



WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

MARCIN LEŚNIEWSKI  
MACIEJ RAFAŁOWSKI  
ANDRZEJ SZWEDOWSKI  
ANDRZEJ WOJTASZEWSKI

# Przyrządy optyczne

## Ćwiczenia laboratoryjne

Praca zbiorowa  
pod redakcją ANDRZEJA SZWEDOWSKIEGO



**WARSZAWA 1976**

## SKRYPTY WPW

wydane

- ADASIEWICZ H., MATLA R. Geometria wykreslna, 1975, ark. wyd. 12, cena zł 15.—
- KANIA J. Wybrane zagadnienia z ergonomii, 1975, ark. wyd. 10, cena zł 13.—
- KOCZYK H. Geometria wykreslna, 1975, ark. wyd. 6, cena zł 8.—
- LIS S. Poradnik projektowania dyplomowego, 1975, ark. wyd. 5, cena zł 7.—
- BAJKOWSKI J. Rysunek techniczny dla studentów SiMR, 1975, ark. wyd. 7, cena zł 9.—
- PRACA ZBIOROWA. Projektowanie instalacji elektroenergetycznych, 1975, ark. wyd. 13, cena zł 16.—
- POZNIAK T. Napędy przemysłowe. Cz. I, 1975, ark. wyd. 5, cena zł 7.—
- RUTKOWSKI J. Podstawy bilansowania masy, pędu, energii i entropii, 1975, ark. wyd. 8, cena zł 11.—
- DYMEK W. Elektryczne urządzenia spawalnicze, 1975, ark. wyd. 16, cena zł 21.—
- BUCZYŃSKI L., TRYLIŃSKI W. Mechaniczne urządzenia informatyki, 1975, ark. wyd. 13, cena zł 16.—
- DAWIDZIUK S. Metodyka pisania pracy magisterskiej, 1975, ark. wyd. 2, cena zł 3.—
- PRACA ZBIOROWA pod red. J. BARANOWSKIEGO. Zbiór zadań z układów elektronicznych impulsowych, 1975, ark. wyd. 17, cena zł 22.—
- WOLSKI L. Balistyka wewnętrzna. Tom. I, 1975, ark. wyd. 10, cena zł 13.—
- SOBOLEWSKI J., GOGOLEWSKI A. Laboratorium sterowania ruchem pociągów, 1975, ark. wyd. 12, cena zł 15.—
- CZERSKI Z. Prefabrykacja w budownictwie, 1976, ark. wyd. 21, cena zł 27.—
- ŁASTOWIECKI J. Laboratorium elementów automatyki, 1976, ark. wyd. 9, cena zł 12.—
- WRONSKI S. i inni. Laboratorium termodynamiki i kinetyki procesów chemicznych, 1976, ark. wyd. 12, cena zł 16.—
- KOŁACIN T. i in. Ćwiczenia laboratoryjne z teorii maszyn, drgań i automatacyjnej regulacji, 1976, ark. wyd. 13, cena zł 17.—
- MIKOŁAJUK K., TRZASKA Z. Elektrotechnika teoretyczna. Teoria obwodów liniowych. Cz. I, 1976, ark. wyd. 22, cena zł 26.—
- OCZYKOWSKI A., TOWPIK K. Drogi żelazne. Wskazówki do ćwiczeń z nawierzchni kolejowej, 1976, ark. wyd. 7, cena zł 9.—
- KRUSZYŃSKI H. i in. Zbiór zadań z teorii układów logicznych, 1976, ark. wyd. 16, cena zł 20.—
- PODOSKI J. Komunikacja miejska, 1976, ark. wyd. 10, cena zł 13.—
- BIELAWSKI J. i inni. Linie produkcyjne elementów prefabrykowanych, 1976, ark. wyd. 13, cena zł 17.—
- GĄSIORKIEWICZ L., NIZIAŁEK D. Środki organizacyjno-techniczne, 1976, ark. wyd. 10, cena zł 14.—
- AMBORSKI K., ZYDANOWICZ W. Laboratorium podstaw automatyki, 1976, ark. wyd. 6, cena zł 8.—
- PRACA ZBIOROWA pod red. A. SZWEDOWSKIEGO, Przyrządy optyczne. Ćwiczenia laboratoryjne, 1976, ark. wyd. 19, cena zł 25.—

w przygotowaniu

- KOŁACZEK B. Astronomia sferyczna z ćwiczeniami, ark. aut. 17
- STĘPOWSKI M. Organizacja stanowisk roboczych, ark. aut. 6
- LIS S. i inni. Organizacja podstawowych procesów produkcyjnych i sterowanie produkcją. Cz. I, ark. aut. 7
- TRZASKA Z. i inni. Ćwiczenia laboratoryjne z obwodów elektrycznych, ark. aut. 12
- UFNAŁSKI W. Materiały do ćwiczeń rachunkowych z chemii fizycznej, ark. aut. 16
- KAŃSKA Z. i inni. Ćwiczenia laboratoryjne z biologii sanitarnej. Cz. II, ark. aut. 10



WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

MARCIN LEŚNIEWSKI  
MACIEJ RAFAŁOWSKI  
ANDRZEJ SZWEDOWSKI  
ANDRZEJ WOJTASZEWSKI

# PRZYRZĄDY OPTYCZNE

## ĆWICZENIA LABORATORYJNE

PRACA ZBIOROWA  
POD REBAKcją ANDRZEJA SZWEDOWSKIEGO



WARSZAWA

1976

Opiniodawca  
prof. Jan Matysiak

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Warszawskiej



Opracowanie redakcyjne – Anna Fijewska

Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej  
Warszawa 1976. Wydanie pierwsze.

Wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Warszawskiej  
Nakł. 400+30. Ark. wyd. 19,44. Ark. druk. 24,25. Papier offset. kl. III 70 g.  
Oddano do druku 30. IX. 1975 r. Zamówienie nr 868.

## SPIS TREŚCI

WSTĘP .....	5
I. WPROWADZENIE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH .....	7
II. ĆWICZENIA MODELOWE .....	29
1. Zestawianie modelowe układu mikroskopu .....	29
2. Zestawianie modelowe układu lunety .....	40
3. Zestawianie modelowe układu projekcyjnego .....	52
4. Zestawianie układu przekaźnika fotoelektrycznego .....	65
5. Zestawianie układu mikroskopu fotoelektrycznego odczytowego .....	73
III. ĆWICZENIA Z POMIARÓW PODSTAWOWYCH WIELKOŚCI OPTY- CZNYCH .....	84
6. Badanie jednorodności szkła optycznego .....	84
7. Pomiar współczynnika załamania .....	105
8. Pomiar ogniskowych i zbiegowych soczewek i u- kładów optycznych .....	122
9. Pomiar promieni krzywizn powierzchni elementów optycznych .....	136
10. Pomiar dużych promieni krzywizn .....	150
11. Pomiar kątów dwuściennych metodami optycznymi ..	164
12. Podstawowe pomiary interferencyjne .....	179
13. Interferometr Twymana .....	193
14. Pomiar w świetle spolaryzowanym .....	207
IV. ĆWICZENIA Z ZAKRESU BADAŃ PRZYRZĄDÓW OPTYCZNYCH ..	220
15. Badanie charakterystycznych wielkości mikroskopu biologicznego .....	220
Mikroskopy i ich wyposażenie dodatkowe .....	236
specjalne wyposażenie mikroskopów .....	255

18. Badanie lornetki pryzmatycznej .....	286
19. Badanie lunety myśliwskiej .....	300
20. Przyrządy geodezyjne .....	306
21. Spektrofotometr .....	318
22. Pomiary optycznej funkcji przenoszenia .....	332
23. Podstawowe procesy holograficzne .....	341
24. Metody i przyrządy do badania wzroku .....	354

## WSTĘP

Celem prac wykonywanych w laboratorium optycznym jest zapoznanie się z działaniem podstawowych przyrządów optycznych, ich modelowym zestawianiem, obsługą i pomiarami ich charakterystyk oraz poznanie niektórych podstawowych zjawisk optycznych z zakresu interferencji i polaryzacji światła i ich zastosowania.

Założeniem przyjętym przy opracowywaniu niniejszego skryptu było przystosowanie stopnia trudności i zakresu wiadomości do wymagań stawianych studentom IV i V roku studiów politechnicznych na specjalności Przyrządy Optyczne i Przyrządy Pomiarowe Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej.

- Tematyka prac laboratoryjnych obejmuje trzy główne działy:
- modelowe zestawianie podstawowych układów optycznych (mikroskop, kolimator, luneta, układ projekcyjny) według przeprowadzonych obliczeń, zapoznanie się z zasadą tworzenia obrazów przez układy optyczne (rzeczywistych, urojonych),
  - poznanie zjawisk interferencji i polaryzacji, typowych metod pomiaru podstawowych wielkości optycznych oraz pomocniczych przyrządów pomiarowych,
  - badania techniczne i obsługa instrumentów optycznych, przeprowadzanie typowych pomiarów przy wykorzystaniu wizualnych i fotoelektrycznych układów odbiorczych.





# I. WPROWADZENIE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH

## 1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE Z OPTYKI GEOMETRYCZNEJ

Przedstawione niżej reguły, definicje wielkości i zależności między nimi należy traktować jako niezbędne przypomnienie, pozwalające na wykonywanie prostych obliczeń, natomiast nie wystarczające dla zrozumienia i przyswojenia podstawowych informacji z zakresu optyki geometrycznej i instrumentalnej. Temu przeznaczeniu służą dwie podstawowe książki: T. Wagnerowskiego Optyka praktyczna, (PWT 1959) oraz R. Józwickiego Optyka instrumentalna (WNT 1970).

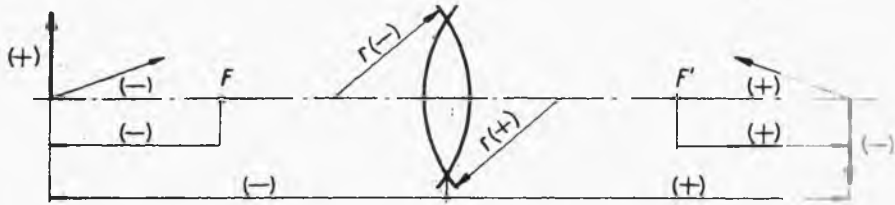


### 1. Reguła znaków stosowana w obliczeniach układów optycznych

W obliczeniach optycznych ze względu na konieczność jednoznacznego określenia położenia przedmiotów i obrazów względem elementów optycznych przyjęto następujące reguły dotyczące znaku wielkości skierowanych:

- a) kierunek biegu promieni świetlnych przedstawiony schematycznie na rysunkach przyjęto z lewej strony ku prawej,
- b) odcinki skierowane zgodnie z kierunkiem biegu światła uważa się za dodatnie,
- c) w płaszczyźnie południkowej układu optycznego odcinki nad osią mają wartość dodatnią,
- d) kąt ostry między prostą a osią optyczną uważa się za dodatni, jeżeli dla pokrycia osi z prostą należy obrócić oś zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Przykładowe oznaczenia podaje rys.I.1.



Rys.I.1. Stosowanie reguły znaków na rysunkach układów optycznych

### 1.2. Oznaczenia podstawowych wielkości optycznych

Symbole wielkości sprzężonych w przestrzeni obrazowej opatrzone są znakiem ' (prim).

Punkty oznacza się literami łacińskimi dużymi.

Odcinki oznacza się literami łacińskimi małymi.

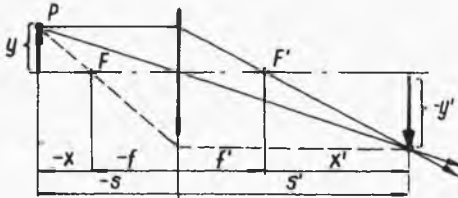
Symbole niektórych wielkości:

- $F, F'$  - ognisko przedmiotowe, obrazowe,
- $f, f'$  - ogniskowa przedmiotowa, obrazowa,
- $s_F, s'_F$  - ogniskowa czołowa przedmiotowa, obrazowa,
- $x$  - odległość od ogniska przedmiotowego do przedmiotu,
- $x'$  - odległość od ogniska obrazowego do obrazu,
- $s_H, s'_H$  - odległość od powierzchni układu do płaszczyzny głównej przedmiotowej, obrazowej,
- $s, s'$  - odległość od płaszczyzny głównej przedmiotowej (obrazowej) do przedmiotu (obrazu),
- $y, y'$  - wymiar liniowy przedmiotu, obrazu,
- $D$  - moc układu optycznego,
- $w$  - kąt polowy,
- $u$  - kąt aperturowy,
- $\alpha$  - powiększenie podłużne,
- $\beta$  - powiększenie poprzeczne,
- $\gamma$  - powiększenie kątowe,
- $G$  - powiększenie wizualne.

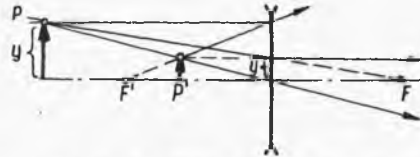
### 1.3. Podstawowe zależności geometryczne

Oznaczenia odległości podane są na typowych przykładach graficznych metod znajdowania położenia obrazów punktu

rzonych przez uproszczoną soczewkę cienką dodatnią (rys.I.2) i ujemną (rys.I.3). Dla tych przypadków grubość soczewki nie została w konstrukcji graficznej uwzględniona, podobnie jak to się czyni przy uproszczonych obliczeniach gabarytowych.



Rys.I.2. Soczewka dodatnia



Rys.I.3. Soczewka ujemna

Odległość przedmiotu  $s$  od obrazu  $s'$  od soczewki lub układu o ogniskowej  $f'$  można obliczyć:

- ze wzoru Descartesa

$$D = \frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s};$$

- ze wzoru Newtona

$$x x' = -f'^2,$$

gdzie:  $x = s - f$  oraz  $x' = s' - f'$

lub

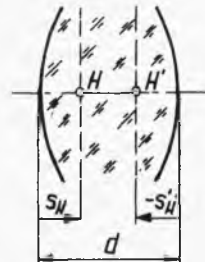
$$s = f' \frac{1 - \beta}{\beta}, \quad s' = f' (1 - \beta).$$

Powiększenie poprzeczne obrazu  $y'$  w stosunku do przedmiotu  $y$  określają zależności geometryczne

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = -\frac{x'}{f'} = \frac{f'}{x}.$$

Odległości od powierzchni soczewki do płaszczyzn głównych przedstawia rys.I.4.

$$s_H = -\frac{d(n-1)}{n r_2} f', \quad s_{H'} = -\frac{d(n-1)}{n r_1} f'.$$



Moc soczewki  $D$  zależna jest od wartości promienia krzywizny  $r_1$  i  $r_2$ , współczynnika załamania materiału  $n$  soczewki

Rys.I.4. Położenie płaszczyzn głównych w soczewce dodatniej

oraz jej grubości  $d$  mierzonej po osi

$$D = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n - 1)^2}{n r_1 r_2} .$$

Przy założeniu w obliczeniach uproszczonych  $d = 0$

$$D = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) .$$

Moc układu złożonego z dwóch elementów optycznych znajdujących się w odległości  $e$  może być obliczona ze wzoru

$$D = D_1 + D_2 - e D_1 D_2$$

Do soczewek o niepomijalnej grubości  $e$  jest odległością między płaszczyzną główną obrazową pierwszego i płaszczyzną główną przedmiotową drugiego elementu

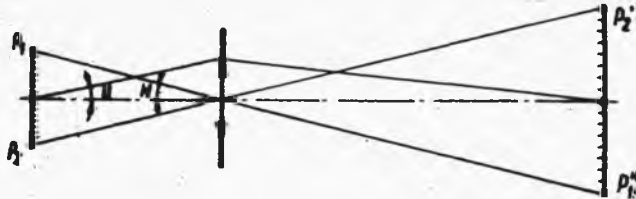
$$e = d - s'_{H_1} + s_{H_2} .$$

#### 1.4. Podstawowe określenia wielkości optyki instrumentalnej

Powiększenie kątowe  $\gamma$  - stosunek tangensów kątów jakie tworzą z osią układu: promień polowy wychodzący z układu optycznego i odpowiadający mu promień padający na układ.

Powiększenie wizualne  $G$  - stosunek kątów, pod którymi widać przedmiot przez przyrząd optyczny i okiem nieuzbrojonym.

Linijowe pola widzenia - największy wymiar odwzorowanej przez układ optyczny części płaszczyzny przedmiotu leżącego w skończonej odległości (rys.I.5, odcinek  $P_1 P_2$ ).



Rys.I.5. Promień aperturowy i promienie polowe

Kątowe pole widzenia - największy kąt, pod którym odwzorowaną część płaszczyzny przedmiotu widać ze środka źrenicy wejściowej przyrządu (na rys.I.5, kąt  $2w$ ).

Kąt aperturowy  $u$  - kąt zawarty między osią układu a promieniem wychodzącym z osiowego punktu przedmiotu przez skraj źrenicy wejściowej (rys.I.5).

Apertura numeryczna  $A$  - iloczyn sinusa kąta aperturowego i współczynnika załamania ośrodka znajdującego się między przedmiotem a układem optycznym

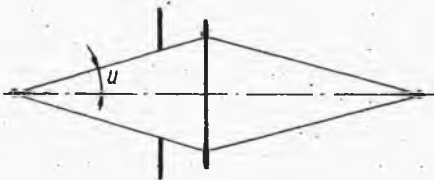
$$A = n \sin u.$$

Otwór względny - stosunek średnicy źrenicy wejściowej układu do jego ogniskowej.

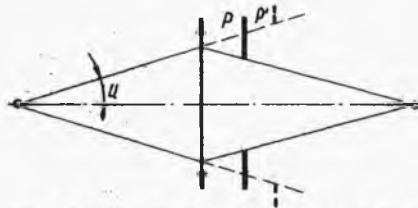
Przysłona pola - materialna przysłona zazwyczaj ustawiona w przyrządach optycznych w płaszczyźnie, w której tworzy się rzeczywisty obraz przedmiotu.

Zdolność rozdzielcza liniowa (kątowna) - najmniejsza odległość liniowa (kątowna) między dwoma punktami przedmiotu odwzorowanymi przez przyrząd optyczny jako dwa osobne punkty.

Źrenica wejściowa i wyjściowa. Elementy optyczne np. soczewki mają określone wymiary, w rezultacie czego ze źródła światła (przedmiotu) przez układ optyczny może być przeniesiona tylko część emitowanej energii. Jest ona ograniczona bądź oprawami tych elementów optycznych, bądź przysłonami znajdującymi się przed układem lub w układzie optycznym. Pojęcie źrenicy wejściowej wprowadzono w celu określenia przysłony lub obrazu przysłony, który w przestrzeni przedmiotowej ogranicza geometryczne wymiary wiązki promieni wpadających do układu. Bardzo często jest to wprost oprawa obiektywu (lunety, lornetki - rys.I.5); na rys.I.6 źrenicą jest przysłona ustawiona przed soczewką; na rys.I.7 źrenicą jest obraz  $P'$ , znajdującej się za soczewką przysłony  $P$  odniesiony do przestrzeni, w której znajduje się przedmiot.



Rys.I.6. Przysłona aperturowa w przestrzeni przedmiotowej

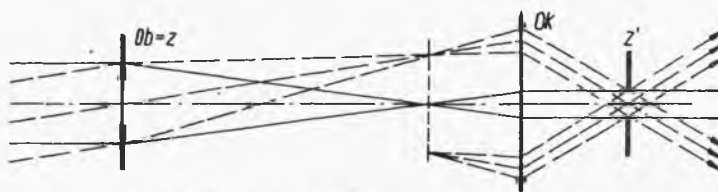


Rys.I.7. Przysłona aperturowa w przestrzeni obrazowej

Jeżeli w osiowym punkcie przedmiotu ustawilibyśmy obserwatora spoglądającego w układ, będzie on widział źrenicę wejściową jako przysłonę (materialną jak na rys.I.5 i I.6 lub niematerialną jak na rys.I.7), ograniczającą wymiary wiązki wpadającej do układu. Skrajne promienie tej wiązki będą tworzyły z osią kąt aperturowy).

Źrenica wyjściowa jest pojęciem analogicznym dla przestrzeni obrazowej. Jest ona obrazem źrenicy wejściowej danym przez układ optyczny. W instrumentach optycznych przeznaczonych do obserwacji, położenie i średnica źrenicy wyjściowej mają znaczenie ze względu na prawidłowość ustawienia oka obserwatora względem przyrządu.

Na rys.I.8 przedstawiony jest przykładowy schemat lunety, gdzie źrenicę wejściową stanowi obiektyw  $Ob$  ustalający średnicę przekroju wiązki wpadającej do układu. Obraz tego obiek-



Rys.I.8. Bieg promieni w lunecie

tywu dany przez okular w płaszczyźnie  $Z'$ , utworzony przez wszystkie pęki promieni jest jednocześnie najmniejszym przekrojem wiązki promieni wychodzących z układu. Jest to właśnie źrenica wyjściowa.

## 2. CHARAKTERYSTYKA I METODA OBLICZEŃ BŁĘDÓW TYPOWYCH POMIARÓW OPTYCZNYCH

### 2.1. Wiadomości ogólne

Wyniki pomiarów i ich analiza nie zawierająca wraz z wynikami oceny ich dokładności nie przedstawiają większej wartości. Na ten fakt należy zwrócić szczególną uwagę przy wykonywaniu pomiarów i ich opracowywaniu. Dokonanie pomiaru to nie tylko

sprawne jego przeprowadzenie, ale także, a może przede wszystkim krytyczna ocena wyników. Podstawową częścią opracowania wyników doświadczenia jest rachunek błędu. Sposób prowadzenia rachunku zależy od specyfiki pracy przy postawionym zadaniu i dlatego nie można podać w tak krótkim opracowaniu ogólnie obowiązujących zasad postępowania. Schematycznie postępowanie może doprowadzić do błędnej oceny dokładności wyników, dlatego już przed przystąpieniem do rachunku, a także pomiarów, należy rozważyć, która z metod oceny błędu najlepiej odpowiada: użytej aparaturze, metodzie pomiaru, specyfice pracy, a także na pomiary jakich wielkości należy zwrócić szczególną uwagę.

## 2.2. Specyfika pracy i metody rachunku błędu

Wskazówkami przy wyborze metody rachunku są przede wszystkim:

- liczba pomiarów,
- stosunek wartości błędów systematycznych do błędów przypadkowych.

Duża liczba pomiarów kwalifikuje ocenę ich dokładności metodą błędu granicznego zazwyczaj w tym przypadku jeżeli błędy systematyczne są pomijalne w porównaniu z przypadkowymi. Zastrzeżenie to wydaje się słuszne mimo faktu, że niekiedy błędy systematyczne można łatwo obliczyć, a po ich odjęciu otrzymać wyniki pomiarów obarczone tylko błędami przypadkowymi.

W pomiarach optycznych błędów systematycznych nie da się na ogół pominąć. Wynika to zwykle z przyjmowania zależności optyki idealnej (bezaberracyjnej) przy pomiarach parametrów rzeczywistych układów (zwłaszcza elementów optycznych) przy założeniach, że soczewki są np. cienkie, wiązka promieni jest równoległa, obie płaszczyzny główne soczewek pokrywają się z płaszczyzną symetrii elementu, itp. Obliczenie błędu systematycznego w tym przypadku w praktyce jest bardzo uciążliwe, a co ważniejsze - w wielu przypadkach niecelowe. Wynika to ze specyfiki pracy układów optycznych, np. w pomiarze ogniskowej układu optycznego prawie zawsze dotychczas pomija się wpływ aberracji sferycznej, co jest o tyle słuszne, że w praktyce z ogniskową układu doskonałego tzw. ogniskową aplanatyczną prawie nigdy nie ma się do czynienia. Jednakże tradycyjnie ognis-

kową uważa się za podstawowy parametr układu optycznego, który należy zmierzyć. Znak błędu systematycznego, w tym przypadku jest na ogół znany, lecz obliczenie jego wartości jest bardzo uciążliwe. Podobnych przypadków można przytoczyć wiele. Jeżeli liczba pomiarów jest mała obliczenie błędu przeprowadza się metodą błędu maksymalnego (skrajnego).

Błąd graniczny w przypadku pomiaru bezpośredniego wyraża się zależnością

$$s_{\max} = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum (A_i - \bar{A})^2}{n - 1}},$$

gdzie:  $\bar{A}$  - średnia arytmetyczna serii odczytów,  $A_i$  - poszczególne odczyty.

W przypadku odniesienia go do średniej arytmetycznej serii pomiarów

$$s_{\max} = \pm 3 \sqrt{\frac{(A_i - \bar{A})^2}{n(n - 1)}}.$$

Błąd graniczny w przypadku pomiaru złożonego  $x = f(x_1, x_2 \dots x_n)$  wyraża się zależnością

$$s_{\max} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F^2}{\partial x_1}\right) s_{\max x_1}^2 + \left(\frac{\partial F^2}{\partial x_2}\right) s_{\max x_2}^2 + \dots},$$

gdzie  $s_{\max x_i}$  - błędy graniczne poszczególnych czynników  $x_i$ .

Maksymalny błąd w przypadku pomiaru bezpośredniego szacuje się wg: staranności przeprowadzonych pomiarów, czułości przyrządu itp. Błąd maksymalny w przypadku pomiaru złożonego  $x = f(x_1, x_2 \dots x_n)$  przedstawia się zależnością

$$\Delta \bar{x} = \pm \left[ \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right| s_{\max x_1} + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right| s_{\max x_2} + \dots \right],$$

gdzie:  $s_{\max x_i}$  - są błędami granicznymi poszczególnych pomiarów.

Jeżeli funkcja  $x$  jest iloczynem  $x = \prod A_n x_n^{a_n}$ , to błąd maksymalny wygodniej przedstawić w postaci błędu względnego



$$\frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} = \pm \left[ \left| a_1 \frac{\Delta \bar{x}_1}{\bar{x}_1} \right| + \left| a_2 \frac{\Delta \bar{x}_2}{\bar{x}_2} \right| + \dots \right].$$

W niniejszym opracowaniu pominięto sprawę rachunku błędów w przypadku serii pomiarowych o różnej dokładności.

Na przykład: należy wyznaczyć ogniskową  $f_u$  soczewki ujemnej. W tym celu tworzy się układ optyczny łącząc soczewkę ujemną z soczewką dodatnią o znanej ogniskowej  $f_d$  tak, że  $f_d < |f_u|$ , a następnie wyznacza się ogniskową  $f$  całego układu w następujący sposób.

Przy stałej odległości  $a_1$  przedmiotu od obrazu mierzy się  $a_2$  - różnicę odległości układu soczewek od obrazu w dwóch położeniach (przy czym w położeniu pierwszym otrzymuje się obraz powiększony, a w drugim - pomniejszony).

Ogniskową układu oblicza się ze wzoru

$$f = \frac{1}{4} \left[ a_1 - \frac{a_2^2}{a_1} \right].$$

Wyznaczyć ogniskową soczewki ujemnej  $f_u$  mając dane:

$$f_d = (115 \pm 1) \text{ mm},$$

$$a_1 = (1000 \pm 2) \text{ mm},$$

$$a_2 = (400 \pm 3) \text{ mm}.$$

### Rozwiązanie

1. Obliczyć nominalną wartość ogniskowej układu

$$f = \frac{1}{4} \left( 1000 - \frac{160000}{1000} \right) = 210 \text{ mm}.$$

2. Obliczenia błędu pomiaru przeprowadzić należy metodą błędu maksymalnego (skrajnego) ponieważ użyte w doświadczeniu soczewki i wiązki światła spełniają tylko w przybliżeniu przyjęte założenie optyki doskonałej (bezaberracyjnej): położenie obu płaszczyzn głównych pokrywa się z płaszczyzną symetrii soczewki oraz wiązka promieni jest równoległa. Bezwzględny błąd maksymalny  $\Delta f$  wyniesie

$$\Delta f = \pm \left[ \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{a_2^2}{a_1^2} \right) \left| \Delta a_1 \right| + \left| \frac{1}{2} \frac{a_2}{a_1} \right| \left| \Delta a_2 \right| \right] = \pm 2 \text{ mm.}$$

3. Ogniskową soczewki ujemnej oblicza się ze wzoru

$$\frac{1}{f_u} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f_d},$$

czyli

$$f_u = \frac{f f_d}{f_d - f} = \frac{210 \cdot 115}{115 - 210} = -254 \text{ mm.}$$

4. Błąd wyznaczenia  $f_u$  wynosi

$$\frac{\Delta f_u}{f_u^2} = \pm \left[ \left| -\frac{\Delta f}{f^2} \right| + \left| -\frac{\Delta f_d}{f_d^2} \right| \right],$$

stąd

$$\Delta f_u = \pm f_u^2 \left( \frac{\Delta f}{f^2} + \frac{\Delta f_d}{f_d^2} \right) = \pm (3,08 - 4,9) = 7,98 \approx \pm 8 \text{ mm.}$$

5. Wynik pomiaru ogniskowej soczewki ujemnej

$$f_u = -(254 \pm 8) \text{ mm.}$$

Błąd względny

$$\frac{\Delta f_u}{f_u} = 3\%.$$

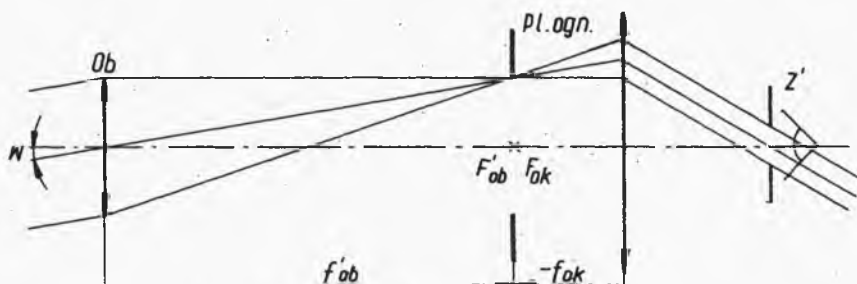
### 3. OPIS POMOCNICZYCH PRZYRZĄDÓW OPTYCZNYCH

Poniżej omówiono podstawowe pomocnicze przyrządy optyczne przeznaczone do justowania (tj. regulacji) i badania właściwości układów optycznych tak w warunkach laboratoryjnych jak i w praktyce warsztatowej. Wykorzystuje się je jako układy celownicze, kontrolne lub pomiarowe, względnie jako układy optyczne pozorujące określone położenie przedmiotu. Za ich pomocą można zestawiać układy optyczne, kontrolować ich charakterystyki i mierzyć wielkości optyczne podstawowe dla danych układów. Można również zestawiać całe układy kontrolne i pomiarowe.

### 3.1. Lunetka pomocnicza

Lunetkę pomocniczą stosuje się w celu zwiększenia powiększenia układu obserwacyjnego. Jest to lunetka typu Keplera z umieszczoną w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu płytką ogniskową z krzyżem lub podziałką. Stosuje się ją przy badaniu i kontroli bezogniskowych przyrządów optycznych, a przy zajęciach w laboratorium optycznym - przy zestawieniu układów. Stanowi ona często część składową wielu przyrządów mierniczych.

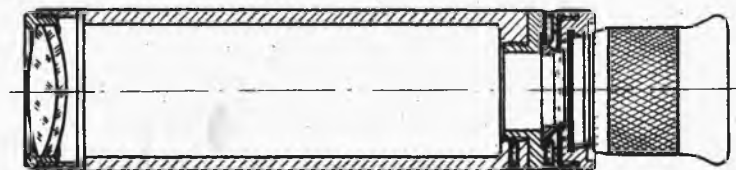
Lunetka (rys.I.9) składa się z obiektywu i okularu z płytką ogniskową. Prosta łącząca środek obiektywu ze środkiem rysunku płytki ogniskowej (np. środkiem krzyża) nazywa się osią celową lunety. Oprawa obiektywu stanowi najczęściej źrenicę



Rys.I.9. Schemat lunety

wejściową (przysłone aperturową) lunety, a jej obraz utworzony przez okular stanowi źrenicę wyjściową lunety. Oprawa płytki ogniskowej określa wielkość kąta pola widzenia lunety  $w$ . Powiększenie spotykanych lunetek pomocniczych  $4 \div 6^x$ . Pole widzenia wynosi ok.  $8^\circ$ . Okular lunetki ma przesuw dioptryjny (aby skompensować wady wzroku obserwatora) w zakresie  $\pm 5$  dioptrii.

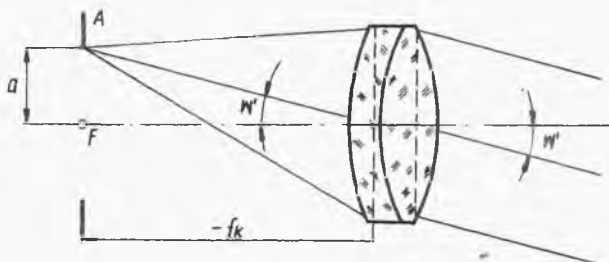
Najprostsza lunetka pomocnicza przedstawiona jest na rys. I.10.



Rys.I.10. Lunetka pomocnicza

### 3.2. Kolimator

Kolimatory są układami optycznymi tworzącymi obrazy punktów lub testów w bardzo dużej odległości (w praktyce często mówi się, że "w nieskończoności"). Składają się z obiektywu i płytki ogniskowej z naniesioną odpowiednią siatką lub znacznikiem pomiarowym, przy czym płytka ogniskowa jest umieszczona w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej obiektywu. Wymiary płytki ogniskowej określają kąt pola widzenia kolimatora (rys. I.11).



Rys.I.11. Obiektyw kolimatora

Na płytce ogniskowej znajduje się punkt  $A$  w odległości  $a$  od osi optycznej. Obraz odcinka  $FA$  znajduje się w nieskończoności i jego kątowy wymiar wynosi (dla niewielkich kątów)

$$\operatorname{tg} w' = \frac{a}{f'_k},$$

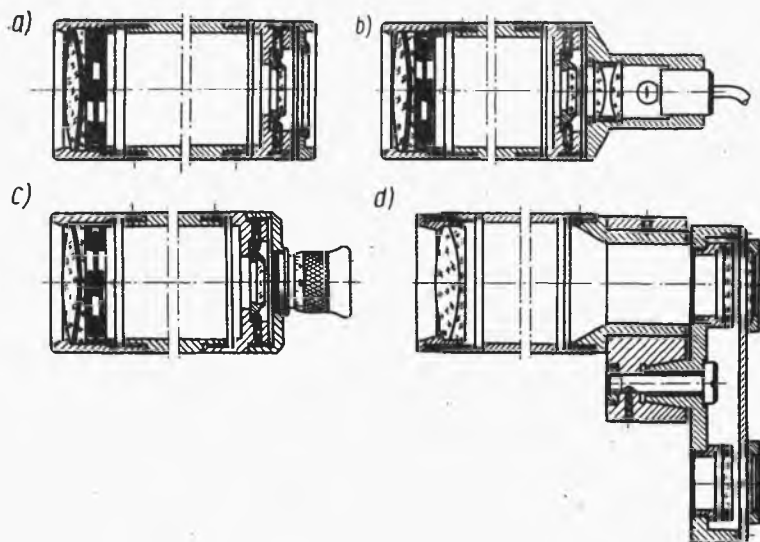
gdzie  $f'_k = -f_k$  - ogniskowa obiektywu kolimatora.

Odległość  $a$  (wymiar płytki) przy zadanym kącie pola widzenia  $w$  obliczamy z tego samego wzoru.

Jeśli kolimator ma służyć dla kilku różnych pomiarów, to można zastosować kilka wymiennych płytek ogniskowych różniących się rysunkami, np. umieszczonych w uchwycie rewolwerowym.

Obiektywy kolimatora powinny cechować dobra korekcja i zdolność rozdzielcza (bliska teoretycznej). Ogólną zasadą wyboru obiektywu kolimatora jest to, aby jego ogniskowa była dłuższa od ogniskowej badanego układu (instrumentu) optycznego. Im dłuższa ogniskowa tym lepiej kolimator "odwzorowuje przedmiot w nieskończoności". Oświetlenie płytki ogniskowej realizuje się albo w postaci najprostszej jako matówka i źródło światła, albo jako złożony układ z kondensorem (rys. I.12). W tym drugim wy-

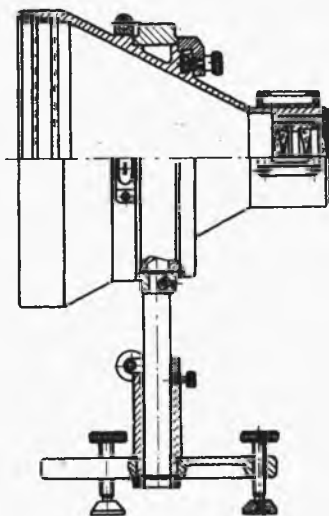
padku w celu uzyskania najlepszych warunków oświetleniowych, obraz żarówki powinien być projektowany przez kondensor w płaszczyznę obiektywu, przy czym obraz żarnika powinien całkowicie i równomiernie wypełniać powierzchnię czynną obiektywu.



Rys.I.12. Kolimatory

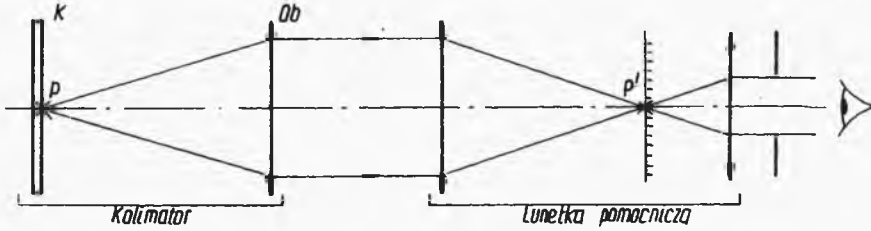
Specjalny rodzaj kolimatorów stanowią kolimatory szerokokątne (rys. I.13) o dużym polu  $2w = 20^\circ \div 45^\circ$ . Na ich płycie ogniskowej umieszczona jest zazwyczaj podziałka kątowna. Kolimatorów tych używa się do pomiarów kątów pola widzenia lunet, sprawdzania mechanizmów kątomierczych, przyrządów celowniczych itp. Na rysunkach przedstawiono kilka typów kolimatorów oraz kolimator szerokokątny.

Kontrola prawidłowości zestawienia kolimatora oraz regulacji (tak, aby dawał on obraz "w nieskończoności") może być dokonywana kilkoma metodami. Tutaj omówiona zostanie tylko

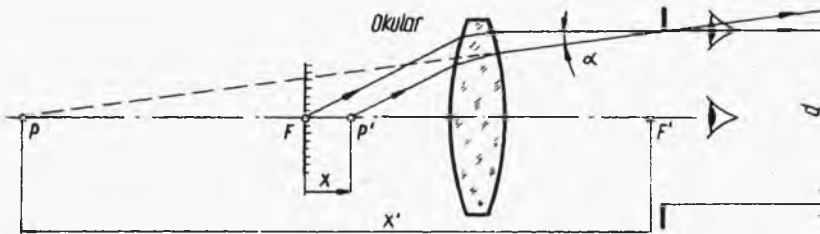


Rys.I.13. Kolimator szerokokątny

jedna - stosowana przy zestawieniu kolimatora na ławie optycznej w czasie ćwiczeń w laboratorium. Wykorzystuje się w niej omówioną w p.3.1 lunetkę pomocniczą, która konstrukcyjnie ustawiona jest "na nieskończoność". Ustawiając ją za obiektywem kolimatora możemy przez nią obserwować obraz krzyża (lub testu) płytki ogniskowej dany przez kolimator (rys.I.14). Na rysunku



Rys.I.14. Kolimator i lunetka pomocnicza



Rys.I.15. Zależność kąta paralaktycznego od ogniskowej i źrenicy wyjściowej okularu

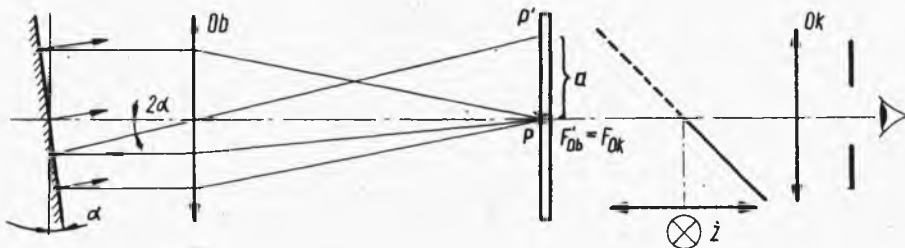
I.15 widać schemat okularu lunetki pomocniczej ze źrenicą wyjściową o średnicy  $d$ . Jeśli wskutek niewłaściwego zestawienia kolimatora (tj. niewłaściwej odległości między płytką ogniskową a obiektywem) obraz środka krzyża płytki ogniskowej  $P$  kolimatora, tworzony przez jego obiektyw nie leży "w nieskończoności", to jego obraz  $P'$  dany przez obiektyw lunetki nie leży na jej płycie ogniskowej (czyli w ognisku przedmiotowym okularu), lecz w odległości  $x$  od niej. Z kolei jego obraz  $P''$  dany przez okular lunety tworzy się w odległości  $x'$  od ogniska obrazowego  $F'$  okularu, podczas gdy obraz krzyża płytki ogniskowej lunety widziany przez okular utworzy się w nieskończoności. Przy przesuwaniu oka w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej poprzecznie do osi zauważymy przesuwanie się obrazu punktu  $P''$  i obrazu środka krzyża (płytki ogniskowej lunety) względem sie-

bie. Jest to paralaksa. Patrząc przez lunetkę (rys.I.14) można przesuwając poosiowo płytkę ogniskową kolimatora i jego obiektyw względem siebie tak długo, aż przy przemieszczaniu oka w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej lunetki nie będzie można zauważyć paralaksy. Przyjmuje się, że kolimator jest wtedy zestawiony prawidłowo.

Dokładność odczytu można zwiększyć obserwując obraz (dany przez badany układ w jego płaszczyźnie ogniskowej obrazowej) za pomocą mikroskopu obserwacyjnego oraz wykorzystując zjawisko paralaksy. Jeśli mikroskop celowniczy nie jest ustawiony dokładnie tak, że jego płaszczyzna przedmiotowa pokrywa się z płaszczyzną obrazu danego przez układ optyczny badany, to obraz w mikroskopie nie będzie leżał w płaszczyźnie krzyża celowniczego mikroskopu obserwacyjnego. Niezgodność płaszczyzn krzyża celowniczego i obrazu testu kolimatora wykrywa się przesuwając oko od jednego do drugiego brzegu źrenicy wyjściowej mikroskopu. Jeśli obraz testu kolimatora i krzyż celowniczy nie leżą w tej samej płaszczyźnie, to przy przesuwaniu oka oka w źrenicy wyjściowej mikroskopu zauważa się wzajemny ruch krzyża i obrazu testu względem siebie.

### 3.3. Lunetka autokolimacyjna

Płytkę ogniskowa z naciętym krzyżem znajduje się w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu lunety. Między płytką ogniskową a okularum znajduje się cienka płytkę światłodzielną, ustawioną pod kątem  $45^\circ$  do osi lunety (rys.I.16). Odbija ona część światła żarówki Z w kierunku płytki ogniskowej. W ten sposób obiektyw lunety wraz z płytką ogniskową stanowią kolimator. Jeżeli



Rys.I.16. Schemat lunety autokolimacyjnej

przed obiektywem lunety zostanie ustawione płaskie zwierciadło prostopadłe do osi lunety, to równoległy do osi pęk promieni

powróci do lunety tą samą drogą i utworzy autokolimacyjny obraz w płaszczyźnie krzyża P. Autokolimacyjny obraz krzyża P' i krzyż na płytce w tym przypadku pokrywają się. Jeśli zwierciadko pochyli się pod małym kątem  $\alpha$ , to pęk osiowy odbitych promieni odchyli się od kierunku promieni padających o kąt  $2\alpha$ , czyli autokolimacyjny obraz środka krzyża znajdzie się w odległości a od środka.

$$a \approx 2\alpha f'_{ob}.$$

Ze względu na bardzo częsty przypadek współpracy lunet autokolimacyjnych ze zwierciadłem, podziałka na płytce ogniskowej lunety jest z reguły opisana od razu w wartościach kąta pochylenia lustra.

Lunetę autokolimacyjną można stosować do badania dokładności urządzeń, które realizują przesunięcia z założenia prostoliniowe np.: łoża tokarek, suporty, prowadnice.

Ponieważ z obiektywu lunety autokolimacyjnej wychodzi pęk promieni równoległych, więc odległość zwierciadła od lunety nie ma wpływu na położenie autokolimacyjnego obrazu środka krzyża w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu.

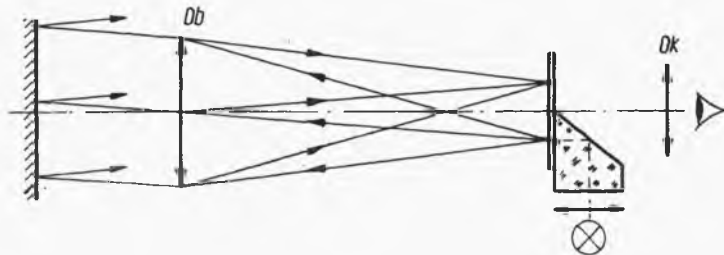
Przy realizacji lunety autokolimacyjnej istotne jest dokładne ustawienie płytki ogniskowej w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu. Niedokładność ustawienia tej płytki powoduje to, że obraz autokolimacyjny nie pokrywa się z krzyżem na osi, czemu towarzyszy występujące zjawisko paralaksy, którą można usunąć, przesuwając płytkę ogniskową wraz z okularem wzdłuż osi optycznej względem obiektywu i obserwując paralaksę między obrazem krzyża płytki ogniskowej i obrazem autokolimacyjnym. Ustawienie "na paralaksę" daje możliwość dokładnego wyregulowania lunety autokolimacyjnej.

Konstrukcja lunety powinna zapewnić dostateczną zdolność rozdzielczą układu. Jasność lunety i zdolność rozdzielcza zależy również od prawidłowego oświetlenia, dlatego też stosuje się układy oświetlające z kondensorem, odwzorowującym obraz źródła światła w płaszczyźnie źrenicy wejściowej obiektywu tak, aby wypełnił on całą powierzchnię źrenicy. Typ lunety przedstawionej na rys. I.16 jest spotykany bardzo rzadko.

Jeśli obraz autokolimacyjny ma mieć inny kształt niż obraz na płytce ogniskowej należy stosować lunetę o innej konstrukcji



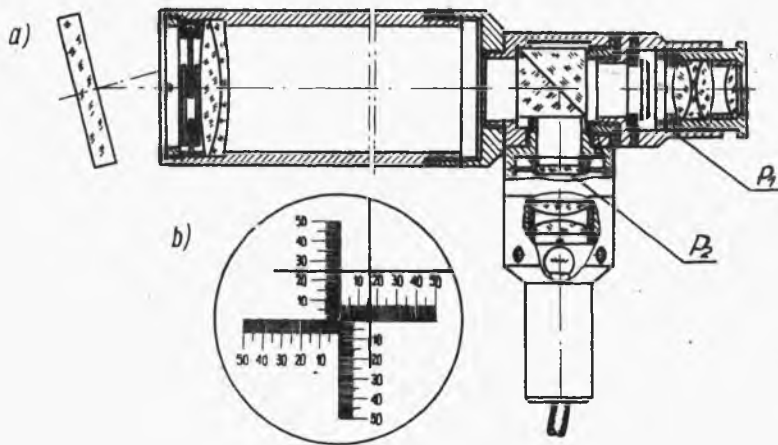
np. z podświetleniem tylko części płytki ogniskowej za pomocą pryzmatu i wykorzystaniem do obserwacji tylko drugiej połowy płytki (rys.I.17). Wadą takiego rozwiązania jest nieosiowe



Rys.I.17. Schemat lunety autokolimacyjnej

położenie obrazów, co zmniejsza dokładność odwzorowania i utrudnia pomiary przy zwiększaniu odległości lustra od obiektywu. Pole widzenia okularu jest wykorzystane tylko w połowie.

Wad tych nie ma rozwiązanie z dwiema płytkami ogniskowymi - jedną do obserwacji i pomiarów, a drugą do utworzenia obrazu autokolimacyjnego (rys.I.18). Rolę płytki światłodzieliącej



Rys.I.18. Luneta autokolimacyjna z dwiema płytkami ogniskowymi

spełnia kostka szklana złożona z dwóch pryzmatów sklejoných powierzchniami przeciwprostokątnymi. Jedna z tych powierzchni pokryta jest warstwą aluminium lub srebra, o przepuszczalności około 50%. Obraz płytki  $P_2$  jest odwzorowany w płaszczyźnie

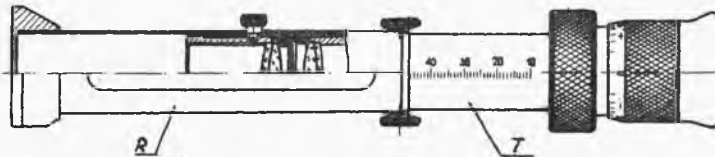
$P_1$  po przejściu promieni przez obiektyw i odbiciu od zwierciadła.

W zależności od przeznaczenia w lunetach można stosować płytki ogniskowe  $P_1$  i  $P_2$  z różnymi rysunkami, można też wprowadzić ruch pomiarowy płytek poprzeczny do osi optycznej.

Lunety autokolimacyjne można wykonywać jako układy centrowane (z regulacją płytek ogniskowych) o osi równoległej lub prostopadłej do wybranych, dokładnie obrobionych powierzchni bazowych.

### 3.4. Mikroskop pomocniczy z podziałką (dynametr)

Mikroskopu pomocniczego z podziałką używa się m.in. przy pomiarze średnic źrenic wyjściowych przyrządów optycznych, odległości źrenic od ostatniej powierzchni układu oraz pośrednio przy pomiarze powiększenia lunet. Obecnie używa się na ogół mikroskopu pomocniczego o konstrukcji pokazanej na rys.I.19.



Rys.I.19. Mikroskop pomocniczy z podziałką

Obiektyw mikroskopu jest oprawiony w tubus T, na którym nacięta jest podziałka milimetrowa. Tubus T można przesuwając w tulei R, której krawędź stanowi wskaźnik podziałki tubusa. Na płytce ogniskowej nacięta jest podziałka milimetrowa. Ponieważ powiększenie obiektywu (który jest symetryczny) jest w tym przypadku  $-1^x$ , więc za pomocą tej podziałki możemy mierzyć przedmiot obserwowany przez mikroskop. Podziałka jest oglądana przez okular o powiększeniu  $G = 12,5^x$ . W celu usunięcia wpływu niedokładności ogniskowania mikroskopu na pomiar, w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu ustawiona jest przysłona (aperturowa), co zapewnia telecentryczny bieg promieni w przestrzeni przedmiotowej. Jeśli więc mierzony przedmiot nie znajduje się dokładnie w płaszczyźnie przedmiotowej mikroskopu, to nie wprowadzi to błędu pomiaru jego wielkości (patrz T.Hanc Pomiary optyczne, wyd.II, § 86).

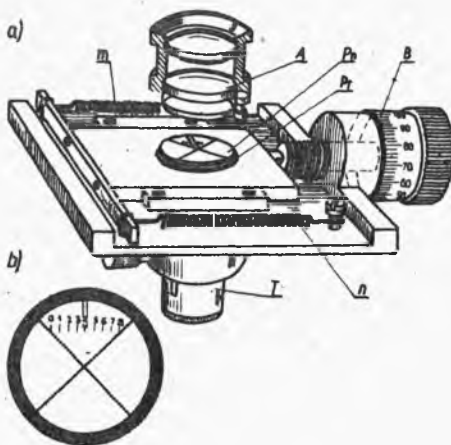
Za pomocą podziałki na płytce ogniskowej możemy pomierzyć średnicę źrenicy wyjściowej badanego przyrządu optycznego, zaś przesuając mikroskop w rurce R i ustawiając go tak, aby był widoczny ostry obraz ostatniej powierzchni układu optycznego, a następnie ostry obraz źrenicy wyjściowej - możemy z różnicy odczytów na tubusie T określić odległość źrenicy wyjściowej od ostatniej powierzchni układu optycznego.

Dzięki temu, że płaszczyzna przedmiotowa mikroskopu pomocniczego jest oddalona od jego oprawy możemy wykonywać pomiar źrenicy wyjściowej, nawet gdy znajduje się ona wewnątrz układu optycznego.

### 3.5. Okular mikrometryczny

W mikroskopach pomiarowych stosuje się okulary mikrometryczne. Omówiony tutaj zostanie pokrótce jeden z prostszych typów.

Śrubowy okular mikrometryczny stosowany w tych przypadkach, w których konieczne jest wykonanie pomiarów liniowych przedmiotów oglądanych przez mikroskop. W okularach tych stosuje się przesuwanie płytki z krzyżem i bisektorem za pomocą śruby mikrometrycznej (rys. I.20). Obudowa okularu zakończona jest tulejką T, osadzoną w tubusie mikroskopu. Bisektor i krzyż naniesione są na płytce  $P_T$ , której oprawa może być przesuwana w prowadnicach śrubą mikrometryczną, przy czym martwy ruch oprawki usuwają sprężyny m i n. Nad ruchomą płytką w małej odległości umieszczona jest płytka nieruchoma  $P_n$  z podziałką. Do-



Rys. I.20. Okular mikrometryczny

puszczalną odległość między płytkami oblicza się wychodząc z dopuszczalnego błędu paralaksy (obie płytki powinny być zwrócone do siebie powierzchniami, na których naniesione są rysun-

ki). Paralaksa nie powinna być zauważalna przy obserwacji przez okular.

Przesunięcie bisektora jest proporcjonalne do kąta obrotu śruby mikrometrycznej, której bęben jest podzielony na 100 działek. Skok śruby wynosi na ogół 1 mm. Obrót bębna o 1 działkę powoduje przesuw bisektora odpowiadający 0,01 mm w płaszczyźnie ogniskowej okulara, a w przestrzeni przedmiotowej -  $0,01/\beta_{ob}$ , gdzie  $\beta_{ob}$  jest rzeczywistym powiększeniem obiektywu mikroskopu. Wartość działek okulara należy zawsze sprawdzić przez obserwację podziałki wzorcowej umieszczonej przed obiektywem. Główne przyczyny błędów (odniesionych do płaszczyzny płytki ogniskowej okulara) przy pomiarze okulem mikrometrycznym są następujące:

a) niedokładność ustawienia bisektora na kreskę podziałki - nie przekracza, jak sprawdzono w praktyce 10" w przestrzeni obrazowej co odpowiada  $0,8 \mu m$ ,

b) błędy wykonania śruby mikrometrycznej - dochodzące do  $2 \mu m$  na 1 skok śruby,

c) błąd odczytu dziesiętnych części działki na bębnie - ok.  $1 \mu m$ .

Dla obiektywu o  $\beta_{ob} = 10^x$ , niedokładność pomiaru przedmiotu nie przekracza  $0,5 \mu m$  przy pomiarze w zakresie jednego skoku śruby.

#### 4. WSKAZANIA DOTYCZĄCE OBSŁUGI PRZYRZĄDÓW OPTYCZNYCH

##### 4.1. Uzgodnienie przyrządu optycznego z okiem obserwatora

W celu prawidłowego wykorzystania przyrządu optycznego przeznaczonego do obserwacji niezbędne jest odpowiednie uzgodnienie go z okiem obserwatora. Dostrojenie to wymaga m.in. spełnienia dwóch podstawowych warunków:

a) pokrycie źrenicy wyjściowej przyrządu ze źrenicą oka

Różnica w położeniach źrenic (przyrządu i oka) wzdłuż osi optycznej powoduje najczęściej ograniczenie pola widzenia. Poprzeczne przesunięcie źrenicy oka względem źrenicy przyrządu wpływa na zmniejszenie jasności i pogorszenie jakości obrazu.

b) właściwe zogniskowanie przyrządu

Polega ono na takim ustawieniu całego przyrządu (lub tylko okulara), aby obraz dany przez przyrząd był ostro widoczny niezależnie od wad oka (krótkowzroczność lub nadwzroczność). W badaniach przyrządów optycznych jako podstawowe przyjmuje się takie ustawienie przyrządu, przy którym obraz dany przez niego tworzy się w nieskończoności. Mówi się, że przyrząd (okular) ustawiony jest na "zero dioptrii".

#### 4.2. Ruchy zgrubne i dokładne

W przyrządach optycznych bardzo często występuje konieczność znacznego przesunięcia lub obrotu przyrządu, zablokowania ruchu zgrubnego, a następnie dokładnego naprowadzenia go na wybrany fragment przedmiotu. Stąd konieczność stosowania podwójnych układów naprowadzenia: zgrubnego i dokładnego. Mówi się wtedy o ruchach makro i mikro. Ze stosowania blokady ruchów zgrubnych wynika ważny wniosek dotyczący obsługi przyrządów: w przypadku gdy jakiś zespół nie daje się przesunąć lub obrócić nie należy przy użyciu siły dążyć do uruchomienia go, lecz poszukać pokrętki, po obróceniu której zwolniona zostanie blokada.

#### 4.3. Przenoszenie przyrządów optycznych

Przy przenoszeniu przyrządów optycznych należy zwracać uwagę, aby nie chwytać za części ruchome, zespoły, pokrętki itp., gdyż może spowodować to trwałe uszkodzenie przyrządu. Najbezpieczniej jest przenosić przyrządy chwytając za podstawę, stały korpus lub specjalnie do tego przewidziane uchwyty. W trakcie przenoszenia przyrządy nie powinny być opierane o ubranie przenoszącego, poddawane wstrząsom lub zajmować pozycje znacznie odbiegających od położenia podczas pracy.

#### 4.4. Ogólne zasady obsługi przyrządów optycznych

Nie dotykać palcami elementów optycznych
------------------------------------------

Nakaz wypisany w ramach dotyczy przede wszystkim powierzchni polerowanych soczewek i pryzmatów, luster zewnętrznie odbijających i matówek. Szczególnej uwadze poleca się lustra i matówki, gdyż dotknięcie ich powierzchni pozostawia trwałe ślady, których usunięcie wymaga często powtórnej obróbki mechanicznej elementu. Ślady linii papilarnych na powierzchni soczewek i pryzmatów można zmywać spirytusem lub eterem jednakże czynność ta wymaga dużej wprawy i nie zawsze daje zadowalające wyniki. W czasie trwania ćwiczeń laboratoryjnych czyszczenie części optycznych przyrządów może być wykonywane jedynie przez asystenta prowadzącego ćwiczenia.

## II. ĆWICZENIA MODELOWE

### Ćwiczenie 1

#### ZESTAWIANIE MODELOWE UKŁADU MIKROSKOPU

##### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z układem optycznym typu mikroskopowego, z jego wielkościami charakterystycznymi i metodami ich obliczania oraz sposobami pomiaru własności takiego układu. Obejmuje ono również podstawowe zagadnienia justowania układów, zestawionych z pojedynczych elementów optycznych na ławach optycznych.

##### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

###### 2.1. Przeznaczenie i cechy charakterystyczne układu optycznego typu mikroskopowego

Mikroskopem nazywa się przyrząd optyczny, umożliwiający obserwację blisko położonego przedmiotu powiększonego. Inaczej mówiąc, dąży się do zwiększenia kąta widzenia przedmiotów leż.

cych w skończonej odległości, bez przesuwania ich na zbyt bliską odległość do oka ze względu na jego wysiłek akomodacyjny.

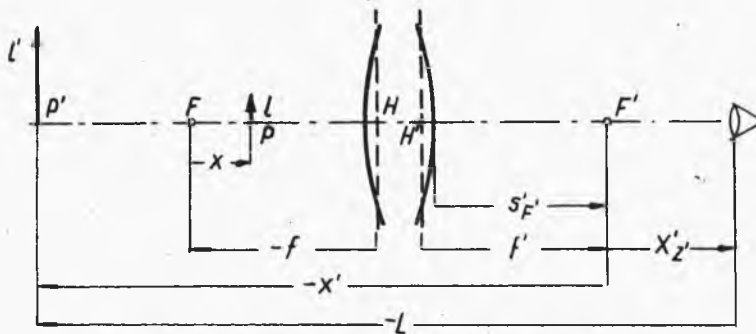
Podstawową wielkością charakterystyczną mikroskopu jest powiększenie wizualne. Powiększenie wizualne jest to - jak wynika z definicji - stosunek kąta  $w'$  pod jakim widać przedmiot przez przyrząd do kąta  $w$ , pod jakim widać ten przedmiot okiem nieuzbrojonym z odległości dobrego widzenia  $D = -250$  mm. Jest to pojęcie związane z przestrzenią przyosiową układu i stąd w definicji przyjmuje się stosunek kątów, a nie ich tangensów

$$G = \frac{df}{f} = \frac{w'}{w} . \quad (1)$$

Najprostszym mikroskopem jest pojedyncza soczewka - lupa. Dla określenia zależności na powiększenie lupy z rys.1.1 wynika

$$G = \frac{l'}{l} = \frac{D}{f'} = \frac{250}{f'} \left( 1 + \frac{x'}{L} \right) , \quad (2)$$

gdzie:  $D$  - odległość z jakiej obserwujemy przedmiot okiem nieuzbrojonym (odległość dobrego widzenia  $D = -250$  mm),  
 $L$  - odległość obrazu od obserwatora.



Rys.1.1. Zasada obserwacji przez lupę

W przybliżeniu dla powiększeń lupy znacznie większych od 1 lub dla oka umieszczonego blisko lupy przyjmuje się drugi wyraz w nawiasie za pomijalny i wtedy

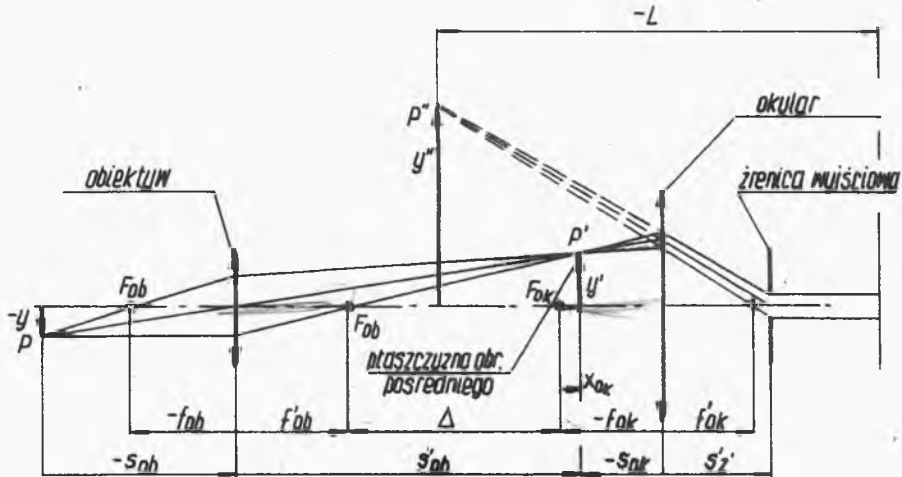
$$G = \frac{250}{f'} . \quad (3)$$

W ćwiczeniu zajmiemy się budową układu mikroskopu złożonego.



## 2.2. Schemat i budowa układu optycznego mikroskopu złożonego

Prosty układ optyczny mikroskopu składa się co najmniej z 2 zespołów: obiektywu i okulara (rys.1.2). Obiektyw tworzy powiększony, odwrócony, rzeczywisty obraz  $y'$  przedmiotu  $y$ .



Rys.1.2. Prosty układ mikroskopu

Obraz ten jest z kolei oglądany przy pomocy okulara, przez który oko umieszczone w źrenicy wyjściowej przyrządu obserwuje pozorny powiększony i odwrócony obraz przedmiotu znajdujący się w odległości  $L$  od obserwatora. Jeśli układ mikroskopu zestawiony zostanie tak, aby oko normalnowzroczne pracowało bez wysiłku akomodacyjnego, tzn. tak, jak dla przedmiotu w nieskończoności, wtedy  $L = -\infty$ ,  $x_{ob} = 0$  i  $-s_{ok} = -f_{ok}$ , a więc płaszczyzna ogniskowa przedmiotowa okulara pokrywa się z płaszczyzną obrazu danego przez obiektyw. Takie zestawienie układu nosi nazwę ustawienia "na zero dioptrii". Obraz pozorny obserwowany przez okular można, przesuając okular, ustawić w odległości dobrego widzenia od obserwatora, wtedy  $L = -250$  mm. Odległość tę możemy wyrazić w dioptriach (określa się wtedy zbieżność pęku promieni za okularom)

1 dioptria odpowiada odległości przedmiotu od oka = 1000 mm, gdzie  $s = 1000/S$ ;  $S$  - odległość w dioptriach,  $s$  - w milimetrach).

Możemy również określić przesuw okulara dla ustawienia obrazu w żądanej odległości od oka, tzw. ruch dioptryjny okulara. Przykładowo: przesunięcie okulara mikroskopu od położenia "0 dioptrii" na odległość odpowiadającą 1 dioptrii (1000 mm) wylicza się ze wzoru

$$a(1 \text{ dptr}) = \frac{f'_{ok}{}^2}{1000},$$

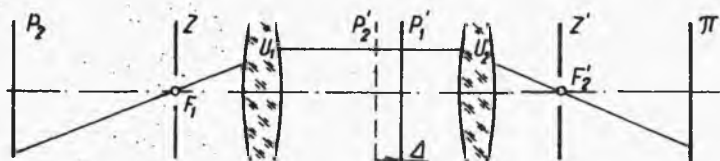
ogólnie

$$a = \frac{f'_{ok}{}^2}{1000} \text{ S.} \quad (4)$$

### 2.3. Telecentryczny bieg promieni głównych w pomiarowych układach optycznych

Telecentryczny bieg promieni głównych w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej ma zastosowanie np. w układach mikroskopowych pomiarowych w celu usunięcia błędu paralaksy odczytu, wynikającego z niedokładnego ustawienia na ostrość. Ogólnie mówiąc, chodzi o to, aby środki plamek rozproszenia - wynikłych z niedokładnego ustawienia na ostro obrazu mierzonych punktów na podziałce pomiarowej przyrządu - leżały w tej samej odległości co mierzone punkty przy prawidłowym zogniskowaniu.

Jeśli w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej obiektywu układu znajduje się przysłona aperturowa (rys.1.3), to źrenica

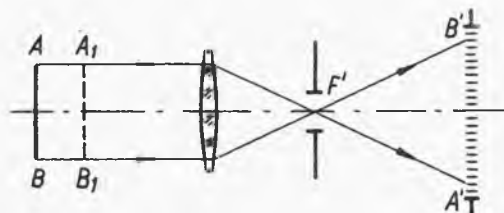


Rys.1.3. Telecentryczny bieg promieni w przestrzeni obrazowej obiektywu

wyjściowa jest w nieskończoności. Wtedy promień główny w przestrzeni obrazowej biegnie równoległe do osi. Wyznacza on środki plamek rozproszenia i zachowuje stałą odległość od siebie, pomimo zmiany odległości obrazu i podziałki. W przypadku przedstawionym na tym rysunku mamy do czynienia z telecentrycznym biegiem promieni w przestrzeni obrazowej obiektywu przyrządu. Jeśli podziałka znajduje się w stałej odległości od obiektywu,

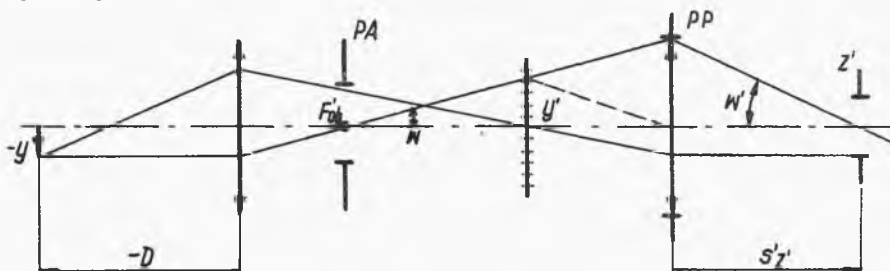
zaś nie ma gwarancji, że położenie przedmiotu będzie stałe stosujemy telecentryczny bieg promieni w przestrzeni przedmiotowej (rys.1.4).

Zapewnia on, że obrazy tych samych punktów przedmiotu będą leżały w tych samych punktach podziałki niezależnie od przesunięcia przedmiotu. Układ mikroskopu z telecentrycznym biegiem promieni w przestrzeni przedmiotowej



Rys.1.4. Telecentryczny bieg promieni w przestrzeni przedmiotowej obiektywu

ukazuje rys.1.5. Telecentryczny bieg promieni głównych w przestrzeni przedmiotowej stosuje się między innymi w mikroskopach warsztatowych.



Rys.1.5. Układ optyczny mikroskopu z telecentrycznym biegiem promieni w przestrzeni przedmiotowej

## 2.4. Podstawowe wielkości charakterystyczne mikroskopu.

### Definicje i wzory

#### Powiększenie mikroskopu

Obraz pośredni dany przez obiektyw jest powiększony  $\beta_{ob}$ -krotnie w stosunku do przedmiotu

$$\beta_{ob} = \frac{y'}{y} = -\frac{\Delta}{f'_{ob}} = \frac{f'_{ob}}{x} = \frac{f'_{ob}}{f'_{ob} - s_{ob}} \quad (5)$$

Obraz ten jest obserwowany przez okular, pracujący jak lupa pod powiększeniem

$$G_{ok} = \frac{250}{f'_{ok}},$$

zgodnie z uproszczoną zależnością dla luży.

Całkowite wizualne powiększenie mikroskopu można określić jako iloczyn powiększenia poprzecznego obiektywu i powiększenia wizualnego okulara

$$G_m = \beta_{ob} G_{ok} = - \frac{\Delta 250}{f'_{ob} f'_{ok}}. \quad (6)$$

Założone powiększenie mikroskopu  $G_m$  można realizować przez dobór mocy obiektywu, okularu i odległości między nimi, a ściślej optycznej długości tubusa tzn. rozsunęcia pomiędzy  $F'$  obiektywu i  $F$  okulara

$$\Delta = x'_{ob} = - \frac{f'^2_{ob}}{s_{ob} - f'_{ob}} = + \frac{f'^2_{ob}}{-s_{ob} + f'_{ob}}. \quad (7)$$

Zmiany parametrów, wpływających na powiększenie, ograniczone są w praktyce względami konstrukcyjnymi lub użytkowymi, np. wzrost odległości  $\Delta$  może niekorzystnie wydłużyć przyrząd, zwiększenie mocy obiektywu (skracanie ogniskowej) utrudnia osiągnięcie wymaganej korekcji aberracji układu, podobnie jak zwiększenie powiększenia okulara. Wszystkie te zmiany, zwiększające powiększenie mikroskopu zmniejszają jednocześnie jego pole widzenia.

#### Pole widzenia (przedmiotowe) mikroskopu

Jest to największy wymiar  $\Phi_p$  przedmiotu widzianego przez układ. Powierzchnia przedmiotu jest pozornie obramowana ostro widoczną krawędzią przysłony, ustawionej w płaszczyźnie przedmiotowej okulara mikroskopu, zwanej przysłoną pola. Jest ona optycznie sprzężona z płaszczyzną przedmiotu. Jeśli takiej przysłony w płaszczyźnie obrazu pośredniego nie ma, to funkcje jej (ograniczenie pola widzenia) spełnia inna przysłona, niesprzężona optycznie z przedmiotem (na przykład oprawa soczewek). Takie ograniczenie pola widzenia jest nieostre i charakteryzuje się stopniowym zmniejszeniem jasności obrazu w kierunku do brzegu pola widzenia. Obraz przysłony pola dany przez obiektyw w przestrzeni przedmiotowej mikroskopu nosi nazwę luki wejściowej. W przypadku pierwszym (przysłona pola w płaszczyźnie obrazu pośredniego) leży ona na przedmiocie. W drugim przypadku przysłoną pola w układzie mikroskopowym jest na ogół oprawa okulara, zaś położenie luki wejściowej względem ogniska przed-

miotowego obiektywu określa wzór

$$x_L = - \frac{f'_{ob}{}^2}{\Delta + f'_{ok}} \quad (8)$$

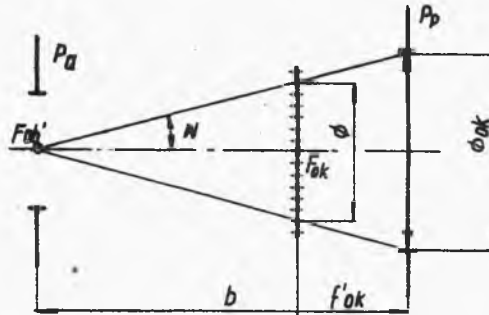
Liniowe pole widzenia w tym przypadku dla płaszczyzny obrazowej obiektywu można określić z następującej zależności (rys.1.6)

$$\frac{\Phi}{\Phi_{ok}} = \frac{b}{b + f'_{ok}} \quad (9)$$

gdzie  $b$  - odległość pomiędzy przysłoną aperturową a płaszczyzną obrazu pośredniego. Przy

ustawieniu układu mikroskopu z telecentrycznym biegiem promieni w przestrzeni przedmiotowej  $b = \Delta$

Przedmiotowe pole widzenia



Rys.1.6. Określenie pola widzenia w przypadku gdy przysłoną pola jest oprawa okulara mikroskopu

$$\Phi_p = \frac{\Phi}{\beta_{ob}} \quad (10)$$

gdzie  $\Phi$  - średnica pola widzenia w płaszczyźnie obrazu pośredniego.

Należy jeszcze określić położenie źrenicy wyjściowej mikroskopu, czyli obrazu diafragmy aperturowej danego przez okular. Z wzoru Descartesa

$$\frac{1}{s'_z} - \frac{1}{s_z} = \frac{1}{f'_{ok}}$$

gdzie:  $s'_z$  - odległość źrenicy wyjściowej od okulara,  
 $s_z$  - odległość diafragmy aperturowej od okulara.

a) jeśli diafragma aperturowa znajduje się w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu (telecentryczny bieg promieni głównych w przestrzeni przedmiotowej), to  $s_z = -(\Delta + f'_{ok})$ ;

b) jeśli diafragma aperturową jest oprawa obiektywu; to

$$s_z = -(f'_{ob} + \Delta + f'_{ok})$$

Żądaną średnicę diafragmy aperturowej przy założonej średnicy źrenicy wyjściowej mikroskopu można określić ze wzoru

$$\Phi_{Da} = \Phi_z \cdot \frac{f'_{ok}}{s'_{z'} - f'_{ok}}. \quad (11)$$

W ćwiczeniu założono  $\Phi_z = 4$  mm. W konstrukcjach rzeczywistych mikroskopów średnica źrenicy wyjściowej jest mniejsza i wynosi  $1 \div 2$  mm.

Innymi wielkościami charakterystycznymi mikroskopu są:

a) apertura numeryczna obiektywu mikroskopu

$$A_n = n \sin u, \quad (12)$$

gdzie:  $n$  - współczynnik załamania ośrodka przestrzeni przedmiotowej,

$u$  - kąt aperturowy obiektywu,

- gdy źrenica wejściowa pokrywa się z oprawą obiektywu

$$u = \arctg \left( - \frac{\Phi_z}{2s_{ob}} \right) \quad (13a)$$

- gdy diafragma aperturowa leży w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu wtedy

$$u = \arctg \left( \frac{\Phi_{Da}}{2f'_{ob}} \right); \quad (13b)$$

b) zdolność rozdzielcza obiektywu, czyli najmniejsza odległość 2 punktów przedmiotu, które mogą być rozróżnione jako osobne

$$b_r = 0,65 \frac{\lambda}{A} \quad (14)$$

Jest to wzór wynikający z teorii dyfrakcji, gdzie  $\lambda$  jest długością fali światła.

### 3. METODY POMIARU WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNYCH UKŁADU MIKROSKOPOWEGO

#### 3.1. Pomiar powiększenia poprzecznego obiektywu

Do pomiaru wykorzystuje się zależność

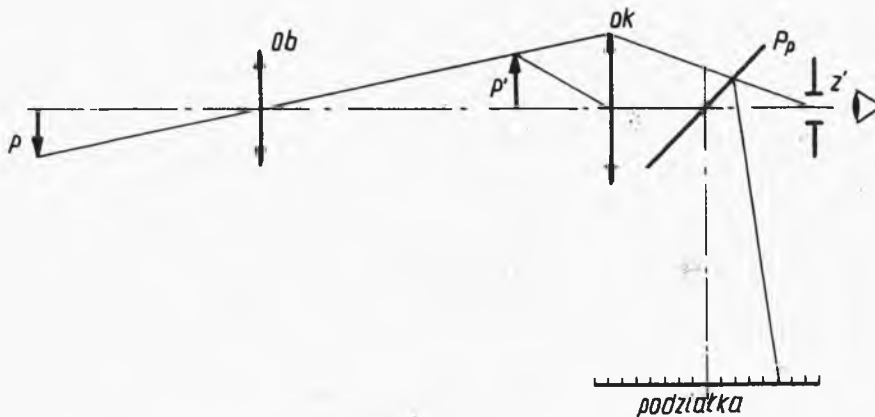
$$\beta_{ob} = \frac{y'}{y}, \quad (15)$$

gdzie  $y$  i  $y'$  są wymiarami przedmiotu i obrazu przedmiotu danego przez obiektyw.

W celu dokonania pomiaru należy w płaszczyźnie przedmiotowej mikroskopu umieścić np. płytkę z dwiema liniami w znanej odległości od siebie. Wielkość obrazu mierzymy drugim pryzmatem liniowym lub za pomocą mikroskopu pomocniczego z podziałką (patrz rozdział I).

#### 3.2. Pomiar powiększenia wizualnego układu mikroskopowego

Zastosujemy metodę pomiaru opartą na zasadzie tzw. aparatu do rysowania. Objaśnia ją rysunek 1.7.



Rys.1.7. Pomiar powiększenia wizualnego mikroskopu za pomocą aparatu do rysowania

Przez zastosowanie płytki półprzepuszczalnej  $P_p$  obserwator widzi jednocześnie nakładające się obrazy: przedmiotu i podziałki, umieszczonej w odległości 250 mm od oka. Dzięki temu można zmierzyć wielkość obrazu (pod warunkiem, że tworzy on

się również w odległości dobrego widzenia). W ustawieniu podstawowym układu mikroskopu (tzn. "na zero dioptrii") obraz dany przez mikroskop tworzy się w nieskończoności. Ponieważ podziałka jest w odległości 250 mm od oka, obserwator nie widzi jednocześnie ostro obu obrazów (oko może akomodować w danym momencie na jeden albo drugi obraz, lecz nie na obydwa jednocześnie). Aby umożliwić pomiar można: albo zamiast podziałki zastosować kolimator o ogniskowej obiektywu  $f' = 250$  z podziałką (wtedy oba obrazy porównywane tworzą się w nieskończoności), albo przesunąć okular mikroskopu tak, aby obraz dany przez mikroskop tworzył się w odległości 250 mm (obydwa obrazy w odległości dobrego widzenia). Stosunek wymiarów obrazu i przedmiotu jest powiększeniem układu mikroskopowego.

Przy pomiarze należy zwrócić uwagę na odpowiednie dobranie oświetlenia przedmiotu i podziałki w taki sposób, aby ich jasność była mniej więcej jednakowa.

### 3.3. Pomiar wielkości i położenia źrenicy wyjściowej

Wykonuje się go za pomocą mikroskopu pomocniczego w sposób opisany w części wstępnej. W wypadku, gdy odległość źrenicy wyjściowej od okulara jest większa od zakresu pomiarowego mikroskopu pomiarowego można posłużyć się matówką i pryzmatem kreskowym.

### 3.4. Pomiar dioptryjności pęku promieni za okularzem w przypadku gdy układ nie jest ustawiony na 0 dioptrii

Pomiaru dokonuje się za pomocą lunetki dioptryjnej, otrzymanej z mikroskopu pomocniczego przez wykręcenie przedniej części obiektywu. Należy przesunąć obiektyw względem płytki ogniskowej aż do uzyskania ostrego obrazu przedmiotu w płaszczyźnie płytki ogniskowej. Przesuw obiektywu odczytuje się na podziałce w wycięciu oprawy lunetki opisanej w dioptriach.



#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

1. W ćwiczeniu należy obliczyć:

a) powiększenie obiektywu i mikroskopu, położenie źrenic i luk, liniowe pole widzenia,

b) wielkość diafragmy aperturowej dla średnicy źrenicy wyjściowej = 4 mm, przesuw okulara na 1 dioptrię,

c) aperturę numeryczną i zdolność rozdzielczą.

Obliczenia należy wykonać dla ustawienia na 0 dioptrii oraz dla danych podanych przez prowadzącego.

2. Zestawić układ według obliczeń i wyjustować (wyregulować położenie elementów).

3. Wykonać pomiary obliczonych wielkości (wg pkt. 4.1a,b) Ćwiczenie należy wykonać na jednym z dwóch omówionych rodzajów układu, wskazanym przez prowadzącego zajęcia.

#### 5. LITERATURA

Józwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.

Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.II. WNT. Warszawa 1964.

Wagnerowski T.: Optyka praktyczna. PWT. Warszawa 1959.

Appel L., Kowalczyk R.: Mikroskop, budowa i użytkowanie. WNT. Warszawa 1966.

#### 6. PYTANIA KONTROLNE

Co to jest układ typu mikroskopowego?

Definicje i położenia źrenic i luk w układzie.

Parametry charakterystyczne mikroskopu:

- powiększenie,
- pole widzenia,
- apertura,
- zdolność rozdzielcza.

Co to jest ruch dioptryjny (dioptryjność pędu promieni)?

Ustawienie na 0 dioptrii.

Sposoby pomiaru własności układu typu mikroskopowego.  
Telecentryczny bieg promieni głównych w układzie optycznym.

## Ćwiczenie 2

### ZESTAWIANIE MODELOWE UKŁADU LUNETY

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie rodzajów lunet, działania układu lunetowego do celów astronomicznych, wielkości charakterystycznych układu oraz metod i wyposażenia do badania jego własności, sposobu regulacji i sprawdzenia układów do obserwacji przedmiotów w nieskończoności (w bardzo dużej odległości od obserwatora).

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

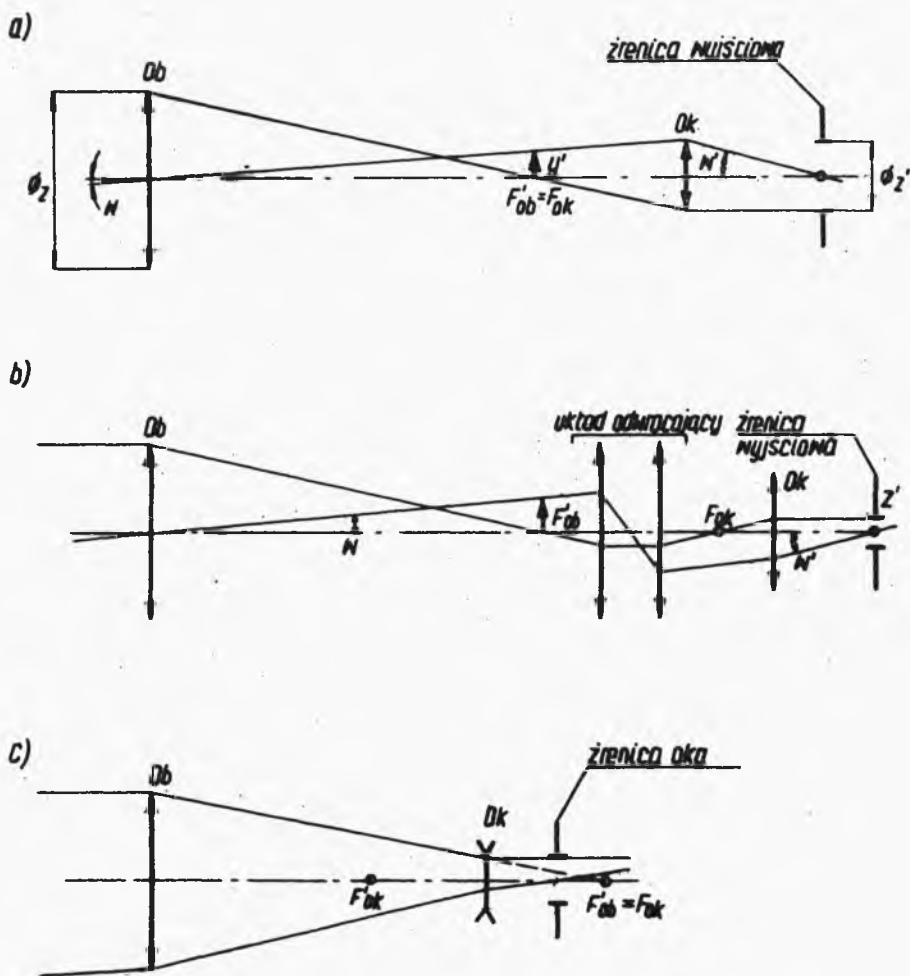
##### 2.1. Ogólne cechy układu lunetowego

Lunety są układami optycznymi służącymi do obserwacji mocno oddalonych przedmiotów. Składają się one z 2 elementów podstawowych: obiektywu i okulara, ustawionych tak, że ognisko obrazowe obiektywu pokrywa się (lub jest sprzężone przez dodatkowe elementy optyczne) z ogniskiem przedmiotowym okulara. Układ taki może być rozwiązany kilkoma sposobami. Najbardziej rozpowszechnionym obecnie typem układu lunetowego jest luneta Keplera zwana również astronomiczną (rys.2.1a). Składa się ona z dodatniego obiektywu i dodatniego okulara. W ustawieniu podstawowym wiązka równoległych promieni biegnących od oddalonego przedmiotu jest skupiona w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej

obiektywu, ponieważ zaś ta pokrywa się z płaszczyzną ogniskową przedmiotową okulara - wiązka po przejściu przez okular również jest równoległa. Układ taki daje obraz odwrócony. Źrenica wejściowa w tego typu lunecie znajduje się na ogół na oprawie obiektywu. Jest ona jednocześnie diafragmą aperturową, zaś źrenicą wyjściową jest obraz oprawy obiektywu dany przez okular. Przy obserwacji, jak wiadomo, oko powinno znajdować się w takim położeniu, aby jego źrenica pokryła się ze źrenicą wyjściową przyrządu. Wtedy wszystkie wiązki, padające na obiektyw przyrządu pod różnymi kątami, trafią do oka. Lunety typu Keplera stosowane są w astronomii oraz w szeregu przyrządów i układów pomiarowych. W tym drugim przypadku, w płaszczyźnie obrazu pośredniego umieszcza się płytkę ogniskową z podziałką lub krzyżem. Wadą tego typu układu jest obserwacja obrazu odwróconego. Wadę tę można stosunkowo łatwo usunąć przez zastosowanie układu odwracającego pryzmatycznego lub soczewkowego. Otrzymujemy wtedy tzw. lunetę ziemską. Typowy przykład takiej lunety przedstawia rys.2.1b. Wstawienie układu odwracającego powoduje jednak zwiększenie gabarytów lunety.

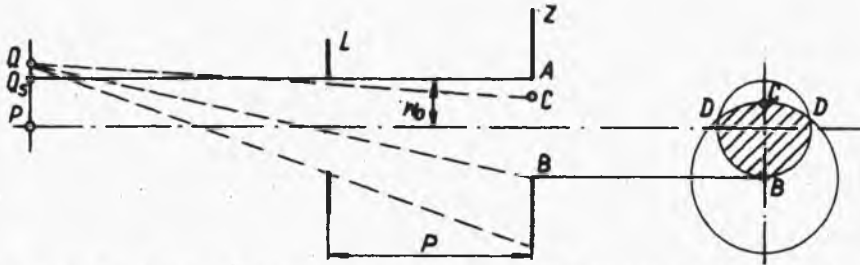
Trzecim typem układu lunetowego jest luneta Galileusza (rys.2.1c). Składa się ona z dodatniego obiektywu i ujemnego okulara umieszczonego przed płaszczyzną obrazu danego przez obiektyw tak, aby obraz ten pokrywał się z płaszczyzną ogniskową przedmiotową okulara. W układzie takim obraz jest prosty i leży w nieskończoności, lecz rzeczywisty obraz pośredni jest niedostępny. Diafragma aperturowa nie może znajdować się na obiektywie, ponieważ obraz obiektywu dany przez okular leży wewnątrz układu i jest pozorny, nie można więc ustawić w nim oka obserwatora. Oko umieszcza się w tym typie lunety bezpośrednio za okularzem, zaś źrenica oka jest diafragmą aperturową układu i jednocześnie źrenicą wyjściową.

Ponieważ w lunecie Galileusza obraz pośredni jest niedostępny i nie można w nim umieścić diafragmy pola, pole to jest ograniczone przez lukę wejściową - oprawę obiektywu, co powoduje stopniowy spadek jasności od skraju pola pełnego światła do skraju pola widzenia (rys.2.2). Każdy punkt w polu pełnego światła  $Q_0$  będzie jednakowo oświetlony, bo wiązki aperturowe  $AQ_0B$  będą takie same jak  $PAB$ . Punkty leżące dalej od osi



Rys.2.1. Typy lunet: a) luneta Keplera (astronomiczna);  
b) luneta ziemna; c) luneta Galileusza

niż punkt  $Q_0$  będą słabiej oświetlone, gdyż źrenica z będzie przysłaniana przez lukę. Czynna powierzchnia źrenicy dla



Rys.2.2. Ograniczenie pola widzenia w luncie Galileusza

wiązki wychodzącej z  $Q$  jest  $BDCDB$ . Pole  $PQ_0$  nazywa się polem pełnego światła, a jego wielkość kątowna

$$\operatorname{tg} w_0 = \frac{\Phi_{ob} - \Phi_z}{2p} = \frac{\Phi_{ob} - \Phi_z G}{2p},$$

gdzie:  $\Phi_{ob}$  - średnica obiektywu ( $= \Phi_L$ ),  
 $\Phi_{z'}$  - średnica źrenicy wyjściowej lunety,  
 $G$  - powiększenie lunety,  
 $p$  - odległość od luki do źrenicy.

Wadami układu jest stosunkowo małe pole widzenia, niewielkie powiększenie - rzędu  $2,5^x$  i brak obrazu pośredniego. Układ Galileusza ze względu na taniocść i prostotę najczęściej stosowany jest w lornetkach teatralnych.

## 2.2. Wielkości charakterystyczne lunety. Definicje i wzory

Powiększenia kątowne lunety definiowane jest jako stosunek tangensów kątów, jakie tworzą z osią: pęk promieni wychodzących z lunety oraz pęk promieni padających (inaczej tangensów obrazowego i przedmiotowego kąta pola widzenia)

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w}, \quad (1)$$

ponieważ

$$\operatorname{tg} w = \frac{-y'}{r_{ob}}; \quad \operatorname{tg} w' = \frac{y'}{r_{ok}},$$



- obrazowy kąt pola widzenia

$$\operatorname{tg} w' = \frac{\Phi_{ok}}{2 s'_{z'}} , \quad (4)$$

gdzie  $s'_{z'}$  - odległość źrenicy wyjściowej od okulara określona ze wzoru

$$s'_{z'} = f'_{ok} + \frac{f'^2_{ob}}{f'_{ob}} ; \quad (5)$$

(przy założeniu, że źrenicą wyjściową jest oprawa obiektywu)  
- położenie łuki wejściowej względem ogniska przedmiotowego obiektywu

$$x_L = - \frac{f'^2_{ob}}{f'_{ok}} ; \quad (6)$$

- średnica łuki wejściowej

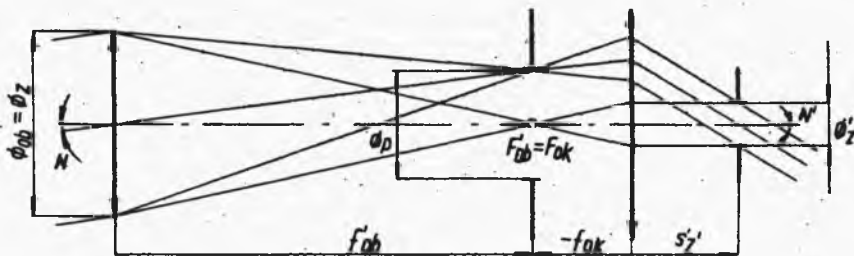
$$\Phi_L = \Phi_{ok} \frac{f'_{ob}}{f'_{ok}} ; \quad (7)$$

- przedmiotowy kąt pola widzenia

$$\operatorname{tg} w = \frac{\Phi_{ok}}{2(f'_{ob} + x'_{Dp})} , \quad (8a)$$

gdzie  $x'_{Dp}$  w tym przypadku =  $-f'_{ok}$ .

b) gdy w płaszczyźnie obrazu pośredniego znajduje się przysłona (np. oprawa płytki ogniskowej, oprawa kolektywu itp.) wtedy jest ona diafragmą pola. Mamy wtedy ostre ograniczenie



Rys.2.4. Luneta Keplera z ostrym ograniczeniem pola widzenia

poła widzenia lunety (rys.2.4). Łuki: wejściowa i wyjściowa leżą w nieskończoności. Kąty pola widzenia:

- przedmiotowy

$$\operatorname{tg} w = \frac{\Phi_p}{2F_{ob}}, \quad (8b)$$

gdzie  $\Phi_p$  - średnica przysłony pola;

- obrazowy

$$\operatorname{tg} w' = \frac{\Phi_p}{2F'_{ok}}, \quad (9)$$

Inne wielkości charakterystyczne lunety to:

- zdolność rozdzielcza (zależność z teorii dyfrakcji)

$$\alpha ["] = \frac{140''}{\Phi_z [\text{mm}]}, \quad (10)$$

- przesuw okulara na 1 dioptrię (patrz ćwic.1)

$$a = \frac{f_{ok}^2}{1000}. \quad (11)$$

### 2.3. Rola kolektywu w układzie lunetowym

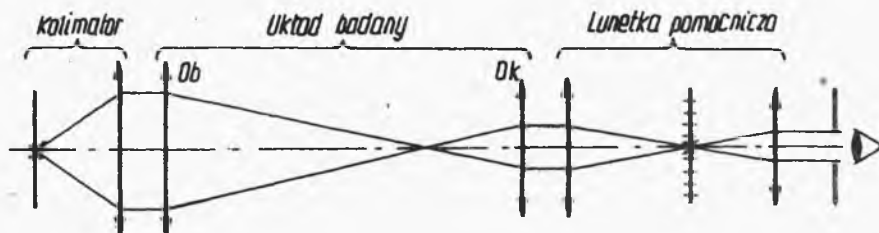
Odległość źrenicy wyjściowej  $s'_z$ , od okulara zależna jest od odległości oprawy obiektywu (przysłony aperturowej) od okulara i mocy okulara, zgodnie ze wzorem, podanym w punkcie 2.2. Rysunek 2.4 przedstawia bieg pęku promieni w takiej lunecie, przy istnieniu przysłony pola w płaszczyźnie obrazu pośredniego.

Z rysunku widać, że odległość  $s'_z$ , i kąt pola  $w'$  wyznaczają średnicę okulara, która będzie tym większa, im większe będą wartości  $w'$  i  $s'_z$ . W celu zmniejszenia średnicy okulara i przybliżenia źrenicy wyjściowej do okulara (co może być istotne ze względów użytkowych) stosuje się kolektywy. W najprostszej wersji jest to soczewka dodatnia, umieszczona w płaszczyźnie przysłony pola (obrazu pośredniego danego przez obiektyw). Dzięki takiemu ustawieniu kolektyw - bez względu na jego ogniskową - nie zmienia położenia ani wielkości obrazu obserwowanego przez lunetę, natomiast przesuwa położenie źrenicy wyjściowej. Ukazuje to rysunek 2.5. Zmianie nie ulega przy tym średnica źrenicy wyjściowej.





za okulem - lunetkę pomocniczą. Układ na ławie przedstawia rys.2.6.



Rys.2.6. Układ lunety Keplera wraz z układem kolimatora i lunetki pomocniczej

Prawidłowo zestawiony układ lunety (w ustawieniu podstawowym - na tzw. 0 dioptrii) powinien charakteryzować się tym, że ognisko obrazowe obiektywu pokrywa się z ogniskiem przedmiotowym okulara, zaś w przypadku istnienia w układzie płytki ogniskowej - również ze środkiem rysunku tej płytki. O ile pokrycie płaszczyzny krzyża płytki ogniskowej z płaszczyzną obrazu pośredniego jest stosunkowo łatwe również bez pomocy lunetki pomocniczej (przy wykorzystaniu obserwacji zjawiska paralaksy (patrz rozdział I) między tymi obrazami przy przesunięciu oka poprzecznie w źrenicy wyjściowej lunety), to ustawienie okulara w położeniu 0 dioptrii ze względu na akomodację oka obserwatora nie jest możliwe bez pomocy lunetki pomocniczej. Należy ustawić ją za zestawionym układem tak, aby źrenica wejściowa lunetki pomocniczej (na ogół jest to oprawa jej obiektywu) pokryła się z płaszczyzną źrenicy wyjściowej zestawionego układu. Obserwując przez okular lunetki pomocniczej jej płytkę ogniskową, zaś na jej tle obrazy testu kolimatora i ewentualnie płytki ogniskowej lunety zestawionej - eliminujemy paralaksę między tymi elementami przesuwając wzdłuż osi optycznej okular lunety zestawianej.

### 3. POMIARY WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNYCH LUNETY

#### 3.1. Pomiar powiększenia lunety

Można go wykonać kilkoma metodami:

a) metoda pomiaru średnic źrenic, omówiona w pkt. 2.2,

b) przez pomiar kątów pola widzenia w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej. Np. mając do dyspozycji kolimator o znanej podziałce kątovej (kąt przedmiotowy  $w$ ) oraz lunetkę pomocniczą z płytką ogniskową ( $w'$ ). Ze stosunku kątów  $w'$  i  $w$  określamy powiększenie lunety.

### 3.2. Pomiar wielkości i położenia źrenicy wyjściowej lunety

Pomiaru dokonuje się za pomocą mikroskopu pomocniczego, odczytując średnicę źrenicy na podziałce płytki ogniskowej mikroskopu. Przesuwając mikroskop w tubusie i ogniskując go raz na ostatnią powierzchnię okulara, zaś drugi raz na obraz źrenicy wyjściowej - z różnicy położenia mikroskopu w tubusie (na podziałce, napiętej na oprawie) można określić położenie źrenicy wyjściowej za układem. W przypadku, gdy zakres pomiarowy mikroskopu pomocniczego jest zbyt mały - pomiarów można dokonać w sposób przybliżony za pomocą matówki, na której odwzorowujemy obraz źrenicy wyjściowej, oraz przymiaru kreskowego.

### 3.3. Pomiar pola widzenia lunety

Pomiaru pola widzenia lunety dokonuje się na ogół za pomocą kolimatora szerokokątnego, odczytując ilość podziałek na płytce ogniskowej kolimatora (stojącego przed lunetą badaną) widoczną w polu widzenia lunety.

### 3.4. Pomiar zdolności rozdzielczej lunety

Pomiaru tego dokonuje się przy pomocy specjalnego kolimatora z testem zdolności rozdzielczej. Testy takie składają się z różnie ułożonych kresek jasnych na ciemnym tle lub odwrotnie. Odległość kątowa między kreskami testu, obserwowana przez lunetę zmniejsza się w kolejnych grupach kresek co  $0,5 + 1,5''$ . Oznaczenia grupy kresek o najmniejszym rozstawie, które są jeszcze rozróżniane przez lunetę, określają jej zdolność rozdzielczą. W celu wyeliminowania wpływu zdolności rozdzielczej oka obserwatora (która może być niższa od wymaganej dla przyrządu) obraz obserwuje się pod powiększeniem za pomocą lunetki

pomocniczej (zwiększającej możliwość obserwowania okiem drobnych szczegółów).

### 3.5. Pomiar dioptryjności pęku promieni za okularzem

Pomiaru dioptryjności pęku promieni za okularzem dokonuje się za pomocą lunetki dioptryjnej, przesuając jej obiektyw tak, aby uzyskać ostry obraz na tle płytki ogniskowej. Na podziałce odczytujemy zbieżność pęku promieni w dioptriach. Można też - wychodząc z ustawienia lunety badanej na 0 dioptrii - ustawić lunetkę dioptryjną na żadaną dioptryjność pęku promieni, a następnie przesunąć okular lunety o odległość odpowiadającą tej zbieżności pęku.

Ruch dioptryjny okularów w przyrządach obserwacyjnych jest stosowany do dopasowania przyrządu do obserwatora o oczach niemiarowych.

## 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Wykonać obliczenia układu lunety Keplera o powiększeniu  $\Gamma$  przy założeniu, że średnica źrenicy wyjściowej  $\Phi_z = 4$  mm, a źrenica wejściowa leży w płaszczyźnie obiektywu. Należy określić położenie luk przy podanym położeniu przysłony pola oraz położenie źrenicy wyjściowej układu.
2. Obliczyć ogniskową kolektywu potrzebnego do uzyskania żadanego położenia źrenicy wyjściowej oraz położenie luk w tym przypadku.
3. Obliczyć przedmiotowy kąt pola widzenia, zdolność rozdzielczą oraz dioptryjność pęku promieni za okularzem.
4. Zestawić układ kolimatora i wyjustować z wykorzystaniem zjawiska paralaksy.
5. Zestawić lunetę astronomiczną bez kolektywu na podstawie obliczeń.
6. Zmierzyć obliczone wielkości (powiększenie, średnicę i położenie źrenicy wyjściowej oraz inne obliczone wielkości).

7. Wstawić do układu kolektyw o obliczonej uprzednio ogniskowej, wyjustować, zmierzyć obliczone wielkości charakterystyczne dla układu z kolektywem.

U w a g a: pomiary należy wykonać zestawiając układ w położeniu dla 0 dioptrii - w tym celu należy prawidłowo ustawić lunetę za pomocą kolimatora (zestawionego uprzednio na ławie) i lunetki pomocniczej.

## 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.  
Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.II. WNT. Warszawa 1964.  
Wagnerowski T.: Optyka praktyczna. PWT. Warszawa 1959.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Własności układu typu lunetowego.

Jakie są rodzaje układów lunetowych?

Wielkości charakterystyczne lunety:

- powiększenie kątowe,
- pole widzenia (przedmiotowe i obrazowe),
- zdolność rozdzielcza,
- położenie i wielkość źrenicy wyjściowej.

Co to jest kolektyw i jaką rolę pełni w układzie lunety Keplera?

Sposób zestawienia układu i justowania.

Sposób pomiaru wielkości i położenia źrenicy wyjściowej, powiększenia, kątów pola widzenia.

Dioptryjność pęku promieni. Ruch dioptryjny.

### Ćwiczenie 3

## ZESTAWIANIE MODELOWE UKŁADU PROJEKCYJNEGO

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zagadnieniami związanymi z konstrukcją i eksploatacją typowych układów projekcyjnych. Materiał ćwiczenia obejmuje obliczenia podstawowych wielkości fotometrycznych.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Na rys.3.1 przedstawiono charakterystyczne typy układów projekcyjnych. Zagadnienia dotyczące układów projekcyjnych wszystkich typów zostaną omówione na przykładzie najbardziej typowego układu - aparatu projekcyjnego pracującego w świetle przechodzącym (rys.3.1a). Przedmiot P oświetlony jest przy pomocy lampy projekcyjnej - Q, kondensora K oraz zwierciadła wklęsłego Z. Obiektyw projekcyjny  $Ob$  odwzorowuje przedmiot na ekranie. W płaszczyźnie przedmiotu najczęściej umieszcza się przesłonę pola (okienko projekcyjne) w celu ostrego ograniczenia projektowanego pola. Najważniejszymi parametrami układu projekcyjnego są powiększenie  $\beta_{ob}$  i natężenie oświetlenia w płaszczyźnie obrazu  $E'$ . Oprócz dostatecznego oświetlenia obrazu od układu projekcyjnego wymaga się także równomierności oświetlenia przedmiotu. Żądaną wartość powiększenia  $\beta_{ob}$  otrzymuje się stosując obiektyw projekcyjny o odpowiedniej ogniskowej  $f'_{ob}$  dla danej odległości projekcyjnej  $s'_{ob}$

$$\beta_{ob} = -\frac{x'_{ob}}{f'_{ob}} \approx \frac{s'_{ob}}{f'_{ob}} .$$

Równomierność oświetlenia na ekranie osiąga się głównie przez odwzorowanie źródła światła (lampy projekcyjnej) w źrenicy wejściowej obiektywu projekcyjnego. Można to wykazać następująco. Jeżeli źródło światła zostanie odwzorowane w płaszczyźnie źrenicy wejściowej obiektywu (niekoniecznie centralnie rys.3,2) to obiektyw pracuje tylko tą częścią źrenicy, która jest oświetlona przez obraz źródła. Pozostałą część źrenicy nie bierze udziału w tworzeniu obrazu i można ją zasłonić np. przysłoną F (rys.3.2a), jednakże w dowolnym punkcie ekranu procentowy udział cienia (z zasłoniętej części źrenicy) i światła (z oświetlonej części) jest taki sam. Stąd wniosek, że natężenie oświetlenia w płaszczyźnie ekranu powinno być równomierne, o ile tylko obraz źródła światła odwzorowany jest w płaszczyźnie źrenicy wejściowej. Zamiast przysłony F można umieścić filtr barwny, którego przesuw w pęku promieni świetlnych będzie powodował zmianę intensywności barwy na ekranie. Na tej zasadzie opiera się polski patent na obiektyw powiększalnikowy do zdjęć barwnych Janpol-Color. Jeżeli obraz źródła odwzorowany zostanie poza płaszczyznę źrenicy, to jak wykazuje rys.3.2b natężenie oświetlenia w płaszczyźnie ekranu nie będzie równomierne. Z powyższego rozumowania wynika, że maksymalne natężenie w płaszczyźnie ekranu można uzyskać tylko przy całkowitym wykorzystaniu apertury obiektywu, tj. przy całkowitym wypełnieniu powierzchni źrenicy przez obraz źródła światła.

Natężenie oświetlenia na ekranie wyraża się zależnością

$$E' = \frac{\pi}{4} \tau_{KO} \frac{L}{(N \beta_{ob})^2} \tau_p \cos^4 w, \quad [lx] \quad (1)$$

gdzie: L - luminacja źródła Q [nt],

$\tau_{KO}$  - współczynnik przepuszczania kondensora i obiektywu,

$\tau_p$  - współczynnik przepuszczania przedmiotu,

N - liczba otworu układu kondensator-obiektyw,

$\beta_{ob}$  - powiększenie projekcyjne,

w - kąt pola widzenia,

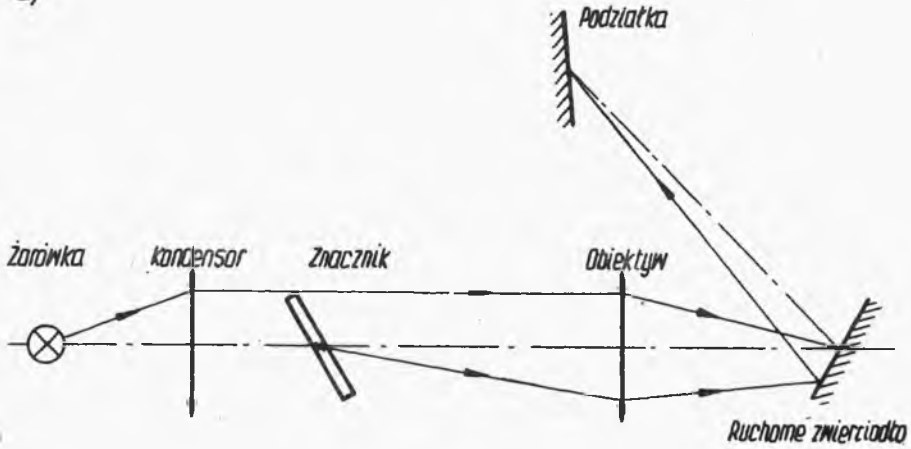
$\cos^4 w$  - czynnik uwzględniający winietowanie naturalne.

Z analizy wzoru (1) wynika, że natężenie oświetlenia na ekranie jest przede wszystkim proporcjonalne do luminacji

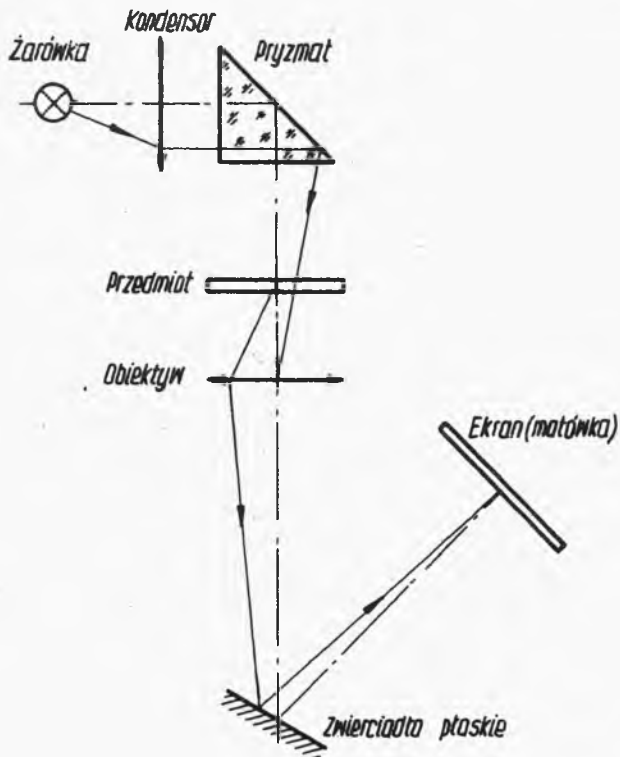




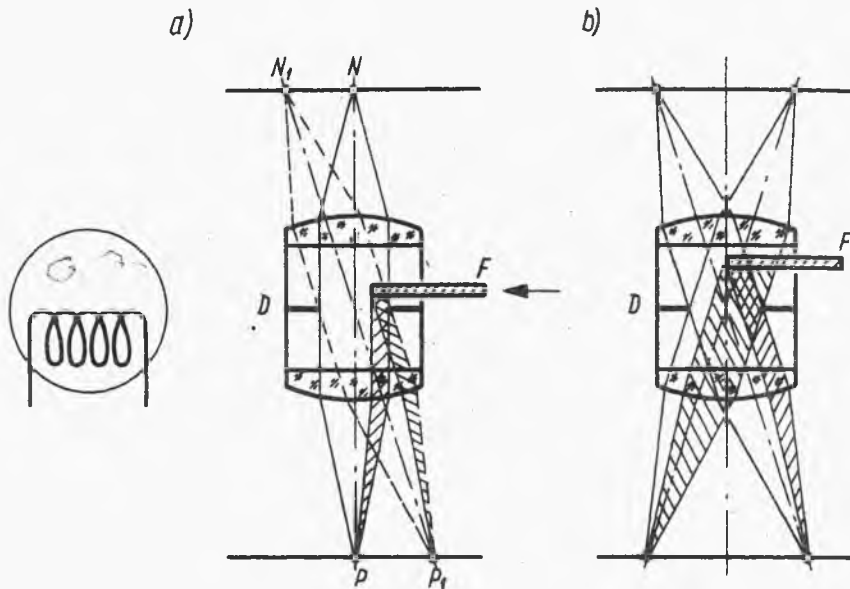
d)



e)



Rys.3.1a) układ projekcyjny pracujący w świetle przechodzącym (diaskop); b) układ projekcyjny pracujący w świetle odbitym (episkop); c) schemat układu projekcyjnego filmowego; d) układ projekcyjny wskaźnika galwanometru; e) schemat układu optycznego projektora warsztatowego

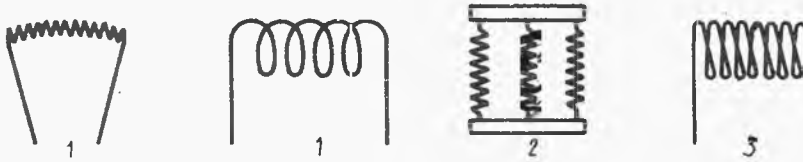


Rys.3.2. Zasada odwzorowania obrazu żarnika w źrenicy wejściowej obiektywu: a) obraz żarnika znajduje się w płaszczyźnie źrenicy wejściowej; b) obraz żarnika nie znajduje się w płaszczyźnie źrenicy wejściowej

źródła światła i współczynnika przepuszczalności układu, zaś odwrotnie proporcjonalne do kwadratów powiększenia projekcyjnego i otworu względnego układu. Otwór względny układu kondensator-obiektyw (oświetlona część źrenicy przez obraz źródła światła) zależy od powiększenia kondensatora, otworu względnego obiektywu i wymiaru źródła światła. Stąd dla maksymalnego wykorzystania źródła światła ich parametry powinny być tak dobrane, aby obraz źródła całkowicie wypełniał powierzchnię źrenicy wejściowej obiektywu. Wtedy powiększenie kondensatora i jego kąt aperturowy osiągają optymalne wartości. Dalsze zwiększanie powiększenia kondensatora (o ile luminacja źródła jest stała np. żarówka wstęgowa) nie powoduje wzrostu natężenia oświetlenia w płaszczyźnie ekranu. Wzrasta wtedy kąt aperturowy, lecz jednocześnie część strumienia świetlnego tracona jest na obudowie (obraz źródła światła wychodzi poza obszar źrenicy wejściowej obiektywu). Jeśli natomiast obraz źródła jest mniejszy od średnicy źrenicy, to jak wykazuje np. rys.3.2a do ekranu nie dojdzie cały (możliwy do wykorzystania) strumień świetlny (ist-

nieje pewien procent cienia wynikający z niecałkowitego wykorzystania przysłony aperturowej obiektywu projekcyjnego). W tym przypadku powiększenie kondensora i jego kąt aperturowy są za małe.

Zagadnienia analizy optymalnego powiększenia kondensora stają się skomplikowane gdy luminancja źródła nie jest stała, co zachodzi przy najczęściej stosowanych żarowych źródłach światła o żarnikach w postaci skrętek (rys.3.3). Luminancja samej skrętki ma określoną wartość ( $15 \div 30$ ) Mnt, natomiast obszaru między skrętkami - zero. Wtedy źródło światła charakteryzuje luminancja średnia. Teoretycznie można skonstruować



Rys.3.3. Rodzaje żarników w postaci skrętek

kondensor o takim powiększeniu aby sam obraz skrętki pokrył całą źrenicę wejściową obiektywu (optymalne rozwiązanie z punktu oświetlenia), lecz ograniczenia praktyczne (aberracja kondensora, trudności justowania, znaczne gabaryty) eliminuje to rozwiązanie. Stąd też powiększenie kondensora najczęściej wynosi

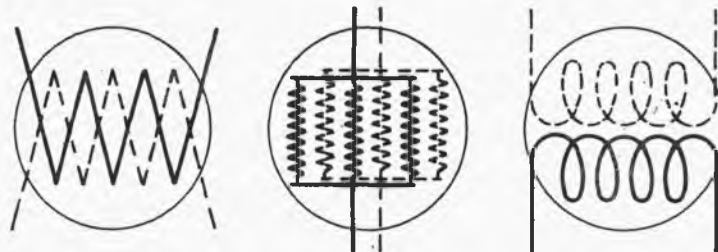
$$\beta_k = -\frac{\Phi_z}{d} = -\frac{\Phi_z}{\sqrt{a^2 + b^2}},$$

gdzie:  $\Phi_z$  - średnica źrenicy wejściowej obiektywu,

$d$  - przekątna źródła światła o wymiarach  $a \times b$ .

Dobieranie odpowiedniego typu kondensora przeprowadza się uwzględniając jego powiększenie i aperturę. W celu lepszego wykorzystania strumienia świetlnego ustawia się z tyłu za źródłem światła wklęsłe zwierciadło ze środkiem krzywizny w płaszczyźnie źródła. Wówczas obraz źródła dany przez zwierciadło leży również w płaszczyźnie źródła, przy czym ustawia się położenie środka krzywizny zwierciadła tak, aby obraz źródła wypełniał wolne miejsca źrenicy (rys.3.4). Źródła światła stosowane do projekcji charakteryzują się wydajnością świetlną. W tabl.1

podano przykładowo wartości strumienia świetlnego i luminancji dla różnych typów źródeł.



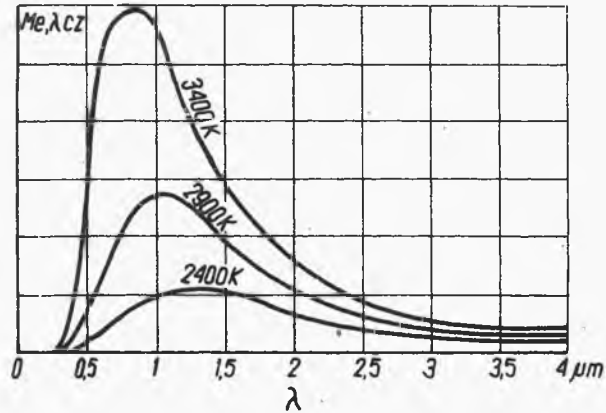
Rys. 3.4. Sposoby wypełnienia przez obraz żarnika wolnych miejsc źrenicy wejściowej obiektywu

Tablica 1

Typ żarnika wg rys. 3.3	Rodzaj źródła	Wydajność świetlna lm/W	Luminancja Mnt
1	zwykła żarówka	6	10
2	żarówka projekcyjna	10	15
3	żarówka halogenowa	30	30
	lampa ksenonowa	20	90 ÷ 700

Najczęściej stosowane w projekcji źródło światła jest termicznie wzbudzonym ciałem stałym (głównie wolfram), którego widmo jest ciągłe i o charakterystyce zbliżonej do widma ciała czarnego, przy czym przez ciało czarne rozumie się ciało całkowicie pochłaniające padającą nań energię niezależnie od długości fali i kierunku padania. Strumień energetyczny (emitancja) wysyłany przez ciało zależy głównie od długości fali i temperatury. Im temperatura ciała jest wyższa tym większa jest moc wypromieniowana przez ciało (proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury) i obszar maksymalnej gęstości promieniowania przesuwa się w stronę fal krótszych (rys. 3.5) (tzw. prawo Wiena). Czyli im większa jest temperatura ciała tym więcej energii przypada na zakres widzialny. Trzy pierwsze typy źródeł podane w tabl. 1 stanowią główną grupę lamp projekcyjnych o żarniku wolframowym. Dwie pierwsze z nich różnią się w zasadzie geometrią żarnika, przy czym większa luminancja żarówki projekcyjnej

osiągnięta jest dzięki bardziej zwartej jego budowie. Podczas eksploatacji tych lamp wolfram paruje z żarnika, powodując zardymianie bańki lampy (normalne zużycie lampy). Temperatura



Rys.3.5. Zależność monochromatycznej gęstości emitancji od temperatury ciała promieniującego

barwowa, tzn. temperatura ciała czarnego wyrażona w stopniach Kelvina, przy której promieniowanie danego ciała i ciała czarnego mają taki sam lub zbliżony skład widmowy, takich lamp wynosi ok. 2850 K. Trzeci typ - lampy halogenowe wypełnione są parami pierwiastków grupy chlorowców (np. jodu). Następuje chemiczne wiązanie się par wolframu i jodu, w wyniku którego powstaje związek, który pod wpływem wysokiej temperatury (w pobliżu żarnika) rozkłada się ponownie na wolny jod i wolfram. Powoduje to regenerację żarnika przedłużając w ten sposób żywotność lampy oraz radykalnie zmniejsza osadzenie się wolframu na ściankach lampy (straty świetlne). Ponieważ proces ten wymaga wysokich temperatur gazu w całej objętości, lampy te mają: zmniejszone gabaryty, bańkę wykonaną ze szkła kwarcowego oraz podwyższoną temperaturę barwową dzięki czemu ich luminancja sięga rzędu 30 Mnt. Najbardziej efektywną lampą projekcyjną jest lampka ksenonowa. Jest to wysokościenne lampka wyładowcza wypełniona ksenonem o ciśnieniu rzędu kilkudziesięciu atmosfer. Charakterystyka widmowa tej lampy niewiele różni się od widma ciała czarnego w temperaturze 5200 K. Ponieważ maksimum czułości oka przypada dla  $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$ , to z prawa Wiena

( $T \lambda_{\max} = 2896 \mu\text{m K}$ ) najodpowiedniejszą temperaturą dającą maksimum energii dla tej długości fali jest  $T \approx 5200 \text{ K}$ . Promieniowanie takiego ciała umownie nazwano światłem białym. Wysoka luminancja osiągnięta jest dzięki małym wymiarom łuku gazu. Wyżej wymienione właściwości tej lampy mają szczególne znaczenie przy projekcji filmów barwnych. Przeszkodą do powszechnego stosowania tych lamp, oprócz rozbudowanego układu zasilania, są małe wymiary łuku gazów wymagające skomplikowanych układów kondensorowych.

Dane w tabl.1 dotyczą warunków normalnej pracy źródeł tj. dla ustalonej temperatury barwowej. Jak już wspomniano luminancja źródła wyraźnie zmienia się z temperaturą barwową. Można zatem zmieniać ją poddając źródło światła zabiegom "przewoltowania i niedowoltowania". Źródło światła nie pracuje wtedy w normalnych warunkach co wpływa na czas pracy źródła. W pierwszym przypadku osiąga się wzrost luminancji kosztem skrócenia czasu pracy, w drugim przypadku odwrotnie.

### 3. OPIS STANOWISKA

Na ławie optycznej umieszcza się kolejno na przesuwanych konikach: zwierciadło wklęsłe, lampę projekcyjną, kondensor z pojemnikiem na ramkę z przeźroczem, obiektyw. Poza ławą w określonej odległości umieszczony jest ekran. Każdy z elementów można przesuwac wzdłuż ławy na konikach oraz regulować jego wysokość w celu ustawienia układu projekcyjnego wzdłuż osi optycznej. Lampę projekcyjną zasila się napięciem stabilizowanym.

### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

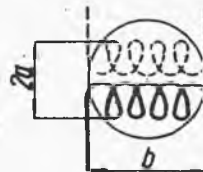
Zadanie: Obliczyć układ projekcyjny dla znanych: ogniskowej obiektywu projekcyjnego  $f'_{ob}$  i podstawie ekranu A.

Parametry układu należy obliczyć dla maksymalnego oświetlenia ekranu. Dobrać odpowiedni kondensor. Obliczenia fotometryczne przeprowadzić dla zmierzonej uprzednio luminancji żarówki.



Powiększenie kondensora

$$\beta_k = - \frac{\Phi_z}{\sqrt{4a^2 + b^2}}.$$



Średnica źrenicy wejściowej

$$\Phi_z = \frac{f'_{ob}}{N_{ob}}.$$

Położenie żarnika lampy projekcyjnej  $s_k$  i ogniskową kondensora otrzymuje się rozwiązując układ równań:

$$\beta_k = \frac{p'_k}{p_k}$$

$$\frac{1}{p'_k} - \frac{1}{p_k} = \frac{1}{f'_k}$$

$$s_k = p_k + S_{H_k}$$

Wymagana apertura kondensora wynosi

$$\sin u_k = \beta_k \sin u'_k \approx \beta_k \frac{y}{S_{ob}},$$

gdzie  $y$  - połowa przekątnej formatu przezrocza.

Luminancja żarówki  $L$

$$L = \frac{I}{S} \quad [\text{nt}],$$

gdzie:  $I$  - zmierzona światłość  $[\text{od}]$ ,

$S$  - powierzchnia żarnika.

Luminancja żarówki z zwierciadłem  $L_z$

$$L_z = \frac{L + \rho L}{2} \quad [\text{nt}],$$

gdzie  $\rho$  - współczynnik odbicia zwierciadła.

Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie obrazu

$$E' = \frac{\pi}{4} \tau \frac{L_z}{(N \beta_{ob})^2} \quad [\text{lx}]$$



Współczynnik przepuszczalności układu  $\tau$

$$\tau = 0,99^g \cdot \prod_{i=1}^n (1 - r_i),$$

$$r_i = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2,$$

gdzie  $g$  - suma grubości szkła [cm].

Liczbę otworu układu projekcyjnego oblicza się w następujący sposób

$$S = 2 \beta_k^2 a b = \frac{\pi D^2}{4},$$



stąd

$$D = 2 \beta_k \sqrt{\frac{2ab}{\pi}},$$

gdzie  $D$  jest średnicą zastępczej źrenicy wejściowej układu projekcyjnego  
czyli

$$N = \frac{f'}{D}.$$




U w a g a: Należy również obliczyć natężenie oświetlenia w płaszczyźnie ekranu bez stosowania zwierciadła wklęsłego.

Jak już wcześniej zaznaczono, dobór typu kondensora przeprowadza się w zależności od jego apertury i powiększenia. Dla tzw. kondensatorów "oszczędnych" (złożonych z soczewek płasko-wypukłych) dobór kondensora przeprowadza się uwzględniając głównie powiększenie kondensora (tabl.2).

W ćwiczeniu należy:

1. Wykonać obliczenia gabarytowe i fotometryczne układu projekcyjnego.
2. Zestawić układ wg obliczeń i sprawdzić jego parametry.

Tablica 2

Typ kondensora	Powiększenie	Apertura
	$\infty$	0,15
	$1 \div 4$	0,4
	$> 4$	0,4

## 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970, s.331-337.

Kruger M.Ja.: Sprawocznik konstruktora optiko-mechaniczeskich priborow. Leningrad 1968. s.169.

Kamler J., Mańk W.: Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie. WNT. Warszawa 1966.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Narysować i objaśnić typowy schemat układu projekcyjnego.

Rola kondensora w układzie projekcyjnym.

Od czego zależy natężenie oświetlenia na ekranie?

W jaki sposób uzyskuje się równomierność oświetlenia w płaszczyźnie ekranu?

## Ćwiczenie 4

# ZESTAWIANIE UKŁADU PRZEKAŹNIKA FOTOELEKTRYCZNEGO

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi obliczeniami i pomiarami fotoelektrycznymi oraz z budową prostego układu przekaźnika fotoelektrycznego, pracującego na zasadzie układu projekcyjnego. Daje on możliwość modulowania sygnału przekaźnika przez zmianę natężenia oświetlenia fotoelementu.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

#### 2.1. Ogólna charakterystyka przekaźnika fotoelektrycznego

Podstawowymi elementami przekaźnika fotoelektrycznego są: źródło światła, układ optyczny (ukierunkowujący wiązkę światła) oraz odbiornik fotoelektryczny. Zadziałanie fotoprzekaźnika spowodowane jest przez przerwanie lub osłabienie wiązki światła (jeżeli jest ono skierowane bezpośrednio na fotoodbiornik) bądź też przez światło padające na fotoelement po odbiciu od przedmiotu. W każdym z tych systemów, na odbiornik powinna padać możliwie duża ilość światła. Powinien zapewnić to układ optyczny, zbierający dużą część promieniowania źródła światła. Obliczenie układu optycznego polega na takim dobraniu elementów optycznych, aby, poza spełnieniem wymogów gabarytowych, strumień światła, docierający do odbiornika, miał wystarczającą moc - określoną przez czułość odbiornika oraz parametry układu elektrycznego. Określenia podstawowych pojęć fotometrycznych, potrzebnych przy obliczeniach energetycznych podane są w ćwiczeniu 3.

Ilość energii, docierająca do odbiornika, jest określona geometrią układu, pochłanianiem światła w układzie oraz odbiciem części światła na powierzchniach elementów optycznych. Bardziej szczegółowo omówiono to zagadnienie w pkt.4.

## 2.2. Źródło światła a odbiornik

W celu określenia reakcji odbiorników promieniowania najczęściej używa się pojęć fotometrycznych (tzn. wielkości, odnoszących się do widzialnej części widma promieniowania). Monochromatyczna gęstość reakcji dowolnego odbiornika (charakteryzująca widmowy rozkład reakcji odbiornika w rozpatrywanym zakresie promieniowania) prawie nigdy nie pokrywa się z krzywą spektralnej czułości oka. Może to prowadzić do poważnych nieporozumień, zwłaszcza gdy odbiornik jest czuły na promieniowanie spoza zakresu widzialnego (np. promieniowanie nadfioletowe lub podczerwone). Ponieważ pojęcia fotometryczne dotyczą tylko promieniowania widzialnego (w zakresie  $0,38 - 0,76 \mu\text{m}$ ) więc jeśli na odbiornik pada fala elektromagnetyczna o długości np. większej niż  $0,76 \mu\text{m}$  to, wychodząc z pojęć fotometrii, naświetlenie odbiornika będzie równe zeru, jednak reakcja odbiornika wystąpi. Jeśli zaś odbiornik jest czuły tylko na promieniowanie podczerwone, a oświetlimy go światłem widzialnym, to - mimo, że na odbiornik pada energia o określonym natężeniu - odbiornik nie wykaże żadnej reakcji. Jednostki i wielkości fotometryczne stosuje się jednak, ponieważ upraszcza to obliczenia. Uwzględniona jest w nich reakcja odbiornika w zakresie promieniowania widzialnego, zaś wiele przyrządów i odbiorników przeznaczonych jest do obserwacji wizualnej, oświetlenia, lub sygnalizacji i pomiarów związanych z człowiekiem. Rozpatrywanie reakcji odbiornika z punktu widzenia fotometrii ma tylko wtedy sens, gdy założymy, że rozkład spektralny promieniowania padającego na odbiornik nigdy nie ulega zmianie. Z tego względu wzorcowanie np. komórek fotoelektrycznych odbywa się przy ustalonym, wzorcowym źródle promieniowania tzw. źródle A - ustalonym przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową. Promieniowanie tego źródła odpowiada promieniowaniu ciała czarnego w temperaturze 2854 K. Dla układów, w których energia padająca na odbiornik ma inny rozkład spektralny niż źródło A - wartość czułości po-

dana w atęście nie jest prawdziwa - należy wtedy wywzorcować odbiornik dla nowego źródła światła, lub - jeśli znana jest jego monochromatyczna gęstość reakcji - można posłużyć się rachunkiem obliczeń energetycznych. Są one jednak skomplikowane i pracochłonne. Jednym z rodzajów fotoelementów - dogodnym w zastosowaniu przy pomiarach fotometrycznych - jest fotoogniwo selenowe. Ma ono korzystną charakterystykę widmową, w której maksimum czułości prawie pokrywa się z maksimum czułości spektralnej oka. Rozkład czułości spektralnej fotoelementu można dopasować do rozkładu czułości oka ludzkiego przez zastosowanie na fotoelemencie odpowiednich filtrów o pochłanianiu selektywnym. Zmieniając w ten sposób względną gęstość monochromatyczną reakcji odbiornika można otrzymać obiektywny miernik wielkości fotometrycznych.

W obliczeniach szacunkowych, zmierzających do określenia sygnału elektrycznego odbiornika fotoelektrycznego, wychodzi się na ogół z następujących danych wejściowych: luminancja źródła światła [ $\text{lm/srd m}^2$ ], całkowity strumień świetlny [ $\text{lm}$ ] lub wydajność świetlną [ $\text{lm/w}$ ] oraz czułość odbiornika określona dla punktu A, odpowiadającego temperaturze typowych wolframowych żarników źródeł światła (w innych typach żarników np. halogenowych - temperatury źródeł są inne). Niektóre dane liczbowe dotyczące charakterystyk różnych źródeł światła podane są w ćwiczeniu 3.

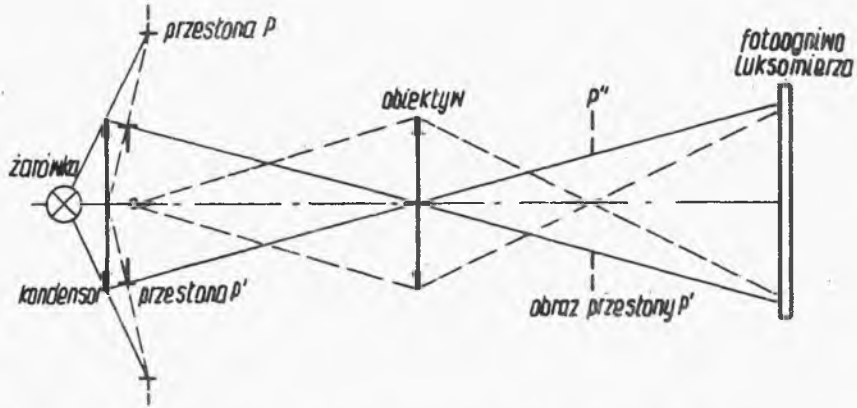
We wspomnianych obliczeniach należy oczywiście uwzględnić również współczynnik przepuszczalności układu (zależny od pochłaniania światła w elementach układu, odbicia na powierzchniach elementów optycznych itp.). Uzyskane wyniki są przybliżone - na ogół umożliwiają jednak wstępne projektowanie układu.

### 3. UKŁAD OPTYCZNY PRZEKAŹNIKA

W ćwiczeniu zestawiany i badany jest układ przekaźnika fotoelektrycznego oparty na zasadach typowego układu projekcyjnego (patrz ćwiczenie 3). Układ składa się z następujących elementów (rys.4.1):

- źródła światła,
- kondensora,

- przysłony  $P'$  umieszczonej - tak jak okienko kadrowe w układzie projekcyjnym - w pobliżu kondensora,
- obiektywu.



Rys.4.1. Schemat układu przekąźnika fotoelektrycznego

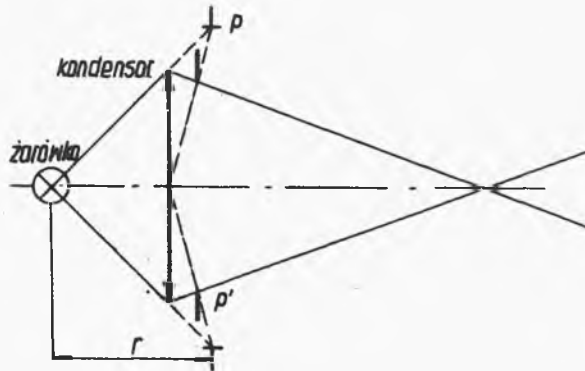
W celu zachowania równomierności oświetlenia obraz źródła światła (żarnika) dany przez kondensator powinien znaleźć się w źrenicy wejściowej obiektywu (obiektywem jest układ złożony z kilku soczewek) - a tym samym w płaszczyźnie diafragmy aperturowej obiektywu. Niektóre obiektywy fabryczne mają wbudowaną irtysową przysłonę aperturową. Zmniejszając jej średnicę można na przysłonie zobaczyć obraz żarnika. Jako element pomiarowy wykorzystuje się lukso mierz z fotoogniwem selenowym.

Za obiektywem w płaszczyźnie obrazu przysłony można umieścić np. ruchome ostrze, umożliwiające liniowe przysłanianie przysłony co powoduje zmianę strumienia światła.

#### 4. OBLICZENIE STRUMIENIA ŚWIETLNEGO PRZECHODZĄCEGO PRZEZ UKŁAD

Elementem ograniczającym geometryczne wymiary wiązki światła przechodzącego przez układ optyczny jest przysłona  $P'$  umieszczona po stronie obrazowej kondensora. W celu określenia strumienia światła wchodzącego do układu konieczna jest znajomość położenia i wymiarów obrazu tej przysłony po drugiej stronie kondensora - w przestrzeni, w której znajduje się żarówka

- czyli w przestrzeni przedmiotowej kondensora. Wielkość ta określa czynny otwór kondensora (rys.4.2).



Rys.4.2. Określenie czynnego otworu kondensora

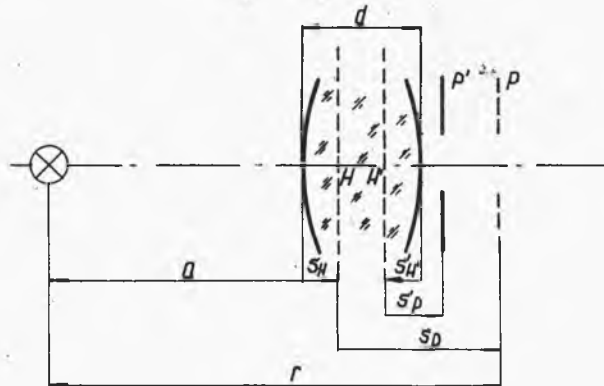
Uwzględniając fakt, że grubość kondensora na ogół nie jest wielkością pomijalną należy obliczenia fotometryczne prowadzić w następującej kolejności:

a) obliczenie odległości  $r$  obrazu przysłony od żarownika w przestrzeni przedmiotowej kondensora (rys.4.3)

$$r = a + s_H + s_p, \quad (1)$$

gdzie  $s_p$  należy obliczyć ze wzoru

$$\frac{1}{s'_p} - \frac{1}{s_p} = \frac{1}{f'_k}; \quad (2)$$



Rys.4.3. Wielkości charakterystyczne kondensora

b) obliczenie powierzchni  $F$  przysłony  $P$  w przestrzeni przedmiotowej kondensora

Dana jest powierzchnia  $F'$  przysłony rzeczywistej  $P'$ . Ponieważ znajduje się ona w przestrzeni obrazowej kondensora, więc powierzchnia  $F$  przysłony  $P$  jest zależna odwrotnie proporcjonalnie od kwadratu powiększenia kondensora  $\beta_k$  (liczonego zgodnie z kierunkiem biegu promieni światła)

$$F = F' \left( \frac{1}{\beta_k} \right)^2 = F' \left( \frac{s_p}{s'_p} \right)^2; \quad (3)$$

c) obliczenie natężenia oświetlenia  $E_p''$  w płaszczyźnie  $P''$  obrazu przysłony tworzonego przez obiektyw projekcyjny (powiększonego  $\beta_{ob}$ -krotnie)

$$E_p'' = E_p \frac{1}{\beta_k^2} \frac{1}{\beta_{ob}^2}, \quad (4)$$

- gdzie:  $E_p$  - natężenie oświetlenia w płaszczyźnie przysłony  $P$   
 $\beta_k$  - powiększenie poprzeczne obrazu przysłony utworzonego przez kondensator (zgodnie z kierunkiem biegu światła),  
 $\beta_{ob}$  - powiększenie poprzeczne obrazu przysłony utworzonego przez obiektyw,  
 $\tau$  - współczynnik przepuszczania układu optycznego zależny od strat przy odbiciu światła od powierzchni optycznych i absorbcji światła przez szkło soczewek.

Wartość natężenia oświetlenia  $E_p$  należy obliczyć po pomiarzeniu światłości  $I$  żarówki za pomocą luksomierza.

Pomiar światłości  $I$

$$I \text{ [cd]} = E l^2 \text{ [lx m}^2\text{]}, \quad (5)$$

gdzie:  $E$  - z odczytu wskazania luksomierza,

$l$  - dowolna odległość luksomierza od żarnika np. 1 m.

Po określeniu światłości można obliczyć  $E_p$

$$E_p = \frac{I}{r^2},$$

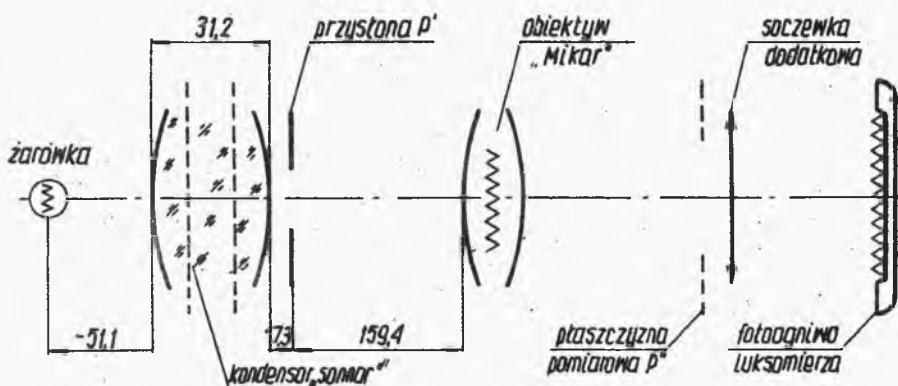


gdzie  $r$  - odległość przysłony  $P$  od żarnika obliczona w punkcie  $a$ .

## 5. UKŁAD OPTYCZNY WYKORZYSTYWANY W ĆWICZENIU

Użyte elementy i ich parametry oraz parametry układu (rys. 4.4):

- kondensator "Sonnar":  $f' = 52$ ,  $s'_{F'} = 50,4$ ,  $s_F = -27,6$ ,
- obiektyw "Mikar":  $f' = 54,2$ ,  $s'_{F'} = 48,6$ ,  $s_F = -50,4$ ,
- powierzchnia otworu przysłony  $P' F' = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ,
- powiększenie obrazu  $P''$  przysłony  $P'$  dane przez obiektyw "Mikar"  $\beta_{ob} = -0,5^x$ ,
- zasilanie żarówki 6 V, 20 W,
- napięcie stabilizowane  $\pm 3\%$ ,
- współczynnik przepuszczania układu optycznego  $\tau = 0,3$ .



Rys.4.4. Układ laboratoryjny przekaźnika fotoelektrycznego

## 6. PRZEBIEG ĆWICZENIA

1. Pomierzyć światłość  $I$  żarówki luksomierzem według punktu 4d.
2. Obliczyć powierzchnię obrazu  $P$  przysłony  $P'$  danego przez kondensator w przestrzeni przedmiotowej (przestrzeni żarówki) wg punktu 4a, 4b.

3. Obliczyć natężenie oświetlenia  $E_p$  wg pkt. 4c.

4. Zestawić układ optyczny wg punktu 5 (bez soczewki dodatkowej).

5. Pomierzyć luksomierzem natężenie oświetlenia wiązki przechodzącej przez układ i padającej na fotoogniwo ustawione w takiej odległości, aby możliwie duża plama świetlna nie była większa niż powierzchnia fotoogniwa i obliczyć natężenie oświetlenia  $E_p$  znając powierzchnię czynną fotoogniwa  $13,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

6. Zbudowany układ optyczny przekaźnika uzupełnić:

- soczewką dodatkową rzutującą obraz źrenicy wyjściowej obiektywu "Mikar" (wraz ze znajdującym się w niej obrazem żarnika) na fotoogniwo luksomierza zamocowane na stanowisku (ogniskową soczewki dobrać doświadczalnie),
- zamocowanym na stoliku pomiarowym ostrzem ustawionym w płaszczyźnie obrazu  $P$  przysłony.

7. Wykonać wykres zmian natężenia oświetlenia  $E$  (mierzonego luksomierzem) w funkcji przesunięć stolika pomiarowego oraz wyznaczyć czułość układu.

8. Wykonać protokół zawierający: schemat układu optycznego, obliczenia, wyniki pomiarów, wykres i wnioski dotyczące porównania wyników obliczeń i pomiarów.

## 7. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.

Oleszyński T.: Miernictwo techniki świetlnej. PWN. Warszawa 1957.

Kamler J., Mańk W.: Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie. WNT. Warszawa 1966.

## 8. PYTANIA KONTROLNE

Podstawowe wielkości świetlne, ich jednostki i zależności między nimi:

- strumień świetlny,
- światłość,

- emitancja świetlna,
- luminancja,
- natężenie oświetlenia.

Zasada pracy układu fotoprzełącznika.

Zagadnienia współpracy odbiornika fotoelektrycznego ze źródłem światła.

Zasady wzorcowania fotoodbiorników.

Dopasowanie monochromatycznej gęstości reakcji odbiornika do celów fotometrycznych.

Zasady obliczeń fotometrycznych.

## Ćwiczenie 5

### ZESTAWIANIE UKŁADU MIKROSKOPU FOTOELEKTRYCZNEGO ODCZYTOWEGO

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania, budową i zastosowaniem odczytowych mikroskopów fotoelektrycznych, a w części praktycznej zapoznanie się ze sposobami współdziałania układów optycznych i elektronicznych, a także - przez ustawienie skomplikowanego układu - z praktycznym modelowaniem przyrządu optycznego.

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

##### 2.1. Wstęp

Zbudowanie i zastosowanie mikroskopów fotoelektrycznych miało bezpośredni wpływ na poprawienie jakości pomiarów linio-

wych. Wpływ ten przejawia się przede wszystkim zmniejszeniem niepewności naprowadzenia osi celowej mikroskopu na kreskę podziałki. Dla mikroskopów wizualnych błąd wycelowania jest rzędu  $0,3 \mu\text{m}$ . Stosując mikroskopy fotoelektryczne uzyskuje się niepewność nastawienia w granicach  $0,02 \mu\text{m}$ . Ponadto na wyjściu mikroskopu fotoelektrycznego otrzymuje się sygnał elektryczny, który może być wykorzystany do automatycznego zapisu wyników pomiarów lub sterowania maszyny podziałkowej. Wprowadzenie automatyzacji pozwala na skrócenie czasu procesów pomiarowych, zmniejszenie błędów pomiarów, odciążenie człowieka od długotrwałych seryjnych operacji pomiarowych i pominięcie wpływu organizmu ludzkiego na wyniki pomiarów (wpływ temperatury ciała ludzkiego, błędy subiektywne itp.).

## 2.2. Opis mikroskopów

Znane są dwa podstawowe układy mikroskopów fotoelektrycznych: układ impulsowy i układ amplitudowy.

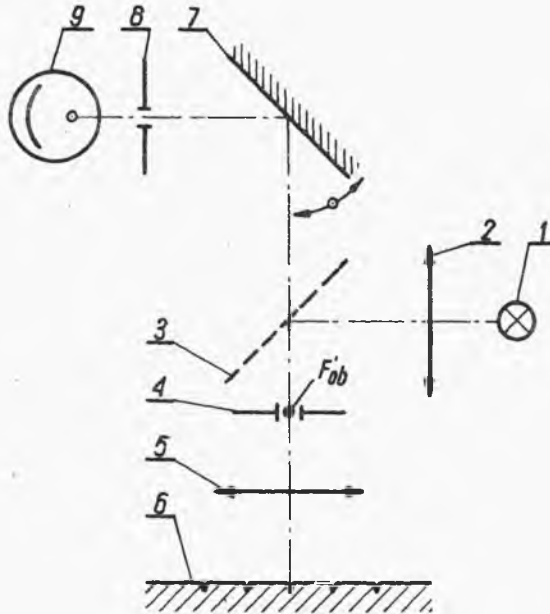
### 2.2.1. Układ impulsowy (rys.5.1)

Obraz źródła światła 1 dany przez kondensor 2 i lustro półprzepuszczalne 3 tworzy się w źrenicy obiektywu 4, a następnie przez obiektyw 5 oświetla podziałkę 6. Obraz podziałki 6 dany przez obiektyw 5 i lustro 7 tworzy się w płaszczyźnie szczeliny 8.

Światło padające na podziałkę zostaje odbite od podzielnicy w kierunku obiektywu 5, natomiast miejsca, w których narysowane są kreski (ze względu na swój kształt) odbijają światło w różnych kierunkach.

W płaszczyźnie szczeliny 8 utworzy się jasny (z ciemnymi kreskami) obraz podzielnicy 6. Lustro 7 wykonuje ruchy oscylacyjne (zaznaczone strzałką) dookoła osi prostopadłej do płaszczyzn rysunku. Ruch lusterka powoduje przesuwanie się obrazu podzielnicy 6 w płaszczyźnie szczeliny 8. Ponieważ szerokości obrazu kreski i szczeliny są równe oraz obraz kreski i szczelina są równoległe, w momencie gdy obraz kreski pokryje się ze szczeliną, na odbiornik fotoelektryczny 9 nie pada światło. Powoduje to zmianę oporności odbiornika i zmianę przeprowadzonego prądu. Zakres ruchu obrazu podziałki 6 w płaszczyźnie

szczeliny 8 nazywa się "obszarem zmiatania". Przyjmuje się, że środek obszaru zmiatania i punkt węzłowy obrazowy obiektywu wyznaczają oś celową mikroskopu. Lustro 7 razem z mechanizmem napędowym pełni rolę modulatora. Jako mechanizmu napędowego używa się przeważnie ramki z przewodnika zawieszzonej w polu

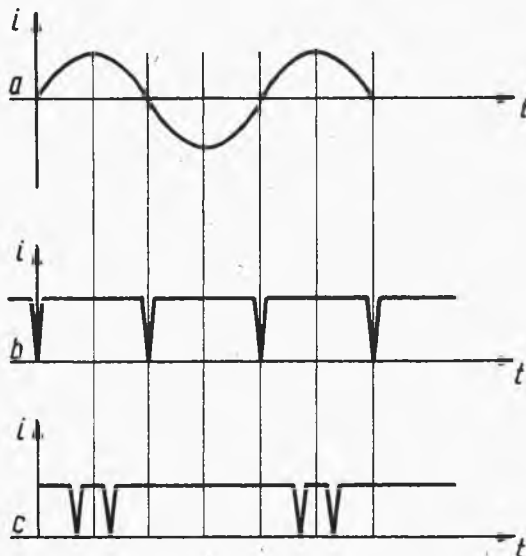


Rys.5.1. Schemat mikroskopu impulsowego

magnetycznym (konstrukcja podobna do mierników elektrycznych lub pętliczek do oscylografów). Częstotliwość drgań lusterka 7 (ok. 50 Hz) powoduje, że czas przebiegu obrazu kreski podziałki w płaszczyźnie szczeliny 8 wynosi 20 ms w jednym cyklu. Jeżeli czas i rozkład prędkości ruchu obrazu jest powtarzalny w każdym cyklu, to obszar zmiatania ma stałe granice i niezmiennie położenie. Stałe jest wtedy także położenie osi celowej mikroskopu.

Rys.5.2a przedstawia przebieg prądu modulatora w funkcji czasu. Rys.5.2b pokazuje przebieg prądu odbiornika fotoelektrycznego 9 przy założeniu, że środek szczeliny 8 pokrywa się ze środkiem obszaru zmiatania oraz, że kreska podziałki znajduje się na osi celowej mikroskopu. Na rys.5.2c przedstawiono

przebieg prądu odbiornika 9 przy założeniu, że środek szczeliny 8 pokrywa się ze środkiem obszaru zamiatania natomiast kreska podziałki jest przesunięta w stosunku do osi celowej.



Rys.5.2. Przebiegi prądowe w mikroskopie impulsowym

Z porównania rysunków 5.2a,b i 5.2a,c widać wyraźnie zależność przesunięcia minimum prądu odbiornika 9 (w stosunku do fazy prądu modulatora) od położenia kreski podziałki (w stosunku do osi celowej mikroskopu). Powyższa zależność wykorzystywana jest przy automatyzowaniu naciągania i pomiarów przyzmiarów kreskowych. Stąd także często mikroskopy te nazywane są fazowo-impulsowymi.

### 2.2.2. Pole widzenia mikroskopu fotoelektrycznego

Obszar zamiatania odniesiony do podzielnicy przyzmiaru można uważać za "pole widzenia" mikroskopu. Można też określić pole widzenia mikroskopu fotoelektrycznego takim obszarem podzielnicy, w którym kreska podziałki zostanie "zauważona" przez mikroskop.

Pole widzenia omawianych mikroskopów zależy między innymi od dopuszczalnej niepewności wycelowania na kreskę przyzmiaru i waha się w granicach od 1 do 0,0002 mm.

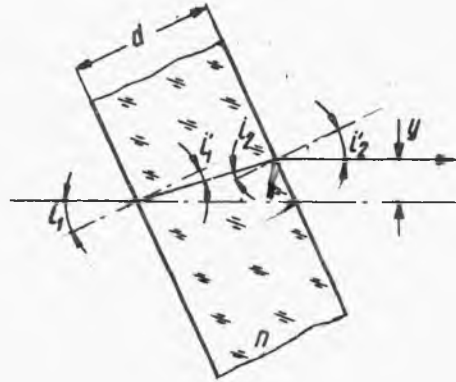
### 2.2.3. Powiększenie mikroskopu fotoelektrycznego

Powiększeniem mikroskopu fotoelektrycznego nazywa się stosunek długości działki urządzenia odczytowego do długości działki o tej samej wartości znajdującej się w płaszczyźnie podzielnicy przyzmiaru. Powiększenia mikroskopów fotoelektrycznych dochodzą do 350 000 razy.

#### 2.2.4. Modulatory

Przedstawiony na rysunku 5.1 modulator składa się z lustra i mechanizmu napędowego. W innych rozwiązaniach zamiast drugiego lustra 7 stosuje się szczelinę, która wprawiana jest w ruch za pomocą modulatora elektrostatycznego. Jeszcze inne - wykorzystują zależność przesunięcia promieni przez szklaną płytkę płaskorównoległą od kąta padania promieni i ten typ modulatora jest omówiony bliżej.

Jeśli na pierwszej powierzchni płytki (rys.5.3) pada promień pod kątem  $i_1$ , to po przejściu do szkła załamie się pod kątem  $i'_1$  i dalej padnie na drugą powierzchnię płytki pod kątem  $i_2 = i'_1$ . Po wyjściu z płytki promień ten będzie biegł równoległe do promienia padającego. Będzie on jedynie przesunięty o wielkość "y". Wielkość przesunięcia "y" zależy od współczynnika załamania szkła "n", z którego zrobiona jest płytka, od grubości "d" i kąta padania "i". Wzór ujmujący tę zależność ma następującą postać



Rys.5.3. Bieg promienia świetlnego przez płytkę płaskorównoległą

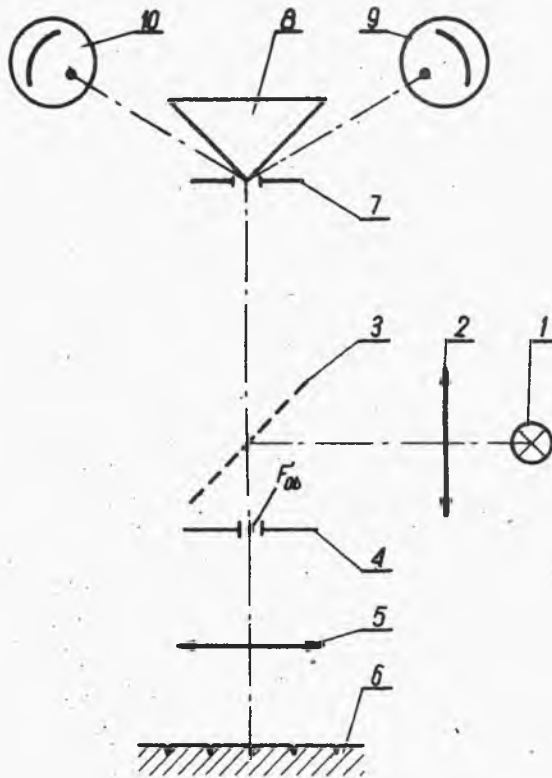
$$y = d \cdot \frac{\sin(i - i')}{\cos i'} \quad (1)$$

Z analizy wzoru wynika, że zależność  $y = f(i)$  nie jest liniowa.

#### 2.2.5. Układ amplitudowy

Amplitudowy układ mikroskopu fotoelektrycznego (rys.5.4) różni się od mikroskopu impulsowego jedynie w części odbiornika. Układ oświetlający i obiektyw są jednakowe dla obu mikroskopów. Zasada działania jest następująca: ciemny obraz kreski podziałki 6 utworzony przez obiektyw 5 w płaszczyźnie szczeliny 7 rozdzielony jest przez pryzmat 6 na dwie części. Sze-

rokość szczeliny 7 równa jest podwójnej szerokości obrazu kreski. Jeżeli krawędź dzieląca pryzmatu 8 znajdzie się w środku obrazu kreski - do fotokomórek 9 i 10 dociera jednakowa ilość energii. Fotokomórki połączone są w układzie mostkowym i miernik wskazuje zero. Przesunięcie obrazu kreski z krawędzi pryzmatu powoduje zmianę oświetlenia fotokomórek i wychylenia miernika. Głowica fotoelektryczna mikroskopu (elementy 7, 8, 9 i 10) budowana jest w różnych układach, np. zamiast



Rys.5.4. Schemat mikroskopu amplitudowego

fotokomórek 9 i 10 mogą być lustra, które kierują światło na jedną fotokomórkę umieszczoną nad pryzmatem 8. Takie rozwiązanie wymaga dodatkowego modulatora (np. płaska tarcza z silnikiem) zasłaniającego na przemian lewą lub prawą gałąź głowicy. Pole widzenia amplitudowego mikroskopu fotoelektrycznego równe jest dwóm grubościom kreski przymiaru i wynosi od kilku do kil-



kunastu mikrometrów. Rozszerzenie pola widzenia możliwe jest przez umieszczenie między przedmiotem i szczeliną obrotowej płytki płasko-równoległej.

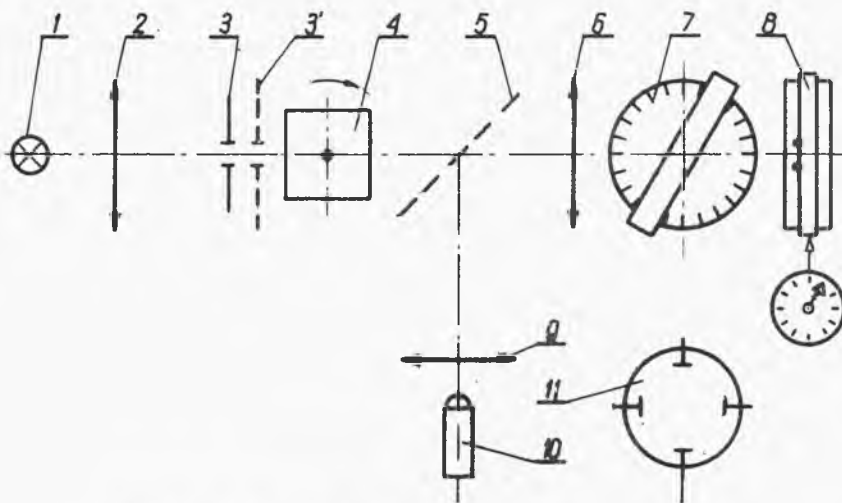
### 2.3. Zastosowanie

Mikroskopy fotoelektryczne używane są głównie w maszynach pomiarowych lub podziałowych, a budowa jednych i drugich jest podobna. Jako przykład można tu przytoczyć automatyzację pomiaru na komparatorze Abbego. Pomiar metodami wizualnymi podziałki o 1000 kreskach trwa około 10-12 godzin, niepewność nastawienia na kreskę jest rzędu  $0,3 \div 0,4 \mu\text{m}$ . Po zautomatyzowaniu komparatora pomiar trwa 20 minut (łącznie z zarejestrowaniem wyników), przy czym błędy pomiaru nie przekraczają  $0,15 \mu\text{m}$ . W przypadku maszyny podziałowej w miejsce jednego z mikroskopów komparatora Abbego mocuje się nóż do nacinania podziałki. Drugi mikroskop służy jako celowniczy przy nastawianiu na kreski wzorca. Błędy podziałek nacinanych na tego typu automatach wynoszą  $0,3 \mu\text{m}$  na 200 mm podziałki. Ponadto znając błędy wzorca, wg którego nacina się podziałkę można na drodze elektronicznej, wprowadzać korektę położenia poszczególnych kresek tak, że nowa podziałka jest wolna od błędów rozmieszczenia kresek wzorca, z którego została skopiowana.

### 3. OPIS STANOWISKA (rys.5.5)

Źródło światła 1 (żarówka 6V) oraz kondensator 2 tworzą oświetlacz, który oświetla szczelinę o regulowanej szerokości 3. Obraz szczeliny 3 dany przez pryzmat 4 tworzy się w płaszczyźnie 3'. Pryzmat 4 obracając się wokół osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku powoduje (przeciwległe ściany pryzmatu tworzą płytkę płasko-równoległą) przesuwanie się obrazu szczeliny 3 w płaszczyźnie 3'. Pryzmat 4 umieszczony jest na osi silnika synchronicznego zasilanego z sieci 220 V/50 Hz. Przedmiotem dla obiektywu 6 jest przesuwający się obraz 3'. Obraz 3' dany przez obiektyw 6 tworzy się na płytce 8. Płytkę 8 pokryta jest powłoką metaliczną lustrzaną i tak ustawiona, że

odbija światło z powrotem w kierunku obiektywu 6. Obrót pryzmatu 4 powoduje ruch obrazu kreski po powierzchni płytki 8.



Rys.5.5. Schemat stanowiska pomiarowego

Na płytce 8 (prostopadle do płaszczyzny rysunku i równoległe do obrazu kreski 3) naniesiona jest rysa. Jeżeli obraz kreski pokryje się z rysą światło nie będzie odbite w kierunku obiektywu. Fakt oświetlenia obiektywu światłem odbitym od płytki 8 zauważony jest przez fotodiodę 10 połączoną ze współrzędną "Y" lampy oscyloskopowej. Lustro półprzepuszczalne 5 i kolektyw 9 są tak ustawione, że obraz płytki 8 dany przez obiektyw 6 tworzy się na kolektywie 9. Natomiast obraz źrenicy obiektywu 6 dany przez kolektyw 9 powstaje na fotodiodzie 10.

Podstawę czasu w oscyloskopie należy dobrać tak, aby czas przebiegu obrazu kreski w płaszczyźnie płytki 8 (w obszarze zmiatania) równy był czasowi przebiegu na ekranie lampy oscyloskopu. Synchronizacja początku ruchu obrazu kreski i plamki na oscyloskopie dokonuje się przez sieć 220 V/50 Hz. Jeżeli obraz kreski podczas ruchu w obszarze zmiatania, trafi na rysę na płytce 8, wówczas fotodioda nie będzie oświetlona przez światło odbite i na oscyloskopie pojawi się "pik", którego szerokość zależna będzie od szerokości obrazu kreski 3 na powierzchni płytki 8, szerokości rysy na płytce 8 i długości obszaru

zamiatania. Płytką 8 umieszczona jest na przesuwym stoliku. Wielkość przesuwu stolika w płaszczyźnie prostopadłej do osi można mierzyć za pomocą czujnika zegarowego. Położenie obszaru zmiatania na powierzchni płytki 8 jest stałe. Przesuw płytki 8 powoduje względny ruch rysy w stosunku do obszaru zmiatania. Odpowiada to przesunięciu pika na ekranie oscyloskopu. Zgodnie z wzorem (1) przesunięcie promieni przez płytkę płasko-równoległą jest funkcją nieliniową kąta obrotu płytki. Liniiowość zachowana jest jedynie przy takim kącie obrotu, przy którym można przyjąć, że sinus kąta równy jest kątowi (słuszne dla małych kątów). Ponieważ obroty silnika napędzającego pryzmat 4 oraz prędkość przesuwu plamki na oscyloskopie są stałe w czasie, to przesuw plamki jest nieliniowo proporcjonalny do przesuwu obrazu szczeliny na powierzchni płytki 8. Powoduje to zmianę powiększenia mikroskopu wzdłuż obszaru zmiatania. W mikroskopach impulsowych dla uzyskania stałego powiększenia ruch płytki odbywa się wg określonego programu. W mikroskopie zestawianym na ćwiczeniach powyższa nieliniowość zostanie nieskompensowana.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1) zestawić na ławie optycznej mikroskop wg schematu omówionego w p.3. Przy zestawieniu mikroskopu należy zwrócić uwagę na: centralne ustawienie wszystkich elementów układu, położenie obrazów pośrednich w odpowiednich miejscach oraz na czystość poszczególnych elementów optycznych;

2) pomierzyć powiększenie mikroskopu dla dwóch długości podstawy czasu.

Powiększenie mikroskopu oblicza się jako stosunek dwóch wielkości:

a) długości 10 mm przesuwu pika na środku ekranu lampy oscyloskopowej,

b) odpowiadającej mu długości "a" przesuwu płytki 8 odczytanej na czujniku zegarowym,

c) powiększenie  $\beta = \frac{10}{a \text{ [mm]}}$  ;

3) zbadać nieliniowość przesunięcia promieni przez płytkę w funkcji kąta obrotu.

W układzie pokazanym na rys.5.5 ustawiona jest płytka płaskorównoległa 7. Płytką ustawioną jest na stoliku z mierzonym kątem obrotu. Odczytu kąta obrotu dokonuje się na urządzeniu odczytowym z noniusem. Wartość elementarnej działki wynosi 5'. Obrót płytki 7 powoduje przesunięcie obszaru zmiatania w stosunku do rysy na płytce 8. Przesunięcie to zależy od kąta obrotu płytki (wg wzoru (1)) i widoczne jest jako zmiana położenia pika na oscyloskopie. Powrót pika na poprzednie miejsce możliwy jest dzięki przesunięciu stolika z płytką 8. Wartość przesunięcia odczytuje się na czujniku zegarowym.

Nieliniowość przesunięcia obrazu kreski w obszarze zmiatania w stosunku do przesunięcia plamki na oscyloskopie i związana z tym zmiana powiększenia nie ma wpływu na błąd pomiaru ponieważ mikroskop używany jest tutaj jako wskaźnik zera.

## 5. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie powinno zawierać:

- 1) schemat układu optycznego mikroskopu zestawionego w czasie ćwiczenia,
- 2) wyniki pomiarów powiększenia mikroskopu,
- 3) wyniki pomiarów przesunięcia wprowadzanego przez płytkę w funkcji kąta obrotu:
  - a) tabela wyników,
  - b) wykres.

## 6. LITERATURA

Meister und Cichon: Feingeräte Technik. Nr 10, 1960.

Meister - Feingeräte Technik Nr 5, 1963.

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. PWN. Warszawa 1970.

## 7. PYTANIA KONTROLNE

Czy prawidłowo będzie działał mikroskop przedstawiony na rys.5.1, w którym zamieniono miejscami źródło światła 1 i fotokomórkę 9?

Narysować schemat mikroskopu amplitudowego z jedną fotokomórką w głowicy.

Jakie następstwa pociągnie za sobą zmiana pryzmatu 4 z czterościennego na dwunastościenny?

Wymienić własności fazowych i amplitudowych mikroskopów fotoelektrycznych.

### III. ĆWICZENIA Z POMIARÓW PODSTAWOWYCH WIELKOŚCI OPTYCZNYCH

#### Ćwiczenie 6

#### BADANIE JEDNORODNOŚCI SZKŁA OPTYCZNEGO

##### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z postaciami wad jednorodności występującymi w szkłe optycznym oraz metodami pomiaru dwójłomności, smużystości i pęcherzowatości.

##### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

###### 2.1. Charakterystyka własności optycznych materiałów

Materiały stosowane na części optyczne charakteryzują się szeregiem własności, które grupowane wg wielkości mechanicznych, chemicznych, elektrycznych, termicznych i optycznych stanowią dla konstruktora podstawę wyboru rodzaju materiału, przy czym wybór ten wiąże się ściśle z cechami użytkowymi konstruowanego przyrządu. Wiele spośród tych własności jest wspólnych dla całej grupy materiałów optycznych, inne chociaż różnico-

wane, mogą mieć drugorzędne znaczenie dla działania przyrządu, bądź też bywają uwzględniane wówczas, gdy alternatywny wybór materiału następuje po zapewnieniu realizacji wymagań podstawowych.

Przykładowo dla większości przyrządów optycznych jako podstawowe własności materiałów optycznych przyjmuje się własności optyczne, tzn. współczynniki załamania i dyspersji wraz z informacjami o ich anomaliach oraz charakterystykę spektralną przepuszczania; z własności mechanicznych - twardość i ścieralność, z własności chemicznych: odporność na działanie czynników atmosferycznych; pomijane są często np. własności termiczne lub elektryczne. Niektóre z tych cech nie uwzględnione przez konstruktora przy ocenie własności użytkowych mogą odgrywać rolę w procesie technologicznym i w ten sposób tworzyć wtórne niejako kryteria wyboru.

Katalogowa charakterystyka optycznych własności materiałów obejmuje przede wszystkim informacje o współczynniku załamania, odniesionym do określonych długości fali światła oraz o przepuszczalności tego światła. Są to informacje podstawowe, formułowane w katalogach szkła optycznego przez określenie wartości współczynników załamania dla ustalonych linii widmowych, współczynników dyspersji dla wybranych przedziałów długości fali światła, a w przypadku materiałów anizotropowych, dwójkomnych - przez określenie współczynników załamania dla promienia zwykłego i nadzwyczajnego. Przykładowo katalog szkła optycznego Jeleniogórskich Zakładów Optycznych - jedyne go producenta w Polsce - zawiera wartości współczynnika załamania dla linii H-A' tzn. dla przedziału widma widzialnego w granicach  $\lambda = 404 - 768 \mu\text{m}$ , dyspersji częściowych i względnych dyspersji częściowych dla tych wybranych wartości odniesionych do dyspersji średniej  $n_F - n_C$ . Katalog firmy Schott-Jena podaje analogiczne wartości dla przedziału  $\lambda = 312 - 2325 \mu\text{m}$  (nie dla wszystkich szkieł).

Ze względu na niemożność uzyskania w procesie produkcyjnym szkła o właściwościach ściśle odpowiadających danym katalogowym istnieje konieczność określenia dopuszczalnych odchyłek od wartości nominalnej współczynnika załamania i dyspersji średniej dla wybranej długości fali np.  $n_d$  i  $(n_F - n_C)$ ; w niektórych innych katalogach tolerowana jest wartość współczynni-

ka dyspersji  $v_d = \frac{n_d - 1}{(n_F - n_C)}$ . Według wymagań katalogu JZO wartości odchyłek  $n_d$  ujęte pięcioma kategoriami od 0 do 4 zawierają się w granicach  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$  dla zerowej kategorii do  $\pm 20 \cdot 10^{-4}$  dla kategorii czwartej. Stąd też konstruktor formułujący powyższe wymagania w specjalnej tabliczce w lewym górnym rogu rysunku konstrukcyjnego np.  $\Delta n_d - 3$  może spodziewać się, że materiał, z którego wykonany będzie element optyczny będzie się różnił wartością współczynnika załamania nie więcej niż o  $10 \cdot 10^{-4}$  od wartości katalogowej. W przypadku, gdy istnieje konieczność zapewnienia możliwie małych różnic wartości współczynnika załamania w serii wyrobów (np. ze względu na wymagania dotyczące montażu obiektywów fotograficznych) wprowadza się odchyłkę różnicy wartości współczynnika załamania od katalogowej odnoszące się do jednej partii materiału optycznego (pochodzącej z jednego wytopu). Wartości te ujęte w trzech klasach oznaczonych literami A - C z reguły są mniejsze 5-10-krotnie od wartości określanych analogicznymi kategoriami  $\Delta n_d$ .

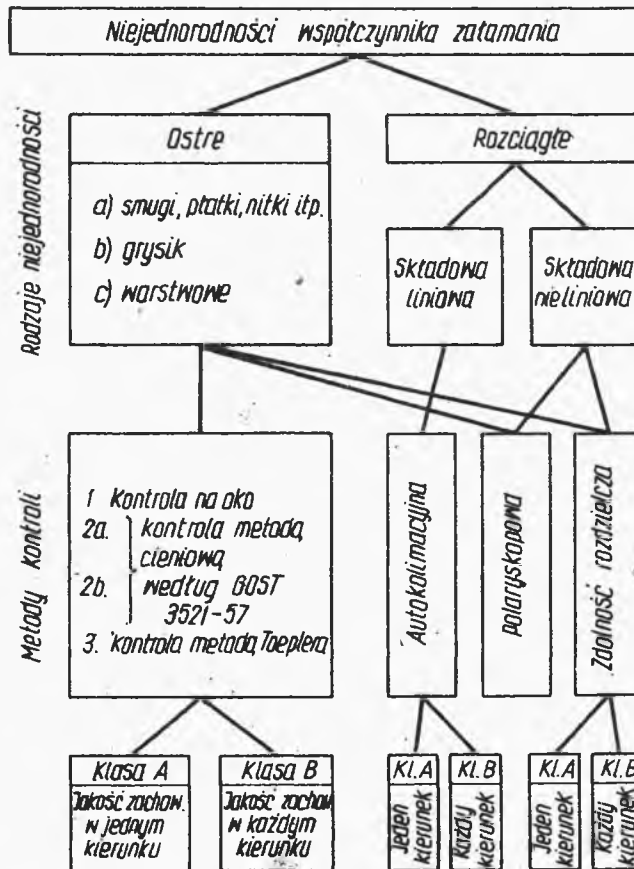
W analogiczny sposób w kategoriach i klasach tolerowane są odchyłki wartości dyspersji średniej  $n_F - n_C$  (patrz p.4). Powyższe wywody dotyczą założonego z góry przypadku, gdy próbka do pomiaru pobierana z partii szkła jest jednorodna, a wynik pomiaru niesie jednoznaczną informację o współczynniku załamania próbki czy też - po przyjęciu największych wartości odchyłek dla kilku próbek - partii szkła.

Niejednorodność współczynnika załamania materiału, z którego wykonano element optyczny może w istotny sposób wpłynąć na jakość odwzorowania obrazu. Ze względu na sposoby pomiaru jak i na wpływ wad w układzie optycznym można wyróżnić dwa zasadnicze rodzaje niejednorodności: lokalne i rozciągłe. Niejednorodności lokalne mogą mieć postać pęcherzy, wtrąceń szamotowych, niestopionych fragmentów zestawu szklarskiego, odszkleń, smug, grysiku (w szkłe kwarcowym), płątków itp. Do nich zaliczać się będzie także niejednorodność warstwowa. Niejednorodności rozciągłe o liniowym lub nieliniowym charakterze zmian współczynnika załamania spowodowane przede wszystkim niejednakową stabilizacją masy szklanej i naprężeniami będą się ujawniały przy



zastosowaniu specjalnych układów pomiarowych autokolimacyjnych lub interferencyjnych. Typowym przykładem występowania liniowej niejednorodności współczynnika załamania będzie płytka o powierzchniach równoległych, działająca - przy gradiencie współczynnika załamania skierowanym równolegle do tych płaszczyzn - jak klin optyczny.

Można przyjąć<sup>x)</sup> podział postaci niejednorodności w powiązaniu z metodami badań przedstawiony na rys.6.1.



Rys.6.1. Rodzaje niejednorodności współczynnika załamania i proponowane metody pomiaru

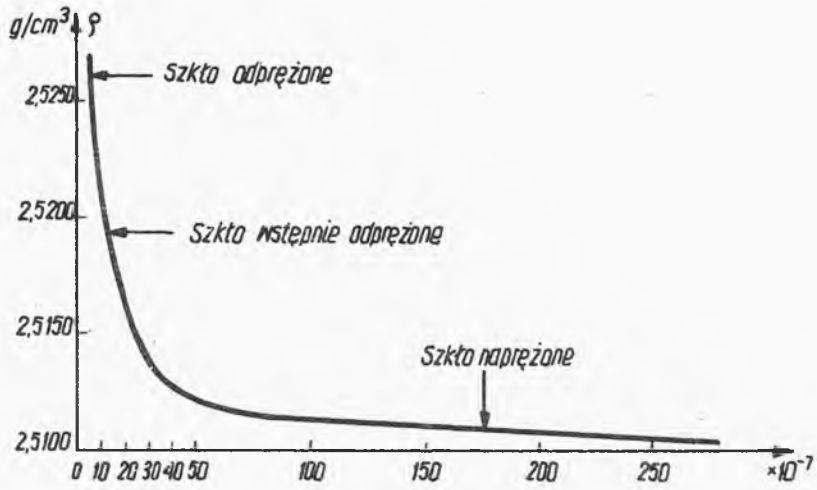
<sup>x)</sup> Wg F. Ratajczyka (patrz wykaz literatury).

## 2.2. Przyczyny niejednorodności współczynnika załamania szkła

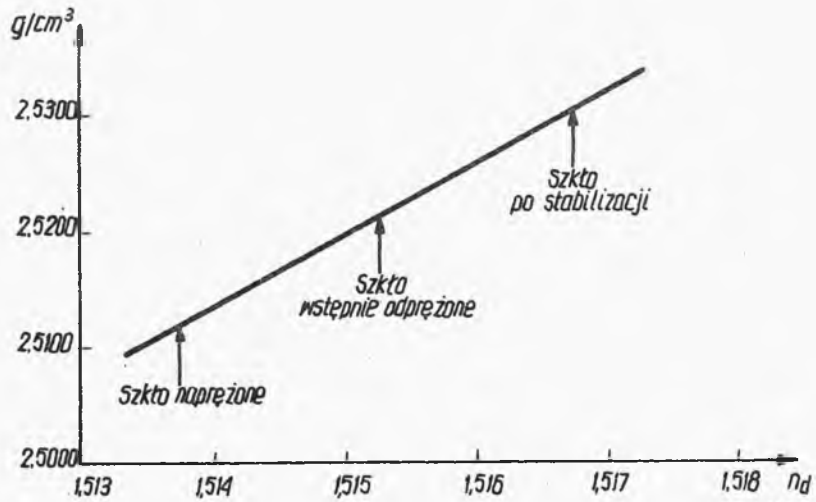
Szkło otrzymane w procesie topienia składników sypkich i tłuczki szklanej, klarowane i homogenizowane w donicy lub wannie może po wylaniu do formy różnić się składem chemicznym w całej swojej masie, co wpływa bezpośrednio na wartości współczynnika załamania. Niedostateczne lub niewłaściwe mieszanie masy szklanej w donicy, korozja ścian donicy i trzpienia wyrobowego, dostawanie się przypadkowych wtrącań szamotowych i pozostawanie pęcherzy zakłóca jednorodność masy w procesie topienia. W czasie formowania szkła optycznego, szczególnie przy wylewaniu szkła z donicy bądź - przy prasowaniu półfabrykatów również mogą powstać smugi, przeważnie warstwowe.

Studzenie szkła wywołuje trwałe naprężenia zarówno rozciągające jak i ściskające, wynikające z różnic gęstości związanych z różnicami temperatury. Wywołuje to rozległe, łagodnie przemieszczające się zmiany współczynnika załamania o wartościach różnych dla promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Różnica tych wartości jest miarą dwójłomności. Odprężanie prowadzone przez wolne programowane zmiany temperatury szkła wylanego do formy pozwala na uzyskanie małych naprężeń. Z obniżeniem się temperatury zwiększa się gęstość szkła, a zatem rośnie jego współczynnik załamania. W czasie stygnięcia szkła w pobliżu punktu  $T_g$  (temperatura zeszklenia) czas niezbędny do uzyskania gęstości największej dla danej temperatury wydłuża się coraz bardziej, przy czym - zwłaszcza poniżej punktu  $T_g$  - osiągnięcie maksymalnego upakowania cząsteczek w szkło jest już praktycznie niemożliwe. W pewnych jednak granicach można tą drogą zmieniać współczynnik załamania, a operacja ta nosi nazwę stabilizowania. Warunkiem prawidłowego przebiegu stabilizacji jest zachowanie jednakowej temperatury całego bloku szkła, co stanowi zasadniczą trudność technologiczną.

Związek między gęstością, naprężeniami i współczynnikiem załamania nie jest całkowicie wyjaśniony, jednak pewne zależności stwierdzone doświadczalnie wskazują na wzrost gęstości szkła odprężonego w porównaniu z naprężonym przy jednoczesnym wzroście współczynnika załamania, przy czym ta druga zależność jest liniowa (rys.6.2 i 6.3).



Rys.6.2. Zmiana gęstości szkła BK7 w zależności od odprężenia



Rys.6.3. Zmiana współczynnika załamania szkła BK7 w zależności od gęstości

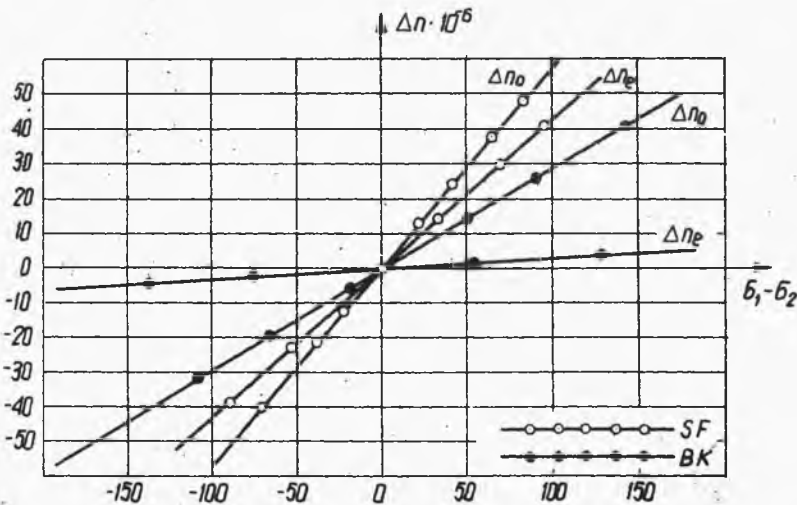
Różnice naprężeń wewnętrznych wywołują odpowiednie zmiany współczynnika załamania. Jeżeli w układzie modelowym kierunek biegu promieni świetlnych jest równoległy do jednego z kierunków naprężeń głównych, wtedy wektory elektryczne padającego światła rozkładają się na dwie składowe odpowiednio równoległe do kierunków działania pozostałych naprężeń, a różnica wartości współczynników załamania tych składowych jest niezależna od naprężenia głównego działającego w kierunku padania światła.

Różnica dróg optycznych

$$\Delta = k\lambda = l(n_1 - n_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2)l,$$

- gdzie:  $l$  - długość drogi promieni w szkle,  
 $\lambda$  - długość fali światła,  
 $\sigma_1, \sigma_2$  - naprężenia główne w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku biegu promieni,  
 $C$  - stała elastooptyczna.

Zmiany w zależności od  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  przedstawione są przykładowo na rys.6.4.



Rys.6.4. Zmiana współczynnika załamania  $n_o$  i  $n_e$  w zależności od naprężeń głównych

### 2.3. Normowanie niejednorodności współczynnika załamania

Wady niejednorodności szkła określono przez: pęcherzowatość, dwójłomność i smużystość. Obejmują one - wg rys.6.1 - niejednorodności o rodzaju zmian ostrym oraz zmiany rozciągle nieliniowe. Niejednorodności o składowej liniowej nie są ujęte żadnymi wymaganiami technicznymi - poza określającymi kategorię i klasę  $\Delta$  nd.

#### Pęcherzowatość

Wymagania określają średnicę pęcherzy (z zastrzeżeniami, o których niżej) i ilość pęcherzy. Kategorię pęcherzowatości ustala się w oparciu o wymiar szóstego co do wielkości pęcherza pomijając 5 pęcherzy większych od niego spośród znajdujących się w przestrzeni 1 dm<sup>3</sup> szkła. Klasę pęcherzowatości określa średnia ilość pęcherzy w 1 dm<sup>3</sup> szkła, przy czym do określenia ilości w kategoriach 2 - 8 przyjmuje się pęcherze o średnicy większej niż 0,03 mm, o ile liczba pęcherzy mniejszych nie przekracza ogólnej dopuszczalnej liczby pęcherzy. Wtrącenia nieprzezroczyste traktuje się jak pęcherze.

Tablice (p.4) przedstawiają liczbowe wartości przypisane odpowiednim kategoriom i klasom pęcherzowatości zgodnie z BN-75/6862-06,

Dwójłomność szkła wyrażona jest różnicą dróg optycznych promieni wzajemnie prostopadle spolaryzowanych do drogi geometrycznej, wzdłuż której ta różnica powstała. Jako jednostkę przyjmuje się nm/cm. Fizyczny sens dwójłomności odpowiada różnicy współczynników załamania tych promieni

$$n_1 - n_2 = k \frac{\lambda}{l} = \frac{\delta}{2\pi} \frac{\lambda}{l},$$

gdzie  $\delta$  - różnica faz po przejściu promieni przez badany blok.

Norma BN-75/6882-06 zawiera klasyfikację dwójłomności szkła (p.4), przy czym np. kategoria 0 określa jako dopuszczalną maksymalną różnicę dróg optycznych  $\Delta = 6$  nm/cm, co odpowiada różnicy  $n_1 - n_2 = 6 \cdot 10^{-7}$ . Jest to wymaganie wysokie, stosunkowo trudne do spełnienia, lecz np. wg norm DIN kategoria ta powinna być podstawową dla optyki precyzyjnej, a w układach optycznych przyrządów polaryzacyjnych i interferencyjnych wartość ta nie powinna być większa niż  $2$  nm/cm.

Ustalenie zaleconych wymagań dotyczących dwójkomności bloków szkła z uwagi na szkodliwy jej wpływ na jakość odwzorowania jest zagadnieniem złożonym ze względu na: trudności w określeniu kryteriów dopuszczalnych deformacji obrazu (np. funkcją przenoszenia kontrastu) dla określonych typowych układów oraz ze względu na zmiany wartości dwójkomności wraz ze zmianą wymiarów bloków w miarę jego rozcinania na mniejsze kawałki, co wymagałoby uwzględnienia wymiarów bloku i wymiarów końcowych elementu. To drugie zagadnienie zostało częściowo ujęte w normie BN-72/6862-03, w której przyjęto znormowany, podstawowy wymiar bloku o kwadratowej powierzchni czynnej o boku 100 mm.

Wiadomo, że dwójkomność jest wprost proporcjonalna do wymiarów bloku przy zachowaniu tych samych proporcji kształtu.

Smużystość, przez którą rozumie się wady szkła optycznego o charakterze ostrych zmian współczynnika załamania w postaci smug, płątków, nitek, warstw, a które dalej nazywane będą umownie smugami - normowana jest przez określenie metod i warunków obserwacji.

Stosowane są trzy zasadnicze metody obserwacji smug: przeglądanie szkła okiem na tle ekranu z polami czarnymi i białymi oddzielonymi od siebie ostrą, prostą krawędzią, przeglądanie szkła ustawianego między dwoma kolimatorami z wzajemnie wygaszającymi się szczelinami umieszczonymi w płaszczyznach ogniskowych obiektywów (metoda Toeplera) oraz projekcja światła przez badany blok szkła na ekran i obserwacja cieni przy określonych charakterystycznych odległościach źródła światła, bloku szkła i ekranu oraz wymiarze źródła - nazywana metodą cieniową lub Dworzaka.

Zgodnie z obowiązującą normą klasyfikacja bloku do odpowiedniej kategorii zależy w tej ostatniej metodzie od stosunku wymiaru źródła światła do odległości od bloku oraz od odległości między blokiem a ekranem, przy której cienie smug na ekranie nie są widoczne (p.4); klasa smużystości wiąże się z tym, czy blok przeglądany jest w jednym czy w trzech kierunkach.

Wszystkie powyżej omówione metody pozwalają na zlokalizowanie miejscowych niejednorodności współczynnika załamania w badanym przedmiocie - bloku szkła.

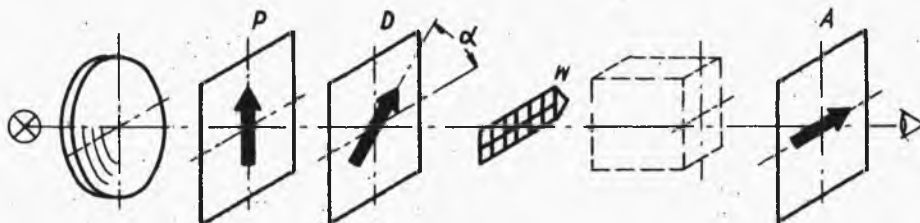
### Zdolność rozdzielcza

Normy CSSR i ZSRR, a w szczególnych przypadkach półfabrykatów również polskie, przewidują określenie "zdolności rozdzielczej bloku szkła" umieszczonego między kolimatorem i lunetą przez wizualną ocenę zmian obrazu testu zdolności rozdzielczej. Istotną zaletą tej metody stanowi badanie integralnego działania niejednorodności współczynnika załamania niezależnie od rodzaju tych niejednorodności zarówno w przypadku zmian rozległych nieliniowych jak i zmian o charakterze ostrym, o ile zajmują odpowiednio znaczną część powierzchni czynnej przekroju przeglądanego szkła. Wadą tej metody jest występująca w większym niż poprzednio stopniu subiektywność oceny odwzorowania testu oraz niemożność lokalizacji wad. Ilościowa ocena wyraża się stosunkiem wartości najmniejszego kąta, pod którym obserwowany jest rysunek testu zdolności rozdzielczej przez blok do najmniejszego kąta obserwacji tego testu bez bloku.

## 3. METODY BADAŃ

### 3.1. Pomiar dwójłomności za pomocą polaryskopu

Pomiar polega na ocenie zmian barwy światła białego spolaryzowanego liniowo. Układ optyczny składa się z polaryzatora P, analizatora A, dwójłomnej "płytki czułej barwy" D umieszczonej między skrzyżowanymi polaryzatorem i analizatorem oraz wzorcowego klina dwójłomności W. Płytkę fazową D wykonana z kryształu dwójłomnego np. kwarcu, miki, bądź z folii tworzyw sztucznych odpowiednio technologicznie przygotowanych jest fałówką o grubości "l" dobranej tak, by wystąpiła różnica dróg



Rys.6.5. Schemat układu optycznego polaryskopu

optycznych między promieniem zwyczajnym i nadzwyczajnym wyrażona w długościach fali światła

$$(n_e - n_o)l = k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

Ustawiona pod kątem  $\alpha$ , zawartym między płaszczyzną drgań polaryzatora a płaszczyzną przechodzącą przez oś optyczną płytki dwójkomnej pozwala na uzyskanie za falówką światła spolaryzowanego liniowo o płaszczyźnie drgań obróconej o kąt  $2\alpha$  względem płaszczyzny polaryzacji światła padającego na nią. W przypadku polaryskopu stosuje się  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ , tzn. promienie, dla których nastąpiło przesunięcie fazowe  $k\lambda$  zostaną przez analizator wygaszone. Wówczas widoczna jest barwa dopełniająca do podstawowej odpowiadającej długości fali wygaszonego światła. W polaryskopach najczęściej spotyka się płytki fazowe dla  $\lambda = 576 \text{ nm}$ , powodujące wygaszenie barwy żółtej i powstawanie jako dopełniającej barwy purpurowej, od której zmiany zarówno w stronę czerwieni jak i fioletu są bardzo łatwo dostrzegalne przez obserwatora (rzędu  $0,02\lambda$ ). Tablica barw lub wzorcowy klin dwójkomny o skokowej lub ciągłej zmianie grubości pozwala ocenić zmiany zabarwienia widoczne po wprowadzeniu w pole widzenia badanego bloku działającego jak dodatkowa płytka dwójkomna. W bardziej złożonych układach polarymetrów stosuje się kompensatory zwiększające dokładność pomiaru do  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Czynności związane z pomiarem dwójkomności bloku o wypolerowanych dwóch przeciwległych powierzchniach obejmują:

1) umieszczenie bloku w polaryskopie między polaryzátorem z płytką czułej barwy a analizátorem i obrócenie o  $45^\circ$  wokół osi optycznej polaryskopu względem położenia, w którym przez blok obserwowano barwę purpurową (taką, jak przy obserwacji bez bloku);

2) ocenę barwy po zmianie spowodowanej obrotem bloku i porównanie jej z barwami klina wzorcowego lub z tablicą 1;

Tablica 1

Barwa	Czerwona	Ciemnoczerwona	Purpurowa	Fioletowa	Niebiesko-fioletowa	Niebieska	Niebiesko-zielona	Zielona	Jasno-zielona	Żółto-zielona
nm	35	15	0	10	25	100	165	185	235	285



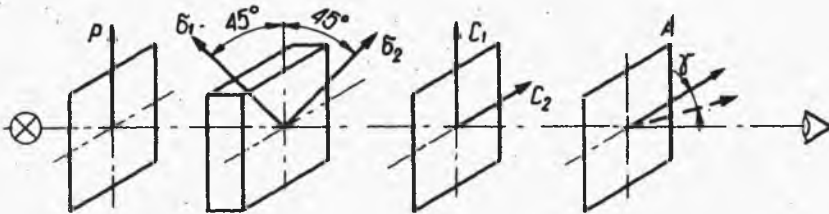
- 3) pomiarzenie długości bloku [cm];
- 4) obliczenie dwójłomności odniesionej do długości 1 cm.

W celu uniknięcia błędów, które mogłyby być spowodowane zmianami stanu naprężeń na skutek zmian temperatury badane bloki szkła należy przed pomiarem przechowywać w pomieszczeniu o temperaturze zbliżonej do panującej w laboratorium pomiarowym.

### 3.2. Pomiar dwójłomności szkła optycznego w blokach metodą Seanarmonte'a

#### 3.2.1. Zasada pomiaru

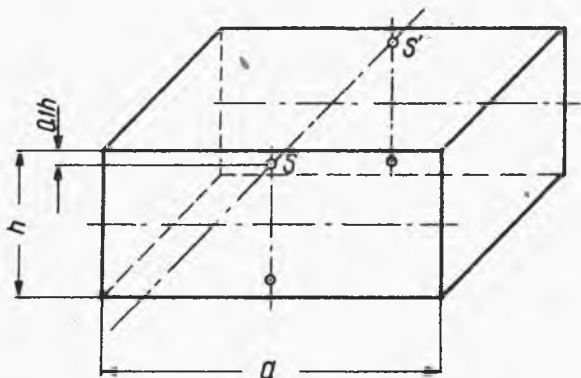
Układ pomiarowy polarymetru składa się ze źródła światła monochromatycznego - lampy rtęciowej wysokociśnieniowej HQE - 50 z filtrem dla  $\lambda = 589,3$  nm, kondensatora, polaryzatora, analizatora oraz ćwierćfalówki umieszczonej przed analizatorem (rys.6.6). Badany blok szkła umieszczony jest między polaryzatorem a ćwierćfalówką, której pierwszy azymut przepuszczania



Rys.6.6. Schemat układu optycznego polarymetrem wg metody Seanarmonte'a

powinien być równoległy względem kierunku polaryzacji polaryzatora. Badany blok szkła należy ustawić w ten sposób, aby kierunki naprężeń głównych w przyjętym umownie tzw. normalnym punkcie pomiarowym tworzyły z kierunkami polaryzacji kąt  $\frac{\pi}{4}$ . Miarą dwójłomności będzie liczba  $k$  izochrom między normalnym punktem pomiarowym  $s$  a najbliższym mu punktem osobliwym, tzn. takim, który w każdym kątowym położeniu bloku pozostaje ciemny. W celu określenia ułamkowej wartości  $k$  izochrom stosuje się obrót polaryzatora. Wartość stosunku  $\frac{\alpha}{\pi}$  kąta obrotu od położenia pierwotnego do takiego, przy którym przesuwała się izochroma przechodzić będzie przez normalny punkt pomiarowy  $\gamma$  odpowiada ułamkowej wartości liczby  $k$  izochrom. Zróznicowanie wymiarów bloków i związanej z tym zmienności dwójłomności

malejącej w miarę ich rozcinania na mniejsze bryły narzuciło konieczność przyjęcia wymiarów odniesienia 100 x 100 mm. Na takiej podstawowej powierzchni określone zostają tzw. podstawowe punkty pomiarowe. Wymagania dotyczące dopuszczalnej dwój-  
łomności szkła odnoszą się do bloków o wymiarach zredukowanych



Rys.6.7. Położenie punktów pomiarowych na czołowej ścianie bloku szkła

do wymiarów podstawowych, mierzonej w podstawowych punktach pomiarowych.

Przy blokach o dowolnych wymiarach boków powierzchni czynnych pomiaru dokonuje się w miejscach wyznaczonych normalnymi punktami pomiarowymi S, leżącymi na osi symetrii połowiącej dłuż-

szy bok i oddalonymi od tych boków o 0,1 część długości boku krótszego. Stąd punkty pomiarowe podstawowe leżą w odległości 10 mm od krawędzi powierzchni czynnych (rys.6.7). Określenie położenia punktów podstawowych przy pomiarze dwójłomności jest konieczne ze względu na zmienne wartości naprężeń wewnątrz bryły badanego szkła, a umożliwia uzyskanie jednoznaczności wyników pomiarów przeprowadzanych np. przez producenta i odbiorcę. Umieszczenie punktu pomiarowego w odległości od krawędzi nie mniejszej niż 0,1 boku, a także wymagana chropowatość matowych, bocznych powierzchni szkła nie większa niż uzyskiwana proszkiem ściernym o granulacji  $28\ \mu\text{m}$  ma na celu uniknięcie wpływu dwójłomności wywołanej procesem szlifowania tych powierzchni.

### 3.2.2. Przebieg pomiaru

1. Skrzyżować polaryzator względem analizatora i sprząc je ze sobą zaciskiem tak, by możliwy był wspólny ich obrót bez zmiany wzajemnego położenia kąтового.

2. Między analizator i polaryzator wstawić badany blok z oznaczonymi normalnymi punktami pomiarowymi.

3. Obracając polaryzatorem sprzężonym z analizatorem określić położenie punktów osoblwowych, tzn. punktów, które w każdym położeniu pozostają ciemne, a odpowiadają linii obserwacji, na której  $\delta_1 - \delta_2 = 0$  i zaznaczyć je na powierzchni bloku.

4. Analizator z polaryzatorem obrócić ustawiając w takim położeniu, przy którym przez punkt pomiarowy przechodzi izoklina, a następnie obrócić je o kąt  $45^\circ$  w dowolnym kierunku.

5. Między blok szkła i analizator wstawić ćwierćfalówkę i obrócić ją tak, aby pole poza obszarem bloku zostało wygaszone, co odpowiada ustawieniu jej w położeniu omówionym przy schemacie układu (rys.6.6).

6. Policzyc ilość  $k$  izochrom (ciemnych linii) między normalnym punktem pomiarowym, a najbliższym mu punktem osoblwym.

7. Analizator obrócić o taki kąt  $\gamma$ , przy którym nastąpi wygaszenie światła przechodzącego przez punkt pomiarowy; obrót powinien następować w kierunku, przy którym zaciemnienie natchodzi od strony punktu osoblwego.

8. Obliczyć dwójłomność w normalnym punkcie pomiarowym ze wzoru

$$\Delta n_n = \frac{\lambda}{l} \left( k + \frac{\gamma}{180} \right),$$

gdzie:  $\lambda = 589$  nm,

$l$  - długość bloku,

$k$  - liczba izochrom,

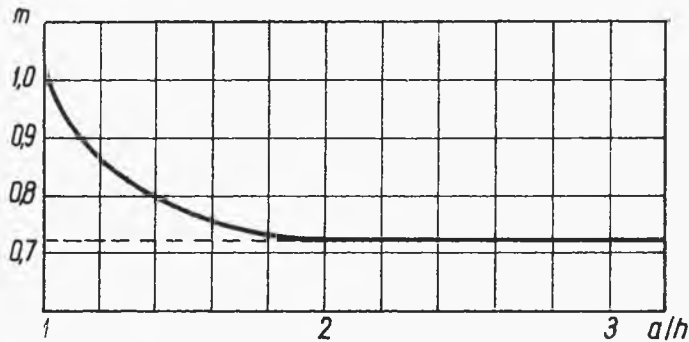
$\gamma$  - kąt obrotu analizatorem.

9. Obliczyć dwójłomność  $\Delta n$  odniesioną do podstawowych wymiarów bloku  $100 \times 100$  mm, znając wymiary powierzchni czynnych bloku badanego. Należy tu uwzględnić kształt tych powierzchni: w badanym bloku są one najczęściej prostokątne, a nie - jak podstawowe - kwadratowe. Ich wymiary także różnią się od podstawowych.

Z doświadczenia wiadomo, że wartość stosunku boku dłuższego  $a$  i krótszego  $h$  wpływa na zmianę wartości dwójłomności wg zależności ujętej wykresem współczynnika  $m$  (rys.6.8)

$$\Delta n = \Delta n_n m \frac{100}{h}.$$

Zmiana dwójkrotności ze zmianą wymiarów bloku jest prawie proporcjonalna, co zostało uwzględnione we wzorze na  $\Delta n$  stosunkiem  $\frac{100}{h}$ .



Rys.6.8. Zależność dwójkrotności od kształtu powierzchni bloku

### 3.3. Pomiary smużystości

Metody badań:

- obserwacja krawędzi pól czarno-białych,
- metoda projekcji cieniowej,
- metoda Toeplera,
- metoda interferencyjna.

Ilościowe określenie smug jest bardzo kłopotliwe. Można przyjąć dwa zasadnicze sposoby ilościowej oceny tego rodzaju miejscowych niejednorodności współczynnika załamania:

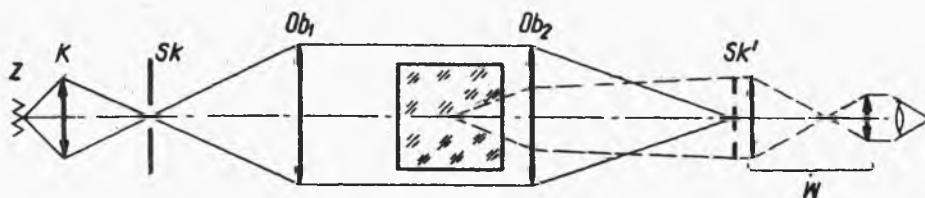
- przez określenie łącznej powierzchni smug, bądź ich łącznej długości w odniesieniu do powierzchni rzutu prześwietlonego bloku,
- przez określenie warunków obserwacji (projekcji), przy których smugi powinny być niezauważalne.

Spśród metod stosowanych przez różne wytwórnie szkła optycznego najczęściej stosowana jest cieniowa i Toeplera.

#### 3.3.1. Metoda Toeplera

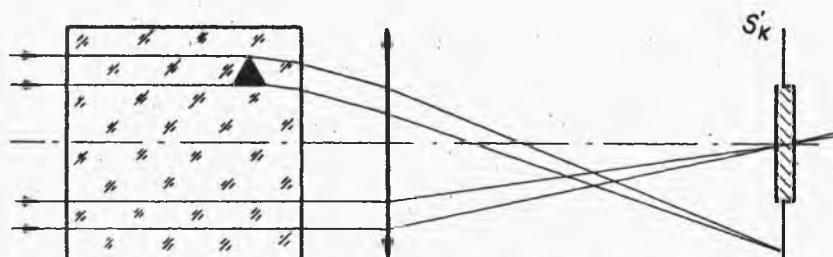
Stanowi ona modyfikację znanej metody Foucaulta stosowanej m.in. do pomiaru promienia krzywizny powierzchni dużych zwierciadeł i oceny prawidłowości jej kształtu przez obserwację równomierności oświetlenia powierzchni zwierciadła, w którym w po-

blizu środka krzywizny umieszczono punktowe źródło światła, a w miejscu, gdzie tworzy się obraz źródła - przysłonę o ostrej krawędzi (patrz instrukcja do ćwiczenia 10).



Rys.6.9. Schemat układu optycznego wg metody Toeplera

Układ optyczny (rys.6.9) składa się z kolimatora z oświetloną szczeliną  $S_k$  o zmiennej szerokości umieszczoną w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu  $Ob_1$ , kolimatora z przesuwym nożem umieszczonym w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej  $S'_k$  obiektywu  $Ob_2$ . Za nim umieszczony jest wizjer w umożliwiający wygodną obserwację bloku umieszczonego między obiektywami. Miejscowe zakłócenia jednorodności współczynnika załamania powodujące odchylenia promieni biegnących przez blok obserwowane są jako pola rozjaśnione bądź ciemne, w zależności od wymiarów i wzajemnego położenia noża i obrazu szczeliny  $S'_k$  (rys.6.10).

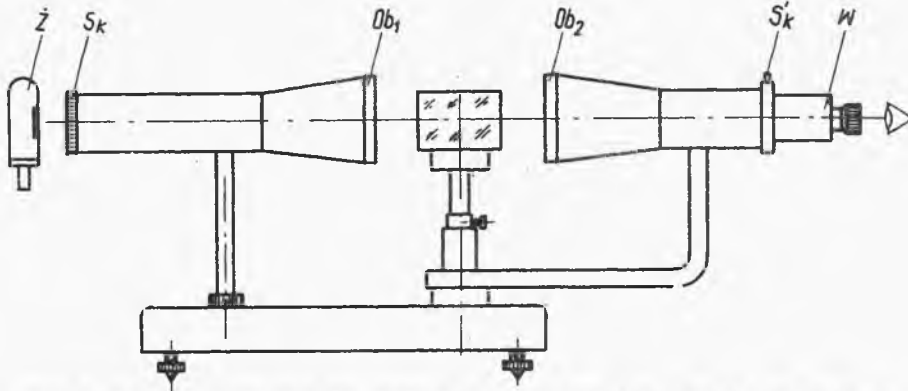


Rys.6.10. Działanie smugi na drodze promieni równoległych

Praktyczna realizacja służąca obserwacji smug tą metodą przyjęta w ćwiczeniu polega na alternatywnym stosowaniu dwóch przysłon: jednej z prześwitem odpowiadającym wymiarom obrazowi szczeliny  $S'_k$ , drugiej zasłaniającej tylko obraz szczeliny  $S'_k$ . W pierwszym przypadku obserwuje się ciemne smugi na jasnym tle, w drugim - rozjaśnione smugi na tle ciemnym.

Powierzchnie czynne bloków szkła nie są względem siebie równoległe, co wprowadza niepożądane poprzeczne przesunięcia

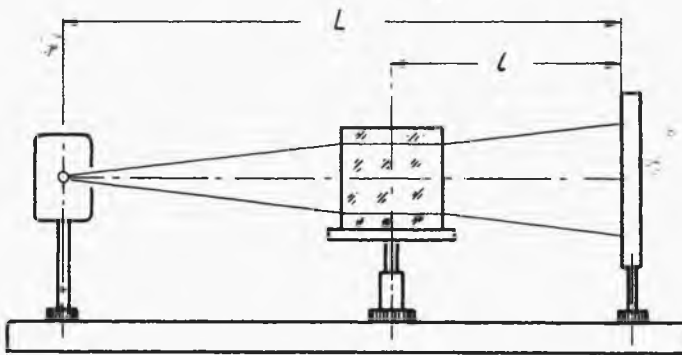
obrazu szczeliny  $S'_k$ , proporcjonalne do kąta dewiacji zależnego od kąta klina między tymi powierzchniami. Przesunięcia te mogą być kompensowane przez: zmianę kąтового położenia kolimatora z wizjerem, stosowanie przysłony w płaszczyźnie obrazowej  $Ob_2$ , bądź też przez zastosowanie kompensatora klinowego o zmiennym kącie łamiącym umieszczonego przed obiektywem  $Ob_2$  (rys.6.11).



Rys.6.11. Stanowisko do pomiaru smużystości metodą Toeplera

### 3.3.2. Metoda projekcji cieniowej

W metodzie tej jako kryterium dobroci szkła przyjmuje się niedostrzeganie cieni utworzonych przez smugi przy obserwacji ekranu, na który pada wiązka światła prześwietlająca badany blok szkła. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia rys.6.12.



Rys.6.12. Schemat pomiaru smużystości metodą projekcji cieniowej

Czułość metody zależna jest w pierwszym rzędzie od wymiarów źródła światła i odległości między źródłem światła a blokiem, a ponadto od odległości ekranu od bloku, luminancji ekranu i charakterystyki spektralnej światła. Na niepewność pomiaru ma oczywiście wpływ subiektywna ocena obrazu zależna od obserwatora.

Wartość stosunku wymiaru źródła światła od odległości od bloku pozostają w związku z wymierną deformacją czoła fali promieniowania optycznego powodowaną przez smugi. Przykładowo próg wykrywalności cieni na ekranie dla źródła o wartości kąta aperturowego  $u = 34'$  odpowiada deformacji  $0,12\lambda$ , dla  $u = 17' - 0,05\lambda$ .

### 3.3.3. Metoda interferencyjna

Metoda ta ujawnia miejscowe lub strefowe zmiany współczynnika załamania. Przedmiot o dokładnie wypolerowanych płaskich przeciwległych powierzchniach może być badany w układzie interferometru dwupromieniowego lub Twyman-Greena przez umieszczenie go na drodze wiązki promieni między powierzchniami roboczymi interferometru, bądź - w przypadku interferometru dwupromieniowego - uzyskanie interferencji promieni odbitych od obydwu powierzchni czynnych badanego przedmiotu. W obydwu przypadkach należy liczyć się z wpływem niepłaskości powierzchni przedmiotu na deformację kształtu obrazu prążkowego wywołanego niejednorodnością materiału, przy czym w drugim przypadku wpływ ten jest dwukrotnie większy. Nie bez znaczenia jest również - ze względu na żadaną znaczną długość drogi koherencji - rodzaj światła stosowanego w interferometrze (praktycznie - światło laserowe).

## 4. TABLICE ODCHYLEK WARTOŚCI PODSTAWOWYCH WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCYCH SZKŁO OPTYCZNE W BLOKACH (wyciąg z BN-75/6962-06)

1. Odchyłki współczynnika załamania  $n_d$  i dyspersji średniej  $n_F - n_C$

Kategoria	$\Delta n_d$	$\Delta(n_F - n_C)$
0	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
1	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
2	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
3	$10 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-5}$
4	$20 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-5}$

2. Odchyłki  $n_d$  i  $(n_F - n_C)$  określone dla szkła pochodzącego z jednego wytopu

Klasa	$n_d$ dla wytopu	$(n_F - n_C)$ dla wytopu
A	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
B	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
C	$2 \cdot 10^{-4}$	-

3. Pęcherzowatość szkła optycznego określona kategoriami w oparciu o wymiar szóstego co do wielkości pęcherza w  $1 \text{ dm}^3$  szkła oraz klasami w oparciu o średnią ilość pęcherzy w  $1 \text{ dm}^3$  (W kategoriach 2 - 8). Do obliczeń przyjmuje się pęcherze o średnicy większej niż 0,03 mm, o ile liczba pęcherzy mniejszych nie przekracza odpowiadającej danej klasie pęcherzowatości).

Kategoria	Średnica pęcherza mm
1	do 0,05
2	0,05 - 0,1
3	0,1 - 0,2
4	0,2 - 0,3
5	0,3 - 0,5
6	0,5 - 0,7
7	0,7 - 1,0
8	1,0 - 2,0

Klasa	Przeciętna liczba pęcherzy w $1 \text{ dm}^3$ szkła
AA	do 10
A	10 - 30
B	30 - 100
C	100 - 300
D	300 - 1000
E	1000 - 3000
F	3000 - 10 000



4. Dwójłomność wyrażona różnicą dróg optycznych odniesiona do długości jednostkowej 1 cm

Kategoria	Dwójłomność nm/cm
00	do 3
0	3 - 6
1	6 - 10
2	10 - 20
3	20 - 35

5. Smużystość określona warunkami obserwacji, przy których cienie smug na ekranie nie są widoczne (stanowisko wg BN-71/6861-05)

Kategoria	Stopień zasmużenia
1	Dopuszcza się smugi niewidoczne po odsunięciu badanego bloku od ekranu na długość 300 mm
2	Dopuszcza się smugi niewidoczne po odsunięciu badanego bloku na odległość 500 mm
3	jw. dla odległości 700 mm

Klasa A - przy przeglądaniu w trzech kierunkach  
Klasa B - przy przeglądaniu w jednym kierunku

#### 5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

1. Pomierzyć dwójłomność bloku szkła za pomocą polaryskopu oceniając zmianę barw interferencyjnych.

2. Pomierzyć dwójłomność bloku metodą Seanarmonta na polarymetrze z ćwierćfalówką i zakwalifikować blok do odpowiedniej kategorii wg BN-75/6862-06.

3. Obserwować smugi w bloku na stanowisku zestawionym wg układu Toeplera.

4. Obserwować i zlokalizować smugi na stanowisku do projekcji cieniowej i zakwalifikować blok do odpowiedniej kategorii i klasy wg BN.

5. Określić klasę i kategorię pęcherzowości wg BN, przyjmując orientacyjne wymiary pęcherzy w porównaniu z pomierzonymi na mikroskopie warsztatowym.

## 6. LITERATURA

Legun Z.: Technologia szkła optycznego cz.I. PWT. Warszawa 1955.

Ratajczyk F., Jakubowska B.: Uwagi o tolerowaniu niejednorodności współczynnika załamania w szkłe. Biuletyn Optyka nr 1/69. Norma BN-75/6862-06. Szkło optyczne w blokach.

Norma BN-72/6862-03. Szkło optyczne. Pomiar dwójłomności szkła optycznego metodą Seanarmonta.

## 7. PYTANIA KONTROLNE

Która z metod pomiaru niejednorodności współczynnika załamania szkła nadaje się do stosowania w sprawdzaniach przemysłowych?

Które z metod przede wszystkim nadają się do kontroli bloków przeznaczonych na elementy optyczne leżące blisko źrenicy lub blisko płaszczyzny obrazowej danego układu optycznego?

Jakie czynniki związane ze stanowiskiem kontrolnym wpływają na niepewność kwalifikacji szkła do odpowiedniej kategorii?

## Ćwiczenie 7

# POMIARY WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest przypomnienie podstawowych zjawisk zachodzących przy przejściu promieni świetlnych przez granicę dwóch ośrodków, pojęcia współczynnika załamania i dyspersji ośrodka oraz zapoznanie z metodami ich pomiarów.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

#### 2.1. Współczynnik załamania i dyspersji

Prędkość rozchodzenia się światła w ośrodkach materialnych jest mniejsza od prędkości rozchodzenia się światła (fali elektromagnetycznej) w próżni. Bezwzględny współczynnik załamania definiuje się jako

$$n = \frac{c}{V}, \quad (1)$$

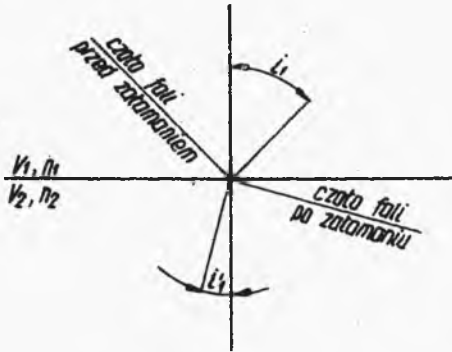
gdzie:  $V$  - prędkość światła w danym ośrodku,

$c = 299\,793,0 \pm 0,3$  km/s - prędkość światła w próżni.

Inaczej mówiąc, bezwzględny współczynnik załamania jest współczynnikiem załamania na granicy próżni i rozpatrywanego ośrodka.

Jeśli  $n_1$  i  $n_2$  są bezwzględnymi współczynnikami załamania dwóch ośrodków, to względny współczynnik załamania między tymi ośrodkami wyraża się wzorem

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (2)$$



Rys.7.1. Załamanie fali na granicy dwóch ośrodków

Zmiana prędkości fali przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego powoduje zmianę kierunku czoła fali płaskiej, a co za tym idzie - zmianę kierunku promienia świetlnego (rys.7.1).

Inna zależność na względny współczynnik załamania

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin i'} \quad (3)$$

gdzie:  $i$  - kąt padania promienia na granicę dwóch ośrodków,  
 $i'$  - kąt załamania.

W technicznych zastosowaniach używa się na ogół pojęcia względnego współczynnika załamania ośrodka, odniesionego do powietrza (ośrodka otaczającego). Ponieważ bezwzględny współczynnik załamania powietrza wynosi  $n_p = 1,000294$ , więc względny współczynnik załamania jest około 1,0003 raza mniejszy od bezwzględnego współczynnika załamania. Z doświadczeń z pryzmatami rozszczepiającymi wynika, że współczynnik załamania szkła dla światła czerwonego (o większej długości fali) jest mniejszy niż dla światła fioletowego.

Ogólnie można powiedzieć, że w zakresie widma widzialnego współczynnik załamania ośrodka rośnie wraz ze zmniejszeniem długości fali. Zjawisko zmiany współczynnika załamania ze zmianą długości fali nosi nazwę dyspersji. Pomiar współczynników załamania wykonuje się na ogół dla długości fali odpowiadających następującym liniom Fraunhofera (tablica 1).

Za miarę średniej dyspersji ośrodka przyjęto wartość  $(n_F - n_C)$  (dyspersja cząstkowa) lub też tzw. współczynnik dyspersji (zwany też liczbą Abbego)

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (4)$$

Ze względów teoretycznych przydatna jest analityczna zależność współczynnika załamania od długości fali. Dość dobrze aproksymuje tę zależność wzór Herzbergera (wzór 5)

Tablica 1

Pierwiastek	Oznaczenie	Długość fali [nm]
H	C	656,3
Cd	C'	643,9
Na	D	589,3 (doublet)
He	d	587,6
Hg	e	546,1
Cd	F'	490,0
H	F	481,1
Hg	g	435,8

$$n = a + b\lambda^2 + \frac{c}{\lambda^2 - 0,035} + \frac{d}{(\lambda^2 - 0,035)^2}, \quad (5)$$

gdzie: a, b, c, d - stałe - do wyliczenia dla czterech znanych wartości n i dla danego szkła,

$\lambda$  - długość fali w  $\mu\text{m}$ .

Wzór ten jest użyteczny w zastosowaniu do szkieł optycznych w zakresie widzialnym oraz bliskim nadfiolecie i podczerwieni.

Przy posługiwaniu się pojęciem względnego współczynnika załamania, odniesionego do powietrza, należy zwrócić uwagę na fakt, że współczynnik załamania powietrza jest zależny od składu chemicznego, temperatury, ciśnienia i długości fali. Najczęściej jako punkt odniesienia przyjmuje się powietrze o temperaturze 20°C i ciśnieniu 760 mm Hg.

Pomiary współczynnika załamania dla światła widzialnego są stosunkowo łatwe do wykonania. Istnieje szereg metod opartych na ogół na pomiarach spektrofotometrycznych, interferencyjnych, pomiarach granicznego kąta odbicia i załamania lub innych. W ćwiczeniu wykorzystywane będą metody oparte na pomiarach kąta granicznego odbicia i załamania.

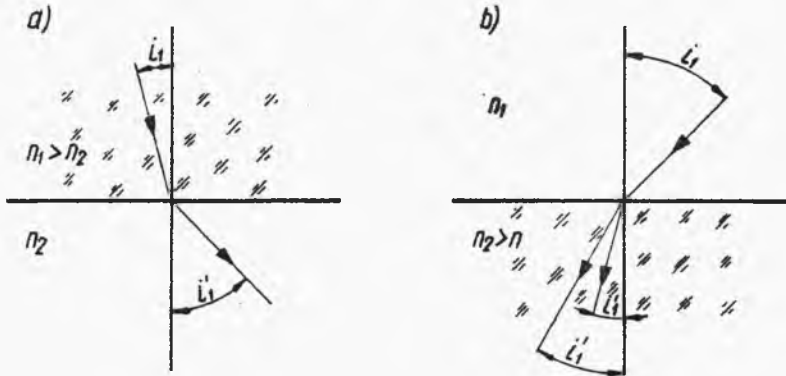
## 2.2. Zjawisko pełnego wewnętrznego odbicia

Zjawisko to wyjaśnia się na podstawie analizy wzoru określającego prawo załamania na granicy dwóch ośrodków

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_1' \quad (6)$$

lub też wprowadzając względny współczynnik załamania (rys.7.2)

$$n_{12} = \frac{\sin i_1'}{\sin i_1} \quad (7)$$



Rys.7.2. Załamanie promienia świetlnego przy przejściu: a) z ośrodka optycznie gęstszego do rzadszego; b) z ośrodka optycznie rzadszego do gęstszego

Załóżmy, że  $n_1 > n_2$ , tzn. promień przechodzi z ośrodka o wyższym współczynniku załamania (optycznie gęstszego) do ośrodka o niższym współczynniku załamania (optycznie rzadszego), wtedy

$$n_{12} > 1, \quad i_1' > i_1.$$

Jeżeli zwiększać będziemy kąt padania  $i_1$  dojdziemy do takiego kąta  $i_{1g}$ , że

$$\sin i_1' = n_{12} \sin i_{12} = 1; \quad (8)$$

wtedy kąt załamania  $i_1' = 90^\circ$ .

Kąt  $i_{1g} = \arcsin\left(\frac{1}{n_{12}}\right)$  nazywamy granicznym kątem padania.

Promienie padające na powierzchnię pod kątem większym od granicznego przechodzą w pierwszym ośrodku, odbijając się zgodnie z prawem odbicia. Mówi się wtedy o zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia. Załóżmy teraz, że na granicę wymienionych ośrodków padają pod różnymi kątami promienie monochromatyczne z rozciągniętego źródła światła. Promienie padające pod kątem

$i_1 < i_{1g}$  zostaną załamane, zaś padające pod kątem  $i_1 > i_g$  - ulegną odbiciu. Jeśli na kierunku promieni odbitych ustawimy lunetę, to w jej polu widzenia utworzą się dwie części: oświetlona (utworzona przez promienie odbite padające na płaszczyznę graniczną pod kątem  $i_1 > i_g$ ) oraz ciemna (ponieważ promienie o  $i < i_g$  - przejdą po załamaniu do drugiego ośrodka). Ciemna część pola będzie nieco rozjaśniona, gdyż przy przejściu promieni do drugiego ośrodka zawsze nieznaczna część światła zostaje odbita.

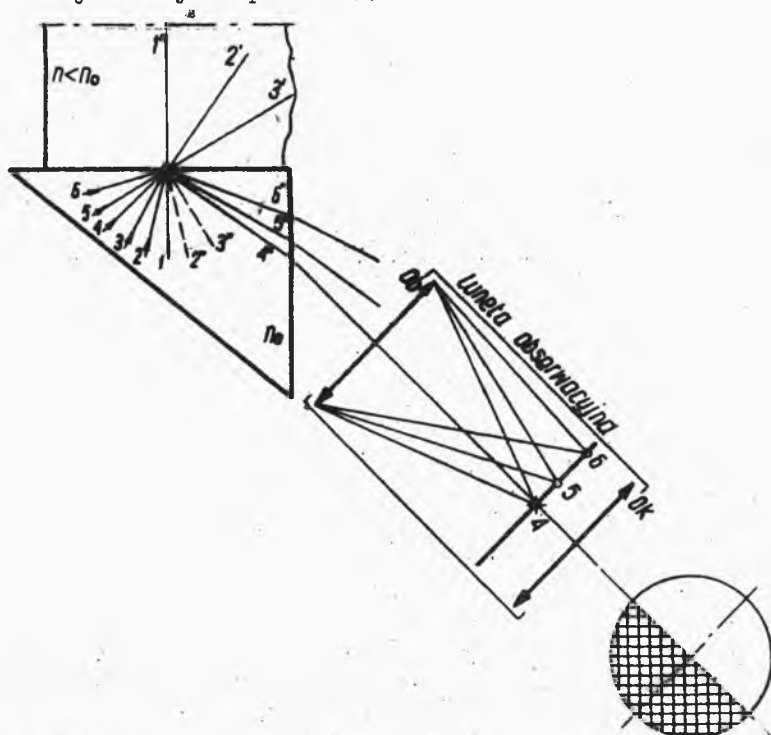
Omówione zjawisko można rozpatrywać również przy założeniu odwrotnego kierunku biegu światła - tzn. z ośrodka optycznie rzadszego do ośrodka optycznie gęstszego. Wtedy  $n_1 < n_2$  oraz  $i_1 > i'_1$  (rys.7.2b).

Jeśli zwiększymy kąt padania  $i_1$  do wartości  $i_1 = 90^\circ$ , otrzymamy pewną maksymalną wartość kąta załamania  $i'_1$ . Ustawiając, podobnie jak poprzednio, lunetę na przedłużeniu promieni załamanych - otrzymamy w jej polu widzenia jasne i ciemne obszary (jasna część pola odpowiada promieniom o kącie padania mniejszym od  $90^\circ$ ).

### 2.3. Wykorzystanie zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia do pomiaru współczynnika załamania

Pomiar kąta granicznego całkowitego wewnętrznego odbicia (granicznego załamania) wykorzystuje się przy pomiarze współczynnika załamania tzw. metodą Wollastona-Kohlrauscha, która jest stosowana w refraktometrach używanych w laboratorium optyki PW. W metodach tych mierzy się kąt graniczny między badanym ośrodkiem (ciałem stałym lub cieczą) a ośrodkiem wzorcowym o znanym współczynniku załamania. Jako element wzorcowy stosuje się pryzmaty wykonane z materiału optycznego (na ogół szkła) o znanym współczynniku załamania większym od współczynnika załamania ciała badanego, zaś badane ciało wprowadza się w kontakt optyczny z pryzmatem wzorcowym. Próbka badana powinna mieć co najmniej jedną płaszczyznę wypolerowaną. Umożliwia to pomiar współczynnika załamania na zasadzie pomiaru kąta promieni odbitych od płaszczyzny styku (rys.7.3). Jeśli pomiar ma być wykonany metodą pomiaru kąta załamania dla "ślizgowego" wejścia promieni wzdłuż granicy dwóch ośrodków (rys.7.4) nale-

ży wypolerować również drugą płaszczyznę próbki - prostopadłą do poprzedniej. Na krawędzi obu płaszczyzn nie może być fazy (zafałszuje to wynik pomiaru).



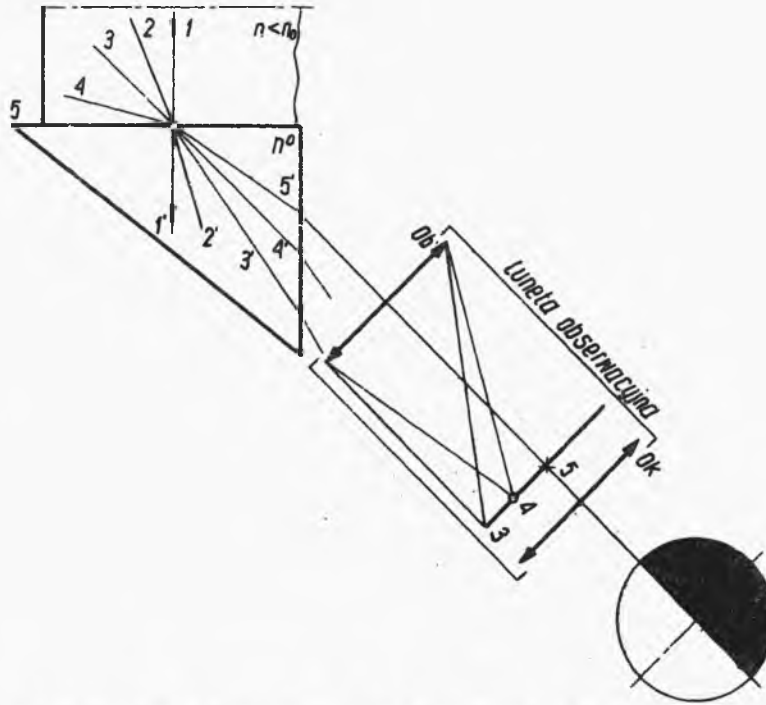
Rys.7.3. Bieg promieni przy pomiarze w świetle odbitym (ciemna część rozjaśniona przez światło częściowo odbite od powierzchni granicznej, przy załamaniu (promienie 2, 3))

Oczywiście jedna linia podziału między polem zaciemnianym a jasnym wystąpi przy zastosowaniu światła monochromatycznego. Dla światła o kilku długościach fali linie podziału będą różne usytuowane dla różnych barw (ze względu na różnice współczynników załamania dla różnych długości fali). Przy odpowiednim doborze źródła światła umożliwia to określenie dyspersji badanego materiału.

Należy zaznaczyć, że stosuje się częściej metodę pomiaru w świetle załamany (ze względu na lepszy kontrast obrazu). Wyjątkiem są pomiary współczynników załamania ciał o dużym współczynniku pochłaniania światła - wtedy lepsza jest metoda pełnego wewnętrznego odbicia.



W celu uzyskania prawidłowego kontaktu między powierzchnią próbki, a powierzchnią pryzmatu należy między te powierzchnie wprowadzić kroplę cieczy imersyjnej. Po wprowadzeniu cieczy

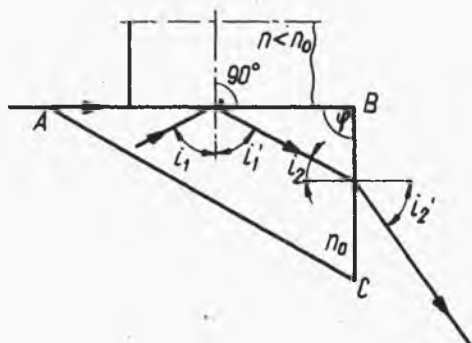


Rys.7.4. Bieg promieni przy pomiarze w świetle załamany (pole ciemne w odwrotnym położeniu w stosunku do rys.7.3)

naciskamy z góry na próbkę tak, aby zlikwidować prążki interferencyjne równej grubości tworzące się w warstwie cieczy. Zapewnia to płaskorównoległość warstwy cieczy. Jeśli warunek ten jest spełniony - to warstwa ta, działająca jak płytko płaskorównoległa nie zmienia kierunku promieni świetlnych, a więc nie wprowadza błędu pomiaru.

Dodatkowo należy zwracać uwagę na to, aby wartość współczynnika załamania cieczy imersyjnej była zawarta między współczynnikiem załamania badanego materiału, a współczynnikiem załamania pryzmatu wzorcowego. Zabezpiecza to przed powstaniem zjawiska pełnego wewnętrznego odbicia w warstwie cieczy imersyjnej (co uniemożliwiłoby pomiar). W pomiarach współczynnika załamania stosuje się najczęściej następujące ciecze imersyjne:

- a) jodek metylenu ( $n = 1,74$ ),
- b) alfa - monobromonaftalen ( $n = 1,66$ ),
- c) roztwór siarki w jodku metylenu ( $n = 1,79$ ),
- d) roztwór fosforu w jodku metylenu ( $n = 1,94$ ).



Z biegu promienia granicznego w pryzmacie (rys.7.5) wynika:

$$n \sin 90^\circ = n_0 \sin i_1',$$

$$n_0 \sin i_2 = \sin i_2',$$

$$i_1' = \varphi \pm i_2;$$

Rys.7.5. Bieg promienia granicznego w pryzmacie wzorcowym

po przekształceniach

$$n = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - \sin^2 i_2} \pm \cos \varphi \sin i_2', \quad (9)$$

zaś gdy  $\varphi = 90^\circ$ , skąd  $\sin 90^\circ = 1$ ,  $\cos 90^\circ = 0$

$$n = \sqrt{n_0^2 - \sin^2 i_2'} \quad (10)$$

Przy posługiwaniu się metodą wewnętrznego odbicia należy zastosować pryzmat o płaszczyźnie AC (naprzeciwko krawędzi łamiącej pryzmatu) - zmatowanej. Oświetlać ją wtedy należy rozciąglącym źródłem światła.

### 3. PRYZRZĄDY DO POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA

#### 3.1. Refraktometr Pulfricha

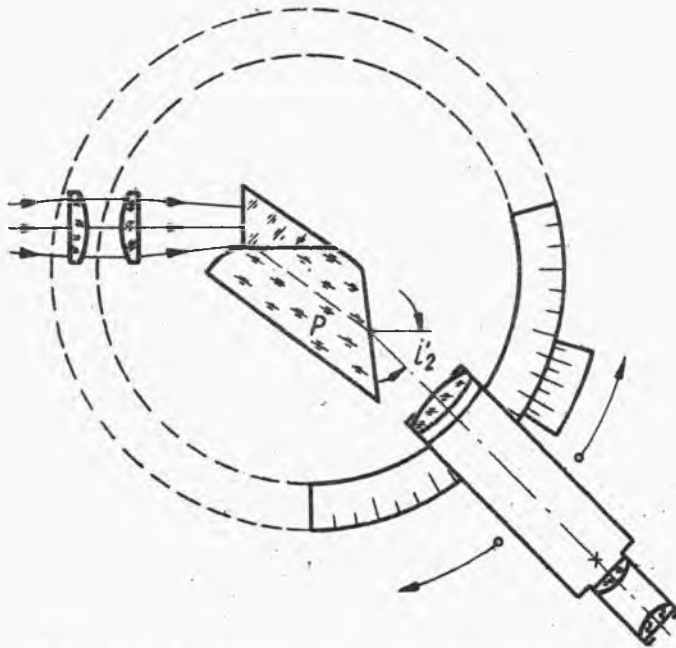
Refraktometr Pulfricha jest przeznaczony do szybkiego pomiaru współczynnika załamania szkła. Jest on zbudowany na zasadzie układu goniometru o poziomej osi obrotu lunety pomiarowej i pionowo usytuowanym kręgu pomiarowym. Funkcję stołu goniometru spełnia zamocowany w uchwycie pryzmat wykonany z bez-

smużystego szkła o wysokim współczynniku załamania. W przyrządzie, używanym w laboratorium stosuje się pryzmat wzorcowy o kącie łamiącym  $\varphi = 90^{\circ}00'00''$ . Współczynniki załamania szkła pryzmatu wzorcowego dla niektórych długości fali podaje tablica 2.

Tablica 2

Linia	g	F	d	D	c
n	1,69987	1,68752	1,67272	1,67254	1,66663

n - podane jest z niedokładnością  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , schemat pracy układu przedstawia rysunek 7.6.



Rys.7.6. Zasada działania refraktometru Pulfricha

W rzeczywistym układzie luneta (z układem autokolimacyjnym) umieszczona jest prostopadle do płaszczyzny kręgu, zaś przed jej obiektywem umieszczony jest pryzmat prostokątny zmieniający kierunek obserwacji na równoległy do płaszczyzny kręgu. Po odbiciu w pryzmacie prostokątnym oś optyczna lunety powinna

przecinać przedłużenie osi kręgu pomiarowego. Okular lunety jest okularzem mikrometrycznym.

Obudowa pryzmatu wzorcowego ma możliwość regulacji przez obrót w dwu płaszczyznach. Umożliwia to ustawienie pryzmatu tak, aby jego przekrój główny był równoległy do osi optycznej lunety. Osiąga się to przez wykorzystanie układu autokolimacyjnego lunety pomiarowej (odbicie autokolimacyjne powinno pokrywać się z krzyżem na płycie ogniskowej w obydwu położeniach lunety prostopadle do górnej i bocznej ściany przyprostokątnej pryzmatu).

Górna powierzchnia pryzmatu wzorcowego ma kształt sfery o promieniu ok. 400 mm, na niej wypolerowana jest płaszczyzna, prostopadła do drugiej przyprostokątnej pryzmatu. Przed pryzmatem od strony źródła światła znajduje się ruchoma osłona, umożliwiająca osłonięcie przeciwprostokątnej pryzmatu przed promieniami światła (zaburzającego pomiar przy pomiarze w świetle załamany).

Próbka badanego szkła powinna mieć co najmniej dwie wzajemnie prostopadłe ściany wypolerowane, zaś krawędź tych ścian powinna być ostra - bez uszkodzeń i bez fazki. Kąt prosty powinien być zachowany z niedokładnością  $\pm 10'$ . Próbka powinna być bez smug i pęcherzy, zaś jej wymiary nie powinny być mniejsze od 3 x 3 x 3 mm.

Przed umieszczeniem próbki na górnej płaszczyźnie pryzmatu należy obydwie płaszczyzny oczyścić, zaś na ścianę pryzmatu nanieść kroplę cieczy imersyjnej (p.2.3). Próbka powinna być ustawiona na pryzmacie tak, aby ściana wypolerowana zwrócona w kierunku źródła światła była prostopadła do przekroju głównego pryzmatu, a jednocześnie do płaszczyzny kręgu. Aby zwiększyć dokładność pomiaru należy - naciskając próbkę i obserwując prążki interferencyjne na płaszczyźnie styku - usunąć klin między ścianą próbki a ścianą pryzmatu wzorcowego lub też doprowadzić do tego, aby przekrój główny klina cieczy imersyjnej był prostopadły do przekroju głównego pryzmatu - nie wprowadza on wtedy błędów do pomiaru. W drugim przypadku prążki interferencyjne powinny być równoległe do płaszczyzny kręgu. Prążki interferencyjne można obserwować przez przednią pionową ścianę wypolerowaną, próbki patrząc ukośnie z góry na warstwę cieczy imersyjnej.

Po wyregulowaniu układu (ustawienie pryzmatu i próbki zgodnie z wymaganiami) dokonuje się pomiaru kąta odchylenia promieni za pomocą dwóch operacji:

1) ustawienie "zerowego" położenia kręgu - wykonuje się przez ustawienie lunety przez autokolimację prostopadle do pionowej ściany pryzmatu wzorcowego i sprowadzenie wskazań na kręgu do 0 przez obrót kręgu (zerowanie wskazania kręgu);

2) obrotem lunety naprowadza się lunetę na granicę pola oświetlanego i ciemnego. W okularze mikroskopu odczytowego odczytuje się wartość kąta z niedokładnością  $1'$ .

Jeżeli źródło światła nie jest monochromatyczne, wtedy w okularze lunety celowniczej utworzy się obraz barwnych pasm. Środek krzyża celowniczego należy naprowadzić wtedy na górną krawędź pasma o barwie odpowiadającej długości fali, dla której określamy współczynnik załamania (żółta - dla linii  $d$ , czerwona -  $c$ , niebieska -  $F$ , fioletowa -  $G'$  itp.). Mając do dyspozycji takie źródło światła można również określić dyspersję szkła badanego na podstawie znanej dyspersji pryzmatu wzorcowego. Wtedy, wykorzystując śrubę mikrometryczną okulara lunety, należy zmierzyć różnice  $d i'_2$  kątów między poszczególnymi liniami widmowymi. Jedna działka na śrubie mikrometrycznej odpowiada  $0,1'$ .

Po dokonaniu pomiarów możemy określić współczynniki załamania próbki na podstawie znanych współczynników załamania pryzmatu wzorcowego  $n_0$  za pomocą wzoru (10)

$$n = \sqrt{n_0^2 - \sin^2 i'_2},$$

zaś dyspersję dla próbki z wzoru powstałego ze zróżniczkowania poprzedniej zależności

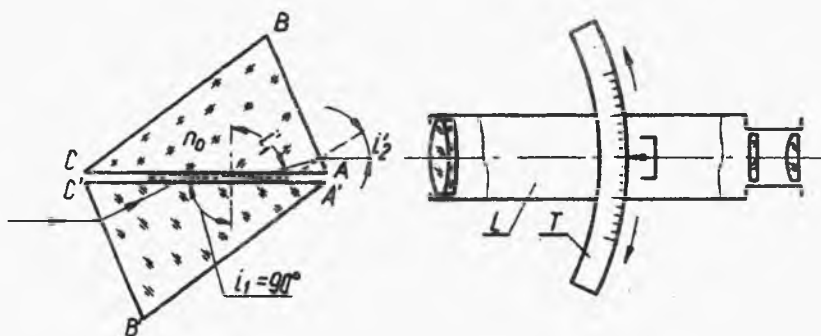
$$d_n = - \frac{\sin 2i'_2}{2n} di'_2 + \frac{n_0}{n} dn_0. \quad (11)$$

Po otrzymaniu wartości  $n_F - n_C$  oraz znając  $n$  możemy określić dyspersję z wzoru (2).

Niedokładność pomiaru refraktometrem Pulfricha wynosi około  $10^{-4}$  dla współczynnika załamania, zaś  $2 - 3 \cdot 10^{-5}$  do określenia  $n_F - n_C$ .

### 3.2. Refraktometr Abbego

Refraktometr ten - wykorzystujący również metodę Wollastona-Kohlrauscha - jest przeznaczony do pomiarów współczynnika załamania cieczy i ciał stałych. Przyrząd ten, którego zasadę działania opracował Abbe w 1874 roku, znalazł szerokie zastosowanie w przemyśle. Wykorzystywany bywa często do pomiarów refraktometrycznych zawartości suchej masy w roztworach substancji organicznych, spożywczych itp. Główną częścią przyrządu jest układ dwóch pryzmatów wykonanych z ciężkiego szkła flintowego, z których jeden pełni funkcję pryzmatu oświetlającego, zaś drugi - pryzmatu pomiarowego (rys.7.7). Układ ten



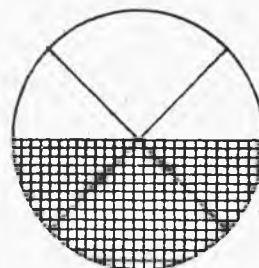
Rys.7.7. Zasada działania refraktometru Abbego

służy do pomiarów współczynnika załamania cieczy. Obydwa pryzmaty są oprawione i połączone zawiasem. Badaną ciecz wprowadza się pomiędzy obydwie pryzmaty. Po złożeniu pryzmatów tworzy ona warstwę o grubości ok. 0,1 mm. Współczynnik załamania pryzmatów jest wyższy od współczynnika załamania cieczy badanej. Promień ślizgający się wzdłuż warstwy cieczy pada na pryzmat pomiarowy pod kątem granicznym  $i'_1$ , zaś wyjdzie z pryzmatu przez ścianę AB pod kątem  $i'_2$ . Ponieważ kąt łamiący  $\varphi$  (rys.7.5) wynosi ok.  $64^\circ$ , więc przy obliczeniu współczynnika załamania należałoby korzystać z wzoru (9):

$$n = \sin \varphi \sqrt{n_0^2 - \sin^2 i'_2} + \cos \varphi \sin i'_2.$$

W celu ułatwienia pomiarów podziałka odczytowa refraktometru Abbego produkcji Zeissa jest ocyfrowana od razu wg wartości  $n_D$  badanego ciała.

Jeżeli substancja płynna lub półpłynna ma duży współczynnik pochłaniania - pomiaru można dokonać w świetle odbitym po odsłonięciu drugiej ściany (BC) pryzmatu pomiarowego. Ściana ta jest zmatowana (podobnie jak ściana A'C' pryzmatu oświetlającego), aby rozproszenie światła było lepsze. W układzie refraktometru produkcji Zeissa w czasie pomiaru, luneta celownicza i mikroskop odczytowy są nieruchome, natomiast obraca się układ pryzmatów z próbką i krąg z podziałką. Lunetę naprowadza się na granicę jasnego i ciemnego pola (rys.7.8), zaś w okularze mikroskopu odczytowego odczytuje się wartość  $n_D$  na skali. Na skali dodatkowo umieszczona jest podziałka określająca procentową zawartość suchej masy w cieczy. Zakres pomiarowy refraktometru Abbego wynosi  $n_D(1,3 - 1,7)$  oraz zawartość suchej masy 0 - 85%. Błąd pomiarowy wynosi dla  $n_D 10^{-4}$  zaś dla zawartości suchej masy 0,1 - 0,2%.

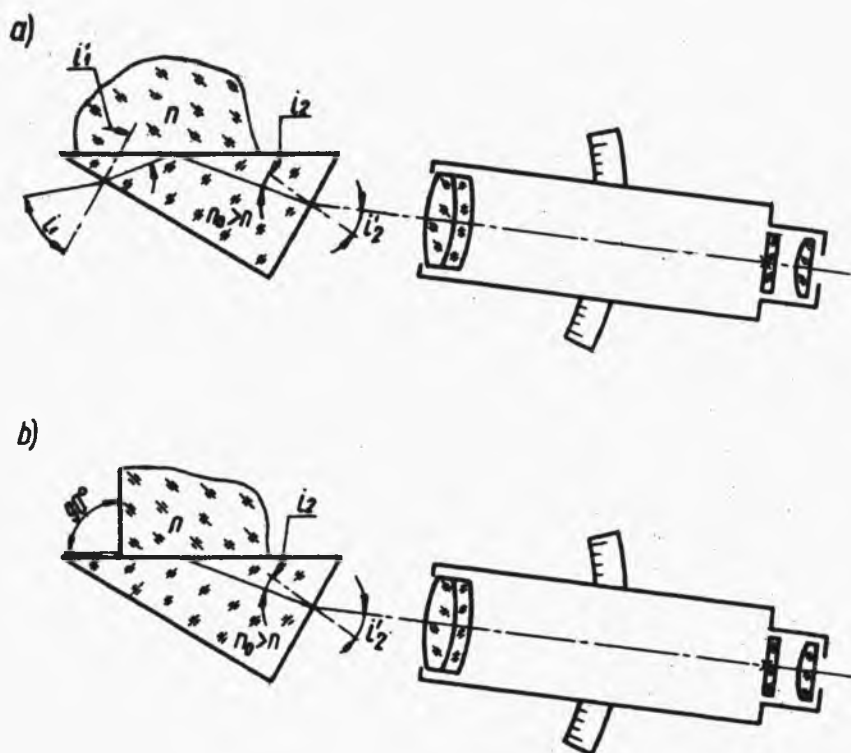


Rys.7.8. Obraz w polu widzenia lunety celowniczej

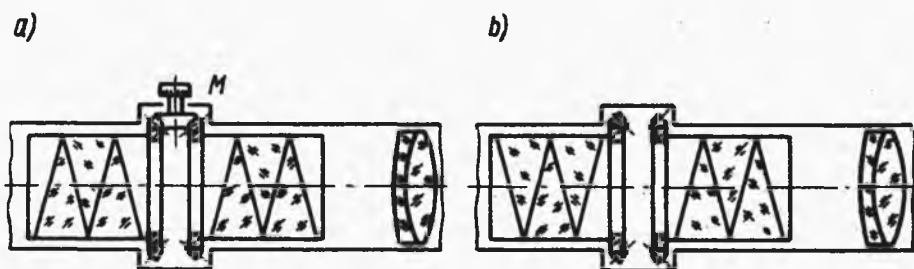
Jak wspomniano, na refraktometrze Abbego można dokonywać pomiarów współczynnika załamania ciał stałych. W tym celu cały układ refraktometru obraca się o  $180^\circ$  tak, aby pryzmat pomiarowy był zwrócony płaszczyzną roboczą ku górze (w normalnym położeniu jest on usytuowany odwrotnie). Następnie odchyła się pryzmat oświetlający, który nie bierze udziału w pomiarze. Próbkę badaną o jednej płaszczyźnie wypolerowanej (przy pomiarze w świetle odbitym - rys.7.9a) lub dwu wzajemnie prostopadłych ścianach wypolerowanych (przy pomiarze w świetle załamanym - rys.7.9b) umieszcza się na pryzmacie wzorcowym (z użyciem cieczy imersyjnej). Bieg promieni jest analogiczny jak w refraktometrze Pulfricha.

Ciecz imersyjna powinna mieć współczynnik załamania  $n_c$  spełniający zależność  $n < n_c < n_o$ , gdzie:  $n$  - współczynnika załamania ciała badanego,  $n_o$  - współczynnik załamania pryzmatu wzorcowego.

Podczas pomiarów refraktometrem Abbego używa się światła dziennego lub innego źródła światła o widmie ciągłym. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu układu kompensującego rozszczepienie światła w pryzmatach pomiarowych i próbce.



Rys.7.9. Pomiar współczynnika załamania ciała stałego refraktometrem Abbego: a) w świetle odbitym; b) w świetle załamany



Rys.7.10. Budowa kompensatora



Schemat kompensatora jest podany na rysunku 7.10.

Kompensator umieszczony jest przed obiektywem lunety celowniczej i składa się z dwóch potrójnych układów pryzmatów. Układ ten tzw. "pryzmat prostego widzenia" Amici jest wykonany w ten sposób (przez dobór kątów i szkieł poszczególnych elementów), że nie zmienia kierunku światła o długości fali odpowiadającej żółtej linii D sodu. Dla innych długości fali wprowadza pewną dyspersję. Obydwa układy pryzmatów są identyczne i mogą obracać się w przeciwne strony (przy pomocy przekładni). W układzie z rys.7.10a ich dyspersje się dodają, zaś w położeniu z rys.7.10b - odejmują. Przez jednoczesny obrót obu zespołów w przeciwnych kierunkach możemy uzyskać układ o dyspersji (zdolności rozszczepiania światła) zmiennej od zera do podwójnej wartości dyspersji każdego z elementów (dodatnią i ujemną).

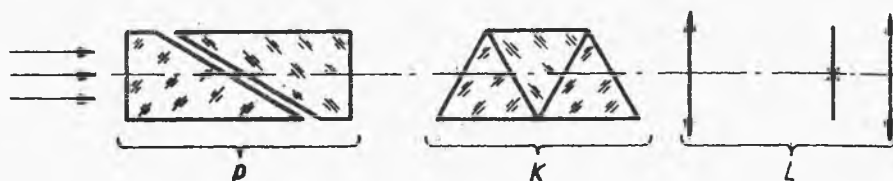
Jeśli obserwowana linia podziału pola jasnego i ciemnego w lunecie jest zabarwiona - to obracając układ kompensatora możemy wnieść dyspersję o przeciwnym znaku, o tej samej wartości. Otrzymamy wtedy ostrą linię podziału obu pól. Dodatkowo kąt obrotu kompensatora w tym położeniu daje informację o dyspersji  $n_F - n_C$  próbki badanej. Kąt obrotu można odczytać na tarczy podziałkowej kompensatora, zaś dyspersję próbki określić z odpowiednich tablic przeliczeniowych, załączonych do fabrycznego refraktometru.

Ponieważ przy dokładnych pomiarach współczynnika załamania cieczy istotny jest wpływ temperatury - w obudowę pryzmatów refraktometru Abbego można wprowadzić obieg ogrzanej wody z termostatu - dla stabilizowania temperatury.

### 3.3. Refraktometr kieszonkowy RR

Refraktometry kieszonkowe są przyrządami przeznaczonymi do określania zawartości suchej masy w różnych płynach oraz zawartości procentowej cukru w roztworze wodnym. Główną cechą tych przyrządów są małe rozmiary (dla refraktometru produkcji PZO - wymiary rzędu  $\varnothing 25 \times 155$  mm ciężar ok. 200 g). Układ optyczny przyrządu jest podobny do refraktometru Abbego (rys.7.11). Oznaczenia na rysunku: P - układ pryzmatów pomiarowych (oświetlający i wzorcowy), K - kompensator nieruchomy, dobrany dla

średniej dyspersji cieczy badanych), L - układ lunety z płytką ogniskową z podziałką.



Rys.7.11. Schemat refraktometru RR

Odczytu dokonuje się bezpośrednio odczytując wartość w procentach na podziałce w miejscu przecięcia jej przez linię graniczną pola ciemnego i oświetlonego. Podziałka jest wzorcowana dla temperatury cieczy 20°C. Wartość działki elementarnej - 0,5%.

Zakresy pomiarowe dla refraktometrów prod. PZO:

Typ	Zakres
RR1	0 - 35%
RR2	30 - 60%
RR3	55 - 85%

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zapoznać się z konstrukcją refraktometru Pulfricha i przygotować go do pomiarów (ustawienie lunety w przekroju głównym pryzmatu, wyzerowanie położenia początkowego kręgu).
2. Dobrać próbkę szkła do badań i dokonać pomiaru refraktometrem dla linii D (przy wykorzystaniu lampy sodowej jako źródła światła). Obliczyć współczynnik załamania próbki na podstawie wyników pomiarów.
3. Zapoznać się z refraktometrem Abbego. Sprawdzić prawidłowość wskazań za pomocą załączonej do refraktometru próbki wzorcowej.
4. Pomierzyć współczynnik załamania i dyspersji wybranej cieczy oraz próbki szkła.

5. Zbadać zawartość cukru w cieczy za pomocą refraktometru RR1 produkcji PZO.

## 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.

Hanc T.: Pomiar optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Omówić definicję współczynnika załamania i współczynnika dyspersji.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia i granicznego załamania.

Pomiar współczynnika załamania metodą Wollastona-Kohlrasha.

Zastosowanie cieczy imersyjnych w pomiarach współczynnika załamania ciał stałych.

Zasada budowy refraktometru Pulfricha. Regulacja układu.

Cechy konstrukcyjne refraktometru Abbego. Pomiar współczynnika załamania i dyspersji.

Zasada pomiaru zawartości cukru lub zawartości suchej masy w roztworach za pomocą refraktometru Abbego i refraktometru kieszonkowego RR.

## Ćwiczenie 8

# POMIARY OGNISKOWYCH I ZBIEGOWYCH SOCZEWEK I UKŁADÓW OPTYCZNYCH

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest przyswojenie pojęć parametrów głównych soczewek oraz zapoznanie z metodami ich pomiarów. Ćwiczenie obejmuje również zagadnienie przyosiowych własności układu optycznego.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

#### 2.1. Soczewka

Soczewkę można zdefiniować jako część przestrzeni jednorodnego ośrodka przezroczystego, ograniczoną dwiema powierzchniami ze wspólną obrotową osią symetrii, z których przynajmniej jedną nie jest płaska. Ośrodkiem takim (materiałem soczewki) może być ciało stałe (szkło, tworzywo sztuczne, kryształ); ciekłe (woda itp.) lub gazowe. Kształt powierzchni ograniczających może być różny. Ze względu na kształt powierzchni rozróżnia się soczewki sferyczne i asferyczne. Ponieważ te ostatnie występują stosunkowo rzadko (m.in. ze względu na trudności wykonania) dalej będzie mowa tylko o własnościach soczewek (lub układów złożonych z soczewek) o powierzchniach sferycznych.

Wspólna oś powierzchni ograniczających, przechodząca przez ich środki krzywizny, nazywa się osią optyczną układu. Zakłada się ponadto, że po obydwu stronach soczewki (lub zespołu soczewek) znajduje się ten sam ośrodek - powietrze.

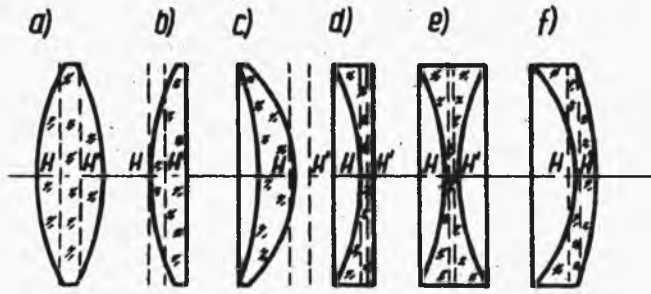
Kształt soczewki określony jest więc przez:

- dwa promienie krzywizny  $r_1$  i  $r_2$ ,

- grubość  $d$  - mierzona wzdłuż osi optycznych, czyli odległość między punktami, w których powierzchnie sferyczne przecinają oś optyczną,
- średnicę zewnętrzną soczewki.

Do określenia własności optycznych soczewki należy znać jeszcze współczynnik załamania materiału, z którego wykonana jest soczewka i własności optyczne ośrodków, w których soczewka jest umieszczona.

Wśród pojedynczych soczewek można wyróżnić soczewki skupiające lub rozpraszające. W uproszczeniu można stwierdzić, że soczewka o grubości wzdłuż osi większej od grubości na brzegu jest soczewką skupiającą (dodatnią) zaś soczewka grubsza na brzegu niż wzdłuż osi optycznej jest soczewką rozpraszającą (ujemną). Różne rodzaje soczewek przedstawia rys.8.1.



Rys.8.1. Rodzaje soczewek

Soczewki dodatnie (skupiające) to: a) dwuwypukła, b) płaskowypukła, c) wypukło-wklęsła, natomiast ujemne (rozpraszające) to: d) płaskowklęsła, e) dwuwklęsła, f) wklęsłowypukła.

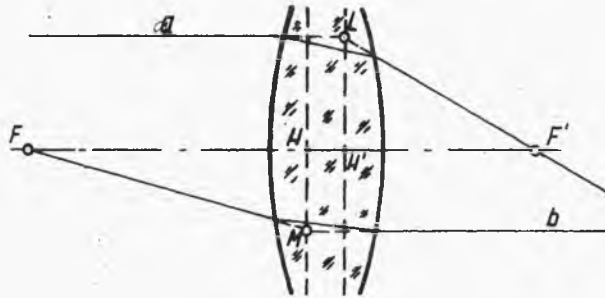
Soczewki c i f nazywane są również meniskami.

## 2.2. Parametry optyczne soczewki

Teraz zostaną wprowadzone elementarne pojęcia charakteryzujące tzw. przyosiowe własności soczewki (tzn. pojęcia służące dla założenia bardzo małej średnicy soczewki i biegu promieni optycznych blisko osi optycznej).

Niech będzie dana soczewka i padający na nią promień, biegnący równoległe od osi optycznej (rys.8.2). Promień załamie się kolejno na obydwu powierzchniach soczewki i przetnie oś

optyczną (rozpatrywane są układy z obrotową osią symetrii) w punkcie  $F'$  zwanym ogniskiem obrazowym. Punkt  $L$  przecięcia



Rys.8.2. Płaszczyzny główne i ogniska soczewki

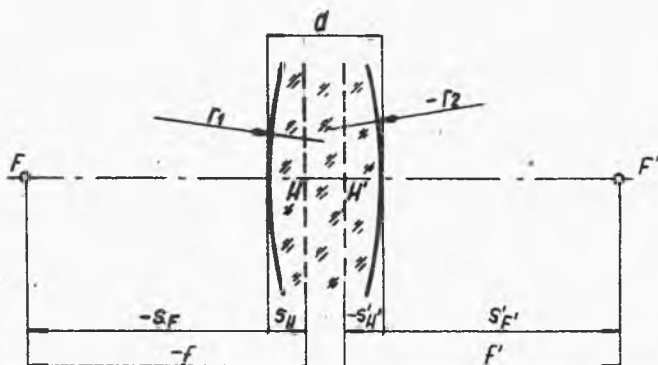
przedłużeń promienia padającego i załamane go przez soczewkę wyznacza położenie płaszczyzny głównej obrazowej  $H'L$  prostopadłej do osi optycznej soczewki. Podobnie punkt  $M$ , wyznaczony przez przecięcie się przedłużeń promienia wychodzącego z ogniska przedmiotowego  $F$  (rys.8.2, promień  $b$ ) przed soczewką i tego promienia po przejściu przez soczewkę (równoległe do osi) - określa położenie płaszczyzny głównej przedmiotowej  $HM$ . Punkt  $H'$  płaszczyzny głównej obrazowej leżący na osi nazywa się punktem głównym obrazowym, zaś punkt  $H$  - płaszczyzny głównej przedmiotowej, leżący na osi - punktem głównym przedmiotowym.

Płaszczyzny główne soczewki są elementami sprzężonymi (obraz przedmiotu leżącego w jednej z nich tworzy się na drugiej). Jest to łatwe do udowodnienia np. przez wyznaczenie obrazów metodą wykreślną. Powiększenie poprzeczne w płaszczyznach głównych  $\beta = +1$ .

Odległość od  $H'$  do  $F'$  (od obrazowego punktu głównego do ogniska obrazowego) jest ogniskową obrazową  $f'$  soczewki, zaś odległość  $HF$  (od głównego punktu przedmiotowego  $H$  do ogniska przedmiotowego  $F$ ) - ogniskową przedmiotową  $f$ . Dla soczewki w powietrzu wielkości te różnią się tylko znakiem (zgodnie z ogólnie przyjętą umową za dodatnie uważa się kierunki skierowane zgodnie z biegiem promieni świetlnych w układzie, a za ujemne - skierowane przeciwnie; na rysunkach zazwyczaj przyjmuje się bieg światła od strony lewej do prawej). Odległości

ognisk układu (soczewki)  $F$  i  $F'$  od punktów przecięcia powierzchni soczewki z osią optyczną nazywają się odpowiednio zbiegowymi (lub ogniskowymi czółowymi) soczewki: przedmiotową  $s_P$  i obrazową  $s'_P$ . Używa się też oznaczeń odległości płaszczyzn głównych od powierzchni soczewki  $s_H$  oraz  $s'_H$ . Oczywiście  $s_H = s_P - f$  oraz  $s'_H = s'_P - f'$ .

Na rysunku 8.3 przedstawione są wymienione wielkości charakterystyczne soczewki. Na rysunkach konstrukcyjnych soczewki



Rys.8.3. Charakterystyczne wielkości soczewki

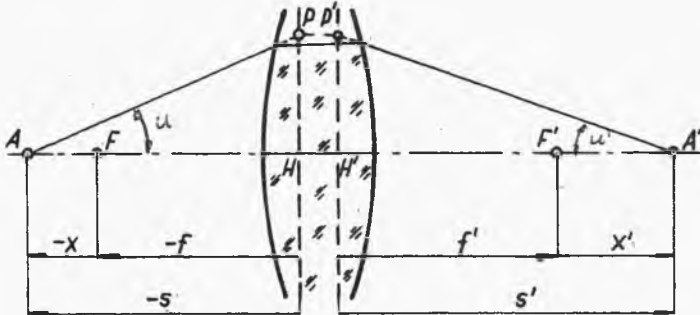
poza wielkościami konstrukcyjnymi (promienie krzywizn, grubość, średnice zewnętrzne i średnice optyczne czynne, materiał) określa się również charakterystyczne wielkości optyczne ( $f'$ ,  $s_P$ ,  $s'_P$ ) oraz szereg wymagań dokładnościowych i materiałowych.

W bardzo uproszczonych rozważaniach przyjmuje się grubość soczewki  $d = 0$  i przechodzi się do pojęcia soczewki cienkiej. W soczewce takiej punkty  $H$  i  $H'$  pokrywają się ze sobą i ze środkiem soczewki.

Dla soczewki grubej promień padający tak, że jego przedłużenie przechodzi przez punkt  $H$ , zostaje przekształcony przez soczewkę na promień, którego przedłużenie przechodzi przez punkt  $H'$ , przy czym promień ten jest równoległy do promienia padającego (dla soczewki cienkiej jest przedłużeniem promienia padającego).

Punkt przecięcia  $P$  (rys.8.4) przedłużenia dowolnego promienia padającego z płaszczyzną główną przedmiotową leży na tej samej wysokości od osi optycznej co punkt  $P'$  przecięcia

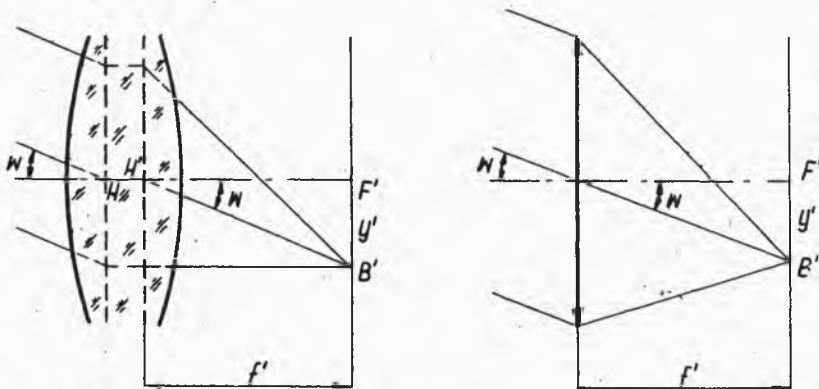
przedłużenia promienia przekształconego z płaszczyzną główną obrazową. Punkt  $P'$  jest obrazem punktu  $P$ .



Rys.8.4. Odzworowanie przez soczewkę przedmiotu leżącego na osi w skończonej odległości

Płaszczyzny prostopadłe do osi optycznej przechodzące przez ogniska nazywają się płaszczyznami ogniskowymi. Obrazy przedmiotów nieskończenie odległych leżą w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej, zaś obrazy punktów płaszczyzny ogniskowej przedmiotowej leżą w nieskończoności. Pojęcia podstawowe optyki geometrycznej podaje Polska Norma PN-71/N-02303.

Niech z punktu nieskończenie odległego  $B$ , leżącego poza osią optyczną pada pęcz promieni nachylonych względem osi pod kątem  $w$  (rys.8.5a). Pęcz ten (promieni równoległych względem siebie) przekształca się po przejściu przez soczewkę w pęcz zbieżny w punkcie  $B'$ , leżącym w płaszczyźnie ogniskowej obra-



Rys.8.5. Odzworowanie przez soczewkę przedmiotu leżącego poza osią w nieskończoności



zowej. Położenie tego punktu można wyznaczyć, rozpatrując wybrany promień z pęku padającego, którego przedłużenie przechodzi przez punkt H. Przedłużenie tego promienia w przestrzeni obrazowej (po przejściu przez soczewkę) przejdzie przez H', a kierunek będzie równoległy do kierunku promienia padającego (rys.8.5a). Analogiczny bieg promieni dla soczewki cienkiej ukazuje rys.8.5b.

Położenie A' - obrazu punktu A w odległości skończonej można wyznaczyć ze wzoru (2) lub wzoru (5) (rys.8.4):

### 2.3. Niektóre analityczne zależności dla soczewki

Mocą soczewki nazywa się wielkość zdefiniowaną jako  $1/f'$ . Jest ona wyznaczana zależnością

$$D = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n - 1) d}{n r_1 r_2} \right], \quad (1)$$

a dla soczewki cienkiej, gdy  $d = 0$

$$D = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1a)$$

U w a g a: Promień  $r$  jest mierzony od powierzchni sferycznej do jej środka krzywizny. Jest on dodatni, jeśli jest skierowany zgodnie z kierunkiem biegu światła w układzie, zaś ujemny przy zwrocie przeciwnym (rys.8.3).

Jeśli dany jest punkt na osi w odległości  $s$  od płaszczyzny głównej przedmiotowej, to jego obraz leży na osi w odległości  $s'$  od płaszczyzny głównej obrazowej. Odległości  $s'$  można wyznaczyć ze wzoru Descartes'a

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}; \quad (2)$$

(wszystkie wielkości we wzorze podlegają wspomnianej już regule znaków).

Położenie punktów głównych i ognisk względem odpowiednich powierzchni określają wzory:

$$\begin{aligned} s_F &= -f' \left[ 1 + \frac{d(n-1)}{n r_2} \right], & s_{F'} &= f' \left[ 1 - \frac{d(n-1)}{n r_1} \right], \\ s_H &= -\frac{d(n-1)}{n r_2} f', & s_{H'} &= -\frac{d(n-1)}{n r_1} f'; \end{aligned} \quad (3)$$

w szczególności dla soczewki cienkiej

$$s_F = f, \quad s_{F'} = f', \quad s_H = s_{H'} = 0.$$

Dla soczewki o jednej powierzchni płaskiej np. rys.8.1b wzory przedstawiają się następująco:

$$D = \frac{1}{f'} = \frac{n-1}{r},$$

$$s_F = f, \quad s_{F'} = f' - \frac{d}{n}, \quad (4)$$

$$s_H = 0, \quad s_{H'} = -\frac{d}{n}.$$

Do analitycznego wyznaczenia położenia obrazu punktu na osi często wygodnie jest zamiast wzoru Descartes'a używać wzoru Newtona

$$x x' = -f'^2, \quad (5)$$

gdzie:  $x, x'$  - odległości punktu i jego obrazu odpowiednio od ogniska przedmiotowego i obrazowego soczewki (rys.8.4).

Dla soczewki ujemnej (rozpraszającej)  $f' < 0$ , zaś dla soczewki dodatniej (skupiającej)  $f' > 0$ . Wynika to z rozważania pojęcia ogniskowej obrazowej.

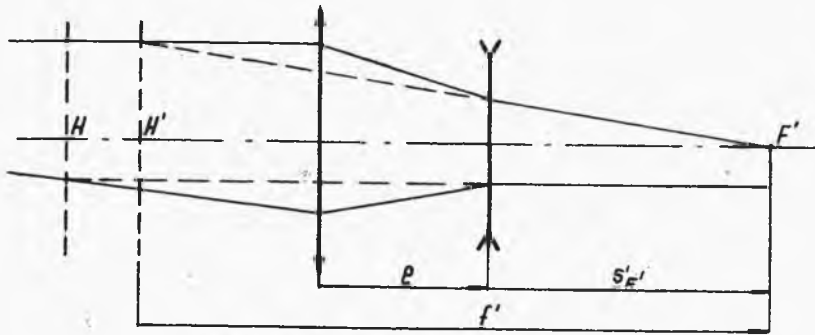
Jak już wspomniano pojęcia ogniskowych, ogniskowych czołowych, płaszczyzn głównych, można określić zarówno dla pojedynczych soczewek jak i do całych układów (z wyjątkiem tzw. układów bezogniskowych), przy czym odległości czołowe i odległości płaszczyzn głównych są wtedy mierzone od pierwszej i ostatniej powierzchni układu. Dla układu dwóch soczewek cienkich o ogniskowych  $f'_1$  i  $f'_2$  oraz odległości między nimi  $e$ , zależności przedstawiają się następująco:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2},$$

$$s_F = f \left( 1 + \frac{e}{f'_2} \right) = -f' \left( 1 - \frac{e}{f'_2} \right) s_H = \frac{e f}{f'_2} = \frac{e f'}{f'_2}, \quad (6)$$

$$s_{F'} = f' \left( 1 - \frac{e}{f'_1} \right), \quad s_{H'} = -\frac{e f'}{f'_1}.$$

Wzory te można stosować również dla soczewek grubych, interpretowanych jako układ płaszczyzn głównych (z pominięciem powierzchni soczewek). W zależności od wartości i znaków elementów składowych płaszczyzn główne układu mogą być przesunięte nawet poza obręb układu. Przykładem tego jest np. układ teleobiektywu (rys.8.6), składający się z soczewki dodatniej i ujemnej. Układ tego typu umożliwia uzyskanie np. w układach fotograficznych zmniejszenie wymiarów układu o dłuższej ogniskowej.



Rys.8.6. Układ teleobiektywu

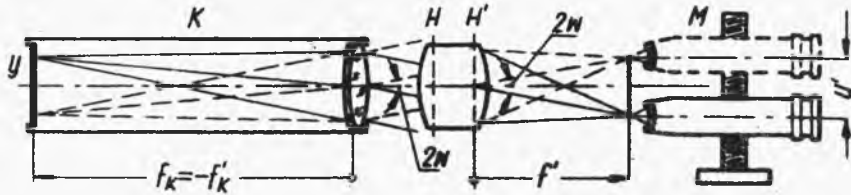
### 3. METODY POMIARU

Istnieje szereg metod wyznaczania wielkości ogniskowych soczewki, opierających się na pomiarach różnych wielkości (np. położenia przedmiotu i obrazu dla badanego układu, pomiarze powiększenia poprzecznego danego przez układ w jednej lub kilku płaszczyznach sprzężonych, pomiarze kątów na goniometrze, porównaniu ze znanym układem itp.). Tutaj omówione będą tylko metody wykorzystywane w czasie ćwiczeń w laboratorium optyki IKPPI0.

#### 3.1. Pomiar ogniskowej metodą Porro

Pomiar ogniskowej metodą Porro, najczęściej stosowany w praktyce warsztatowej, opiera się na wykorzystaniu kolimatora

o znanej ogniskowej  $f'_k$  i znanych wymiarach testu na płytce ogniskowej (rys.8.7).



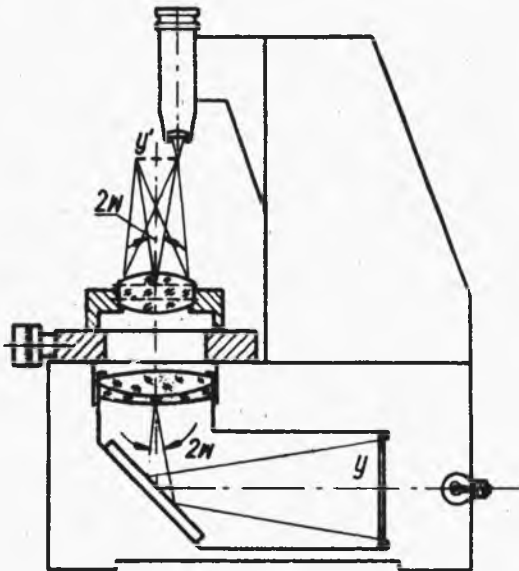
Rys.8.7. Pomiar ogniskowej soczewki skupiającej metodą Porro

Obraz testu dany przez obiektyw kolimatora tworzy się w nieskończoności. Za kolimatorem umieszczono badany układ optyczny  $HH'$ , który tworzy obraz testu kolimatora w swojej płaszczyźnie ogniskowej obrazu. Odległość  $y'$  obrazów kresek testu mierzy się najczęściej mikroskopem celowniczym, przesuwającym za pomocą śruby mikrometrycznej. Z rysunku

$$\left| \frac{y}{f'_k} \right| = \left| \frac{y'}{f'} \right|, \quad \text{tg } w = \frac{y}{2f'_k}, \quad (7)$$

$$f' = \left| \frac{y}{y'} \right| f'_k, \quad (8)$$

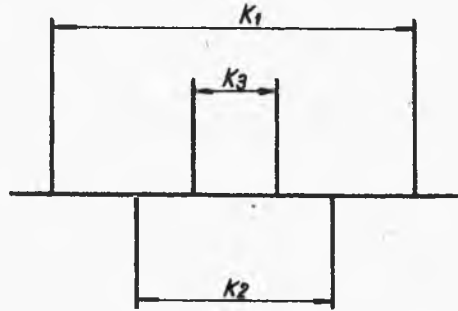
$$f' = k y'.$$



Rys.8.8. Mikroskop warsztatowy przystosowany do pomiarów ogniskowej metodą Porro.

W przyrządach warsztatowych do pomiaru ogniskowej wartość  $k$  jest podana. Często doбира się ją tak, aby  $k = 10, 20 \dots$  W laboratorium układ taki jest zainstalowany w kolimatorze o ogniskowej 1 m z mikroskopem umieszczonym na ławie optycznej. Nieco zmodyfikowany układ zastosowano w adaptowanym mikroskopie warsztatowym

(rys.8.8). W układzie mikroskopu oświetlacz zastąpiono kolimatorem z płytką ogniskową z testem. Mierzony układ umieszcza się na stole mikroskopu, zaś pomiaru  $y'$  dokonuje się przesuwem stolika za pomocą śruby mikrometrycznej. Czasem na płytce ogniskowej umieszcza się kilka par kresk do większej wygody pomiaru układów o różnych wartościach ogniskowej. W przyrządach stosowanych w laboratorium zastosowano rysunek testu (rys.8.9) o następujących wartościach stałych (tabl.1).



Rys.8.9. Rysunek testu do pomiaru ogniskowej metodą Porro

Tablica 1

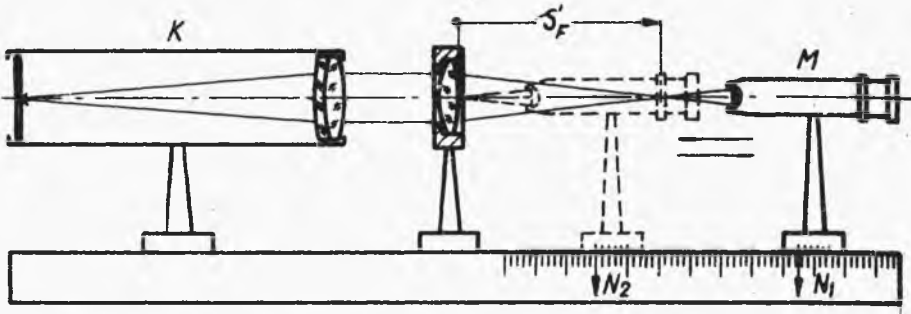
	Układ na ławie optycznej	Układ w mikroskopie warsztatowym
$k_1$	$49,856 \pm 0,027$	$5,289 \pm 0,003$
$k_2$	$71,281 \pm 0,032$	$10,535 \pm 0,008$
$k_3$	$124,356 \pm 0,024$	$21,305 \pm 0,034$

Po odczytaniu wielkości  $y'$  ogniskową badanego układu oblicza się ze wzoru (8).

### 3.2. Metoda pomiaru ogniskowych czołowych soczewki dodatniej

Ogniskową czołową (lub też inaczej odległość ogniska od ostatniej powierzchni układu optycznego) soczewki mierzy się najczęściej za pomocą układu pomiarowego złożonego z: kolimatora, układu badanego i mikroskopu obserwacyjnego, umieszczonych na ławie optycznej z możliwością dokonania odczytu położenia mikroskopu na podziałce ławy. Kolimator pozoruje położenie przedmiotu w nieskończoności, a obraz przedmiotu dany przez badany układ utworzy się w jego płaszczyźnie ogniskowej obrazowej. Mikroskop ustawia się dwukrotnie: raz tak, aby zobaczyć

bez paralaksy obraz testu kolimatora, zaś drugi raz tak, aby przez mikroskop zaobserwować ostatnią powierzchnię badanego układu (rys.8.10).



Rys.8.10. Pomiar ogniskowej czołowej układu skupiającego

U w a g a: Ponieważ mikroskop ma pewną odległość czołową płaszczyzny przedmiotowej od obiektywu - nie należy dosuwać go na styk do powierzchni układu - może to spowodować uszkodzenie powierzchni optycznych układu badanego lub mikroskopu.

Różnica odczytów położenia mikroskopu na ławie dla obydwu ustawień

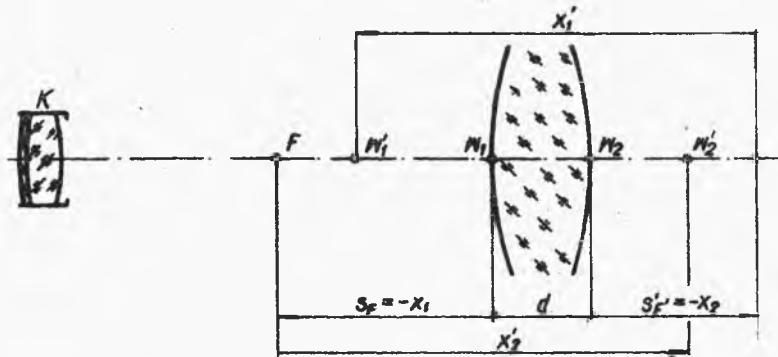
$$S'_F = N_2 - N_1 \quad (9)$$

daje wartość ogniskowej czołowej układu. Dla pomiaru drugiej czołowej należy badany układ odwrócić i powtórzyć te same czynności.

Układ pomiarowy opisany powyżej (ława optyczna) może również służyć do pomiaru ogniskowej. Poza określeniem  $s'_F$  i  $s_F$  należy pomierzyć położenie obrazów powierzchni soczewki danej przez soczewkę odpowiednio do drugiej przestrzeni (patrz rys. 8.11). Będą to wielkości:  $s'_F = F'W_2 = -x_2$ ,  $FW'_1 = x'_1$  oraz po odwróceniu układu  $FW'_2 = x_2$  i  $s_F = W_1F = -x_1$ ; wtedy ze wzoru Newtona

$$f'^2 = s_F F'W'_1 = s'_F F_2W'_2 = -x_2 x'_2 = -x_1 x'_1 \quad (10)$$

Jednocześnie znając grubość układu  $d = W_1W_2$  znajdujemy położenie płaszczyzn głównych  $HH'$ , a co za tym idzie - układ optyczny jest całkowicie określony.



Rys.8.11. Pomiar ogniskowej na ławie optycznej

### 3.3. Uwagi o niedokładności pomiaru ogniskowej i wyznaczenia położenia ognisk w układzie

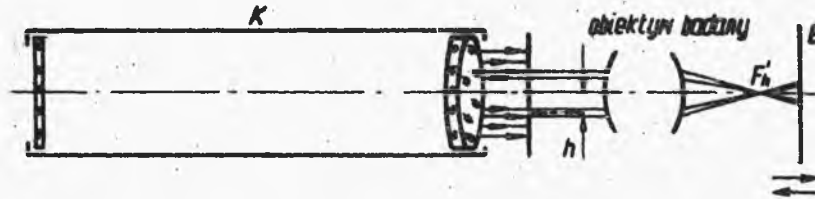
Omówione w punkcie 3.1 wielkości charakterystyczne soczewek są wielkościami przyosiowymi, tzn. są one słuszne dla promieni biegnących blisko osi optycznej. Gdy jednak rozpatrywać układy rzeczywiste można stwierdzić, że pęk promieni monochromatycznych, równoległych do osi optycznej - po przejściu przez układ przestaje być pękiem homocentrycznym (zbiegającym się w jednym punkcie). Jest to skutek aberracji sferycznej układu. Podczas pomiarów zawsze otrzymuje się więc pewne położenie środkowe, w którym przekrój pęku jest najmniejszy (przy pominięciu dyfrakcji). Ogólnie położenie środkowe nie pokrywa się z ogniskiem przyosiowym. Jeżeli zależy na określeniu położenia ogniska "strefowego" dla danej strefy padania promieni na układ, należy przed układem umieścić przysłonę odcinającą promienie biegnące poza daną strefę (symetryczną względem środka układu). W ten sposób można zmierzyć położenie ogniska dla danej strefy (rys.8.12).

Wiązkę promieni równoległych (biegnących z punktu nieskończenie odległego) realizuje kolimator.

Z rozważania wzoru Newtona

$$x x' = -f'^2$$

dla badanego układu wynika, że odległość obrazu od ogniska obrazowego jest odwrotnie proporcjonalna do odległości przedmiotu.



Rys.8.12. Wyznaczenie położenia ogniska "strefowego" dla układu optycznego skupiającego o obrotowej osi symetrii

Wynika stąd, że: np. jeśli należy mierzyć położenie ogniska obrazowego (czołową ogniskową obrazu) z dokładnością 0,1%, to kolimator musi zrealizować przedmiot dla badanego układu w odległości większej niż 1000  $f'$  (1000 ogniskowych badanego układu).

Należy zwrócić również uwagę na korelację między ogniskową badanego układu, a ogniskową kolimatora. Dwukrotnie zastosowany wzór Newtona (do kolimatora i do układu badanego) pozwala ustalić następującą zależność między błędem ustawienia płytki kolimatora a błędem pomiaru ogniskowej czołowej.

$$\Delta x' = \Delta x_k \frac{f'^2}{f_k^2}, \quad (11)$$

gdzie:  $\Delta x'$  - błąd pomiaru,

$\Delta x_k$  - błąd ustawienia płytki kolimatora,

$f', f_k$  - ogniskowe elementu badanego i kolimatora.

Wynika stąd, że kolimator powinien mieć ogniskową dłuższą od ogniskowej elementu badanego. Ponadto wg A. Zachariewskiego dokładność zogniskowania kolimatora  $\Delta x_k$  wyraża się wzorem

$$\Delta x_k = \frac{2\lambda}{6 A^2}, \quad (11)$$

gdzie:  $A$  - apertura obiektywu kolimatora,

$\lambda$  - długość fali świetlnej.

Ze względu na głębłą ostrości mikroskopu celowniczego wraz ze wzrostem ogniskowej powinna rosnać apertura (otwór czynny)



obiektywu kolimatora. Z podanych wzorów, przy założonej aperturze kolimatora oraz żądanej dokładności pomiaru można dla danego zakresu ogniskowych badanych elementów określić ogniskową kolimatora. Średnio przyjmuje się, że obiektyw kolimatora powinien mieć ogniskową 3 - 5 razy dłuższą od ogniskowej badanego elementu.

Na koniec należy wspomnieć, że omówione metody pomiaru ogniskowych i czołowych można wykorzystać przy pomiarze ogniskowych układów ujemnych (rozpraszających) pod warunkiem zastosowania mikroskopu celowniczego o dużej odległości płaszczyzny przedmiotu (dłuższej od mierzonych wielkości układu) od oprawy obiektywu.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zmierzyć ogniskową wybranego układu optycznego (soczewki) metodą Porro. Pomiar wykonać za pomocą urządzenia w adaptowanym mikroskopie warsztatowym.
2. Pomierzyć obydwie ogniskowe czołowe układu za pomocą zestawu: ława optyczna z kolimatorem i mikroskopem celowniczym.
3. Przeprowadzić analizę otrzymanych wyników i oszacować dokładność pomiaru.

#### 5. LITERATURA

- Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1966.  
Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.  
Wagnerowski T.: Optyka praktyczna. PWT. Warszawa 1959.  
Praca zbiorowa: Podstawy optyki instrumentalnej. PWT. Warszawa 1957.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Omówić:

- podstawowe przyosiowe własności charakterystyczne soczewki (układu optycznego),
- parametry konstrukcyjne soczewki,
- typy i rodzaje soczewek,
- analityczne zależności między własnościami optycznymi soczewki, a jej parametrami konstrukcyjnymi,
- podstawowe prawa przekształcenia przyosiowego przez układ optyczny (wzory Descartes'a, Newtona),
- zasadnicze zależności dla wyznaczenia parametrów układów złożonych,
- pomiar ogniskowej metodą Porro,
- pomiar ogniskowych czołowych,
- czynniki wpływające na dokładność pomiaru ogniskowych czołowych.

## Ćwiczenie 9

### POMIARY PROMIENI KRZYWIZN POWIERZCHNI ELEMENTÓW OPTYCZNYCH

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych sferometrycznych i autokolimacyjnych metod pomiaru promieni krzywizn powierzchni sferycznych elementów optycznych. Pomiary dużych promieni krzywizn omówione są w ćwiczeniach 10 oraz 12 (metody interferencyjne).

## 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Pomiary kształtu powierzchni optycznych wyróżnia dokładność oceny odchyłek kształtu rzędu  $\lambda/20$ ,  $\lambda/50$  w przypadku powierzchni sferycznych i  $\lambda/100$ ,  $\lambda/200$  powierzchni płaskich lub powierzchni elementów optyki astronomicznej.

Czynnikiem utrudniającym pomiary jest konieczność unikania bezpośredniego zetknięcia narzędzia mierniczego z powierzchnią optycznie czynną przedmiotu ze względu na wymaganą czystość i gładkość powierzchni elementów wykonanych niekiedy z materiałów mało odpornych na działanie mechaniczne lub chemiczne (np. niektóre kryształy), bądź też pokrytych cienkimi powłokami ochronnymi, przeciwodblaskowymi lub zwierciadlanymi.

W praktyce produkcyjnej pomiary krzywizn typowych elementów optycznych zasadniczo sprowadzają się bądź do pomiarów wzorców, których repliki stosowane na stanowiskach roboczych służą jako sprawdziany, bądź do pomiarów pojedynczych elementów wykonywanych jednostkowo (np. duże zwierciadła).

Podstawowe metody pomiaru promieni oparte są na:

- pomiarze średnicy elementu o kształcie pośrednim między półkulą a kulą (strzałka łuku  $h > R$ ), stosowanym np. przy pomiarze wzorcowych sprawdzianów interferencyjnych lub czołowych soczewek obiektywów mikroskopowych,
  - pomiarze strzałki łuku powierzchni (przyjęła się nazwa "metody sferometryczne"),
  - pomiarach autokolimacyjnych,
  - pomiarach interferencyjnych,
  - pomiarach cieniowych,
  - pomiarach położenia obrazu astygmatycznego.
- } stosowanych przy dużych promieniach krzywizn (ćwiczenie 10).

### 2.1. Pomiary promienia krzywizny realizowane przez pomiar średnicy kuli

Powierzchnie wypukłych sprawdzianów interferencyjnych w zakresie promieni 0 - 25 mm (wg BN-74/5520-02) wykonywane są w kształcie niepełnej kuli ( $h/R = 1,2$ ). Pomiary prowadzi się metodami znanymi w metrologii technicznej (np. za pomocą opti-

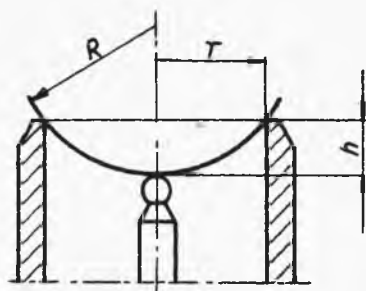
metrów) z zastrzeżeniem dotyczącym konieczności zachowania pierwotnej gładkości wypolerowanych powierzchni przedmiotu.

## 2.2. Pomiar promienia krzywizny za pomocą sferometru pierścieniowego

Metoda ta jest rozpowszechniona ze względu na uniwersalność stosowania jej do powierzchni wypukłych i wklęsłych, jedynym ograniczeniem wymiaru średnicy mierzonego przedmiotu i szeroki zakres wartości promieni. Zasada pomiaru polega na mierzeniu strzałki łuku powierzchni opartej o krawędź pierścienia o znanej średnicy. Znajomość wartości strzałki  $h$  i promienia pierścienia osadczego  $r$  pozwala na obliczenie promienia krzywizny  $R$  wg zależności

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}.$$

Miarą strzałki  $h$  (rys.9.1) jest poosiowe przesunięcie trzpienia mierniczego usytuowanego w osi symetrii pierścienia



Rys.9.1. Zasada pomiaru sferometrem pierścieniowym

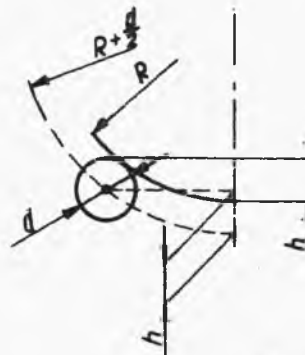
osadczego, zmierzone dla dwóch pozycji trzpienia: gdy opiera się on o powierzchnię przedmiotu badanego oraz o powierzchnię płaskiej płytki (szklanej ze względu na dokładność wykonania) spoczywających na pierścieniu osadczym.

Instrukcje obsługi sferometrów zawierają dla każdego z wymienionych pierścieni dane o wartościach  $r$  lub częścię o wartościach stałej  $A = \frac{r^2}{2}$ .

W nowych sferometrach stosuje się niemal wyłącznie pierścienie z trzema (stalowymi lub korundowymi) kulkami o średnicy  $d$  zastępującymi krawędź osadczą, rozstawionymi w równych odległościach od siebie i w odległości  $r$  od osi pierścienia osadczego (rys.9.2)

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm \frac{d}{2}.$$

Znak "plus" stosuje się dla powierzchni wklęsłych, "minus" dla powierzchni wypukłych. Wartość  $r$  i  $d$  znane są z atestów przyrządów pomiarowych. Metody sferometryczne można stosować również do pomiarów kształtu powierzchni asferycznych o obrotowej osi symetrii (np. paraboloidalnych, elipsoidalnych) przez pomiar strzałki  $h$  przy użyciu szeregu wymiennych pierścieni osadczych o różnych średnicach. Do pomiaru krzywizny powierzchni walcowych używa się pierścieni z czterema kulkami również rozstawionymi symetrycznie w znanych odległościach. Możliwy jest także pomiar kształtu powierzchni torycznych (o dwóch różnych promieniach krzywizny w przekrojach wzajemnie prostopadłych) przez zastąpienie pierścienia dwoma stałymi trzpieniami oporowymi, między którymi przesuwają się trzpień mierniczy, bądź przez pomiar strzałki kolejno dla dwóch różnych pierścieni czterokulkowym (przy czym punkty podparcia tworzą prostokąt).



Rys.9.2. Zasada pomiaru sferometrem kulkowym

Niedokładności pomiaru krzywizny za pomocą sferometrów związane są z błędem wartości promienia pierścienia osadczego  $r$ , nieprostoliniowością przesuwu trzpienia mierniczego, ekscentrycznością pierścienia i trzpienia, błędowi wykonania podziałki, względem której mierzony jest ruch trzpienia, zmiennych nacisków mierniczych, błędami odczytu i błędami temperaturowymi.

Zakres wartości promieni, do których praktycznie stosuje się metody sferometryczne zawiera się w granicach wartości promieni 20 - 1000 mm, błąd względny pomiaru  $R$  pojedynczych elementów 0,02%, a dla pary sprawdzianów interferencyjnych o powierzchniach wypukłej i wklęsłej 0,01%.

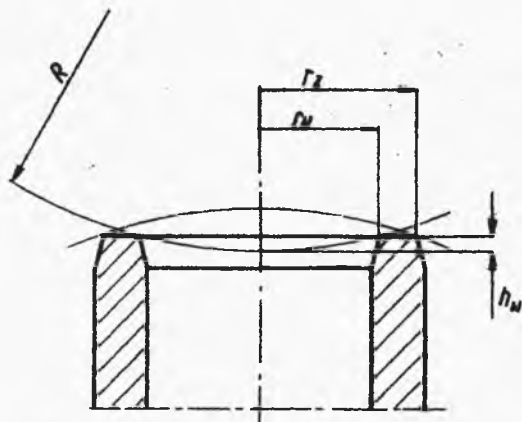
Metody sferometryczne stosowane są zarówno do pomiarów bezwzględnych promienia krzywizny jak i pomiarów porównawczych w stosunku do wzorca, stosowanych w kontroli międzyoperacyjnej np. przy szlifowaniu powierzchni soczewek. Pomiar różnic strzałki łuku powierzchni realizowany jest przy użyciu czujników zegarowych lub pneumatycznych. Pomiar promieni krzywizny szklanych sprawdzianów interferencyjnych prowadzone są ze szczegól-

ną starannością. Sprawdziany interferencyjne - jeżeli nie są replikami tak jak tzw. sprawdziany robocze wykonywane do użytku warsztatowego wg sprawdzianów wzorcowych - wykonywane są jednocześnie dla powierzchni wypukłej i wklęsłej. Pomiar średniego promienia krzywizny, którego wartość znajdzie się w oznaczeniu sprawdzianu, realizowany za pomocą urządzeń sferometrycznych opisanych przykładowo w p.3.1 powinien uwzględnić:

a) błędy systematyczne:

- błąd wykonania podziałki związanej z ruchomym trzpieniem pomiarowym. Przy pomiarach dokładnych konieczne jest uwzględnienie poprawek, których wartości związane są z określonym przyrządem,

- błąd promienia krzywizny krawędzi pierścienia osadczego (krawędzi zewnętrznej dla powierzchni wklęsłych i krawędzi wewnętrznej dla powierzchni wypukłych (rys. 9.3),



Rys.9.3. Pierścień sferometru

- błąd płaskości powierzchni czołowej pierścienia osadczego wynikający z dopuszczalnej niepłaskości - określonej w stosunku do szklanego wzorcowego sprawdzianu interferencyjnego - nie większej niż 2 prążki interferencyjne ( $\sim 0,6 \mu\text{m}$ ),

- błąd związany z odstępstwem od zalecanej temperatury otoczenia  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , unikany dzięki laboratoryjnym warunkom, w których prowadzone są pomiary;

b) błędy przypadkowe - jak zaznaczono w rozdziale I - obliczone są jako błędy maksymalne:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2},$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial r} \right| |\Delta r| + \left| \frac{\partial R}{\partial h} \right| |\Delta h|.$$

$$\Delta R = \left| \frac{1}{\left(\frac{h}{r}\right)} \right| |\Delta r| + \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{1}{\left(\frac{h}{r}\right)^2} \right| |\Delta h|.$$

Krzywa na rys.9.4 przedstawia wartości błędu  $\Delta R$  w zależności od stosunku  $h/r$  przy założonych wartościach błędów granicznych  $\Delta r = \Delta h = 0,001$  mm. Z wykresu widać, że dobór średnicy pierścienia ma istotne znaczenie na wartość błędu  $\Delta R \left(\frac{h}{r}\right)$ , najmniejszego dla  $h/r = 1$ .

Obliczenie średniego promienia krzywizny pary sprawdzianów interferencyjnych uwzględnia błędy popełnione przy pomiarze promieni powierzchni wypukłej i wklęsłej. W obliczeniach wprowadza się wielkości: średniego promienia pierścienia osadczego  $\varrho = \frac{r_w - r_z}{2}$  i sumarycznej strzałki  $m = h_w + h_z$  oraz

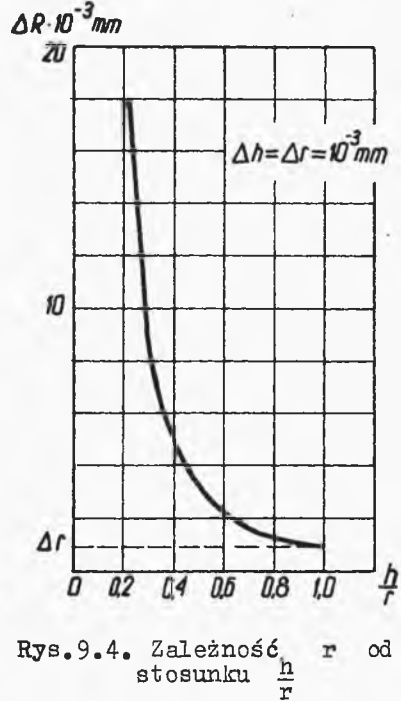
$$K = 2 \frac{r_z - r_w}{r_z + r_w}, \quad \eta = 2 \frac{m}{r_z + r_w},$$

stąd średni promień krzywizny pary sprawdzianów interferencyjnych

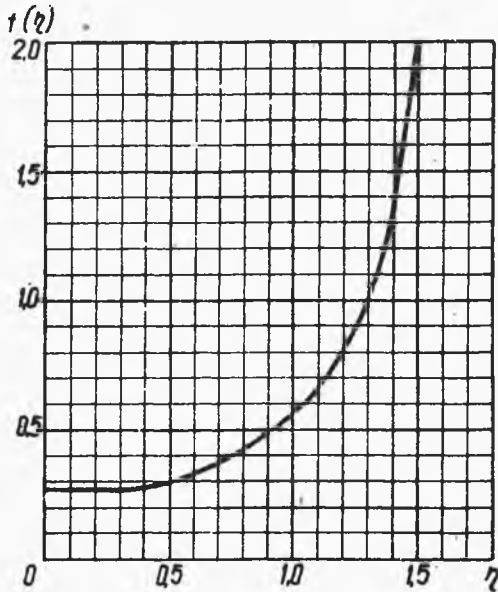
$$R = \left[ \frac{\varrho^2}{m} + \frac{m}{4} \right] \left[ 1 + K^2 f(\eta) \right]$$

Wielkość  $\eta$  wiąże wartości strzałek krzywizny i promieni pierścieni osadczych. Funkcję  $f(\eta)$  ilustruje krzywa na rys. 9.5, odpowiadająca zależności

$$f(\eta) = \frac{\eta^2 + 4}{(\eta^2 - 4)^2};$$



Rys.9.4. Zależność  $\Delta R$  od stosunku  $\frac{h}{r}$



Rys.9.5. Zależność współczynnika  $f(\eta)$  od  $\eta$

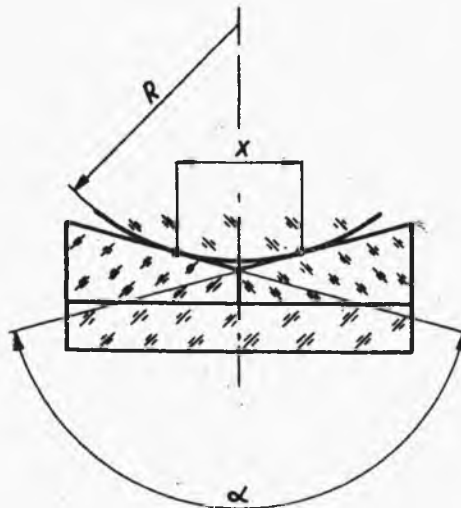
(wyprowadzenie  $f(\eta)$  można znaleźć w DIN 58 161, Blatt 3). Ze względu na zużywanie się pierścieni, a szczególnie ścieranie się krawędzi wewnętrznej i zewnętrznej pierścienia osadczego podczas eksploatacji sferometru następuje zmiana promieni  $r_w$  i  $r_z$ . Co pewien czas konieczne jest wzorcowanie pierścieni i aktualizowanie wartości  $\varrho$  obliczonej wg wzoru

$$\varrho = \sqrt{m_0 R_0 \left[ 1 - K_0^2 f(\eta) \right]} - \frac{m_0^2}{4}$$

#### 2.4. Pomiary za pomocą gniazda pryzmatycznego lub pary powierzchni sferycznych

Promień powierzchni sferycznej może być pomierzony po ułożeniu jej w gnieździe pryzmatycznym składającym się z dwóch szklanych klinów (rys.9.6) tworzących kąt dwuścienny  $\alpha$ . Odległość  $x$  między punktami styku, w których pojawiają się prążki interferencyjne, mierzona jest za pomocą mikroskopu warsztatowego, komparatora Abbego lub podobnego przyrządu składającego się z mikroskopu przeznaczonego do wizualnego ustalenia położenia punktów styku i układu pomiaru długości.  $x$  jest miarą promienia wg zależności

$$R = \frac{x}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}$$

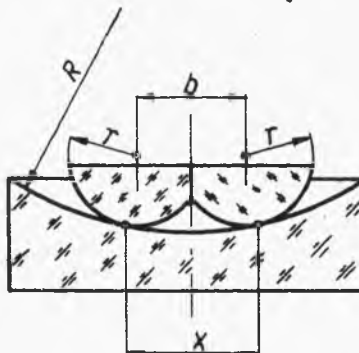


Rys.9.6. Pomiar za pomocą gniazda pryzmatycznego



Błąd pomiaru zależy od błędu pomiaru kąta  $\alpha$  (ok.  $1''$ ) i błędu pomiaru odległości  $x$ , przy czym korzystne jest stosowanie możliwie dużych wartości  $x$ . Oświetlenie monochromatyczne ułatwia lokalizację prążków. Klipy mocowane są do pomocniczej płytki na kontakt tj. przez adhezyjne zespojenie polerowanych powierzchni (bez kleiwa).

Metoda ta ma zastosowanie do powierzchni wypukłych. Zastosowanie pary powierzchni sferycznych o tym samym promieniu zamiast pary klinów pozwala na pomiar promienia krzywizny powierzchni zarówno wypukłych jak i wklęsłych (rys.9.7).



Rys.9.7. Pomiar przy użyciu pary powierzchni sferycznych

$$R = \frac{r \cdot x}{x - b},$$

gdzie:  $x$  - odległość między punktami styku powierzchni,  
 $b$  - odległość między środkami krzywizn pary powierzchni sferycznych,  
 $r$  - promień krzywizny powierzchni wzorca.

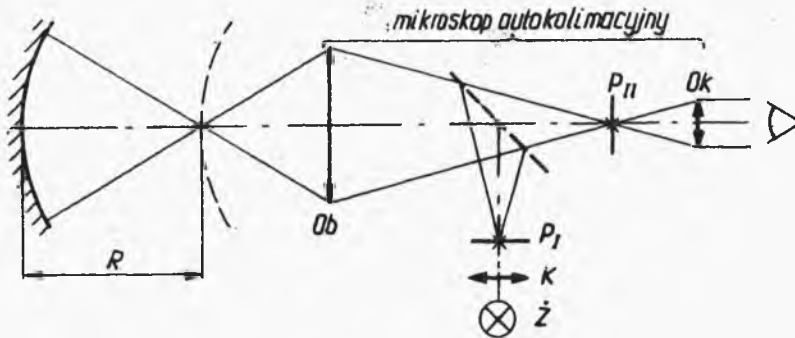
Obydwie te metody są stosunkowo proste pod warunkiem wykonania dokładnych przymiarów szklanych, co w warunkach przeciętnie wyposażonych warsztatów optycznych nie przedstawia specjalnych trudności. Błąd pomiaru promienia krzywizny tymi metodami nie przekracza  $10^{-4}R$ .

#### 2.4. Pomiary promienia krzywizny metodami autokolimacyjnymi

Zwierciadlane powierzchnie sferyczne tworzą obraz stygmacyjny tylko dla dwóch punktów: środka krzywizny i punktu leżącego bezpośrednio na tej powierzchni, przy czym obrazy tych punktów pokrywają się z położeniem przedmiotu tj. punktu w środku krzywizny lub na powierzchni zwierciadła. Ta właściwość została wykorzystana w autokolimacyjnych metodach pomiaru promieni.

Schemat pomiaru przedstawiony jest na rys.9.8, stanowi jeden z wariantów, w którym w mikroskopie autokolimacyjnym umie-

szczone są dwie płytki ze znakami celowniczymi (np. krzyżami). Jedna z nich ( $P_I$ ) oświetlona jest żarówką  $\dot{Z}$  przez kondensator  $K$ , druga  $P_{II}$  umieszczona przed okularom  $Ok$ . W omawianym mi-



Rys.9.8. Mikroskop autokolimacyjny

kroskopie obydwie płytki  $P_I$  i  $P_{II}$  znajdują się w tej samej odległości od obiektywu. Obraz krzyża  $P_I$  tworzony przez obiektyw  $Ob$  znajduje się w płaszczyźnie sprzężonej z płaszczyzną płytki ogniskowej  $P_{II}$  okularu  $Ok$ . Obraz płytki  $P_I$  będzie widoczny na tle płytki  $P_{II}$  wówczas, gdy punkt przedmiotowy mikroskopu znajduje się w środku krzywizny mierzonej powierzchni bądź pokryje się z tą powierzchnią, która zresztą będzie widoczna również dla obserwatora. Praktyczna realizacja tej metody następuje przez wykorzystanie łąwy optycznej pozwalającej na pomiar przemieszczeń przedmiotu lub sanek z mikroskopem autokolimacyjnym wzdłuż podzielnicy łąwy.

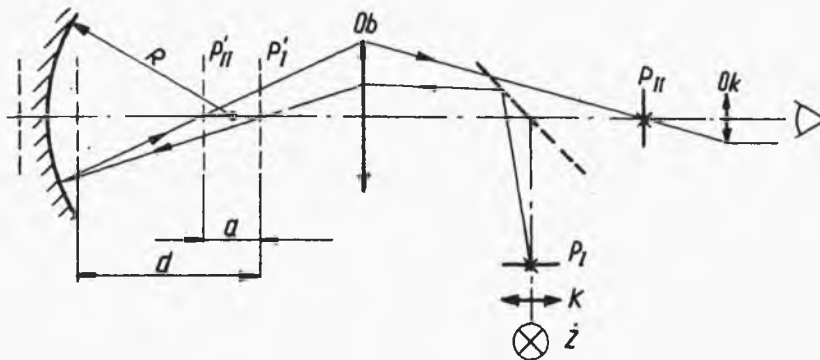
Obserwator po zamocowaniu elementu optycznego i wstępnej jego regulacji znajduje obraz autokolimacyjny krzyża widoczny na tle badanej powierzchni, a następnie obraz widoczny po odsunięciu mikroskopu odpowiadający drugiej pozycji pomiarowej. Odczyt dokonywany jest po zaniknięciu paralaksy między krzyżem okularu i autokolimacyjnym obrazem krzyża oświetlacza.

Metoda jest uniwersalna dla powierzchni wklęsłych, dla których ograniczenia wynikają tylko bądź to z określonej długości łąwy optycznej, bądź jasności obrazu autokolimacyjnego, zależnej od kąta aperturowego wiązki światła odbijanej przez badaną powierzchnię. Powierzchnie wypukłe mogą być mierzone w zakresie wartości promieni ograniczonych odległością czołową przedmiotową obiektywu mikroskopowego, niekiedy wymiennego. Do tego

pomiaru można też przystosować lunetę autokolimacyjną przez stosowanie wymiennych nasadek dodatnich na jej obiektyw.

Modyfikację powyższej metody stanowi zastosowanie mikroskopu z dwiema podobnymi płytkami ogniskowymi  $P_I$  i  $P_{II}$ , ale znajdującymi się w różnych odległościach od obiektywu.

Do uzyskania autokolimacyjnego obrazu krzyża  $P_I$  w płaszczyźnie krzyża  $P_{II}$  mikroskop musi się znaleźć w takim położeniu względem powierzchni badanej, aby utworzyła ona obraz krzyża  $P_I$  w płaszczyźnie  $P_{II}'$ . Stąd można wyprowadzić zależność na promień krzywizny przy znanych odległościach  $a$  - mię-



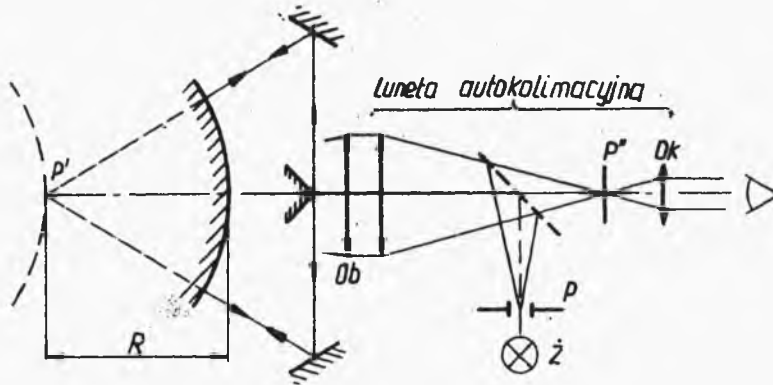
Rys.9.9. Mikroskop autokolimacyjny z rozsuniętymi płytkami ogniskowymi

dzy płaszczyznami  $P_I'$  i  $P_{II}'$  oraz przemieszczeniu  $d$  niezbędnym do ustawiania mikroskopu w dwóch pozycjach pomiarowych względem mierzonej powierzchni

$$R = \sqrt{d^2 - a^2}.$$

Wartość stała  $a$  odległości między obrazami krzyży  $P_I'$  i  $P_{II}'$  w przestrzeni przedmiotowej obiektywu jest wyznaczona dla danego mikroskopu przez obserwację obrazu odbitego od płaskiej powierzchni zwierciadlanej, ustawionej w miejsce powierzchni badanej, dla której to płaskiej powierzchni odległość od autokolimacyjnego obrazu krzyża  $P_I'$  od powierzchni zwierciadła jest równa połowie odległości między płaszczyznami  $P_I'$  i  $P_{II}'$ . Odległość  $d$  odpowiada odległości między dwiema pozycjami pomiarowymi mikroskopu: ustawionego na powierzchni i na środek krzywizny.

Odmianę metody autokolimacyjnej reprezentuje realizowana za pomocą układu pokazanego na rys.9.10, tym razem na przykładzie powierzchni wypukłej. W płaszczyźnie ogniskowej obiektywu



Rys.9.10. Mikroskop autokolimacyjny z rozdwojonym obrazem

lunety autokolimacyjnej umieszczona jest szczelina  $P$  oświetlana oświetlaczem  $\dot{Z}$ . Za obiektywem lunety umieszczony jest układ z obiektywem  $Ob$  o odpowiednio dobranej ogniskowej  $f'_{ob} > R$ , na który pada wiązka promieni równoległych, wybiegających z obiektywu lunety. W źrenicy wyjściowej obiektywu umieszczony jest układ zwierciadeł rozdzielający wiązkę promieni na dwie, symetrycznymi gałęziami biegnące ku punktowi  $P'$ . Autokolimacyjne obrazy szczeliny odbite od powierzchni sferycznej obserwowane są przez okular  $Ok$  dzięki zastosowaniu elementu światłodzielnego między szczeliną a obiektywem. Jeżeli powierzchnia badana znajdzie się w którymś z dwóch znanych już charakterystycznych punktów pomiarowych, wówczas rozdwojone obrazy szczeliny znajdą się w koincydencji (będą ze sobą zgrane). Wartość promienia  $R$  - jak poprzednio - określa względne przemieszczenie badanej powierzchni i pomiarowego układu optycznego. Metoda ta jest chętnie stosowana ze względu na wygodę obserwacji, jako że ocena wzajemnego przemieszczenia poprzecznego znaków jest łatwiejsza niż ocena wzajemnego położenia wzdłuż osi układu, wymagającego oceny paralaksy między tymi znakami.

Podobna zasada pomiaru zastosowana została np. w oftalmometrze do pomiaru promienia krzywizny rogówki przy zastosowaniu komparatorów płytkowych lub klinowych.

Zalecane metody oraz wymagane niedokładności pomiarów promieni krzywizny (na przykładzie sprawdzianów interferencyjnych) podaje tablica 1.

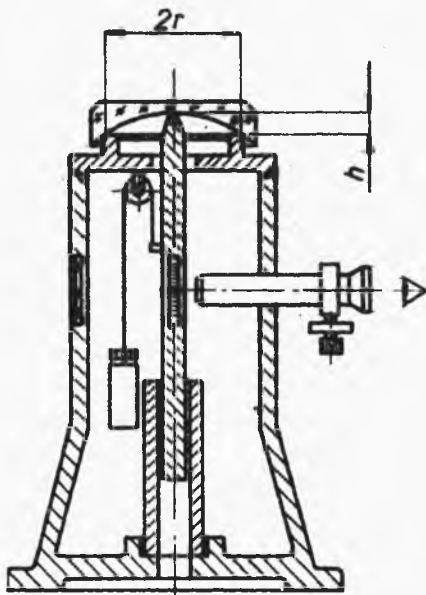
Tablica 1

Promienie krzywizny sprawdzianów [mm]	Metoda pomiaru	Graniczny błąd pomiaru promienia dla klasy sprawdzianu			
		O	A	B	C
od 0,5 do 2	Pomiar średnicy kuli na optimetrze wg wzorca długości	0,3 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm
powyżej 2 do 10		0,5 μm	0,5 μm	1 μm	2 μm
powyżej 10 do 25		0,5 μm	1 μm	2 μm	3 μm
powyżej 25 do 1000	Metoda autokolimacji ze środka krzywizny i od powierzchni sprawdzianu	0,01%	0,01%	0,02%	0,03%
powyżej 1000 do 2000		0,02%	0,02%	0,03%	0,06%
2000 do 5000		0,03%	0,04%	0,06%	0,10%
5000 do 10000		0,04%	0,06%	0,10%	0,20%
Powierzchnie płaskie	Interferometr	0,01 - 0,015 λ			

### 3. OPIS STANOWISK POMIAROWYCH

#### 3.1. Sferometr

Sferometr (firmy VEB Feinmess-Dresden) przeznaczony jest do pomiarów promieni krzywizny wypukłych i wklęsłych powierzchni kulistych za pomocą pomiaru strzałki łuku opartego na trzech kulkach rozmieszczonych na pierścieniu osadczym znanej średnicy i w jednakowych odległościach. Zakres wartości promieni pierścieni osadczych 3 - 55 mm. Wmienne pierścienie osadcze mocowane są na kołnierzu w górnej części korpusu. Z trzpieniem pomiarowym przemieszczającym się w osi pierścieni związana jest podzielnia obserwowana przez mikroskop odczytowy (schemat sferometru przedstawia rys.9.11) pozwalający na dokonanie odczytu położenia trzpienia w pozycjach pomiarowych odpowia-



Rys.9.11. Konstrukcja sferometru

trzcienia pomiarowego obsadza się końcówką mierniczą z chwytem stożkowym, zakończoną kulą agatową. Stolik płaski znajdujący się pod głowicą pomiarową może być zastąpiony analogiczną końcówką, niezbędną np. przy pomiarze grubości soczewek dwukłesłych.

### 3.2. Mikroskop autokolimacyjny na ławie optycznej

Na prowadnicach ławy optycznej umieszczony jest stolik z uchwytem do mocowania soczewki i stolik z mikroskopem autokolimacyjnym.

Mikroskop zbudowany jest wg wariantu układu optycznego, w którym zarówno płytka ogniskowa oświetlacza jak i płytka ogniskowa okularu znajdują się w jednakowych odległościach od obiektu (rys.9.8). Zastosowanie tego układu wynika z uniwersalności stosowanego przyrządu, który dzięki zastosowaniu wymienionych obiektywów może być lunetą autokolimacyjną, bądź - po wstawieniu obiektywu o krótszej niż obiektyw lunetowy ogniskowej - mikroskopem. Powiększenie okularu -  $12,5^x$ , powiększenie obiektywu mikroskopowego  $5^x$ . Konstrukcja mikroskopu umożliwia

jących zetknięciu trzcienia z polerowaną powierzchnią płaskiej płytki szklanej i z powierzchnią mierzoną.

W celu zapewnienia jednakowego nacisku mierniczego trzpień przesuwany jest układem dźwigniowym o stałym obciążeniu przy zastosowaniu hamulca powietrznego, zmniejszającego prędkość ruchu trzcienia. Przedmiot leżący na pierścieniu przyciskany jest do pierścienia ze stałą siłą.

Sferometr o konstrukcji nieco odmiennej niż na rys. 9.11 może być przystosowany do pomiaru grubości przedmiotów.

W tym celu w dolnej części

zdejmowanie samego okularu, przy czym jego płytka ogniskowa pozostaje w korpusie mikroskopu. Okaże się to wygodne przy wstępnej regulacji wzajemnego położenia powierzchni mierzonej względem mikroskopu oraz przy ustawianiu mikroskopu w odległościach odpowiadających przybliżonej pozycji pomiarowej. Stolik z zamocowanym mikroskopem przesuwany jest poosiowo wzdłuż prowadnic ławy, przy czym połączony z nim projekcyjny mikroskop odczytowy umożliwia określenie położenia względem podziałki umieszczonej na podzielnicy związanej z ławą. Zakres przesuwu 2 m, wartość działki elementarnej podziałki ławy 1 mm. Mikroskop może być również przemieszczany poziomo w kierunku prostopadłym do osi optycznej. Ruch mikroskopu realizowany jest za pomocą śruby mikrometrycznej w zakresie 25 mm, wartość działki elementarnej 0,01 mm.

Element optyczny - najczęściej soczewkę, której promień krzywizny jednej z powierzchni należy zmierzyć - mocuje się w uchwycie trójszczekowym o rozstawieniu szczęk regulowanym odpowiednio do średnicy soczewki i przesuwany pionowo w celu zgrania osi symetrii powierzchni sferycznej soczewki z osią mikroskopu. Ta ostatnia regulacja w łatwy sposób może być wykonana przy obserwacji obrazu źródła światła na tle źrenicy wyjściowej obiektywu mikroskopu po uprzednim zdjęciu okularu. Całkowite i centralne rozjaśnienie źrenicy obiektywu wskazuje na to, że płaszczyzna przedmiotowa mikroskopu pokrywa się ze środkiem krzywizny badanej powierzchni bądź z wierzchołkiem tej powierzchni.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Pomierzyć za pomocą sferometru promienie wypukłych i wklęsłych powierzchni sferycznych, obliczyć błąd pomiaru zależny od  $h$ ,  $r$ ,  $d$ .
2. Pomierzyć za pomocą mikroskopu autokolimacyjnego promień krzywizny wklęsłej soczewki i obliczyć błąd pomiaru.

## 5. LITERATURA

Hanc T.: Pomiarы optyczne. Wyd.2. WNT, Warszawa 1964, § 36-41.  
DIN - 58 161 Blatt 2.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Podać zasadę pomiaru krzywizny powierzchni kulistej i walcowej za pomocą sferometru.

Od czego zależy niedokładność pomiaru sferometrem?

Jak mierzyć promienie krzywizn powierzchni torycznych?

Podać zasadę regulacji względnego położenia mikroskopu autokolimacyjnego i powierzchni przedmiotu mierzonego.

Jakiego typu powierzchnie asferyczne można mierzyć omówionymi wyżej metodami?

## Ćwiczenie 10

# POMIARY DUŻYCH PROMIENI KRZYWIZN

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru dużych promieni krzywizn powierzchni sferycznych elementów optycznych.

## 2. METODY POMIARU

Zastosowanie metod pomiarów przedstawionych w ćwiczeniu 9 do powierzchni o małej krzywiznie ograniczone jest czynnikami



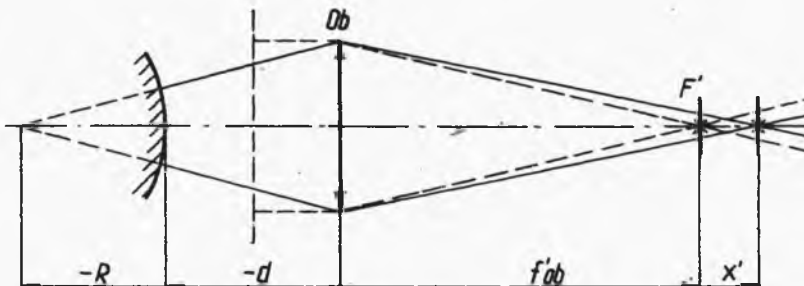
technicznymi wynikającymi bądź z realizacji samej zasady pomiaru (np. przy stosowaniu mikroskopu autokolimacyjnego - wymaganą długością prowadnic nie mniejszą niż długość promienia), bądź cechami użytkowymi przyrządu pomiarowego (np. przy pomiarach sferometrycznych - wpływem znacznego ciężaru zwierciadła badanego na błąd pomiaru przedmiotów o dużych powierzchniach).

W pomiarach dużych promieni krzywizn oprócz metod interferencyjnych (omówionych w ćwiczeniu 12) mają zastosowanie:

- metoda porównania położenia obrazów autokolimacyjnych utworzonych przez powierzchnię badaną i powierzchnię płaską,
- metoda pomiaru (za pomocą kolimatora i lunety) położenia obrazów astygmatycznych utworzonych po odbiciu od badanej powierzchni,
- metoda cieniowa Foucaulta,
- metoda cieniowa pomiaru położenia obrazów astygmatycznych.

2.1. Metoda porównania położenia obrazów autokolimacyjnych utworzonych przez powierzchnie: płaską i badaną powierzchnię sferyczną

Zasada pomiaru polega na zastosowaniu lunety autokolimacyjnej ze zmienną odległością płytki ogniskowej okularu od obiektywu. Na rys.10.1 pokazany jest schemat układu optycznego przyrządu, w którym odcinek  $x'$  odpowiada odległości między obra-



Rys.10.1. Pomiar lunetą autokolimacyjną

zami autokolimacyjnymi, uzyskanymi po odbiciu promieni od powierzchni badanej oraz od powierzchni płaskiej. Przy założonej znajomości odległości  $d$  powierzchni sferycznej od płaszczyz-

ny głównej przedmiotowej obiektywu można napisać

$$-x - f = -R - d,$$

stąd po zastosowaniu wzoru Newtona oraz zastąpieniu  $f = -f'$

$$R = \frac{-f'^2}{x'} - f' - d,$$

gdzie znana jest również ogniskowa obiektywu  $f'$ , a wartość  $x'$  ustalona w czasie pomiaru.

Symbol  $d$  oznacza odległość od płaszczyzny głównej przedmiotowej obiektywu do powierzchni mierzonej, przy czym przy znacznych wartościach  $R$  można ją przyjąć jako odległość od pierwszej powierzchni obiektywu. Zatem niedokładność pomiaru zależna jest od błędu wyznaczenia wartości  $d$ , a udział błędu względnego  $\Delta d/R$  odpowiednio maleje dla dużych promieni.

Niedokładność wyznaczenia wartości  $x'$  związana jest niepewnością ustawienia płaszczyzny płytki ogniskowej okularu, na której znajduje się krzyż względem obrazu autokolimacyjnego utworzonego po odbiciu od powierzchni zwierciadła płaskiego i powierzchni mierzonej, zależną od zauważalnej paralaksy między nimi.

Błąd maksymalny wynosi

$$\Delta R = \left| \frac{f'^2}{x'^2} \right| |\Delta x'| + \left| \frac{2f'}{x'} \right| (|\Delta f'| + |\Delta f'|) + |\Delta d|$$

lub po wprowadzeniu  $x$

$$\Delta R = \left| \frac{x^2}{f'^2} \right| |\Delta x'| + \left| \frac{2x}{f'} \right| (|\Delta f'| + |\Delta f'|) + |\Delta d|,$$

z czego wynika zalecenie stosowania lunet o długiej ogniskowej obiektywu.

Analiza błędu paralaksy (rozdz.I) wskazuje na zalecenie stosowania dużego otworu względnego obiektywu  $D/f'_{ob}$  lunety - co związane jest często z wymiarami badanego przedmiotu - oraz krótkiej ogniskowej okularu, tzn. dużego powiększenia lunety bowiem

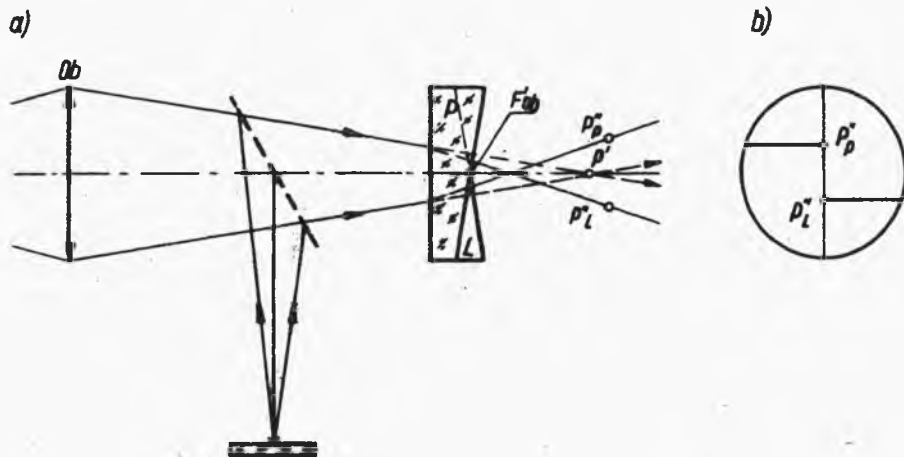
$$\Delta x'_{ob} = \frac{2f'_{ok}{}^2 \cdot \varepsilon}{d_z} = \frac{2f'_{ob} \cdot f'_{ok} \varepsilon}{D}$$

gdzie:  $d_z$  - średnica źrenicy wyjściowej,  
 $\varepsilon$  - kąt zdolności rozpoznawczej oka.

Zastosowanie systemu koincydencyjnego w postaci pary klinów umieszczonych zamiast płytki ogniskowej pozwala na znaczne zmniejszenie kąta paralaktycznego  $\varepsilon$ .

## 2.2. Opis lunety autokolimacyjnej z okularum koincydencyjnym

Rys.10.2a przedstawia schemat lunety autokolimacyjnej z okularum koincydencyjnym. W płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu lunety umieszczone są dwa jednakowe klipy optyczne

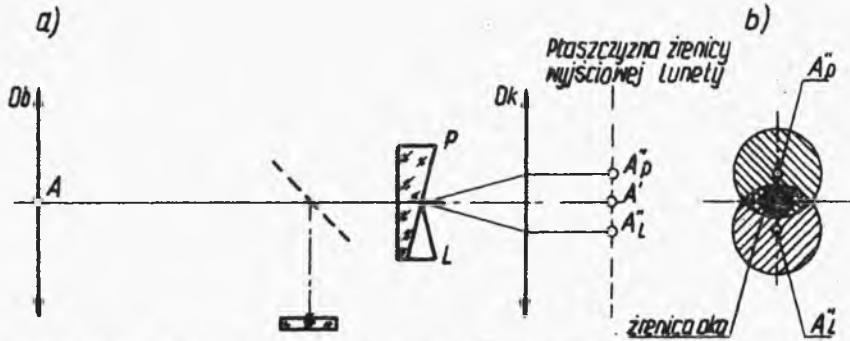


Rys.10.2. Luneta autokolimacyjna z głowicą koincydencyjną

o podstawach skierowanych przeciwnie. Ich odległość od obiektywu tak jest dobrana, aby punkt przecięcia rzutu obydwu powierzchni nachylonych leżał w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu. Jeżeli obraz autokolimacyjny nie jest tworzony w płaszczyźnie ogniskowej, lecz np. za płaszczyzną ogniskową, wówczas obserwator zauważy rozdwojenie linii obrazu autokolimacyjnego (jak na rys.10.2b). Punkt  $P'$  wskazuje położenie obrazu utworzonego bez układów klinów - będzie to obraz leżący na osi, np. przesunięty wzdłuż osi względem ogniska  $F'_{ob}$ ; układ klinów wprowadza poprzeczne przesunięcie obrazów  $P''_p$  i  $P''_L$  zależne od kąta łamiącego klinów.

Wprowadzenie pary klinów w płaszczyźnie ogniskowej układu lunetowego wpływa na zmianę położenia źrenicy wyjściowej lune-

ty. Ponieważ każdy z klinów inaczej wpływa na bieg promieni aperturowych - w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej tworzą się dwa obrazy źrenicy wejściowej (oprawy obiektywu) przesunięte względem siebie. Odległość między środkami obrazów źrenicy zależy od kąta łamiącego klina  $\varphi$  i ogniskowej okularu  $f'_{ok}$ . Warunkiem niezbędnym do zapewnienia prawidłowej obserwacji obydwu części pola widzenia jest możliwość umieszczenia źrenicy oka w obydwu obszarach zdwojonej źrenicy wyjściowej jednocześnie (rys.10.3).



Rys.10.3. Położenie źrenic wyjściowych w lunecie wg rys.10.2

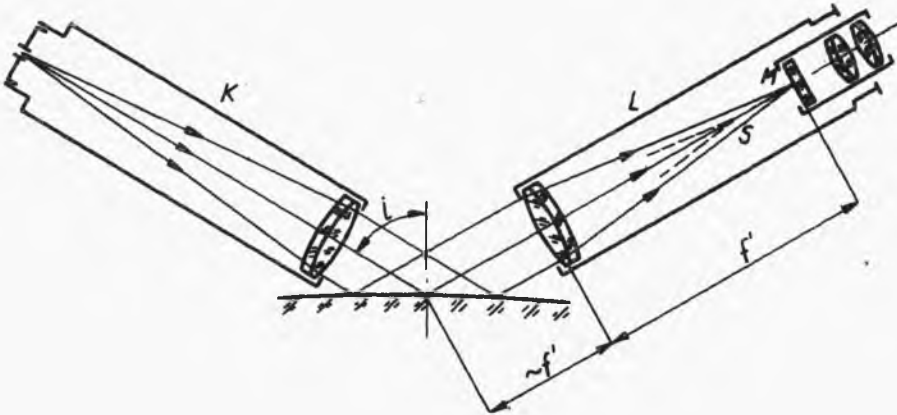
Względny błąd ustawienia autokolimacyjnego urządzenia pomiarowego z wbudowanym układem klinów ocenia się na 0,005%.

### 2.3. Pomiar położenia obrazów astygmatycznych utworzonych przez odbicie wiązki promieni padającej pod dużym kątem na powierzchnię sferyczną

W metodzie tej wykorzystuje się kolimator i lunetę z przesuwającym okularom. Obraz punktowego źródła światła umieszczonego w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu kolimatora obserwowany jest przez lunetę, przy czym obydwie te przyrządy nachylone są pod znacznym kątem i w stosunku do normalnej do badanej powierzchni. W zależności od tego kąta oraz od promienia krzywizny zmienia się wzajemne położenie obrazów punktowego źródła światła danych przez obiektyw lunety i odpowiadających południkowemu i równoleżnikowemu przekrojowi wiązki, obserwowanych jako wzajemnie prostopadłe przewężenie wiązki światła w tych kierunkach.

$$R \approx \frac{2f_{ob}^2 \sin i \operatorname{tg} i}{\Delta_{SM}},$$

gdzie  $\Delta_{SM}$  oznacza odległość między ogniskami astygmatycznymi mierzoną wzdłuż osi optycznej lunety za pomocą przesuwanej płytki ogniskowej z okularum.



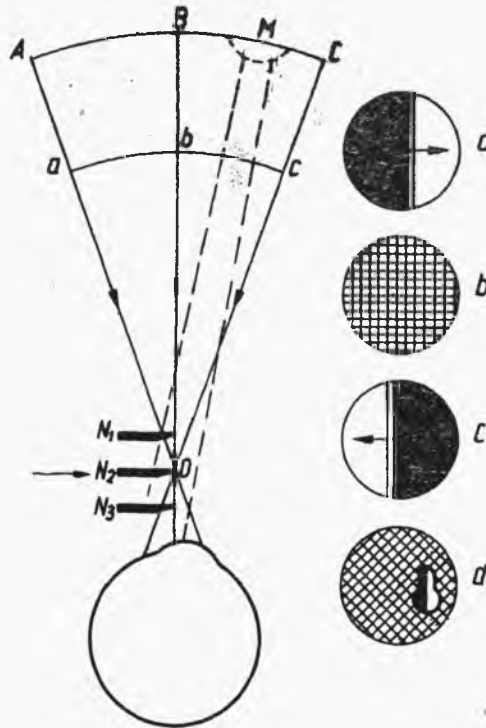
Rys.10.4. Pomiar z wykorzystaniem oceny położenia obrazów astygmatycznych

Wzór powyższy jest słuszny w przypadku, gdy powierzchnia badana znajduje się w odległości ogniskowej obiektywu. Metoda ta może być stosowana również do pomiaru kształtu powierzchni matowej pod warunkiem stosowania kątów nachylenia nie mniejszych niż  $82^\circ$  (przy chropowatości powierzchni uzyskiwanej przy szlifowaniu wykańczającym przed polerowaniem).

#### 2.4. Metoda cieniowa Foucoult'a pomiaru promienia krzywizny

Położenie środka krzywizny powierzchni wklęsłej może być wyznaczona metodą, której zasada przedstawiona jest na rys. 10.5. Punkt O jest środkiem powierzchni sferycznej ABC lub abc, ilustrowanej czoło fali świetlnej. Obserwator, którego źrenica oka umieszczona jest w punkcie O, będzie obserwował powierzchnię ABC badanego elementu jako obszar o jednakowej luminancji. Jeżeli blisko środka krzywizny O zostanie umieszczona przysłona krawędziowa (ostrze noża) prostopadła do osi układu, to przy przesuwaniu jej w kierunku zaznaczonym strzał-

ką w położeniu  $N_1$  obserwator, którego źrenica oka umieszczona jest za punktem  $O$ , zauważy cień pojawiający się na lewym brzegu powierzchni sferycznej. Przy dalszym przesuwaniu noża

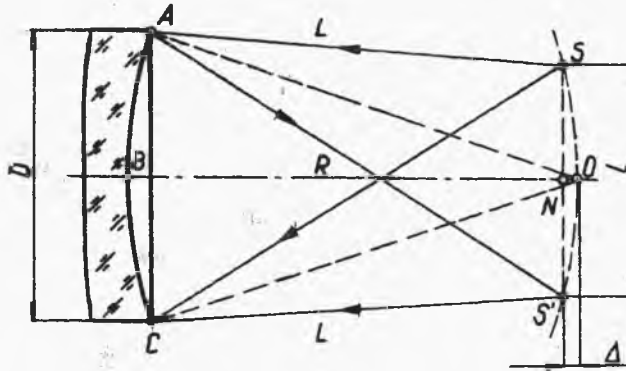


Rys.10.5. Zasada metody cieniowej Foucaulta

obraz będzie zaciemniał się strefami ku stronie prawej, tak jak ilustruje to rys.10.5a, odpowiadający położeniu ostrza  $N_1$ .

W położeniu  $N_3$  ruch ostrza spowoduje zaciemnianie obrazu powierzchni ABC z prawa na lewo, tj. odwrotnie niż poprzednio. Jest zatem jedno położenie noża ( $N_2$ ), w którym jego ruch prostopadły do osi układu spowoduje szybkie, jednoczesne i równomierne zaciemnienie całej powierzchni. Jest to środek krzywizny czoła fali, odpowiadający środkowi krzywizny badanej idealnej powierzchni. Pomiar promienia krzywizny polega w tej metodzie na zlokalizowaniu środka krzywizny i pomiarze (metodami konwencjonalnymi) odległości między nim a wierzchołkiem powierzchni.

W praktyce stosuje się układ, w którym źródło światła (szczelina prostokątna) oraz krawędź noża są nieco - ze względów technicznych - rozsunięte. Rys.10.6 przedstawia taki właśnie schemat pomiaru.



Rys.10.6. Pomiar promienia krzywizny metodą Foucaulta

Punkty S i S' odpowiadają położeniu szczeliny i jej obrazowi i leżą w płaszczyźnie SNS' prostopadłej do prostej przechodzącej przez środek krzywizny i wierzchołek powierzchni sferycznej, którą to prostą można przyjąć za oś układu. Analiza geometrii powstawania obrazu S' punktu S oddalonego od niego o odległość l wskazuje, że punkt N nie pokrywa się ze środkiem O, lecz leży w pewnej od niego odległości  $\Delta$ . Strzałka  $\Delta$  łuku SOS' wyniesie

$$\Delta = \frac{l^2}{4R}.$$

Odległość l jest dla danego układu stała, odległość BN mierzy się po ustaleniu takiego położenia noża, w którym zaciemnienie powierzchni następuje równomiernie. Ze względu na to, że łatwiejszy do zrealizowania jest pomiar odległości L (np. taśmę mierniczą), przybliżony wzór na promień krzywizny (przy założeniu  $2D + l \approx 2D$  i  $L \gg D$ ) wyraża się

$$R \approx L + \frac{D l}{4L}.$$

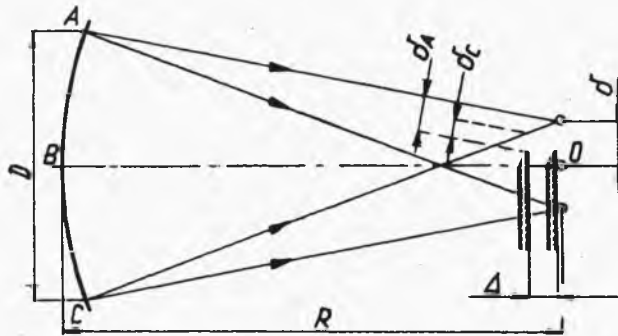
Czułość tej metody zależna jest od stosunku D/R oraz od szerokości szczeliny. Przy znajomości  $\Delta h_{\min}$  jako najmniejszej

szej wyczuwalnej (ze względu na zauważalną zmianę luminancji obrazu powierzchni) miejscowej deformacji czoła fali - najmniejsze przesunięcie  $\Delta_{\min}$  wynosi (po zróżniczkowaniu wzoru na strzałkę łuku)

$$\Delta_{\min} = \Delta R_{\min} = \frac{8R^2}{D^2} \Delta h_{\min} \cdot$$

Wartość  $\Delta h_{\min}$  zależna także jest od apertury, szerokości szczeliny  $\delta$  oraz od najmniejszej wyczuwalnej przez obserwatora zmiany kontrastu  $\gamma$ .

Na podstawie rys.10.7 można wyprowadzić zależność na  $\Delta h_{\min}$  czyli najmniejszą wyczuwalną deformację czoła fali.



Rys.10.7. Związek przeogniskowania  $\Delta$  z wymiarami obrazów szczeliny  $\delta$

Ilość światła docierająca do oka obserwatora jest proporcjonalna do szerokości szczeliny  $\delta$  i jest jednakowa dla punktów A i C w położeniu noża bliskim O. Po przesunięciu noża o odległość  $\Delta$  wymiar "okna", przez które światło wybiega z punktu A i z punktu C zmieni się niejednakowo. Geometryczna analiza rysunku 10.7 wskazuje na zależności:

$$\delta_A \approx \delta + \frac{D\Delta}{2R},$$

$$\delta_C \approx \delta - \frac{D\Delta}{2R}.$$

Kontrast  $\gamma$  dla obrazów w punktach A i C wynosi

$$\gamma = \frac{\delta_A - \delta_C}{\delta_A} \approx \frac{2D + \Delta}{2R\delta + D\Delta}$$



stąd przeogniskowanie

$$\Delta = \frac{2R \delta \tau}{D(2 - \gamma)}$$

Jeżeli przyjmujemy, że  $\gamma \ll 2$ ,  
stąd:

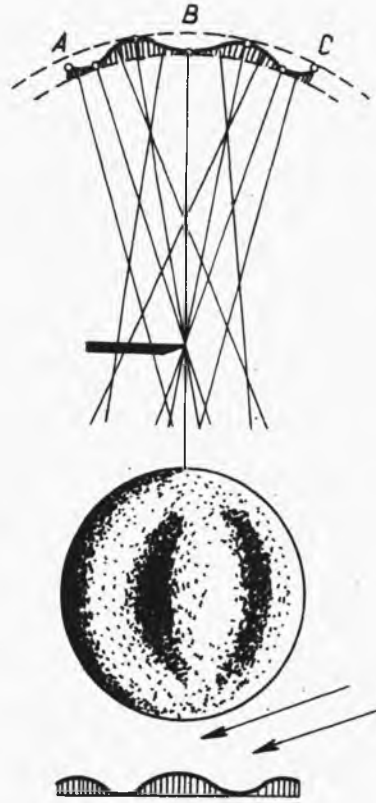
$$\Delta_{\min} = \frac{R \delta \tau}{D},$$

$$\Delta h_{\min} = \Delta_{\min} \frac{D^2}{8R^2} = \frac{\delta \tau D}{8R}.$$

Wartość progowa zmiany kontrastu obserwowana okiem przy sprzyjających warunkach może wynosić 1,5%, jednak przy tego typu pomiarach - z doświadczenia - przyjmuje się 10%, co odpowiada  $\gamma = 0,1$ . Np. dla  $\delta = 0,01$ ,  $\tau = 0,1$ ,  $\frac{D}{R} = 0,1$ ,  $\Delta h_{\min} = 0,012 \mu\text{m}$ .

Metoda cieniowa Foucaulta stosowana bywa przede wszystkim do wykrywania i pomiarów miejscowych zniekształceń powierzchni zwierciadlanej, ujawniających się przy obserwacji obiektu jako same plamy na ciemnym tle (rys.10.5 i 10.8). Metodę tę stosuje się nie tylko do powierzchni sferycznych, ale - w zmodyfikowanym układzie - do badania każdej regularnej powierzchni, z którą układ tworzyć będzie - w sensie optycznym - układ doskonały, np. przy retuszu polerowania powierzchni parabolicznych zwierciadeł astronomicznych.

Ze względu na swą wysoką czułość metoda ta bywa stosowana do wszelkich pomiarów opierających się na wykrywaniu deformacji czoła fali, np. spowodowanych niejednorodnością współczynnika załamania - przy badaniu bloków szkła (metoda Toeplera - ów.6) lub badaniu zmian gęstości powietrza w tunelach aerodynamicznych. Znajduje też zastosowanie do badania aberracji układów optycznych. Czუłość metody przy stosowaniu przeciętnych



Rys.10.8. Odzworowanie nierówności powierzchni metodą Foucaulta

warunków obserwacji określona maksymalną liniową deformacją czoła fali  $\Delta h_{\min} = 0,015 \lambda$ . W granicznych przypadkach można uzyskać  $0,005 \lambda$  przy stosowaniu szerokości szczeliny rzędu średnicy plamki dyfrakcyjnej i optymalnego oświetlenia.

Do uzyskania dużej czułości konieczne jest spełnienie kilku wymagań:

a) krawędzie świecącej szczeliny i krawędź noża muszą być równe i względem siebie równoległe, bowiem w innym przypadku przycinanie obrazu szczeliny będzie niejednoczesne, a kontrast obrazu zmaleje. Wymaganie to tym większą ma wagę, im większe stosuje się kąty aperturowe układu;

b) luminancja obrazu - ze względu na zależność wykrywalności zmian kontrastu od oświetlenia - powinna zawierać się w przedziale  $1 - 10^4$  nt. Przy szerokościach szczelin bliskich szerokości plamki dyfrakcyjnej warunek ten wymaga stosowania źródeł światła o bardzo wysokiej luminancji (rtęciowych, ksenonowych lub laserowych). Wskazane jest także stosowanie światła monochromatycznego;

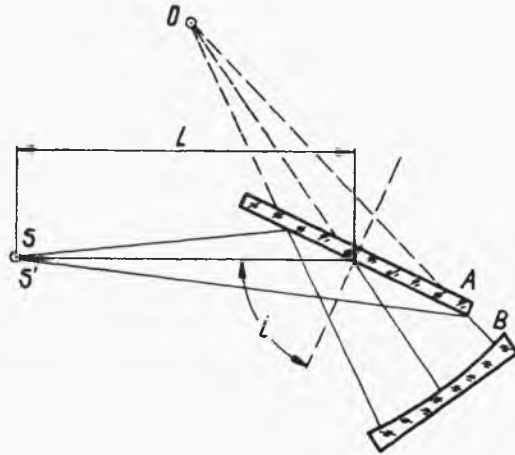
c) oko obserwatora musi być zaadaptowane do tych warunków oświetlenia, w których odbywa się obserwacja; oczywiste jest też wymaganie akomodacji na powierzchnię (lub przestrzeń) badaną.

## 2.5. Metoda cieniowa pomiaru położenia obrazów astygmatycznych (wg Commone'a)

Metoda opiera się na pomiarze odległości między astygmatycznymi obrazami punktowego źródła światła utworzonymi po odbiciu od badanej powierzchni. Rys.10.9 przedstawia badaną powierzchnię A umieszczoną między pomocniczym zwierciadłem wklęsłym B a punktowym źródłem światła S. Jeżeli założy się, że powierzchnia A jest płaska, wówczas obraz punktu S umieszczonego w środku krzywizny zwierciadła wklęsłego dany przez to zwierciadło znajdzie się również w środku krzywizny. W praktyce stosuje się nieznaczne przesunięcie położenia świecącego punktu S po to, by można było w miejscu S' umieścić ostrze noża Foucaulta (sposób omówiony bliżej w pkt 2.4).

Jeżeli źrenica oka obserwatora lub źrenica pomocniczego układu wizjera umieszczona jest w płaszczyźnie wyznaczonej punk-

tem  $S'$ , wówczas będzie on obserwował równomierne przyciemnienie powierzchni zwierciadła wklęsłego B, o ile powierzchnia tego zwierciadła jest doskonale sferyczna oraz o ile odbijająca powierzchnia A jest doskonale płaska. W przypadku, gdy powierzchnia A jest sferyczna, wówczas w miejscu  $S'$  tworzy się astygmatyczny obraz punktu S, odpowiadający biegowi promieni południkowych i równoleżnikowych. Odległość między tymi obrazami przy znanej wartości kąta "i" oraz odległości



Rys.10.9. Pomiar metodą Commona

$L$  jest zależna od promienia krzywizny powierzchni A.

Czułość metody zależna jest również od apertury zwierciadła B. Doświadczalnie stwierdzono, że optymalny stosunek D:R powinien wynosić 1:7 - 1:12. Ponieważ błędy kształtu powierzchni sferycznej zwierciadła B bezpośrednio wpływają na błąd pomiaru, wymaga się, by nie były one większe niż 0,2 - 0,3 wartości wynikających z kryterium Raleigha. Ze względów technologicznych możliwe jest uzyskanie miejscowych odchyłek kształtu tego zwierciadła nie większych niż  $0,02\mu\text{m}$  stąd warunek ten może być stosunkowo łatwo spełniony.

Błędy wykonania zwierciadła B zaznaczają się odpowiednio wyraźniej przy wzroście kąta "i" proporcjonalnie do wartości  $2\cos i$ .

Do pomiaru promienia krzywizny zwierciadła A należy przyjąć możliwie duży kąt "i" oraz znaczną odległość od tego zwierciadła do środka krzywizny S. Zależność odległości między obydwoimi obrazami astygmatycznymi  $\Delta_{SM}$  a promieniem krzywizny R ujmuje wzór

$$R = \frac{4L^2 \sin i \operatorname{tg} i}{\Delta_{SM}}$$

Widać wyraźną analogię do wzoru stosowanego w metodzie wg p.2.3, przy czym dwukrotne odbicie promieni od badanej powierzchni odpowiednio zwiększyło czułość pomiaru.

Praktyczna realizacja układu cieniowego Foucaulta (wg 2.4) polega na pomiarze odcinka  $\Delta_{S_1M_1}$ , wzdłuż którego przesuwają się punktowe źródło światła jednocześnie z przysłoną krawędziową (wynika to z powszechnie stosowanej konstrukcji głowicy przyrządu przesuwanej śrubą mikrometryczną). W tym przypadku  $\Delta_{S_1M_1} = 0,5 \Delta_{SM}$  zatem

$$R = \frac{2L^2 \sin i \operatorname{tg} i}{\Delta_{S_1M_1}}$$

Interesujący jest w przypadku powierzchni płaskich związek między  $\Delta_{S_1M_1}$  a liczbą prążków interferencyjny  $N$ , którą konstruktor w dokumentacji z reguły określa dopuszczalną niepłaskość powierzchni optycznie czynnych

$$N \cong \frac{2h}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \frac{D^2}{8R} = \frac{D^2}{4\lambda R},$$

gdzie:  $h$  - jest strzałką czaszy o promieniu  $R$ ,

$D$  - średnicą czynną powierzchni  $A$ ,

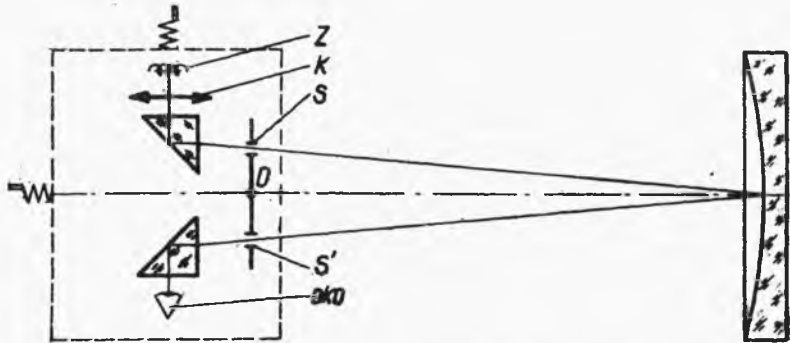
$\lambda$  - długością fali światła;

$$N = \frac{D^2 \Delta_{S_1M_1}}{8 \lambda L^2 \sin i \operatorname{tg} i}.$$

### 3. OPIS GŁOWICY SZCZELINOWEJ FOUCAULTA

Rys.10.10 przedstawia schematycznie stanowisko do pomiaru promienia krzywizny powierzchni zwierciadła wklęsłego metodą cieniową Foucaulta. Szczelina otworkowa  $S$  o zmiennej średnicy oświetlona jest za pomocą żarówki  $Z$  i kondensora  $K$ . Obraz szczeliny powinien utworzyć się w miejscu, w którym znajduje się krawędź ostrza noża Foucaulta  $S'$  przed okiem obserwatora. Dla ułatwienia pomiaru przesunięć poosiowych  $\Delta$  głowica przyrządu z wbudowaną szczeliną i nożem Foucaulta umocowana jest

na stoliku krzyżowym mikroskopu warsztatowego przesuwanyymi śrubami mikrometrycznymi.



Rys.10.10. Schemat głowicy szczelinowej

#### 4. PRZEBIEG CWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Pomierzyć promień krzywizny zwierciadła metodą pomiaru położenia obrazów astygmatycznych.
2. Ustawić stanowisko do pomiaru krzywizny powierzchni płyty metodą cieniową Commona i wykonać pomiary dla  $i = 45^\circ$  oraz  $i = 60^\circ$ .
3. Ustawić stanowisko do pomiaru metodą Foucaulta i pomierzyć promień krzywizny zwierciadła wklęsłego w strefach pierścieniowych.

#### 5. LITERATURA

Henc T.: Pomiary optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.  
Maksutow P.D.: Izgotowlenie i issledowanie astronomiceskoj optiki. Maszgiz. Moskwa 1953.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Od czego zależy niedokładność metody wg p.2.2?

Co ogranicza zakres pomiaru promienia krzywizny w każdej z metod?

W jaki sposób można mierzyć promienie powierzchni walcowej?

Określić (opisowo) zależności wyniku pomiaru wg pkt 2.4 od technicznych parametrów przyrządu oraz czynników subiektywnych.

## Ćwiczenie 11

### POMIARY KĄTÓW DWUŚCIENNYCH METODAMI OPTYCZNYMI

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie optycznych metod pomiaru kątów przedmiotów o powierzchniach płaskich polerowanych, dokonywanego za pomocą goniometrów i przyrządów z lunetą autokolimacyjną.

#### 2. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Metody pomiaru omówione w niniejszej instrukcji są metodami optycznymi wykorzystującymi układy typu kolimator-luneta lub lunetę autokolimacyjną i stosowane przede wszystkim do przedmiotów o powierzchniach płaskich polerowanych lub - przy niezbędnej modyfikacji - matowych. Jak w każdej grupie metod

pomiarów wyróżnione zostaną metody pomiarów bezwzględnych i porównywalnych, mających miejsce w kontroli międzyoperacyjnej.

## 2.1. Pomiary małych kątów w elementach optycznych

Płytki np. szklane o nieznacznych odchyleniach od równoległości polerowanych powierzchni mogą być mierzone metodami gonimetrycznymi typowymi dla pomiaru kątów dwuściennych przez wykorzystanie autokolimacyjnego odbicia od obydwu powierzchni płytki, bądź też - przy bardzo małych kątach - metodami interferencyjnymi.

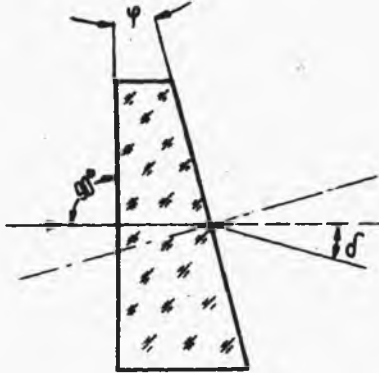
### 2.1.1. Metody interferencyjne

Polegają one na pomiarze odległości międzyprążkowych w obrazie interferencyjnym, uzyskanym przy interferencji wiązek monochromatycznego światła odbitego od obydwu powierzchni płytki. Zakres pomiarowy kąta między powierzchniami płytki związany jest z dostrzeganiem prążków, tj. z kontrastem prążków interferencyjnych i powiększeniem układu obserwacyjnego, którym najczęściej jest układ stosowany w interferometrach (patrz ów.12). Spośród czynników w istotny sposób wpływających na kontrast prążków interferencyjnych znaczenie ma różnica dróg optycznych wprowadzona grubością optyczną płytki o określonym współczynniku załamania, wymiary oraz stopień monochromatyczności źródła światła ( $\Delta\lambda/\lambda$ ).

Niekiedy obraz prążkowy jest zdeformowany, kształt prążków interferencyjnych nie jest regularny, nieprostoliniowy. Może to być spowodowane niejednorodnością współczynnika załamania materiału, z którego wykonana jest badana część, wywołaną np. naprężeniami wewnętrznymi. Podobną deformację obrazu prążków powoduje niepłaskość powierzchni odbijających. Stąd metoda ta bywa stosowana przy bardzo dokładnych pomiarach przedmiotów o nieznacznej grubości, gdy istotną informacją ma być deformacja czoła fali przechodzącej przez nie, bądź odbitej od powierzchni badanych. Metoda ta nabrała znaczenia wobec stosowania laserowych źródeł światła o bardzo dobrej monochromatyczności.

### 2.1.2. Metody autokolimacyjne

Nierównoległość powierzchni płytki np. szklanej może być określona za pomocą lunety autokolimacyjnej przez pomiar kąta między wiązkami promieni odbitych od obydwu powierzchni przy znanej wartości współczynnika załamania  $n$  materiału, z którego



Rys.11.1. Płytką klinową na drodze wiązki promieni równoległych

tego wykonana jest płytka. Przy założeniu, że luneta autokolimacyjna jest ustawiona normalnie do pierwszej powierzchni klina zależności między kątem łamiącym a kątem dewiacji  $\delta$  (rys.11.1) przedstawia się następująco

$$\delta = 2\varphi(n - 1). \quad (1)$$

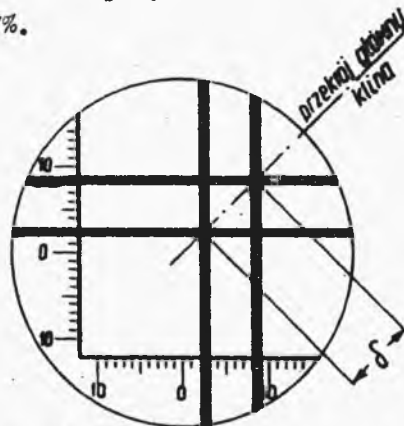
Wzór ogólny dla przypadków, gdy kąt padania różni się od normalnego do powierzchni o wartość  $i$

$$\delta = 2\varphi(n - 1) \left( 1 + \frac{n+1}{2n} i^2 \right). \quad (2)$$

We wzorze tym przyjęto uproszczenia wynikające ze stosowania wartości kąta zamiast funkcji kąta  $i$ . Różnica między wartością dokładną a przybliżoną wg wzoru (1) przykładowo dla:  $\varphi = 1^\circ$ ,  $i = 5^\circ$ ,  $n = 1,52$ , wynosi ok. 0,7%.

Niekiedy wartość kąta  $\delta$  określa się w dioptriach pryzmatycznych (w oftalmice). Jednej dioptrii pryzmatycznej odpowiada - wg definicji - kąt odpowiadający odchyleniu biegu promieni o 1 cm na drodze 1 m.

W polu widzenia okularu lunety autokolimacyjnej widoczne są dwa obrazy krzyża, pochodzące z odbicia od obydwu powierzchni klina; miarą kąta  $\delta$  jest odległość między środkami krzy-



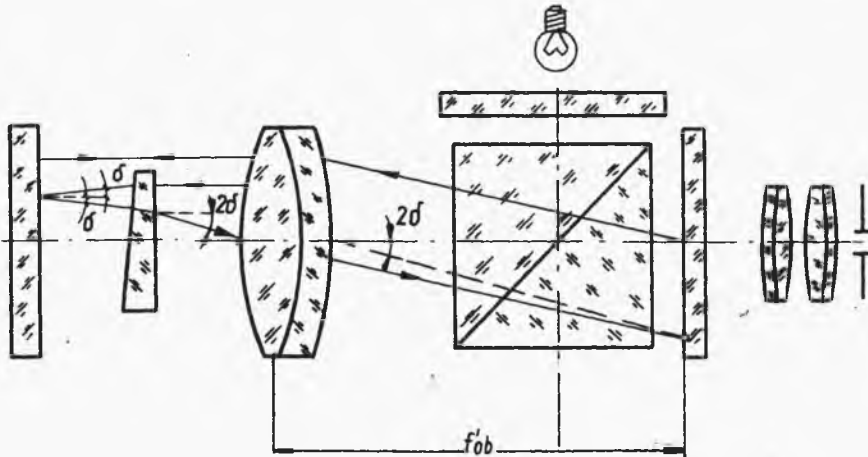
Rys.11.2. Autokolimacyjne obrazy krzyży na tle podziałki obserwowanej przez okular lunety



ży (rys.11.2). Czujność tej metody określona minimalną odległością między obrazami krzyży, którą obserwator dostrzega zależy od:

- zdolności rozdzielczej lunety i jej powiększenia,
- rodzaju światła stosowanego przy pomiarze (chromatyzm wprowadzony przez klin przy stosowaniu światła niemonochromatycznego powoduje pozorne pogorszenie ostrości obrazów krzyża),
- kształtu (niepłaskości) powierzchni odbijających. W przypadku, gdy powierzchnia odbijająca jest sferyczna, wówczas obraz krzyża powstaje przed lub za płaszczyzną ogniskową obiektywu lunety. Obserwator - przy nieznacznych zmianach - będzie obserwował paralaksę między krzyżem w okularze a tym obrazem, bądź przy zmianach większych - obraz autokolimacyjny nieostry, rozmyty.

Inna metoda o podobnych dokładnościach pomiaru polega na wykorzystaniu lunety autokolimacyjnej i płaskiego zwierciadła, między którymi umieszczona jest mierzona płytki klinowa, częściowo tylko przysłaniająca źrenicę wejściową (obiektyw) lunety (rys.11.3).



Rys.11.3. Pomiar klinowości płytki za pomocą lunety autokolimacyjnej przy użyciu dodatkowego zwierciadła

W polu widzenia okularu na tle podziałki widocznych jest kilka obrazów autokolimacyjnych krzyża: z odbicia od powierzchni klina (te pomijają się) i od powierzchni zwierciadła. Jeden z nich pochodzi bezpośrednio z odbicia wiązki promieni wybiegają-

cych z lunety od zwierciadła, drugi - również od zwierciadła, ale po dwukrotnym przejściu przez klin. Stąd

$$\varphi \approx \frac{\delta}{4(n-1)} \cdot \quad (3)$$

Dokładność pomiaru można zwiększyć - dla odpowiednio małych kątów klina - przez dwukrotny odczyt położenia tego drugiego krzyża po obrocie klina o  $180^\circ$ . Dodatkową zaletę tej metody stanowi to, że klin nie musi być orientowany ściśle prostopadle do osi optycznej lunety, choć ze wzrostem kąta jego pochylenia będzie rósł błąd pomiaru wynikający z przyjęcia w obliczeniach uproszczonego wzoru (1).

Przy posługiwaniu się lunetą pomiarową należy zwrócić uwagę na to jaka jest wartość działki. W lunetach autokolimacyjnych stosuje się zazwyczaj podziałki skalowane tak, by wartość działki odpowiadała wartości pochylenia powierzchni odbijającej, tzn. połowie kąta między kierunkami biegu wiązki wybiegającej i powracającej do obiektywu.

### 2.1.3. Pomiar kąta łamiącego płytki klinowej metodą pomiaru kąta dewiacji

Klin o kącie łamiącym  $\varphi$  ustawiony na drodze wiązki promieni równoległych padających prostopadle do jednej z jego powierzchni odchyła tę wiązkę o kąt dewiacji  $\delta$  wg zależności  $\delta = \varphi(n-1)$ .

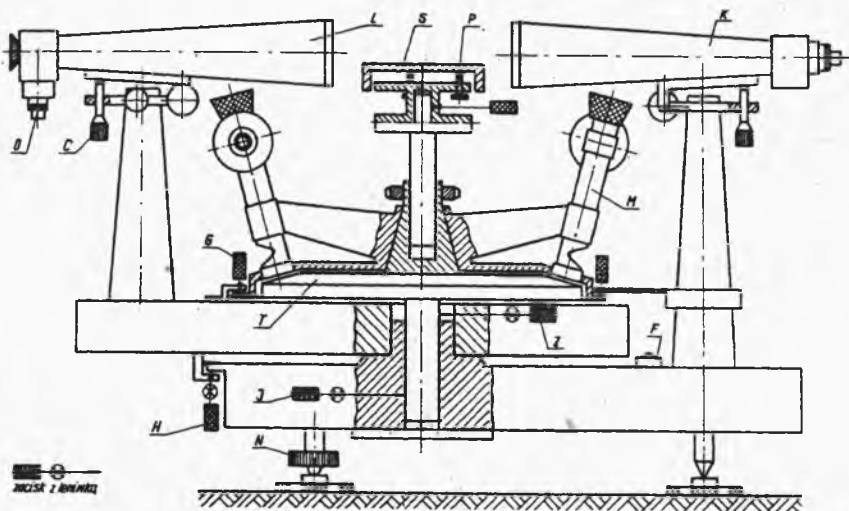
Pomiar tą metodą może być przeprowadzany za pomocą kolimatora i lunety z podziałką lub lunety goniometru, między którymi umieszcza się płytkę. Do obliczenia kąta  $\delta$  potrzebna jest oczywiście - podobnie jak w metodach poprzednich - znajomość wartości współczynnika załamania  $n$ .

## 2.2. Pomiary kątów dwuściennych przyzmatów za pomocą goniometru

### 2.2.1. Opis goniometru

Schematyczna konstrukcja goniometru laboratoryjnego przedstawiona jest na rys.11.4.

Na kręgu podziałowym T umieszczona jest podziałka kąto-  
wa, względem której dokonuje się odczytu za pomocą dwóch noniu-  
szy z lupami lub w dokładniejszych goniometrach za pomocą



Rys.11.4. Schemat goniometru

dwóch mikroskopów odczytowych M, umieszczonych symetrycznie na średnicy kręgu. W osi goniometru umieszczony jest stolik obrotowy S z płytką, której położenie regulowane jest trzema śrubami. Oś obrotu powinna pokrywać się z osią obrotu kręgu podziałowego. Ponad kręgiem znajduje się luneta L i kolimator K ustawione tak, by ich osie optyczne przecinały się w osi obrotu, ponad powierzchnią stolika. Z reguły kolimator jest nieruchomy względem podstawy goniometru (z wyjątkiem ruchów regulacyjnych o których niżej), natomiast luneta może być przemieszczana na ramieniu wychylnym w płaszczyźnie poziomej, przy czym oś optyczna lunety jest stale skierowana ku osi stolika. W płaszczyźnie ogniskowej obiektywu kolimatora umieszczony jest krzyż lub pionowa szczelina o regulowanej szerokości. Krzyż na płycie ogniskowej kolimatora oświetla się tak, by obraz źródła światła utworzony został w źrenicy układu, tzn. w płaszczyźnie obiektywu kolimatora, natomiast w przypadku stosowania szczeliny można zastosować projekcję obrazu źródła światła w płaszczyznę szczeliny.

W lunecie w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu znajduje się krzyż lub podwójna pionowa linia (bisektor), na tle którego widoczny będzie obraz szczeliny kolimatora. Lunety goniometrów są z reguły lunetami autokolimacyjnymi z dwiema płytkami ogniskowymi i wbudowanym oświetlaczem O.

### 2.2.2. Regulacja goniometru

Podstawa goniometru spoczywa na trzech nóżkach poziomujących N, którymi wg wskazań poziomicy F poziomuje się goniometr. Czynność ta pomijana w mało dokładnych goniometrach (nie-dokładność pomiaru kąta 30") powinna być wykonana w goniometrach precyzyjnych ze względu na konieczność zapewnienia właściwej pracy łożyska głównego goniometru, które powinno być obciążone symetrycznie.

Luneta autokolimacyjna umieszczona na ramieniu ułożyskowanym obrotowo względem osi głównej goniometru może być przemieszczona ruchem szybkim lub - po zaciśnięciu śruby H - naprowadzana wolno leniwką. Podobnie realizowany ruch obrotowy ma limbus z kręgiem podziałowym T. Krąg podziałowy może być sprzężony z ramieniem lunety autokolimacyjnej zaciskiem Z lub z podstawą goniometru J, co umożliwia wykonywanie pomiarów na różnych fragmentach podzielnicy kręgu.

Urządzenia odczytowe - w prostych goniometrach jednostronne, w precyzyjnych podwójne - sprzęgane są z ramieniem lunety autokolimacyjnej zaciskiem G lub są na tym ramieniu osadzone. Zarówno kolimator jak i luneta mogą być nieznacznie pochylane w płaszczyźnie pionowej w celu uzyskania prostopadłości osi lunety i kolimatora względem osi głównej goniometru, a pośrednio - równoległości względem płaszczyzny kręgu podziałowego.

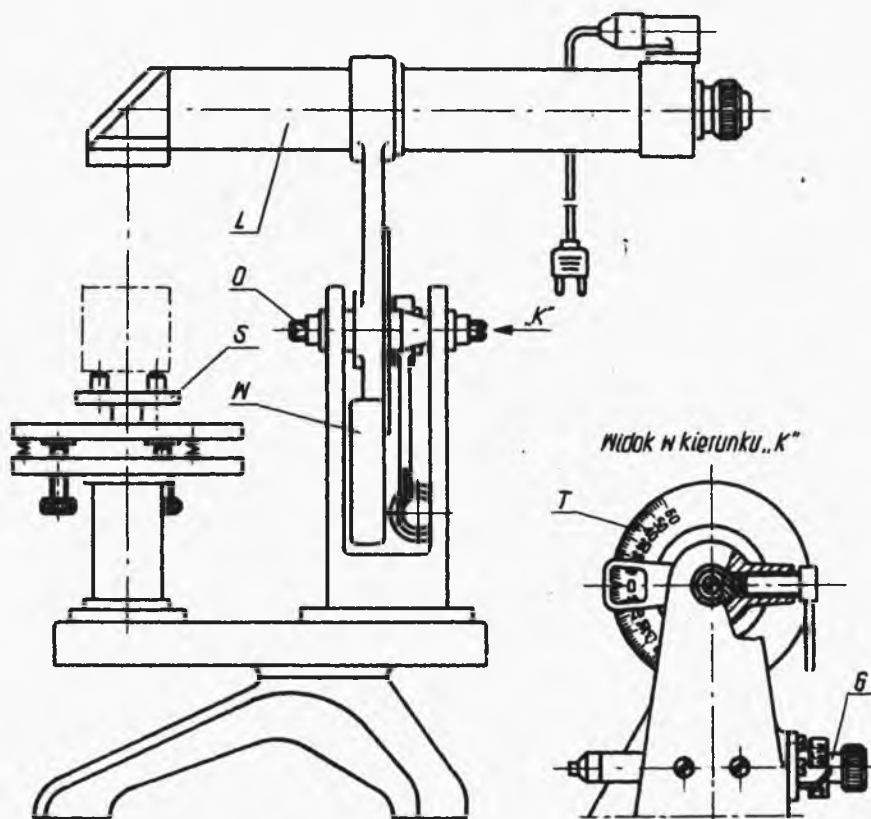
Regulacja goniometru w celu przygotowania go do pomiarów:

a) ustawienie "na nieskończoność" układu optycznego lunety autokolimacyjnej (o ile wyposażona jest w płytkę ogniskową przesuwaną poosiowo) za pomocą wzorcowej płytki o płaskiej powierzchni odbijającej lub przez obserwację obrazu szczeliny kolimatora (do zaniknięcia paralaksy między krzyżem okulara a obrazem autokolimacyjnym lub obrazem szczeliny kolimatora);

b) naprowadzenie osi lunety autokolimacyjnej na kierunek prostopadły do osi głównej (regulacja śrubą) przeprowadza się przy obserwacji obrazu autokolimacyjnego uzyskanego od wzorcowej płytki płasko-równoległej w dwóch przeciwległych (co  $180^\circ$ ) położeniach lunety. W przypadku, gdy obraz krzyża autokolimacyjnego przesunięty jest w górę lub w dół względem krzyża w okularze należy skorygować kątowe położenie lunety o połowę obserwowanej różnicy, zaś o drugą połowę skorygować ruchem śrub P pochylających stolik, na którym spoczywa płytka wzorcowa.

Pokrycie krzyży autokolimacyjnego i okularu lunety powinno być obserwowane w obydwu tych położeniach lunety.

Do pomiarów porównawczych pryzmatów stosowany jest goniometr przedstawiony schematycznie na rys.11.5. Luneta autokolimacyjna L umieszczona jest na ramieniu wychylnym z przeciw-

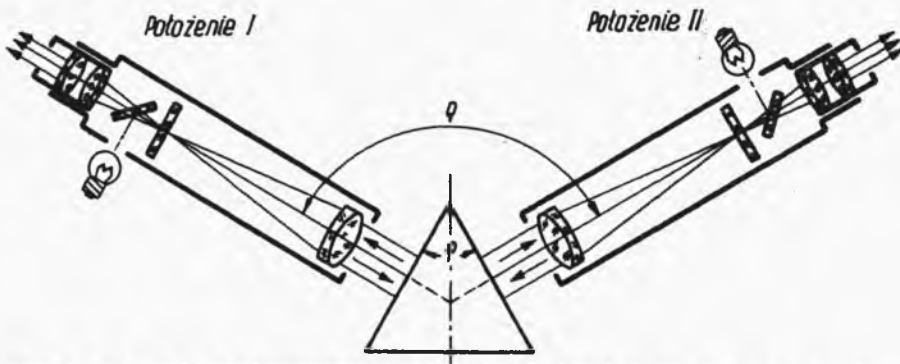


Rys.11.5. Goniometr warsztatowy przeznaczony do pomiarów porównawczych

wagę. W obracającym się wokół osi poziomej  $O$  przecinającej się z pionową osią obrotu stolika  $S$ . Krąg z podziałnią  $T$  służy do zgrubnego ustawienia położenia lunety autokolimacyjnej. Dokładne naprowadzenia lunety dokonywane jest za pomocą śruby mikrometrycznej  $G$ . Położenie lunety ustala się wg pryzmatu wzorcowego umieszczonego na stoliku przedmiotowym zaopatrzonego w trzy wkręty podporowe zakończone sferycznymi polewanymi powierzchniami wkładów agatowych.

### 2.2.3. Pomiary kątów dwuściennych na goniometrze

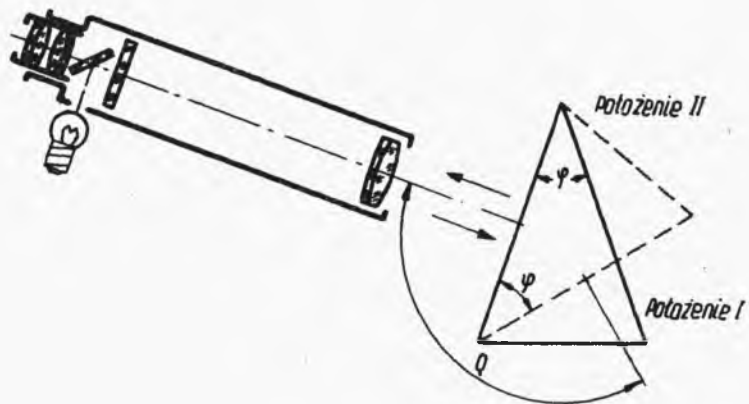
Kąt dwuścienny - z definicji - powinien być pomierzony w przekroju głównym pryzmatu, toteż po ułożeniu pryzmatu na stoliku należy dokonać jego regulacji tak, by krawędź kąta dwuściennego była równoległa do pionowej osi obrotu stolika. Za pomocą śrub poziomujących stolika doprowadza się do pokrycia (w kierunku pionowym) punktów środkowych autokolimacyjnych obrazów krzyża lunety, uzyskanych od obydwu - na przemian - powierzchni tworzących kąt dwuścienny. Pomiar może być dokonany przez obrót lunety wokół stolika (rys.11.6) lub przez obrót



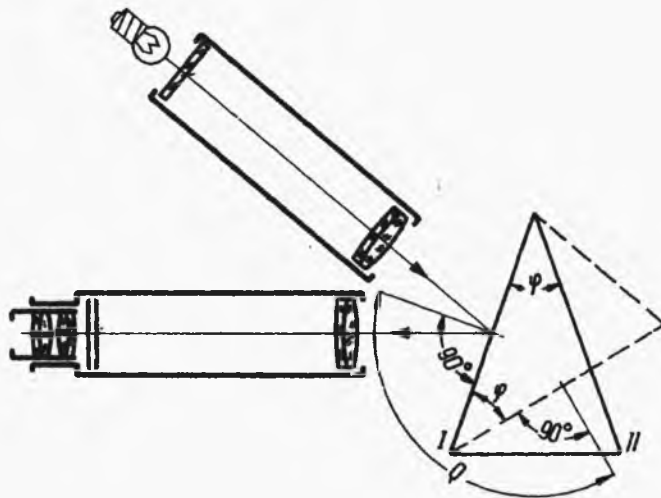
Rys.11.6. Autokolimacyjny pomiar kąta dwuściennego na goniometrze przy zastosowaniu ruchomej lunety

stolika względem osi nieruchomej lunety (rys.11.7); odczyty dokonywane są każdorazowo po doprowadzeniu do pokrycia się obrazu autokolimacyjnego z krzyżem lunety.

Kąt dwuścienny można mierzyć także przy użyciu kolimatora i lunety. W tym celu należy je zbliżyć do siebie ustawiając ich osie pod możliwie małym kątem (rys.11.8). W czasie pomiaru pozostają one nieruchome, natomiast obracany jest stolik bada-



Rys.11.7. Autokolimacyjny pomiar kąta dwuściennego przy zastosowaniu ruchomego stolika



Rys.11.8. Pomiar kąta dwuściennego przy zastosowaniu kolimatora, lunety i ruchomego stolika

nym pryzmatem. Odczytu kąтового położenia stolika dokonuje się w dwóch położeniach po naprowadzeniu obrazu szczeliny (ewentualnie krzyża) kolimatora na obraz krzyża w lunecie. Ze względu na błąd podziału podziałki na kręgu T pomiary kątów należy wykonywać kilkakrotnie na różnych fragmentach podzielnicy.

W elementach pryzmatycznych o co najmniej trzech powierzchniach, np. w pryzmatach prostokątnych oprócz kątów dwuściennych toleruje się również nierównoległość płaszczyzn czynnych względem przyjętego kierunku odniesienia. Najczęściej nosi ona miano piramidalności pryzmatu, określonej jako nierównoległość jednej z płaszczyzn względem krawędzi kąta dwuściennego utworzonej przez pozostałe dwie płaszczyzny. Pomiar piramidalności na goniometrze możliwy jest jedynie wówczas, gdy lunetą autokolimacyjną można mierzyć odchylenia obrazu krzyża autokolimacyjnego również w płaszczyźnie pionowej. Analogicznie mierzy się nieprostokątność pionowych powierzchni odbijających względem przyjętej powierzchni bazowej, na której spoczywa pryzmat, pod warunkiem uprzedniego wyregulowania stolika tak, by jego powierzchnia była prostopadła do głównej osi goniometru.

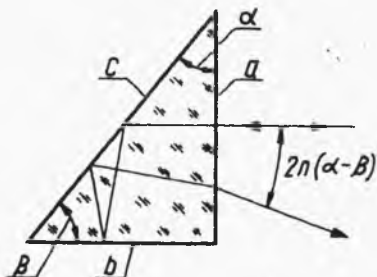
### 2.3. Pomiary porównawcze kątów w pryzmatach za pomocą lunety autokolimacyjnej

Najwygodniejszym - przy kontroli seryjnej - jest goniometr wg rys. 11.5 nazywany czujnikiem autokolimacyjnym, w którym zerowanie przyrządu dokonywane jest dla pryzmatu wzorcowego, spoczywającego na agatowych nóżkach stolika lub - jak to niekiedy jest konieczne przy złożonych kształtach pryzmatów np. dachowych - w gniazdku osadzonym zamiast płyty stolika. Odbicie od czołowej powierzchni pryzmatu niesie informację o odchyłkach wymiarów kąta między nią a powierzchniami bazowymi z porównania z obrazem autokolimacyjnym uzyskanym od pryzmatu wzorcowego.

Składowe przesunięcia krzyża autokolimacyjnego względem wyzerowanej uprzednio podziałki w okularze lunety będą odpowiadały odchyłkom kątów w przekroju głównym pryzmatu jego piramidalności.



Inna z metod pomiaru niektórych odchyłek kątów w pryzmacie polega na obserwacji dwóch autokolimacyjnych obrazów pochodzących od powierzchni pierwszej i od ostatniej powierzchni po przejściu promieni przez pryzmat "tam i z powrotem". Przykładowo pryzmat, który - wykonany prawidłowo tworzy w rozwinięciu wzdłuż osi wiązki promieni płytkę płasko-równoległą - nie będzie wprowadzał względnego przemieszczenia obrazów autokolimacyjnych krzyży



uzyskanych z odbicia od powierzchni a i b. Piramidalność pryzmatu (nierównoległość  $\pi$  krawędzi ab do płaszczyzny c) wprowadzi kątowe przesunięcia obrazów autokolimacyjnych o odległość zależną od kąta  $\pi$  i współczynnika załamania materiału, z którego wykonany jest pryzmat

Rys.11.9. Autokolimacyjny pomiar odchyłek kątów w pryzmacie prostokątnym

$$\delta_{\pi} = 2n\pi. \quad (4)$$

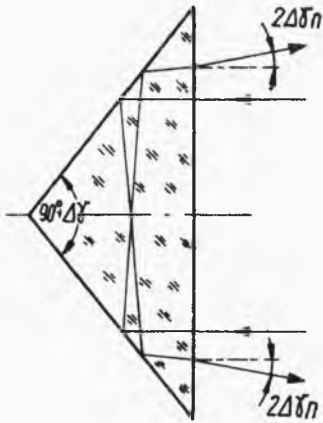
Jeżeli kąty  $\alpha$  i  $\beta$  są sobie równe, wówczas w przekroju głównym (czyli w płaszczyźnie rysunku 11.9) kierunek padania i kierunek, w którym wybiegają promienie z pryzmatu po odbiciu od wewnątrz nie ulegnie zmianie. W przypadku różnicy kątów  $\alpha$  i  $\beta$  promień odbity dozna odchylenia o kąt

$$\delta = 2n(\alpha - \beta). \quad (5)$$

Rozróżnienie obydwu obrazów jest łatwe dzięki różnicy ich jasności, bowiem obraz uzyskany od pierwszej powierzchni jest jaśniejszy. W opisany sposób sprawdza się również pryzmaty o bardziej złożonym kształcie, przy czym dla pryzmatów dachowych zależność między klinowością w przekroju głównym a piramidalnością staje się bardziej złożona.

Inny sposób sprawdzenia pryzmatów prostokątnych przedstawia rysunek 11.10. Prostopadle do powierzchni przeciwprostokątnej pada wiązka promieni z obiektywu lunety autokolimacyjnej. Część ich odbija się od tej powierzchni, tworząc w płaszczyźnie płytki ogniskowej lunety autokolimacyjny obraz krzyża, część zaś ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na ścianach

przyprostokątnych i po przejściu przez pryzmat także kierowana jest ku obiektywowi lunety, przy czym obrazowy opis odnosi się do dwóch wiązek promieni kierowanych na górną i dolną część pryzmatu, a wychodzących z dwóch połówek źrenicy lunety. Przy różnicy o  $\Delta \gamma$  kąta  $90^\circ$  między powierzchniami przyprostokątnymi kątowe przemieszczenia promieni względem pryzmatu idealnego wyniesie dla każdej z nich  $2\Delta\gamma$ , a po uwzględnieniu współczynnika załamania kąt między obydwoma wiązkami wybiegającymi z pryzmatu wyniesie  $4n\Delta\gamma$ . Jest to zatem metoda dwukrotnie dokładniejsza od poprzedniej. Piramidalność może być pomierzona analogicznie jak poprzednio. Rozróżnienie obrazów pochodzących z odbicia od powierzchni przyprostokątnych oraz z odbicia od powierzchni przeciwprostokątnej jest łatwa przy obrocie stolika o niewielki kąt, przy którym to obrocie te pierwsze obrazy pozostają nieruchome w polu widzenia.



Rys.11.10. Autokolimacyjny pomiar odchyłki kąta  $90^\circ$

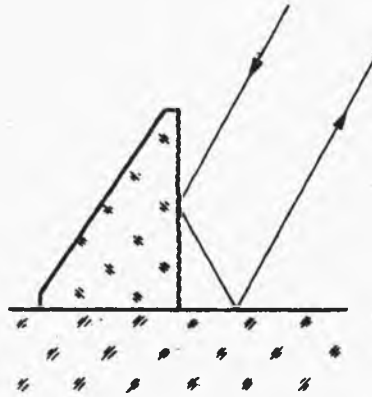
Przy dokładnych pomiarach autokolimacyjnych dużych przedmiotów na wynik pomiaru może mieć wpływ niejednorodność współczynnika załamania materiału, z którego wykonany jest przedmiot sprawdzany. Ujawni się ona przez pogorszenie ostrości obrazu krzyża, bądź też - w przypadkach rozciągniętych zmian wartości  $n$  o liniowych przyrostach  $\Delta n$  w kierunku prostopadłym do osi wiązki - przez dodatkową zmianę kąta  $\delta$  między wiązką padającą na przedmiot a przechodzącą przezzeń.

Pomiary autokolimacyjne stosowane zasadniczo do przedmiotów o powierzchniach polerowanych mogą być adaptowane do powierzchni matowych po przyłożeniu do nich pomocniczych płytek płasko-równoległych pokrytych cieczą imersyjną. Błąd pomiaru będzie zależał wówczas zarówno od nierównoległości powierzchni płytek jak i (przede wszystkim) od równomierności warstwy cieczy imersyjnej wypełniającej przestrzeń między powierzchniami matowymi a tymi płytkami.

Przy dokładnych pomiarach autokolimacyjnych dużych przedmiotów na wynik pomiaru może mieć wpływ niejednorodność współczynnika załamania materiału, z którego wykonany jest przedmiot sprawdzany. Ujawni się ona przez pogorszenie ostrości obrazu krzyża, bądź też - w przypadkach rozciągniętych zmian wartości  $n$  o liniowych przyrostach  $\Delta n$  w kierunku prostopadłym do osi wiązki - przez dodatkową zmianę kąta  $\delta$  między wiązką padającą na przedmiot a przechodzącą przezzeń.

Pomiary autokolimacyjne stosowane zasadniczo do przedmiotów o powierzchniach polerowanych mogą być adaptowane do powierzchni matowych po przyłożeniu do nich pomocniczych płytek płasko-równoległych pokrytych cieczą imersyjną. Błąd pomiaru będzie zależał wówczas zarówno od nierównoległości powierzchni płytek jak i (przede wszystkim) od równomierności warstwy cieczy imersyjnej wypełniającej przestrzeń między powierzchniami matowymi a tymi płytkami.

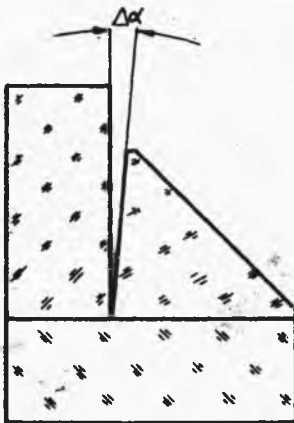
Kąty dwuścienne  $90^\circ$  tworzone przez powierzchnie matowe mogą być również bezpośrednio sprawdzane lunetą autokolimacyjną. W tym celu na płytce płaskiej ustawia się badany przedmiot, a oś lunety autokolimacyjnej kieruje się prawie stycznie do powierzchni matowej (rys.11.11). Przy dużych kątach padania powierzchnie matowe zachowują się tak jak lustrowane, toteż obrazy autokolimacyjne krzyża (słabo widoczne, nieco rozmyte) pozwolą na wykonanie pomiaru.



Rys.11.11. Autokolimacyjny pomiar odchyłki kąta  $90^\circ$  między powierzchniami matowymi

#### 2.4. Interferencyjna kontrola kątów pryzmatów

Metodę tę stosuje się przy wykonywaniu pryzmatów o odchyłkach rzędu kilku sekund. Do tego celu wykorzystuje się sprawdziany



Rys.11.12. Kątownik interferencyjny i sprawdziany pryzmat

obliczyć różnicę kąta pryzmatu i sprawdzianu

$$\Delta \alpha = N \frac{\lambda}{2l} \quad (6)$$

### 3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Przeprowadzić regulację goniometru.
2. Pomierzyć kąt dwuścienny pryzmatu na goniometrze.
3. Pomierzyć kąt metodą autokolimacyjną.
4. Pomierzyć kąt klina metodą dewiacji w układzie kolimator-luneta.
5. Autokolimacyjnie pomierzyć kąty w pryzmacie prostokątnym (kąty:  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $\pi$ ).

### 4. LITERATURA

Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.  
Legun Z.: Technologia szkła optycznego. T.II. PWT. Warszawa 1958.

### 5. PYTANIA KONTROLNE

Od czego zależy niedokładność pomiaru kątów za pomocą goniometru przy zastosowaniu kolimatora i lunety?

Które metody obarczane są błędami wynikającymi z wad materiałowych badanych części?

Jak wiąże się niedokładność wykonania powierzchni przedmiotów badanych z niedokładnością pomiaru?

Podać kolejność czynności regulacji goniometru?

Jak zdefiniować piramidalność pryzmatu rombowego i jakimi metodami można ją zmierzyć?

Co ogranicza stosowanie metod autokolimacyjnych do pomiaru kąta klina płytek szklanych?

## Ćwiczenie 12

### PODSTAWOWE POMIARY INTERFERENCYJNE

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska interferencji dwupromieniowej i podstawowych pomiarów interferencyjnych.

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

##### 2.1. Interferencja światła

Interferencja światła jest to zjawisko nakładania się co najmniej dwu ciągów fal świetlnych. Niech te ciągi będą opisane równaniami falowymi:

$$e_1 = E_1 \sin(\omega t - \varphi_1), \quad (1)$$

$$e_2 = E_2 \sin(\omega t - \varphi_2),$$

gdzie:  $\varphi_1 - \varphi_2$  - oznacza różnicę faz między dwoma ciągami fal,  
 $e_1, e_2$  - natężenie pól elektrycznych.

O wrażeniu świetlnym odbieranym przez oko obserwatora decyduje natężenie światła I (intensywność) proporcjonalna do kwadratu amplitudy  $A$  składowych ruchów harmonicznycch. Rezultatem interferencji jest powstawanie w różnych punktach przestrzeni rozkładu intensywności tzw. prążków interferencyjnych. Rozwiązaniem równań falowych (1) są równania ruchu harmonicznego w postaci:

$$a_1 = A_1 \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (2)$$

$$a_2 = A_2 \cos(\omega t - \varphi_2),$$

gdzie:  $A_1, A_2$  - amplitudy składowych ruchów harmonicznycch.

Po nałożeniu tych ruchów (interferencja) otrzymuje się

$$a = A \cos(\omega t - \varphi),$$

gdzie

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

lub operując intensywnościami

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

Jeżeli ciągi fal wychodzą z różnych źródeł lub nawet z różnych punktów tego samego źródła, to z uwagi na spontaniczność emisji ich fazy będą się zmieniać niezależnie. Częstotliwość drgań w zakresie widzialnym przekracza  $10^{12}$  Hz, stąd oko ludzkie (i każdy inny odbiornik) zarejestruje średnią wartość. Ale każda wartość średnia niezależnie zmieniająca się przyjmuje wartość równą zeru. Stąd wartość  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$  i zgodnie z zależnością (3) intensywność  $I$  w dowolnym wybranym punkcie będzie algebraiczną sumą  $I_1$  i  $I_2$ . W tym przypadku nie zaobserwuje się zjawiska interferencji (prążków interferencyjnych). Stąd wniosek, że podstawowym warunkiem zaobserwowania zjawiska interferencji, a zarazem jego praktycznego wykorzystania do pomiarów jest uzgodnienie faz obu ciągów fal (koherencja promieniowania, spójność) możliwa wtedy, gdy oba ciągi fal wychodzą z tego samego punktu źródła. W dowolnym punkcie przestrzeni fazy ciągów fal można opisać zależnościami:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{L_1}{\lambda}, \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{L_2}{\lambda}, \quad (4)$$

gdzie:  $L_1, L_2$  - drogi optyczne  $L = n d$ ,  
 $n$  - współczynnik załamania ośrodka,  
 $d$  - droga geometryczna,  
 $\lambda$  - długość fali świetlnej.

Z podstawienia (4) do (3) otrzymuje się równanie interferencji opisujące intensywność  $I_A$  w dowolnie wybranym punkcie  $A$  przestrzeni w zależności od intensywności składowych ciągów fal  $I_1, I_2$ , różnicy dróg optycznych  $\Delta L$  przy określonej długości fali świetlnej  $\lambda$

$$I_A = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi \Delta L}{\lambda}. \quad (5)$$

Wprowadza się wielkość  $m = \frac{\Delta L}{\lambda}$ , zwaną rzędem interferencji:

$$I_{A \max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (6)$$
$$I_{A \min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

Zbiór punktów przestrzeni o maksymalnej intensywności tworzy jasne prążki interferencyjne, natomiast ciemne - zbiór o najmniejszej intensywności. Jak widać jasne prążki powstają przy parzystej zaś ciemne przy nieparzystej wielokrotności  $\frac{\lambda}{2}$ . Równanie (5) jest słuszne dla punktowego źródła emitującego światło ściśle monochromatyczne. W rzeczywistych warunkach każde źródło ma skończone wymiary oraz emituje fale o określonym składzie widmowym.

Rozpatrzmy teraz wpływ:

- 1) wymiarów źródła światła,
- 2) monochromatyczności promieniowania.

ad 1. Jak wcześniej wspomniano zjawisko interferencji może być zaobserwowane tylko wtedy, gdy fale pochodzą z tego samego punktu źródła. Zatem w płaszczyźnie obrazu powstaną układy prążków pochodzące z różnych punktów źródła i wypadkowy układ prążków będzie sumą tych układów. Prowadzi to do pogorszenia widoczności prążków interferencyjnych lub nawet do zaniknięcia prążków, jeżeli różnica dróg optycznych ciągów fal między dwoma punktami źródła wyniesie  $(2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ . Oznacza to, że ciemny prążek pochodzący z jednego punktu źródła wystąpi w miejscu jasnego prążka pochodzącego z drugiego punktu tegoż źródła. Stąd wniosek, że najlepsze warunki obserwacji zjawiska interferencji występują przy punktowym źródle światła, a każde zwiększenie jego wymiarów prowadzi do pogorszenia widoczności prążków interferencyjnych.

ad 2. Analogicznie przedstawia się zagadnienie monochromatyczności promieniowania. W przypadku gdy źródło świeci światłem niemonochromatycznym, to w płaszczyźnie obrazu powstają oddzielne układy prążków dla poszczególnych linii widmowych, co powoduje pogorszenie widoczności prążków interferencyjnych (przy świetle białym prążki są kolorowe).

W celu określenia widoczności prążków wprowadza się pojęcie kontrastu prążków definiowanego jako

$$C = \frac{I_{A \max} - I_{A \min}}{I_{A \max} + I_{A \min}} \quad (7)$$

Prążki widoczne są najlepiej przy maksymalnym kontraście ( $C = 1$ ), a przestają być widoczne przy kontraście zerowym. Wstawiając (6) do (7) otrzymuje się

$$C = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

oraz wynikający z tego wniosek, że maksymalny kontrast prążków interferencyjnych można otrzymać tylko przy jednakowych intensywnościach ciągów fal.

Reasumując, na kontrast prążków mają wpływ:

- stosunek energii obu ciągów fal,
- wymiary źródła światła,
- monochromatyczność promieniowania.

Z wyżej wymienionymi faktami związana jest maksymalna różnica dróg optycznych (np. odległość sprawdzianu od mierzonego elementu, grubości badanej płytki) jaką można osiągnąć przy założonym kontraście obserwowanych prążków i wynosi ona przykładowo:

- dla światła białego - kilka  $\mu\text{m}$ ,
- dla światła sodowego - rzędu kilkunastu mm,
- dla światła kadmu (czerwona linia) - rzędu kilkudziesięciu mm,
- dla światła laserowego - do kilkuset m.

## 2.2. Zjawiska interferencji na przykładzie klina optycznego

Rozpatrzmy zjawisko interferencji na przykładzie płytki szklanej, której powierzchnie tworzą ze sobą pewien kąt  $\alpha$  (rys.12.1). Promień AB dzieli się na dwa promienie BJ i BCDK, które pozornie przecinają się w punkcie  $G_1$ . Zbiorowi promieni AB odpowiada zbiór punktów  $G_1$  z różnicą dróg optycznych zależną od parametrów klina i położenia źródła światła względem klina. Zbiór punktów  $G_1$  wyznacza płaszczyznę lokalizacji prążków interferencyjnych, które można obserwować bezpośrednio okiem lub przez mikroskop utworzony przez obiek-

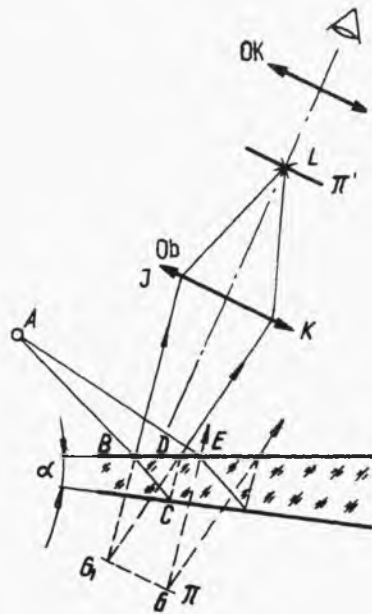


tyw  $O_b$  i okular  $O_k$ . Różnica dróg optycznych wyniesie

$$\Delta L = BCD n + DKL - BIL + \frac{\lambda}{2}; \quad (8)$$

$\frac{\lambda}{2}$  dodano ze względu na skok fazy w punkcie  $B$  występujący przy odbiciu od powierzchni dzielącej ośrodek o mniejszym i większym współczynniku załamania. Jeżeli chcemy aby zbiór punktów  $G_1$  (czyli kształt prążków interferencyjnych) nie zależał od wzajemnego położenia klina i źródła światła konieczne jest odsunięcie źródła do nieskończoności, czyli oświetlenie płytki wiązką promieni równoległych. Tak zmodyfikowany układ stanowi prosty interferometr (rys. 12.2).

Źródło światła spójnego  $Z$  ograniczone przesłoną  $P$  umieszczoną w płaszczyźnie ogniskowej

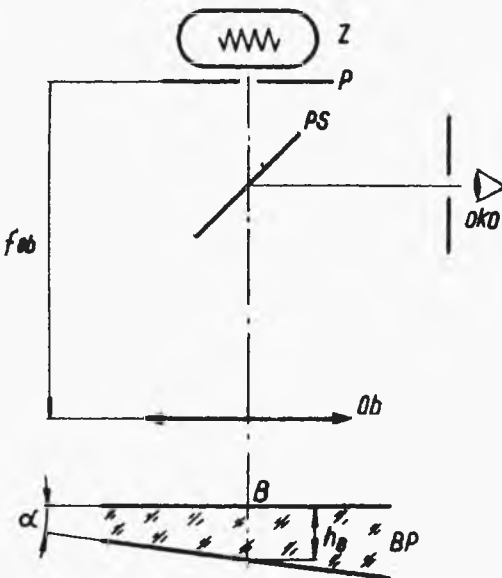


Rys.12.1. Zjawisko interferencji w klinowej płytce

obiektywu  $O_b$  oświetla badaną płytkę  $BP$ . Promienie odbite od obu powierzchni płytki tworzą układ prążków interferencyjnych obserwowanych okiem po odbiciu od płytki światłodzielącej  $PS$ . Ponieważ pomiary interferencyjne dotyczą małych wartości kąta  $\alpha$ , to zależność (8) można napisać w postaci

$$\Delta L = 2h_B n + \frac{\lambda}{2}.$$

Zgodnie z (6) ciemne prążki powstaną w miejscach gdzie



Rys.12.2. Prosty interferometr dwupromieniowy

$$\Delta L = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

stąd

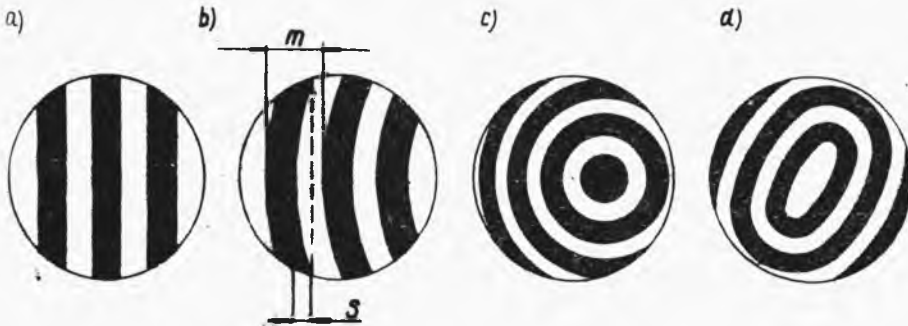
$$h = \frac{m\lambda}{2n}, \quad (9)$$

czyli dla określonego rzędu interferencji prążki powstają dla jednakowych grubości płytki -  $h$ . Stąd pochodzi nazwa prążków jednakowej grubości. Jeżeli w polu widzenia między dwoma punktami odległymi o  $l$  znajdzie się  $m$  prążków interferencyjnych, to kąt klina  $\alpha$  można obliczyć ze wzoru

$$\alpha = \frac{m\lambda}{2n l}. \quad (10)$$

Jeżeli mamy do czynienia z płytką (klinem) powietrznym występującym przy sprawdzaniu interferencyjnym elementów wtedy  $n = 1$ .

W celu określenia kształtu powierzchni badanego elementu należy zestawić układ, w którym jedną powierzchnią płytki powietrznej stanowi badany element, drugą zaś powierzchnia wzorcowa. Miarą kształtu powierzchni jest zniekształcenie prążków interferencyjnych. Dla powierzchni płaskiej otrzyma się proste i równoległe względem siebie prążki interferencyjne (rys.12.3a).



Rys.12.3. Obrazy interferencyjne powierzchni płaskiej sferycznej i torycznej

Sferyczne zniekształcenie powierzchni płaskiej objawia się bądź zakrzywieniem prążków (rys.12.3b) lub ich kołowością (rys. 12.3c) w zależności od kąta nachylenia badanego elementu od sprawdzianu. W pierwszym przypadku niepłaskość  $\Delta$  wyznacza się

jako stosunek ugięcia prążków  $S$  od odległości  $m$  między nimi  $\Delta = \frac{S}{m} \frac{\lambda}{2}$  w drugim jako liczba prążków  $\Delta = N \frac{\lambda}{2}$ . Toryczne zniekształcenie badanej powierzchni objawia się owalizacją prążków interferencyjnych, a miarą tego zniekształcenia jest maksymalna różnica liczby prążków w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach na odcinkach tej samej długości (rys.12.3d).

W celu określenia wklęsłości lub wypukłości dla przypadków przedstawionych na rys.12.3c i 12.3d należy lekko nacisnąć od góry badany element. Jeżeli prążki będą się rozchodzić ze środka ku brzegom będzie to przypadek wypukłości. Jeżeli prążki będą schodzić się do środka będzie to przypadek wklęsłości.

### 2.3. Pomiar dużych promieni krzywizn powierzchni sferycznych za pomocą płaskiego sprawdzianu interferencyjnego

Badaną powierzchnię kładzie się na płaskiej powierzchni sprawdzianu i oświetla światłem monochromatycznym o znanej długości fali  $-\lambda$ . Promienie odbite od tych powierzchni utworzą kołowy układ prążków interferencyjnych tzw. prążków Newtona (rys.12.4). Mierząc średnice  $\phi_1, \phi_2$  dwóch prążków o numerach  $N_1$  i  $N_2$  można wyznaczyć promień krzywizny  $R$  następująco. Ponieważ

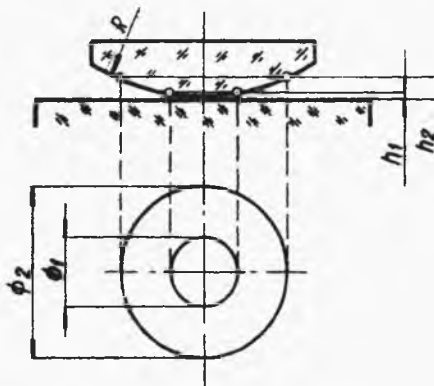
$$h_2 - h_1 = \frac{\lambda}{2} (N_2 - N_1)$$

oraz

$$h_1 \approx \frac{\phi_1^2}{8R}, \quad h_2 \approx \frac{\phi_2^2}{8R},$$

stąd ostatecznie

$$R = \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{4\lambda (N_2 - N_1)}. \quad (11)$$



Rys.12.4. Prążki Newtona

W celu uzyskania dużej dokładności pomiaru zaleca się mierzyć średnice prążków daleko położonych od siebie oraz z uwagi

na miejscowe zniekształcenie w pobliżu punktu styku zaleca się mierzyć średnice prążków o wyższych numerach ( $N > 5$ ).

#### 2.4. Pomiar lokalnych zmian grubości płytek płasko-równoległych przy pomocy prążków jednakowego nachylenia

Dotychczas w ćwiczeniu rozpatrywano prążki równej grubości, powstające w klinowatej płytce (klinie powietrznym) przy założeniu punktowego źródła światła. Jeżeli kąt klina malał liczba prążków interferencyjnych zmniejszała się i w skrajnym przypadku kolejny jasny (lub ciemny) prążek wypełniał całe pole widzenia. Jeżeli w tym przypadku zastosuje się rozciągnięte źródło światła, to rząd interferencji (kolejne prążki) dla danej płytki płasko-równoległej będzie funkcją tylko kąta padania na pierwszą powierzchnię

$$m = \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{2d n \cos i'}{\lambda} + \frac{1}{2}.$$

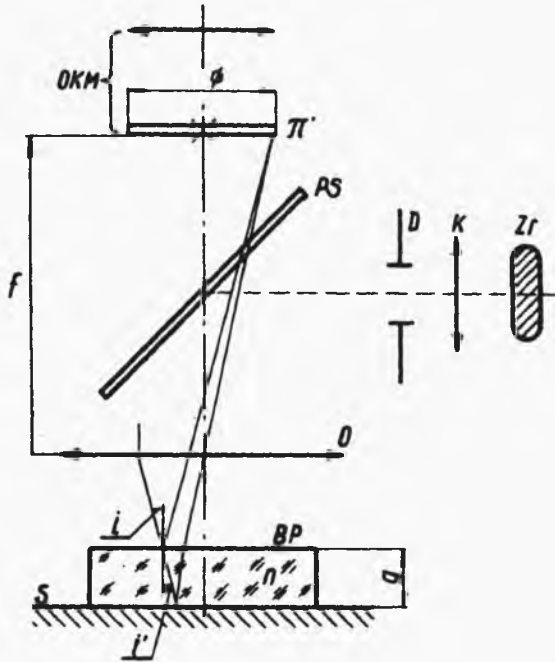
Prążki mają kształt pierścieni koncentrycznych i odpowiadają jednakowym kątom nachylenia do normalnej do powierzchni. Stąd też pochodzi nazwa prążków jednakowego nachylenia, zwanych także prążkami Heidingera. Jeżeli podczas przesuwania badanej płytki w płaszczyźnie prostopadłej do osi nastąpi lokalna zmiana grubości, to zmieniają się średnice obserwowanych prążków, czyli zmiana średnic prążków jest miarą zmiany grubości płytek płasko-równoległych. Osiągane dokładności sięgają rzędu nm ( $10^{-9}$  m). Ponieważ płaszczyzny, od których odbijają się promienie są w zasadzie równoległe, to lokalizacja prążków zachodzi w nieskończoności i do ich obserwacji używa się lunety o małym powiększeniu. Ogólny schemat interferometru do sprawdzania szklanych płytek płasko-równoległych przedstawiono na rys.12.5.

Rozciągnięte źródło światła monochromatycznego Zr, za pomocą kondensora K, płytki światłodzielącej PS i obiektywu O oświetla badaną płytkę BP. Prążki interferencyjne obserwuje się w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu. Średnice prążków można mierzyć za pomocą okularu mikrometrycznego Ok. Różnica dróg optycznych  $\Delta L$  między interferencyjnymi promieniami wynosi

$$\Delta L = m \lambda = 2 n d \cos i' + \frac{\lambda}{2}. \quad (12)$$

Przy założeniu, że  $n$  i  $\lambda$  są stałe i po zróżniczkowaniu (12) można otrzymać zależność między zmianą grubości płytki  $d$  i zmianą tego samego ciemnego prążka ( $\Delta L = \text{const}$ )

$$\Delta d = d \frac{\cos i'_2 - \cos i'_1}{\cos i'}$$



Rys.12.5. Interferometr prążków jednakowego nachylenia

Wprowadzając przybliżenie  $\cos \alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2}$  i ponieważ  $i = n i'$  oraz  $\phi = 2 f i$  ostatecznie otrzymuje się

$$\Delta d = \frac{d}{8n^2 f^2} (\phi_1^2 - \phi_2^2) - \frac{\lambda}{2n} K, \quad (13)$$

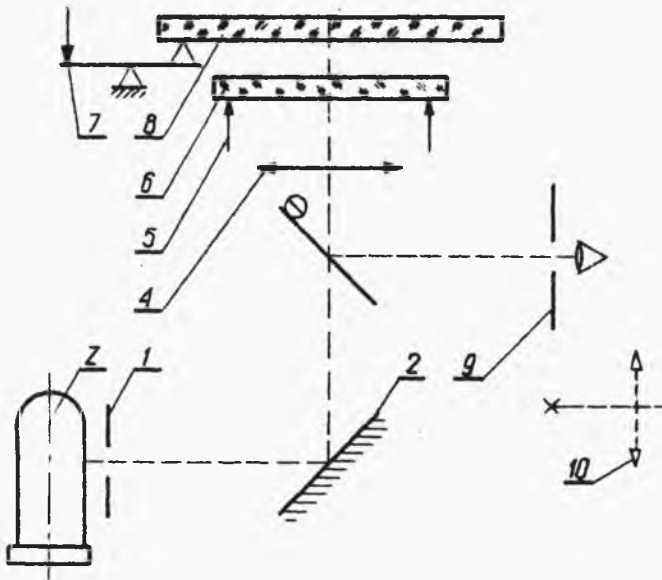
gdzie:  $\phi_1, \phi_2$  - średnice tego samego ciemnego prążka mierzone w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu  $O$  odpowiadające zmianie grubości płytki o  $\Delta d$ . Ostatni składnik  $\frac{\lambda}{2n} K$  uwzględnia możliwość zmiany rzędu rozpatrywanego prążka  $K = 1, 2, \dots$  przy przejściu na pierwszy, drugi itd. prążek o

większej średnicy  $K = -1, -2, \dots$ , gdy przechodzenie następuje na prążki o mniejszej średnicy.

### 3. OPIS STANOWISKA

#### 3.1. Interferometr do płaszczyzn

Schemat optyczny interferometru przedstawiono na rys.12.6. Lampa spektralna Z przy pomocy lustra 2 i obiektywu 4 oświetla sprawdzian 6 i badany element 8 wiązką promieni równoległych, przy czym przysłona 1 ogranicza wymiary źródła



Rys.12.6. Interferometr warsztatowy do sprawdzania płaszczyzn

światła. Prążki interferencyjne obserwuje się przez przysłonę 9. Regulację klina powietrznego przeprowadza się za pomocą śrub elewacyjnych dla ruchu makro 5 i ruchu mikro 7. Dostawiany w miejsce przysłony 9 okular 10 służy do regulacji interferometru.

#### Regulacja interferometru

1. Ustawić lampę spektralną z nałożoną przysłoną 1 na wysokości zwierciadła 2 i patrząc od strony sprawdzianu ustawić ją w środku pola widzenia.

2. Ustawić przysłoną 1 w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu 4. W tym celu należy dostawić lunetę pomocniczą (justerską) od strony sprawdzianu i ruchem lampy doprowadzić do ostrego obrazu przysłony 1 względem podziałki na płycie ogniskowej lunetki.

3. Ustawić powierzchnię sprawdzianu prostopadle do osi interferometru. W tym celu należy w miejsce przysłony 9 wstawić okular 10 i ruchem śrub 5 sprowadzić obraz przysłony 1 na środek pola widzenia (metoda autokolimacyjna).

4. Położyć badany element na podpórkach z końcówkami agatowymi.

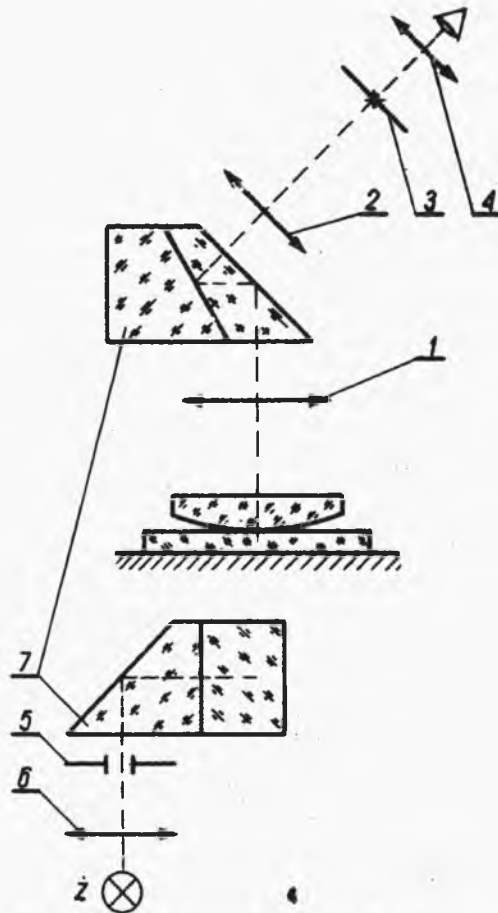
5. Ruchem śrub 5 doprowadzić do pokrycia się obrazów przysłony 1 odbitych od powierzchni sprawdzianu i badanego elementu.

6. Wyjąć okular 10, na jego miejsce wstawić przysłoną 9 i obserwować prążki interferencyjne.

7. Dokładną regulację klina powietrznego przeprowadzić za pomocą śrub 7.

#### 3.2. Interferometr prążków Newtona do pomiaru krzywizn powierzchni sferycznych

Schemat optyczny interferometru przedstawiono na rys.12.7. Lampa spektralna za pomocą kondensatora 6 pryzmatu 7 i obiektywu 1 oświetla badany element wiązką promieni równoległych uzyskaną przez wstawienie przysłony 5 w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu 1. Prążki interferencyjne obserwuje się pod powiększeniem  $8^x$  przez mikroskop, który tworzą obiektywy 1 i 2 oraz okular 4. Do naprowadzenia mikroskopu nad wybrany prążek służy płytka ogniskowa 3 z naciętym krzyżem. Do pomiaru średnicy prążków interferometr wyposażony jest w krzyżowy przesuw stolika dokonany za pomocą śrub mikrometrycznych w zakresie 50 i 25 mm z niedokładnością odczytu położenia 0,01 mm.



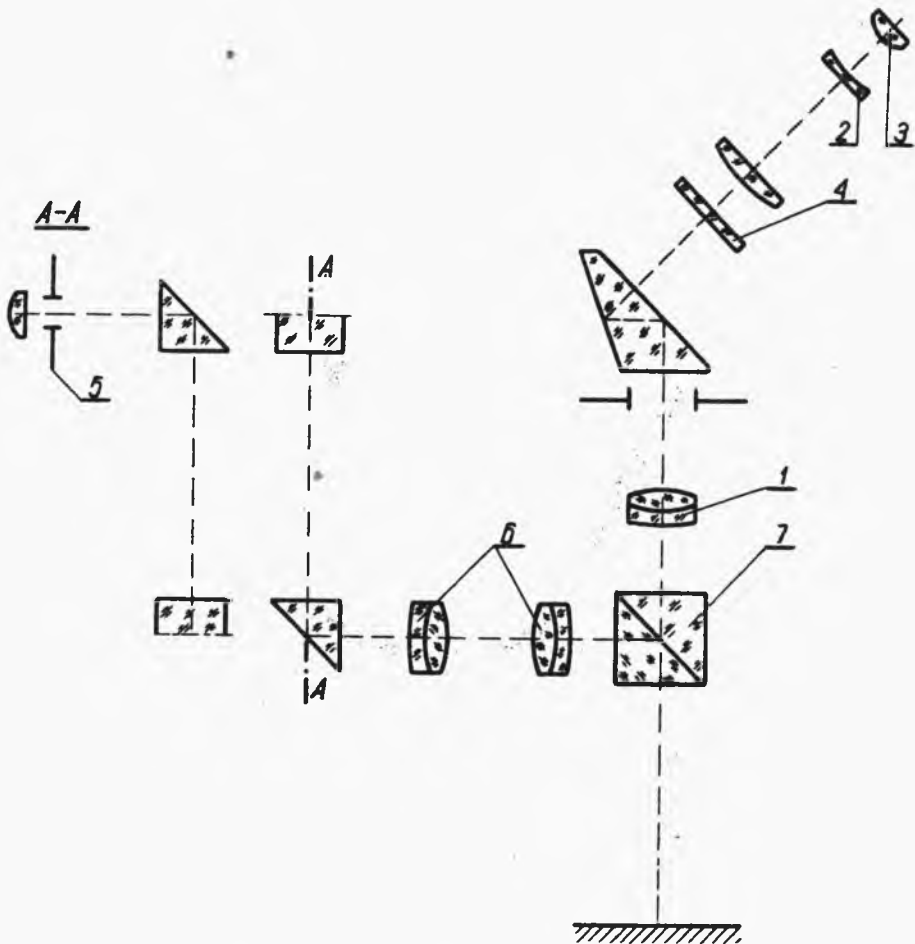
Rys.12.7. Interferometr Newtona

### 3.3. Interferometr Heidingera do pomiaru lokalnych zmian grubości płytek płasko-równoległych

Schemat interferometru przedstawiono na rys.12.8. Układ optyczny interferometru składa się z obiektywu 1, którego ognisko przedmiotowe pokrywa się z płaszczyzną badanej płytki BP i teleokularu złożonego z dwu soczewek 2 i 3. We wspólnym ognisku lunety znajduje się płytka ogniskowa 4 z naciętym bisektorem połączona ze śrubą mikrometryczną do pomiaru średnic prążków. Telecentryczny bieg promieni w płaszczyźnie pomiarowej uzyskano przez położenie w płaszczyźnie ogniskowej przed-



miotowej obiektywu obrazu przysłony 5. Lampa spektralna oświetla badaną płytkę przez kondensor 6. Układ pryzmatów 7, z powierzchnią sklejoną chromowaną, stanowi element światłodziący. Stolik interferometru ma dwa prostopadłe względem siebie ruchy.



Rys.12.8. Interferometr Heidingera

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Wyregulować interferometr warsztatowy do płaszczyzn.
2. Określić jakościowo i ilościowo wadę powierzchni płaskiej elementu optycznego.
3. Zmierzyć promień krzywizny powierzchni sferycznej.
4. Sprawdzić w wyznaczonych miejscach lokalne zmiany grubości płytki płasko-równoległej.

#### 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. § 3.2.5. WNT. Warszawa 1970.

Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.II. § 42. WNT. Warszawa 1964.

Leśniewski M.: Analiza dokładności pomiaru różnicy dróg optycznych za pomocą prążków interferencyjnych jednakowego nachylenia. Biuletyn Optyka Nr 1/1969.

#### 6. PYTANIA KONTROLNA

- Od czego zależy kontrast prążków interferencyjnych?
- Narysować i objaśnić schemat optyczny interferometru.
- Warunki zaobserwowania zjawiska interferencji.
- Omówić zastosowanie zjawiska interferencji do kontroli elementów optycznych.

## Ćwiczenie 13

# INTERFEROMETR TWYMANA

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska interferencji, rodzajów prążków interferencyjnych, interferometru Twymana-Greena oraz wyznaczanie obszarów spójności dla różnych źródeł promieniowania.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

#### 2.1. Interferencja - opis zjawiska

Interferencja światła jest to zjawisko nakładania się co najmniej dwu ciągów fal świetlnych. Jeżeli w zjawisku udział biorą dwa ciągi fal (np. odbite od płaszczyzn płytki szklanej, cienkiej warstwy oliwy na wodzie itp.) wtedy mówi się o interferencji dwupromieniowej, zaś przy większej liczbie ciągów (zazwyczaj po dokonaniu specjalnych zabiegów naporowania metalu na szkło) o interferencji wielopromieniowej. O wrażeniu świetlnym, odbieranym przez oko obserwatora decyduje intensywność  $I$  proporcjonalna do kwadratu amplitudy składowych ciągów fal. Rezultatem interferencji jest powstawanie w różnych punktach przestrzeni rozkładu intensywności tzw. prążków interferencji.

Jeżeli istnieją dwa źródła o intensywnościach  $I_1$  i  $I_2$ , to ogólne równanie opisujące zjawisko interferencji ma postać

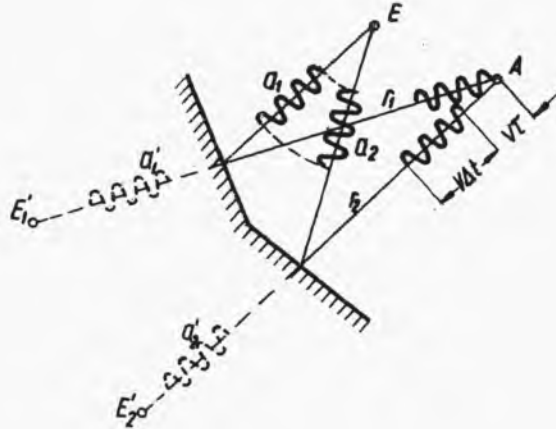
$$I_A = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} R \{ \gamma_{12}(\tau) \}, \quad (1)$$

gdzie  $R \{ \gamma_{12}(\tau) \}$  oznacza część rzeczywistą tzw. zespólnego stopnia koherencji  $\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}}$ , przy czym  $\Gamma_{12}(\tau)$  jest funkcją wzajemnej koherencji.

Jak wynika z (1) na intensywność w dowolnie wybranym punkcie A wpływają: stały składnik będący algebraiczną sumą  $I_1$  i  $I_2$  oraz składnik zawierający wspomniany wyżej zespolony stopień koherencji. Jeżeli ten ostatni składnik jest równy zeru, to  $I_A = I_1 + I_2$  i cała przestrzeń ma tę samą intensywność, czyli nie zaobserwuje się zmiany intensywności odpowiadającej prążkom interferencyjnym. Stąd też pod pojęciem koherencji w optyce rozumie się zdolność światła do interferencji. Jeżeli w żadnych warunkach nie można otrzymać prążków interferencyjnych (promieniowanie obu źródeł nie jest zdolne do interferencji) wtedy mówi się o braku wzajemnej koherencji promieniowania i światło niekoherentnym. Natomiast gdy prążki interferencyjne otrzymuje się w każdych warunkach dla obu źródeł, wtedy mówi się, że emitowane promieniowanie jest wzajemnie koherentne.

Jeżeli ciągi fal pochodzą z różnych źródeł lub nawet różnych punktów tego samego źródła, to z uwagi na spontaniczność emisji ich funkcja wzajemnej koherencji  $\Gamma_{12}(\tau) = 0$ , a zatem i  $\mathcal{G}_{12}(\tau) = 0$ . Stąd też, aby otrzymać  $\Gamma_{12}(\tau) \neq 0$  należy praktycznie korzystać z tego samego punktu źródła światła dla obu ciągów fal. Dwa ciągi fal uzyskuje się wprowadzając podział energii np. przy pomocy płytki światłodzielącej. Między światłem niekoherentnym a koherentnym (całkowicie) istnieje przedział światła częściowo koherentnego, tzn. zdolnego do "wytworzenia" prążków przy określonych warunkach. Dla lepszego zrozumienia tego zagadnienia wprowadza się uproszczony model zjawiska interferencji. Zakłada się źródło światła w postaci atomu emitującego fale elementarne (na rys.13.1 odcinki sinusoid) o tej samej częstotliwości średniej. Z uwagi na kwantowy charakter emisji światła fale zostają wypromieniowane co pewien czas, tworząc ciąg fal elementarnych o skończonych długościach. Niech na rys.13.1 podział energii dokonuje się przy pomocy dwu zwierciadeł ustawionych pod kątem. Pierwotne źródło E zostaje "zamienione" na dwa wtórne źródła promieniowania  $E'_1$  i  $E'_2$ . Do punktu A dociera promieniowanie pochodzące od tych źródeł. Ponieważ od źródła do punktu A oba ciągi fal przebywają różne drogi  $r_1$  i  $r_2$ , to następuje fazowe przesunięcie objawiające się w przyjętym modelu częściowym pokryciem fal elementarnych.

nych. Jeżeli czas opóźnienia fazowego  $\tau = \frac{r_1 - r_2}{v}$  jest większy od czasu trwania fali elementarnej  $\Delta t$  - czas koherencji źródła, tzn.  $|\tau| > \Delta t$ , to fale elementarne obu ciągów nie mają



Rys.13.1. Uproszczony model interferencji

części wspólnej (tzw. współczynnik pokrycia fal elementarnych  $\kappa(\tau)$  równa się zero) i analogicznie do dwu niezależnych źródeł nie ma żadnej koherencji między ciągami fal w wybranym punkcie A i wtedy zespolony stopień koherencji równy jest zero. Jeżeli  $\tau = 0$ , tzn. nie ma fazowego przesunięcia fal elementarnych, wtedy współczynnik pokrycia się fal (będący w przyjętym modelu modułem zespolonego stopnia koherencji) równy jest jedności i światło jest koherentne. Dla  $0 < |\tau| < \Delta t$  moduł zespolonego stopnia koherencji będzie spełniał nierówność  $1 > \kappa(\tau) = \gamma_{12}(\tau) > 0$ . Mówi się wtedy, że światło jest częściowo koherentne.

Dokładny model zjawiska interferencji, a ściślej problem koherencji, wymaga biegłej znajomości wybranych działów rachunku prawdopodobieństwa (procesy stochastyczne) i z tego powodu nie został tu przytoczony.

Zakładając monochromatyczne i punktowe źródło (tzw. koherencja w czasie i przestrzeni) moduł zespolonego stopnia koherencji  $|\gamma_{12}(\tau)| = 1$ , a równanie (1) przybierze postać

$$I_A = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi n (r_2 - r_1)}{\lambda_0}. \quad (2)$$

Wielkość  $m = \frac{n(r_2 - r_1)}{\lambda_0}$  nazywa się rzędem interferencji i jest odpowiednikiem kolejnych prążków interferencyjnych. Dla  $m = 0, 1, 2 \dots$  intensywność w punkcie A przybiera wartość maksymalną, zaś dla  $m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$  wartość minimalną:

$$I_{A \max} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2}, \quad (3)$$

$$I_{A \min} = I_1 + I_2 - 2 \sqrt{I_1 I_2}.$$

Zbiór punktów o maksymalnej intensywności nosi nazwę jasnego prążka interferencyjnego, zaś o minimalnej intensywności - ciemnego prążka interferencyjnego. Do określenia widoczności prążków interferencyjnych wprowadza się pojęcie kontrastu definiowanego jako

$$C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{A \max} - I_{A \min}}{I_{A \max} + I_{A \min}}, \quad (4)$$

a charakteryzuje on maksymalną różnicę intensywności prążków względem intensywności średniej. Jeżeli do (4) podstawić (3) i ponadto wprowadzić współczynnik podziału energii między źródłami  $\psi = I_1/I_2$ , to wyrażenie na kontrast przybierze postać

$$C = \frac{2 \sqrt{\psi}}{1 + \psi} \quad (5)$$

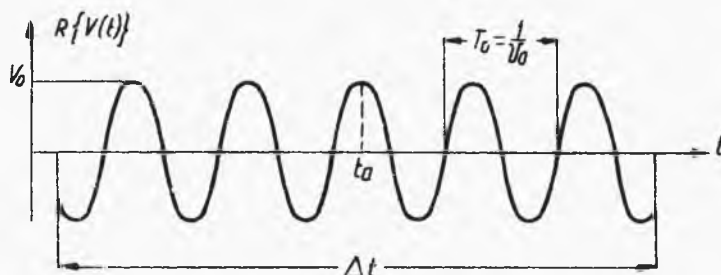
Wynika z tego bardzo ważny wniosek, że maksymalny kontrast prążków interferencyjnych można otrzymać tylko przy jednakowych intensywnościach interferujących ze sobą ciągów fal. Wtedy prążki ciemne mają intensywność zerową zaś jasne czterokrotnie większą od pojedynczego źródła

$$I_A = 4I_0 \cos^2 \pi m.$$

## 2.2. Wpływ chromatyzmu źródła na kontrast prążków

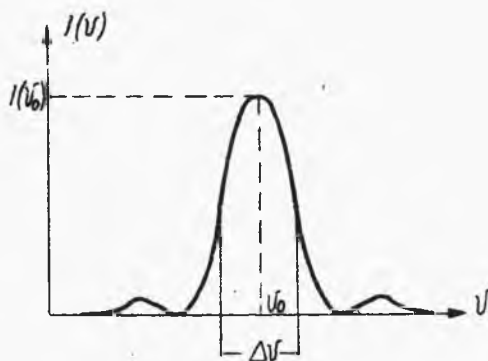
Pod pojęciem fali monochromatycznej rozumie się falę harmoniczną, która nie ma ograniczenia w czasie i przestrzeni, czyli jest określona w przedziale czasu  $(-\infty, +\infty)$ . Wtedy częstotliwość i długość fali odpowiednio wynoszą:  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ ,  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ .

W rzeczywistych warunkach nawet tak proste źródło jak pojedynczy atom (uproszczony model interferencji) emituje ciąg fal elementarnych o skończonym czasie emisji. Wtedy zgodnie z oznaczeniami rys.13.2 i 13.3 takiemu źródłu można przypisać pewien przedział częstotliwości  $\Delta\nu \approx \frac{1}{\Delta t}$  oraz przedział widma



Rys.13.2. Fala elementarna

$\Delta\lambda = \lambda_0^2/c \Delta\nu$ . Stąd wniosek, że w przyrodzie nie ma źródeł idealnie monochromatycznych, bowiem nawet dla tak prostego źródła będącego odpowiednikiem lampy spektralnej o jednej linii widmowej  $\lambda_0$  będzie istniał otaczający ją przedział  $\Delta\lambda$ . Im dłuższy jest czas emisji elementarnej  $\Delta t$ , tym źródło jest bardziej zbliżone do monochromatycznego. W rzeczywistości źródła promieniują światło, dla którego emisja zachodzi między różnymi poziomami i w związku z tym istnieje szereg przedziałów  $\Delta\lambda$ , co powoduje pogorszenie się widoczności prążków. Następnie bowiem przyrost rzędu interferencji

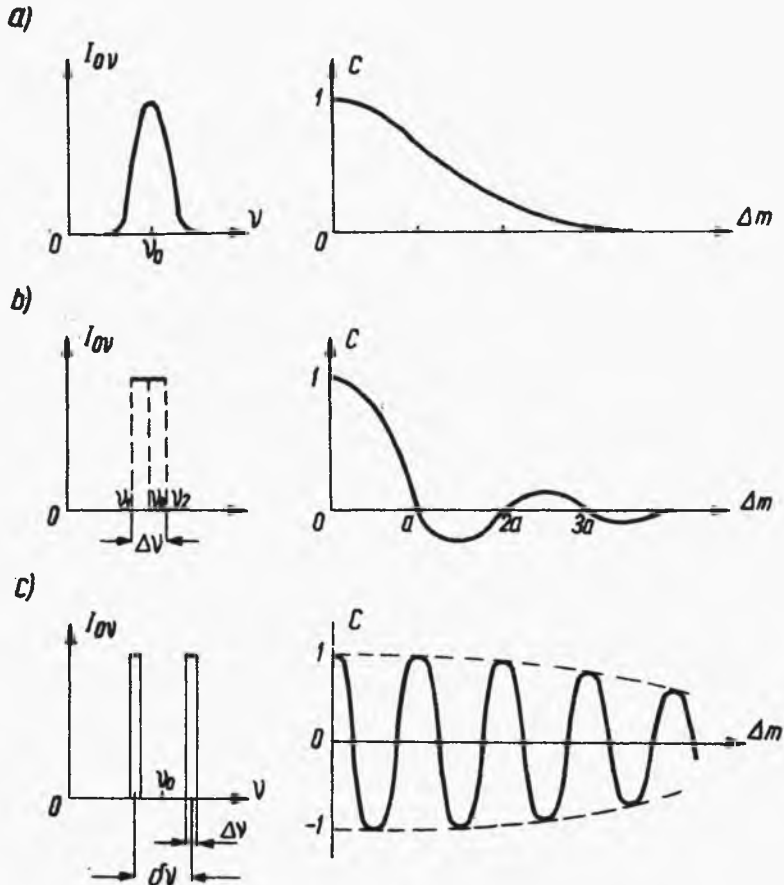


Rys.13.3. Przedział widmowy fali elementarnej

$$\Delta m = m_0 \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$$

Dla przykładu na rys.13.4 podano trzy źródła o różnej charakterystyce promieniowania.

Szczególnie nieprzyjemne w technice interferometrycznej jest źródło o charakterystyce przedstawionej na rys.13.4c.



Rys.13.4. Typy źródeł światła obciążone chromatyzmem: a) źródło quasi-monochromatyczne; b) rzeczywiste źródło; c) dublet sodowy

Obserwuje się dudnienie kontrastu wywołane dwoma przedziałami spektralnymi  $\Delta \nu$  o bliskich częstotliwościach ( $\delta \nu$  małe). Typowym źródłem o tej charakterystyce jest lampa sodowa, dla której  $\delta \nu = 6 \text{ \AA}$  (dublet sodowy). Ponieważ zmniejszenie się kon-



trastu z 1 do 0,9 jest dla oka niemal niezauważalne, to opierając się na tym założeniu można wyznaczyć warunek na dopuszczalny chromatyzm źródła

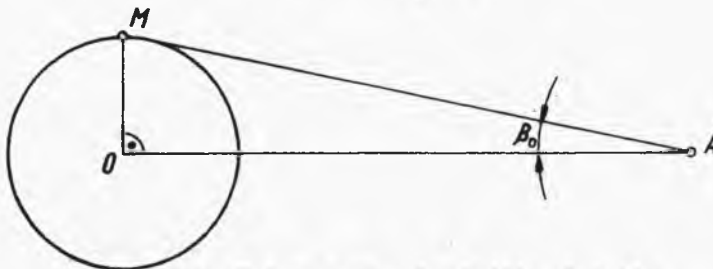
$$\Delta m = m_0 \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \leq \frac{1}{4}. \quad (6)$$

### 2.3. Wpływ wymiarów źródła światła na kontrast prążków

Ponieważ punktowe źródło światła (optymalny przypadek ze względu na kontrast prążków) emituje bardzo małą energię, to dla praktycznych zastosowań istnieje konieczność korzystania z rozciągniętych źródeł światła.

Rozciągnięte źródło można traktować jako niezależny zbiór punktów z uwagi na brak koherencji między ich promieniowaniem. Powstaje stąd, analogicznie do wpływu chromatyzmu źródła, cały szereg układów prążków pochodzących z różnych punktów źródła. Z sumy intensywności (dla poszczególnych układów prążków) zostaje wyznaczony rozkład intensywności (układ prążków) dla całego źródła. Związane są z tym dwa zagadnienia: orientacja prążków i wpływ wymiaru źródła. Wiadomo, że maksymalny kontrast uzyskuje się dla zerowego rzędu interferencji, czyli dla zerowej różnicy dróg optycznych. Stąd też orientację prążków wyznacza się wystawiając prostopadłe do powierzchni źródła, a w miejscu ich przecięcia istnieją najlepsze warunki interferencji. Jeżeli źródło światła widziane jest z rozpatrywanego punktu A pod kątem  $2\beta_0$  (rys.13.5), to ze wzoru na kontrast prążków (dla równoenergetycznego podziału wiązki) otrzymuje się

$$C = \text{sinc} \frac{\pi \beta_0^2 m_c}{2}.$$



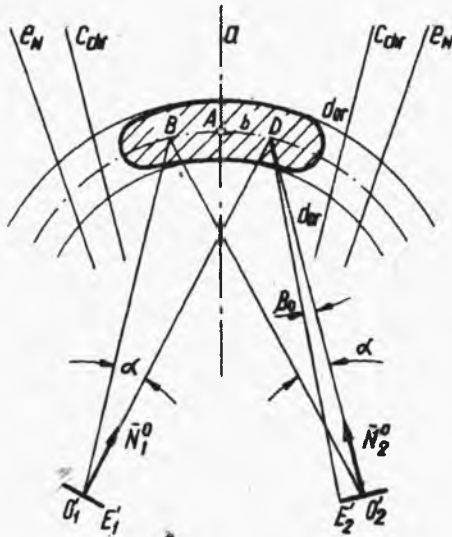
Rys.13.5. Wpływ wymiarów źródła światła

Wynika stąd wniosek, że ze wzrostem wymiarów źródła dla danego rzędu interferencji następuje spadek kontrastu prążków. Jeżeli, analogicznie jak poprzednio, dopuści się niezauważalny spadek kontrastu  $C \geq 0,9$ , to otrzymuje się warunek na wymiar źródła światła w postaci

$$\beta_0 \leq \frac{1}{\sqrt{2m_0}} \quad (7)$$

#### 2.4. Lokalizacja prążków

Niech rys.13.6 przedstawia dwa źródła wtórne  $E'_1$  i  $E'_2$  usytuowane w pewien sposób w przestrzeni. Jeżeli źródła są



Rys.13.6. Obszar lokalizacji prążków interferencyjnych

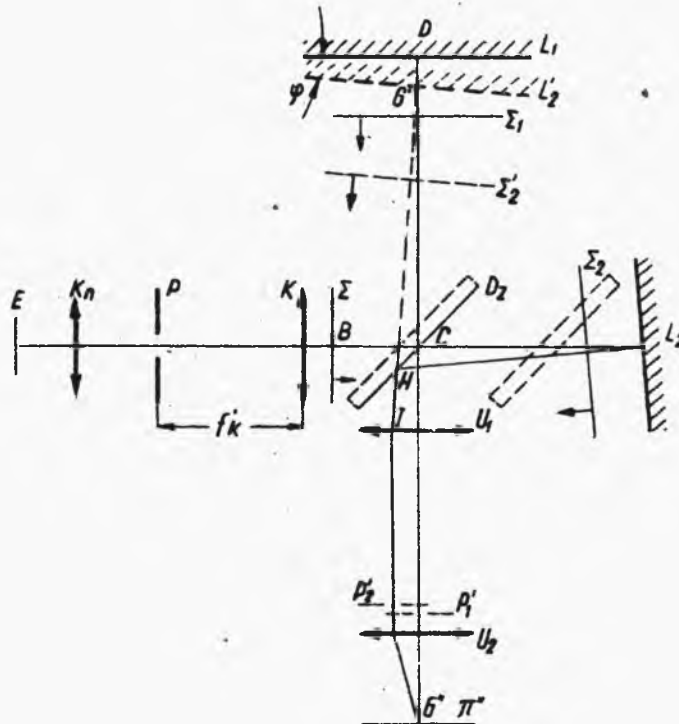
punktowe i monochromatyczne, to prążki powstają w dowolnym punkcie pola interferencyjnego. Takie prążki noszą nazwę niezlokalizowanych. Jeżeli źródła są punktowe, ale obarczone "chromatyzmem" wówczas istnieją granice widoczności prążków " $c_{chr}$ " wyznaczone przez odbiornik, przy czym najlepsze warunki obserwacji istnieją na płaszczyźnie symetrii odcinka  $O'_1 O'_2$  (zerowy rząd interferencji). Z kolei jeśli źródła monochromatyczne mają skończone wymiary ( $\beta_0$  - kątowy wymiar źródła), to najwyższy kontrast jest w punktach, które leżą na przecięciu promieni jednakowo zorientowanych do źródeł. Punkt D leży na przecięciu prostopadłych do płaszczyzny źródła, a zbiór "b" tworzy punkty o tych samych kątach z prostopadłymi do źródeł. Poza linią kontrast szybko spada, przy czym linie " $d_{or}$ " oznaczają granicę wynikającą z orientacji promieni, a linie " $e_w$ " granicę widoczności prążków związaną z wpływem wymiarów źródła. Między liniami  $c_{chr}$ ,  $d_{or}$ ,

to prążki powstają w dowolnym punkcie pola interferencyjnego. Takie prążki noszą nazwę niezlokalizowanych. Jeżeli źródła są punktowe, ale obarczone "chromatyzmem" wówczas istnieją granice widoczności prążków " $c_{chr}$ " wyznaczone przez odbiornik, przy czym najlepsze warunki obserwacji istnieją na płaszczyźnie symetrii odcinka  $O'_1 O'_2$  (zerowy rząd interferencji). Z kolei jeśli źródła monochromatyczne mają skończone wymiary ( $\beta_0$  - kątowy wymiar źródła), to najwyższy kontrast jest w

$e_w$  leży tzw. obszar lokalizacji prążków interferencyjnych, który może zmieniać swoje położenie dodatkowo ze wzajemnym usytuowaniem źródeł. Jeżeli rzeczywiste źródła są nachylone pod pewnym kątem, to obszar lokalizacji prążków leży w pewnej odległości i mówi się o tzw. prążkach jednakowej grubości. Jeżeli źródła są do siebie równoległe, to lokalizacja prążków jest w nieskończoności, przy czym nie odgrywa wtedy roli wymiar źródła światła ( $\beta_0 = 0$ ). Wtedy mówi się o prążkach równego nachylenia.

### 2.5. Interferometr Twymana

Schemat interferometru przedstawia rys. 13.7. Źródło światła monochromatycznego E poprzez kondensator  $K_n$  oświetla przysłonę P umieszczoną w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej kolimatora K. Równoległa wiązka wychodząca z kolimatora zo-



Rys.13.7. Schemat interferometru Twymana-Greena

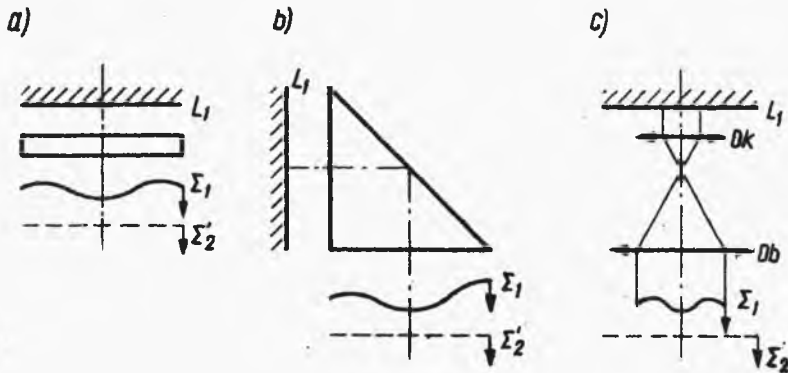
staje podzielona za pomocą płytki światłodzielącej  $D_z$  na dwie części. Jedną z nich po odbiciu od płytki światłodzielącej  $D_z$  i płaskiego zwierciadła  $L_1$  oraz powtórnym przejściu przez światłodzielącą płytkę  $D_z$  utworzy obraz źródła  $P'_1$  w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu  $U_1$ . Druga wiązka po przejściu przez światłodzielącą płytkę  $D_z$  i odbiciach od płaskiego zwierciadła  $L_2$  i światłodzielącej płytki  $D_z$  utworzy obraz źródła  $P'_2$  także w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu  $U_1$ . Powstałe w ten sposób wtórne źródła światła utworzą pewien układ prążków o lokalizacji zależnej od wzajemnego położenia tych źródeł. Na wzajemne ułożenie się źródeł głównie wpływa położenie zwierciadeł  $L_1$  i  $L_2$ . Jeżeli założy się, że zwierciadło  $L_1$  jest prostopadłe do osi optycznej zaś  $L_2$  nachylone jest pod niewielkim kątem wtedy wtórne źródła światła  $P'_1$  i  $P'_2$  nie pokrywają się całkowicie tworząc prążkowe pole interferencyjne, które można obserwować przez układ obiektywów  $U_1$  i  $U_2$ , przy czym ten ostatni może być zastąpiony okiem. Jeżeli oba zwierciadła  $L_1$  i  $L_2$  są prostopadłe do osi optycznych obu gałęzi interferometru wtedy wtórne źródła  $P'_1$  i  $P'_2$  są pokryte i widać jednorodne pole interferencyjne (kolejny prążek wypełnia całe pole widzenia - przy punktowym źródle światła). Przy użyciu układu optycznego  $U_1$  i  $U_2$  w postaci lunety można na tle źródła obserwować kołowy układ prążków jednakowego nachylenia. Jeżeli drogi optyczne obu gałęzi będą jednakowe, wtedy rząd interferencji  $m = 0$  i można obserwować prążki w świetle białym, przy czym w celu skompensowania zmiany rzędu interferencji wraz ze zmianą długości fali (szklana płytka światłodzieląca) ustawia się dodatkową płytkę z tego samego szkła i o tej samej grubości co płytka światłodzieląca w odpowiedniej gałęzi interferometru.

## 2.6. Badanie jakości układów optycznych przy pomocy interferometru Twyman

### 2.6.1. Badanie elementów optycznych płaskich i układów bezogniskowych

Oceny jakości lub pomiaru aberracji falowych dokonuje się obserwując zniekształcenie fali płaskiej, wychodzącej z koli-

matora interferometru po przejściu przez badany element lub układ. Niech fala płaska  $\Sigma$  (rys.13.7) po odbiciu od zwierciadeł  $L_1$  i  $L'_2$  utworzy dwie fale  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$ . Odległość mierzona w kierunku prostopadłym do nich będzie równa w przybliżeniu różnicy dróg optycznych między interferującymi promieniami. Jeżeli w jednej gałęzi interferometru umieści się badany element (rys.13.8), to fala płaska po przejściu przez niego dwukrotnie w ogólnym przypadku nie będzie płaska. Jej kształt



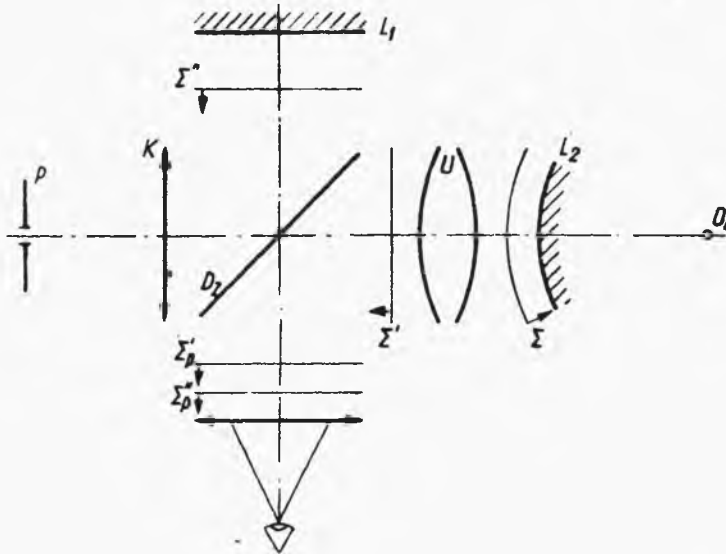
Rys.13.8. Rodzaje układów optycznych badanych na interferometrze Twymana z płaskimi zwierciadłami

zależny będzie od błędów wykonania, niejednorodności ośrodka (rys.13.8a i 13.8b) lub dodatkowo aberracji falowych układu (rys.13.8c). Błędy płaskości można wyznaczyć na podstawie kształtu prążków i ich liczby w polu widzenia po dokonaniu kompensacji polegającej na zniwelowaniu wpływu klina płytki lub pryzmatu i zwierciadeł interferometru.

### 2.6.2. Badanie ogniskujących układów optycznych

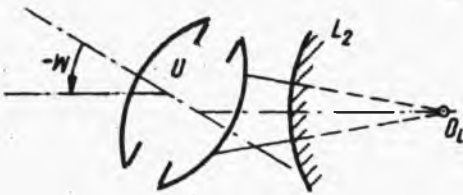
W tym przypadku w miejsce zwierciadła płaskiego należy wstawić zwierciadło sferyczne i pokryć obraz przysłony P z jego środkiem krzywizny (rys.13.9). Jeżeli układ U jest bezaberracyjny wówczas fala  $\Sigma$  po przejściu przez badany układ będzie sferyczną i jeżeli jej środek pokryje się ze środkiem zwierciadła, wówczas po powtórny przejściu (po odbiciu od zwierciadła sferycznego) układu będzie znowu falą płaską. W polu widzenia widać będzie w ogólnym przypadku liniowe prążki in-

terferencyjne zmieniające swe zagęszczenie ze zmianą kąтового położenia zwierciadła płaskiego  $L_1$ . Zwierciadło  $L_1$  można



Rys.13.9. Interferometr Twymana przystosowany do badania układów ogniskujących

ustawić tak, aby pole interferencyjne było jednorodne. Jeżeli układ jest obciążony aberracjami wówczas nie można znaleźć takiego położenia zwierciadła  $L_2$ , dla którego pole byłoby jednorodne. Miarą aberracji falowej jest rozmieszczenie i liczba prążków interferencyjnych. Kołowość prążków (przy zminimalizowaniu ich liczby) wskazuje na aberrację sferyczną układu, eliptyczność - na wady montażu lub toryczność powierzchni. W celu obserwacji punktów leżących poza osią optyczną obraca się badany układ o pewien kąt pola, przy czym należy zapewnić poprzeczny przesuw zwierciadła  $L_2$  dla pokrycia obrazu przysłony P ze środkiem jego krzywizny (rys.13.10). Stosując różne źródła światła (wymiana lamp spektralnych) można wyznaczyć aberrację chromatyczną układów.



Rys.13.10. Badanie układów ogniskujących dla punktów pozaosiowych

W celu obserwacji punktów leżących poza osią optyczną obraca się badany układ o pewien kąt pola, przy czym należy zapewnić poprzeczny przesuw zwierciadła  $L_2$  dla pokrycia obrazu przysłony P ze środkiem jego krzywizny (rys.13.10). Stosując różne źródła światła (wymiana lamp spektralnych) można wyznaczyć aberrację chromatyczną układów.

### 3. OPIS STANOWISKA

Interferometr przeznaczony jest do badania układów dioptryjnych i afokalnych. Układ interferometru zmontowano na płycie traserskiej o wymiarach 780 x 1000 mm, z wyjątkiem układu kolimatora, który umieszczony jest na wałku przykręconym do płyty. Obserwacja prążków odbywa się pod kątem  $60^{\circ}$  do poziomu dzięki zastosowaniu dodatkowego zwierciadła łamiącego oś optyczną. Okular do regulacji i przysłona będąca źrenicą wyjściową przyrządu oraz przysłona kolimatora ( $\varnothing 0,7 - 6$ ) mm ograniczające wymiary źródła światła umieszczone są w uchwytych rewolwerowych. Przesunięcie ruchomego zwierciadła interferometru realizuje się przy pomocy cięgien.

Układy interferometru mają zapewnione następujące ruchy regulacyjne:

- 1) płytki światłodzielącej - kątowe w płaszczyźnie pionowej i poziomej;
- 2) zwierciadła interferometru:
  - a) kątowe w płaszczyźnie poziomej i pionowej,
  - b) liniowe - przesuw wzdłuż osi wiązki odniesienia do 300 mm;
- 3) zwierciadła sferycznego do badania układów dioptryjnych:
  - a) kątowe - w płaszczyźnie pionowej,
  - b) liniowe - w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych w płaszczyźnie poziomej; zakres pomiarowy 0-25 mm z niedokładnością 0,01 mm;
- 4) układu badanego:
  - a) kątowe - w płaszczyźnie poziomej; odczyt co  $1^{\circ}$ ,
  - b) liniowe - przesuw wzdłuż osi obiektywu  $\pm 10$  mm.

Regulacja interferometru opisanego w p.3

1. Ustawienie oświetlenia przysłony kolimatora. W tym celu należy tak ustawić wzajemne położenie lampy spektralnej i kondensora, aby obraz powierzchni świecącej lampy pokrywał największy z otworów przedmiotowej przysłony rewolwerowej.

2. Ustawienie kolimatora na nieskończoność (zero dioptrii) przeprowadza się za pomocą ruchomego obiektywu. Prawidłowe położenie obiektywu uzyskuje się po zaskoczeniu zatrzasku dla odpowiedniej linii spektralnej.

3. Prostopadłe ustawienie zwierciadła leżącego naprzeciw kolimatora. W tym celu w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej kolimatora (przysłona rewolwerowa) obserwuje się autokolimacyjny obraz przysłony pochodzący od regulowanego zwierciadła. Ustawienie zwierciadła uważa się za prawidłowe kiedy przysłona i jej autokolimacyjny obraz pokrywają się.

4. Wzajemnie prostopadłe ustawienie osi optycznych gałęzi interferometru. W tym celu zamiast zwierciadła półprzepuszczalnego ustawia się na płycie interferometru pryzmat pentagonalny i obserwując świecący obraz przysłony przez okular ustawia się go w środku pola widzenia (poprzecznym ruchem okulara).

5. Prawidłowe ustawienie zwierciadła półprzepuszczalnego. W tym celu należy przez okular obserwować obraz przysłony po odbiciu od zwierciadeł. Obraz przysłony powinien zajmować położenie w środku pola widzenia. W czasie tego zabiegu ruchome zwierciadło powinno być zasłonięte.

6. Po odsłonięciu ruchomego zwierciadła, obracając nim, sprowadza się do pokrycia obrazu przysłony, pochodzące z obu gałęzi interferometru.

7. Wymienić okular na przysłonę. W polu widzenia powinny być widoczne prążki interferencyjne, przy czym ruchome zwierciadło powinno zajmować w przybliżeniu środkowe położenie na prowadnicach (zerowy rząd interferencji).

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Przeprowadzić regulację interferometru Twyman przy sodowym źródle światła.
2. Wyznaczyć obszar spójności dla sodowego źródła przy różnych wymiarach źródła światła.
3. Zmienić lampę sodową na kadmową z filtrem RG2 firmy Schott i wyznaczyć obszar spójności dla różnych wymiarów źródła.
4. Użyć światła laserowego i powtórzyć czynności związane z wyznaczeniem obszaru spójności.
5. Zaobserwować i zinterpretować jakość wskazanego do badań elementu (układu) optycznego.
6. Wykonać wykresy i podać wnioski.



## 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. § 3.2 i 7.1.2. WNT. Warszawa 1970.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Co wpływa na kontrast prążków interferencyjnych?

Rodzaje prążków interferencyjnych i ich lokalizacja.

Dlaczego przy pracy ze światłem białym konieczne jest wstawienie płytki kompensacyjnej?

Kiedy powstaną prążki zlokalizowane w nieskończoności i jaki jest ich kształt?

## Ćwiczenie 14

### POMIARY W ŚWIETLE SPOLARYZOWANYM

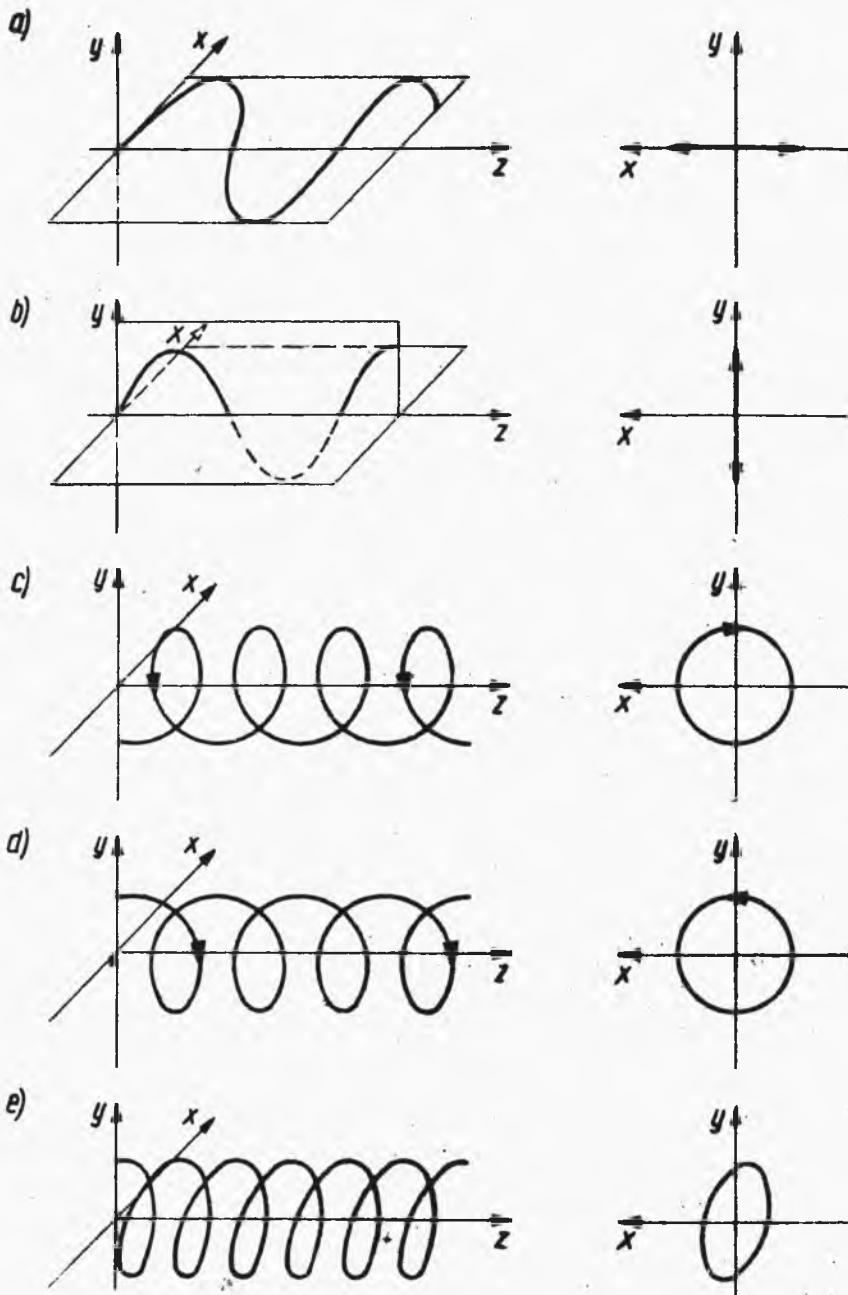
#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych wiadomości z kresu polaryzacji światła.

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

##### 2.1. Polaryzacja światła

W przeciwieństwie do światła naturalnego tj. światła otrzymanego z klasycznych źródeł, które emitują fale elektromagnety-



Rys.14.1. Niektóre stany polaryzacji światła: a) liniowa pozioma; b) liniowa pionowa; c) kołowa prawoskrętna; d) kołowa lewoskrętna; e) eliptyczna

czne (w zakresie widzialnym) w sposób całkowicie dowolny, nieuporządkowany co do czasu kierunku i zwrotu emisji - światło spolaryzowane cechuje uporządkowanie emisji w określony sposób.

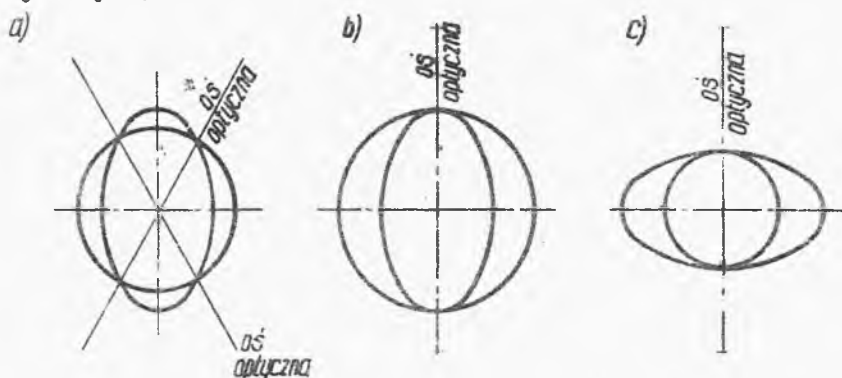
Niech na rys.14.1a gruba ciągła linia przedstawia falę elektromagnetyczną, której drgania przebiegają w płaszczyźnie poziomej. O takim świetle mówi się, że jest spolaryzowane liniowo i poziomo. Oznacza to, że taka wiązka światła cechuje się uporządkowaniem drgań tylko w jednej (poziomej) płaszczyźnie. Stanów polaryzacji światła jest wiele. Niektóre z nich schematycznie przedstawiono na rys.14.1a-e. Matematycznie można wykazać, że najbardziej ogólnym przypadkiem światła spolaryzowanego jest postać eliptyczna. Pozostałe przypadki stanowią szczególne jego postacie. Rozróżnia się ponadto skrętność polaryzacji. Jeżeli obserwator patrzy w kierunku rozchodzenia się fali świetlnej i śledzi na krzywej (rys.14.1) hipotetycznie poruszający się punkt (koniec rzutu wektora optycznego) zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara - wtedy mówi się, że polaryzacja jest prawostronna. Jeżeli koniec rzutu wektora optycznego porusza się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara - wtedy zachodzi polaryzacja lewostronna. Całkowita polaryzacja światła występuje rzadko i zwykle istnieją pośrednie stopnie polaryzacji - mówi się wtedy o świetle częściowo spolaryzowanym. Jeżeli zmiesza się dwa strumienie świetlne  $\phi_p$  lumenów światła spolaryzowanego z  $\phi_n$  lumenami światła niespolaryzowanego wtedy stopień polaryzacji wiązki światła wynosi

$$\frac{\phi_p}{\phi_p + \phi_n}.$$

## 2.2. Ośrodki dwójłonne

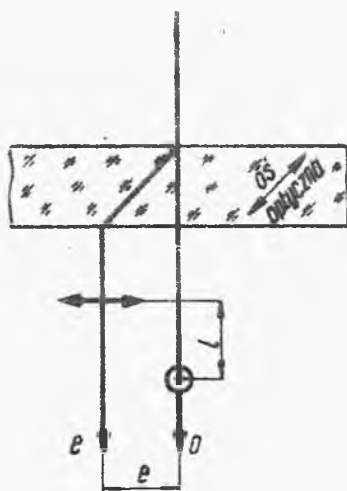
Światło przechodząc przez ośrodki dwójłonne dzieli się na dwie wiązki. Jedna z nich podlega zwykłym prawom załamania optyki ośrodków izotropowych i nosi miano zwyczajnej. Zaś druga, dla której prawo załamania (ściślej współczynnik załamania) zależy od wybranego kierunku - nosi nazwę nadzwyczajnej. Dla wiązki zwyczajnej wektor współczynnika załamania jest niezależny od wybranego kierunku i reprezentuje go kula, zaś wektor

współczynnika załamania wiązki nadzwyczajnej (co można wykazać matematycznie) reprezentuje elipsoida obrotowa. Na rys.14.2 przedstawiono trzy możliwości wzajemnego położenia elipsy i okręgu (osiowy przekrój) współczynników załamania ośrodków dwójłomnych.



Rys.14.2. Rodzaje ośrodków (kryształów) dwójłomnych: a) dwuosiowy; b) jednoosiowy ujemny; c) jednoosiowy dodatni

Rys.14.2a przedstawia tzw. dwójłomny ośrodek dwuosiowy, zaś rys.14.2b i 14.2c ośrodki jednoosiowe, przy czym pierwszy ośrodek przyjęto nazywać ujemnym zaś drugi dodatnim. Wzdłuż kierunków osi optycznych współczynniki załamania są jednakowe dla



Rys.14.3. Bieg promienia przez płytę dwójłomną

promieni zwyczajnego i nadzwyczajnego i światło rozchodzi się tak jak w ośrodkach izotropowych. Jeżeli z ośrodka dwójłomnego (a są to najczęściej kryształy) wytnie się płytkę płasko-równoległą o kierunku osi optycznej nierównoległą do jej powierzchni i skieruje się na nią prostopadle promień świetlny, to zgodnie z poprzednimi rozważaniami podzieli się on na dwa promienie: zwyczajny - będący przedłużeniem padającego i równoległy do niego przesunięty promień nadzwyczajny. Ponieważ ten ostatni przebywa dłuższą drogę w kryształach od zwyczajnego, występuje także między

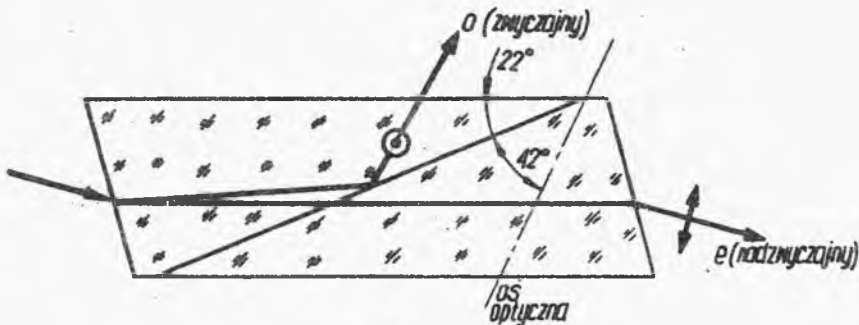
nimi przesunięcie fazowe. Z analizy równań Maxwella wynika ponadto jeszcze jedna bardzo ważna właściwość tych promieni. Otóż są one wzajemnie prostopadłe spolaryzowane liniowo. Wielkość rozsunięcia "e" i przesunięcia fazowego l (rys.14.3) zależy od kąta położenia osi optycznej kryształu względem powierzchni płytki oraz różnicy współczynników załamania ( $n_e - n_o$ ) i grubości płytki d. Dla promienia nieprostopadłego do płaszczyzn płytki wartości "l" i "e" będą dodatkowo funkcją kąta padania. W szczególnym przypadku promienia prostopadłego do płaszczyzn płytki tak wyciętej z kryształu, że oś optyczna jest prostopadła do promienia, wtedy mamy:

$$e = 0,$$
$$l = (n_e - n_o)d .$$

Takie płytki przyjęto nazywać fazowymi.

### 2.3. Polaryzatory

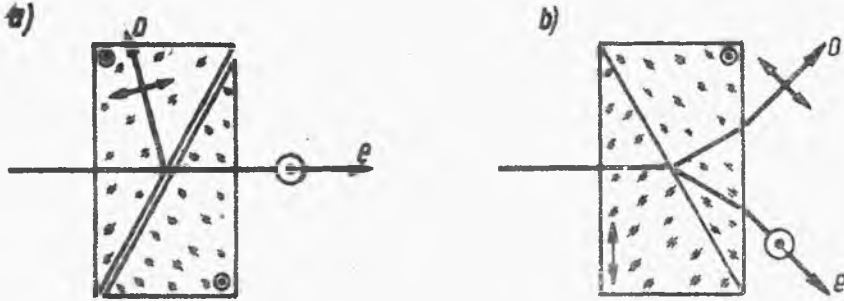
Fakt rozdawiania wiązki światła naturalnego na dwie wiązki spolaryzowane liniowo wykorzystuje się do urządzeń polaryzujących światło - zwanych polaryzatorami. Takim klasycznym polaryzatorem jest pryzmat Nikoła (rys.14.4). Zbudowany jest on



Rys.14.4. Polaryzator Nicola

z dwu sklejonych ze sobą kawałków szpatu islandzkiego, co przy założonych kątach i odpowiednio dobranym współczynniku załamania kleju powoduje całkowite wewnętrzne odbicie wiązki zwyczajnej na granicy sklejenia. Zatem po przejściu przez pryzmat Ni-

kola światło staje się spolaryzowane liniowo. Z bardziej znanych polaryzatorów wykorzystujących zjawisko dwójłomności kryształów można wymienić polaryzatory Glana-Thompsona i Wollastona. Pierwszy z nich (rys.14.5a) składa się z dwóch niesklejonych kawałków kalcytu w kształcie pryzmatów o kącie łamiącym



Rys.14.5. Polaryzatory: a) Glana-Thompsona; b) Wollastona

$38,5^\circ$ . Oś optyczna jest prostopadła do kierunku rozchodzenia się światła. Wartość kąta łamiącego jest tak dobrana, że wiązka zwyczajna zostaje całkowicie odbita. "Przepuszczona" wiązka jest spolaryzowana praktycznie w 100%. Drugi z nich (rys. 14.5b) polaryzator Wollastona "przepuszcza" obie załamane wiązki z tym, że rozdziela je symetrycznie na tyle, aby można z nich korzystać oddzielnie. Składa się z dwóch sklejonych pryzmatów o jednakowym kącie łamiącym, wyciętych z kalcytu o osiach optycznych prostopadłych. Zmianą kąta łamiącego pryzmatów można uzyskać dowolne rozdwojenie wiązek.

Innymi typami polaryzatorów są polaryzatory odbiciowe i absorpcyjne. Pierwsze z nich wykorzystują zjawisko odbicia światła od powierzchni dielektryka. Najprostszym polaryzatorem odbiciowym jest zwykła szklana płytka płasko-równoległa nachylona pod kątem do kierunku padania wiązki światła. Wtedy zarówno wiązka odbita jak i załamana są częściowo spolaryzowane z tym, że wiązka odbita wykazuje większy stopień polaryzacji. Wraz ze zmianą kąta nachylenia zmienia się stopień polaryzacji wiązek i staje się zerowy przy kącie padania  $0^\circ$ , a 100% (dla wiązki odbitej) przy tak zwanym kącie Brewstera ( $\text{tg } i = n$ ).

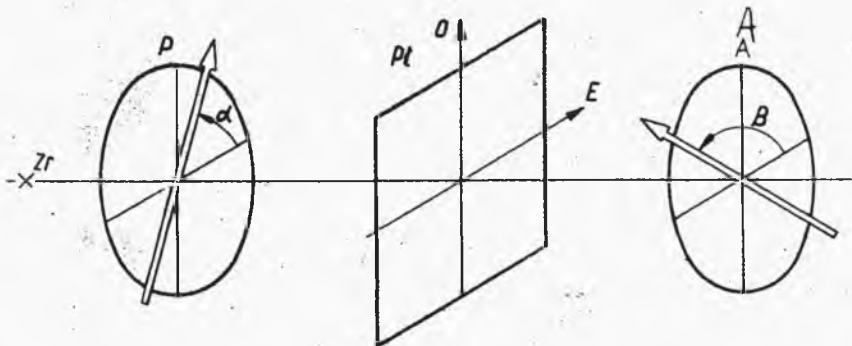
Najbardziej rozpowszechnione w praktyce laboratoryjnej są polaryzatory absorpcyjne zwane polaroidami. Pomysł tego rodza-

ju polaryzatorów podany przez Landa (wówczas jeszcze studenta) wywołał wielką sensację. Otóż dużą przezroczystą błonę z materiału plastycznego ogrzewa się i rozciąga. Podczas procesu rozciągania cząstki polimeru rozmieszczone początkowo chaotycznie ukierunkowują się wzdłuż siły rozciągającej. Następnie błonę zanurza się w roztworze jodu, który przenika do równoległe ułożonych cząstek polimeru. Dzięki dobremu przewodnictwu atomów jodu polaryzatory te silnie pochłaniają drgania elektryczne o kierunku do nich prostopadłym zaś drgania o kierunku równoległym zostają przepuszczane praktycznie bez strat. Stąd też teoretyczna przepuszczalność tych polaryzatorów wynosi 50% zaś stopień polaryzacji praktycznie 100%. Z uwagi na możliwość uszkodzenia cienkiej warstwy polimeru stosuje się ochraniające płytki szklane.

#### 2.4. Płytki fazowe

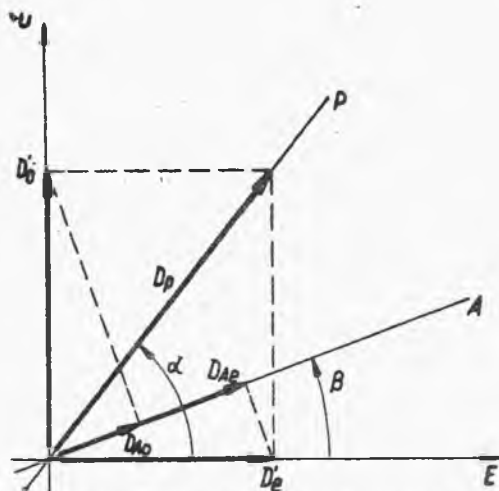
Jak już wiadomo, dwójkomna płasko-równoległa o osi optycznej prostopadłej do padającej wiązki światła wywołuje różnicę fazy między wiązkami zwyczajną i nadzwyczajną, natomiast nie powoduje rozdzielenia tych wiązek (płytki fazowe). Płytki fazowe pozwalają przekształcać stany polaryzacji i używa się ich najczęściej do wytwarzania rzadko spotykanych stanów polaryzacji.

Rozpatrzmy teraz metodę wyznaczania stanu polaryzacji za płytką fazową. W tym celu zestawmy układ jak na rys.14.6.



Rys.14.6. Schemat do analizy stanów polaryzacji

Źródło światła naturalnego  $Z_r$  oświetla polaryzator liniowy  $P$ , który polaryzuje wiązkę w znanym kierunku. Za polaryzatorem znajduje się płytka fazowa o znanym kierunku drgań fali zwy-



Rys.14.7. Wykres do wyznaczania stanów polaryzacji

czajnej  $O$  i nadzwyczajnej  $E$ . Do analizy stanu polaryzacji za płytką służy element polaryzacyjny nazywany od swej funkcji - analizatorem  $A$ . Polaryzator  $A$  polaryzuje wiązki światła w kierunku  $P$  (rys.14.7) nachylonym pod kątem  $\alpha$  do kierunku drgań fali nadzwyczajnej płytki fazowej, zaś  $D_p$  oznacza moduł wektora indukcji charakteryzujący amplitudę wiązki spolaryzowanej. W płytce fazowej zo-

stanie on rozłożony na dwa wektory składowe zwyczajny  $D'_o$  i nadzwyczajny  $D'_e$ , które wynoszą:

$$\begin{aligned} D'_o &= D_p \sin \alpha, \\ D'_e &= D_p \cos \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Przez analizator zaś przejdą tylko składowe zwyczajne  $D_{Ao}$  i nadzwyczajne  $D_{Ae}$ , które wynoszą:

$$\begin{aligned} D_{Ao} &= D'_o \sin \alpha, \\ D_{Ae} &= D'_e \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Fala nadzwyczajna za analizatorem ma postać

$$D'_{Ae} = D_{Ae} \exp(-i \omega t) \exp(i\delta),$$

zaś zwyczajna

$$D'_{Ao} = D_{Ao} \exp(-i \omega t).$$



Czynnik  $\exp(i\delta)$  uwzględnia różnicę faz, wywołaną w płytce fazowej. Obie fale interferują ze sobą dając wrażenie świetlne dla oka obserwatora, o którym decyduje intensywność  $I_A$

$$I_A = I_p \left[ \cos^2(\alpha + \beta) + \sin 2\alpha \sin \beta \cos^2 \frac{\delta}{2} \right], \quad (3)$$

gdzie:  $I_A$  - intensywność za analizatorem,  
 $I_p$  - intensywność za polaryzatorem,  
 $\alpha$  - kąt analizatora (rys.14.6),  
 $\beta$  - kąt polaryzatora (rys.14.6),  
 $\delta$  - przesunięcie fazowe.

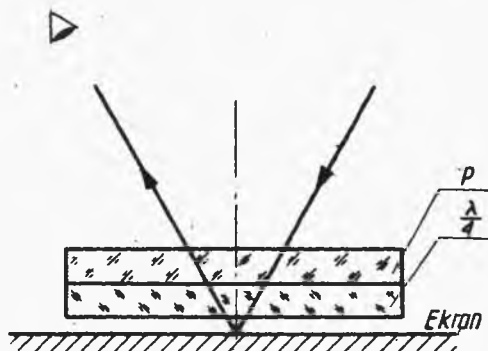
Najbardziej znanymi płytkami fazowymi są ćwierć- i półfalówka. Ćwierćfalówka to, zgodnie z nazwą, płytka o grubości optycznej  $\frac{\lambda}{4}$  oraz przesunięciu fazowym  $\frac{\pi}{2}$

$$l = (n_e - n_o) d = \frac{\lambda}{4}. \quad (4)$$

Jeżeli jeden z kierunków głównych ćwierćfalówki pokrywa się z kierunkiem drgań polaryzatora, to jak wykazuje analiza wzoru (3) światło jest spolaryzowane liniowo o kierunku zgodnym z polaryzatorem. Jeżeli kierunek drgań polaryzatora jest nachylony pod kątem  $\frac{\pi}{4}$  do kierunku głównego ćwierćfalówki, to intensywność za analizatorem jest niezależna od jego położenia i wynosi  $I_A = 0,5I_p$ , a uzyskany stan polaryzacji nosi nazwę polaryzacji kołowej.

Sklejając polaroid z odpowiednio zorientowaną ćwierćfalówką można, utworzyć polaryzator kołowy. Należy tylko ustawić go właściwą stroną do kierunku padającej wiązki. Odwrotne ustawienie takiego polaryzatora daje polaryzację liniową. Polaryzatory kołowe wykorzystuje się jako warstwy wygaszające odbłaski.

Niech warstwa polaroid P i ćwierćfalówka -  $\frac{\lambda}{4}$  ochrania przed odbłaskami ekran (np. ekran radaru) (rys.14.8). Padające światło po przejściu przez polaryzator kołowy jest spolaryzowane



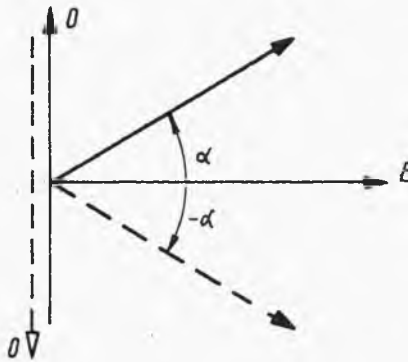
Rys.14.8. Polaryzator kołowy

kołowo np. prawoskrętnie. Po odbiciu od ekranu światło zmienia skrętność polaryzacji (lustrzane odbicie) na lewoskrętną, którą wygasza prawoskrętny polaryzator kołowy.

Półfalówka to płytką fazowa o grubości optycznej  $\frac{\lambda}{2}$  i przesunięciu fazowym  $\pi$

$$l = (n_e - n_o) d = \frac{\lambda}{2}.$$

Zasada jej działania jest następująca. Wiązka światła spolaryzowanego liniowo pada na półfalówkę. W tej płytce faza



jednej ze składowych różni się od drugiej o  $\pi$ , następuje zatem obrócenie kierunku drgań wiązki spolaryzowanej o  $2\alpha$  (rys.14.9). Czyli półfalówka służy do otrzymywania wiązki spolaryzowanej liniowo (analiza wzoru (3)) pod dowolnym kątem (przez obrót półfalówki). Ta cecha jest wykorzystywana do obrotu płaszczyzny polaryzacji światła laserowego. Płyt-

Rys.14.9. Zasada obrotu płaszczyzny polaryzacji przez półfalówkę

ki fazowe jak wiadomo, służą do otrzymywania określonych stanów polaryzacji. Ważne zastosowanie

znajduje również proces odwrotny - identyfikacji nieznaných stanów polaryzacji. Należy znaleźć płytkę fazową, która ustawiona pod pewnym kątem, przekształci ją w wiązkę spolaryzowaną liniowo. Tymi zagadnieniami zajmuje się elipsometria pozwalająca na podstawie zmiany stanu polaryzacji światła odbitego od próbki sądzić o właściwościach fizyko-chemicznych danej próbki (np. pomiar grubości cienkich warstw rzędu  $\text{\AA}$ ).

## 2.5. Dwójłomność wymuszona

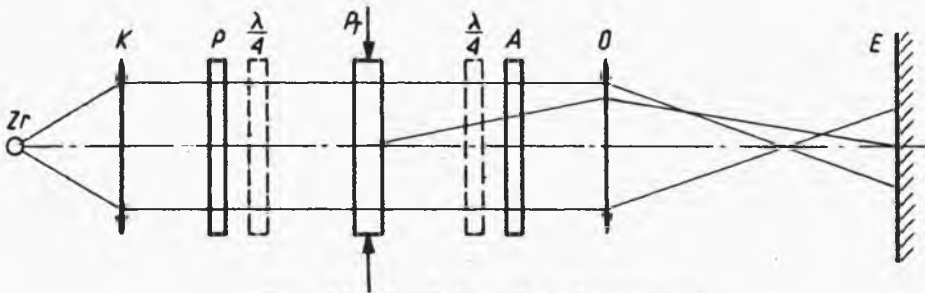
Dotychczas pod pojęciem dwójłomności rozumieliśmy dwójłomność naturalną (kryształ). Okazuje się, że ciała izotropowe pod wpływem naprężeń wewnętrznych lub zewnętrznych stają się dwójłomnymi o przypadkowych położeniach osi optycznych i dwójłomności  $(n_e - n_o)$

$$n_e - n_o = c(\sigma_1 - \sigma_2),$$

gdzie:  $\sigma_1, \sigma_2$  - naprężenia główne,

$c$  - stała elastoptyczna materiału.

Jeżeli taką próbkę umieści się pomiędzy polaryzatorem i analizatorem zaobserwuje się dwa rodzaje linii: izokliny i izochromy. Pierwsze dają informacje o tym, gdzie znajdują się w płytce punkty, dla których kierunek naprężeń głównych pokrywa się z płaszczyzną drgań polaryzatora lub analizatora. Obracając polaryzator i analizator o ten sam kąt można wyznaczyć trajektorie, dla których kierunek naprężeń głównych wyznaczony jest przez nowe położenie płaszczyzn drgań polaryzatora i analizatora. Drugie pozwalają wyznaczyć miejsca w płytce, dla których stała jest różnica drgań naprężeń głównych. Tymi zagadnieniami zajmuje się elastoptyka. Podstawowym przyrządem elastoptycznym jest polaryskop (rys.14.10).



Rys.14.10. Schemat polaryskopu

Obciążoną próbką  $Pr$  wykonaną z materiału o dużej stałej elastoptycznej umieszcza się w polu widzenia polaryskopu. Źródło światła oświetla wiązką promieni równoległych układ polaryzator  $P$ , próbkę  $Pr$  i analizator  $A$  poprzez kondensator  $K$ . Na ekranie  $E$ , który znajduje się w płaszczyźnie obrazowej obiektywu  $O$  można obserwować linie charakteryzujące stany obciążenia. Eliminację izoklin uzyskuje się przez dodanie dwóch ćwierćfalówek dających polaryzację kołową.

## 2.6. Skreślenie płaszczyzny polaryzacji

Francuski uczyony Arago stwierdził, że kierunek drgań światła spolaryzowanego liniowo ulega zmianie przy przejściu przez

niektóre ośrodki. Takim klasycznym ośrodkiem jest wodny roztwór cukru. Kąt skręcenia kierunku drgań jest proporcjonalny do stężenia cukru w roztworze, do odległości jaką światło przebyło w roztworze i do współczynnika zdolności skręcającej roztworu. Fakt ten znalazł zastosowanie w pomiarach stężenia cukru (polarymetry).

O wiele ciekawsze zjawisko odkrył Faraday. Zauważył on, że niektóre substancje nie wykazujące w zwykłych warunkach własności skręcenia płaszczyzny polaryzacji wykazują ją po umieszczeniu ich w silnym polu magnetycznym. Kąt skręcenia jest największy gdy kierunek pola pokrywa się z kierunkiem wiązki światła, a jest równy zeru, gdy kierunki te są prostopadłe. Stosując zatem zmienne pole magnetyczne można uzyskać zmieniający się w pewnych granicach kąt skręcenia. Zjawisko to ma zastosowanie w pomiarach automatycznych. Właściwością wyróżniającą wymuszone skręcenie płaszczyzny polaryzacji od naturalnego jest to, że gdy światło wraca tą samą drogą (w obszarze pola magnetycznego, to skręcenie na tych odcinkach nie kompensują się. Jest to szczególnie przydatne w budowie bardzo dokładnych przyrządów pomiarowych wyznaczających minimalne stężenie gazów itp. (np. zanieczyszczenia powietrza). W celu zwielokrotnienia kąta skręcenia stosuje się zwykle wielokrotne odbicia od zwierciadeł wklęsłych (modulator Faradaya).

### 3. OPIS STANOWISKA

#### Polaryskop

Schemat optyczny polaryskopu przedstawiono na rys.14.10. Punktowa lampa rtęciowa poprzez zielony filtr i kondensator oświetla układ polaryzatora, ćwierćfalówek i analizatora. Badaną próbkę umieszcza się pomiędzy polaryzatorem i analizatorem (w specjalnym uchwycie). Polaryzator i analizator mają niezależne ruchy obrotowe dookoła osi optycznej. Odczyt położenia z niedokładnością 30'. Ćwierćfalówki stanowią wymienne elementy zakładane na polaryzator i analizator z niezależnym ruchem w stosunku do nich. Wyróżnione są (zatrzaskami) położenia co 45° w stosunku polaryzatora i analizatora.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zaobserwować działanie polaryzatora i analizatora oraz przy pomocy luksomierza wyznaczyć stopień polaryzacji polaroidu.
2. Zestawić polaryzator kołowy i wyznaczyć eliptyczność polaryzacji (z filtrem i bez filtru).
3. Zbadać rodzaje polaryzacji przy różnych kątowych położeniach ćwierćfalówki względem polaryzatora,
4. Zbadać rodzaj i położenie katowe płaszczyzn polaryzacji przy różnych kątowych położeniach półfalówki względem polaryzatora.
5. Zestawić układy do obserwacji izoklin i izochrom.
6. W sprawozdaniu podać wnioski z przeprowadzonych badań.

#### 5. LITERATURA

- Shurcliff W.A.: Światło spolaryzowane. WNT. Warszawa 1970.  
Wood E.: Kryształy i światło. PWN. Warszawa 1968.  
Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.  
Pindera J.: Zarys elastooptyki. PWT. Warszawa 1953.

#### 6. PYTANIA KONTROLNE

- Co to jest światło spolaryzowane?  
Sposoby otrzymywania światła spolaryzowanego.  
Rodzaje polaryzatorów.  
Po co używa się filtru w układzie polaryskopu z użyciem ćwierć- i półfalówki?  
Co to są płytki fazowe?  
Objasnić bieg promienia przez dwójkomną płytkę płasko-równoległą.  
Od czego zależy błąd pomiaru naprężeń metodą elastooptyczną?

## IV. ĆWICZENIA Z ZAKRESU BADAŃ PRZYRZĄDÓW OPTYCZNYCH

### Ćwiczenie 15

#### BADANIE CHARAKTERYSTYCZNYCH WIELKOŚCI MIKROSKOPU BIOLOGICZNEGO

##### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową mikroskopu biologicznego, podstawowymi zespołami i zasadniczymi zagadnieniami regulacji układu oświetlającego. Dotyczy ono również pomiaru podstawowych wielkości charakterystycznych mikroskopu oraz zapoznaje z zasadami użytkowania mikroskopów.

##### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

###### 2.1. Budowa mikroskopu biologicznego

Do podstawowych zespołów mechanicznych lub mechaniczno-optycznych mikroskopu należy zaliczyć:

- a) podstawę ze statywem,
- b) stolik przedmiotowy,
- c) tubus z nasadką okularową,
- d) mechanizmy ruchu,
- e) układ oświetlający.

Podstawa ze statywem jest elementem nośnym całego układu mikroskopu, łączącym wszystkie pozostałe zespoły w jedną całość. Podstawowym zadaniem tego elementu jest zapewnienie dobrej stabilności mikroskopu i sztywności całej konstrukcji.

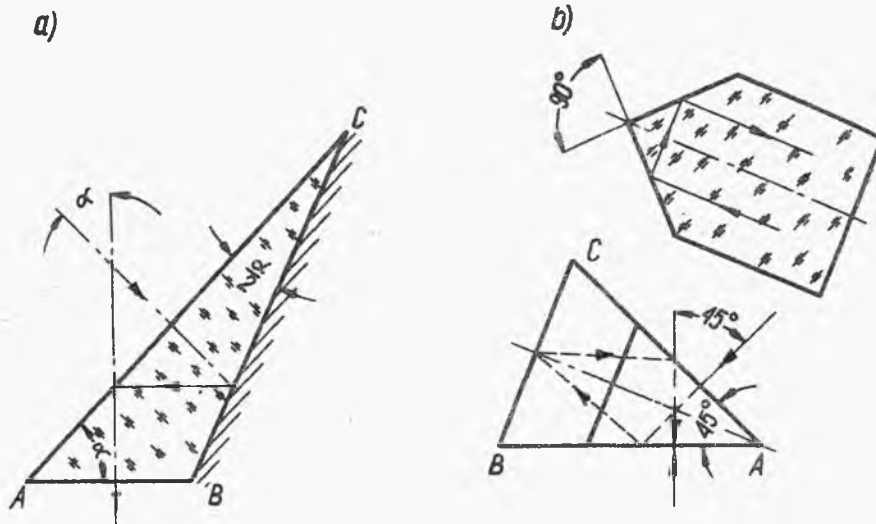
Stolik przedmiotowy służy do utrzymania w określonym położeniu płytki przedmiotowej z preparatem. Na ogół wyposażony jest w elementy mocujące preparat, mechanizm ruchu krzyżowego oraz ma możliwość obrotu wokół osi pionowej. Stolik przedmiotowy powinien spełniać warunek prostopadłości jego płaszczyzny roboczej do osi optycznej mikroskopu. Przesuwany stolik służy do przemieszczania preparatu w dwu prostopadłych kierunkach. Pokrętki mechanizmów ruchu są często zaopatrzone w podziałkę z noniusem o dokładności 0,1 mm.

Tubus z nasadką okularową jest główną częścią układu mikroskopu. Zadaniem jego jest utrzymanie stałej odległości pomiędzy obiektywem a okularem. Odległość ta, nazywana mechaniczną długością między płaszczyznami oporowymi obiektywu i okulara. Jest ona znormalizowana i w mikroskopach produkcji PZO wynosi 160 mm. Utrzymanie tej długości ma istotne znaczenie do zapewnienia dobrej korekcji układu optycznego oraz zamienności obiektywów i okularów.

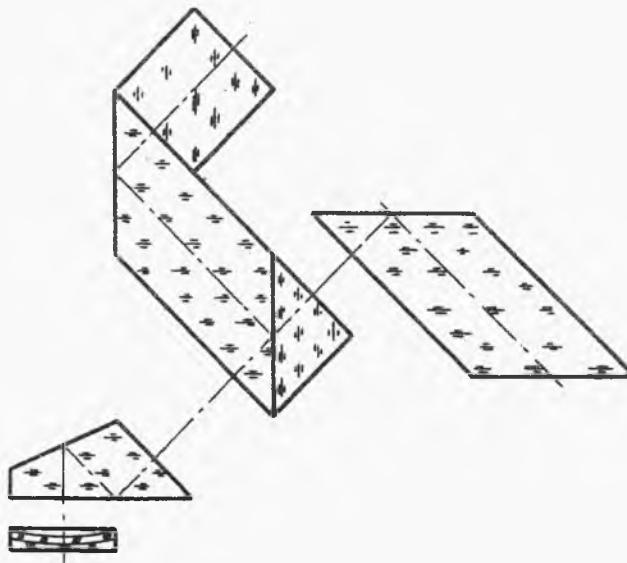
W tubusie nowoczesnego mikroskopu można wyróżnić kilka elementów:

- zmieniacz obiektywów - najczęściej w postaci uchwytu rewolwerowego,
- głowicę - element łączący uchwyt rewolwerowy zmieniacza obiektywów z nasadką okularową,
- nasadkę okularową jedno- lub dwuoczną.

W nowoczesnych typach mikroskopów oś optyczna nasadki jest pochylona pod kątem  $45^{\circ}$ . Pochylenie to osiąga się przez zasto-



Rys.15.1. Pryzmaty pochylające oś optyczną w mikroskopowych nasadkach okularowych: a) pryzmat Bauernfeinda; b) pryzmat dachowy Schmidta

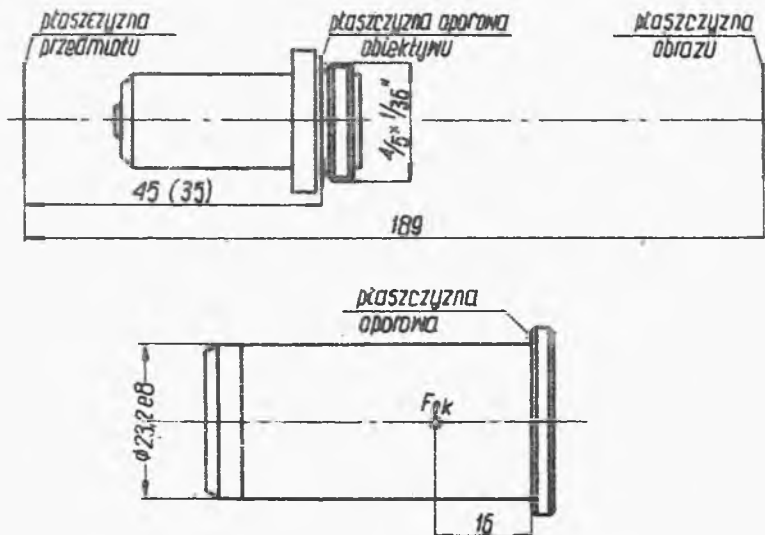


Rys.15.2. Nasadka dwuoczna z pryzmatami rombowymi



sowanie pryzmatów typu Schmidta lub Bauernfeinda (rys.15.1). Ze względu na wygodę stosuje się nasadki dwuoczne, działające na zasadzie podziału wiązki promieni na dwie części za pomocą powierzchni światłodzielnącej (rys.15.2). Ponieważ pryzmaty nasadki wydłużają drogę optyczną konieczne jest wprowadzenie dodatkowej soczewki do układu. Zastosowanie tej soczewki wprowadza dodatkowo powiększenie. W nasadkach dwuocznych PZO powiększenie dodatkowe wynosi 1,5.

Oczywiście pozostałe elementy układu, tzn. obiektywy i okulary również mają wymiary znormalizowane. Np. dla obiektywów i okularów produkcji PZO wymiary znormalizowane pokazuje rys.15.3.



Rys.15.3. Wymiary znormalizowane dla: a) obiektywów;  
b) okularów - produkcji PZO

Zadaniem mechanizmu ruchu (inaczej mechanizmu ogniskującego) jest umożliwienie precyzyjnego naprowadzenia płaszczyzny preparatu do pokrycia się z płaszczyzną przedmiotową obiektywu mikroskopu. Mechanizm realizuje na ogół ruch zgrubny (do szybkiego znajdowania płaszczyzny preparatu) oraz ruch drobny (do dokładnego ustawienia ostrości). Mechanizmy te muszą mieć dobrze usunięte luzy i powinny zapewniać dużą stabilność układu, nawet przy dodatkowym obciążeniu (np. wyposażeniem dodat-

kowym). Jest to bardzo istotne ze względu na konieczność zachowania stałego położenia preparatu względem przyrządu. Głębia ostrości mikroskopu przy dużych powiększeniach jest mała i wyraża się wzorem

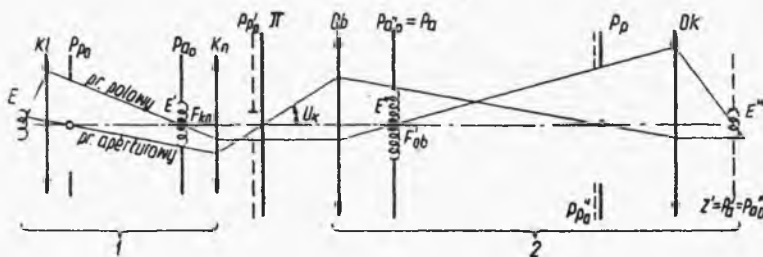
$$\delta = \pm 125 \frac{n \epsilon}{G_m A}, \quad (1)$$

gdzie:  $n$  - współczynnik załamania ośrodka przed mikroskopem,  
 $\epsilon$  - kąt zdolności rozdzielczej oka na ogół  $1' - 4'$ ,  
 $G_m$  - powiększenie wizualne,  
 $A$  - apertura numeryczna mikroskopu.

W celu umożliwienia pomiaru drobnych przesunięć tubusa (np. do oceny grubości preparatu) - pokrętło ruchu drobnego jest zaopatrzone w podziałkę o działce elementarnej 0,001 mm (jeden obrót bębna - 0,1 mm).

W nowoczesnych konstrukcjach mikroskopów elementem ruchomym jest na ogół stolik przedmiotowy, co uniezależnia mechanizm od dodatkowego obciążenia tubusa.

Układ oświetlający ma zadanie zwiększenia natężenia oświetlenia preparatu, równomierności oświetlenia i wyeliminowania zbytecznych pęków promieni świetlnych, które - rozpraszając się na oprawach soczewek - obniżają kontrast obrazu mikroskopowego. Powinien on przy tym zapewnić wykorzystanie apertury obiektywu mikroskopowego ze względu na zdolność rozdzielczą układu. Zadania te najlepiej spełnia układ oświetlający, oparty na zasadzie Köhlera. Aby zrozumieć istotę działania tego układu należy go analizować łącznie z układem mikroskopu (rys. 15.4).



Rys.15.4. Oświetlenie Köhlera w układzie mikroskopu biologicznego

Oznaczenia na rysunku:

1 - układ oświetlający, 2 - układ optyczny mikroskopu, Kl - kolektor, Kn - kondensor, Pp<sub>0</sub> - przysłona polowa oświetlacza, Pa<sub>0</sub> - przysłona aperturowa oświetlacza,  $\pi$  - płaszczyzna preparatu (przedmiotu), Ob - obiektyw mikroskopu, Pa - przysłona aperturowa obiektywu, Pp - przysłona polowa okulara, Ok - okular, z' - źrenica wyjściowa układu.

Przysłony Pp<sub>0</sub> i Pa<sub>0</sub> są diafragmami irysowymi o nastawianej średnicy.

Obraz żarnika źródła światła E dany przez kolektor Kl powinien tworzyć się w płaszczyźnie przysłony aperturowej Pa<sub>0</sub> oświetlacza. Płaszczyzna tej diafragmy powinna z kolei znajdować się w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej kondensora F<sub>kn</sub>, aby jej obraz (wraz z obrazem żarnika) dany przez kondensor Kn tworzył się w nieskończoności. Skutek jest taki, że preparat  $\pi$  jest oświetlany przez nieskończone odległe źródło wtórne. Obraz Pa<sub>0</sub> dany z kolei przez obiektyw Ob tworzy się w jego płaszczyźnie ogniskowej obrazowej F'<sub>Ob</sub>, pokrywając się z umieszczoną tam przysłoną aperturową Pa - obiektywu. Obraz tych elementów dany następnie przez okular tworzy źrenicę wyjściową przyrządu, w której umieszczone powinno być oko obserwatora.

Przysłona polowa Pp<sub>0</sub> oświetlacza, umieszczona jest za kolektorem Kl. Jej obraz tworzony jest przez kondensor Kn w płaszczyźnie  $\pi$  preparatu, zaś następnie przez obiektyw Ob w płaszczyźnie przysłony pola Pp okulara (umieszczonej w ognisku przedmiotowym okulara).

Ponieważ Pa<sub>0</sub> i Pp<sub>0</sub> są przysłonami irysowymi, więc przez zmianę średnicy Pa<sub>0</sub> regulować można kąt aperturowy  $u_k$  oświetlacza, zaś przez zmianę średnicy Pp<sub>0</sub> można zmieniać średnicę oświetlanego pola preparatu.

Tak skonstruowany układ optyczny mikroskopu z oświetlaczem ma szereg zalet. Umożliwia on odcięcie zbytecznych pęków promieni, odbijających się na oprawach soczewek lub ściankach tubusa i obniżających kontrast obrazu. Umożliwia również dopasowanie apertury oświetlacza do apertury obiektywów mikroskopowych. Ponieważ wtórne źródło światła znajduje się w nieskończo-

ności względem preparatu - na preparat pada pod różnymi kątami nieskończenie wiele równoległych wiązek światła z każdego punktu źródła światła. Daje to równomierne oświetlenie preparatu. Takie ustawienie ułatwia również dopasowanie układu przy wymianie obiektywów (w uchwycie rewolwerowym). Aby obraz  $Pa_0$  pokrył się z  $Pa$  - wystarczy umieścić przysłoną aperturową obiektywu w jego płaszczyźnie ogniskowej obrazowej.

Układ oświetlający może być wbudowany w podstawę mikroskopu (w bardziej skomplikowanych konstrukcjach) bądź też realizowany za pomocą dostawianej lampy mikroskopowej i elementów układu mikroskopu. Regulacja układu dla tego drugiego rozwiązania jest opisana w p.4.2 i 4.5.

## 2.2. Podstawowe wielkości charakterystyczne mikroskopu

Główne pojęcia optyczne dotyczące układów mikroskopowych oraz zasada działania układu zostały omówione w ćwiczeniu 1. Z tego względu podane tu zostaną tylko pewne informacje uzupełniające.

Pole widzenia w mikroskopach fabrycznych jest ograniczone przeważnie przez przysłoną umieszczoną w ognisku przedmiotowym okularu. Średnica tej przysłony jest rzędu  $\varnothing_p = 12 - 16 \text{ mm}$ . Przedmiotowe pole widzenia mikroskopu określane jest zatem zależnością

$$\varnothing_p = \frac{\varnothing_p'}{\beta_{ob}} \quad (2)$$

Ponieważ w niektórych typach okularów mikroskopowych np. typu Huyghensa układ optyczny zawiera kolektyw, znajdujący się przed przysłoną pola, ostro ograniczającą pole widzenia, więc kolektyw ten - wskutek przesunięcia go względem płaszczyzny obrazu pośredniego - wprowadza dodatkowe powiększenie, które należałoby uwzględnić we wzorze (2). Powoduje to pewne powiększenie przedmiotowego pola widzenia mikroskopu przy zastosowaniu takich okularów w stosunku do wielkości rozważanych wyżej.

### Powiększenie użyteczne mikroskopu

Zależności, określające powiększenie mikroskopu zostały podane w ćwiczeniu 1. Trzeba przypomnieć, że w przypadku mikro-

skopu z nasadką dwuoczną sumaryczne powiększenie układu wyraża się zależnością

$$G_m = \beta_{ob} G_{ok} G_n, \quad (3)$$

gdzie:  $\beta_{ob}$  - powiększenie poprzeczne obiektywu,

$G_{ok}$  - powiększenie wizualne okulara,

$G_n$  - powiększenie nasadki dwuocznej (na ogół  $G_n = 1,5^x$ ).

Należy podkreślić, że nie jest celowe zwiększenie bez ograniczeń powiększenia mikroskopu. Wynika to z ograniczonej zdolności rozdzielczej przyrządu (patrz ćwiczenie 1). Zdolność rozdzielcza oka ludzkiego jest ograniczona (ok.  $1,5'$ ). Jeśli możliwości przyrządu mają być wykorzystane to odcinek  $br$  (liniowa zdolność rozdzielcza) powinien być widziany przez przyrząd pod kątem nie mniejszym od  $1,5'$ . Dalsze zwiększenie powiększenia nie daje już więcej informacji, a nawet może być szkodliwa (ujawni się dyfrakcyjna struktura obrazu, co utrudni obserwację).

Wchodząc z definicji powiększenia wizualnego mamy

$$\Delta w' = w G_m = G_m \frac{br}{250} = G_m \frac{0,65 \lambda}{250 A_o}. \quad (4)$$

Zakłada się w praktyce, że powinno być spełnione

$$2' < \Delta w' < 4';$$

dla średniej długości fali  $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$  mm po zaokrągleniach otrzymamy zależność

$$500 A_o < G_m = \beta_{ob} G_{ok} < 1000 A_o, \quad (5)$$

gdzie  $A_o = n \sin u$  - apertura obiektywu.

Ponieważ  $A_{o \max} = 1,4$  (dla obiektywów imersyjnych), więc stosowanie powiększeń mikroskopu optycznego powyżej  $1400^x$  jest niecelowe.

Jeżeli powiększenie mikroskopu jest zbyt małe - to nie wykorzystuje się jego zdolności rozdzielczej (a przy tym apertury). Dla mikroskopów o mniejszych powiększeniach wystarczą obiektywy o mniejszych aperturach (pozwala to na obniżkę kosztów, daje większą głębię ostrości, ułatwia manipulowanie ukła-

dem ze względu na większy odstęp między obiektywem a preparatem itp.).

#### Dobór powiększenia mikroskopu

Powiększenia mikroskopów są znormalizowane (PN/N-53003). Analizując, jaki powinien być udział poszczególnych elementów składowych w całkowitym powiększeniu mikroskopu można wykazać, że powiększenia obiektywu nie powinny być duże, gdyż warunki pracy są wtedy mniej dogodne (mała odległość robocza, duże krzywizny soczewek itp.). Z tego względu zasadą powinien być taki dobór obiektywu, aby górną granicą powiększenia użytecznego można było uzyskać przy maksymalnym powiększeniu okulara.

### 3. POMIARY WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNYCH MIKROSKOPU

#### 3.1. Pomiar powiększenia wizualnego mikroskopu biologicznego

Pomiaru powiększenia dokonujemy w tym przypadku w oparciu o definicję powiększenia wizualnego

$$G_m = \frac{w'}{w}, \quad (6)$$

gdzie:  $w'$  - kąt pod jakim obserwowany przedmiot widać przez mikroskop,

$w$  - kąt pod jakim przedmiot widać z odległości dobrego widzenia = 250 mm - okiem nieuzbrojonym.

Do pomiaru należy przyjąć przedmiot o znanych rozmiarach np. o długości  $a$ , stąd kąt

$$w = \frac{a}{250} [\text{rd}] \cong \frac{a}{250 \cdot 3 \cdot 10^{-4}} [1'] . \quad (7)$$

Kąt  $w'$  możemy zmierzyć za pomocą lunety z płytką ogniskową. Podziałka na płytce może być wycechowana w jednostkach kątowych lub liniowych. W tym drugim przypadku kątową wielkość obrazu możemy określić z wzoru

$$\text{tg } w' = \frac{y'}{f'}, \quad (8)$$

gdzie:  $y'$  - wielkość obrazu na płytce ogniskowej w mm,

$f'$  - ogniskowa obiektywu lunety w mm.

### 3.2. Pomiar powiększenia obiektywu mikroskopu

Dokładna znajomość rzeczywistego powiększenia obiektywu mikroskopu (ewentualnie obiektywu mikroskopu łącznie z nasadką dwuoczną) jest istotna w przypadku wykonywania za pomocą mikroskopu pomiarów liniowych wymiarów na preparacie. Przy pomiarach tych wykorzystuje się okular mikrometryczny, do pomiaru wielkości obrazu pośredniego przed okularzem. Budowa okulara mikrometrycznego została omówiona w części wstępnej. Do określenia rzeczywistej wielkości mierzonego przedmiotu konieczna jest znajomość rzeczywistego powiększenia obiektywu. Może ono odbiegać od określonego wartościami nominalnymi, grawerowanymi na obiektywie (i ewentualnie nasadce) ze względu na tolerancje wykonawcze dopuszczane przez normę oraz fakt, że dla okulara mikrometrycznego jego płaszczyzna przedmiotowa może leżeć w nieco innym położeniu względem płaszczyzny oporowej. W celu uzyskania ostrego obrazu należy nieco przeogniskować układ, co zmienia powiększenie.

Aby określić rzeczywiste powiększenie obiektywu należy śrubą mikrometryczną okulara mikrometrycznego zmierzyć wielkość  $y'$  obrazu przedmiotu o znanej wielkości  $y$  (np. płytki testowej PP 1/100). Powiększenie rzeczywiste

$$\beta_{ob} = \frac{y'}{y} \quad (9)$$

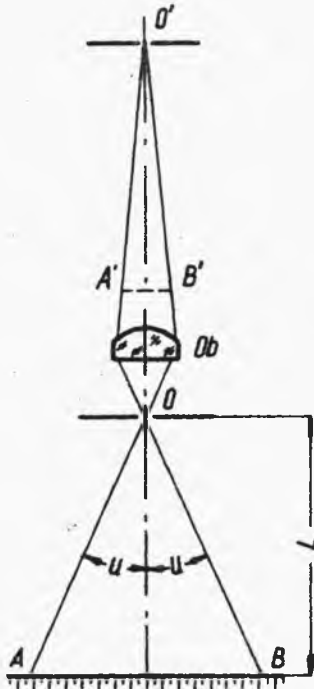
### 3.3. Pomiar głębi ostrości mikroskopu

Na ogół wykonuje się go przez przeogniskowanie mikroskopu w obie strony, aż do całkowitego rozmycia obrazu. Przesunięcie tubusa odczytuje się na podziałce pokrętła ruchu drobnego mechanizmu ogniskującego (wartość elementarna działki 0,001 mm).

### 3.4. Pomiar apertury obiektywu mikroskopowego

Pojęcie apertury numerycznej zostało opisane w ćwiczeniu 1. Od apertury obiektywu uzależnione jest oświetlenie obrazu danego przez mikroskop oraz co najważniejsze - zdolność rozdzielcza. Z zależności między zdolnością rozdzielczą, aperturą i po-

większeniem wynika, że szczególnie istotna jest duża apertura dla obiektywów o dużym powiększeniu. Zasadę pomiaru apertury (a ściślej kąta aperturowego) pokazuje rysunek 15.5.



Rys.15.5. Pomiar apertury obiektywu mikroskopowego

Mikroskop jest ustawiony na przysłonę z otworkiem  $O$ , przed którą w odległości  $L$  ( $L \gg f'_{ob}$ ) znajduje się podziałka  $AB$ . Obraz rzeczywisty  $A'B'$  dany przez obiektyw utworzy się w pobliżu płaszczyzny ogniskowej obrazowej (w której umieszczona jest diafragma aperturowa obiektywu). Wobec tego po wyjęciu okulara mikroskopowego z tubusa można zobaczyć obraz podziałki na tle otworu obiektywu. Na podstawie widocznej w otworze części podziałki można określić kąt aperturowy obiektywu

$$\operatorname{tg} u = \frac{AB}{2L}. \quad (10)$$

Aby uniknąć błędu paralaksy przy odczycie należy wstawić do tubusa w miejsce okulara - przysłonę w postaci małego otworu  $O'$  na osi optycznej układu i obserwować przez ten otwór. Jeśli ogniskowe obiektywu są krótkie (obiektywy o dużym powiększeniu), to obraz  $A'B'$  jest bardzo mały. Do obserwacji podziałki można użyć pomocniczego mikroskopu o niewielkim powiększeniu - wstawionego w miejsce okulara.

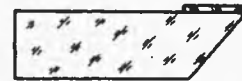
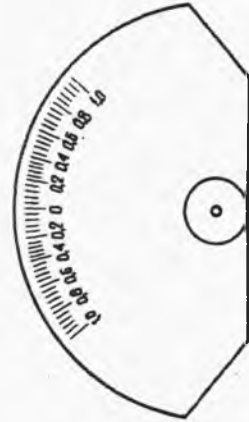
Omówiona zasada pomiaru jest realizowana w specjalnym przyrządzie - tzw. apertometrze Abbego. Różnica polega na tym, że na drodze promieni między podziałką  $AB$  i otworem  $O$  znajduje się płaszczyzna odbijająca pochylona o  $45^\circ$ .

Główną częścią apertometru jest cylindryczna płytko szklana o grubości 12 mm, promieniu ok. 45 mm i podstawie w kształcie odcinka koła (rys.15.6). Ścianka naprzeciwko powierzchni walcowej jest ścięta pod kątem  $45^\circ$  i pracuje jako powierzchnia odbijająca. Na górnej płaszczyźnie, na osi walca, znajduje się krążek posrebrzony z wyciętą szczeliną. Na górnej płaszczyźnie

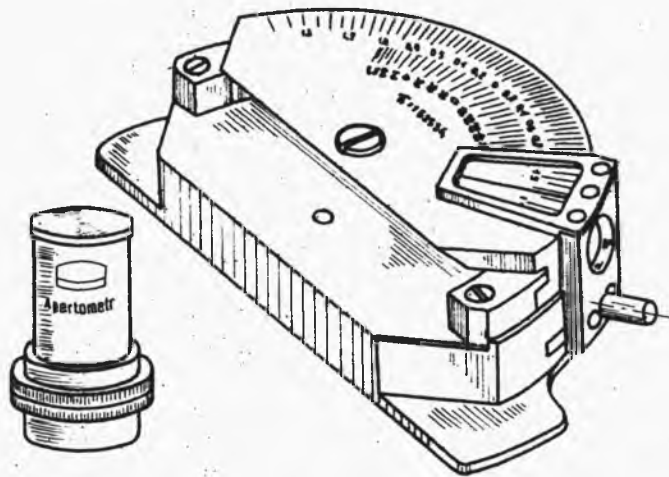


płytki na obwodzie nacięta jest podziałka. Na powierzchni cylindrycznej przesuwają się ramka metalowa z płytką mleczną z naciętym krzyżem oraz wskaźnikiem do podziałki.

Apertometr (rys.15.7) należy ustawić na stoliku przedmiotowym mikroskopu ukośną płaszczyzną do statywu tak, aby powierzchnia cylindryczna była oświetlona. Mikroskop ustawia się na ostry obraz szczeliny wyciętej na obszarze posrebrzonym. Po zastąpieniu okulara mikroskopu diafragmą z małym otworkiem obserwujemy obraz krzyża na tle diafragmy otworu obiektywu (U w a g a: wstępnie należy ustawić wskaźnik na środku podziałki - inaczej krzyż może nie być widoczny w polu widzenia). Następnie - przesuwając ramkę w obydwie strony aż do pokrycia się środka krzyża z krawędzią diafragmy obiektywu - dokonujemy odczytów na skali. Ponieważ 0 znajduje się na środku podziałki, a pomiar od brzegu do brzegu diafragmy dotyczy podwójnej apertury - należy z obydwu odczytów wyciągnąć wartość średnią - aby wyeliminować ewentualny błąd asymetrycznego ustawienia przyrządu. Na podziałce są



Rys.15.6. Płytki podstawowa aperturometru Abbego



*Mikroskop pomocniczy*

Rys.15.7. Widok ogólny aperturometru Abbego

dwie skale - jedna bezpośrednio w wartości apertury (po uwzględnieniu załamania w szkłe), druga w jednostkach kątowych, umożliwiającą odczyt kąta aperturowego obiektywów suchych. Dokładność pomiaru apertury wynosi  $\pm 0,01$ . Jeśli badany obiektyw pracuje z cieczą imersyjną - należy przy pomiarze wprowadzić ciecz imersyjną między obiektyw a płytkę apertometru.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zapoznać się z budową mikroskopu biologicznego ML5, rozpoznając w nim poszczególne zespoły zgodnie z p.2.1.

2. Zmontować mikroskop i zestawzić układ zgodnie z rysunkiem 15.8, rozpoznając w nim poszczególne zespoły.

U w a g a: zasilanie lampy mikroskopowej odbywa się przez transformator. Dodatkowo do obwodu można włączyć autotransformator regulacji światłości żarówki oświetlacza.

3. Przygotować mikroskop do pracy, ustawiając oświetlenie zgodnie z zasadą Köhlera:

a) po wstępnym ustawieniu układu wg rysunku 15.8 ustawić lustro płaskie tak, aby światło z lampy mikroskopowej było skierowane na kondensator;

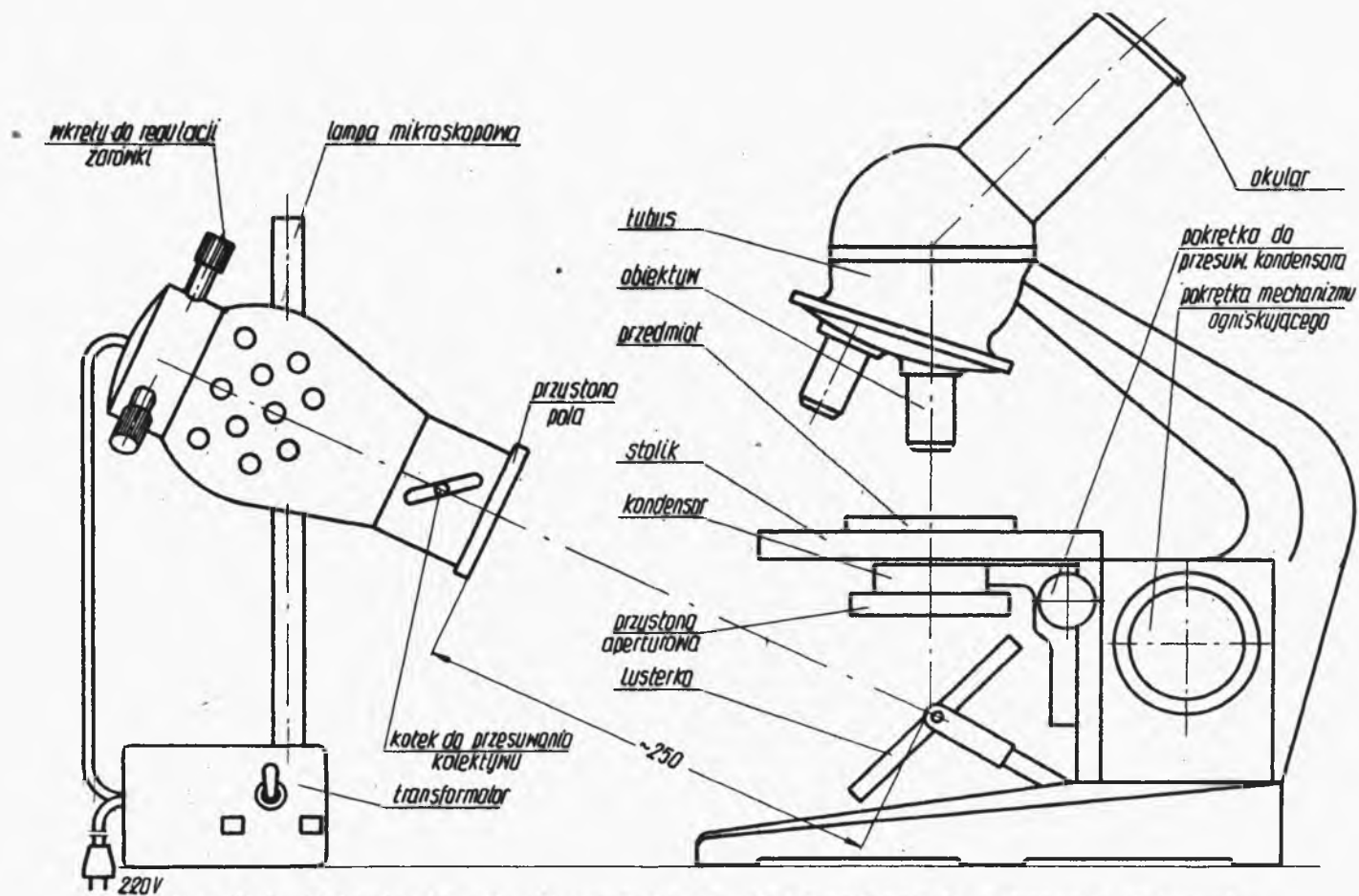
b) patrząc z hoku zbliżyć stolik do tubusa na małą odległość (ok. 0,5 mm);

c) patrząc w okular opuścić stolik aż do chwili, w której widoczny będzie przedmiot (oddalając stolik od obiektywu).

U w a g a: poszukiwanie obrazu przedmiotu (ogniskowanie mikroskopu) przez podnoszenie stolika (zbliżanie preparatu do obiektywu) grozi zgnieceniem preparatu i zniszczeniem obiektywu;

d) po zamknięciu irysowej przysłony połowej (rys.15.8) ruchem kondensora ustawić ostry obraz przysłony na tle przedmiotu;

e) po zamknięciu przysłony aperturowej (patrz rysunek) ruchem kolektora ustawić ostry obraz żarnika żarówki na listkach przysłony (przysłonę aperturową najlepiej jest obserwować patrząc wzdłuż osi lampy mikroskopowej w lustro płaskie). Obraz żarnika należy wycentrować przez przesuwanie żarówki wkrętami regulacyjnymi;



Rys.15.8. Ustawienie mikroskopu i lampy oświetlającej do wykonania ćwiczenia

f) obserwując przedmiot przez mikroskop ustawia się średnicę przysłony pola tak, aby jej obraz był równy średnicy pola widzenia danego obiektywu;

g) po wyjęciu okulara, patrząc w tubus, ustawia się średnicę przysłony aperturowej tak, aby jej obraz równy był  $2/3$  średnicy diafragmy obiektywu.

U w a g a: przy obiektywach o małym powiększeniu ( $5^x$  i  $10^x$ ) całe pole widzenia może nie być równomiernie oświetlone (ze względu na zbyt krótką ogniskową kondensora). Można wtedy poprawić sytuację przez odkręcenie i zdjęcie górnej soczewki kondensora.

4. Patrząc przez mikroskop opisać zmianę w obrazie preparatu przy zmianie średnicy diafragmy aperturowej (układ: obiektyw  $40^x$ , okular  $5^x$ ).

5. Pomierzyć głębnię ostrości (zgodnie z p.3.3 dla obiektywu  $40^x$ , okularu  $5^x$  i dwóch wybranych średnic diafragmy aperturowej).

6. Pomierzyć powiększenie wizualne mikroskopu zgodnie z p.3.1 przy wykorzystaniu jako przedmiotu płytki PP1/100 (test kreskowy co 0,01 mm) i lunetki pomocniczej (z podziałką o wartości działki elementarnej  $3'$ ). Mierzac lunetką kąt  $w'$ , pod jakim widać a działek płytki PP1/100 i obliczając  $w$

$$w = \frac{0,01}{250} a \quad [\text{rd}], \quad (11)$$

ponieważ  $1' \cong 3 \cdot 10^{-4}$ , więc

$$G_m = \frac{w'}{w} = 7,5 \frac{w'}{a}. \quad (12)$$

Pomiar należy przeprowadzić dla dwóch powiększeń mikroskopu.

7. Pomiar wielkości liniowych składa się z 2 części:

a. wyznaczenia powiększenia obiektywu za pomocą płytki PP1/100 (mikrometru obiektywowego) oraz okulara mikrometrycznego wg p.3.2;

b. pomiarzenie okularom mikrometrycznym wielkości  $y'$  obrazu dowolnego przedmiotu (np. grubości włosa ludzkiego itp.) i wyznaczenie rzeczywistej wielkości przedmiotu

$$y = \frac{y'}{\beta_{ob}}. \quad (13)$$

8. Pomierzyć aperturę dwóch wskazanych obiektywów mikroskopowych wg p.3.4 i obliczyć odpowiadającą im zdolność rozdzielczą.

## 5. LITERATURA

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.  
Wagnerowski T.: Optyka praktyczna. PWT. Warszawa 1959.  
Hanc T.: Pomiary optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.  
Appel L., Kowalczyk R.: Mikroskop, budowa i użytkowanie. WNT. Warszawa 1966.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Omówić zasadnicze zespoły mikroskopu, ich rolę i zadania.

Omówić konstrukcję i przeznaczenie nasadki dwuocznnej.

Narysować układ oświetlenia wg Köhlera, bieg promienia polowego i aperturowego: omówić rolę wszystkich elementów w układzie, zasadę pracy układu i zalety tego sposobu oświetlenia.

Omówić wielkości charakterystyczne mikroskopu (powiększenie wizualne, apertura, zdolność rozdzielcza, powiększenie obiektywu i okulara, zakres powiększeń użytecznych i korekcja między wielkościami).

Omówić zasadę doboru powiększeń elementów składowych mikroskopu.

Omówić metodę pomiaru powiększenia wizualnego mikroskopu.

Omówić konstrukcję i przeznaczenie okulara mikrometrycznego.

Omówić pomiar powiększenia obiektywu.

Pomiar głębi ostrości obiektywu oraz pomiar apertury obiektywu i konstrukcja apertometru Abbego.

## Ćwiczenie 16

# MIKROSKOPY I ICH WYPOSAŻENIE DODATKOWE

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z konstrukcją i przeznaczeniem mikroskopów: badawczego, metalograficznego i stereoskopowego, z wyposażeniem dodatkowym do mikroskopów oraz z metodami badania jakości obiektów mikroskopowych.

### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

#### 2.1. Mikroskop badawczy MB-2

W mikroskopie badawczym MB-2 wyróżnić można wszystkie zespoły opisane w ćwiczeniu 15 p.2.1. Od mikroskopu ML-5 - używanego w ćwiczeniu 15 różni się on niektórymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. W podstawę mikroskopu wbudowany jest niskonapięciowy oświetlacz, umożliwiający stosowanie oświetlenia wg zasady Köhlera. Mechanizmy ruchu, działające na przesuw tubusa z obiektywem i nasadką, mają ruch drobny z odczytem co 0,002 mm. Nieco inna jest konstrukcja nasadki dwuocznej. Kondensator ma mechanizm umożliwiający dokładne wycentrowanie. Istnieje również możliwość zastosowania lusterka (podobnie jak w ML-5) do wykorzystania oświetlaczy specjalnych. Pozostałe zespoły są podobne jak w mikroskopie laboratoryjnym ML-5.

Mikroskop MB-2 należy do grupy mikroskopów badawczych, przeznaczonych przede wszystkim do badań w biochemii, cytologii, mikroskopii i histologii. Ma on szerokie możliwości stosowania dodatkowego wyposażenia uzupełniającego do rysowania, projekcji, mikrofotografii, dokładnych pomiarów liniowych, do obserwacji w ciemnym polu, metodą obserwacji kontrastu fazowego itp.

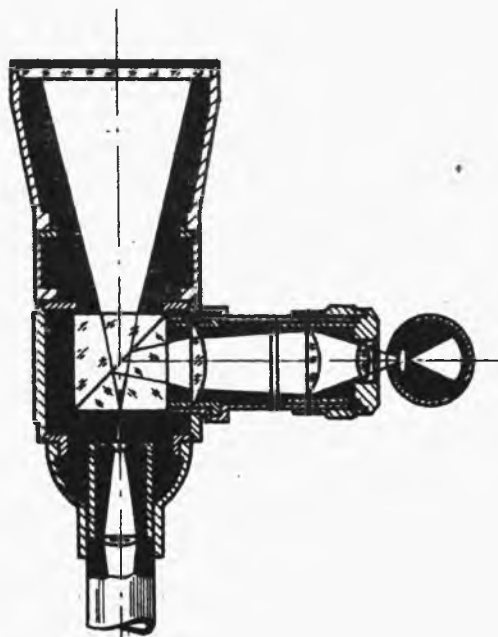
## 2.2. Wyposażenie dodatkowe do mikroskopów

Możliwości eksploatacyjne mikroskopów biologicznych mogą być rozszerzone przez zastosowanie wyposażenia dodatkowego. Umożliwia to wykorzystanie mikroskopu do projekcji obrazów, kopiowania rysunkowego, fotomikrografii, obserwacji jednoczesnej przez kilku obserwatorów, porównywania obrazów mikroskopowych, nie mówiąc o szeregu akcesoriów uzupełniających możliwości manipulacyjne lub zakres metod badawczych. Niektóre specjalne metody obserwacji są opisane w ćwiczeniu 17. Poniżej omówicze zostaną zasady działania kilku rodzajów sprzętu uzupełniającego.

### 2.2.1. Nasadka fotograficzna MNF

Nasadka służy do wykonywania zdjęć preparatów mikroskopowych na płytach fotograficznych 65 x 90 ( $\varnothing_{cz} \approx 60$ ) lub na błonie małoobrazkowej 24 x 36 mm. Schemat nasadki przedstawia rysunek 16.1.

Nasadkę mocuje się za pomocą łącznika na mikroskopie na miejsce nasadki okularowej. Jest ona wyposażona w układ obserwacyjny do nastawiania ostrości i migawkę centralną. Można na niej mocować specjalną kasetę na płyty fotograficzne lub małoobrazkowy aparat fotograficzny. Zamiast kasety z płytą fotograficzną w kamerze można zainstalować matówkę z lustrem do dokładnego nastawienia ostrości. W nasadce znaj-



Rys.16.1. Schemat mikroskopowej nasadki fotograficznej

duje się okular kompensacyjny lub projekcyjny do lepszego korygowania aberracji obrazu (głównie krzywizny pola i chroma-

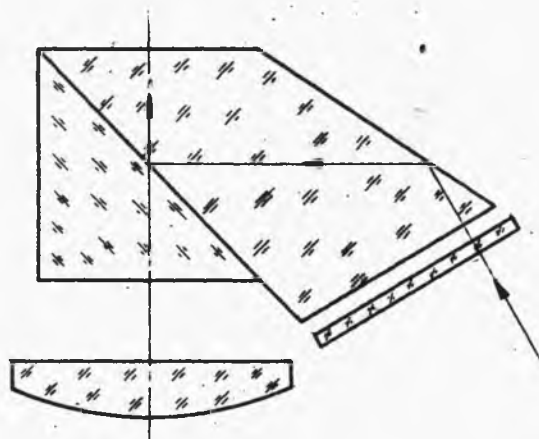
tyzmu wielkości). Ponieważ przy wykonywaniu zdjęć na płycie (błonie) fotograficznej musi utworzyć się obraz rzeczywisty preparatu - więc cały układ mikroskopu musi zostać przeogniskowany (przesunięty) względem preparatu. Układ obserwacyjny w nasadce MNF produkcji PZO może być przestawiony do współpracy z kasetą lub z aparatem fotograficznym.

Czas naświetlania należy określić eksperymentalnie. Produkowane są również przez niektóre firmy specjalne światłomierze do fotomikrografii.

W celu uzyskania większej głębi ostrości należy stosować maksymalne powiększenie okulara i minimalne powiększenie obiektywu. Oświetlenie preparatu powinno być ustawione według zasady Köhlera. Ponieważ czułość oka ludzkiego jest nieco inna od czułości emulsji fotograficznej, więc ustawienie ostrości okiem może prowadzić do nieostrości obrazu fotograficznego. Można temu zapobiegać przez stosowanie odpowiednich filtrów w układzie oświetlającym lub też przez skompensowanie położenia układu celowniczego nasadki tak, aby optymalnej ostrości dla oka w układzie celowniczym odpowiadała optymalna ostrość obrazu fotograficznego.

#### • 2.2.2. Mikroskopowa nasadka do rysowania

Mikroskopowe nasadki do rysowania mogą być dwojako rodzaju. Pierwsza metoda - polega na rzutowaniu obrazu na kartkę papieru za pomocą zwierciadła płaskiego po odpowiednim prze-



Rys.16.2. Mikroskopowa nasadka rysunkowa (mocowana za okularzem)

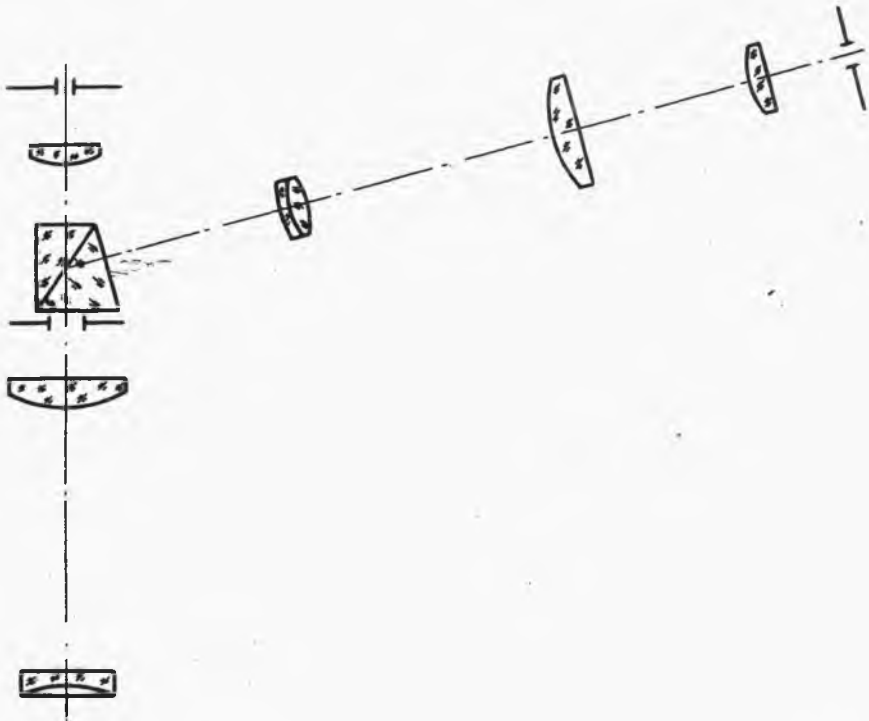
ogniskowaniu układu. Metodę tę realizuje nasadka MNR produkcji PZO. Wymaga ona zaciemnienia pomieszczenia. Do wykonywania rysunków preparatów mikroskopowych w świetle dziennym buduje się aparaty do rysowania, których konstrukcja jest oparta na innej zasadzie - tzw. przyzmatów rysunkowych. Zasadę tę obrazuje rys.16.2.



Płaszczyzna rysunkowa jest odwzorowana przez układ pryzmatów w polu widzenia mikroskopu. Obserwator widzi jednocześnie obraz mikroskopowy i płaszczyznę rysunku, co umożliwia skoplowanie obrazu na papierze. W celu skompensowania różnicy jasności obu obrazów stosuje się filtr przyciemniający. Przy stosowaniu nasadek ukośnych w mikroskopach, płaszczyzna rysunku jest pozioma, a obraz pozostaje bez deformacji. Rozwiązanie takie stosowane jest w nasadkach MNR1 i MNR2 produkcji PZO. Różnią się one między sobą tylko zastosowaniem do różnego kąta pochylenia tubusa w mikroskopach ( $45^{\circ}$  np. ML5 lub  $55^{\circ}$  np. MB2).

### 2.2.3. Okular demonstracyjny podwójny MOP

Umożliwia on jednoczesną obserwację obrazu 2 osobom. Przykładowy układ optyczny ukazuje rysunek 16.3.



Rys.16.3. Schemat optyczny układu okulara podwójnego prod. PZO

Okular może być zaopatrzony we wskaźnik, którego koniec przesuwana się w płaszczyźnie obrazu i umożliwia wskazywanie

szczegółów obrazu. Dodatkowa gałąź okularu ma regulację dioptryjną umożliwiającą dostrojenie ostrości do oka drugiego obserwatora.

### 2.3. Mikroskop stereoskopowy

Widzenie stereoskopowe jest procesem fizjologicznym i polega na tym, że nieco różne obrazy obserwowanego przedmiotu dane przez każde oko obserwatora są scalane przez mózg w jeden obraz dający wrażenie głębi. Umożliwia to przestrzenną ocenę położenia przedmiotu. Możliwa jest ona wtedy, gdy obraz jest przesunięty w jednym oku co najmniej o odległość następnego elementu światłoczułego siatkówki oka. W ten sposób powstaje pojęcie stereoskopowej zdolności rozdzielczej (kąta, przy którym następuje przesunięcie obrazu z odpowiedniego elementu światłodzielnego na sąsiedni). Zależy ona od cech obserwatora i jest rzędu 4 - 32".

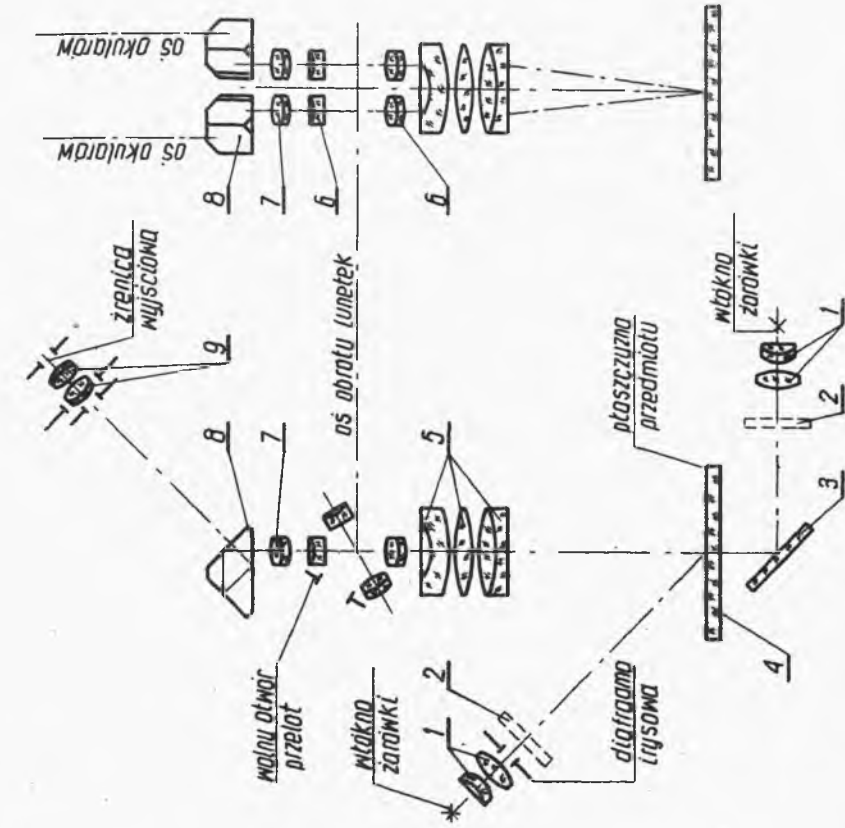
W celu uzyskania wrażenia głębi obrazu mikroskopowego należy preparat obserwować przez 2 układy mikroskopowe o osiach pochylonych o kąt  $14 - 16^{\circ}$  (kąta zbieżności oczu obserwatora przy obserwacji przedmiotu w odległości dobrego widzenia).

W takim układzie obrazy mikroskopowe muszą być oczywiście proste - osiąga się to zazwyczaj przez zastosowanie pryzmatycznych układów odwracających (układ Porro II, pryzmat dachowy Schmidta).

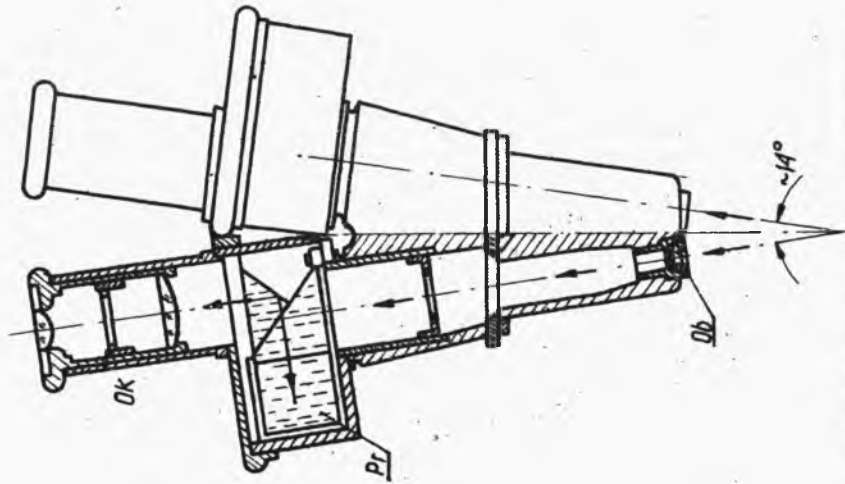
Obecnie buduje się dwa podstawowe rodzaje mikroskopów stereoskopowych. Pierwszy rodzaj tzw. typu Greenougha składa się z dwóch układów mikroskopowych pochylonych pod kątem i zamocowanych wspólnie w obudowie.

Najprostszy schemat układu przedstawia rys.16.4. Zmianę powiększenia w takim układzie osiąga się przez wymianę okularów lub obiektywów. Układy odwracające na ogół są typu Porro II. Jest to starszy typ rozwiązania układu stereoskopowego, używany również obecnie (mikroskop MSt 127, PZO, Mak Ks - Reichert PM-XVI - Zeiss itp.).

Drugi typ mikroskopu stereoskopowego ma tylko jeden obiektyw, w ognisku przedmiotowym którego umieszcza się przedmiot. Obiektyw daje więc obraz w nieskończoności, zaś obraz ten jest obserwowany przez układ dwóch lunet obserwacyjnych. W przestrze-



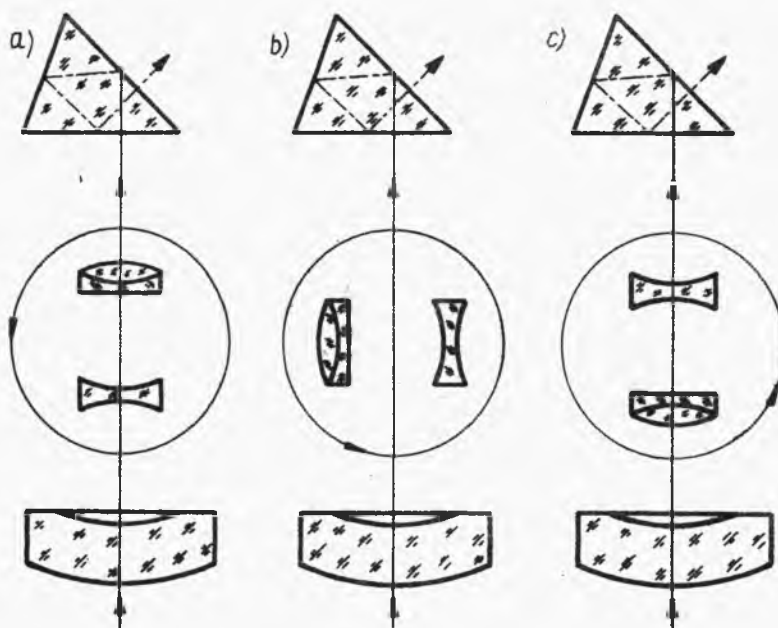
Rys.16.5. Mikroskop stereoskopowy z jednym obiektywem



Rys.16.4. Mikroskop stereoskopowy typu Greenougha

ni przedmiotowej środki perspektywy dla każdej lunety są rozdzielone, są więc warunki do obserwacji stereoskopowej. Taki układ jest przedstawiony na rys.16.5.

Zmianę powiększenia takiego układu można osiągnąć albo przez zmianę okularów, albo przez wstawienie w bieg promieni między obiektywem a lunetami obserwacyjnymi dodatkowo pary lunetek Galileusza. Na ogół umieszcza się je na bębnie (rys.16.6). Na bębnie może być 1 lub 2 pary lunetek. Zaletą układu jednoobiektywowego jest duża, niezmienna odległość czołowa mikroskopu. Rozwiązanie to jest stosowane m.in. w mikroskopach MSt 130, 131 (PZO), Citoplast (Zeiss), M4, Mp (Wild i Heerbrugg) itp.



Rys.16.6. Zasada zmiany powiększenia w stereoskopowym mikroskopie jednoobiektywowym

Należy wspomnieć tutaj, że obecnie w niektórych konstrukcjach mikroskopów stereoskopowych stosuje się zamiast układu Galileusza układ o płynnej zmianie powiększenia w zakresie ok.  $5,7^{\times}$ . W połączeniu z wymiennymi obiektywami i okularami daje to szeroki zakres możliwości doboru powiększenia.

Ze względu na niewielką aperturę obiektywu, głęboką ostrość oraz rosnące zniekształcenia przedmiotu przy większych powiększeniach zakres powiększeń użytecznych dla mikroskopu stereoskopowego na ogół nie przekracza  $100^{\times}$ .

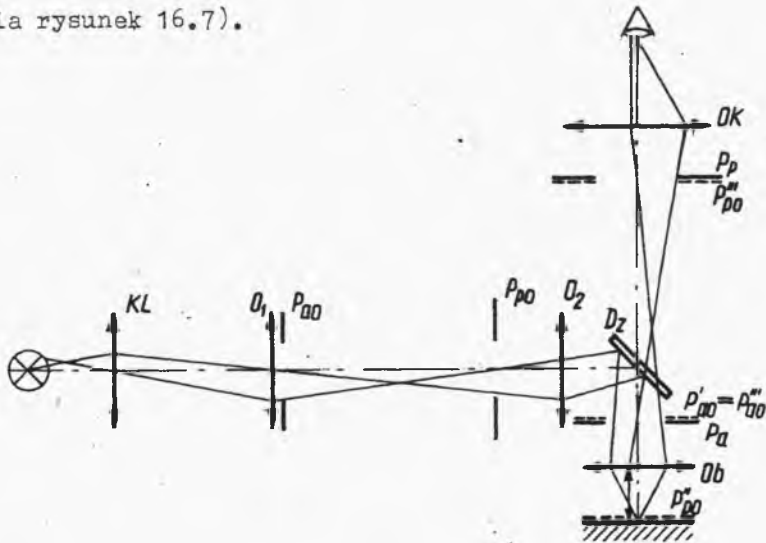
Obserwacje mogą być przeprowadzone w świetle odbitym lub przechodzącym. Istnieje wiele sposobów mocowania przedmiotu, zależnie od zastosowania mikroskopu.

Główne zastosowania mikroskopów stereoskopowych to: biologia, przemysł elektroniczny, chemiczny, włókienniczy, w kontroli i montażu części precyzyjnych, w mineralogii itp.

#### 2.4. Mikroskop metalograficzny

Mikroskopy metalograficzne służą do obserwacji struktury metali, minerałów, tworzyw sztucznych itp. Są stosowane na ogół w laboratoriach przemysłowych, laboratoriach wyższych uczelni i instytutów naukowych itp.

Ze względu na nieprzezroczystość preparatu istnieje konieczność oświetlenia preparatu od strony obiektywu i obserwacji w świetle odbitym. Obecnie najczęściej stosuje się oświetlenie bezpośrednio przez obiektyw obserwacyjny. Ideą takiego oświetlacza (realizującego oświetlenie na zasadzie Köhlera) przedstawia rysunek 16.7).



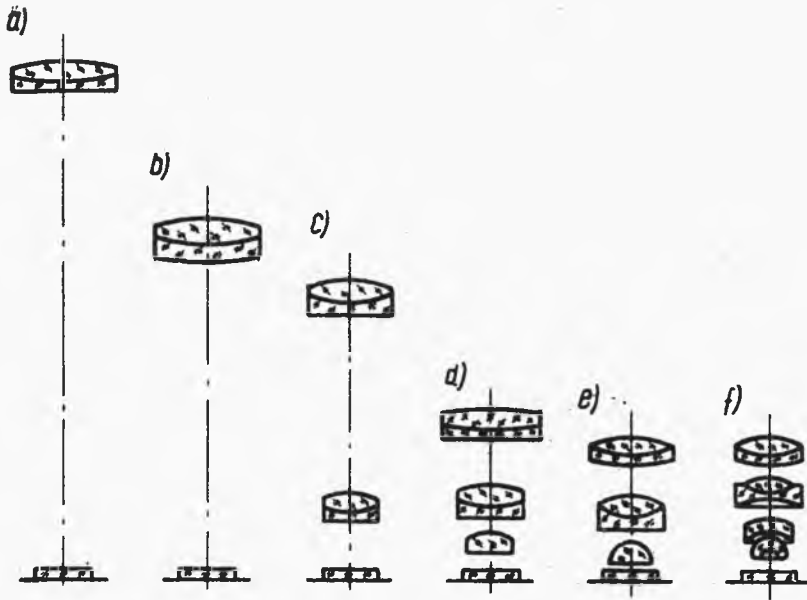
Rys.16.7. Schemat oświetlenia światłem odbitym w mikroskopie metalograficznym

Obiektyw obserwacyjny wraz z soczewką  $O_2$  spełnia jednocześnie rolę kondensora. Przysłona pola  $Pp_0$  oświetlacza jest odwzorowana przez ww. układ (soczewka  $O_2$ , płytka światłodzieląca i obiektyw) w płaszczyźnie preparatu, a po odbiciu na preparacie - przez obiektyw - w płaszczyźnie obrazu pośredniego przed okularzem. Kolektor KL tworzy obraz żarnika w przysłonie aperturowej  $Pa_0$ . Układ  $O_1$  jest dodatkowym kolektywem - tworzy obraz kolektora w przysłonie pola oświetlacza. Układy pracujące w świetle odbitym muszą mieć większą moc ze względu na straty występujące w układzie. Ponieważ nie używa się szkiełka nakrywkowego na preparacie - obiektywy do obserwacji w świetle odbitym powinny mieć inaczej skorygowane aberracje. Ze względu na wygodę zakładania próbek o różnych rozmiarach stosuje się różne rozwiązania przestrzenne i mechaniczne. Na przykład mikroskop Met-3 (PZO) ma układ odwrócony z obiektywami umieszczonymi pod stolikiem przedmiotowym (obserwacja preparatu od dołu). Wygodne dla obserwatora usytuowanie nasadki okularowej uzyskuje się przez zastosowanie odpowiedniego układu odbijającego. W układzie mechanicznym można wyróżnić grupy zespołów analogiczne do omawianych w ćwiczeniu 15 (z wyjątkiem kondensora, którego rolę pełni obiektyw). Układ ze stolikiem na górze nie ogranicza w zasadzie kształtu i rozmiarów próbki (wymagając tylko 1 płaszczyzny szlifowania do obserwacji). Układ przesuwu stolika (ślizgowy) ułatwia manipulowanie preparatem. Zakresy powiększeń są rzędu  $80^x - 500^x$ .

### 3. BADANIE OBIEKTYWÓW MIKROSKOPOWYCH

#### 3.1. Ogólne wiadomości o obiektywach

Wymagania stawiane obiektywom mikroskopowym zależne są od powiększenia i apertury, rodzaju mikroskopu, metody obserwacji, własności i współpracujących elementów układu oraz żądanej jakości odwzorowania. Od warunków pracy i powiększenia zależy stopień komplikacji układu optycznego. Obrazuje to rys. 16.8, zaś parametry poszczególnych obiektywów podane są w tabelicy 1.



Rys.16.8. Schematy obiektywów achromatycznych PZO

Tablica 1

	a	b	c	d	e		f
$\beta$	$3^x$	$5^x$	$10^x$	$20^x$	$40^x$	$60^x$	$100^x$ imer- syjny
A	0,1	0,15	0,25	0,4	0,65	0,85	1,3
$f'$ [mm]	35,98	26,27	15,85	8,7	4,63	2,99	1,86
Odległość robocza [mm]	18	12	4,99	2,11	0,44	0,33	0,13

Rysunek 16.8 przedstawia najprostszą odmianę obiektywów produkcji PZO - achromaty. Obiektywy takie mają skorygowaną aberrację sferyczną, odstępstwo od warunku sinusów, komę oraz chromatyzm położenia dla dwóch długości fali. Dla mikroskopów biologicznych obiektywy kompensują aberrację sferyczną i chromatyczną, wnoszone przez szkielek nakrywkowe (jest to istotne przy powiększeniach obiektywu powyżej  $10^{\times}$ ). Achromaty są często używane ze względu na stosunkowo niską cenę. Obiektywy achromatyczne składają się z 2 - 6 soczewek.

Bardziej skomplikowane i droższe są półapochromaty i apochromaty. Charakteryzują się one lepszą korekcją aberracji chromatycznej położenia, tzn. częściowo (półapochromaty) lub całkowicie skorygowany chromatyzm położenia dla trzech długości fali. Mają też większą jasność od obiektywów achromatycznych i wierniejsze odwzorowanie barw. Wymagają stosowania szkieł specjalnych, dużej liczby soczewek i znacznie większej dokładności montażu, są pracochłonne i kosztowne.

Wymienione obiektywy nie mają korygowanej krzywizny pola. Przy obserwacji wizualnej jest ona częściowo kompensowana akomodacją oka, natomiast jest bardzo szkodliwa przy fotomikrografii. Należy ją wtedy kompensować aberracją okularów mikroskopu. Układami obiektywów o skorygowanej krzywiznie pola są planachromaty i planapochromaty. Korekcję krzywizny pola w tych układach osiąga się na ogół przez zastosowanie grubych menisków. Układy te, zgodnie z nazwą mają również zalety achromatów lub apochromatów. Najlepiej nadają się one do fotomikrografii w barwach naturalnych. Powinny współpracować z okularami o płaskim polu, aby uniknąć przekorygowania krzywizny pola o układzie.

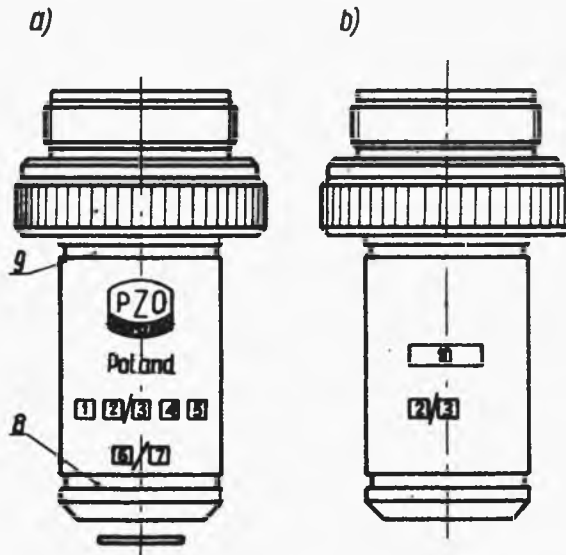
Ostatnią grupą obiektywów są obiektywy monochromatyczne - przeznaczone do badań w świetle jednobarwnym. Są one korygowane tylko dla jednej długości fali (najczęściej 275 nm lub 257,3 nm). Wykonywane są najczęściej z kwarcu, na ogół w postaci szeregu menisków aplanatycznych. Umożliwia to dobre skorygowanie aberracji geometrycznych.

Dodatkowymi wymaganiami, które powinny być spełniane przez zespoły optyczne mikroskopu, są warunki wynikające z konieczności zachowania zamienności elementów optycznych (np. zmiana obiektywu na obiektyw o innym powiększeniu w uchwycie rewolwerowym, wymiana



okularów). Oprócz opisanych w punkcie 2.1 ćwiczenia 15 wymagań gabarytowych, dochodzą wymagania na wycentrowanie (osiowość) i zogniskowanie obiektywów w mikroskopie. Będą one omówione w p.3.2.

Charakterystykę obiektywu można odczytać z oznaczeń na jego oprawie. Zostaną podane oznaczenia stosowane w Polskich Zakładach Optycznych. Oznaczenia są podawane przez oznakowanie oraz barwą masy wypełniającej grawerowane napisy i paski w dolnej i górnej części obiektywu. Kolor dolnego paska oznacza rodzaj ośrodka między obiektywem a przedmiotem, zaś kolor górnego paska określa przeznaczenie obiektywu. Obydwie informacje są również podane w formie opisu. Oznaczenia grawerowane składają się z następujących wielkości, zaznaczonych na rys.16.9 i opisanych w tabelicy 2: 1-symbol rodzaju układu optycznego (wg tabelicy 2 p.a), 2-powiększenie, 3-apertura numeryczna, 4-symbol ośrodka między przedmiotem a obiektywem (wg tabelicy 2 p.b), 5-oznaczenie przeznaczenia obiektywu (wg tabelicy 2 p.c), 6-długość tubusa, 7-grubość szkła nakrywkowego (wg tabelicy 2 p.d), 8-pasek dolny, 9-pasek górny, 10-numer fabryczny.



Rys.16.9. Rozmieszczenie oznaczeń w obiektywach PZO: a) oznaczenia główne, b) oznaczenia z drugiej strony obiektywu

Tablica 2

a	Rodzaj układu optycznego	Oznaczenia grawerowane	Kolor napisów
	Achromat Planachromat Apochromat Monochromatyczny	Bez oznaczenia Plan Apo ... A (dł.fali, dla której korygowany jest obiektyw)	czarny biały czerwony zielony
b	Rodzaj ośrodka między przedmiotem a obiektywem	Opis	kolor dolnego paska na obiektywie
	Powietrze Woda Olejek imersyjny	brak WI OI	- błękitny czarny
c	Przeznaczenie obiektywu	Opis	kolor górnego paska na obiektywie
	Obiektywy do kontrastu fazowego: dodatniego ujemnego zmiennego anoptralnego dodatniego  Obiektyw do mikroskopu polaryzacyjno-interferencyjnego  Obiektyw do mikroskopu polaryzacyjnego	Ph PhA PhZ  PhS  PI  Pol	zielony żółty biały  szary  czerwony  bez paska
d	Oznaczenie współpracy obiektywu ze szkłem nakrywkowym preparatu		
	Obiektyw do współpracy ze szkłem nakrywkowym o grubości 0,17  Obiektyw, który może pracować bez szkła lub ze szkłem nakrywkowym  Obiektyw, który musi pracować bez szkiełka nakrywkowego	0,17  -  0	

### 3.2. Parafokalność i paracentryczność obiektywów mikroskopowych

Przedmiotowe pole widzenia mikroskopu zmienia się przy zmianie obiektywu odwrotnie proporcjonalnie do powiększenia obiektywu. Podobnie głębia ostrości obiektywu maleje wraz ze wzrostem apertury. Warunki, które powinny być spełniane przy zmianie obiektywu w mikroskopie są następujące:

a) obraz środka preparatu nie powinien "uciekać" z pola widzenia przy przejściu na większe powiększenie (paracentryczność obiektywów);

b) spadek ostrości preparatu nie może być zbyt duży (parafokalność).

Odpowiednie wymagania dla obiektywów PZO są formułowane następująco:

$a_0$  - przy przejściu na powiększenie większe szczegól ze środka pola widzenia nie powinien przesunąć się więcej niż o  $2/3R$  ( $R$  promień pola widzenia),

$b_0$  - przy przejściu na większe powiększenie pomiarowe przesunięcie względem płaszczyzny najlepszej ostrości nie powinno być większe niż:

$5^x$	$10^x$	$50 \mu m$ ,
$10^x$	$40^x$	$10 \mu m$ ,
$40^x$	$100^x$	$6 \mu m$ .

Sprawdzenie obu warunków jest stosunkowo łatwe: a) bezpośrednio przy obserwacji; b) przy wykorzystaniu podziałki ruchu drobnego mechanizmu ruchu w mikroskopie.

Spełnienie obydwu warunków jest zależne od dokładności wykonania i montażu zmieniacza obiektywów oraz dokładności zachowania odległości płaszczyzny oporowej obiektywu od płaszczyzny przedmiotu i zachowania wartości ogniskowej obiektywu.

### 3.3. Badanie jakości obiektywów

#### 3.3.1. Badanie zdolności rozdzielczej obiektywów mikroskopowych

Zdolność rozdzielcza mikroskopu jest określona jako graniczna odległość dwóch punktów w płaszczyźnie przedmiotu, które mogą być jeszcze rozróżniane osobno. Teoretycznie wielkość tę określa się na gruncie teorii dyfrakcji dla światła niekoherentnego

$$br_{\min} = \frac{0,65 \lambda}{A};$$

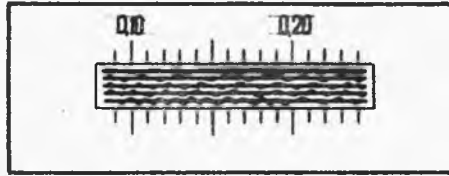
jest ona zależna od długości fali świetlnej oraz apertury mikroskopu.

Zdolność rozdzielcza obiektywu decyduje o zdolności rozdzielczej całego mikroskopu. Rzeczywista zdolność rozdzielcza obiektywu zależy od stanu korekcji aberracji układu, jakości montażu, wycentrowania soczewek, naprężeń w szkłe, zanieczyszczenia itp. Oczywiście przy badaniach należy zapewnić spełnienie warunków teoretycznych (tzn. wystarczającej apertury obiektywu i kondensora w układzie). Do sprawdzania zdolności rozdzielczej rzeczywistej obiektywów mikroskopowych używa się preparatów naturalnych o prawidłowej drobnej strukturze np. łuski motyla kapustnika, komórki wodorostów, pyłek kwiatowy lub preparatów okrzemków. Tych ostatnich zwłaszcza używa się często jako preparatów kontrolnych. Ich struktura umożliwia pomiary zdolności rozdzielczej rzędu 1,9 - 0,25  $\mu\text{m}$ . Najczęściej używany jest preparat pleurosigma angulatum o strukturze pasmowej i odległości między pasmami około 0,5  $\mu\text{m}$  (konieczna apertura wynosi 0,8 przy oświetleniu prostym i 0,6 przy skośnym). W zasadzie pomiar zdolności rozdzielczej sprowadza się do porównywania obiektywów z obiektywem przyjętym za wzorcowy.

#### 3.3.2. Badanie aberracji i błędów montażu obiektywów mikroskopowych

Do sprawdzenia jakości obrazu danego przez obiektyw można posłużyć się testami: tzw. płytką Abbego, testem punktowym oraz testem kratczkowym.

Za pomocą testu Abbego (rys.16.10) można wykryć aberrację sferyczną i chromatyzm położenia. Test taki jest klinowym szkiełkiem nakrywkowym z naniesionym szeregiem falistych linii srebrnych. Grubość szkiełka jest odciekowana podziałką od 0,09 mm do 0,24 mm. Szkiełko jest stroną posrebrzoną sklezione ze szkłem podstawowym. Badanie wymaga stosowania oświetlenia regulowanego od prostego do skośnego, toteż oświetlacz powinien mieć ruchomą przysłonę irysową przesuwaną w płaszczyźnie prostopadłej względem osi optycznej.



Rys.16.10. Test Abbego do badania jakości obiektywów mikroskopowych

Przysłona przesuwana powinna być tak wyregulowana, aby jej obraz w źrenicy wyjściowej obiektywu miał średnicę równą  $2/3$  średnicy diafragmy obiektywu.

Po centralnym ustawieniu obrazu diafragmy przesuwanej w źrenicy wyjściowej obiektywu należy ustawić mikroskop na ostre widzenie zarysu pasemka srebrowego w miejscu (wg podziałki) odpowiadającym grubości szkiełka nakrywkowego, dla której (zgodnie z opisem na oprawie - patrz p.3.1) jest skorygowany obiektyw. Przy obserwacji w oświetleniu prostym obraz pasma srebrowego powinien być ostry. Następnie należy przesuwać diafragmę prostopadle do kierunku pasm srebrowych (przejście do oświetlenia skośnego). Rozmycie ostrych krawędzi świadczy o aberracji sferycznej obiektywu, zaś ewentualne zabarwienie rozmycia - o aberracji chromatycznej. Jeśli rozmycie obrazu pojawia się po stronie pasma srebrowego przeciwnej do kierunku przesuwu diafragmy - oznacza to dodatnią aberrację sferyczną, zaś jeśli od strony oświetlonej części źrenicy - aberracja sferyczna jest ujemna. Przy obiektywach achromatycznych zabarwienie pojawia się: z jednej strony pasma - żółtozielone, z drugiej - różowofioletowe, zaś gdy aberracje chromatyczne są duże - również inne barwy. Przy apochromatach powstają tylko cienkie obwódki widma wyższych rzędów.

Bardzo czułą metodą badania obiektywów mikroskopowych jest obserwacja obrazu dyfrakcyjnego punktu świecącego. Do obserwacji należy używać silnego okularu ( $\sim 25^x$ ). Jako przedmiot mogą

służyć cząsteczki srebra w prześwitach testu Abbego (wymaga to jednak zmiany kondensora na kondensator ciemnego pola - daje on skośne oświetlenie i odwraca kontrast - cząsteczka srebra staje się świecąca). Przedmiotem może być również otworek w warstwie srebra (naniesionej chemicznie), umieszczonej - jak preparat mikroskopowy - między szkiełkiem podstawowym a nakrywkowym.

Przy idealnym skorygowaniu i bezbłędnym montażu obraz punktu powinien być plamką Airy (patrz rys.16.11). Środkowy jasny krążek powinien obejmować około 85% energii świetlnej, zaś na zewnątrz występują coraz ciemniejsze prążki kołowe. Jeśli aberracja sferyczna jest dobrze skorygowana, to przeogniskowanie mikroskopu w górę i w dół powoduje ten sam skutek - prążki jaśnieją i poszerzają się; jeśli obiektyw ma dodatnią aberrację sferyczną - przy zbliżeniu obiektywu do preparatu zewnętrzne prążki tracą ostrość i rozmywają się w poświatę, zaś przy oddaleniu obiektywu od preparatu - wzrasta ilość prążków zewnętrznych. Przy aberracji sferycznej ujemnej zjawisko przebiega



Rys.16.11. Obrazy dyfrakcyjne Airy

odwrotnie - zbliżenie preparatu i mikroskopu powoduje powstanie większej ilości prążków, zaś oddalenie - rozmycie prążków zewnętrznych.

Zbyt mała grubość szkiełka nakrywkowego powoduje powstanie aberracji sferycznej ujemnej, a zbyt duża - aberracji sferycznej dodatniej. Chromatyzm powoduje silne zabarwienie prążków dyfrakcyjnych. Samą aberrację sferyczną lepiej jest badać w świetle monochromatycznym.

Złe wycentrowanie soczewek, odchyłki kształtu powierzchni, wady w szkłe, naprężenia - lub dla punktów w polu widzenia - koma lub astygmatyzm - powodują deformację kołowości prążków, nieostrość lub ich asymetrię.

Przy obserwacji punktów na brzegu pola obraz dyfrakcyjny jest mało wyraźny. Sprawdza się, czy obraz nie rozmywa się promieniście od środka pola widzenia w podłużne pasemko.

Do badania krzywizny pola można zastosować test kratkowy (siatka o wielkości kratki  $0,1 \times 0,1$  mm na warstwie srebra). Ogniskując kolejno na środek i brzeg testu można - z różnicy odczytów na gałce ruchu drobnego - określić strzałkę krzywizny pola. Można również oceniać średnią pola widzenia ostro odwzorowanego w stosunku do promienia całego pola widzenia. Z deformacji kształtu testu można określić dystorsję (przez pomiar różnicy powiększeń na brzegu i środku pola).

Pomiary krzywizny pola i dystorsji powinny być w zasadzie przeprowadzone w układzie mikroskopu projekcyjnego, aby wyeliminować wpływ akomodacji oka na pomiar. Pomiar dotyczy wtedy jednak łącznej aberracji całego układu (obiektywu i okulara).

Opisane wyżej metody umożliwiają w zasadzie stwierdzenie obecności aberracji w układzie lub ich przybliżone oszacowanie. Dokładniejsza ocena aberracji wymaga stosowania bardziej skomplikowanych metod np. interferencyjnych lub pomiarów przy zmiennym oświetleniu monochromatycznym (dla oceny aberracji chromatycznych).

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zapoznać się z mikroskopem badawczym MB-2 i przygotować go do pracy.
2. Przeprowadzić badanie wskazanych obiektów na podstawie p.3.
3. Zapoznać się z wyposażeniem dodatkowym do mikroskopów.
4. Zapoznać się z mikroskopem stereoskopowym oraz mikroskopem metalograficznym.

#### 5. LITERATURA

- Józwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.  
Hano T.: Pomiary optyczne. Wyd.2. WNT. Warszawa 1964.

Appel L., Kowalczyk R.: Mikroskop, budowa i użytkowanie. WNT. Warszawa 1966.

Praca zbiorowa: Podstawy optyki instrumentalnej. PWT. Warszawa 1957.

Kozłowski T.: Mierniki oceny achromatycznych obiektywów mikroskopowych i współpracujących z nimi okularów. Biuletyn Optyka 3/1971.

Popielas M.: Mierniki oceny planachromatycznych, apochromatycznych i planapochromatycznych układów mikroskopowych. Biuletyn Optyka 1/1973.

Prospekty firmy PZO i Zeiss.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Zasadnicze różnice konstrukcyjne między mikroskopem MB-2 a ML-5.

Wyposażenie do fotomikrografii. Zasadnicze problemy wykonywania zdjęć obrazów mikroskopowych.

Urządzenia do rysowania obrazów mikroskopowych oraz do demonstracji obrazów.

Zasada działania i budowa mikroskopu stereoskopowego. Typy mikroskopów stereoskopowych. Sposoby zmiany powiększenia w mikroskopie stereoskopowym.

Obserwacja mikroskopowa przedmiotów nieprzezroczystych. Zasada oświetlenia przez obiektyw (oświetlenie "epi"). Konstrukcja mikroskopu metalograficznego.

Omówić rodzaje obiektywów mikroskopowych i ich cechy charakterystyczne.

Oznaczenia na oprawach obiektywów mikroskopowych.

Znaczenie parafokalności i paracentryczności dla pracy układu mikroskopowego. Wymagania techniczne.

Testy do sprawdzania jakości obiektywów mikroskopowych i sposoby ich użytkowania.

Metody badania zdolności rozdzielczej mikroskopu.

Badanie aberracji obiektywów mikroskopowych.



## Ćwiczenie 17

# SPECJALNE WYPOSAŻENIE MIKROSKOPÓW

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest przedstawienie specjalnych technik mikroskopowych do obserwacji przedmiotów fazowych: techniki kontrastu fazowego i polaryzacyjno-interferencyjnej oraz sposobów ich realizacji w układzie mikroskopu. Ćwiczenie ma również zapoznać z użytkowaniem wyposażenia specjalnego i jego zastosowaniem do badań.

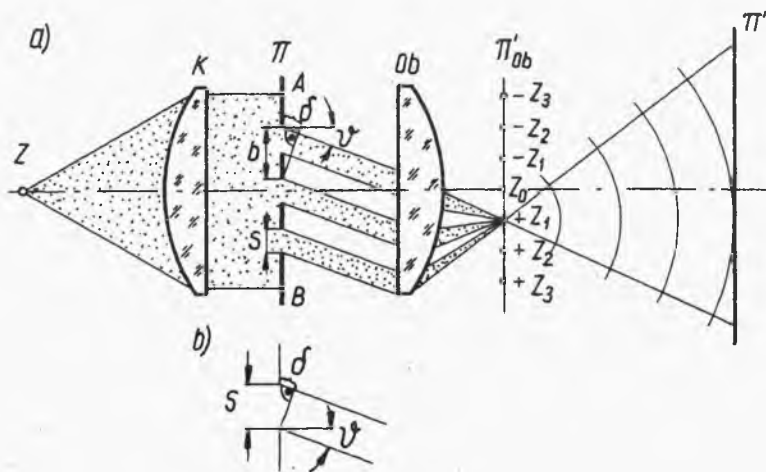
### 2. INFORMACJE OGÓLNE

W punkcie tym omówione zostaną niektóre zagadnienia dotyczące dyfrakcyjnej struktury obrazu mikroskopowego: dyfrakcyjna teoria odwzorowania w mikroskopie oraz zależność zdolności rozdzielczej mikroskopu od zjawisk dyfrakcji.

#### 2.1. Teoria Abbego powstawania obrazu mikroskopowego

Teorię tę stosuje się tylko do przedmiotów mikroskopowych nieświecących - oświetlanych przez inne źródło światła. Ocenia ona własności przedmiotu poprzez analizę jego wpływu na odwzorowanie źródła światła (wpływu dyfrakcyjnego). Działanie przedmiotu uwzględnia się jako działanie siatki dyfrakcyjnej. Siatki idealne można podzielić na amplitudowe (wywołujące zmianę amplitudy światła) lub fazowe (powodujące powstanie różnicy faz światła przechodzącego). Rzeczywiste układy są kombinacjami tych dwu rodzajów siatek. Załóżmy, że przedmiot AB jest siatką amplitudową (nieprzezroczyste paski i przezroczyste szczeliny). Jest on oświetlony za pośrednictwem kondensora K, w ognisku którego znajduje się punktowe monochromatyczne źródło światła (rys.17.1).

Każdy punkt szczeliny jest źródłem fal elementarnych rozchodzących się we wszystkich kierunkach. Tworzą one nieskończenie wiele wiązek promieni równoległych biegnących pod różnym kątem  $\psi$  do osi optycznej układu. Wiązki te tworzą po przejściu



Rys.17.1. Powstawanie obrazu mikroskopowego przedmiotów periodycznych wg teorii Abbego

przez obiektyw obraz dyfrakcyjny źródła światła (jako interferencyjne obrazy lub bardziej rozmyte):  $Z_3, Z_2, Z_1, Z_0, -Z_1, -Z_2$  itp.

Jeśli interferencja zachodzi tylko między falami elementarnymi różnych szczelin (wymagałoby to nieskończenie małej szerokości szczelin), wtedy rozkład natężenia oświetlenia w obrazie źródła (w płaszczyźnie  $\Pi'_{Ob}$ ) opisany jest zależnością

$$E = A^2 \left( \frac{\sin p \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2, \quad (1)$$

gdzie:  $A$  - amplituda ugiętych fal,

$\varphi$  - różnica faz ugiętych fal, zależna od kąta dyfrakcji, i od szerokości szczelin,

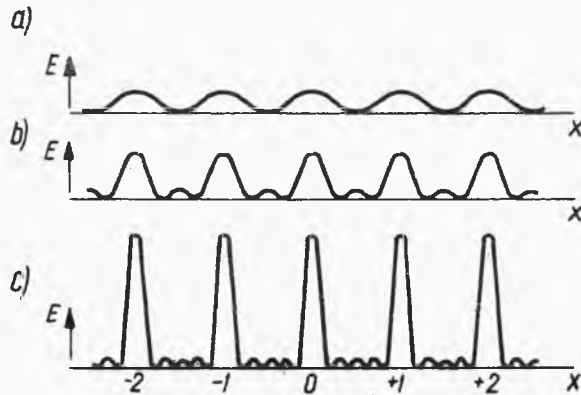
$p$  - liczba czynnych szczelin w siatce.

Różnica faz wyraża się wzorem:

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta\delta}{\lambda} = \frac{2\pi b \sin\psi}{\lambda}, \quad (2)$$

gdzie  $\Delta\delta$  - różnica drogi optycznej między promieniami z dwóch sąsiednich szczelin.

Ze wzoru na natężenie oświetlenia wynika, że dla danej liczby szczelin  $p$  wykres natężenia oświetlenia tworzy krzywą o szeregu maksimów głównych, rozdzielonych słabymi maksimumi wtórnymi w ilości  $p - 2$  (rys.17.2).



Rys.17.2. Rozkład natężenia oświetlenia w obrazie dyfrakcyjnym punktowego źródła światła dla siatki złożonej z: a) dwu; b) trzech; c) pięciu szczelin

Wzrost liczby szczelin powoduje zawężenia na wykresie szerokości głównych maksimów oraz wzrost ich jasności ( $E \sim p^2$ ). Wpływ maksimów wtórnych maleje.

Maksima główne występują w miejscach, dla których

$$\sin \vartheta_m = m \frac{\lambda}{b}, \quad (3)$$

gdzie:  $\lambda$  - długość fali,

$b$  - stała siatki dyfrakcyjnej,

$m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$  rząd dyfrakcyjny.

Maksimum rzędu zerowego ( $m = 0$ ) powstaje od światła nieugiętego ( $\vartheta_0 = 0$ ) i tworzy się w miejscu, w którym powstałby obraz źródła światła wyznaczony optyką geometryczną. Po obydwu stronach występują maksima wyższych rzędów ( $m = \pm 1, \pm 2 \dots$ ) powstałe od światła ugiętego ( $\vartheta_1 = \pm \frac{\lambda}{b}$ ,  $\vartheta_2 = \pm 2 \frac{\lambda}{b}$  itp. - dla małych kątów). Odległość między maksimami jest tym większa im mniejsza jest stała siatki.  $b$  (odległość między szczelinami).

Ponieważ kąt  $\psi$  jest zależny od długości fali, więc obrazy niezerowych rzędów dla światła białego z zewnątrz będą zabarwione na czerwono dalej od maksimum zerowego.

Jeśli szerokość szczelin siatki nie jest pomijalnie mała, to szczelina jest źródłem grupy fal między sobą koherentnych (źródło światła punktowe i monochromatyczne). Wtedy obraz ostateczny jest wypadkową obrazu od wszystkich szczelin i obrazu tworzonych przez każdą szczelinę z osobna. Wzór na rozkład natężenia oświetlenia przyjmuje postać

$$E = s^2 A^2 \underbrace{\left(\frac{\sin \frac{\psi}{2}}{\frac{\psi}{2}}\right)^2}_{C_1} \underbrace{\left(\frac{\sin p \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}\right)^2}_{C_2}, \quad (4)$$

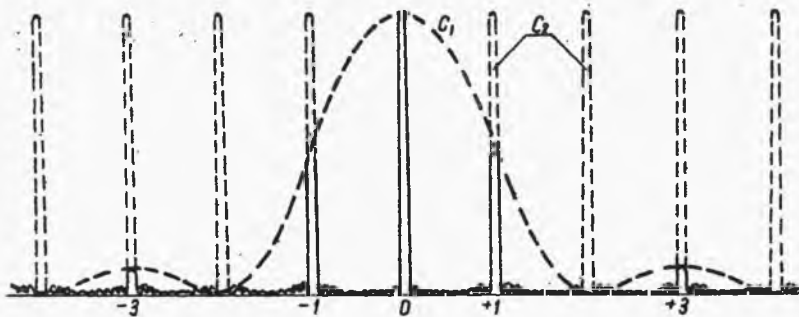
gdzie: (oprócz oznaczeń objaśnionych poprzednio)

$s$  - szerokość szczeliny,

$\psi = \frac{2\pi \delta_s}{\lambda} = \frac{2\pi s \sin \psi}{\lambda}$  - różnica faz między falami z tej samej szczeliny,

$\delta_s$  - różnica dróg optycznych między falami z obu krańców danej szczeliny.

Wykres  $E$  wygląda teraz jak na rys.17.3.



Rys.17.3. Rozkład natężenia oświetlenia w obrazie dyfrakcyjnym dla siatki o szerokich szczelinach (obraz punktowego źródła światła)

Człon  $C_1$  z poprzednio podanego wzoru jest funkcją sinc.

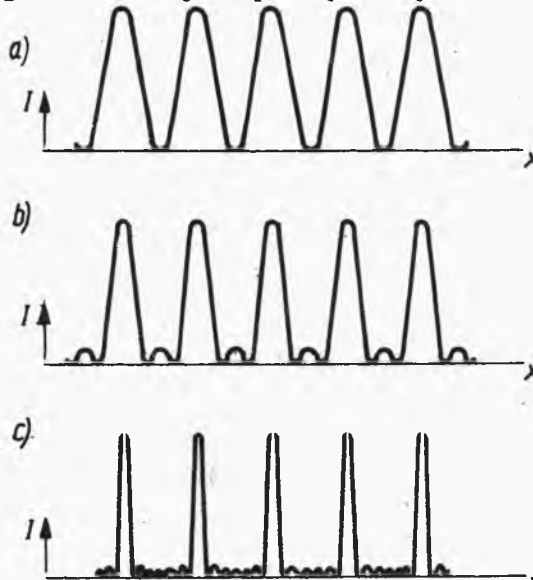
Wykres  $C_2$  przedstawiony był uprzednio (rys.17.2). Po nałożeniu wytłumione są maksima oznaczone  $m_0 \frac{b}{s}$ , gdy  $\frac{b}{s} = 2, 3, 4 \dots$ , zaś wysokość pozostałych maksimów głównych jest proporcjonalna do  $s^2$ .

Rozpatrując teraz płaszczyznę obrazu  $\pi'$  (rys.17.1) - obraz siatki dyfrakcyjnej AB powstanie podczas wtórnej interferencji fal, których źródłem (wtórnym) są dyfrakcyjne obrazy w płaszczyźnie diafragmy obiektywu  $\pi'_{ob}$ . Jeśli szczeliny siatki są wąskie, to obrazy w płaszczyźnie  $\pi'_{ob}$  można uznać za punktowe źródła światła o stałej amplitudzie emitowanych przez nie fal elementarnych. W płaszczyźnie  $\pi'$  interferuje tyle fal  $q$  - ile maksimów dyfrakcyjnych powstanie w płaszczyźnie  $\pi'_{ob}$  (płaszczyźnie źrenicy wyjściowej obiektywu).

Intensywność oświetlenia w płaszczyźnie obrazu wyrazi się wzorem

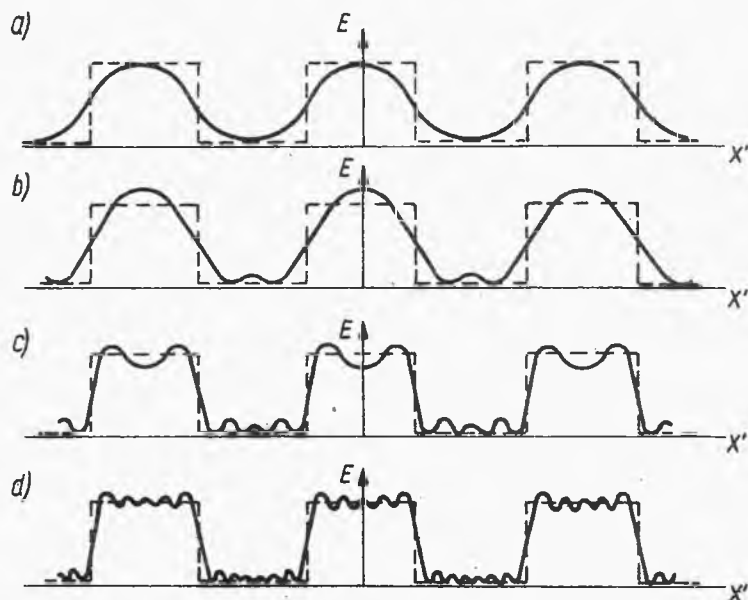
$$I = A^2 \left( \frac{\sin q \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \right)^2. \quad (5)$$

Wykres tego rozkładu jest podany na rys.17.4.



Rys.17.4. Natężenie oświetlenia w obrazie testu wąskoszczelinowego dla czynnych: a) dwóch; b) trzech; c) pięciu maksimów dyfrakcyjnych w źrenicy wyjściowej obiektywu.

Jeśli szczeliny siatki są szerokie, wtedy wzór się komplikuje. Przykładowy rozkład natężenia oświetlenia w obrazie testu Foucaulta (paski jednakowej szerokości na przemian jasne i ciemne) przedstawia rys.17.5 (a - dla dwóch, b - trzech, c - pięciu i d - ośmiu czynnych maksimum dyfrakcyjnych w obrazie źródła światła).



Rys.17.5. Rozkład natężenia oświetlenia w obrazie testu Foucaulta

Na podstawie dotychczasowych rozważań można stwierdzić, że wierność odwzorowania mikroskopowego jest tym większa, im większa jest liczba czynnych maksimum dyfrakcyjnych w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej.

Aby promienie weszły do obiektywu musi być  $\psi < 90^\circ$  więc

$$q = 2 n \sin u \frac{b}{\lambda} + 1, \quad (6)$$

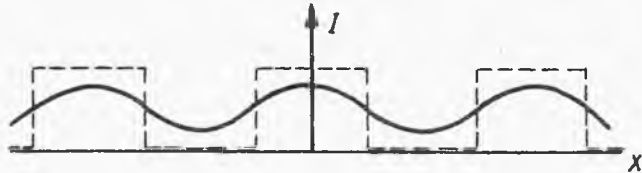
gdzie:  $n \sin u = A$  - apertura numeryczna obiektywu,

$b$  - stała siatki,

$\lambda$  - długość fali.

Jeśli źródło jest rozciągłe i niemonochromatyczne, to obraz ostateczny będzie wypadkową rozkładów natężenia oświetlenia powstałych dla każdej długości fali i każdego punktu źródła światła. W konsekwencji obraz testu Foucaulta jest podobny z zatar-

ciem wtórnych prążków dyfrakcyjnych i obniżeniem kontrastu przejścia minimum w maksimum (rys.17.6) - linia przerywana przedstawia natężenie światła w obrazie geometrycznym.



Rys.17.6. Rozkład natężenia oświetlenia w obrazie testu Foucaulta w świetle niekoherentnym

Teoria Abbego stosuje się zarówno do siatek dwumiarowych jak i do przedmiotów o dowolnej strukturze, którą można zawsze interpretować jako zbiór siatek amplitudowo-fazowych.

## 2.2. Zdolność rozdzielcza i zdolność rozpoznawcza mikroskopu

Wychodząc z teorii dyfrakcji stwierdza się, że aby obrazy dwóch punktów można było rozróżnić przez przyrząd optyczny, muszą one być rozsunięte na tyle, aby między centralnymi maksimumi plamek dyfrakcyjnych występował spadek natężenia oświetlenia. Przyjmuje się na ogół za graniczny warunek podany przez Rayleigha, aby maksimum główne jednej plamki pokryło się z pierwszym minimum drugiej plamki. Jest to warunek umowny. Zdolność rozdzielczą można wtedy określić z wzoru Hopkinsa

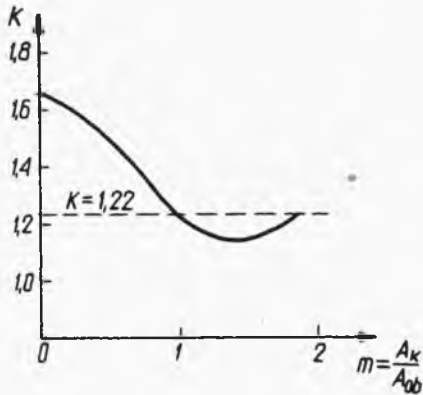
$$b_r = k \frac{\lambda}{2n \sin u}, \quad (7)$$

gdzie  $k$  - współczynnik zależny tak od stopnia koherencji światła jak i stosunku apertur obiektywu i kondensora  $m = A_k/A_{Ob}$  (rys.17.7). Dla  $m = 0$  oświetlenie jest koherentne i  $k = 1,63$  zaś dla  $m = 1$  oświetlenie staje się niekoherentne i  $k = 1,22$ .

Zdolność rozdzielczą  $b_r$  jest minimalną odległością punktów, które są rozróżniane osobno przez mikroskop. Wraz ze wzrostem koherencji oświetlenia odległość ta rośnie (zdolność rozdzielcza spada). Teoretycznie  $k = \min$  gdy  $m = 1,5$ , lecz światło rozproszone na oprawach obiektywu obniża kontrast obrazu. Z tego względu nie przekracza się praktycznie  $m = 0,7$ .

Wtedy  $k = 1,3$  a zdolność rozdzielcza mikroskopu

$$b_r = \frac{0,65 \lambda}{A_0} .$$



Rys.17.7. Zależność współczynnika  $k$  zdolności rozdzielczej od względnej apertury kondensatora  $m = \frac{A_k}{A_{ob}}$

Nieco innym pojęciem, związanym jednak ściśle ze zdolnością rozdzielczą jest zdolność rozpoznawcza mikroskopu. Określa ona minimalne wymiary przedmiotu, którego istnienie można stwierdzić przez mikroskop. Wskutek dyfrakcji obrazy przedmiotów rozmazują się i w granicznym przypadku nie dają zmiany natężenia oświetlenia w płaszczyźnie obrazu. Zdolność rozpoznawcza opisana jest wzorem formalnie podobnym do wzoru Hopkinsa

$$c = K \frac{\lambda}{2n \sin u} = K \frac{\lambda}{2A_0} , \quad (8)$$

gdzie:  $c$  - najmniejszy graniczny wymiar przedmiotu,

$K$  - współczynnik zależny od kontrastu przedmiotu, jego kształtu i stopnia koherencji oświetlenia.

Przykładowo dla obrazu przedmiotu okrągłego o kontraście równym 1:  $K = 0,16$  dla światła koherentnego,

$K = 0,25$  dla światła niekoherentnego;

dla obrazu linii o kontraście równym 1:

$K = 0,01$  dla światła koherentnego,

$K = 0,02$  dla światła niekoherentnego.

Liczby te dotyczą ciemnych przedmiotów na jasnym tle. W odwrotnym przypadku zdolność rozpoznawcza zależy tylko od ilości światła emitowanego przez przedmiot.

Należy zwrócić uwagę, że dla pierwszego przypadku zdolność rozpoznawcza rośnie wraz ze wzrostem koherencji oświetlenia.



### 3. KONTRAST FAZOWY

Większość preparatów biologicznych należy do przedmiotów fazowych, tzn. takich, które bądź pochłaniają światło w stopniu nieznacznym, bądź wcale (ściślej - pochłaniają światło w tym samym stopniu co i otaczający je ośrodek). Ze względu na różnice współczynnika załamania, przedmioty te powodują zmianę fazy światła przechodzącego lub odbitego (ze względu na różną drogę optyczną promieni w porównaniu z promieniem biegnącym tylko w ośrodku otaczającym). Często jest również niemożliwa zmiana współczynnika pochłaniania przedmiotów przez dodatkowe zabiegi jak np. barwienie. Ze względu na fakt, że oko ludzkie i inne odbiorniki są czułe na zmiany natężenia światła (zmianę amplitudy fali świetlnej) - przedmioty fazowe są dla takich odbiorników niewidoczne.

Konieczne staje się więc takie przetransformowanie energii świetlnej, aby informację zawartą w rozkładzie fazy światła po przejściu przez obiekt obserwowany przekształcić na zmiany amplitudy światła.

W tym miejscu należałoby określić pojęcie kontrastu jasności (krótko kontrastu). Określa on - najprościej mówiąc - różnicowanie jasności elementów obrazu obserwowanego w stosunku do jasności tła

$$K = \frac{I_t - I_o}{I_t}, \quad (9)$$

gdzie:  $I_o$  - jasność obiektu,

$I_t$  - jasność tła.

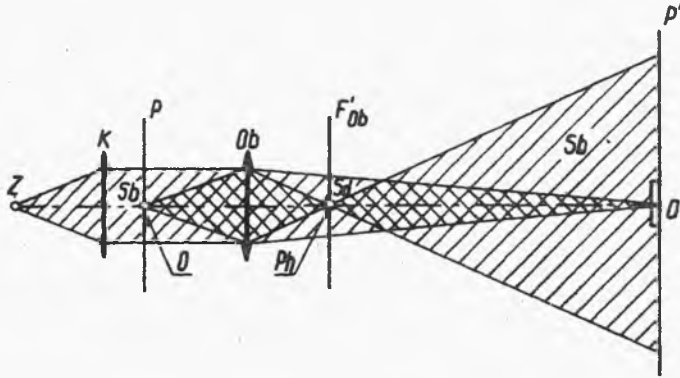
Pojęcie to nie uwzględnia różnic barwy. Pojęcie kontrastu barwnego nie zostało jednak określone ilościowo i jest tylko pojęciem jakościowym.

Można wyróżnić dwa rodzaje kontrastu: dodatni - gdy obiekt jest ciemniejszy od tła, ujemny - gdy obiekt jest jaśniejszy od tła.

Minimalna wartość kontrastu, którą może dostrzec oko ludzkie zależy od szeregu czynników: wielkości i kształtu przedmiotu, rodzaju tła, oświetlenia, wielkości źrenicy oka itd.

### 3.1. Zasada kontrastu fazowego

Ideę kontrastu fazowego obrazuje rysunek 17.8.



Rys.17.8. Zasada metody kontrastu fazowego w mikroskopie

Tak, jak w rozważaniach punktu 2.1 zakłada się, że niewielki przedmiot  $S_b$  (tym razem fazowy) jest oświetlony równoległą wiązką promieni - monochromatyczną i koherentną, daną przez punktowe źródło światła  $Z$  umieszczone w ognisku przedmiotowym kondensora  $K$ . Przedmiot  $S_b$  różni się od otaczającego środowiska współczynnikiem załamania. W układzie mikroskopu można wtedy wyróżnić wiązkę światła bezpośredniego, która skupia się w środku płaszczyzny ogniskowej obrazowej obiektywu tworząc zerowe maksimum dyfrakcyjne. Drugą wiązkę tworzy światło ugięte na przedmiocie - tworzące maksima dyfrakcyjne wyższych rzędów. Obraz utworzony w płaszczyźnie  $\pi'$  jest wynikiem interferencji światła bezpośredniego i dyfrakcyjnego. Ze względu na niską intensywność światła dyfrakcyjnego kontrast w płaszczyźnie obrazu jest bardzo mały i obraz jest niedostrzegalny. Kontrast ten mierzy się w odniesieniu od tła, tzn. do natężenia oświetlenia całej płaszczyzny obrazu (które pochodzi od światła bezpośredniego).

Dodatkowo należy zauważyć, że w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu światło bezpośrednio koncentruje się na stosunkowo niewielkiej przestrzeni objętej zerowym maksimum dyfrakcyjnym. Dzięki temu można w tej płaszczyźnie oddziaływać na światło bezpośrednie bez modyfikacji światła rozproszonego (przy założeniu małych wymiarów przedmiotu - co powoduje

silną dyfrakcję światła, a w konsekwencji dużą odległość maksimum wyższych rzędów od maksimum zerowego w płaszczyźnie  $F'_{ob}$ . Idea kontrastu fazowego zawiera się w tym, aby tak zmieniać natężenie i fazę światła bezpośredniego, żeby uzyskać maksymalny kontrast między obrazem przedmiotu a tłem. Dla zilustrowania należy przytoczyć kilka wzorów. Jeśli falę płaską po wyjściu z kondensora opisać równaniem

$$y = A \sin \omega t, \quad (10)$$

to fala przechodząca przez przestrzeń układu aż do płaszczyzny obrazowej pod nieobecność przedmiotu fazowego dozna opóźnienia fazowego

$$\psi = 2\pi L/\lambda,$$

gdzie  $L$  - droga optyczna od płaszczyzny  $\pi$  (przedmiotowej) do płaszczyzny  $\pi'$  (obrazowej).

Fala ta opisana będzie zależnością

$$y_b = A \sin(\omega t - \psi); \quad (11)$$

jest to zależność, opisująca światło bezpośrednie w układzie.

Jeśli w płaszczyźnie przedmiotu znajdzie się przedmiot fazowy - zmieni on drogę optyczną  $L$  o wartość

$$\delta = (n_1 - n)L, \quad (12)$$

gdzie:  $n_1 - n$  - różnica współczynników załamania ośrodka i przedmiotu,

$l$  - grubość przedmiotu fazowego.

Fala w płaszczyźnie  $\pi'$  wyrazi się zależnością

$$y' = A \sin(\omega t - \psi + \varphi), \quad (13)$$

gdzie:  $\varphi = 2\pi\delta/\lambda$ , co po przekształceniu i założeniu  $\varphi \ll \frac{\pi}{2}$ , skąd  $\cos \varphi = 1$ ,  $\sin \varphi = \varphi$  - daje:

$$y = A \sin(\omega t - \psi) + A \varphi \sin\left(\omega t - \psi + \frac{\pi}{2}\right) = y_b + y_d, \quad (14)$$

gdzie  $y_d = A \varphi \sin(\omega t - \psi + \pi/2)$  - jest równaniem światła dyfrakcyjnego o niewielkiej amplitudzie  $A \varphi$ .

Fala w płaszczyźnie obrazu jest więc sumą światła bezpośredniego i dyfrakcyjnego. Światło dyfrakcyjne, zależnie od znaku  $\varphi$  jest przesunięte w fazie względem światła bezpośredniego  $S_b$  o  $\pi/2$  lub  $-\pi/2$ . Natężenie światła w płaszczyźnie obrazu dla punktów, gdzie  $\varphi = 0$  wynosi  $I = A^2$ , gdy zaś  $\varphi \neq 0$ ,  $I_0 = A^2 + (A\varphi)^2$ . Ponieważ  $\varphi$  - małe, więc  $(A\varphi)^2$  jest do pominięcia i różnice oświetlenia w płaszczyźnie obrazu są pomijalnie małe.

Jeśli teraz w miejscu zerowego maksimum dyfrakcyjnego w płaszczyźnie  $F'_{Ob}$  zostanie umieszczona płytko fazowa  $Ph$  zmieniająca fazę światła bezpośredniego  $S_b$  o  $\pi/2$  (płytko fazowa dodatnia) lub  $-\pi/2$  (płytko fazowa ujemna). Wtedy

$$y'_b = A \sin \left( \omega t - \psi \pm \frac{\pi}{2} \right),$$

a sumaryczną falą w płaszczyźnie obrazowej

$$y'' = y_d + y'_b = A(1 \pm \varphi) \sin \left( \omega t - \psi \pm \frac{\pi}{2} \right). \quad (15)$$

W przypadku tym jasność tła nie ulega zmianie, natomiast natężenie światła w obszarze obrazu przedmiotu fazowego wyraża się zależnością

$$I_0 = A^2(1 \pm \varphi)^2 \approx A^2(1 \pm 2\varphi) \quad (16)$$

i jest różne od jasności tła. Kontrast jasności określa zależność

$$K = \frac{I_t - I_0}{I_t} = \frac{A^2 - A^2(1 \pm 2\varphi)}{A^2} = \mp 2\varphi. \quad (17)$$

Znak w równaniu zależy:

- a) od zastosowanej płytki fazowej (dodatniej lub ujemnej);
- b) od znaku przesunięcia fazowego  $\varphi$  (wprowadzonego przez obserwowany przedmiot fazowy).

Dla niezbyt dużych przesunięć fazowych zależność ukazuje tabl. 1.

Kontrast można znacznie zwiększyć jeśli jednocześnie ze zmianą fazy światła bezpośredniego o  $+\pi/2$  osłabi się jego natężenie (płytki fazowe absorbcyjne). Z analizy wynika, że jes-

li światło bezpośrednio zostanie osłabione  $N$  razy wtedy

$$K = \mp 2\varphi\sqrt{N}, \quad (18)$$

kontrast zwiększa się  $\sqrt{N}^x$ .

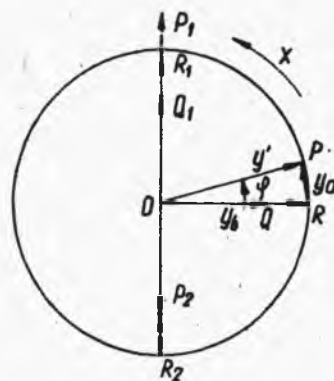
Tablica 1

Współczynnik załamania	Płytką fazowa dodatnia	Płytką fazowa ujemna
$n > n_1$ $0 > \varphi \gg -\frac{\pi}{2}$	ciemny obraz na jasnym tle (kontrast dodatni)	jasny obraz na ciemnym tle (kontrast ujemny)
$n < n_1$ $0 < \varphi \ll \frac{\pi}{2}$	obraz jaśniejszy od tła (kontrast ujemny)	obraz ciemniejszy od tła (kontrast dodatni)

Jeśli rozpatrywać kontrast fazowy wektorowo (rys.17.9) - można go pokrótce opisać jako zmianę długości wektora wypadkowego wektorów (których długość oznacza amplitudę, a kierunek - fazę) światła bezpośredniego i dyfrakcyjnego przez zmianę kierunku składowej światła bezpośredniego.

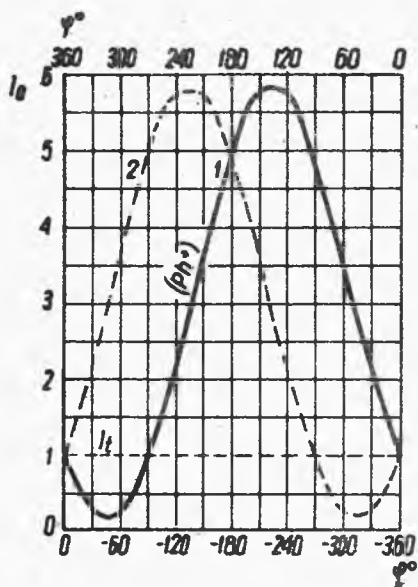
Dla małych przesunięć fazowych  $\varphi$  wektor światła dyfrakcyjnego  $y_d$  jest w przybliżeniu prostopadły do wektora światła bezpośredniego  $y_b$ . Zmiana fazy światła bezpośredniego tak, aby kierunek jego wektora był równoległy do kierunku  $y_d$  maksymalizuje lub minimalizuje wektor wypadkowy  $OP$  ( $OP_1, OP_2$ ), zaś zmiana długości wektora  $y_b$  umożliwia uzyskanie maksymalnego kontrastu w obrazie.

W przypadku uogólnionym dla przedmiotów silnie łamiących lub pochłaniających światło (amplitudowo-fazowych) - nie można założyć prostopadłości wektora światła dyfrakcyjnego względem bezpośredniego. Zastosowanie więc zmiany fazy światła bezpośredniego o  $\pi/2$  nie daje optymalnego zwiększenia kontrastu, a w niektórych przedziałach przesunięcia fazowego światła dy-



Rys.17.9. Interpretacja wektorowa kontrastu fazowego

frakcyjnego  $\varphi$  może powstać nawet odwrócenie kontrastu (tzn. zamiast spodziewanego kontrastu dodatniego wystąpi ujemny lub



Rys.17.10. Natężenie światła w obrazie przedmiotu fazowego w zależności od przesunięcia fazy wniesionego przez przedmiot

odwrotnie). Obrazuje to wykres na rys.17.10, na którym przedstawiono krzywe natężenia światła w obrazie  $I_0$  w zależności od przesunięcia fazowego  $\varphi$  wprowadzonego przez przedmiot dla płytki fazowej ujemnej i dodatniej. Poziom  $I_t = 1$  odpowiada umownie natężeniu oświetlenia tła.

Wykres ten dotyczy przedmiotów o współczynniku załamania wyższym od współczynnika załamania ośrodka  $n > n_1$ . Jeśli  $n < n_1$  wykres wygląda podobnie z tym, że płytki fazowe: dodatnia i ujemna zamieniają się rolami.

Ze wzrostem absorpcji płytki fazowej kontrast silnie łamiących przedmiotów fazowych

spada. Optymalne osłabienie światła bezpośredniego w zależności od przesunięcia fazowego  $\varphi$  przedmiotu przezroczystego można określić z warunku Richtera

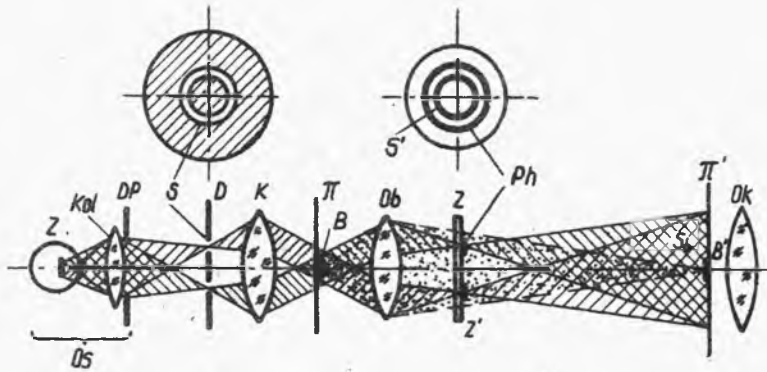
$$\frac{1}{N} = 4 \sin \frac{2\varphi}{2} . \quad (19)$$

Na zakończenie tego punktu należy zauważyć, że przytoczone rozważania były słuszne dla przedmiotów małych - o silnym efekcie dyfrakcyjnym. Dla przedmiotów dużych - słabo uginających światło - wyższe maksima dyfrakcyjne w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej obiektywu  $P'_0$  (rys.17.8) leżą blisko maksimum zerowego. Nie można więc oddziaływać na światło bezpośrednie bez upośledzenia światła dyfrakcyjnego. Ujemnie wpływa to na wierność odwzorowania. Obrazy przedmiotów rozciągniętych są kontrastowe tylko na krawędziach, zaś w środku są tak samo jasne jak tło. Wierność odwzorowania jest więc tym lepsza, im przedmiot jest

mniejszy. Wpływa na nią również szereg czynników: rozmiary płytki fazowej i jej absorbcja, apertura obiektywu i kondensora, rodzaj oświetlenia oraz rozproszenie światła w układzie itd.

### 3.2. Techniczna realizacja urządzenia kontrastu fazowego

Ógólny schemat układu, realizującego kontrast fazowy ukazuje rys.17.11.

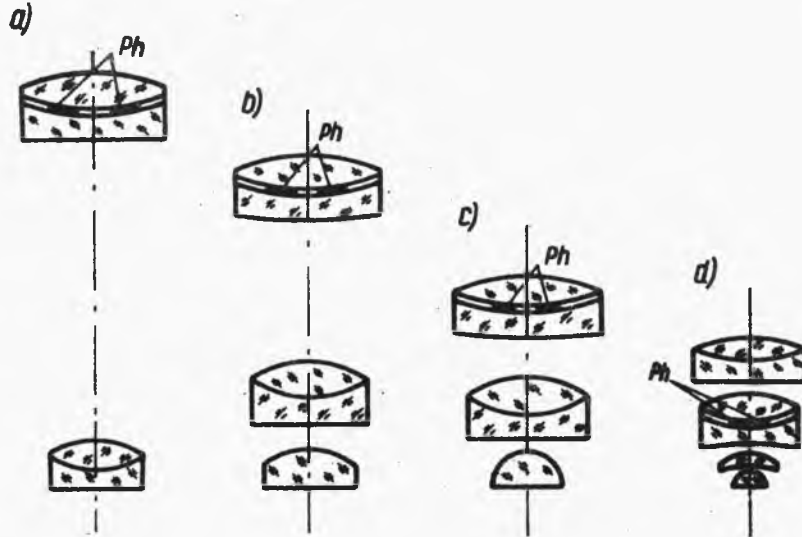


Rys.17.11. Zasada budowy mikroskopu z kontrastem fazowym (typu Zernicka)

Pierścieniowy kształt diafragmy aperturowej kondensora oraz płytki fazowej daje możliwość lepszego wykorzystania apertury kondensora, przepuszcza więcej światła, dzięki symetrycznie we wszystkich kierunkach. Średnica i szerokość pierścieni muszą być dobrane w celu uzyskania optymalnej zdolności rozdzielczej i kontrastu. Szerokość szczeliny pierścieniowej jest kompromisem między wpływem aberracji układu i ograniczeniem światła bezpośredniego i dyfrakcyjnego - a niebezpieczeństwem wystąpienia dodatkowych efektów dyfrakcyjnych w diafragmie i na pierścieniach fazowych.

Płytki fazowa i diafragma aperturowa kondensora muszą leżeć w płaszczyznach wzajemnie sprzężonych układu kondensor-obiektyw. Dąży się do tego, aby pierścienie fazowe umieszczać między kolejnymi elementami układu obiektywu, nawet kosztem lekkiego odsunięcia ich od płaszczyzny ogniskowej obrazowej obiektywu (ewentualne odchylenie koryguje się przesunięciem

diafragmy względem kondensora). Rys.17.12 przedstawia obiektywy fazowe produkcji PZO: a)  $10^{\times}$ , b)  $20^{\times}$ , c)  $40^{\times}$ , d)  $100^{\times}$  (imersyjny).



Rys.17.12. Obiektywy fazowe PZO (opracowane przez M.Plutę)

PZO produkuje 4 typy urządzeń fazowych stosowanych jako wyposażenie do zwykłego mikroskopu biologicznego. Urządzenie takie jest złożone z kompletu obiektywów, kondensora z pierścieniowymi diafragmami w uchwycie rewolwerowym, ustawczego mikroskopu pomocniczego i kluczyka.

Oznaczenia obiektywów podaje tablica w ćwiczeniu 16, p.3.1. Nazwy urządzeń stosowane przez PZO są następujące:

- a) KF - urządzenie do kontrastu fazowego dodatniego typu Zernike,
- b) KFA - urządzenie do kontrastu fazowego ujemnego (typu anoptralnego),
- c) KFS - urządzenie do kontrastu fazowego dodatniego (typu anoptralnego),
- d) KFZ - urządzenie do kontrastu fazowego zmiennego.

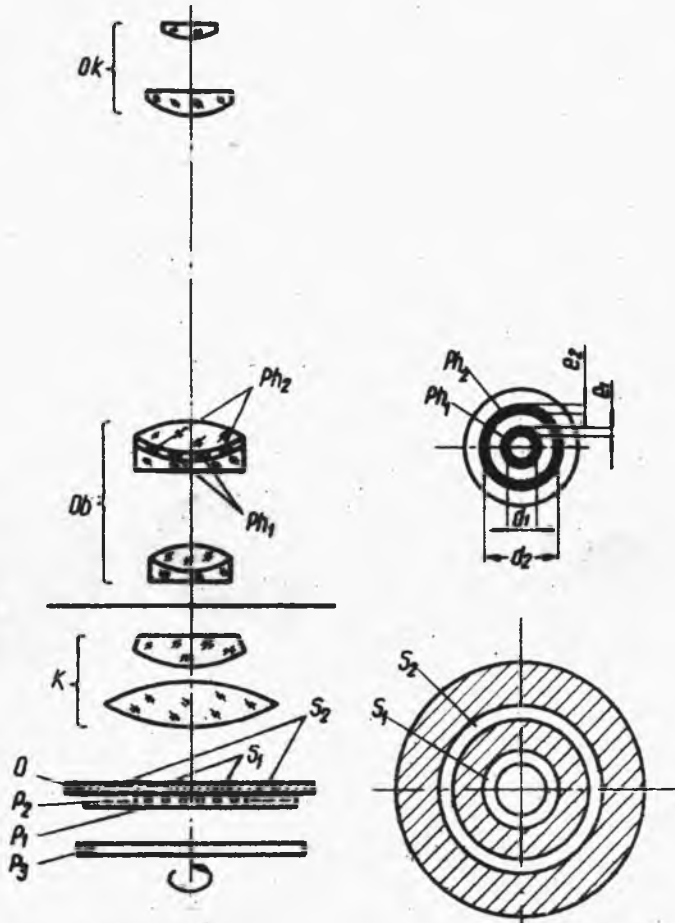
Pierwsze trzy typy urządzeń różnią się rodzajem materiału, z którego wykonano płytkę fazową. W najstarszym historycznie typie (a) opracowanym przez F.Zernicke rolę płytki fazowej pełni warstwa metaliczno-dielektryczna (chromu lub aluminium,



kriolit lub fluorok magnezu). Spełnia ona rolę dodatniej płytki fazowej o przepuszczalności rzędu 15 - 30% i jest zaklejo-  
na balsamem kanadyjskim.

W typach (b) i (c) - na podstawie doświadczeń opracowanych przez M.Plutę z Centralnego Laboratorium Optyki, warstwy wykonuje się z sadzy lub sadzy i warstwy dielektryka. Materiał ten nie wykazuje szkodliwych odbić światła (jaki występuje na warstwach metalicznych). Daje to lepszy kontrast i plastyczność obrazu. Układy takie noszą nazwę anoptralnych (nie odbijających).

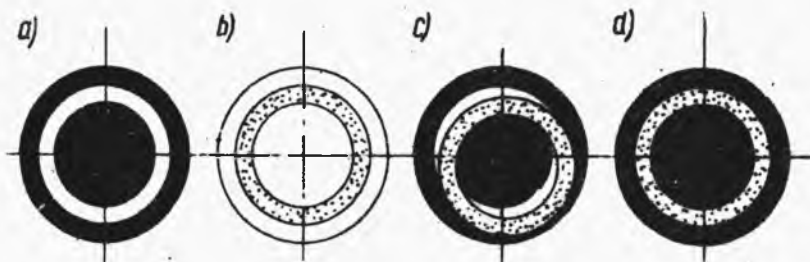
Urządzenie kontrastu zmiennego KFZ zbudowane jest nieco inaczej. Obrazuje to rys.17.13.



Rys.17.13. Mikroskop fazowy z kontrastem zmiennym

Diafragma aperturowa oświetlacza w tym układzie składa się z dwóch koncentrycznych szczelin pierścieniowych  $S_1$  i  $S_2$ , którym w obiektywie odpowiadają 2 pierścienie fazowe  $Ph_1$  i  $Ph_2$  (jeden z nich jest dodatni, drugi ujemny). Ponadto szczeliny  $S_1$  i  $S_2$  są przysłonięte polaryzatorami  $P_1$  i  $P_2$  - o skrzyżowanych płaszczyznach drgań światła. Dodatkowy polaryzator  $P_3$  jest obrotowy i umożliwia - zależnie od położenia jego płaszczyzny drgań - przepuszczanie światła przez szczelinę  $S_1$ ,  $S_2$  lub częściowo przez każdą z nich. Ponieważ każda ze szczelin  $S_1$  i  $S_2$  jest optycznie sprzężona z inną płytką fazową, więc urządzenie umożliwia płynne przechodzenie od kontrastu fazowego ujemnego przez mieszany do dodatniego i dobranie optymalnych warunków obserwacji przedmiotu. Pewną wadą układu są duże straty światła - co wymaga stosowania silnych układów oświetlających.

Przy pracy z układami kontrastu fazowego istotną jest regulacja układu - opisana dokładnie w instrukcjach użytkowania urządzeń. Szczególnie istotne jest "zgranie" obrazów szczeliny diafragmy aperturowej oświetlacza z pierścieniem fazowym obiektywu. Do tego celu służy mikroskop pomocniczy, znajdujący się w komplecie oraz uruchamiany kluczem mechanizm centrujący diafragmy w uchwycie rewolwerowym. Właściwe ustawienie szczeliny ukazuje rys.17.14.



Rys.17.14. Centrowanie pierścieni fazowych

#### 4. MIKROSKOP INTERFERENCYJNO-POLARYZACYJNY

Niektóre zagadnienia teoretyczne związane z tym tematem zostały już omówione w innych ćwiczeniach. Należą do nich: zja-

wiska interferencji i rodzaje interferometrów (ćwiczenia 12 i 13) i polaryzacji światła, zasady działania i rodzaje polaryzatorów (ćwiczenie 14). Dlatego też nie będą one powtarzane tutaj po raz drugi, aczkolwiek zapoznanie się z nimi jest konieczne przy omawianiu zagadnienia mikroskopii interferencyjno-polaryzacyjnej.

#### 4.1. Zasada mikroskopii interferencyjnej

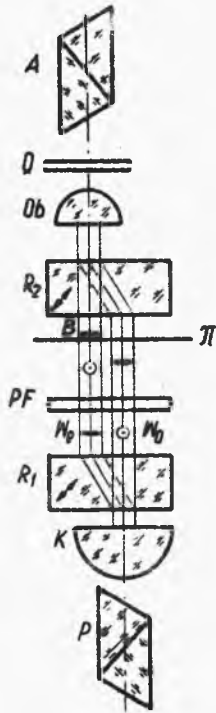
Mikroskopia interferencyjna ma szereg zalet w porównaniu z innymi metodami mikroskopii, stosowanymi do obserwacji przedmiotów fazowych. Zapotrzebowanie na tę metodę wiąże się w biologii głównie z faktem, że zawartość suchej masy w komórkach lub tkankach wiąże się z różnicą drogi optycznej - łatwą do wyznaczenia interferometrycznie. Zaletą mikroskopu interferencyjnego w porównaniu z metodą kontrastu fazowego jest możliwość badań nie tylko jakościowych, ale również ilościowych. Można za jego pomocą wyznaczyć również grubość przedmiotów fazowych, współczynnik załamania badanych obiektów, stężenie substancji, kształt mikropowierzchni itp.

Tak jak w każdym interferometrze również w mikroskopie interferencyjnym należy doprowadzić do interferencji czoła fali, zniekształconego po przejściu przez przedmiot obserwowany, z falą odniesienia. Istnieje szereg mikroskopów interferencyjnych opartych na zasadzie interferometrów dwupromieniowych Michelsona, Jamina, Mach-Zehndera, Fizeau itp. W niniejszym ćwiczeniu zapoznamy się z mikroskopami opartymi na interferencji światła spolaryzowanego (stąd nazwa mikroskopów interferencyjno-polaryzacyjnych). Zaletami tych układów w porównaniu ze wspomnianą poprzednio grupą są: możliwość łatwego zaadaptowania zwykłych mikroskopów, prostota budowy i łatwość użytkowania, oraz - co najistotniejsze - fakt, że na ogół należą one do układów nierozregulowujących się.

Zasadę tych mikroskopów łatwo można omówić na przykładzie układu interferencyjno-polaryzacyjnego Lebiediewa (rys.17.15).

Polaryzator P i analizator A są pryzmatami polaryzacyjnymi,  $R_1$  i  $R_2$  - płytki dwójkomne (kalcytowe lub kwarcowe) wycięte pod kątem  $45^\circ$  do osi optycznej kryształu. Wiązka pro-

mieni spolaryzowanych przez polaryzator P wychodzi z kondensora K jako równoległa (płaskie czoło fali), zostaje rozdwo-



jona przez płytkę  $R_1$  na wiązkę zwyczajną  $W_0$  i nadzwyczajną  $W_0'$ , spolaryzowane wzajemnie prostopadle. Półfalówka PF zmienia różnicę dróg optycznych obydwu wiązek o  $\lambda/2$  i obraca ich płaszczyzny polaryzacji o  $90^\circ$  (wiązki zmieniają się rolami). W drugiej płytce dwójłomnej wiązka nadzwyczajna zachowuje się jak zwyczajna, zaś zwyczajna - jak nadzwyczajna. Różnica dróg optycznych między falami wywołana przez  $R_1$  - zostaje w płytce  $R_2$  skompensowana - pozostaje tylko różnica dróg optycznych  $\lambda/2$  wywołana przez PF.

Tak mała różnica dróg optycznych umożliwia obserwację interferencji w świetle białym. Wiązka po opuszczeniu płytki dwójłomnej  $R_2$  jest spolaryzowana liniowo i zostaje wygaszona przez analizator A ustawiony tak, że jego płaszczyzna drgań jest prostopadła do płaszczyzny drgań polaryzatora P.

Rys.17.15. Układ interferencyjno-polaryzacyjny Lebediewa

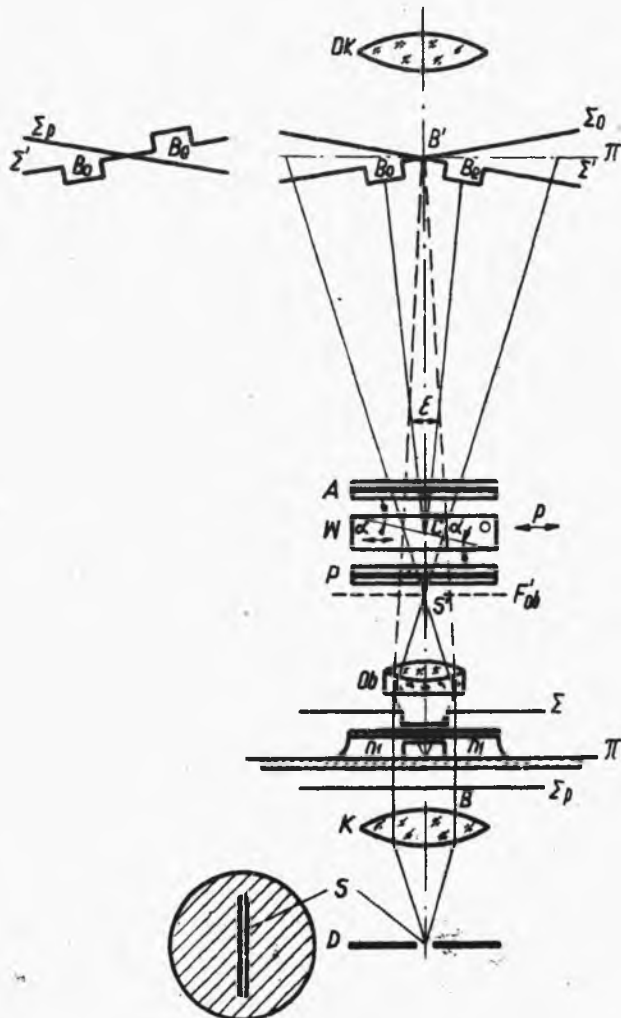
Jeśli na drodze jednej wiązki znajdzie się przedmiot B - wprowadzający zniekształcenie czoła fali (przesunięcie fazowe) - zmieni to stan polaryzacji i wiązka nie zostanie całkowicie wygaszona przez analizator - w polu widzenia pojawi się jasny obraz na ciemnym tle. Jeśli przed analizatorem umieścić płytkę ćwierćfalową Q - można zmienić wiązkę zaburzoną (ogólnie o eliptycznej polaryzacji) na wiązkę liniowo spolaryzowaną o innym kierunku polaryzacji. Obracając analizator aż do wygaszenia tej wiązki i mierząc kąt obrotu - można wyznaczyć różnicę drogi optycznej wywołaną przez przedmiot.

W przypadku mikroskopu Lebediewa jak i w szeregu innych typów, przez przedmiot przechodzi jedna lub obie z rozdwojonych wiązek promieni (zależy to oczywiście do rozdwojenia wiązek oraz wymiarów przedmiotu). Istnieje jednak szereg rozwiązań, w których wiązka zostaje rozdzielona dopiero po przejściu przez płaszczyznę przedmiotu i obiektyw układu. Do ciekawszych

należy rozwiązanie oparte na wykorzystaniu pryzmatu Wollastona, do których należy również mikroskop MPI, wykorzystywany w niniejszym ćwiczeniu.

#### 4.2. Mikroskop interferencyjno-polaryzacyjny z pryzmatem Wollastona

Zasada działania pryzmatu Wollastona została omówiona w ćwiczeniu 14. Schemat mikroskopu przedstawia rys.17.16.



Rys.17.16. Schemat mikroskopu interferencyjno-polaryzacyjnego z pryzmatem Wollastona

W płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej kondensora umieszczona jest przesłona D ze szczeliną S równoległą do krawędzi łamiących pryzmatu Wollastona, który znajduje się za obiektywem - między polaryzatorem P, a analizatorem A. Równoległa wiązka światła koherentnego oświetla przedmiot B. Światło bezpośrednio (patrz punkt 3) po przejściu przez obiektyw tworzy w jego płaszczyźnie obrazowej ogniskowej - obraz szczeliny S'.

Obraz szczeliny powinien być odpowiednio usytuowany względem płaszczyzny lokalizacji prążków interferencyjnych w pryzmacie Wollastona, pracującym w świetle spolaryzowanym między polaryzatorem i analizatorem. (Płaszczyzna ta znajduje się wewnątrz pryzmatu. Zerowy prążek interferencyjny powstaje w tym miejscu pryzmatu, dla którego grubość pryzmatów składowych jest jednakowa - czyli różnica dróg optycznych dla promienia zwyczajnego lub nadzwyczajnego jest równa zero).

Jeśli zbieżna wiązka światła bezpośredniego za obiektywem pada tak, że punkt jej zbieżności (obraz szczeliny S') pokrywa się z płaszczyzną lokalizacji prążków - a ściślej z punktem rozwidlenia promieni C, wtedy promień zwyczajny i nadzwyczajny wychodzą z pryzmatu praktycznie ze stałą różnicą faz i w płaszczyźnie obrazowej mikroskopu  $\pi'$  uzyskuje się jednorodne pole interferencyjne (jeśli obraz szczeliny pokrywa się z zerowym prążkiem interferencyjnym - wtedy pole jest ciemne - gdy polaryzator i analizator są skrzyżowane, lub jasne - gdy są równoległe). Jeśli szczelina "wycina" inny - barwny prążek interferencyjny, wtedy barwa taka odpowiada barwie interferencyjnej danego prążka (zależnej od różnicy dróg optycznych między promieniem nadzwyczajnym a zwyczajnym. W szczególności gdy  $\Delta = 0,56 \mu\text{m}$  - uzyskuje się jednobarwne pole o barwie purpurowej - jest to tzw. barwa czuła, która przy nieznacznej zmianie różnicy drogi optycznej szybko przechodzi w barwę fioletową lub czerwoną).

Jeśli natomiast obraz szczeliny S' nie leży w płaszczyźnie lokalizacji prążków - wtedy dla fali nadzwyczajnej i zwyczajnej wychodzących z pryzmatu - różnica faz nie jest stała (fale są skrzyżowane jak na rysunku  $\Sigma_e$  i  $\Sigma_o$ ) i w płaszczyźnie  $\pi'$  występują prążki interferencyjne.

Powyższe uwagi dotyczyły światła bezpośredniego. Jeśli rozpatrzeć teraz światło dyfrakcyjne - ugięte na przedmiocie, to przejdzie ono przez pryzmat Wollastona w innym miejscu niż światło bezpośrednie (linie przerywane). Powoduje to powstanie dla tego światła innej różnicy faz promieni nadzwyczajnego i zwyczajnego niż dla światła bezpośredniego. Daje to inne barwy interferencyjne w metodzie z jednobarwnym tłem (metoda a) lub też odchylenie lub zniekształcenie prążków w polu prążkowym (metoda b).

Ponieważ światło jest rozdzielone po przejściu przez przedmiot, więc informacje o przedmiocie zawarte są w każdej fali. Po interferencji powstają w polu widzenia 2 obrazy przedmiotu odpowiadające zaburzeniom każdej z fal interferencyjnych  $B_o$  i  $B_e$ .

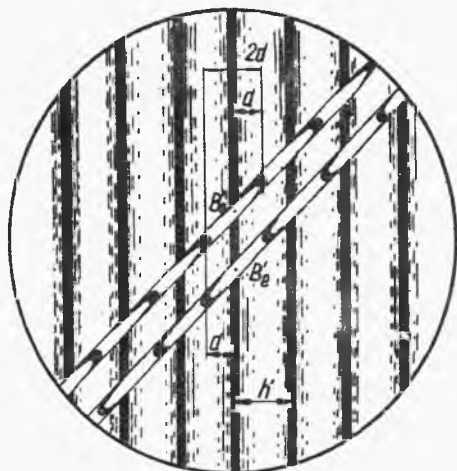
W praktyce rozróżnia się 3 metody obserwacji w mikroskopie polaryzacyjno-interferencyjnym.

#### 4.3. Metody obserwacji w mikroskopie polaryzacyjno-interferencyjnym

##### 4.3.1. Metoda prążkowa

Zakładając fazowy przedmiot B (rys.17.16) w postaci izotropowego paska o stałej grubości, o współczynniku załamania różnym od współczynnika załamania ośrodka otaczającego - można stwierdzić, że fala płaska  $\Sigma_p$  po wyjściu z kondensora ulega odkształceniu do postaci  $\Sigma'$ . Po przejściu przez obiektyw fala zostaje spolaryzowana liniowo przez polaryzator, a następnie rozdwojona przez pryzmat Wollastona - ustawiony tak, że jego krawędź łamiąca tworzy z płaszczyzną polaryzacji polaryzatora kąt  $45^\circ$ . Fale nadzwyczajne i zwyczajne są spolaryzowane względem siebie prostopadle, a po przejściu przez analizator (również ustawiony pod kątem  $45^\circ$  do płaszczyzn drgań obu fal) powstają dwie fale o równoległych kierunkach drgań, ulegających interferencji. Ponieważ środek obrazu szczeliny  $S'$  nie pokrywa się z płaszczyzną prążków interferencyjnych pryzmatu Wollastona, więc po wyjściu z analizatora różnica faz obu fal nie jest stała (fale nie są równoległe). W efekcie w płaszczyźnie  $\pi'$  powstają prostoliniowe prążki interferencyjne znie-

kształcone w przeciwnych kierunkach w obrazach obserwowanego przedmiotu (rys.17.17).



Rys.17.17. Prążkowe pole widzenia w mikroskopie interferencyjno-polarizacyjnym (obraz podłużnego włókna)

Jeśli zinterpretować zjawisko również jako interferencję fali płaskiej  $\Sigma_p$  i fali  $\Sigma'$  - o fazie przyspieszonej w jednym obrazie przedmiotu zaś opóźnionej w drugim. Ponieważ odchylenie prążków zachodzi w obu obrazach w przeciwnych kierunkach, więc mierząc podwójne odchylenie prążków  $2d$  można podwoić dokładność pomiaru. Zależność odchylenia  $d$  od odległości między prążkami niezniekształconymi w układzie  $h'$  oraz grubości przedmiotu i współczynników załamania: przedmiotu

$n$  i środowiska  $n_1$ , wyraża się zależnością

$$d = \frac{h' l(n_1 - n)}{\lambda} \quad (20)$$

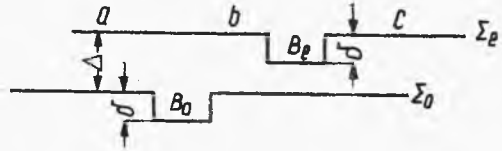
Umożliwia to wyznaczenie  $n$  lub  $l$ , a przy zastosowaniu dwóch ośrodków odniesienia (np. 2 rodzajów cieczy imersyjnej) można z układu równań z 2 niewiadomymi wyznaczyć  $d$  i  $n$ . Metoda prążkowa nadaje się do badań przedmiotów podłużnych lub drobnych, które mogą być co najmniej w połowie rozdwojone.

#### 4.3.2. Metoda jednorodnego pola z dużym rozdwojeniem obrazu

Metoda ta, podobnie jak i metoda dyferencjalna (p.4.3.3) jest realizowana wtedy, gdy jak już wspomniano, obraz szczeliny  $S'$  leży w płaszczyźnie lokalizacji prążków pryzmatu Wollastona. Przy zbliżaniu pryzmatu do obrazu szczeliny (przechodząc od metody prążkowej) prążki się rozszerzają, do momentu kiedy 1 prążek rozprzestrzenia się na całe pole widzenia o barwie takiej, jaką  $\Sigma$  pola interferencyjnego pryzmatu Wollastona wycina obraz szczeliny. Powierzchnie falowe  $\Sigma_o$  i  $\Sigma_e$  (rys. 17.18) są do siebie równoległe.



Różnica faz między falami poza obszarem zaburzenia w każdej fali jest stała, co odpowiada stałej barwie interferencyjnej w obszarze jednego z obrazów (zwyčajnego  $B_0$  lub nadzwyczajnego  $B_e$  - zależnie od wzajemnego usytuowania fal  $\Sigma_e$  i  $\Sigma_0$ ) różnica faz zwiększa się, zaś w drugim obrazie zmniejsza się o różnicę dróg optycznych wprowadzoną przez przedmiot fazowy, co zmienia barwę interferencyjną w tym obszarze.



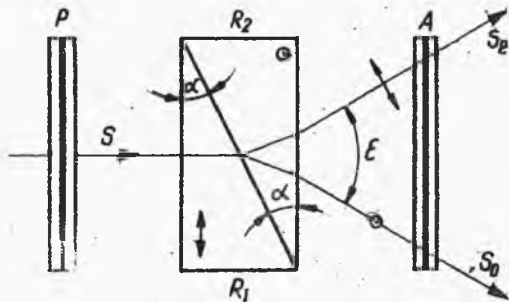
Rys.17.18. Metoda jednorodnego pola interferencyjnego z całkowitym rozdwojeniem obrazu

Poprzeczne przesuwanie pryzmatu Wollastona powoduje ruch prążków interferencyjnych na tle obrazu szczeliny - co zmienia tak barwę tła jak i barwy obrazów rozdwojonych oraz kontrast. Ze zmiany barwy można wnioskować o różnicy dróg optycznych. Metoda pomiaru polega na doprowadzeniu zabarwienia obrazów zwyčajnego i nadzwyczajnego do wyjściowego zabarwienia tła oraz pomiarze dokonanego przy tym przesunięciu pryzmatu (można też wykorzystać ciemną barwę zerowego prążka interferencyjnego (przy skrzyżowanych polaryzatorze i analizatorze). Różnica dróg optycznych wyraża się zależnością

$$\delta = \frac{1}{2} (p_2 - p_1) \Delta p, \quad (21)$$

gdzie:  $\Delta p = \lambda_n$  - różnica drogi optycznej na jednostkę przesuwu pryzmatu,

$h$  - odległość międzyprążkowa.



Rys.17.19. Pryzmat dwójkromny Wollastona

Należy zwrócić uwagę, na to, że aby dla obserwowanych przedmiotów pomiary były przeprowadzane w tych samych obszarach obrazów rozdwojonych (ogólnie różnica fazy jest zmienna w obszarze przedmiotu) - co wskazuje, że do dokonania pomiaru obrazy muszą być rozdwojone co najmniej w 50%. W tym przypadku nie

zachodzące na siebie obszary odpowiadają przeciwległym obszarom przedmiotu. Rozdwojenie obrazu jest zależne od kąta łamiącego  $\alpha$  przyzmatu dwójłomnego (rys.17.19).

Im mniejszy jest kąt  $\alpha$  - tym mniejszy jest zakres pomiaru, a większa jego dokładność.

#### 4.3.3. Metoda dyferencjalna

Metoda ta różni się od poprzedniej tym, że kąt łamiący przyzmatu Wollastona doбира się tak, iż rozdwojenie fal interferujących jest znikomo małe - rzędu zdolności rozdzielczej mikroskopu.

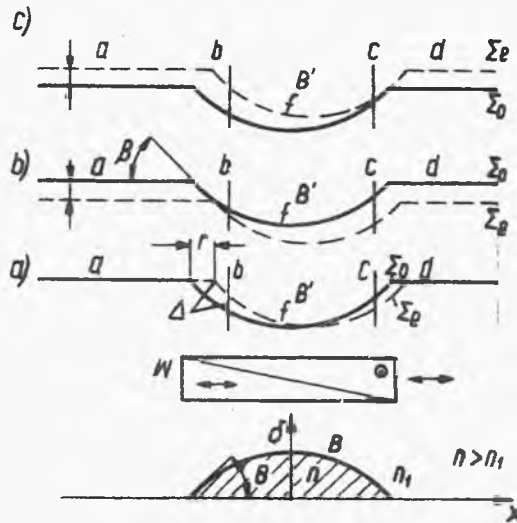
Żądana wartość kąta łamiącego przyzmatu jest więc odwrotnie proporcjonalna od iloczynu  $A f_{ob}$  i waha się od 20' dla obiektywów o małym powiększeniu do 40' dla obiektywów o dużym powiększeniu.

Istotę zjawiska oraz sposób pomiaru różnicy drogi optycznej najlepiej przeanalizować na przykładzie przedmiotu rozciągniętego B o łagodnym spadku drogi optycznej. Pomiar najlepiej jest wykonywać dla wyjściowego położenia przyzmatu Wollastona ustawionego tak, że z obrazem szczeliny S' (rys.17.16) pokrywa się ciemny prążek interferencyjny pola interferencyjnego przyzmatu.

Wzajemne położenie fali zwyczajnej i nadzwyczajnej przedstawia rys.17.20. Położenie wyjściowe fal przedstawia rysunek a; tło oraz środek przedmiotu (obszary a, d, f) są ciemne, ponieważ różnica dróg optycznych w tych miejscach = 0. W obszarach bliższych brzegu przedmiotu (b i c) istnieje różnica faz: Jeśli zmiana spadku różnicy dróg optycznych przedmiotu jest płynna - wtedy w tych obszarach płynnie zmienia się jasność lub zabarwienie obrazu. Przesuwając przyzmat poprzecznie do osi mikroskopu można, przesuwając względem siebie powierzchnie falowe, doprowadzić do zerowej różnicy dróg optycznych w badanym fragmencie przedmiotu (maksymalne zaciemnienie danego fragmentu przedmiotu - odpowiada to rysunkom 17.20b i c). Różnica dróg optycznych wyraża się wzorem

$$\Delta = (p - p_0) \Delta p, \quad (22)$$

gdzie:  $p$  - położenie pryzmatu przy maksymalnym zaciemnieniu badanego fragmentu przedmiotu,  
 $p_0$  - zerowe położenie pryzmatu,  
 $\Delta p$  - różnica drogi optycznej na jednostkę przesuwu pryzmatu (patrz p.4.3.2).



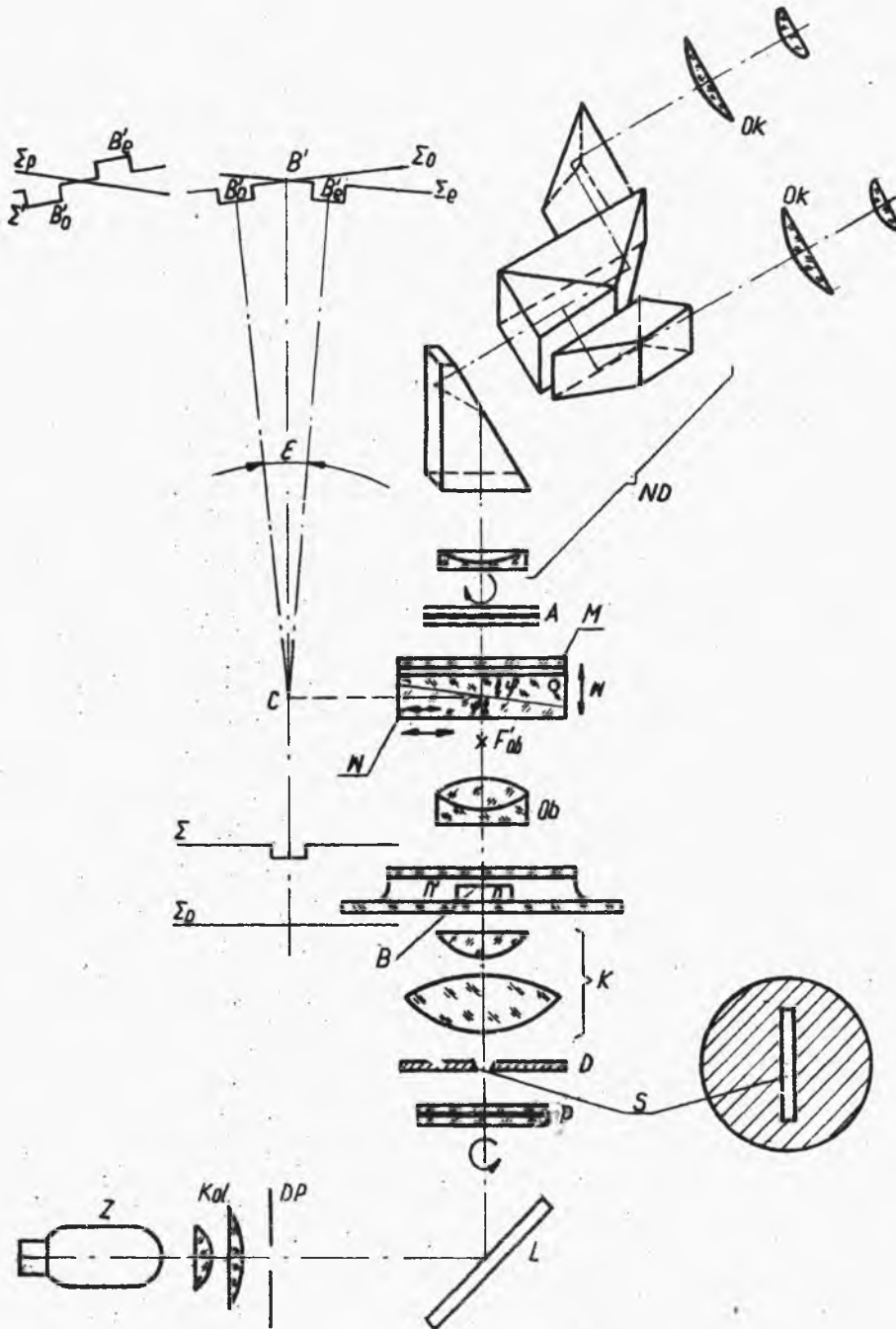
Rys.17.20. Pomiar różnicy drogi optycznej w obrazie dyferencjalnym

Ze względu na mały kąt łamiący pryzmatu dokładność pomiaru jest duża i może być rzędu kilku  $\lambda/1000$ .

Różnicę dróg optycznych można również ocenić na podstawie zmiany barwy w danych fragmentach przedmiotu.

Ponieważ przy obserwacji metodą dyferencjalną (rys.17.20) znak różnicy dróg optycznych na obydwu brzegach przedmiotu (obszar  $b$  i  $c$ ) jest różny więc występują tam różne jasności lub różne barwy interferencyjne. Wygląd przedmiotu jest taki, jakby był on oświetlony z jednej strony skośnym światłem, rzucającym cień na przeciwną stronę.

Metoda dyferencjalna nadaje się przede wszystkim do obserwacji i badań przedmiotów niejednorodnych. Oprócz pomiarów nadaje się również do obserwacji, daje bowiem obraz plastyczny, wierny - bez ujemnych efektów występujących w metodzie kontrastu fazowego.



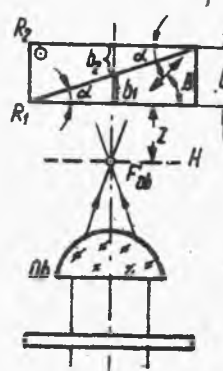
Rys.17.21. Schemat optyczny mikroskopu interferencyjno-polaryzacyjnego MPI prod. PZO

#### 4.4. Mikroskop interferencyjno-polaryzacyjny MPI produkcji PZO

Zasada działania mikroskopu MPI nie odbiega od układu opisanego w punkcie 4.3. Kompletny schemat optyczny mikroskopu przedstawia rysunek 17.21.

Rysunek przedstawia układ mikroskopu wraz z oświetlaczem i nasadką dwuoczną ND. W układzie MPI polaryzator P został przeniesiony przed przysłonę D ze szczeliną S, co nie zmienia zasady pracy układu. Na pryzmacie Wollastona istnieje możliwość założenia płytki pomiarowej do pomiaru przesunięcia poprzecznego pryzmatu. Pryzmaty Wollastona są wymienne, zależnie od metody obserwacji jaka ma być realizowana: prążkowa, z dyferencjalnym lub z dużym rozdwojeniem obrazu.

Ponieważ ognisko obrazowe obiektywów o większym powiększeniu ( $> 10^X$ ) znajduje się wewnątrz układu optycznego, więc stosowane są do nich zmodyfikowane pryzmaty Wollastona z wyrzuconą poza obszar pryzmatu płaszczyzną lokalizacji prążków). Osiąga się to przez wycięcie jednego z elementów pryzmatu tak, aby jego oś optyczna prostopadła do krawędzi łamiącej była pochylona względem płaszczyzny zewnętrznej. W ten sposób płaszczyznę lokalizacji prążków można zgrać z płaszczyzną obrazową ogniskową obiektywu  $F'_{Ob}$  (rys.17.22).



Rys. 17.22. Pryzmat dwójłomny z zewnętrzną płaszczyzną lokalizacji prążków

#### 4.5. Zastosowanie mikroskopu interferencyjno-polaryzacyjnego

Metody mikroskopii interferencyjnej mogą być stosowane we wszystkich dziedzinach nauki i techniki, w których stosuje się badania mikroskopowe. Zakres jej używania częściowo pokrywa się z zastosowaniem kontrastu fazowego, przewyższa go jednak w dziedzinie badań ilościowych pod względem różnorodności pomiarów.

Najszerze zastosowanie ma mikroskop interferencyjny w badaniach biologicznych obiektów fazowych (badania różnicy dróg optycznych, grubości obiektywów, przepuszczalności światła, zawartości suchej masy, objętości komórek itp.).

W chemii i fizyko-chemii - mikroskopię interferencyjną można stosować głównie w różnych pomiarach ilościowych masy, gęstości koncentracji substancji, w badaniach procesów rozpuszczania, roztopiania i krystalizacji, niejednorodności substancji, odkształceń powierzchniowych, zjawisk włoskowatości i zwilżania, procesów dyfuzji i osmozy itp.

We włókiennictwie używa się metody interferencyjnej do badania kształtu włókien (od czego zależą ich własności), pomiaru grubości włókien i ich współczynnika załamania, dwójłomności - dającej informację o strukturze włókien, odporności na wilgoć, elastyczności itd.

W kryształografii i mineralogii można przeprowadzić badania interferencyjne własności kryształów, ich dwójłomności, kierunków osi optycznych, skręceń płaszczyzny polaryzacji, dyslokacji w strukturze, figur wzrostu i kątów między powierzchniami mikrokryształów. W metalografii badać można gładkość i topografię powierzchni, kształtu mikronierówności itp.

Inne możliwości wykorzystania mikroskopii interferencyjnej istnieją w technikach cienkich warstw, przemyśle gumowym, papierniczym, ceramicznym itd.

## 5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zainstalować w mikroskopie biologicznym urządzenie kontrastu fazowego, przygotować je do pracy na podstawie instrukcji użytkowania i wskazań punktu 3.2. Obejrzeć wskazane preparaty.
2. Przygotować do pracy mikroskop interferencyjno-polaryzacyjny MPI:
  - a) zapoznać się z konstrukcją mechaniczną mikroskopu,
  - b) ustawić oświetlenie Köhlera,
  - c) przygotować mikroskop do pracy metodą dyferencjalną i obejrzeć wskazane preparaty,
  - d) przygotować mikroskop do pracy metodą prążkową i obejrzeć preparaty,

e) przygotować mikroskop do pracy metodą jednorodnego pola z dużym rozdwojeniem obrazu.

Regulację mikroskopu w p.c, d, e należy przeprowadzić zgodnie z instrukcją fabryczną.

U w a g a: Ponieważ obiektywy mikroskopu nie mają amortyzatorów oraz mają różną długość mechaniczną - istnieje duże niebezpieczeństwo zniszczenia preparatu lub uszkodzenia obiektywu podczas ustawiania układu i zmiany obiektywów. W związku z tym ogniskowanie mikroskopu należy przeprowadzać tylko przez odsuwanie obiektywu od preparatu (po ustawieniu wstępnym obiektywu przy preparacie przy obserwacji z boku), zaś zmianę obiektywów - tylko po podniesieniu głowicy obiektywowej do góry.

f) ocenić, czy współczynnik załamania badanego obiektu jest wyższy, czy niższy od współczynnika załamania środowiska; kluczem do tego jest tablica zamieszczona w instrukcji fabrycznej.

## 6. LITERATURA

Pluta M.: Mikroskopia fazowo-kontrastowa i interferencyjna. PWN. Warszawa 1965.

Appel L., Kowalczyk R.: Mikroskop. Budowa i użytkowanie. WNT. Warszawa 1966.

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.

Prospekty i instrukcje firmowe PZO.

## 5. PYTANIA KONTROLNE

Zasadnicze tezy teorii Abbego powstawania obrazu w mikroskopie; obraz dyfrakcyjny źródła światła, zdolność rozdzielcza i zdolność rozpoznawcza mikroskopu.

Specyficzne cechy przedmiotów fazowych przy obserwacji mikroskopowej.

Światło dyfrakcyjne a światło bezpośrednie, uzyskiwanie kontrastu amplitudowego przy obserwacji przedmiotów fazowych.

Rodzaje kontrastu fazowego.

Sposób ustawienia układu pracującego w kontraście fazowym.

Zjawisko interferencji i polaryzacji światła, płytki dwój-  
komne.

Polaryzatory, ćwierćfalówka i półfalówka.

Zasada działania mikroskopu interferencyjnego, rodzaje mi-  
kroskopów interferencyjnych.

Zasada działania układu mikroskopowego z pryzmatem dwój-  
komnym Wollastona.

Prążkowa metoda obserwacji.

Dyferencjalna metoda obserwacji.

Metoda jednorodnego pola z dużym rozdwojeniem obrazu.

Możliwości pomiarowe mikroskopii interferencyjnej.

Zastosowania mikroskopu interferencyjnego.

## Ćwiczenie 18

### BADANIE LORNETKI PRYZMATYCZNEJ

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie: lornetki pryzmatycznej, pod-  
stawowych wymagań technicznych dotyczących widzenia dwuocznego  
oraz pomiarów głównych parametrów lunet i lornet.

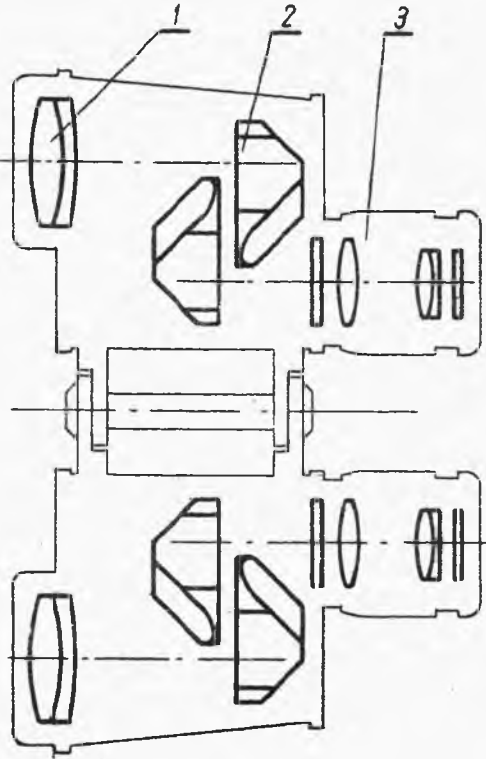
#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Lornetką nazywa się układ dwu lunet przystosowanych do wi-  
dzenia dwuocznego. Układ taki zwiększa wygodę obserwacji, a po-  
za tym możliwość oceny przestrzennego rozmieszczenia elementów

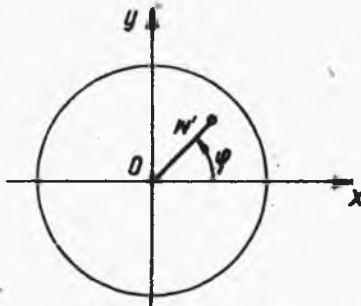


dzięki zwiększeniu rozstawienia źrenic wejściowych obiektywów przyrządu względem rozstawienia oczu obserwatora. Rys.18.1 przedstawia typową lornetkę pryzmatyczną.

Ponieważ przestrzeń przedmiotowa zostaje przekształcona przez dwa układy lunet niezależnie dla prawego i lewego oka, to istnieje konieczność spełnienia dodatkowych warunków wynikających z granic fizjologicznych widzenia dwuocznego, wiążących parametry optyczne obydwu lunet oraz ustalających ich wzajemne położenie. Są to wymagania odnoszące się do różnicy powiększenia obydwu lunet, wzajemnego skręcenia obrazów wnoszonego przez pryzmatyczne lub zwierciadlane układy odwracające oraz nierównoległości promieni osiowych wychodzących z okularów lunet. Każde z nich wywołuje nierównoległość promieni polowych,



Rys.18.1. Schemat lornetki pryzmatycznej: 1-obiektyw, 2-pryzmatyczny układ odwracający, 3-okular



Rys.18.2. Układ współrzędnych cylindrycznych dla ustalenia składowych kąta nierównoległości promieni wychodzących z lornet

co powoduje męczenie oczu przy długotrwałej obserwacji, a przy większych wartościach dwojenie obrazów. W celu wyznaczenia składowych  $\Delta x, \Delta y$  kąta nierównoległości wiązki promieni, wprowadza się współrzędne cylindryczne (rys.18.2), gdzie  $w'$  oznacza kąt polowy wiązki, zaś  $\varphi$  - kąt azymutu, a punkt 0 rzut osi optycznej lunety za okularem. Dla występującej różnicy powiększenia  $\Delta \gamma$  w obydwu lunetach, powodującej przyrost kąta polo-

wego  $\Delta w'$ , składowe  $\Delta x_1, \Delta y_1$  kąta nierównoległości zgodnie z rys.18.3 wynoszą:

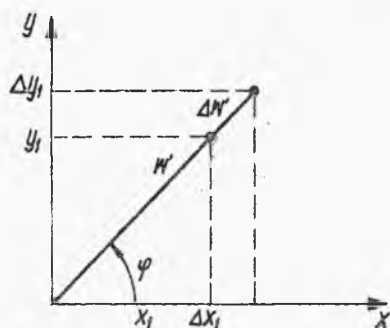
$$\Delta x_1 = \Delta w' \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\Delta y_1 = \Delta w' \sin \varphi,$$

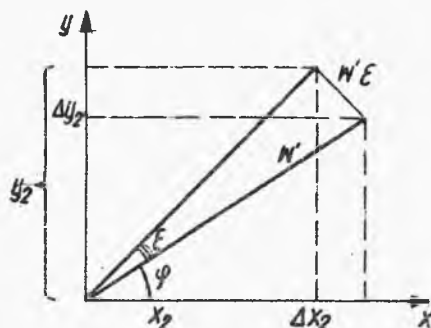
zaś składowe  $\Delta x_2, \Delta y_2$  spowodowane wzajemnym skręceniem obrazów  $\varepsilon$  zgodnie z rys.18.4 wynoszą:

$$\Delta x_2 = w' \varepsilon \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\Delta y_2 = w' \varepsilon \cos \varphi.$$



Rys.18.3. Wpływ różnicy powiększeń obu lunet



Rys.18.4. Wpływ wzajemnego skręcenia obrazów

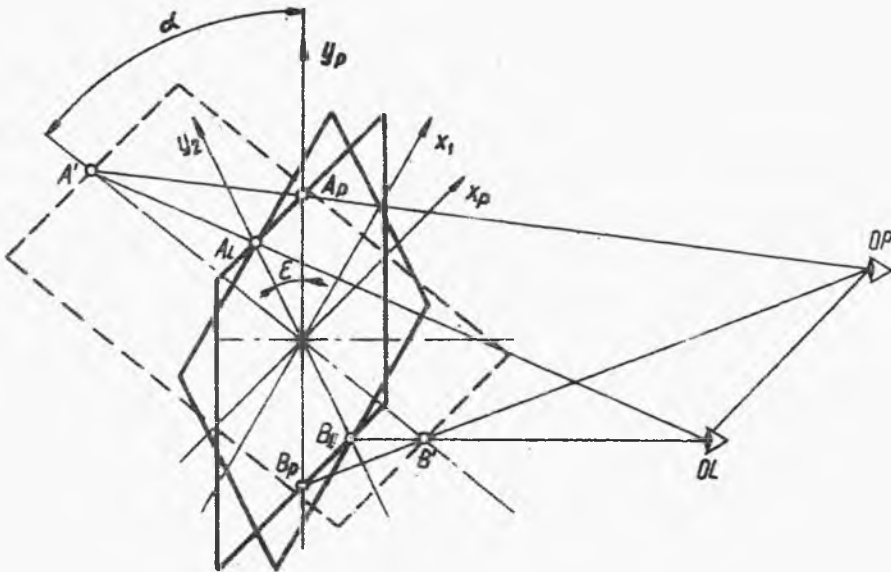
Łatwo zauważyć, że dla kąta  $\varphi = 0^\circ$  różnica powiększenia wpływa tylko na składową w kierunku osi  $OX$ , a składowa ta od skręcenia obrazów zeruje się. Odwrotny wpływ mają te składowe dla kąta  $\varphi = 90^\circ$ . Wynika stąd jeszcze jedna wada odwzorowania przestrzeni przez układ lornetowy (o ile występują skręcenie obrazów lub różnica powiększeń) - jest to obrót płaszczyzny obrazu. Dla przykładu rozważmy wpływ skręcenia obrazów o kąt  $\varepsilon$  (rys.18.5). Ponieważ składowa ta wpływa na kierunek osi  $OY$  zaś składowa na osi  $OX$  zeruje się, powstaje stąd pozorne obrócenie płaszczyzny obrazu wokół osi poziomej o kąt  $\alpha$ . Przy różnicy powiększeń obu lunet powstaje pozorne obrócenie płaszczyzny obrazu wokół osi pionowej.

Ogólnie składowe kąta nierównoległości wiązki promieni wychodzących z lornety po uwzględnieniu  $\Delta w' = \frac{\Delta \bar{x}}{\bar{\theta}} w'$  wynoszą:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 + \left( \frac{\Delta \delta}{\delta} \cos \varphi + \varepsilon \sin \varphi \right) w', \\ \Delta y &= y_0 + \left( \frac{\Delta \delta}{\delta} \sin \varphi + \varepsilon \cos \varphi \right) w', \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:  $x_0, y_0$  - składowe kąta nierównoległości promieni osiowych,

- $\frac{\Delta \delta}{\delta}$  - względny przyrost powiększeń obu lunet,
- $\varepsilon$  - kąt wzajemnego skręcenia obrazów,
- $w'$  - kąt połowy wiązki promieni,
- $\varphi$  - kąt azymutu wiązki promieni (współrzędne cylindryczne).



Rys.18.5. Wpływ wzajemnego skręcenia obrazów na pozorny obrót płaszczyzny obrazu

Układ równań (3) może służyć do ustalenia wymagań technicznych dla przyrządów dwuoczných.

Jeżeli tolerancje widzenia dwuocznego wynoszą: na zbieżność i wichrowatość - 1 dioptria pryzmatyczna ( $\sim 35'$ ), a na rozbieżność -  $3^{\circ}$ , to przy:

1) dopuszczalnej wartości  $\frac{\Delta \delta}{\delta} = 2\%$  wynikającej z ograniczenia różnicy wielkości obrazów dla obu oczu obserwatora (ani-zeikonii),

UKD 681.4:535.824.17

OPTYKA, MECHANIKA PRECYZYJNA I PRZYRZĄDY POMIAROWE	NORMA BRANŻOWA	BN-69 5523-01
	Optyczne przyrządy dwuocenne Podstawowe wymagania techniczne	
	Grupa katalogowa XIII 43	

**1. WSTĘP**

**1.1. Przedmiot normy.** Przedmiotem normy są podstawowe wymagania techniczne obowiązujące przy projektowaniu i wykonywaniu optycznych przyrządów dwuocennych (lornetka, mikroskop stereotypowy, dalmierz, mikroskopowa nasadka dwuocenna itp.).

**1.2. Określenia**

**1.2.1. Zbieżność** - nierównoległość osi wiązek promieni wychodzących z obu członów przyrządu w płaszczyźnie osi okularów, gdy przecięcie wiązek następuje za przyrządem po stronie obserwatora.

**1.2.2. Rozbieżność** - nierównoległość osi wiązek promieni wychodzących z obu członów przyrządu w płaszczyźnie osi okularów, gdy przecięcie wiązek następuje przed przyrządem względem obserwatora.

**1.2.3. Wichrowatość** - nierównoległość rzutów osi wiązek promieni wychodzących z obu członów przyrządu na płaszczyznę symetrii przyrządu.

**2. PODSTAWOWE WYMAGANIA TECHNICZNE**

**2.1. Rozstawienie źrenic wyjściowych przyrządu.** Każdy optyczny przyrząd dwuocenny powinien zapewnić zmianę rozstawienia swoich źrenic wyjściowych od 54 do 74 mm, zachowując jego symetrię z dokładnością do  $\pm 1$  mm.

**2.2. Zakres dioptryjny ruchu okularów.** Minimalny ruch dioptryjny okularów wyrównujący różnicę refrakcji obu oczu obserwatora powinien wynosić  $\pm 3$  dioptrii.

**2.3. Różnica powiększeń** w obu członach przyrządu nie powinna przekroczyć 2%.

**2.4. Wzajemne skreślenie obrazów** w obu członach przyrządu nie powinno przekroczyć  $30''$ .

**2.5. Nierównoległość osi wiązek promieni** dla punktu płaszczyzny leżącego w środku pola widzenia w całym zakresie rozstawienia źrenic wyjściowych nie powinna przekroczyć:

- zbieżność -  $0'$ ,
- rozbieżność -  $2,5''$ ,
- wichrowatość -  $15''$ .

Dla mikroskopów stereoskopowych dopuszcza się rozbieżność do  $12''$ .

**2.6. Różnica położenia źrenic wyjściowych przyrządu.** Różnica położenia względem płaszczyzny prostopadłej do płaszczyzny symetrii przyrządu i do płaszczyzny przechodzącej przez osie okularów nie powinna przekraczać 1,5 mm przy ustawieniu okularów na 0 dioptrii.

**2.7. Różnice luminancji obserwowanych obrazów** nie powinny być większe niż 20% (w porównaniu z ich wartościami średnimi).

K O N I E C

INFORMACJE DODATKOWE do BN-69/5523-01

CSRS CSN 193410  
 India IS 2754  
 IIR IS 3413  
 NRD TGL 19052

NRD TGL 19053  
 TGL 19054  
 Włochy UNI 5403  
 ZSRR ГОСТ 7048

Zjednoczenie Przemysłu Sprzętu Optycznego i Medycznego  
 Ustanowione przez Dyrektora ZPSCiM „Omel” dnia 7 lipca 1969 r.  
 jako norma obowiązująca w zakresie produkcji od dnia 1 stycznia 1970 r.  
 (Mon. Pol. nr 40/1969 poz. 334)

2) założonej wielkości wzajemnego skręcenia obrazów  $\epsilon = 30'$ ,  
3) maksymalnym obrazowym kącie pola  $w' = 15^\circ$  wynikającym z rozważań kątowej charakterystyki oka (wg Yves le Granda większym kątom obserwacji towarzyszy zazwyczaj obrót głowy, a co za tym idzie wyjście jednego z oczu ze źrenicy wyjściowej lunety a zatem zanik obserwacji dwuocznej przez lornetę),

otrzymuje się tolerancje na równoległość promieni osiowych (osi lornetki):

- 1) zbieżność -  $0^\circ$ ,
- 2) rozbieżność -  $2,5^\circ$ ,
- 3) wichrowatość -  $15'$ .

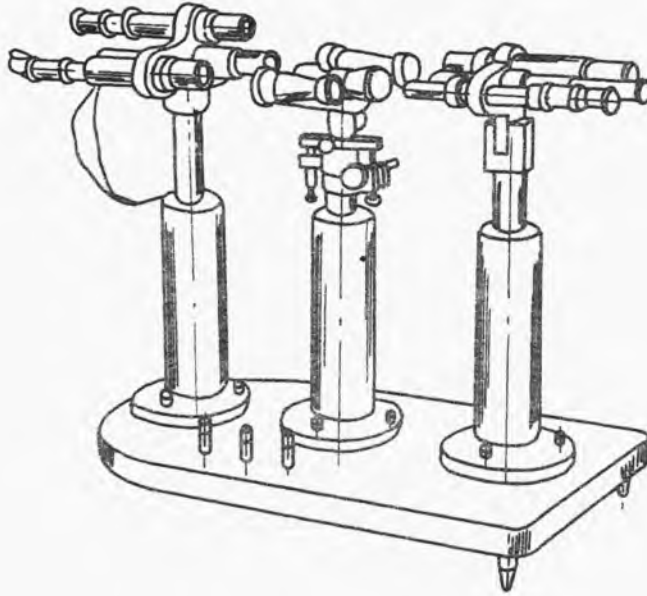
Podstawowe wymagania techniczne dotyczące przyrządów dwuocznych ujmuje BN-69/5523-01 (załącznik 1).

U w a g a: Ćwiczenie "Badanie lornetki pryzmatycznej" wymaga przyswojenia wiadomości wstępnych zawartych w ćwiczeniu 2 "Zestawienie układu lunetowego".

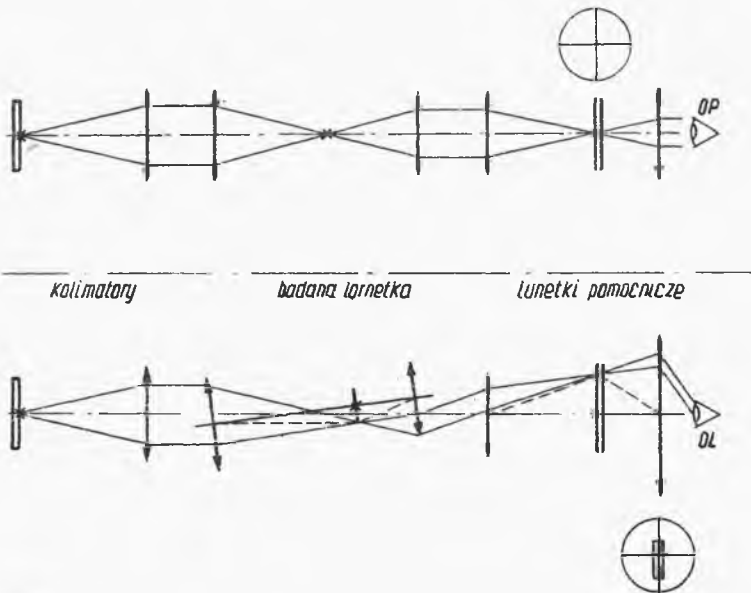
### 3. OPIS STANOWISKA

#### 3.1. Przyrząd do sprawdzania równoległości osi lornetek

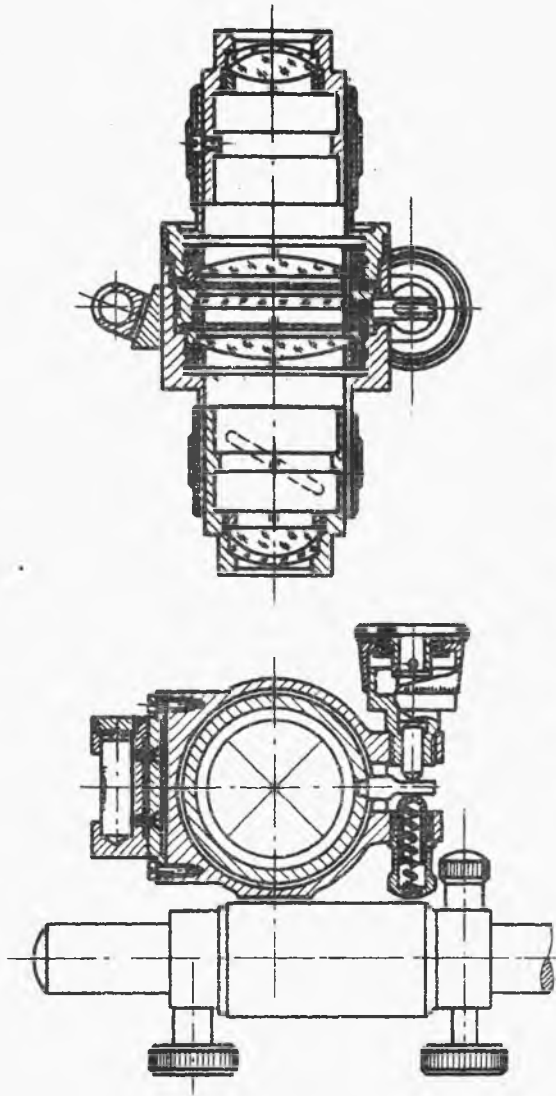
Przyrząd przedstawiono na rys.18.6 zaś uproszczony schemat optyczny na rys.18.7. Składa się on z trzech par kolimatorów z lunetkami pomocniczymi. Na płytkach ogniskowych kolimatorów podświetlanych światłem sztucznym oraz na płytce jednej z lunet leżącej naprzeciw nieruchomej podczas pomiaru gałęzi lornetki, znajdują się nacięte krzyże. W pozostałych dwóch lunetkach pomocniczych odpowiadających położeniom: maksymalnemu i minimalnemu rozstawieniu źrenic lornetki umieszczone są płytki ogniskowe z krzyżem i polem tolerancji dla nierównoległości osi lornetki. Badaną lornetkę mocuje się w uchwycie o zmiennym kątowym położeniu osi lornety.



rys.18.6. Widok ogólny przyrządu do sprawdzania równoległości osi lunetek



rys.18.7. Uproszczony schemat optyczny przyrządu do sprawdzania równoległości osi lunetek



Rys. 18.8. Schemat iUNETKI wychylnej

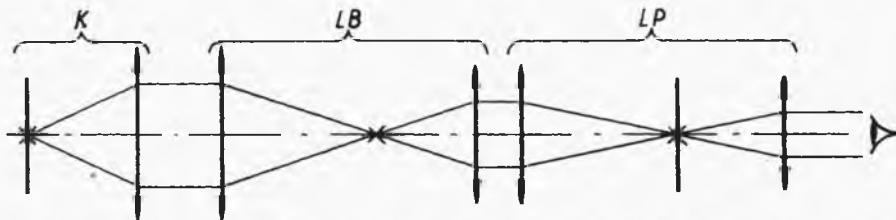
### 3.2. Lunetka wychyłna

Lunetka wychyłna jest to lunetka pomocnicza o powiększeniu około  $1,5^x$  z obrotowym ruchem pomiarowym dookoła swej osi optycznej (rys.18.8). Na płytkę ogniskową naniesione są dwa krzyże obrócone wzajemnie o kąt  $45^\circ$ . Obrót płytki ogniskowej realizuje się za pomocą śruby mikrometrycznej o wartości działki elementarnej  $1'$  i zakresie pomiarowym  $\pm 5^\circ$ . Błąd pomiaru nie przekracza  $5'$ .

## 4. POMIARY

Ponieważ większość pomiarów prowadzi się dla obu lunet lornetki jednakowo i wyniki porównuje się ze sobą dla sprawdzenia warunków wynikających ze specyfiki widzenia dwuocznego - w dalszym opisie tych pomiarów podany będzie sposób pomiaru tylko jednej z lunet.

Ustawienie okulara na zero dioptrii przeprowadza się w układzie podanym na rys.18.9. Między kolimator K i lunetkę pomocniczą LP wstawia się badaną lunetę LB i obserwuje obraz



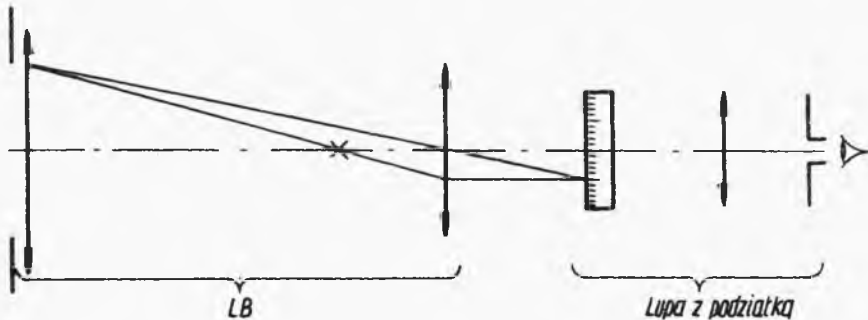
Rys.18.9. Schemat pomiarowy ustawienia na "zero dioptrii"

testu kolimatora na tle podziałki znajdującej się na płytce ogniskowej okulara lunetki pomocniczej. Jeżeli obrazy te widoczne są jednakowo ostre (bez paralaksy) okular lunetki ustawiony jest na zero dioptrii. W przeciwnym przypadku należy pokręcić oprawą okulara badanej lunetki.



#### 4.1. Pomiar powiększenia

Pomiar powiększenia lunety najczęściej przeprowadza się przez pomiar powiększenia poprzecznego. Ponieważ w lunetach powiększenie to nie zależy od długości przedmiotu, to po ustawieniu lunety na zero dioptrii wystarczy zmierzyć dowolny przedmiot (np. oprawę obiektywu lub kołową przysłonę postawioną bezpośrednio przed obiektywem) i jego obraz utworzony przez lunetę. Pomiaru wielkości przedmiotu dokonuje się np. suwmiarką, zaś jego obrazu specjalną lupą z podziałką (dynametr Ramsdena) lub mikroskopem z podziałką (dynametr Czapskiego). Schemat pomiaru podaje rys.18.10.



Rys.18.10. Schemat pomiaru powiększenia lunety

Powiększenie lunety wynosi

$$G = \frac{\varnothing_p}{\varnothing_o},$$

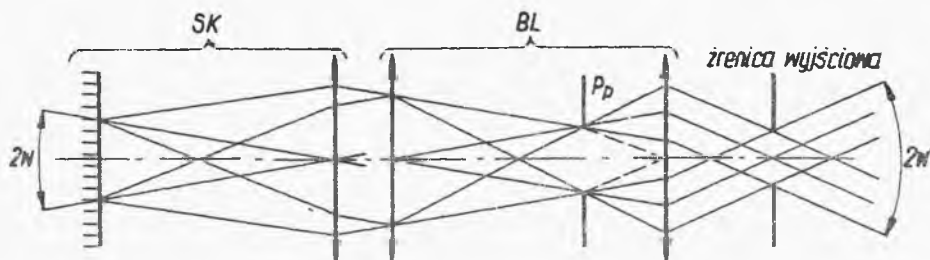
gdzie:  $\varnothing_p$  - wielkość przedmiotu,  
 $\varnothing_o$  - wielkość obrazu.

#### 4.2. Pomiar kąta pola widzenia

Pomiar kąta pola widzenia najwygodniej wykonać przy pomocy kolimatora szerokokątnego (rys.18.11).

Za kolimatorem szerokokątnym SK umieszcza się badaną lunetę. W tym pomiarze bardzo ważne jest położenie oka obserwatora w stosunku do lunety. Oko powinno znajdować się w płaszczyźnie źrenicy wyjściowej lunety, gdyż inaczej może nastąpić

ograniczenie pola widzenia. Z tego samego powodu odległość między obiektywem kolimatora szerokokątnego i lunety powinna



Rys.18.11. Schemat pomiaru przedmiotowego kąta pola widzenia za pomocą kolimatora szerokokątnego

być jak najmniejsza, a wynik pomiaru otrzymuje się przez porównanie obrazu podziałki kolimatora z przysłoną pola lunetki  $P_p$ .

#### 4.3. Sprawdzenie zdolności rozdzielczej lunety

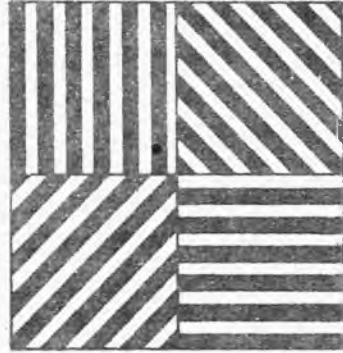
Kątowa zdolność rozpoznawcza oka ludzkiego wynosi około  $60''$ . Jeżeli patrzy się przez przyrząd optyczny o powiększeniu  $G$ , to w przestrzeni przedmiotowej tego przyrządu oko rozróżnia kąt  $\alpha = \frac{60''}{G}$ . Stąd można by wysnuć wniosek, że stosując bardzo duże powiększenia można by rozróżnić bardzo małe kąty. Ten wniosek jest fałszywy ponieważ zdolność rozdzielczą przyrządu zazwyczaj ogranicza zjawisko dyfrakcji i dla lunety prawdziwa jest zależność

$$\alpha'' = \frac{140''}{\varnothing_z [\text{mm}]},$$

gdzie  $\varnothing_z$  - średnica źrenicy wejściowej lunety wyrażona w milimetrach.

Oznacza to, że teoretycznie (nie uwzględniając aberracji układu i błędów montażowych) przez daną lunetę nie można rozróżnić przedmiotów (np. dwu gwiazd), które są widoczne pod mniejszym kątem niż to wynika z podanej zależności. Czyli do obserwacji bardzo małych kątów konieczne są obiektywy olbrzymiej średnicy (średnica zwierciadła teleskopu w obserwatorium Mt Palomar wynosi 5 m). W praktyce warsztatowej sprawdzenie

zdolności rozdzielczej układu optycznego służy do oceny jego jakości. Sprawdzenie zdolności rozdzielczej lunet przeprowadza się w układzie przedstawionym na rys.18.9. Za kolimatorem z testem zdolności rozdzielczej (o średnicy obiektywu większej od źrenicy wejściowej lunety) umieszcza się lunetę i obserwuje się obraz testu bezpośrednio okiem lub w przypadku lunet o małym powiększeniu dodatkowo przez lunetkę pomocniczą, oceniając, która z grup testowych o najdrobniejszej strukturze jest jeszcze rozróżniana. Przy czym dotyczy to każdego kierunku testu. Każda z grup testowych jest opisana odpowiadającą jej kątową zdolnością rozdzielczą. Rys.18.12 przedstawia typową grupę testu zdolności rozdzielczej. Złożona jest ona z kresek o jednakowej grubości oraz odległości między ich środkami równej podwójnej grubości kresek. Odległość między kreskami płytki ogniskowej kolimatora oblicza się ze wzoru



Rys.18.12. Grupa testowa testu zdolności rozdzielczej

$$e = \frac{\delta'' f'_k}{206265} \text{ [mm]},$$

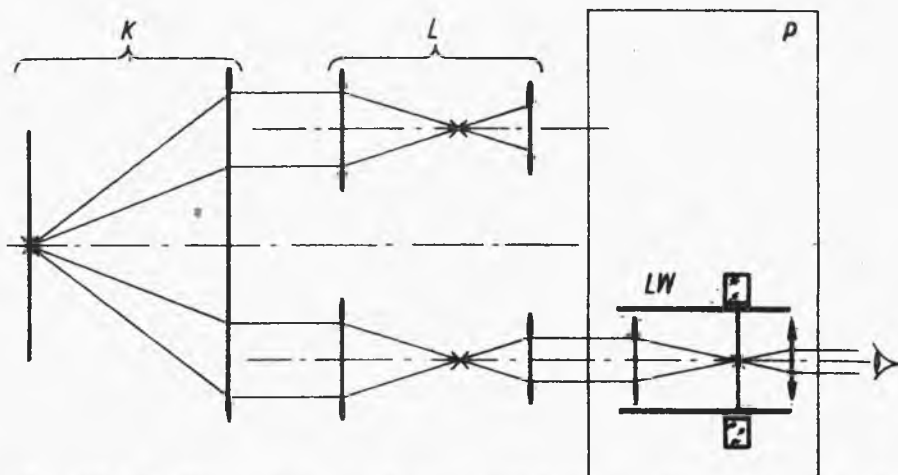
gdzie:  $\delta''$  - żądana zdolność rozdzielcza wymiaru w sekundach kątowych,

$f'_k$  - ogniskowa obiektywu kolimatora.

Sprawdzenie równoległości osi lornetki przeprowadza się na specjalnym przyrządzie (rys.18.6). Po zamocowaniu lunetki ustawia się ją tak, aby oś mechaniczna była równoległa do osi optycznej jednej u lunetek. Można to uzyskać przez pochylenie uchwytu mocującego lornetkę w przyrządzie. Sprawdzenie prawidłowego położenia polega na tym, że środek obrazów krzyża kolimatora i lunetki pomocniczej powinny się pokrywać. Następnie patrząc przez lunetkę pomocniczą leżącą na przeciw drugiej gałęzi lornetki (położenie odpowiadające maksymalnemu lub minimalnemu rozstawieniu osi lornetki) sprawdza się czy środek obrazu krzyża kolimatora nie wyszedł poza pole tolerancji umieszczone na płytce ogniskowej lunetki pomocniczej.

#### 4.4. Pomiar wzajemnego skręcenia obrazów

Pomiar wzajemnego skręcenia obrazów przeprowadza się w układzie podanym na rys.18.13. Za kolimatorem K o dużej średnicy (tak, aby mógł zapewnić jednocześnie obserwację lewym i prawym obiektywem) umieszcza się badaną lornetkę L. Zamiast



Rys.18.13. Stanowisko pomiarowe wzajemnego skręcenia obrazów

krzyża płytki ogniskowej kolimatora można umieścić nitkę z ciężarkiem (pion). Za jednym z okularów lornetki ustawia się na płaskiej poziomej płycie P lunetkę wychylną LW. Przez obrót lunetki wychylnej pokrywa się kresę krzyża płytki ogniskowej lunetki z obrazem nitki pionu odczytując kątowne położenie lunetki wychylnej. Następnie przesuwa się na płycie lunetkę wychylną naprzeciw drugiego okularu i powtarza czynności związane z kątownym pomiarem położenia lunetki wychylnej. Wzajemne skręcenie obrazów jest różnicą kątowych położań lunetki

$$\varepsilon = \alpha_1 - \alpha_2 .$$

#### 5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Ustawić okulary lornetki na zero dioptrii i porównać nastawy z opisami na pierścieniach dioptryjnych okularów.

2. Zmierzyć powiększenie obu lunet lornetki i wyniki porównać z normą.
3. Wyznaczyć zdolność rozdzielczą lunet i porównać z teoretyczną.
4. Wyznaczyć przedmiotowy kąt pola widzenia lunet.
5. Sprawdzić równoległość osi lornetki i wynik porównać z normą.
6. Wyznaczyć wzajemne skrócenie obrazów lewej i prawej lunetki i wynik porównać z normą.
7. Przeprowadzić kontrolną obserwację za pomocą dobrej i złej lornetki.

## 6. LITERATURA

- Wagnerowski T.: Optyka praktyczna. PWT. Warszawa. 1961 s.141-144.
- Józwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa. 1970. s. 303-307.
- Hanc T.: Pomiary optyczne. WNT. Warszawa 1964. s.342-343, 371-373, 375-378.
- Praca zbiorowa: Podstawy optyki instrumentalnej. PWT. Warszawa 1957. s.363-370.
- Starkiewicz W.: Optyka oka i szkieł okularowych. PZWL. Warszawa 1953. s.366.
- Handbuch der Physik. Band XVIII Verlag von Julin Springer. Berlin 1927.
- BN-69/5523-01: Optyczne przyrządy dwuoczne. Podstawowe wymagania techniczne.

## 7. PYTANIA KONTROLNE

Wszystkie pytania kontrolne ćwiczenie nr 2.

Co to jest lorneta?

Jakie podstawowe wymagania techniczne musi spełniać przyrząd dwuoczny?

Jakie wady odwzorowania przestrzeni powodują różnica powiększeń obu lunet, wzajemne skrócenie obrazów i nierównoległość promieni osiowych lunet?

## Ćwiczenie 19

### BADANIE LUNETY MYŚLIWSKIEJ

#### 1. CEL ĆWICZENIA

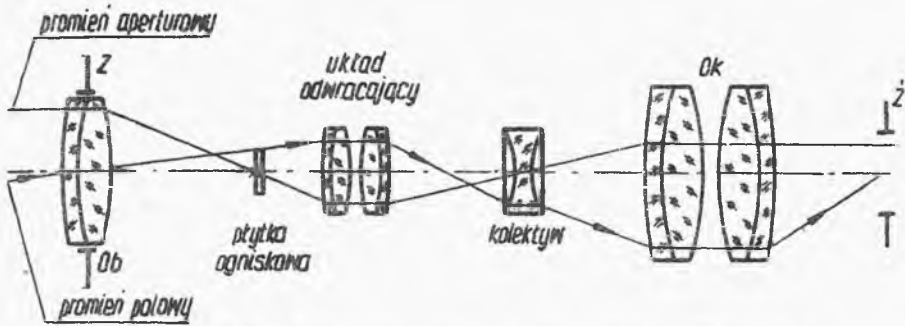
Celem ćwiczenia jest poznanie lunetki myśliwskiej, jej głównych parametrów oraz sposobu ich pomiaru, autokolimacyjnej metody regulacji kolimatorów oraz nabrania wprawy w modelowym zestawieniu układów optycznych.

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Wyznaczenie kierunku w przestrzeni (celowanie) dokonuje się przez naprowadzenie na dany przedmiot (cel) tzw. punktów celowniczych (np. muszki i szczerbinki na lufie karabinu). Jednakże dokładne umieszczenie tych trzech punktów na jednej linii prostej jest utrudnione z uwagi na różną ich odległość od oka obserwatora. Co prawda podświadoma właściwość akomodowania oka pozwala na bardzo szybką zmianę ostrego widzenia punktów znajdujących się w różnych odległościach to jednak dokładne celowanie w takich warunkach nie jest możliwe. Optyczne przyrządy celownicze stwarzają dogodne warunki celowania poprzez utworzenia obrazu celu na tle krzyża celowniczego, a znajdują zastosowanie głównie w wojsku (wszelkiego rodzaju celowniki) w myślistwie (lunety myśliwskie), w sporcie (broń sportowa)

oraz w przyrządach pomiarowych (niwelator, teodolit, pion optyczny itp.).

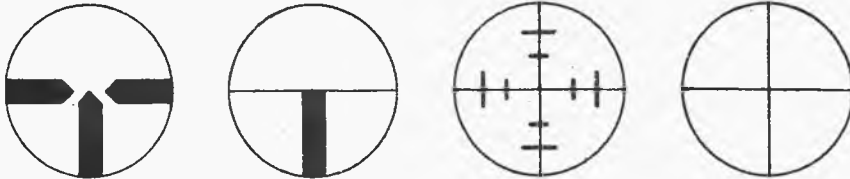
Schemat optyczny lunety myśliwskiej przedstawiono na rys. 19.1. Obiektyw Ob tworzy obraz w płaszczyźnie płytki ogniskowej, na której nacięto krzyż celowniczy. Soczewkowy układ



Rys.19.1. Schemat optyczny lunetki myśliwskiej

odwracający (najczęściej o powiększeniu  $\beta = -1^x$ ) umożliwia prawidłową orientację przestrzeni przedmiotowej za lunetą oraz tworzy obraz celu w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej okulara Ok. Ujemny kolektyw stosuje się w celu uzyskania dużej odległości ( $\sim 80$  mm) położenia źrenicy wyjściowej od ostatniej powierzchni okularu, koniecznej z uwagi na odrzut po strzale. Powiększenia takich lunet wynoszą od  $1,5^x$  do  $6^x$ , a pole widzenia dochodzi do  $12^\circ$ . Powiększenie  $1,5^x$  zamiast  $1^x$  stosuje się z uwagi na psychologiczny efekt pomniejszenia przedmiotu przy patrzeniu przez otwór. Ponieważ w czasie polowań rzadko strzela się na bardzo duże odległości (najczęściej 150 m) płytka ogniskowa z krzyżem celowniczym znajduje się w odległości nieco większej niż ogniskowa czołowa obiektywu i mówi się wtedy, że luneta ma usuniętą paralaksę na tę właśnie odległość. Z kolei, z uwagi na ruch pocisku po paraboli, a nie prostej lub ustawienie dowolnego przewyższenia celu, płytka ogniskowa z krzyżem (lub jedno z ramion krzyża) ma zapewniony eksploatacyjny ruch w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej lunety. Środek krzyża celowniczego i obrazowy punkt węzłowy obiektywu wyznaczają tzw. oś celową lunety, zaś kąt zawarty między osią optyczną a osią celową lunety nosi nazwę kąta podniesienia

nia. Rodzaje krzyży celowniczych podano na rys.19.2. Myśliwską lunetę celowniczą mocuje się nad lufą strzelby w ten sposób, aby oś optyczna lunety była równoległa do osi mechanicznej lufy.

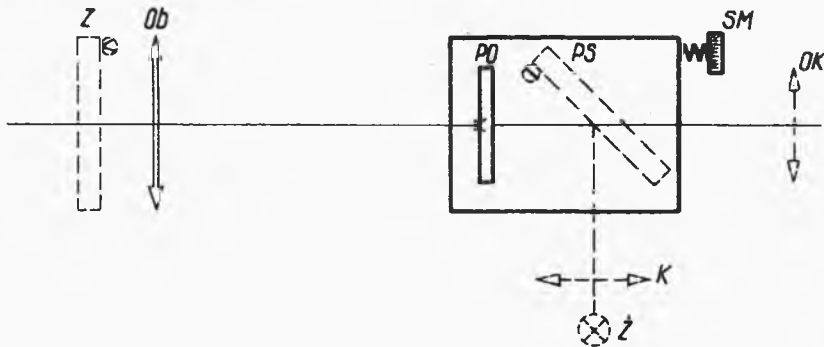


Rys.19.2. Rodzaje krzyży celowniczych

### 3. OPIS STANOWISKA

#### 3.1. Kolimator ze zmiennym położeniem płytki ogniskowej

Schemat kolimatora podano na rys.19.3. Części zaznaczone linią przerywaną służą do regulacji kolimatora. Płytkę ogniskową PO umieszczona jest w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej



Rys.19.3. Stanowisko kolimatora z ruchomą płytką ogniskową

obiektywu Ob przy określonym nastawieniu śruby mikrometrycznej SM, która realizuje zmienne położenie płytki ogniskowej w zakresie (0 - 10) mm z niedokładnością odczytu położenia 0,01 mm.



### 3.2. Autokolimacyjna metoda regulacji kolimatora

W tym celu należy:

1. Zestawić orientacyjnie następujące elementy optyczne:

- zwierciadło płaskie Z,
- obiektyw  $Ob$  o ogniskowej  $f_{Ob}$ ,
- płytkę ogniskową z krzyżem PO,
- płytkę światłodzielącą PS,
- okular OK o ogniskowej  $f_{Ok}$ ,
- kondensator K,
- źródło światła  $\dot{Z}$ ,

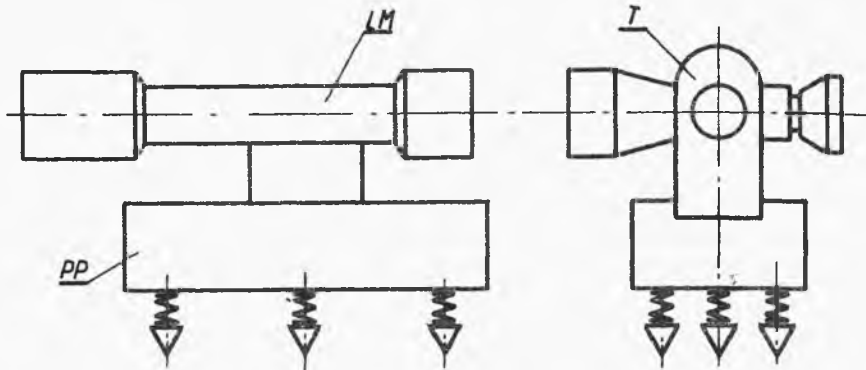
tak, aby powstała z nich lunetka autokolimacyjna.

2. Ustawić prawidłowe oświetlenie płytki ogniskowej. W tym celu obraz źródła światła  $\dot{Z}$  utworzony przez kondensator K musi wypełniać żrenicę obiektywu  $Ob$ . Żądane położenie ustawia się ruchem kondensora, źródła światła i płytki światłodzielącej.

3. Regulować wzajemne położenie obiektywu i płytki ogniskowej. W tym celu patrząc przez okular OK obserwuje się autokolimacyjny obraz płytki ogniskowej odbity od zwierciadła Z. Jeżeli płytka ogniskowa PO znajduje się dokładnie w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu  $Ob$ , to nie będzie zauważalna paralaksa położenia płytki ogniskowej i jej autokolimacyjnego obrazu. Żądane położenie realizuje się ruchem obiektywu (zgruba regulacja) oraz ruchem płytki ogniskowej za pomocą śruby mikrometrycznej SM (regulacja dokładna).

### 3.3. Stanowisko do pomiaru kąta podniesienia

Schemat pomiarowy przedstawiono na rys.19.4. Na wypoziomowanej płycie PP mocuje się badaną lunetę myśliwską LM za jej płaszczyznę bazową (jaskółczy ogon). Naprzeciw obiektywu lunety umieszcza się wyrektyfikowany teodolit T. Odczyt wartości kąta podniesienia przeprowadza się na kręgu pionowym, teodolitu na pokryciu się obrazu krzyża celowniczego lunety z krzyżem płytki, ogniskowej teodolitu.

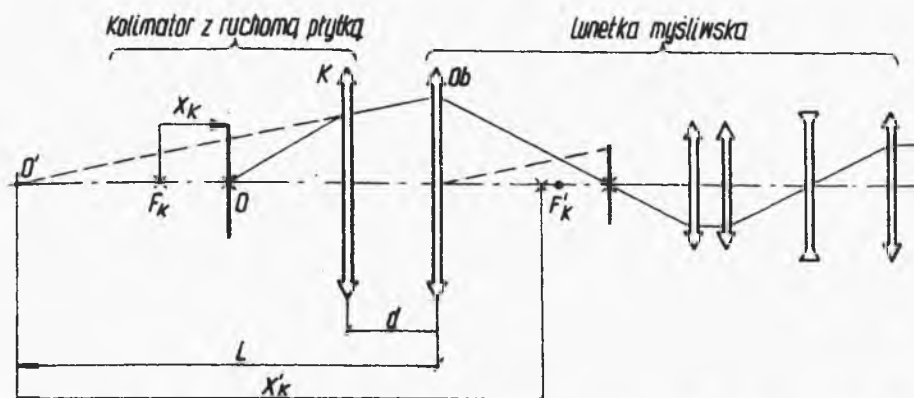


Rys.19.4. Stanowisko do pomiaru kąta podniesienia lunetki myśliwskiej

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Zapoznać się z lunetą myśliwską.
2. Zmierzyć powiększenie lunety i odległość źrenicy wyjściowej od ostatniej powierzchni okularu.
3. Ustawić metodą autokolimacyjną kolimator z ruchomą płytka ogniskową na zero dioptrii, zanotować "zerowe" położenie śruby mikrometrycznej.
4. Usunąć zwierciadło płaskie i na jego miejsce wstawić badaną lunetę myśliwską. Ruchem śruby mikrometrycznej usunąć paralaksę pomiędzy obrazem płytki ogniskowej kolimatora, a krzyżem celowniczym lunety i zanotować "pomiarowe" położenie śruby mikrometrycznej.
5. Zgodnie z rys.19.5 (korzystając ze wzorów optyki geometrycznej) wyznaczyć odległość -  $L$ , dla której usunięto paralaksę położenia w lunetce myśliwskiej.
6. Wyznaczyć kąt podniesienia osi celowej lunety myśliwskiej.



Rys.19.5. Pomocniczy schemat do wyznaczenia odległości  $L$ , dla której usunięto paralaksę w myśliwskiej lunecie celowniczej

## 5. LITERATURA

Hanc T.: Pomiarzy optyczne. WNT. Warszawa 1964.

Praca zbiorowa: Podstawy optyki instrumentalnej. PWT. Warszawa 1957.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

Narysować i objaśnić schemat myśliwskiej lunety celowniczej.

Autokolimacyjna metoda regulacji kolimatorów.

Co to są: kąt podniesienia i oś celowa lunety celowniczej?

## Ćwiczenie 20

# PRZYRZĄDY GEODEZYJNE

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych optycznych przyrządów geodezyjnych, zasady działania oraz sposobu pomiaru kątów i odległości w terenie. Ponadto na przykładzie niwelatora z przekładną lunetą dokładne zapoznanie się z ich reletyfikacją.

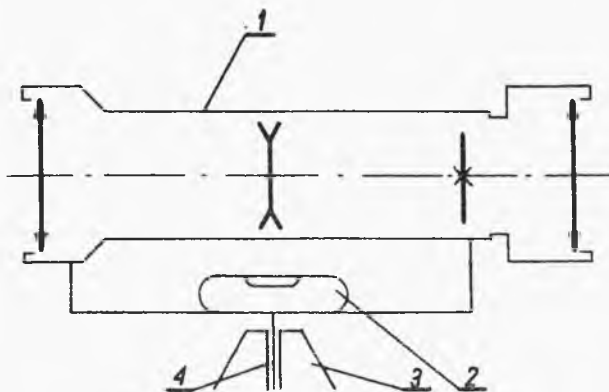
### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Podstawowymi optycznymi przyrządami geodezyjnymi są niwelator i teodolit.

#### 2.1. Niwelatory

Służą one głównie do wyznaczania kierunku poziomego w przestrzeni. Pozwalają na wyznaczenie różnic wysokości pomiędzy dowolnie wybranymi punktami w terenie, pomiar odległości przy pomocy tzw. łat mierniczych oraz dokonywanie pomiaru kątów w płaszczyźnie poziomej (o ile mają poziomy krąg pomiarowy). Głównymi zespołami niwelatora (rys.20.1) są: luneta geodezyjna 1, poziomnica rurkowa 2, spodarka 3, pionowa oś obrotu 4. Do dokonywania pomiaru kątów niwelatory wyposaża się dodatkowo w krąg poziomy podziałki kątowej z urządzeniami odczytowymi. Kierunek celowania tworzy tzw. oś celowa lunety wyznaczona środkiem krzyża płytki ogniskowej lunety i obrazowym punktem węzłowym obiektywu. Dokładność niwelatorów określa się wielkością błędu pomiaru wyrażonego w mm/1 km. Ze względu na dokładność niwelatory dzieli się na:

- 1) precyzyjne ( $\pm 1 \text{ mm}/1 \text{ km}$ ),
- 2) techniczne ( $\pm 2,5 \text{ mm}/1 \text{ km}$ ),
- 3) budowlane ( $\pm 8 \text{ mm}/1 \text{ km}$ ).



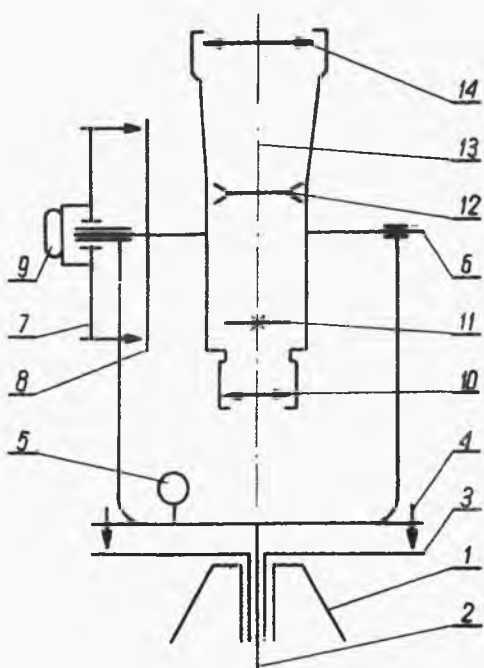
Rys.20.1. Schemat niwelatora

Niwelatory precyzyjne służyć wyłącznie do dokładnej niwelacji terenu i zazwyczaj nie posiadają kręgu poziomego do pomiaru kątów. Pozostałe dwa typy konstruowane są w dwu wersjach z kręgiem poziomym (symbol - NiK) lub bez niego (symbol - Ni). W zależności od sposobu poziomowania osi celowej niwelatory dzieli się na: niwelatory z poziomica i samopoziomujące (automatyczne). W tych drugich poziomowanie dokonuje się samoczynnie zazwyczaj poprzez wahliwe umieszczenie zwierciadlanego elementu poziomującego.

## 2.2. Teodolity

Umożliwiają one pomiary kątów w przestrzeni. W celu dokonywania pomiarów względem przyjętych płaszczyzn odniesienia pionowej i poziomej - teodolit (rys.20.2) wyposażony jest w odpowiednie układy pomiarowe składające się z kręgu z podziałką (pionowy i poziomy), wskaźników i optycznego układu powiększającego. Wierzchołek mierzonego kąta znajduje się w miejscu, gdzie przecinają się osie obrotu układów pomiarowych (poziomego i pionowego kręgu pomiarowego) i oś lunety. Dwa kolejne położenia osi celowej lunety tworzą ramiona mierzonego kąta, przy czym odczytuje się wartość rzutu kąta na płaszczyznę poziomą

i kąt w płaszczyźnie pionowej. Obracając lunetę dookoła pionowej i poziomej osi obrotu teodolitu można naprowadzić środek



Rys.20.2. Schemat teodolitu

krzyża płytki ogniskowej na żądany punkt w przestrzeni, a następnie odczytać wartości wskazane przez wskaźniki na kręgach z podziałką. Z kolei po naprowadzeniu środka krzyża na drugi punkt w przestrzeni należy ponownie dokonać odczytu na kręgach. Odpowiednie różnice odczytów wskażą wartości rzutu na płaszczyznę poziomą kąta między wybranymi punktami przestrzeni i kąt w płaszczyźnie pionowej. Kręgi poziome opisywane są od  $0^{\circ}$  do  $360^{\circ}$  (lub  $400$  gradów). Zaś kręgi pionowe od zera do  $40^{\circ}$  w górę i w dół. Jeżeli na kręgu pionowym ustawi się

odczyt zerowy, to wówczas, przy prawidłowo wyregulowanym (wyregulowanym) teodolicie, oś celowa będzie pozioma. Na rysunku 20.2 obrócono układ odczytowy kręgu pionowego wraz z lunetą o kąt  $90^{\circ}$  (z położenia poziomego do pionu). Teodolit składa się z lunety geodezyjnej, którą tworzy obiektyw 14, soczewka ogniskująca 12, płytka ogniskowa 11 i okular 10. Luneta ułożyskowana jest na poziomej osi obrotu 6 z urządzeniem odczytowym kątów w płaszczyźnie pionowej, które tworzą krąg pionowy 8, układ odczytowy kręgu pionowego 7 i poziomnica układu odczytowego kręgu pionowego 9. Całość (luneta i zespół kręgu pionowego) umocowana jest na korpusie przyrządu zwanym alidadą. Na alidadzie znajdują się także urządzenia odczytowe kręgu poziomego 4 i poziomnica kręgu poziomego 5. Krąg poziomy 3 umieszczony jest na pośredniej części teodolitu zwanej limbusem znajdujący się pomiędzy alidadą a spodarką 1. Ułożyskowania alidady, limbusa i spodarki tworzą oś główną teodolitu.

Spodarka służy do zamocowania teodolitu na statywie i do poziomowania kręgu poziomego.

Teodolity klasyfikuje się wg ich dokładności lub cech konstrukcyjnych. Ze względu na dokładność teodolity dzieli się na:

- 1) wysokiej precyzji (błąd pojedynczego odczytu ( $\delta < 1''$ )),
- 2) precyzyjne ( $6'' > \delta \geq 1''$ ),
- 3) średnio dokładne ( $60'' > \delta \geq 6''$ ),
- 4) mało dokładne ( $\delta \geq 1'$ ).

Ze względu na układ osi pionowej teodolity dzieli się na:

1) jednoosiowe (symbol - T) - w których krąg poziomy zamocowany jest na spodarce,

2) dwuosiowe, repetycyjne (symbol - TT) - w których krąg poziomy może być sprzęgany zarówno ze spodarką jak i z alidada,

3) reiteracyjne (symbol - Th) - w których krąg poziomy może obracać się względem spodarki, a nie jest sprzęgany z alidada,

4) busolowe (symbol - Tk) - w których krąg poziomy osadzony jest na magnesie spełniającym rolę igły magnetycznej.

### 2.3. Optyczny pomiar odległości za pomocą niwelatora lub teodolitu

Schemat pomiaru przedstawia rys.20.3. Obraz łąty mierniczej P tworzy się na płytce ogniskowej P', na której znajdują się dwie poziome kreski dlamiercze umieszczone w odległości L'. Z podobieństwa trójkątów można napisać

$$\frac{L}{D} = \left| \frac{L'}{f_{ob}} \right|,$$

stąd

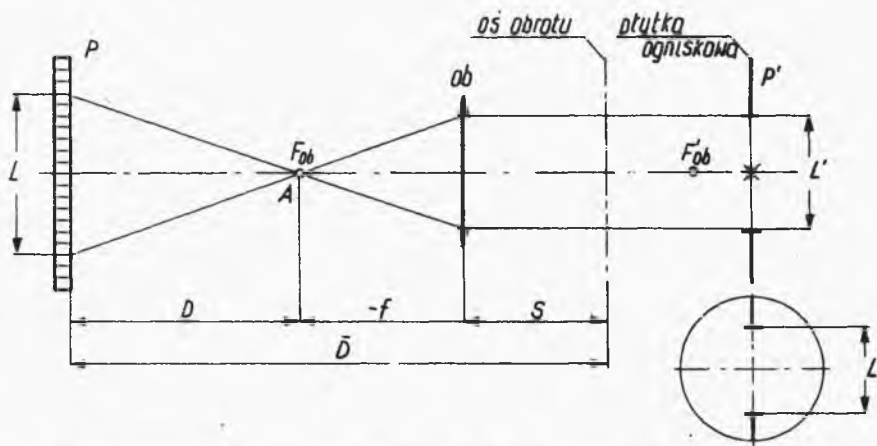
$$D = \frac{f_{ob}}{L'} L = k L$$

oraz

$$D = D + f_{ob} + s = k L + c,$$

gdzie  $c = f + s$ .

Ponieważ wartości  $f'_{Ob}$ ,  $L'$ ,  $f$  i  $s$  są stałe, to wielkości "k" i "c" też są stałymi i noszą nazwy: pierwsza - stałej mnożenia, druga - stałej dodawania. W stałej mnożenia uwzględniona jest także zamiana jednostek. Odczytując przez lunetę na łacie mierniczej liczbę działek centymetrowych zawartych między kreskami dalmierzczymi i mnożąc przez stałą mnożenia oraz dodając stałą dodawania otrzymuje się odległość łaty mierzonej od pionowej osi obrotu teodolitu. Punkt w terenie odpowiadający pionowej osi obrotu teodolitu wyznacza się zawieszając pod przyrządem na specjalnym haku pion lub przez obserwację przez specjalne urządzenie zwane pionem optycznym. Nowoczesne lunety geodezyjne konstruowane są tak, że punkt A (rys.20.3), zwany punktem analaktycznym, leży na pionowej osi



Rys.20.3. Schemat pomiaru odległości metodą optyczną

obrotu teodolitu i wtedy stała dodawania  $c = 0$ , zaś stała mnożenia najczęściej  $k = 100$ . Obiektyw takiej lunety złożony jest z dwu zespołów soczewek (dodatniego i ujemnego) tworzących razem teleobiektyw. Ogniskowanie na bliskie odległości realizuje się przez przemieszczenie ujemnego zespołu wzdłuż osi optycznej lunety.

#### 2.4. Rektyfikacja niwelatora z przekładaną lunetą

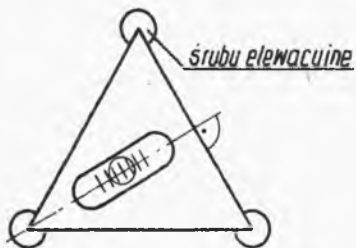
Rektyfikacja ma na celu zapewnienie poziomej osi celowej w dowolnym położeniu roboczym niwelatora. Aby niwelator którego oś celowa jest poziomowana przy pomocy poziomnicy, został



wyrektyfikowany konieczne jest spełnienie następujących warunków:

1. oś poziomicy powinna być prostopadła do pionowej osi obrotu niwelatora,
2. pionowa oś niwelatora powinna wyznaczać pion,
3. poziome ramię krzyża pivtki ogniskowej powinno być prostopadłe do pionowej osi obrotu, natomiast pionowe ramię krzyża powinno leżeć w płaszczyźnie równoległej do pionowej osi przyrządu,
4. oś celowa i oś geometryczna lunety powinny się pokrywać,
5. oś poziomicy rurkowej powinna być równoległa do tworzących pierścieni lunety.

Regulację według punktów 1 i 2 przeprowadza się jednocześnie w następujący sposób. Poziomicę rurkową ustawić tak, aby jej oś leżała nad jedną ze śrub elewacyjnych (rys.20.4). Ruchem tej śruby elewacyjnej doprowadzić pęcherzyk do środkowego położenia. Jeżeli po obrocie niwelatora o  $180^\circ$  wokół osi pionowej pęcherzyk poziomicy zmieni swoje położenie, regulację przeprowadza się metodą kolejnych przybliżeń, obracając niwelator kolejno co  $180^\circ$  i kasując po każdym obrocie połowę błędu położenia pęcherzyka śrubą elewacyjną (nad którą przebiega oś poziomicy), a połowę śrubą regulacyjną poziomicy. Z kolei należy obrócić korpus niwelatora o kąt  $90^\circ$  (czyli ustawić oś poziomicy równoległe do linii łączącej pozostałe dwie śruby elewacyjne) i obracając nimi w przeciwnych kierunkach doprowadzić pęcherzyk do środkowego położenia. Po tej regulacji pęcherzyk nie powinien już zmieniać swego położenia przy obrocie niwelatora, a stałość położenia w granicach 0,5 działki oznacza, że oś obrotu jest pionowa. Jeżeli wychylenie pęcherzyka jest większe należy opisaną czynności powtórzyć.



Rys.20.4. Zasada poziomowania przyrządu z poziomnicą rurkową

Sprawdzenie położenia kresek krzyża przeprowadza się w następujący sposób. Lunetę niwelatora pieruje się na nirałaki,

dobrze widoczny punkt pokrywający się z poziomym ramieniem krzyża. Ruchem obrotowym wokół osi przyrządu należy przeprowadzić obserwowany punkt przez całe pole widzenia lunety, który nie powinien zejść z poziomej kreski (w granicach grubości kreski). W przypadku stwierdzenia nieprawidłowego położenia kreski poziomego ramienia krzyża należy obrócić oprawę krzyża (przy znacznych odchyłkach) lub całą lunetę, wykręcając lub wkręcając wkręt regulacyjny. Podczas tego zabiegu luneta powinna być dociśnięta do zderzaka wkrętu regulacyjnego.

Sprawdzenie warunku pokrywania się osi celowej lunety z osią geometryczną przeprowadza się następująco. W pewnej odległości (25 ÷ 50 m) przed niwelatorem ustawia się łatę mierniczą, a następnie nie zmieniając położenia niwelatora obraca się lunetę dookoła osi geometrycznej o kąt  $180^{\circ}$  (do zderzaka). Odczyty łaty w pierwszym i drugim położeniu powinny być identyczne. W przeciwnym razie kasuje się połowę różnicy wskazań śrubami rektyfikacyjnymi krzyża. W ten sposób skorygowano położenie poziomej kreski krzyża. Korekcję poziomej kreski ramienia krzyża przeprowadza się analogicznie po obróceniu lunety o  $90^{\circ}$ . Przy rektyfikacji należy posługiwać się parami przeciwnych śrub rektyfikacyjnych krzyża, równoległych do sprawdzanego kierunku. Po skończonej regulacji obu kierunków widoczny w środku pola widzenia punkt nie powinien zataczać okręgów względem krzyża przy obrocie lunety wokół osi geometrycznej.

Sprawdzenie równoległości osi poziomnicy do tworzących pierścieni przeprowadza się przy dwóch położeniach lunety na wspornikach podstawy. W tym celu należy przed niwelatorem (25 ÷ 50 m) ustawić łatę i wykonać odczyt oraz powtórzyć tę operację po przełożeniu lunety o  $180^{\circ}$ . Obydwa odczyty powinny być identyczne. W przeciwnym przypadku należy podnieść lub obniżyć oś celową lunety o połowę różnicy wskazań przy pomocy wkrętów rektyfikacyjnych przy jednym ze wsporników.

## 2.5. Rektyfikacja teodolitu

Teodolit uważa się za wyrektyfikowany jeśli spełnia następujące warunki:

- 1) oś główna teodolitu jest pionowa,
- 2) oś celowa lunety jest prostopadła do poziomej osi obrotu lunety,
- 3) oś obrotu lunety jest prostopadła do pionowej osi obrotu alidady i przy spoziomowanym przyrządzie zajmuje położenie poziome.

Sprawdzenie i rektyfikację pionowego położenia osi pionowej przeprowadza się w identyczny sposób jak przy rektyfikacji niwelatora (p. 1 i 2 rektyfikacji).

Nieprostokadłość osi celowej lunety do poziomej osi obrotu nosi nazwę błędu kolimacji. Regulację przeprowadza się przez poprzeczne przesuwanie płytki ogniskowej. Usuwanie błędu kolimacji nie jest objęte tematem ćwiczenia.

Nieprostokadłość poziomej i pionowej osi obrotu teodolitu nosi nazwę błędu inklinacji. W nowoczesnych teodolitach prostokadłość tych osi zapewniona jest fabrycznie i z tego powodu nie podlega regulacji.

Poziomowanie osi celowej przeprowadza się przy pomocy poziomnicy umieszczonej na pionowym kręgu pomiarowym. Po ustawieniu pęcherzyka w środkowym położeniu i nastawieniu wskazania zerowego na kręgu pionowym oś celowa powinna zajmować położenie poziome. Sprawdzenie tego warunku przeprowadza się przy pomocy łaty mierniczej w następujący sposób. Ustawia się wskazanie zerowe na kręgu pionowym i celuje się lunetę na łatę odczytując położenie osi celowej. Następnie obraca się lunetę wokół pionowej i poziomej osi przyrządu o kąty po  $180^{\circ}$  i ponownie celuje się na poprzedni punkt łaty. Jeżeli wówczas wskazanie na kręgu pionowym jest w dalszym ciągu zerowe (lub  $180^{\circ}$ ), to spełniony jest warunek poziomej osi celowej. W przeciwnym przypadku należy lunetę ustawić na wskazanie odpowiadające średniej arytmetycznej obu odczytów na kręgu i do tego ustawienia doregulować położenie poziomnicy kręgu pionowego.

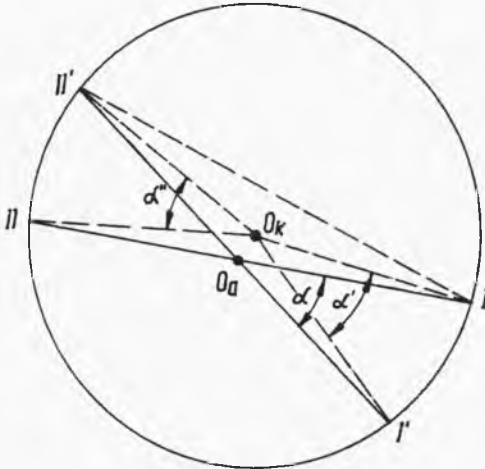
Oprócz w/w składników błędu pomiaru (wynikających z niedokładnej rektyfikacji przyrządu) istnieją ponadto następujące źródła błędów:

- 1) nierównomierność podziałki kręgów (poziomego i pionowego),
- 2) mimośrodowość osadzenia podziałki względem osi obrotu.

Jakkolwiek w przyrządzie powinny się znaleźć kręgi pomiarowe zapewniające podaną (w metryczce przyrządu) dokładność pomiaru, to wpływ istniejącej nierównomierności podziałki kręgu na błąd pomiaru można

zmniejszyć przez wielokrotny pomiar kąta (na różnych częściach kręgu).

Błąd mimośrodowego osadzenia podziałki względem osi obrotu można wyeliminować przez konstrukcję systemu odczytowego w postaci dwóch urządzeń odczytowych (na tym samym kręgu) rozmieszczonych co  $180^\circ$  (po przeciwnych stronach osi obrotu). Niech  $O_k$  i  $O_a$  (rys. 20.5) będą odpowiednio osiami obrotu kręgu i alidady. Jeśli przyrząd ma dwa urządzenia odczytowe I i II,



Rys.20.5. Kasowanie błędu mimośrodowości osadzenia kręgu za pomocą dwu noniuszy (systemów odczytowych)

to mierząc kąt w terenie  $\alpha$  otrzymuje się:

- przy celowaniu na pierwszy kierunek średni odczyt

$$\frac{I + II}{2},$$

- przy celowaniu na drugi kierunek średni odczyt

$$\frac{I' + II''}{2}.$$

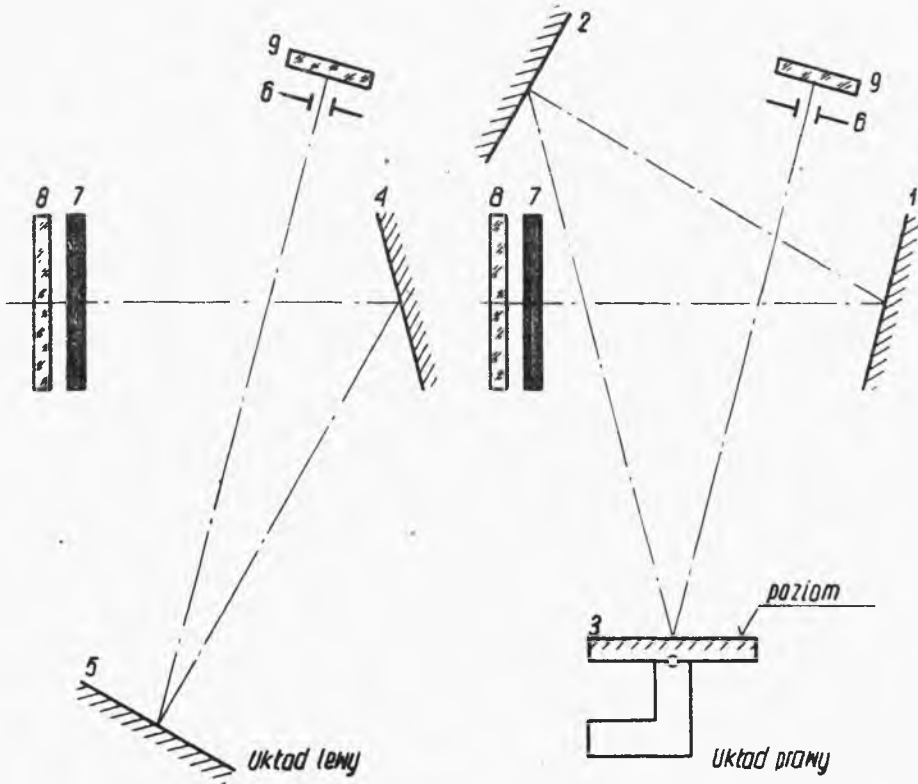
Zmierzony kąt  $\alpha$  w rzeczywistości wynosi

$$\alpha = \frac{\alpha' + \alpha''}{2},$$

jako kąt zewnętrzny  $\triangle O_a I II'$ . Stąd wniosek, że średnia arytmetyczna odczytów (z dwóch urządzeń odczytowych) jest wolna od błędu mimośrodowości.

## 2.6. Niwelator automatyczny NiL produkcji PZO

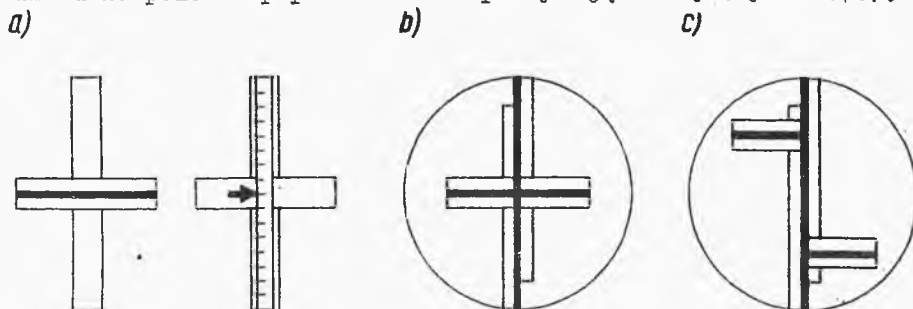
Schemat optyczny niwelatora NiL podano na rys.20.6. Składa się on z dwu układów luster, przy czym element (7) stanowi dzielnik pola, zaś (8) i (9) są płytkami ochronnymi. Układ



Rys.20.6. Schemat optyczny automatycznego niwelatora "NiL" prod. PZO

lewy tworzą nieruchome lustra (4) i (5), zaś lewy nieruchome lustra (1) i (2) oraz ruchome wahadło z lustrem (3) tłumione magnetycznie. Układ lewy daje obraz prosty zaś prawy odwrócony. Samopoziomujący lustrzany niwelator NiL jest przyrządem o mniejszej dokładności (klasa budowlana). Przystępując do pracy z niwelatorem należy zamocować go na trzpieniu statywu. Po tej czynności automatycznie zostaje odblokowane wahadło z ruchomym lustrem (3). W celu wykonania pomiaru wystarczy wstępnie ustawić niwelator w pozycji pionowej i przez wziernik ob-

serwować obraz łąty mierniczej (rys.20.7). Jeżeli poprzeczka łąty nie znajduje się na poziomie niwelatora, obserwator widzi dwie połówki poprzeczki nie pokrywające się (rys.20.7c).



Rys.20.7.a) łąta miernicza niwelatora "Nil"; b) poprzeczka znajduje się na poziomie osi celowej niwelatora "Nil"; c) poprzeczka nie znajduje się na poziomie osi celowej niwelatora "Nil"

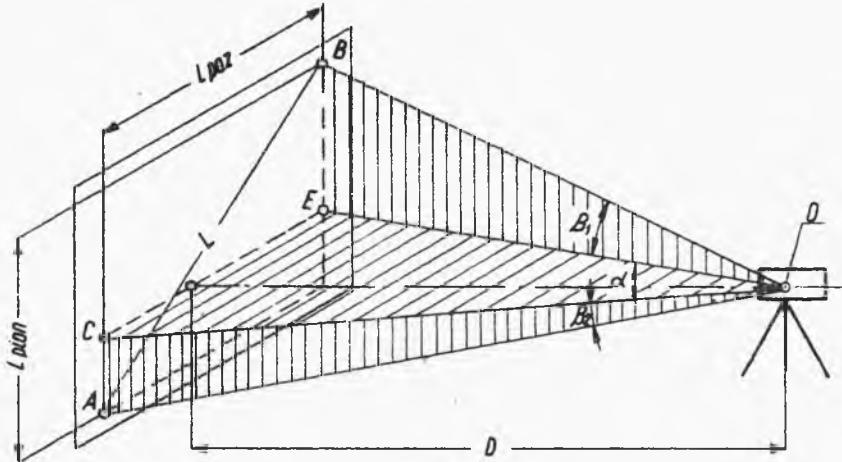
Jeżeli obie połówki poprzeczki tworzą jedną linię (rys.20.7b) na łacie dokonuje się odczytu. W celu wyznaczenia różnicy poziomów dwóch punktów w terenie, należy między nimi (w przybliżeniu po środku) ustawić niwelator. Na wybranych punktach postawić łątę i dokonać odczytów. Różnica odczytów na łacie jest różnicą poziomów między tymi punktami. Po skończonych pomiarach lub zmianie stanowiska niwelator należy koniecznie zdjąć ze statywu w celu unieruchomienia wahadła z lustrem, co zabezpiecza niwelator przed uszkodzeniem lub rozregulowaniem.

### 3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Przeprowadzić rektyfikację niwelatora "Gerlach" z przekładaną lunetą.
2. Wyznaczyć stałe dodawania i mnożenia niwelatora "Gerlach".
3. Przeprowadzić rektyfikację teodolitu TT-21.
4. Nauczyć się odczytywać wskazania układu odczytowego teodolitu TT-21.
5. Zmierzyć długość odcinka między wskazanymi przez asystenta punktami. Sposób pomiaru wyjaśnia (rys.20.8).

6. Wyznaczyć różnicę wysokości wskazanych punktów przy pomocy automatycznego niwelatora NiL.



Rys.20.8. Sposób pomiaru odległości między dwoma punktami za pomocą teodolitu

#### 4. LITERATURA

Kłuźniak S.: Geodezja. T.II. PWN. Warszawa 1954.

Szymoński J.: Instrumentoznawstwo geodezyjne. Cz.II. PPWK. Warszawa 1956.

#### 6. PYTANIA KONTROLNE

Warunki jakie musi spełniać weryfikowany niwelator (z przekładaną lunetą).

Do czego służą stałe mnożenia i dodawania niwelatora (lub teodolitu)?

Podać i objaśnić źródła błędów pomiaru teodolitu.

Po co urządzenie odczytowe kręgu ma dwa noniusze?

## Ćwiczenie 21

### SPEKTROFOTOMETR

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przyrządami służącymi do pomiaru zmian absorpcji promieniowania zależnej od długości fali.

#### 2. WSTĘP

Szerokie zastosowanie widm absorpcyjnych do badania składu substancji datuje się od zastosowania odbiorników fotoelektrycznych w charakterze detektorów promieniowania. Odbiorniki fotoelektryczne umożliwiły znaczne rozszerzenie zakresu spektralnego pomiarów ( $0,2 \div 50 \mu\text{m}$ ), zmniejszenie błędu pomiarów oraz ich automatyzację (z zapisem włącznie).

#### 3. PODSTAWY TEORETYCZNE POMIARÓW

Energia wiązki elektromagnetycznej podczas przechodzenia przez materię zmniejsza się. To zmniejszenie energii zachodzi na skutek odbicia od powierzchni ograniczających dany ośrodek, rozproszenia na cząsteczkach ośrodka, a także na skutek absorpcji. Powrót do stanu normalnego następuje przez emisję (we wszystkich kierunkach) niekiedy w zakresie innej długości fali niż absorbowana, bądź też przez przejścia bezpromieniste. W wyniku absorpcji energia wiązki przechodzącej ulega na całej drodze osłabieniu. Zmiana absorpcji w zależności od długości fali jest wielkością charakterystyczną dla danego ośrodka i może stanowić podstawę do jego rozpoznania. Analiza absorpcyjna



szczególnie szeroko stosowana jest w chemii, biologii i medycynie, gdzie wykorzystuje się ją do wykrywania poszczególnych związków chemicznych.

W przypadku materiałów optycznych zależność zmiany absorpcji od długości fali wykorzystywana jest nie do identyfikacji składników, lecz do wprowadzenia zamierzonych zmian temperatury barwowej, bądź wyeliminowania określonych długości fali.

Absorpcja  $A$  definiowana jest jako

$$A = \log \frac{I_0}{I},$$

gdzie:  $I_0$  - natężenie promieniowania wiązki padającej na dany ośrodek,

$I$  - natężenie promieniowania wiązki po przejściu przez warstwę o określonej grubości.

Z prawa Beera-Waltera wiadomo, że wartość absorpcji wiązki monochromatycznej przechodzącej przez roztwór jednoskładnikowy jest wprost proporcjonalna do stężenia roztworu i do grubości warstwy absorpcyjnej. Ponadto wartość absorpcji roztworów wieloskładnikowych jest sumą absorpcji pojedynczych składników. Wychodząc z powyższych zależności można zapisać równanie wiążące absorpcję z właściwościami ośrodka i grubością warstwy absorbującej

$$I = I_0 e^{-kd},$$

gdzie:  $k$  - współczynnik pochłaniania zależny od długości fali i rodzaju materiału,

$d$  - grubość warstwy.

#### 4. OPIS APARATURY DO POMIARU ABSORPCJI

W zależności od sposobu działania i stopnia skomplikowania budowy można wyróżnić następujące grupy przyrządów:

- a) kolorymetry,
- b) fotometry,
- c) spektrofotometry.

W każdej z wyżej wymienionych grup przyrządów są następujące zespoły, istotne z punktu widzenia pracy przyrządu:

- źródło promieniowania,
- monochromator,
- pomieszczenie badanej substancji,
- odbiornik promieniowania,
- układ odczytowy - z ew. rejestracją wyników pomiaru.

#### 4.1. Źródło promieniowania

Przeważnie jest to termicznie pobudzone źródło o widmie ciągłym. Wskazany jest równoenergetyczny rozkład promieniowania w całym zakresie pomiarowym, przy czym w większości przyrządów wymagana jest stabilizacja wartości energii promieniowania. W zakresie widma widzialnego, ultrafioletu i podczerwieni stosuje się lampy żarowe z włóknem wolframowym. Lampy gazowe o widmie dyskretnym używane są przeważnie do wzorcowania monochromatorów.

#### 4.2. Monochromator

Wybieranie promieniowania o określonej długości fali można realizować za pomocą:

- filtrów absorpcyjnych lub interferencyjnych,
- monochromatorów pryzmatycznych,
- monochromatorów siatkowych.

Pierwsze z wymienionych, z uwagi na dość szeroki przedział przepuszczalnych długości fal, używane są w przyrządach prostych jak kolorymetry i fotometry, głównie w zakresie widma widzialnego.

Podstawowym elementem monochromatorów pryzmatycznych jest pryzmat załamujący wykonany ze szkła lub kryształu (kwarc, NaCl). Parametrami charakterystycznymi są:

- zakres przepuszczalności fali elektromagnetycznej zależny od materiału, z którego wykonany jest pryzmat,
- dyspersja kąтова  $\Delta\delta$ , odpowiadająca określonemu przedziałowi długości fali  $\Delta\lambda$

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\lambda} = \frac{t}{b} \frac{\Delta n}{\Delta\lambda},$$

gdzie:  $t$  - długość podstawy pryzmatu,

$b$  - średnica wiązki wychodzącej z pryzmatu;

zależność dyspersji kątovej od  $\Delta n / \Delta \lambda$  wskazuje, że będzie ona przybierała różne wartości dla różnych długości fali światła;

- zdolność rozdzielcza. Miarą zdolności rozdzielczej jest wyrażenie

$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta \delta}{\Delta \lambda} b = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} t.$$

Stosowanie pryzmatów załamujących ograniczone jest zakresem długości fali światła przepuszczanego przez materiał pryzmatu oraz uzależnia dyspersję kątową i zdolność rozdzielczą od długości fali.

Monochromatory siatkowe mają tę przewagę, że dyspersja ich nie zależy od długości fali promieniowania, a tylko od rodzaju użytej siatki dyfrakcyjnej, jednak zakłócenia w widmie spowodowane promieniowaniem rozproszonym oraz rozdział energii na wyższe rzędy powoduje ograniczenie w ich stosowaniu. Zdolność rozdzielcza monochromatora siatkowego zależy od liczby rys w siatce i jest przeważnie kilkakrotnie wyższa od zdolności rozdzielczej monochromatora pryzmatycznego.

Istotnymi elementami monochromatora są także obiektywy kolimatorów i szczeliny: wejściowa i wyjściowa. Ze względu na duży zakres widmowy obiektywy kolimatorów wykonuje się jako zwierciadła wklęsłe. Szczeliny (często łukowe) posiadają regulowaną szerokość z możliwością odczytu co 0,01 mm.

#### 4.3. Pomieszczenie badanej substancji

Badaną substancję umieszcza się między źródłem promieniowania i monochromatorem lub między monochromatorem i odbiornikiem. W pierwszym przypadku badana próbka naświetlana jest całą energią promienistą emitowaną przez źródło. Jedno lub dwukanałowa komora pomiarowa jest przeznaczona do ustawiania badanej próbki, próbki odniesienia, względnie obydwu elementów jednocześnie. Badane elementy mogą być w postaci płytek płasko-równoległych, błon naniesionych na szkło podstawowe lub cieczy. W każdym przypadku musi być znana grubość badanego elementu.

Dla cieczy stosowane są kuwety o różnej grubości, wykonane ze szkła lub materiałów przepuszczających odpowiedni zakres promieniowania.

#### 4.4. Odbiorniki promieniowania

Energia po przejściu przez badaną substancję lub substancję odniesienia oddziałuje na odbiornik, którym może być oko lub przetwornik fotoelektryczny. Zasada działania opiera się na:

- zjawisku wrażliwości oka na różnicę luminancji sąsiadujących powierzchni,
- zjawisku fotoelektrycznym (fotokomórki, krotniki fotoelektryczne, fotoogniwa),
- zjawisku zmiany oporu pod wpływem promieniowania cieplnego (bolometry, termistory).

Wszystkie odbiorniki mają określone wspólne cechy charakterystyczne, z których najważniejsze to:

- gęstość monochromatyczna reakcji (powinna być dobrana do zakresu długości fali, w którym prowadzony jest pomiar),
- czułość, czyli przyrost wartości sygnału spowodowany zmianą natężenia promienia,
- poziom szumów (prąd ciemny),
- charakterystyka częstotliwościowa (szybkość reakcji w funkcji częstotliwości zmiany natężenia napromieniowania),
- zmęczenie (zmiana wartości sygnału w funkcji czasu).

W prostych przyrządach (kolorymetry) jako odbiorniki stosuje się fotoogniwa. W przyrządach wizualnych (fotometry) jako odbiornik stosowano oko, wykorzystując jego wrażliwość na różnicę luminancji dwóch sąsiadujących pól. W przyrządach działających półautomatycznie jako odbiorniki stosuje się fotokomórki, krotniki fotoelektryczne lub bolometry w zależności od zakresu długości analizowanej fali.

#### 4.5. Urządzenia odczytowe i rejestrujące

Większość przyrządów służących do pomiaru absorpcji wykorzystuje metodę zerową. W układzie urządzenia odczytowego wbudowany jest kompensator, którym wyrównuje się natężenie na-

promienienia padające na odbiornik z dwóch kanałów przyrządu (pomiarowego i odniesienia) lub równoważę prądy płynące w odbiornikach umieszczonych w kanałach pomiarowych. Podziałka na kompensatorze wskazuje transmisję badanej próbki w stosunku do próbki umieszczonej w kanale odniesienia. Na skali kompensatora znajduje się jeszcze druga podziałka - podziałka absorpcji (ekstynkcji). Obie wielkości związane są następującą zależnością

$$a_E = \log \frac{100}{a_D} = 2 - \log a_D,$$

gdzie:  $a_E$  - wskazania na podziałce absorpcji,

$a_D$  - wskazania na podziałce przepuszczalności.

Wynik pomiaru odczytywany jest na podziałce kolejno dla różnych długości fali. W nowoczesnych spektrofotometrach zmiana długości fali i porównanie natężenia napromienienia odbiornika następuje automatycznie (wg z góry ustalonego programu). Wynik pomiaru - przepuszczalność w funkcji długości fali - rejestrowany jest na rejestratorze w formie wykresu lub zapisu cyfrowego. W niektórych spektrofotometrach zamiast wartości długości fali podawana jest liczba falowa określona następującą zależnością

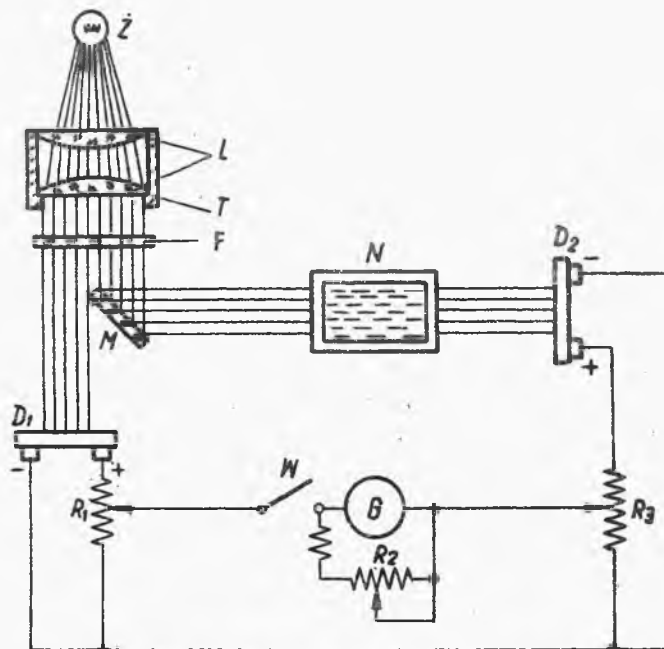
$$\text{liczba falowa } [\text{cm}^{-1}] = \frac{10000}{\text{długość fali } [\mu\text{m}]} \cdot$$

## 5. PRZYKŁADY PRZYRZĄDÓW DO POMIARU ABSORPCJI

### 5.1. Kolorymetr fotoelektryczny typ KF 2

W kolorymetrze tym detektorami są dwa fotoogniwa; pomiar wykonywany jest za pomocą wyskalowanego potencjometru. Źródłem światła Z (rys.21.1) jest żarówka wolframowa o napięciu 6 V i mocy 30 W, zasilana z sieci prądu zmiennego przez wbudowany w przyrząd magnetyczny stabilizator. Promieniowanie wychodzące ze źródła przechodzi przez kondensator L, który formuje wiązkę równoległą, stałą przysłoną T i filtr barwny F. Lusterko M rozdziela wiązkę na dwie części, z których jedna pada

wprost na fotoogniwo selenowe  $D_1$ , a druga przechodzi przez naczynko  $N$  i pada na drugie fotoogniwo  $D_2$ . Kolorymetr zaopatrzony jest w pięć filtrów barwnych. Filtry te umieszczone są w tarczy, przez obrót której mogą być wprowadzone kolejno w bieg wiązki. Obydwa fotoogniwa selenowe połączone są w układ



Rys.21.1. Schemat kolorymetru KF2

mostkowy. Przyrządem pomiarowym jest galwanometr lusterkowy  $G$ , którego wskazania odtwarza ruch plamki świetlnej wzdłuż matówki z zaznaczoną pionową kreską wskazującą położenie zerowe. Przez zmianę oporności opornika  $R_2$  zmieniać można czułość układu pomiarowego. Potencjometr pomiarowy  $R_1$  połączony jest z tarczą kołową wyskalowaną w wartościach absorpcji i procentach transmisji. Tarcza ta obraca się jednocześnie z ruchem suwaka potencjometru  $R_1$ .

Przed przystąpieniem do pomiaru należy, przy wyłączonym (wyłącznikiem  $W$ ) z układu pomiarowego galwanometrze sprawdzić w sposób mechaniczny plamkę galwanometru do położenia zerowego. Dokonuje się tego przez obrót odpowiedniej pokrętki galwanometru. Następnie włącza się galwanometr i jedną z trzech

możliwych wartości oporności opornika  $R_2$  dobiera się czułość układu pomiarowego. W naczynku  $N$  umieszcza się odnośnik, potencjometr pomiarowy ustawia się w położeniu "100% transmisji", za pomocą potencjometru  $R_3$  sprowadza się plamkę galwanometru do położenia zerowego. Następnie naczynko z odnośnikiem zastępuje się naczynkiem z roztworem badanym. Plamkę galwanometru sprowadza się ponownie do zera przy użyciu potencjometru pomiarowego i na połączonej z nim podziałce odczytuje się wartość transmisji lub wartość absorpcji (w procentach).

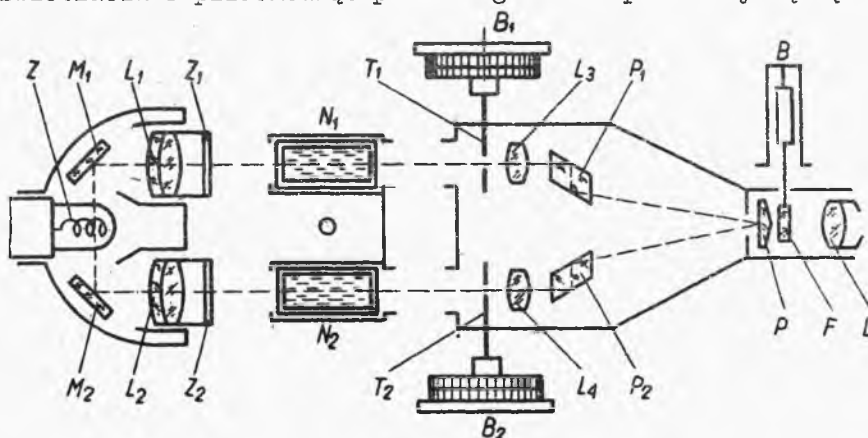
W skład wyposażenia przyrządu wchodzi cztery pary naczyń o grubościach 5 mm, 10 mm, 20 mm, 50 mm. Naczynia te umieszczone są w szufladce wsuwanej do wnętrza przyrządu. Odpowiednia sygnalizacja świetlna wskazuje, które z naczyń znajduje się w biegu wiązki. Kolorymetr ten przeznaczony jest przede wszystkim dla laboratoriów przemysłowych.

W ćwiczeniu należy wykonać: regulację kolorymetru oraz pomiar przepuszczalności danego filtru.

W sprawozdaniu należy umieścić: schemat i opis kolorymetru, wyniki pomiarów (tablice, wykresy) oraz wnioski z pomiarów.

### 5.2. Fotometr Pulfricha

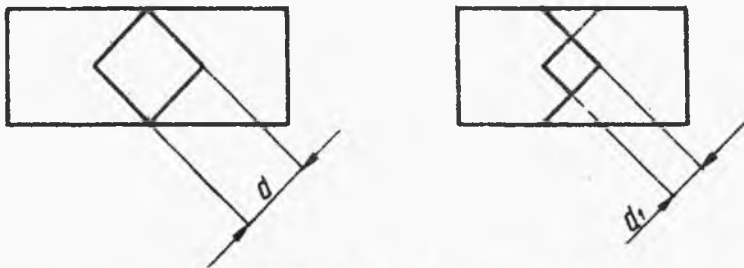
Dwie wiązki światła odbijając się od lusterek wychodzą z oświetlacza i przechodząc przez regulowane przesłony łączą się



Rys.21.2. Schemat fotometru Pulfricha

w bipryzmacie (rys.21.2). Obserwator widzi w okularze dwa pola z ostrą granicą podziału (krawędź bipryzmatu). Lewe pole oświetlone jest wiązkami promieni, przechodzącymi przez prawą część fotometru, a prawe przez lewą jego część. Zmieniając wielkości otworu każdej przesłony, tj. przekrój odpowiedniej wiązki, możemy zmienić luminancję każdego pola. Pozwala to na dokonanie fotometrycznych porównań intensywności obydwu wiązek światła. Jeżeli jedna z wiązek posiada mniejszą intensywność niż druga, np. na skutek strat w znajdującym na jej drodze środowisku, to przez zmianę otworu przysłony na drodze drugiej wiązki można wyrównać luminancje obu pól i wg wielkości zmiany otworu przysłony określić względną intensywność obydwu wiązek światła (przy założeniu, że znany jest stosunek intensywności bez obecności pochłaniającego środowiska).

Zmienne filtry umieszczone przed okularzem, pozwalają dokonywać tych pomiarów w różnych zakresach długości fal światła. Na rys.21.3 przedstawiony jest schemat przysłony. Pełnego otwarcia przysłony dokonuje się jednym obrotem bębna. Przysłona



Rys.21.3. Schemat przysłony

jest otwarta całkowicie, kiedy jej dwie połowy nie nakładają się jedna na drugą, a tylko stykają się, tworząc kwadratowy otwór.

Intensywność światła przechodzącego przez przysłonę jest proporcjonalna do pola otworu. Wielkość  $d$  jest liniowo związana z kątem obrotu bębna, a podziałka bębna stopniowana od 0 do 100, naniesiona jest tak, że wartości jej są bezpośrednio proporcjonalne do intensywności przechodzącego światła (czarna podziałka). Na czarnej podziałce odczytuje się bezpośrednio



przepuszczalność danej substancji w procentach, natomiast czerwona podziałka służy do odczytania ekstynkcji.

W celu otrzymania krzywej pochłaniania jako funkcji zależnej od długości fali światła należy posłużyć się filtrami umieszczonymi w przesłonie rewolwerowej. Obszar przepuszczalności tych filtrów jest bardzo wąski bowiem połówkowa szerokość pasma przepuszczalnego światła wynosi około 40,0 nm.

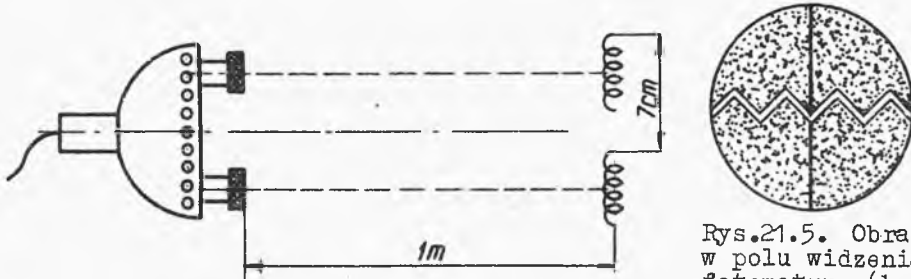
Nominalne wartości długości fali światła przepuszczanego przez filtr podane są w tablicy 1.

Tablica 1

Nr filtru	$\lambda$ [nm]
9	750
8	720
7	660
6	610
5	570
4	530
3	500
2	470
1	420

\*Aby otrzymać dostatecznie dokładne pomiary należy zachować jednakową luminancję obydwu pól. Do dokonania regulacji przyrzędu zdjeżdża się fotometr ze statywu i kieruje wiązki światła od oświetlacza na ekran, np. ustawioną prostopadle kartę papieru, w odległości jednego metra od oświetlacza. Przy przesuwaniu oprawki z kondensatorami otrzymuje się dwa ostre obrazy żarnika lampy. Należy zbliżać albo oddalać obydwa obrazy aż do otrzymania rozstawienia 7 cm między prawymi lub lewymi końcami obydwu obrazów (rys.21.4). Po ustawieniu fotometru na statywie i nałożeniu filtru nr 5, przesunięciem kondensatorów oświetlacza otrzymuje się w obu polach ostre obrazy żarnika lampy, położone jak na rys.21.5. Następnie wstawia się matówki w okna oświetlacza i ogniskuje okular na granicę podziału obu pól. Ustawiając jeden z bębnow na wartość 100, obrotem drugiego bębna wyrównuje się luminancję obydwu pól, dokonując 5 do

10 pomiarów. Jeżeli średnia wartość wyniku równa jest  $100 \pm 2$ , to regulacja przyrządu przeprowadzona była prawidłowo. Jeżeli



Rys.21.4. Regulacja fotometru

Rys.21.5. Obraz w polu widzenia fotometru (bez matówek)

błąd jest większy, przesuwa się jeden z kondensatorów i ponownie dokonuje fotometrowania aż do osiągnięcia jednakowej luminancji przy jednakowych nastawach bębna.

Przy fotometrowaniu dobrym kryterium równości luminancji pól jest zanik granicy podziału obydwu pól. W czasie fotometrowania oko obserwatora winno być dociśnięte do ocznika okulara i w miarę możliwości przy pomiarach powinno zawsze zajmować jedno i to samo położenie.

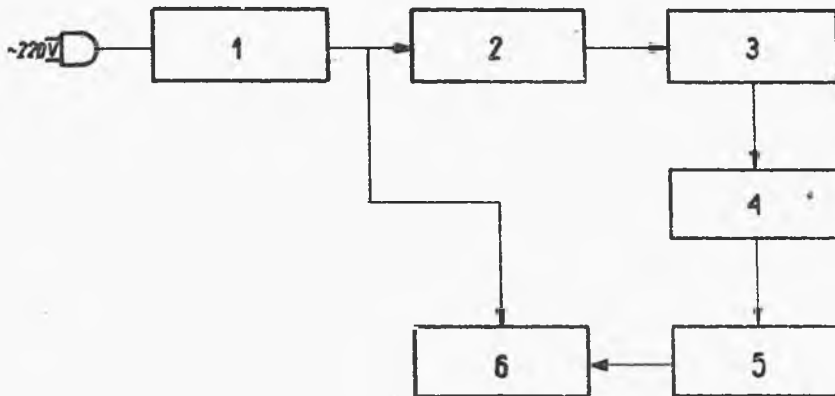
W ćwiczeniu należy wykonać: regulację fotometru oraz pomiaru wskazanych elementów.

W sprawozdaniu należy umieścić: schemat i opis fotometru, wyniki pomiarów (tablica, wykresy) oraz wnioski z pomiarów (w przypadku badania filtra absorpcyjnego należy określić oznaczenie szkła według katalogu Schotta).

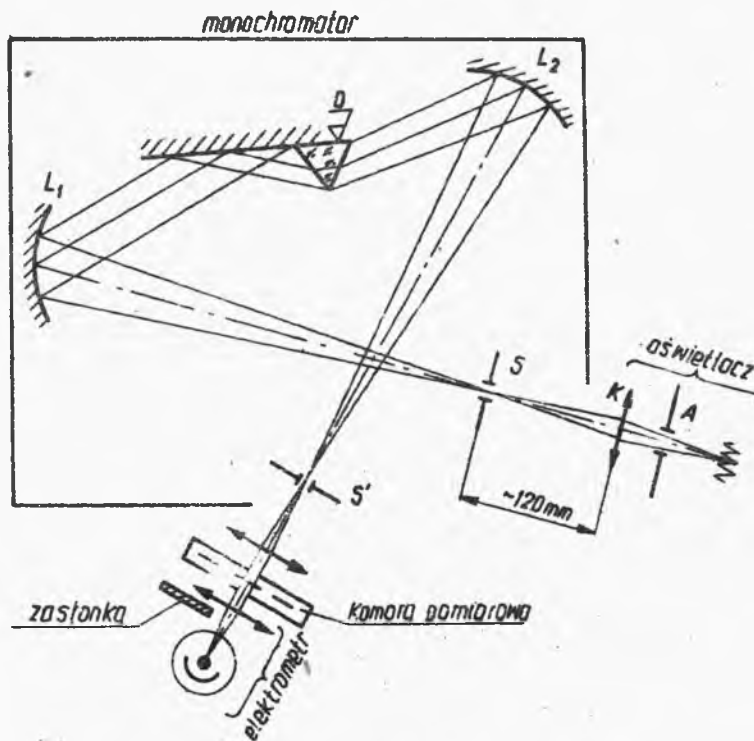
### 5.3. Spektrofotometr uniwersalny Zeissa

Spektrofotometr składa się z szeregu oddzielnie stojących zespołów. Zespoły te mogą być wymienne, tworząc trzy zestawy pomiarowe stosowane do różnych metod pomiarowych. Poniżej omówiony zostanie układ stosowany najczęściej, którego schemat blokowy przedstawia rys.21.6.

Napięcie z zasilacza stabilizowanego 1 zasila źródło promieniowania 2, np. żarówkę z żarnikiem wolframowym lub lampę rtęciową niskociśnieniową (zasilaną z osobnego dławika). Strumień światła przez monochromator 3 i komorę pomiarową 4 do-



Rys.21.6. Schemat blokowy spektrofotometru



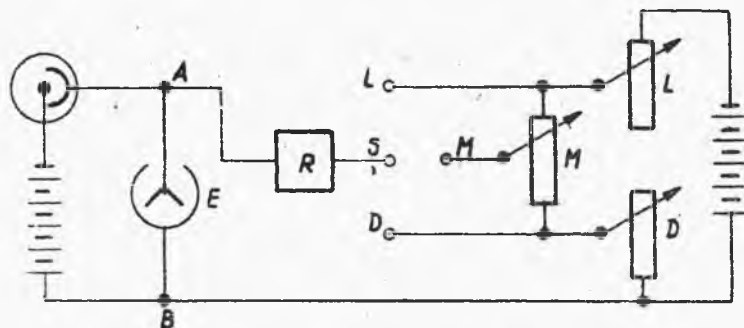
Rys.21.7. Schemat spektrofotometru

ciera do elektrometru 5. Kompensator 6 służy do regulacji i kompensacji prądu fotokomórki umieszczonej w elektrometrze 5.

Rysunek 21.7 pokazuje schemat układu spektrofotometru.

Obraz źródła światła dany przez kondensator K tworzy się na szczeliny S ustawionej w ognisku zwierciadła  $L_1$ . Obraz przesłony aperturowej A dany przez kondensator K tworzy się na lustrze  $L_1$  (obserwator patrząc w monochromator przez szczelinę  $S'$  widzi obraz przesłony A na tle lustra  $L_1$ ). Wiązka światła po odbiciu od lustra  $L_1$  pada na pryzmat dyspersyjny; dalej na szczeliny  $S'$  tworzy się rozciągnięty barwny obraz szczeliny S. Szczelina  $S'$  wybiera z widma spektralnego wymagany obszar odpowiadający określonej długości fali. Za szczeliną  $S'$  znajduje się komora pomiarowa, w której mocowane są elementy: badany i odniesienia. Po przejściu przez komorę pomiarową wiązka światła pada na fotokomórkę połączoną z elektrometrem. Zasłonka używana jest przy kompensacji prądu ciemnego fotokomórki.

Rys.21.8 przedstawia układ elektryczny spektrofotometru. W obwód anodowy włączony jest duży opór R. Spadek potencjału



Rys.21.3. Układ elektryczny spektrofotometru

utworzony na tym oporze może być mierzony za pomocą elektrometru E. W omawianym spektrofotometrze stosowany jest elektrometr nitkowy pracujący metodą zerową. Pomiar polega na trzykrotnej kompensacji spadku potencjału na oporze R:

- przy połączeniu S-D kompensacja prądu ciemnego fotokomórki potencjometrem D,
- przy połączeniu S-L kompensacja prądu fotokomórki potencjometrem L (przy przechodzeniu światła przez element odniesienia),

- przy połączeniu S-M kompensacja prądu fotokomórki potencjometrem M przy przechodzeniu światła przez element badany.

Położenie potencjometru M (wskazywane w %) pokazuje przepuszczalność badanego elementu w stosunku do przepuszczalności elementu odniesienia. Ze względu na zmienną w funkcji długości fali luminancję żarówki, przepuszczalność układu optycznego spektrofotometru oraz czułość fotokomórki - po każdorazowej zmianie długości fali należy kompensować prąd odniesienia potencjometrem L. Podczas kompensacji obserwuje się na matówce obraz nitki elektrometru. Kompensacja jest ukończona gdy obraz nitki zajmie położenie środkowe. Zmiana długości fali następuje przez obrót lustera i pryzmatu wokół punktu O (rys.21.7). Podziałka połączona z obrotem pryzmatu ocyfrowana jest w jednostkach umownych. Do każdego pryzmatu producent dołącza tablicę, do porównania wskazań z długością fali. Po wymianie pryzmatu należy zawsze sprawdzić tablicę wzorcowania za pomocą lampy rtęciowej o znanym widmowym rozkładzie luminancji.

Opis regulacji i szczegółową instrukcję obsługi zawiera osobna instrukcja.

W ćwiczeniu należy: sprawdzić tabelę wzorcowania i czułość przyrządu oraz pomierzyć przepuszczalność zadanych filtrów.

W sprawozdaniu należy umieścić: schemat przyrządu, protokół wzorcowania monochromatora, tablicę i wykresy wyników oraz wnioski z pomiarów.

## 6. LITERATURA

Praca zbiorowa pod red. Świętosławskiej J.: Spektrofotometria absorpcyjna. PWN: Warszawa 1962.

Kamler J., Mańk W.: Odbiorniki fotoelektryczne. WNT. Warszawa 1966.

Jóźwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.

## 7. PYTANIA KONTROLNE

Omówić zasadę działania i cechy charakterystyczne monochromatorów.

Omówić sposób wzorcowania monochromatora.

Regulacja fotometru Pulfricha.

Zasada działania kolorymetru.

Układ elektryczny spektrofotometru.

Sposób pomiaru spektrofotometrem.

## Ćwiczenie 22

### POMIARY OPTYCZNEJ FUNKCJI PRZENOSZENIA

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z obrazem rozciągniętych przedmiotów, utworzonym przez układ optyczny oraz wpływem na ten obraz: przeogniskowania, apertury i aberracji układu optycznego. W czasie ćwiczenia należy także zapoznać się z przyrządem umożliwiającym pomiar funkcji przenoszenia kontrastu.

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Każdy przyrząd optyczny dokonuje przekształcenia przestrzeni przedmiotowej w przestrzeń obrazową. Przestrzeń przedmiotową rozumie się tu jako zbiór źródeł światła. Przestrzenią obrazową jest zbiór obrazów tych źródeł. Ponieważ układ optyczny dokonuje przekształcenia geometryczno-energetycznego, zachodzi pytanie czy i w jaki sposób układ optyczny wpływa na

podobieństwo rozkładu obrazów źródeł światła do rozkładu samych źródeł. W celu sprecyzowania odpowiedzi należy ustalić rozkład źródeł światła w przestrzeni przedmiotu, a następnie zbadać rozkład obrazów tych źródeł w przestrzeni obrazu.

Rozważania teoretyczne wskazują, że najlepszym do tego celu jest przedmiot płaski, w którym luminancja w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej układu wzdłuż jednej współrzędnej (oś  $x$ ) zmienia się wg funkcji sinus, wzdłuż drugiej (oś  $y$ ) jest stała. Taki przedmiot nazywa się sinusoidalnym. Obraz sinusoidalnego przedmiotu będzie płaski, prostopadły do osi optycznej układu. Rozkład oświetlenia wzdłuż osi  $x'$  będzie zmieniał się wg sinusoidy, wzdłuż osi  $y'$  będzie stały. Różnice występują jedynie w położeniu jasnych i ciemnych miejsc (w stosunku do wyznaczonych na podstawie praw optyki geometrycznej) oraz w kontraście obrazu (w stosunku do kontrastu przedmiotu). Kontrast obrazu (lub przedmiotu) określony jest następującym wyrażeniem

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

gdzie:  $I_{\max}$  - największe natężenie oświetlenia w obrazie lub największa luminancja przedmiotu,

$I_{\min}$  - najmniejsze oświetlenie w obrazie lub najmniejsza luminancja przedmiotu.

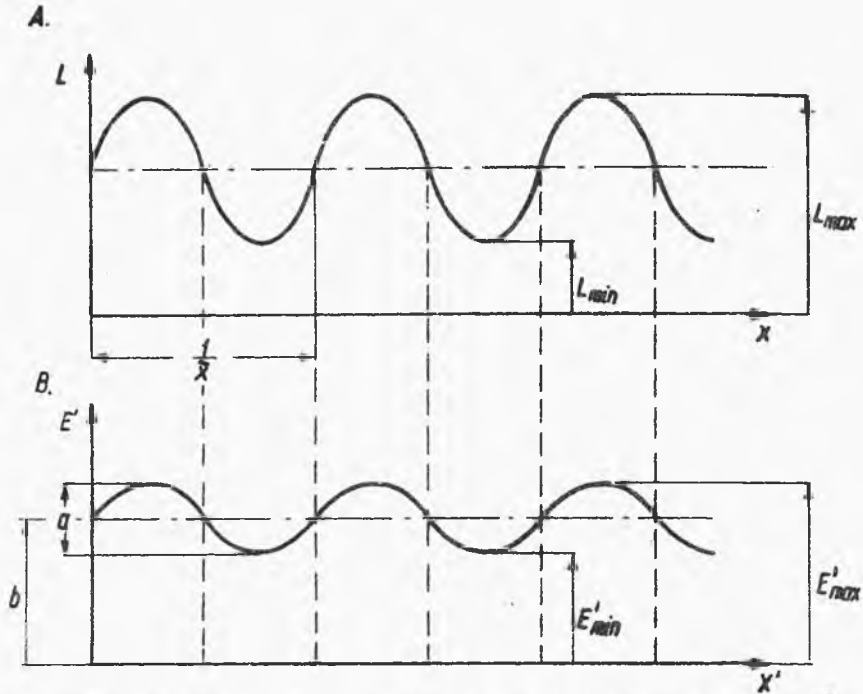
Zgodnie z definicją kontrast w przedmiocie wyrazi się wzorem (rys.22.1)

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}.$$

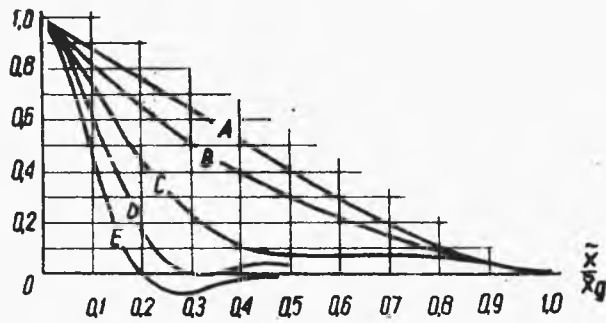
Kontrast w obrazie będzie

$$K' = \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}}.$$

Stosunek kontrastów  $d = \frac{K'}{K}$  będący funkcją częstości  $\tilde{x}$  nazywa się optyczną funkcją przenoszenia kontrastu lub często w uproszczeniu - funkcją przenoszenia. Przebieg FP zależy



Rys.22.1. Rozkład luminancji w przedmiocie (a); rozkład oświetlenia w obrazie (b)



Rys.22.2. Funkcja przenoszenia dla przegniskowanego układu bezaberracyjnego



od aberracji układu optycznego, jego zogniskowania, wielkości i kształtu źrenicy.

Rys.22.2 pokazuje przykładowe przebiegi funkcji przenoszenia dla przeogniskowanego układu bezaberracyjnego. Wartości przeogniskowania:

dla układu z kołową źrenicą

krzywa A - w ognisku,

krzywa B - aberracja falowa  $\lambda/4$ ,

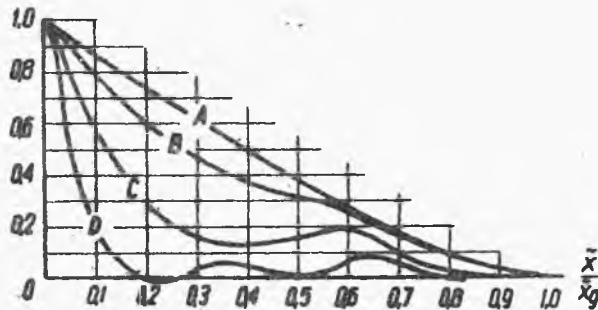
krzywa C - aberracja falowa  $\lambda/2$ ,

krzywa D - aberracja falowa  $3\lambda/4$ ,

krzywa E - aberracja falowa  $\lambda$ .

Z wykresu wynika, że przy przeogniskowaniu najszybsza zmiana kontrastu występuje dla częstości  $\tilde{x} = 0,3 - 0,4 \tilde{x}_g$ . Częstość graniczna  $\tilde{x}_g = 2A/\lambda$  jest to częstość, dla której kontrast w obrazie równy jest zeru.

Rys.22.3 pokazuje wpływ aberracji sferycznej trzeciego rzędu na funkcję przenoszenia. Krzywe obliczone są dla płaszczyzny obrazu położonej w połowie między ogniskiem brzeżnym i przyosiowym.



Rys.22.3. Funkcja przenoszenia dla układu obciążonego aberracją sferyczną

Wartości aberracji sferycznej:

krzywa A - aberracja sferyczna  $\delta s' = 0$ ; falowa 0,

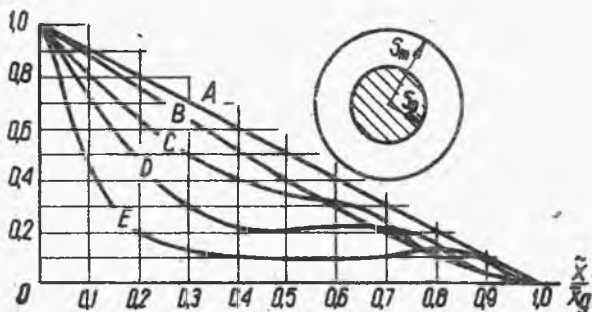
krzywa B - aberracja sferyczna  $\delta s' = 4\lambda/n'\sin^2 u'$ ,  
falowa  $\lambda/4$ ,

krzywa C - aberracja sferyczna  $\delta s' = 8\lambda/n'\sin^2 u'$ ;  
falowa  $\lambda/2$ ,

krzywa D - aberracja sferyczna  $\delta s' = 16\lambda/n'\sin^2 u'$ ;  
falowa  $\lambda$ .

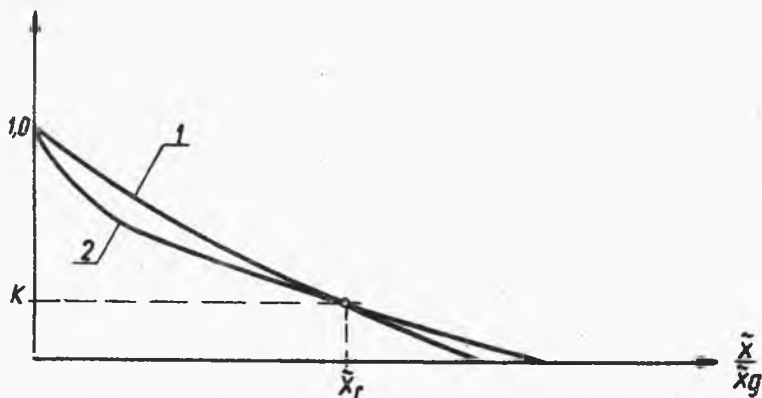
Rys.22.4 pokazuje wpływ kształtu źrenicy na funkcję przenoszenia:

- krzywa A - dla otworu kwadratowego,
- krzywa B - dla otworu okrągłego,
- krzywa C - dla otworu okrągłego przysłoniętego  $s_o/s_m = 1/4$ ,
- krzywa D - dla otworu okrągłego przysłoniętego  $s_o/s_m = 1/2$ ,
- krzywa E - dla otworu okrągłego przysłoniętego  $s_o/s_m = 3/4$ .



Rys.22.4. Funkcja przenoszenia dla układów z różnym kształtem źrenicy

Na rys.22.5 pokazano przebiegi funkcji przenoszenia dwóch obiektywów fotograficznych, które mają tę samą zdolność rozdzielczą. Pierwszy układ z wyższym kontrastem w niskich częstotliwościach tworzy obraz żywszy, bardziej kontrastowy. Drugi układ jest obiektywem portretowym, miękko rysującym.



Rys.22.5. Funkcja przenoszenia dla dwóch obiektywów fotograficznych: K-minimalny kontrast wykrywany przez odbiornik,  $X_r$ -zdolność rozdzielcza

Funkcja przenoszenia może być stosowana do oceny jakości układów optycznych. Jednym z kryteriów może być wtedy pole pod krzywą funkcji przenoszenia. Z innych zastosowań można wymienić badania własności całych systemów: obiektyw, klisza, kamera telewizyjna, monitor, oko itp. Szczególne korzyści z funkcji przenoszenia uzyskuje się wtedy, gdy można przez proste mnożenia funkcji przenoszenia dla dwóch lub więcej układów otrzymać funkcję przenoszenia całego systemu. Dla przykładu, jeżeli obiektyw kamery ma kontrast 0,5 przy  $\lambda = 20$  l/mm i jest użyty z filmem, który ma kontrast 0,7 przy 20 l/mm, kontrast całości  $d(20) = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35$ . Jeżeli fotografowany tą kamerą przedmiot ma kontrast 0,1, wtedy obraz ma kontrast  $K = 0,1 \cdot 0,35 = 0,035$ , co leży na granicy wizualnego wykrywania. Funkcja przenoszenia nie może być stosowana między poszczególnymi elementami układu optycznego nie oddzielonymi elementem rozpraszającym. Spowodowane to jest tym, że aberracje poszczególnych soczewek mogą kompensować się i ostateczny obraz ma mniejsze aberracje niż każdy pośredni.

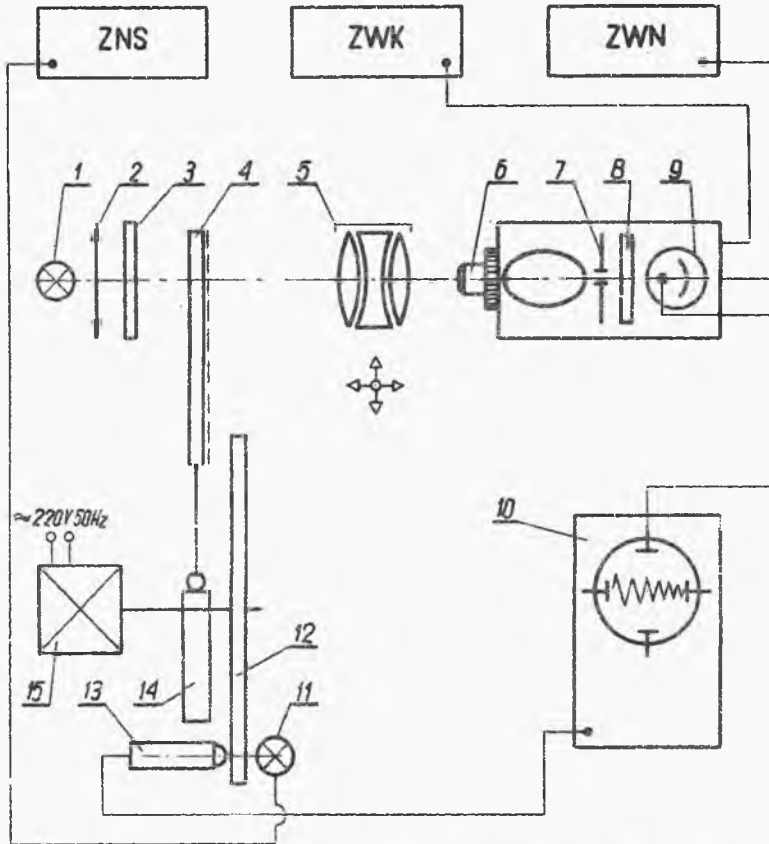
### 3. OPIS STANOWISKA

Rys.22.6 przedstawia schemat stanowiska pomiarowego. Przedmiotem 4 jest test, o prostokątnym rozkładzie luminancji, składający z 14 grup linii (po 4 linie w każdej grupie) o następujących częstościach (w liniach na mm): 12,5; 10; 8; 6,25; 5; 3,9; 3,1; 2,5; 2; 1,55; 1,25; 1; 0,8; 0,625. Test przesuwany jest za pomocą krzywki 14 w kierunku prostopadłym do osi przyrzędu. Obrót krzywki 14 uzyskuje się z przekładni napędzanej przez silnik synchroniczny 15, zasilany z sieci 220V 50 Hz.

Badany układ 5 umieszczony jest w specjalnym uchwycie, na stoliku od mikroskopu warsztatowego, umożliwiającym przesuwanie badanego układu wzdłuż osi optycznej oraz w kierunku prostopadłym do niej.

Mikrofotometr - fotometruje obraz testu dany przez badany układ. W skład mikrofotometru wchodzi obiektyw mikroskopowy 6, szczelina 7, matówka 8 oraz krotnik fotoelektryczny 9. Mikrofotometr zasilany jest zasilaczem wysokiego napięcia (ZWN)

i zasilaczem wtórnika katodowego (ZWK). Wyjście mikrofotometru przyłączone jest do wejścia Y w oscyloskopie wolnych przebiegów 10.



Rys. 22.6. Schemat stanowiska pomiarowego

Obraz źródła światła 1 dany przez kondensator 2 i filtr interferencyjny 3 tworzy się w źrenicy badanego układu 5. Obraz testu 4 dany przez badany układ 5 fotometrowany jest mikrofotometrem. Obraz testu wewnątrz mikrofotometru (na szczelinie 7) można oglądać przez owalny otwór wycięty w obudowie. Obserwowanie obrazu testu ułatwia ustawienie przyrządu przed pomiarem. W czasie pomiaru otwór w obudowie musi być zakryty.

Krzywka przesuwająca test jest tak dobrana, aby pomimo zmiennej częstotliwości testu częstotliwość zmian oświetlenia szczeliny 7 była stała. Podstawa czasu w oscyloskopie 10 wy-

zwalana jest impulsem z fotoczujnika 13 jeden raz na pełny obrót krzywki 14. Wyzwolenie podstawy czasu następuje w chwili gdy na szczelinie 7 odwzorowane jest przezroczyste pole umieszczone na początku testu. Czas przebiegu plamki na oscyloskopie należy dobrać tak, aby odpowiadał on czasowi przesunięcia testu z jednego skrajnego położenia w drugie. Na ekranie oscyloskopu otrzymuje się przebieg proporcjonalny do zmian natężenia oświetlenia w obrazie testu 4 danym przez badany układ 5. Każdej ciemnej lub jasnej kresce testu 4 odpowiada minimum lub maksimum odchylenia plamki na ekranie oscyloskopu (w kierunku osi Y). Na ekranie oscyloskopu, częstość w kierunku osi X powinna być stała. Jeżeli po ustawieniu badanego układu okaże się, że wymieniona częstość jest różna dla niskich i wysokich częstości testu należy wyrównać ją, przesuwanając badany układ poprzecznie do osi optycznej przyrządu. Przesunięcie wykonuje się za pomocą śruby mikrometrycznej stolika mikroskopu warsztatowego.

#### 4. POMIARY

##### 1. Założenia upraszczające

- przyjmuje się, że test ma rozkład sinusoidalny o kontraście równym 1 dla wszystkich częstości przestrzennych;
- obiektyw mikroskopowy zastosowany w mikrofometrze nie wpływa na zmniejszenie kontrastu obrazu testu danego przez badany układ;
- temperatura barwowa źródła światła i czułość widmowa fotokrotnika dopasowane są do czułości spektralnej papieru światłoczułego;
- kontrast w obrazie równy jest 1 dla najniższych częstości, czyli  $a = 2b$  dla  $\tilde{x}_{\text{testu}} = 0,625 \text{ l/mm}$  (rys.22.1).

##### 2. Określenie częstości w obrazie danym przez badany układ

Częstość  $\tilde{x}'$  w obrazie danym przez badany układ zależy od powiększenia w jakim pracuje badany układ i wyznaczona jest z zależności

$$\tilde{x}' = \tilde{x} \frac{x}{f'_{\text{ob}}},$$

gdzie:  $\tilde{x}$  - częstość testu (wg p.3.1),  
 $x$  - odległość testu od ogniska przedmiotowego badane-  
go układu,  
 $f'_{ob}$  - ogniskowa badanego układu.

3. Rejestracja wyników pomiarów odbywa się przez fotogra-  
fowanie przebiegów z oscyloskopu.

## 5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy:

1. Uruchomić stanowisko.
2. Z badać wpływ przeogniskowania (dla dwóch różnych otwo-  
rów względnych):
  - a) zogniskować obiektyw na najlepszy obraz. Za najlepszy  
obraz przyjmuje się takie położenie obiektywu, w którym uzys-  
kuje się maksymalne amplitudy dla wszystkich częstości;
  - b) przeogniskować układ o 0,5 mm, określić częstości, dla  
których najszybciej zmienia się kontrast oraz określić często-  
ści ustalone powyżej w stosunku do częstości granicznych.
3. Z badać wpływ aberracji sferycznej:
  - zogniskować układ przy maksymalnej liczbie otworu,
  - zmniejszyć liczbę otworu i sprawdzić czy nie przesunęła się  
płaszczyzna najlepszej ostrości,
  - otrzymane wyniki skomentować.

## 6. SPRAWOZDANIE

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Schemat stanowiska pomiarowego.
2. Uwagi o pracy stanowiska.
3. Wyniki badania wpływu przeogniskowania:
  - a) fotografie z oscyloskopu,
  - b) wykresy funkcji przenoszenia,
  - c) obliczenia i komentarze.
4. Wyniki badania wpływu aberracji sferycznej (komentarz).

## 7. LITERATURA

Józwicki R.: Optyka instrumentalna. PWN. Warszawa 1970.  
Shmith W.: Modern Optical Engineering. McGraw Hill Book Cop.  
New York 1966.

## 8. PYTANIA KONTROLNE

Co to jest funkcja przenoszenia?  
Omówić wpływ przeogniskowania na funkcję przenoszenia.  
Omówić wpływ aberracji sferycznej na funkcję przenoszenia.  
Omówić wpływ kształtu źrenicy na funkcję przenoszenia.  
Narysować i omówić schemat stanowiska do badania funkcji  
przenoszenia.

## Ćwiczenie 23

### PODSTAWOWE PROCESY HOLOGRAFICZNE

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych procesów holograficznych (zapis i rekonstrukcja).

#### 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Holografia jest techniką bezsoczewkowej rejestracji i odtwarzania obrazów przestrzennych. Nazwa tej techniki pochodzi od dwóch wyrazów greckich: hōlos - całkowity, cały; gramma -

zapis. Podstawy holografii sięgają prac E. Abbego (1893) - "Dyfrakcyjna teoria powstawania obrazów w mikroskopie" i M. Wolfkego (1920) - "O możliwości optycznego odwzorowania siatki molekularnej".

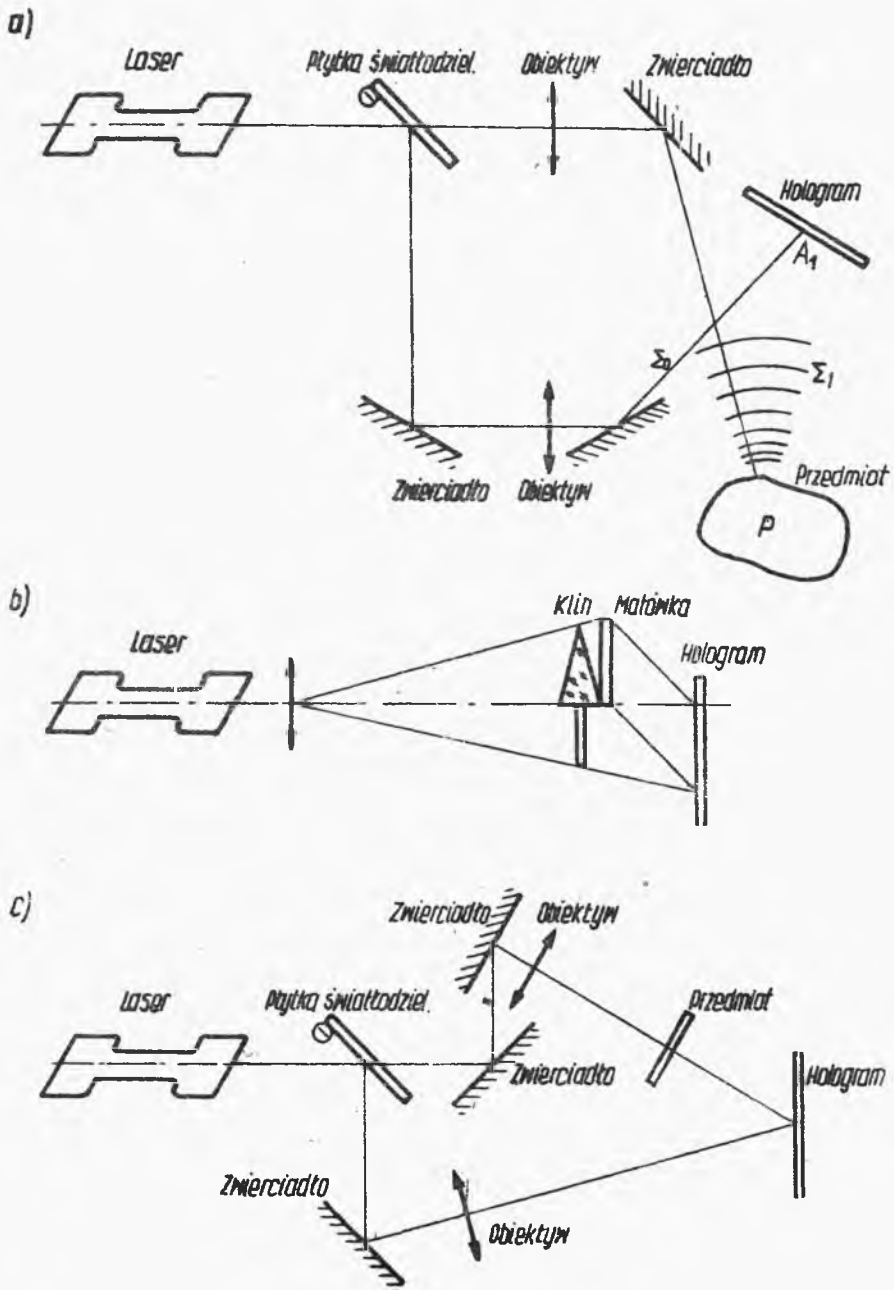
Z obu tych prac wynika, że w procesie wytwarzania obrazu można wyróżnić dwa etapy: pierwszy - utworzenie obrazu dyfrakcyjnego przedmiotu - widma (analiza przedmiotu), drugi - otrzymanie obrazu przedmiotu poprzez syntezę widma przedmiotu. Wolfke ponadto zauważył, że do otrzymania obrazu dyfrakcyjnego wcale nie jest potrzebny obiektyw. Teoretyczne podstawy tych prac, a także prace H. Boerscha i L. Bragga, wykorzystał Denis Gabor, publikując w 1948 r. pracę "Nowa metoda w mikroskopii prowadząca do powiększenia zdolności rozdzielczej mikroskopu elektronowego". Metodę tę wykorzystał on również dla fal świetlnych. Metoda polega na dwustopniowej dyfrakcyjnej rekonstrukcji obrazu przedmiotu przy użyciu tzw. fali odniesienia.

Holografia wymaga koherentnych źródeł światła, stąd też prawdziwy przełom w holografii przypada na lata sześćdziesiąte, kiedy to powstaje pierwszy laser. W 1962 r. E. Leith i J. Upatnieks przedstawiają praktyczny układ holograficzny. W tym samym roku powstaje hologram w świetle białym (J. Denisjuk). W roku 1966 wykonano pierwsze barwne hologramy obserwowane w świetle białym (G. Stroke). Powstaje także pierwszy film holograficzny. Obecnie holografia realizowana jest za pomocą fal świetlnych, radiowych, rentgenowskich, ultradźwiękowych. Tworzy się pamięci holograficzne i kartoteki o dużych bardzo pojemnościach. W zasadzie nie ma dziedziny naukowej gdzie holografia nie znalazłaby zastosowania. Ukoronowaniem burzliwego rozwoju holografii jest przyznanie Denisowi Gaborowi w 1971 r. nagrody Nobla.

## 2.1. Teoria powstawania hologramu

Dotychczas podano wiele układów, w których można wykonywać hologramy (rys.23.1). Jak już wspomniano, klasycznym, a zarazem najczęściej spotykanym, jest układ opracowany przez Leitha i Upatnieksa (rys.23.1a). Na przedmiot pada spójna fala  $\Sigma_0$ . Wg teorii Kirchhoffa, każdy punkt przestrzeni, do którego dotrze fala  $\Sigma_0$  staje się źródłem nowej fali kulistej  $\Sigma_1$  rozcho-





Rys.23.1. Podstawowe schematy przy rejestracji hologramów: a) w świetle odbitym od przedmiotu (układ zaproponowany przez Leitha i Upatnieksa); b, c) w świetle przechodzącym przez przedmiot

dzącej się we wszystkich kierunkach. Skutkiem interferencji do punktu  $A_1$  płyty fotograficznej dotrze zaburzenie będące sumą zaburzeń pochodzących ze wszystkich punktów przedmiotu  $P$  opisanego równaniem

$$U_{A_1} = \iint_S V_p \frac{\exp(ikr)}{r} K(\alpha) ds, \quad (1)$$

gdzie:  $U_{A_1}$  - rozkład amplitud i faz w pkt  $A_1$ ,  
 $V_p$  - funkcja opisująca amplitudę i fazę fali,  
 $r$  - odległość przedmiotu od punktu  $A_1$ ,  
 $K(\alpha)$  - współczynnik kierunkowy rozchodzenia się fali  
 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  
 $\lambda$  - długość fali świetlnej.

Podobna sytuacja panuje we wszystkich punktach płyty fotograficznej, gdzie do każdego z nich dociera zaburzenie "niosące" informację o całym przedmiocie  $P$ . Płyta fotograficzna reaguje na informację amplitudową i w poszczególnych swych punktach ulega zaciemnieniu proporcjonalnie do intensywności zaburzenia padającego. W celu zarejestrowania fazy przedmiotu, tzn. informacji o wzajemnym położeniu punktów przedmiotu, wprowadzono falę odniesienia (odbicie od zwierciadła -  $Z$ ), która interferuje z falą odbitą od przedmiotu tworząc układ prążków interferencyjnych. Informacja o fazie zawarta jest w odległości między prążkami.

Fale odniesienia  $\Sigma_0$  i przedmiotowa  $\Sigma_1$  przedstawiają się równaniami:

$$\Sigma_0 = V_0 \exp(i\alpha x),$$

$$\Sigma_1 = V_1 \exp(i\Phi),$$

gdzie:  $\Sigma_0, \Sigma_1$  - odpowiednio rozkład amplitud i faz fali odniesienia i padania,

$V_0, V_1$  - funkcje opisujące rozkłady amplitud i faz fali odniesienia i padania,

$\exp(i\alpha x), \exp(i\Phi)$  - funkcje opisujące fazy fal odniesienia i padania.

W płaszczyźnie płyty fotograficznej powstaje zaburzenie będące sumą

$$\Sigma = \Sigma_0 + \Sigma_1.$$

Intensywność fali  $I = VV^*$  w płaszczyźnie płyty jest równa splotowi rozkładów amplitud i faz

$$I_{\Sigma} = \Sigma \Sigma^* =$$

$$= I_0 + I_1 + V_0 V_0^* \exp [i(\Phi - \alpha x)] + V^* V_0 \exp [-i(\Phi - \alpha x)].$$

Przepuszczalność płyty fotograficznej (transmisja - T) zależy od intensywności i wynosi

$$T = k_0 - k_1 I_{\Sigma} =$$

$$= k_0 - k_1 (I_0 + I_1) - k_1 V_0 V_0^* \exp [i(\Phi - \alpha x)] + k_1 V^* V_0 \exp [-i(\Phi - \alpha x)],$$

gdzie:  $k_0, k_1$  - dodatnie stałe zależne od materiału światłoczułego.

Tak naświetlona płyta fotograficzna staje się hologramem. Po typowej obróbce fotograficznej polegającej na wywołaniu, płukaniu i utrwaleniu następuje specjalny zabieg "odbielenia" hologramu, pozwalający osiągnąć lepsze parametry energetyczne. Po takich zabiegach hologram staje się nieregularną siatką dyfrakcyjną ze specyficznym dla holografowanego przedmiotu układem prążków interferencyjnych. Przy rekonstrukcji należy hologram oświetlić falą odniesienia  $\Sigma_0$ . Po przejściu  $\Sigma_0$  przez hologram powstanie zaburzenie zależne od transmisji płyty opisane zależnością

$$\Sigma_H = T \Sigma_0 = [k_0 - k_1 (I_0 + I_1)] V_0 \exp(i\alpha x) - k_1 V V_0^* V_0 \exp(i\Phi) +$$

$$+ V_0^2 V \exp [i(2\alpha x - \Phi)].$$

Ponieważ hologram, jak już wspomniano, można przyrównać do siatki dyfrakcyjnej, to przy rekonstrukcji oprócz wiązki zerowego rzędu (fala oświetlająca) powstaną symetrycznie po obu stronach wiązki wyższych rzędów. Praktycznie w holografii wy-

korzysta się wiązki pierwszego rzędu - zbieżną tworzącą rzeczywisty obraz i rozbieżną tworzącą urojony obraz, który można obserwować okiem lub fotografować. Skoro w każdym punkcie hologramu zawarta jest informacja o całym przedmiocie - to dowolna część hologramu daje obraz całego przedmiotu. Można zatem pociąć hologram na dowolną liczbę części tworząc nowe hologramy. Odtwarzane obrazy przedmiotów z tych hologramów nie będą całkiem identyczne, ponieważ będą odpowiadały różnym punktom obserwacji danego przedmiotu (zjawisko paralaksy), a także będą posiadały różną jasność i głęboką ostrość zależną od wielkości danej części płyty (apertura hologramu). Rekonstruowany z hologramu obraz przedmiotu jest przestrzenny, tzn. można obserwować głęboką stereoskopową oraz - przesuwając hologram względem oczu - obserwować zakryte w poprzednim położeniu punkty przedmiotu (zaglądać z boku za przedmiot). Przy rekonstrukcji obrazu holograficznego wynikają zagadnienia związane z:

- powiększeniem obrazu,
- usytuowaniem obrazu,
- aberracjami obrazu.

Jeżeli w procesie zapisu i rekonstrukcji hologramu zostanie zmieniona geometria układu, to mamy do czynienia ze zmianą położenia obrazu przedmiotu oraz ze zmianą powiększenia. Zgodnie z oznaczeniami na rys.23.2 zależność na zmianę położenia obrazu ma postać

$$s' = \frac{\pm p^2 s z_c z_r}{z_c z_r \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \mp p^2 s z_r - s z_c \frac{\lambda_2}{\lambda_1}},$$

a wartość powiększenia

$$\beta = \frac{s'}{s} = \left( \frac{1}{p} \mp p \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{s}{z_c} - \frac{1}{p} \cdot \frac{s}{z_r} \right)^{-1},$$

gdzie:  $z_r$  - odległość źródła światła - hologram przy zapisie,

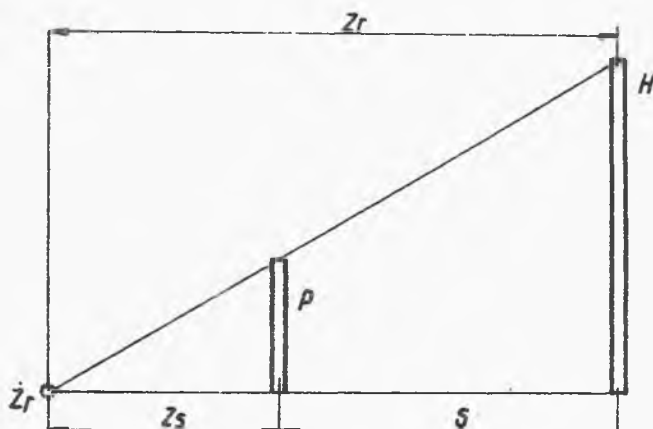
$z_s$  - odległość źródła światła od przedmiotu przy zapisie,

$s$  - odległość przedmiotu od hologramu przy zapisie,

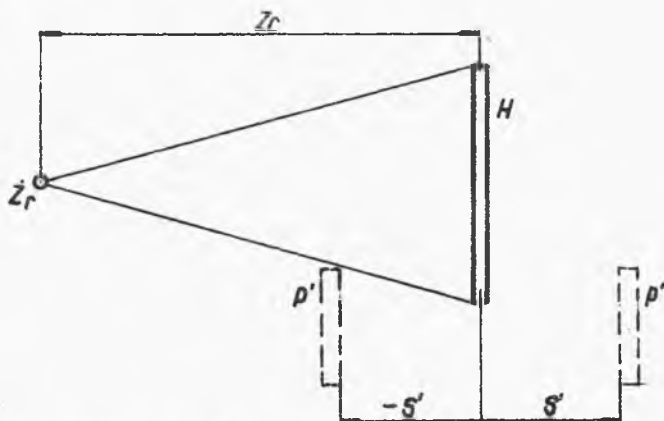
$z_c$  - odległość źródła światła od hologramu przy rekonstrukcji,

$s'$  - odległość obrazu od hologramu przy rekonstrukcji,  
 $p$  - krotność powiększenia odbitki hologramu w powiększalniku,  
 $\lambda_1$  - długość fali świetlnej przy zapisie hologramu,  
 $\lambda_2$  - długość fali świetlnej przy rekonstrukcji hologramu.

a)



b)



Rys.23.2. Zależności geometryczne w procesach zapisu (a) i odtwarzania (b)

Jeżeli nie uwzględnia się zmiany powiększenia odbitki hologramu w powiększalniku, to powyższe wzory można przedstawić w analogicznej postaci do wzorów soczewkowych (Descartes'a)

$$\frac{1}{\lambda_1 s'} = \frac{1}{\lambda_1 s} + \frac{1}{\lambda_2 z_c} \mp \frac{1}{\lambda_1 z_s} ,$$

przy czym wielkość  $\left( \frac{1}{\lambda_2 z_c} \mp \frac{1}{\lambda_1 z_s} \right) = \varphi_H$  nazywa się mocą hologramu

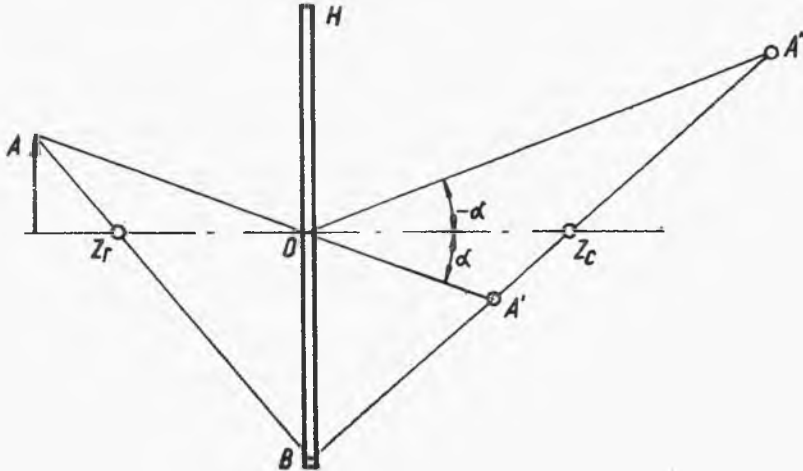
$$\beta = \frac{\lambda_2 \cdot s'}{\lambda_1 \cdot s} .$$

Znaki  $\pm$  w podanych wzorach wskazują na istnienie dwóch obrazów tzw. prostego (górnny znak) i sprzężonego (dolny znak) zarówno dla odtworzenia obrazu rzeczywistego jak pozornego. Istnienie obrazu sprzężonego nie da się intuicyjnie wyjaśnić, wynika to z czystych rozważań matematycznych. Obraz sprzężony jest jak gdyby lustrzanym odbiciem obrazu prostego i jest on odwrócony w dwu kierunkach (lewo-prawo i góra-dół) oraz, o ile hologram jest przestrzenny, obraz sprzężony jest pseudoskopowy. Analogicznie do konstrukcji znajdowania obrazów w soczewkach można przytoczyć poglądową konstrukcję znajdowania obrazów holografowanego przedmiotu (rys.23.3).

Z punktu przedmiotu A prowadzi się prostą przechodzącą przez punkt odniesienia fali przy zapisie  $Z_T$  do przecięcia z hologramem (punkt B). Ten punkt hologramu B łączy się prostą z punktem odniesienia fali przy rekonstrukcji  $Z_C$ . Następnie z punktu przedmiotu A prowadzi się prostą przechodzącą przez punkt hologramu leżący na "osi optycznej" (linii łączącej punkty odniesienia fal przy zapisie i rekonstrukcji). Na przecięciu prostych  $AO$  i  $BZ_C$  leży obraz prosty  $A'$  przedmiotu odtworzony z hologramu. W celu wyznaczenia położenia obrazu sprzężonego  $A''$  należy odmierzyć symetrycznie od osi kąt "minus" (rys.23.3) i prowadzić prostą do przecięcia się z prostą  $BZ_C$ .

Z przytoczonych zależności wynikać by mogło, że przy odpowiedniej obróbce fotograficznej i zmianie geometrii układu, a zwłaszcza zmianie długości fal przy zapisie i rekonstrukcji, można by otrzymać w zasadzie dowolną zdolność rozdzielczą. Podstawową przeszkodą do osiągnięcia tego celu jest niemożność wykonania hologramu na falach bardzo krótkich np. rentgenowskich. Ponadto przy każdej zmianie długości fali lub geometrii przy

odtworzeniu pojawiają się typowe aberracje układów soczewkowych. Jedynie obraz prosty odtworzony przy tej samej geometrii i długości fali jest bezaberracyjny.



Rys.23.3. Graficzna metoda znajdowania obrazów rekonstruowanych z hologramu

## 2.2. Materiały światłoczułe dla potrzeb holografii

Materiały światłoczułe muszą charakteryzować się następującymi cechami:

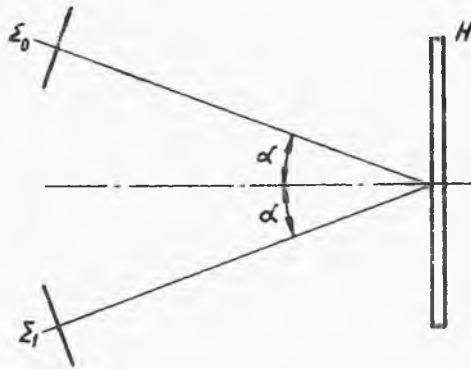
- 1) dużą czułością dla określonej długości fali,
- 2) wysoką zdolnością rozdzielczą,
- 3) odpowiednim zakresem widmowym,
- 4) małym skurczem emulsji.

ad 1. Selektywna czułość spektralna pozwala pracować przy niepełnym zaciemnieniu pomieszczenia.

ad 2. Wymaganą zdolność rozdzielczą oblicza się ze wzoru (rys.23.4)

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\alpha}$$

Przykładowe zdolności rozdzielcze emulsji firmy Agfa-Gevaer podano w tabl.1.

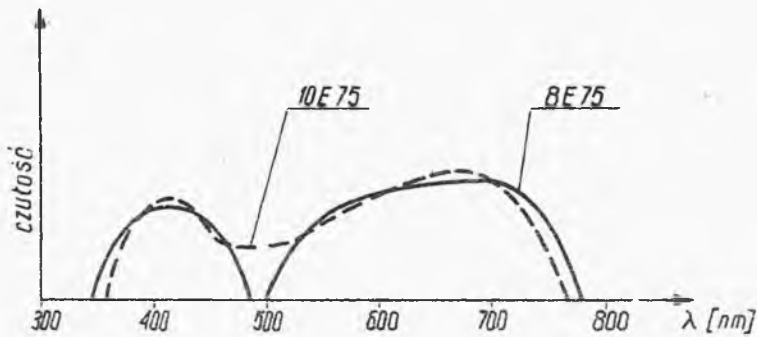


Rys.23.4. Schemat dla obliczenia wymaganej zdolności rozdzielczej płyty fotograficznej

Tablica 1

Typ emulsji	Zdolność rozdzielcza l/mm
8 E 75	3000
10 E 75	2800
8 E 56	3000
10 E 56	2800

ad 3. Są to przeważnie płyty panchromatyczne lub superpanchromatyczne. Przykładowe charakterystyki widmowe podano na rys.23.5.



Rys.23.5. Przykładowe charakterystyki widmowe materiałów fotograficznych do holografii firmy Agfa-Gaevert



ad 4. Mały skurcz emulsji konieczny jest ze względu na wprowadzane przezeń zniekształcenia obrazu.

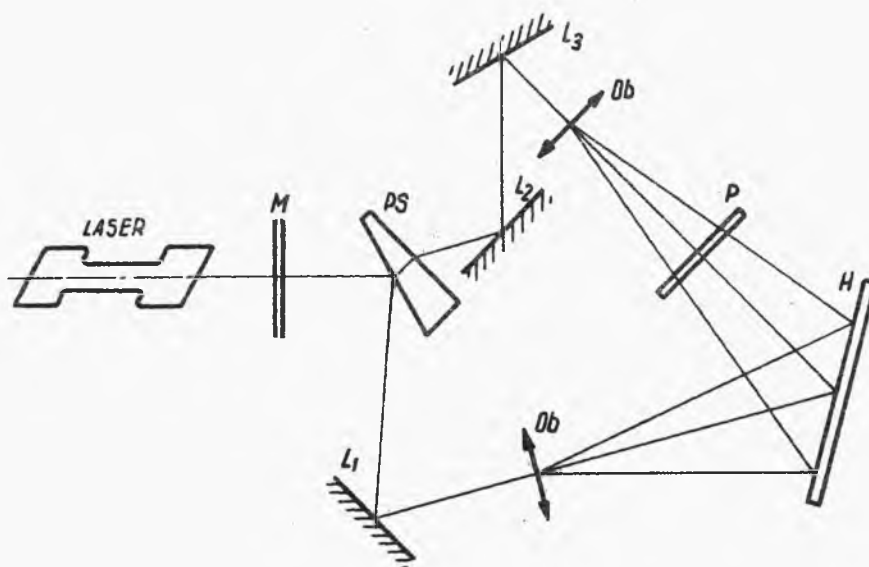
### 2.3. Zastosowanie holografii w metrologii

Szczególne zastosowanie w metrologii znalazła holograficzna metoda podwójnej ekspozycji. Polega ona na tym, że na płycie fotograficznej rejestruje się w pewnym odstępie czasu dwa hologramy. Efektem takiego postępowania jest powstanie na tle zrekonstruowanego przedmiotu prążkowego pola interferencyjnego. Liczba prążków i ich kształt są miarą zmiany stanu tego przedmiotu w przedziale czasu między ekspozycjami (przesunięcia, zniekształcenia, zmiana wymiarów itp.). Jeżeli przedział czasu jest stosunkowo duży (rzędu sekund lub minut), mówi się wtedy o zmianach statycznych, np. ugięcie kowadełka mikrometru pod wpływem nacisku mierniczego. Jeżeli przedział czasu jest krótki (ułamki sekund), wtedy mówi się o zmianach dynamicznych np. pomiar drgań belek, membran itp. Podwójną ekspozycję uzyskuje się z laserów impulsowych o odpowiednio dobranej częstotliwości błysków. Sam proces wywołania i odtworzenia hologramów pozostaje taki sam jak poprzednio.

Inną ciekawą metodą znajdującą zastosowanie w metrologii jest holograficzna metoda wizualizacji procesów zmiennych w czasie (np. obserwowanie i pomiary rozkładu temperatury płomienia gazowego, obserwacja i wykrywanie wad drgających membran itp.). Metoda jest w zasadzie rozszerzeniem metody podwójnej ekspozycji, która rejestruje zmiany dla ustalonego przedziału czasu. Metoda wizualizacji polega na wykonaniu hologramu przedmiotu będącego w spoczynku lub ustalonej początkowej chwili czasu przy pomocy lasera impulsowego. Następnie po obróbce fotochemicznej z uzyskanego hologramu rekonstruuje się obraz przedmiotu, który pokrywa się z rzeczywistym przedmiotem. Każda zmiana rzeczywistego przedmiotu uwidoczniła zostaje pojawieniem się zmiennego pola prążkowego, przy czym tak jak poprzednio kształt i liczba prążków są miarą zmiany stanu np. rozkładem temperatury (współczynnika załamania), drgań membrany itp.

### 3. OPIS STANOWISKA

Schemat optyczny układu do rejestracji hologramu przedstawiono na rys.23.6. Wiązka światła laserowego pada na płytkę światłodzielącą PS, która dzieli ją na dwie wiązki. Dolna



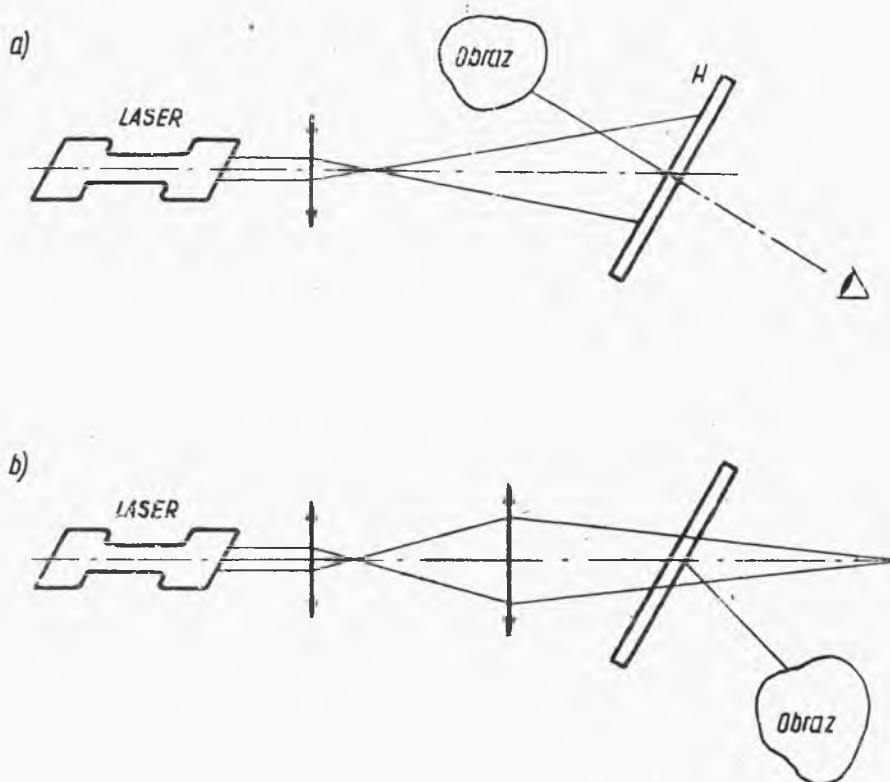
Rys.23.6. Schemat stanowiska do zapisu hologramu

jest wiązką odniesienia i tworzą ją zwierciadło płaskie  $L_1$  i obiektyw  $Ob$  do rozszerzenia wiązki (kulista fala odniesienia). Górna wiązka, którą tworzą zwierciadła płaskie  $L_2$  i  $L_3$  oraz obiektyw  $Ob$ , prześwietla holografowany przedmiot  $P$ . Obie wiązki interferują ze sobą, dając w płaszczyźnie płyty fotograficznej  $H$  określony układ prążków interferujących. Układ prążków zostaje utrwalony na płycie. W celu ustalenia czasów ekspozycji służy migawka  $M$ .

Jak widać, układ do rejestracji hologramu jest interferometrem, którego dolna gałąź stanowi wiązkę odniesienia, zaś górna wiązkę przedmiotową. W celu uzyskania maksymalnego kontrastu prążków konieczne jest zachowanie równych dróg optycznych obu wiązek (zerowy rząd interferencji). Ponadto, aby wyeliminować interferencję od obu płaszczyzn płytki światłodzielącej - płytka ta wykonana jest w postaci klina.

Schemat optyczny przy rekonstrukcji hologramu przedstawia:

- 1) dla przedmiotu pozornego rys.23.7a,
- 2) dla przedmiotu rzeczywistego rys.23.7b.



Rys.23,7. Schematy do odtwarzania holograficznych przedmiotów:  
a) dla obrazu pozornego; b) dla obrazu rzeczywistego

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy: z podanych elementów optycznych zestawić i wyregulować interferometr do rejestracji hologramu, wykonać hologram rzeczywistego przedmiotu płaskiego, zestawić układ do rekonstrukcji hologramu do otrzymania obrazu pozornego i rzeczywistego. Wykonać obliczenia zmiany skali i porównać z doświadczeniem.

## 5. LITERATURA

- Piekara A.: Nowe oblicza optyki. PWN. Warszawa 1968.  
Laengel Bela A.: Lasery. PWN. Warszawa 1965.  
Stankowski J., Graja A.: Wstęp do elektroniki kwantowej. WKiŁ.  
1972.  
Vienot J.C., Śmigielski P., Royer H.: Holografia optyczna. WNT,  
Warszawa 1975.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

- Co to jest holografia?  
Dlaczego rekonstruowany obraz jest przestrzenny?  
Podać schematy optyczne do wykonania hologramu.  
Podać schematy optyczne układów do odtworzenia hologramu.  
Jakie są wymagania stawiane materiałom fotograficznym dla  
potrzeb holografii?  
Od czego zależy dokładność odwzorowania kształtu przedmio-  
tu rekonstruowanego z hologramu?

## Ćwiczenie 24

# METODY I PRZYRZĄDY DO BADANIA WZROKU

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami badania wzroku, przyrządami służącymi do tego badania oraz poznanie cech własnego wzroku.

## 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE

### 2.1. Wstęp

Większość układów optycznych jest projektowana przy założeniu, że będą one w sposób bezpośredni (przyrządy wizualne) lub pośredni (przyrządy projekcyjne i fotograficzne) przekształcały lub rejestrowały informacje dla człowieka. Stąd szczególna rola, jaką spełnia układ wizualny człowieka wśród innych odbiorników.

Układ wizualny człowieka nie ogranicza się tylko do samego oka. Informacja, która dociera do świadomości człowieka, zależy również od procesu jaki zachodzi między receptorami fali elektromagnetycznej i ośrodkami widzenia mózgu. Zagadnieniami przenoszenia informacji przez układ nerwowy zajmuje się psychofizjologia. Tu rozważania zostaną ograniczone tylko do opisu właściwości oka jako układu optycznego i podania pewnych faktów, będących ostatecznym rezultatem współdziałania wspomnianego układu, elementów światłoczułych i układu nerwowego.

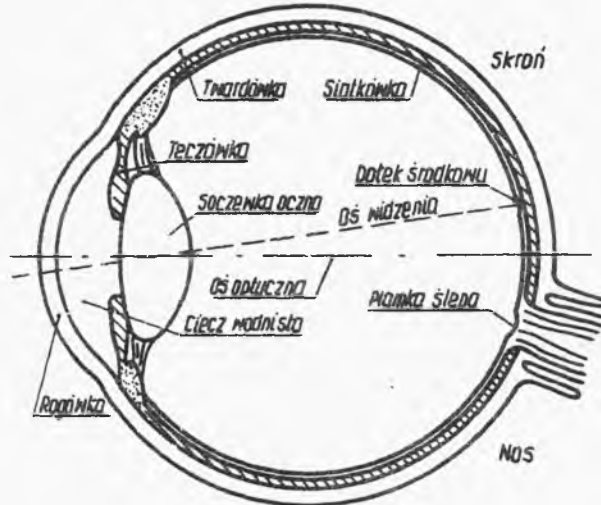
Przytoczone w dalszej części wartości liczbowe są średnimi wartościami większej liczby przebadanych przypadków. Dla konkretnej osoby różnice mogą występować nie tylko w stosunku do podanej średniej, ale nawet między jednym i drugim okiem. Poza tym, z uwagi na wpływ całego organizmu na proces widzenia, pewne parametry pod działaniem bodźców fizycznych, psychicznych lub procesów biologicznych (starzenie się) będą podlegały chwilowym lub stałym zmianom.

### 2.2. Budowa oka

Oko ma w przybliżeniu kształt kuli o średnicy 24 mm, wypukłej w większej części bezpostaciową substancją (ciałkiem szklistym), znajdującej się pod ciśnieniem pozwalającym na utrzymanie jego kształtu.

Przekrój oka pokazano na rys.24.1. Najogólniej pod względem optycznym oko można przyrównać do aparatu fotograficznego, przy czym rolę warstwy światłoczułej spełnia tu siatkówka przylegająca do wewnętrznej strony ścianki gałki ocznej, za-

kończącej na zewnątrz białą i prawie nieprzezroczystą twardówką. W przedniej części oka twardówka przechodzi w przepuszczającą światło w zakresie widzialnym rogówkę, która łącznie



Rys.24.1. Przekrój oka

z soczewką oczną tworzy układ optyczny oka, odwzorujący przedmiot na płaszczyźnie leżącej przed okiem na powierzchni siatkówki.

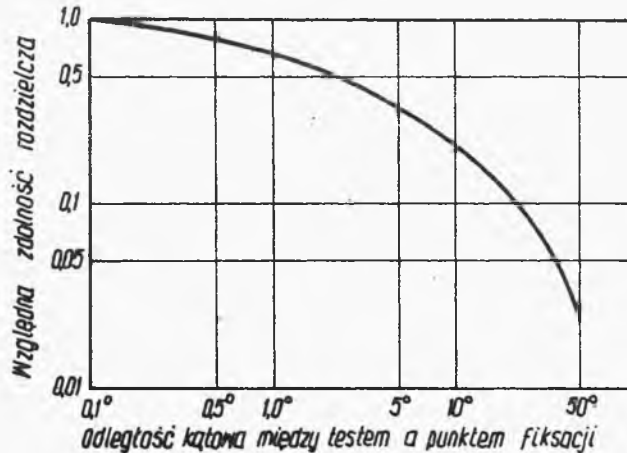
Przez zmianę kształtu soczewki ocznej zmienia się moc układu i położenie ogniska obrazowego względem siatkówki, dzięki czemu można ogniskować na niej obrazy punktów znajdujących się w różnych odległościach od obserwatora. Zdolność przystosowania się oka do obserwowania przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach nazywa się akomodacją. Jeżeli przy zmniejszonym napięciu mięśni odkształcających soczewkę, a więc bez udziału akomodacyjnego ognisko obrazowe układu pokrywa się z siatkówką (co jest równoznaczne z ostrym widzeniem przedmiotów odległych), wówczas oko uważane jest za miarowe.

Przylegająca do soczewki ocznej tęczówka spełnia rolę przysłony aperturowej. Pod wpływem bodźców świetlnych odbieranych przez siatkówkę ma ona zdolność kurczenia się, dzięki czemu zmniejszana jest średnica źrenicy wejściowej układu w granicach od 8 mm w ciemności do 2 mm przy intensywnym oświetleniu.

Układ optyczny oka można z pewnym przybliżeniem uważać za centryczny. Zbiór środków krzywizn powierzchni rogówki i so-

czewki leży na prostej zwanej osią optyczną oka, która jednak nie jest osią widzenia oka.

Siatkówka jako odbiornik padającego nań promieniowania elektromagnetycznego zbudowana jest z dwóch rodzajów komórek światłoczułych: czopków i pręcików połączonych za pomocą nerwów z mózgiem. Czopki o względnie niskiej czułości przeznaczone są do obserwacji przy świetle dziennym. Ich maksymalne zagęszczenie występuje w dołku środkowym odległym około 1,5 mm od osi optycznej w stronę skroni. Następstwem tego jest również najwyższa zdolność rozróżnienia szczegółów przez obserwatora w momencie, gdy obraz przedmiotu znajduje się w tym obszarze. Wraz ze wzrostem odległości obrazu od dołka, na skutek zmiany zagęszczenia czopków, szybko maleją możliwości analizujące oka, czego ilustracją jest wykres 24.2 wykonany w skali logarytmicznej. Kąt odniesiony jest do powierzchni przedmiotowej i mierzony ze środka źrenicy wejściowej. Dla kąta  $10^{\circ}$  pięciokrotnie obniża się zdolność rozdzielcza oka w porównaniu z jej maksymalną wartością.



Rys.24.2. Zdolność rozdzielcza oka

Skupiając uwagę na konkretnym punkcie przedmiotu, nazywanym punktem fiksacji, obserwator podświadomie zwraca obie gałki oczne tak, aby obraz wspomnianego punktu znalazł się jednocześnie w środku obszarów o najwyższej zdolności rozdzielczej jednego i drugiego oka. Jeżeli przedmiot jest powierzchnią,

wówczas dokonywana jest jego wizualna analiza za pomocą zwrotu gałek ocznych i obrotu głowy. Peryferyjne części siatkówki dają ogólnie tylko informację o obecności przedmiotu w polu widzenia.

Rezultatem przesunięcia dołka środkowego poza oś optyczną jest rozbieżność między osią optyczną a osią główną widzenia przechodzącą przez punkt fiksacji i środek źrenicy wejściowej. Kąt między nimi wynosi średnio  $5^{\circ}$ .

Fakt ten dla oka nieuzbrojonego ma tylko znaczenie teoretyczne. Oś główna widzenia, łatwa zresztą do wyznaczenia, jest najważniejszym elementem odniesienia w procesie widzenia i dlatego zwykle utożsamia się ją z osią optyczną, przyjmując, że układ optyczny oka ma obrotową oś symetrii.

Przy widzeniu nocnym, kiedy czułość czopków jest niewystarczająca nawet przy maksymalnej średnicy źrenicy, rolę odbiorników fali elektromagnetycznej przyjmują pręciki, które zabezpieczone są przed nadmiarem światła przy widzeniu dziennym za pomocą wydzielonego barwnika. Proces jego pochłaniania i wydzielenie nie jest natychmiastowy, co jest przyczyną zjawiska olśnienia przy przechodzeniu z pomieszczenia zaciemnionego do oświetlonego. Z tej samej przyczyny, jeżeli obserwator jest przystosowany do widzenia dziennego, przechodząc do warunków obserwacji nocnej stopniowo uzyskuje możliwości dostrzegania przedmiotów. Proces przystosowania się do warunków oświetlenia nazywa się adaptacją.

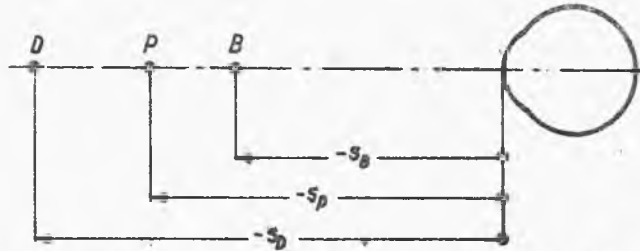
Pręciki znajdują się tylko poza dołkiem środkowym i największe ich zagęszczenie występuje na odległości kątowej  $15^{\circ}$  od jego środka. Stąd widzenie nocne jest widzeniem peryferyjnym.

W miejscu, gdzie połączenie nerwowe elementów siatkoczułych z mózgiem tworzą wspólny nerw wzrokowy powstaje plamka ślepa pozbawiona zupełnie czopków i pręcików. Przedmiot znajdujący się na odległości nieco poniżej  $15^{\circ}$  od punktu fiksacji po stronie skroni przy widzeniu jednoocznym nie zostanie zauważony przez obserwatora.



### 2.3. Wady refrakcji

Punkt przestrzeni przedmiotowej, który jest sprzężony z siatkówką przy zwolnionym napięciu mięśni odkształcających soczewkę oczną, nazywany jest punktem dali D, natomiast - przy maksymalnym wysiłku akomodacyjnym - punktem bliży B. Między tymi dwoma punktami oko jest w stanie odwzorować ostro na siatkówce każdy punkt P (rys.24.3). Odwrotność odległości (mie-



Rys.24.3. Położenie punktu dali i bliży

rzonej w m) punktu dali od wierzchołka rogówki<sup>1)</sup> nazywana jest refrakcją oka, tzn.

$$R = \frac{1}{s_D} . \quad (1)$$

Jednostką refrakcji jest dioptria 1/m. Dla oka miarowego, ponieważ punkt dali znajduje się w nieskończoności,  $R = 0$ .

Przez bliskość  $X_p$  dowolnego punktu P rozumieć się będzie wielkość wyrażoną w dioptriach zgodnie z zależnością

$$X_p = \frac{1}{s_p} , \quad (2)$$

gdzie  $s_p$  jest mierzone w m.

1) Często stosowane jest pojęcie refrakcji głównej, kiedy punktem odniesienia nie jest wierzchołek rogówki, a punkt główny przedmiotowy układu. Podobnie jak moc czołowa szkła okularowego w porównaniu z jego mocą, tak i refrakcja w porównaniu z refrakcją główną są pojęciami znacznie wygodniejszymi w okulistyce, gdyż nie wymagają przy doborze szkła okularowych uwzględnienia niemal umownej poprawki na położenie płaszczyzny głównej.

Stąd bliskość punktu dali jest równoznaczna z refrakcją.  
Różnica

$$A = R - X_p \quad (3)$$

nazywana jest akomodacją czynną przy obserwacji punktu P. Natomiast maksymalna wartość akomodacji czynnej

$$A_{\max} = R - X_B \quad (4)$$

nazywa się amplitudą akomodacji.

Wartość amplitudy akomodacji największa u dzieci zmniejsza się u człowieka z wiekiem. Obserwator z oczami miarowymi ( $R=0$ ) w wieku powyżej 45 lat nie jest w stanie ostro odwzorować na siatkówce obrazu przedmiotów leżących bliżej niż 300 mm od niego. Wynika stąd konieczność kompensowania osobom starszym za pomocą dodatnich szkieł okularowych spadku amplitudy akomodacji, co umożliwi im właściwą obserwację przedmiotów bliskich. Zmniejszenie się amplitudy akomodacji do wartości, kiedy konieczna jest jej kompensacja nazywana jest starczowzrocznością.

Jak już powiedziano, oko jest wtedy miarowe, jeżeli przy braku akomodacji ognisko obrazowe pokrywa się z siatkówką oka. Na taki stan składa się wiele czynników jak: moc rogówki, soczewki ocznej, współczynniki załamania ośrodków, długość mechaniczna oka itp. Ich odpowiednie nałożenie się definiuje dopiero prawidłowość pracy oka i ewentualnie istniejąca dysharmonia powoduje powstanie wad określonych wspólnie sferycznymi wadami refrakcji (niemiarowość sferyczna).

W przypadku krótkowzroczności, kiedy gałka oczna może być zbyt długa, punkt D znajduje się w przestrzeni rzeczywistej ( $R > 0$ ) i obserwator nie jest w stanie ostro widzieć przedmiotów dalekich. Przy nadwzroczności punkt dali jest pozorny ( $R < 0$ ) i w zależności od stopnia wady i wartości amplitudy akomodacji punkt bliży może być pozorny lub rzeczywisty. W pierwszym przypadku nawet przedmioty nieskończenie odległe nie będą ostro widoczne. Korekcja nadwzroczności i krótkowzroczności polega na dodaniu takiego szkła okularowego i w takiej odległości  $d$  od rogówki, aby obraz punktu nieskończenie odległego dany przez szkło pokrywał się z punktem D oka. Ponieważ szkła

okularowe są cechowane za pomocą mocy czołowej  $D$  [1/m], przy czym

$$D_c = \frac{1}{s'_R}, \quad (5)$$

gdzie  $s'_R$  - odległość ogniska obrazowego szkła od jego drugiej powierzchni wyrażona w m; wówczas między refrakcją i mocą czołową szkła okularowego musi być spełniona zależność

$$D_c = \frac{R}{1 + dR}. \quad (6)$$

Zwykle przyjmuje się  $d = 0,012$  m.

Jeżeli rogówka nie jest powierzchnią sferyczną, wówczas układ optyczny oka ma różną moc, a więc i różną refrakcję w różnych przekrojach południkowych. Obraz jest astygmatyczny i przy obserwacji testu złożonego z promieniowo ułożonych kresek wystąpią różnice między kierunkami w ich ostrym odwzorowaniu. Wada astygmatyzmu jest korygowana za pomocą szkieł torycznych, których moc czołowa jest również odpowiednią funkcją przekroju południowego.

#### 2.4. Zdolność rozpoznawcza oka

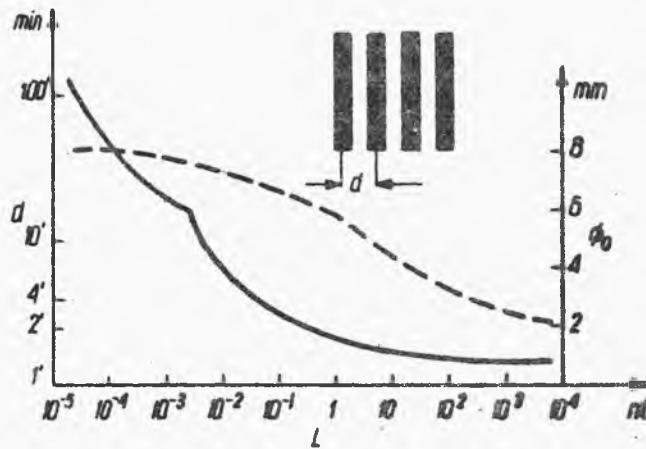
Z uwagi na budowę siatkówki, zachodzące procesy nerwowe, aberracje układu optycznego oka, zjawiska dyfrakcji itp., istnieją fizjologiczne granice możliwości rozpoznania przez człowieka różnych elementów lub zachodzących zdarzeń.

Przez granicę rozpoznania lub zdolność rozpoznawczą oka rozumieć się będzie pewne wartości liczbowe, oderwane lub mianowane, charakteryzujące w sposób ilościowy wspomniane możliwości. Pojęcia te odnoszą się tu do warunków, kiedy obserwator ma swobodę w doborze najkorzystniejszego położenia oka, a więc bez ustalonego punktu fiksacji.

Granica rozpoznania jest najczęściej funkcją wielu parametrów, np. zależy od warunków w jakich próba się odbywa, od sposobu oświetlenia, od kolejności zachodzących zjawisk (zagednienie adaptacji) itp. i często jest pojęciem subiektywnym z uwagi na trudność definicji samego momentu rozpoznania. Przykładem może być prosty przypadek obrazu dwóch punktów. Przy do-

statecznie małej ich odległości powstaje wrażenie jednego punktu. W miarę ich oddalania najpierw obraz wydłuża się w kierunku ruchu, a dopiero później powstaje wrażenie zdwojenia. Przy jednakowej światłości obydwu punktów eksperymentalnie wyznaczony graniczny kąt rozpoznania przy dostrzeganiu wydłużenia wynosi  $1,3'$ , natomiast zdwojenia  $1,8'$ . Kąt ten rośnie, a więc zdolność rozpoznawcza maleje wraz ze wzrostem światłości obydwu punktów. Spowodowane jest to zwiększeniem się wpływu światła rozproszonego (zjawisko dyfuzji) w ośrodkach optycznych oka.

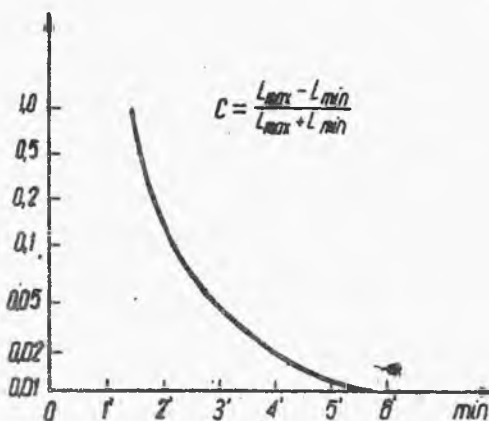
Test Foucaulta złożony z układu czarno-białego linii (rys. 24.4) odgrywa ważną rolę przy badaniu jakości obrazu układów



Rys.24.4. Zdolność rozdzielcza oka w zależności od luminancji przedmiotu

optycznych. Jako graniczny kąt rozpoznawania testu przyjmuje się minimalny kąt pod jakim widać jego okres przestrzenny  $d$  w chwili gdy odróżnione są poszczególne kreski (kierunkowość struktury zauważana jest przy mniejszym kącie). Dla optymalnych warunków obserwacji kąt ten wynosi  $1,2'$ . Wartość kąta rośnie, a więc zdolność rozpoznawcza maleje wraz ze spadkiem luminancji (rys.24.4) i kontrastu (rys.24.5) testu. Nieciągłość na pierwszym wykresie powstająca dla luminancji testu  $5 \cdot 10^{-3}$  nt jest spowodowana zmianą roli czopków i pręcików jako elementów światłoczułych. Ogólnie biorąc zdolność rozpoznawcza kierunków poziomych i pionowych jest jednakowa, ale średnio o 7% wyższa niż kierunków skośnych kresek.

Zmiana luminancji obserwowanego testu wprowadza zmianę natężenia oświetlenia w płaszczyźnie siatkówki. Z uwagi na sprzężoną z tym zmianą średnicę  $\phi_0$  źrenicy oka (linia przerywana na rys.24.4) następuje równocześnie zmiana wpływu aberracji układu na jakość obrazu na siatkówce i dane wykresu na rys.24.4 są wynikiem nałożenia się wpływu wielkości reakcji elementów światłoczułych siatkówki i jakości obrazu.



Często w pomiarowych przyrządach optycznych wykorzystywana jest zdolność

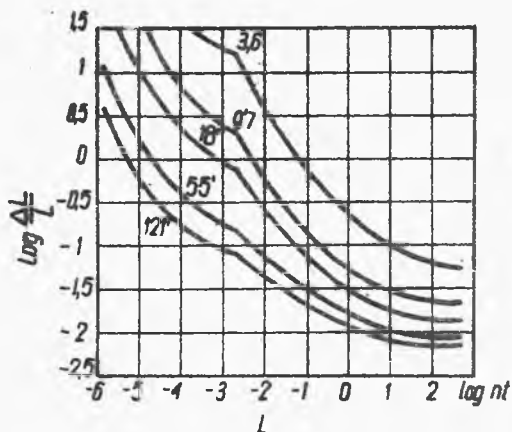
Rys.24.5. Zdolność rozdzielcza oka w zależności od kontrastu przedmiotu

oka do wykrywania braku współliniowości dwóch kresek. Powtarzalność koincydencji przy ich zgrywaniu jest rzędu 5" - 10". Wyższą jeszcze dokładność można osiągnąć przez symetryczne ustawienie jednej kreski względem dwóch odpowiednio rozstawionych (bisektor).

Do celów okulistycznych, szczególnie przy wyznaczaniu wad refrakcji, stosowane są tablice testowe złożone najczęściej z układu liter lub cyfr o różnej wysokości. Miarą zdolności rozpoznawczej jest pojęcie ostrości wzrokowej definiowanej jako odwrotność kąta, pod którym widać najmniejszy rozpoznawczy element. Przyjmuje się, że ostrość wzrokowa  $V = 1$ , jeżeli wspomniany kąt wynosi 5'. Badanie za pomocą testów optometrycznych daje ogólne informacje o możliwości percepcyjnej oka, lecz do celów technicznych jest zbyt mało precyzyjne, gdyż np. granica rozpoznawcza zależy również od rodzaju litery lub cyfry.

Ważną cechą rozpoznawczą oka, wykorzystywaną do celów metrologicznych w fotometrii jest dostrzeganie różnicy oświetlenia dwóch pól. Najmniejsza dostrzegalna różnica luminancji  $\Delta L$  nazywana jest progiem różnicowym. Na rys.24.6 podano wyniki pomiarów, dotyczących porównania luminancji  $(L + \Delta L)$  koła widocznego pod kątem  $w$  (kąt w zaznaczony na każdej krzywej) znajdującego się na tle o luminancji  $L$ . Wraz ze wzrostem kąta  $w$

i luminancji  $L$  maleje monotonicznie względny próg różnicowy  $\Delta L/L$  (rośnie względna zdolność rozpoznawcza), dążąc do wartości asymptotycznych.



Rys.24.6. Zależność progu różnicowego od luminancji przedmiotu

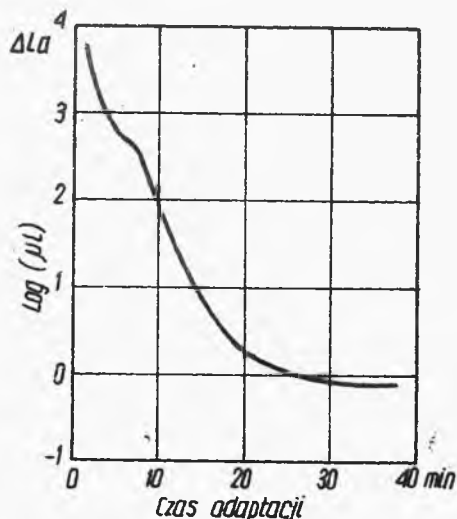
Jeżeli luminancja pola odniesienia  $L = 0$ , mówi się wtedy o progu absolutnym  $\Delta L_a$ . Jego wartość zależy od adaptacji. Ilustracją tej zależności jest wykres na rys.24.7. Dopiero po jednej godzinie przebywania w ciemności osiągnięta jest maksymalna zdolność dostrzegania. Adaptacja ma podobny wpływ na wyznaczenie progu różnicowego, przy czym jej rola maleje

wraz ze wzrostem luminancji  $L$  pola odniesienia.

Jeżeli luminancja testu lub obserwowanego pola jest zmienia

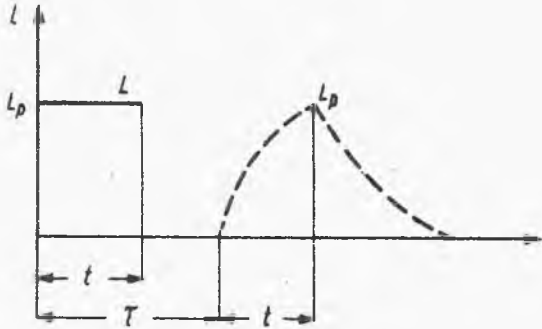
na w czasie, wówczas jej pozorną zmianę rejestrowaną w świadomości człowieka nie będzie pokrywała się ze zmianami rzeczywistymi. Niech dla przykładu test będzie oświetlony za pomocą impulsu prostokątnego dostatecznie krótkiego zaznaczonego linią ciągłą na rys.24.8, wówczas odpowiadająca mu pozorną zmianą luminancji  $L_p$  przedstawiona jest linią przerywaną. Czas opóźnienia  $\tau$ , w którym sygnał przebywa drogę od siatkówki do świadomości człowieka zmienia się od 0,3 s

dla luminancji najniższych do 0,15 s dla oświetlenia dziennego. W czasie  $t$  wrażenie narasta wykładniczo, by następnie w podobny sposób znikać. Mówi się wtedy o zjawisku inercji widzenia.



Rys.24.7. Zależność absolutnego progu różnicowego od czasu adaptacji do ciemności

Jeżeli impulsy powtarzają się periodycznie, wówczas pozorna luminancja również ulega zmianie lecz jej względna wartość  $\Delta L_p/L_p$  maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Z uwagi na różnicowy próg dostrzegania istnieje pewna częstotliwość krytyczna  $N_K$ , poza którą luminancja pozorna będzie stała. Częstotliwość krytyczna jest funkcją luminancji i zmienia się od 10 Hz dla  $10^{-2}$  nt do 55 Hz dla  $5 \cdot 10^4$  nt.

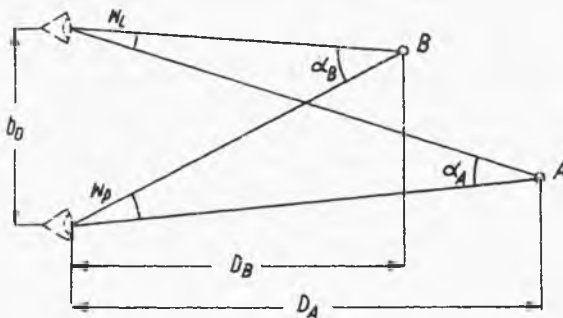


Rys.24.8. Pozorna zmiana luminancji w odpowiedzi na sygnał o prostokątnym rozkładzie luminancji

Pozorny zanik zmian luminancji jest podstawą przekazywania ciągłości ruchu na ekranie telewizyjnym i kinowym.

Wrażenie rejestrowane przez człowieka o intensywności odbieranego sygnału, nazywane tu jego pozorną wartością, jest również funkcją częstotliwości. Przykładowo dla  $N = 5 - 10$  Hz i wysokich luminancji testu, pozorna intensywność sygnału jest

wyższa niż intensywność jaka byłaby odczuwana przy ciągłym jego działaniu o tej samej luminancji. Zjawisko to jest spowodowane zmianą adaptacji siatkówki (miejscowe olśnienie) i jest wykorzystywan w sygnalizacji świetlnej.



Rys.24.9. Zależność kątowa w widzeniu stereoskopowym

Powstaje wrażenie przestrzennego rozmieszczenia przedmiotów w polu widzenia człowieka jest cechą związaną z widzeniem dwuocznym. Różnica kątów (rys.24.9)  $\Delta w = w_L - w_P$ , pod którymi widać dwa punkty  $A$  i  $B$  przez lewe i prawe oko, odczuwana jest jako różnica odległości  $D = D_A - D_B$  od obserwatora. Istnieje graniczny kąt  $\Delta w_g$  możliwości dostrzegania przestrzennego (stereoskopowego

przemieszczenia dwóch przedmiotów. Dla blisko leżących punktów w polu widzenia średnio wynosi on  $10''$ . Jeżeli punkt A znajduje się w nieskończoności, wówczas  $\alpha_A = 0$  i położenie granicznego punktu B, który dla obserwatora nie będzie leżał na tej samej odległości co punkt A, wynika z równości  $\alpha_B = \Delta w_g = 10'' = 5 \cdot 10^{-5}$  rad. Ponieważ odległość środków źrenic oczu  $b_0$  wynosi średnio 65 mm, to graniczna odległość  $D_g$  nazywana promieniem widzenia stereoskopowego wyniesie

$$D_g = \frac{b_0}{\Delta w_g} = 1300 \text{ [m]}. \quad (7)$$

Przedmioty leżące w odległości większej od promienia widzenia stereoskopowego dla obserwatora będą znajdowały się już nieskończenie daleko.

Wzajemne usytuowanie przedmiotów w przestrzeni można ocenić również jednocześnie i na odległościach większych niż  $D_g$ . Ocena taka opiera się na szacowaniu proporcji perspektywicznych i uwzględnieniu wpływu czynników atmosferycznych. Np. przedmiot zamglony będzie wydawał się pozornie dalej leżący niż ten sam przedmiot obserwowany w przezroczystym powietrzu. Szacowanie położenia przedmiotów za pomocą czynników wtórnych jest nieprzydatne do celów metrologicznych i leży w kręgu zagadnień dotyczących złudzeń optycznych.

Należy tu podkreślić, że oko jest wykorzystywane do celów pomiarowych, ale tylko jako element porównujący. Np. wizualny pomiar oświetlenia dowolnego pola, czy odległości do dowolnego punktu będzie polegał na zrównaniu intensywności lub odległości z drugim elementem, dla którego te parametry są znane. Bezwzględna ocena tych wielkości jest mało dokładna, a często z uwagi na wyżej wspomniane czynniki obarczona grubym błędem.

Zaburzenia w widzeniu dwuocznym (błędy w odwzorowaniu przestrzeni) powoduje wada nazywana zezem. Wada ta polega na trudności lub niemożliwości uzyskania obrazu tego samego punktu w dołku środkowym lewego i prawego oka jednocześnie lub nieskoordynowaniu ruchu obu gałek ocznych.

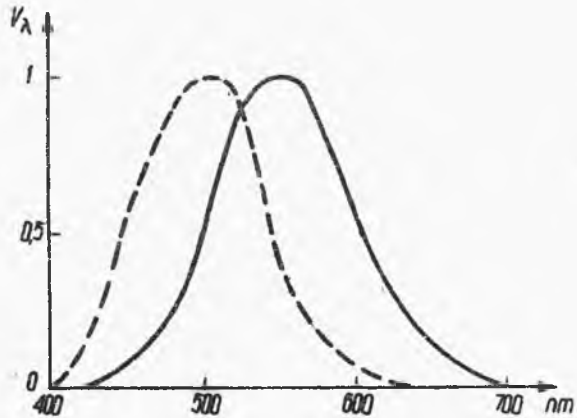


## 2.5. Czułość widmowa oka. Widzenie barwne

Tylko część energii promieniowania elektromagnetycznego padającego na oko dotrze do siatkówki i zostanie pochłonięta przez czopki i pręciki wywołując tym samym reakcję elektrochemiczną, odczuwaną przez nas jako wrażenie świetlne. Pozostała część zostaje rozproszona, pochłonięta lub odbita przez ośrodki optyczne oka. Współczynnik przepuszczenia ośrodka jest różny dla różnych długości fali, ponadto wielkość reakcji samych elementów światłoczułych zależy również od długości fali i dopiero nałożenie się tych czynników definiuje gęstość monochromatyczną reakcji oka na promieniowanie nazywaną tu czułością widmową oka. Czopki i pręciki mają różne własności widmowe i dlatego czułość widmowa oka zależy od jego adaptacji. Przy świetle dziennym (widzenie fotopowe) maksimum czułości przypada na 555 nm, natomiast nocnym (widzenie skotopowe) dla 510 nm.

Obie krzywe czułości po znormowaniu ich maksymalnych wartości do 1 pokazano na rys. 24.10 (linia ciągła - widzenie dzienne, linia przerywana - nocne).

Krzywa czułości spektralnej oka przy widzeniu fotopowym odgrywa szczególną rolę w fotometrii. W celu



Rys.24.10. Krzywe widmowej czułości oka

uniknięcia niejednoznaczności z uwagi na różnice fizjologiczne między poszczególnymi osobami, na podstawie wielu pomiarów ustalona została średnia krzywa czułości nazywana względną skutecznością świetlną promieniowania monochromatycznego  $V_\lambda$ , która w pewnym sensie umownie ustala zależności między energią promieniowania elektromagnetycznego a wrażeniami świetlnymi przez nią wywołanymi.

Przy obserwacji źródła światła, oprócz wrażenia ilościowego określonego przez luminancję źródła, powstaje wrażenie ja-

kościowe, którym jest barwa promieniowania. Wrażenie barwy zachodzi tylko przy widzeniu dziennym, a więc przyczyn jej powstawania należy szukać w budowie czopków. W siatkówce istnieją ich trzy rodzaje, które reagują na różne zakresy widma. Zbiór reakcji tych trzech czopków, zależnie od proporcji sygnałów, ustala wrażenie barwy. Ponieważ znane są gęstości monochromatyczne reakcji wszystkich trzech receptorów, wystarcza to do jednoznacznego określenia każdej barwy za pomocą trzech liczb. Zagadnieniem pomiaru barw, szczególnie ważnym dla przemysłu poligraficznego i sygnalizacji, zajmuje się kolorymetria.

### 3. BADANIE WZROKU

#### 3.1. Badanie ostrości wzroku metodą Dondersa

Powszechnie stosowana jest subiektywna metoda badania wzroku, opracowana przez F.C.Dondersa (1818 - 1880), profesora z Utrechtu.

Punktem wyjściowym tej metody jest ustalenie ostrości wzroku oka patrzącego w dal bez szkła, a następnie - dla osiągnięcia najlepszej ostrości - stosowanie sukcesywnie coraz mocniejszych szkieł korekcyjnych. Szkło korekcyjne, przy którym osiąga się najlepszą ostrość będzie szkłem poprawnie korygującym wady refrakcji, zaś moc tego szkła jest miarą refrakcji oka (oczywiście po uwzględnieniu odległości oka od szkła).

##### 3.1.1. Przyrządy do badania ostrości wzroku

Do badania wzroku metodą Dondersa i ustalenia ścisłej recepty na okulary potrzebne są następujące przyrządy:

- a) tablica do badania ostrości wzroku,
- b) kasetka okulistyczna z kompletem szkieł próbnych,
- c) oprawa do szkieł próbnych,
- d) przyrząd do pomiaru rozstawienia źrenic (pupillometr),
- e) keratometr,
- f) dioptrymierz optyczny (frontofokometr).

Niektóre z wymienionych przyrządów omówione zostaną poniżej.

#### Tablica do badania ostrości wzroku

Spotyka się różne rodzaje tych tablic - ze znakami literowymi, cyfrowymi, w postaci kół z przerwami, ze znakami obrazkowymi itp.

Najbardziej rozpowszechnione są tablice opracowane przez Snellena ze znakami literowymi i figurą promienistą.

Tablice ze znakami cyfrowymi lub w postaci kół z przerwami w rozmaitych kierunkach wskazane są przy badaniu analfabetów. Do badania dzieci opracowano tablice obrazkowe na zasadach obowiązujących przy znakach innych typów, a mianowicie dla rzędu D = 6 sylwetka obrazka z odległości 6 m jest widziana pod kątem 5', a szczegóły pod kątem 1'.

W czasie badania tablice powinny być oświetlane światłem rozproszonym, przy czym intensywność oświetlenia nie może być zbyt mała, gdyż przy słabym oświetleniu maleje ostrość wzroku. Oświetlenie powinno wynosić około 300 lx (wg Melanowskiego).

#### Kaseta okulistyczna

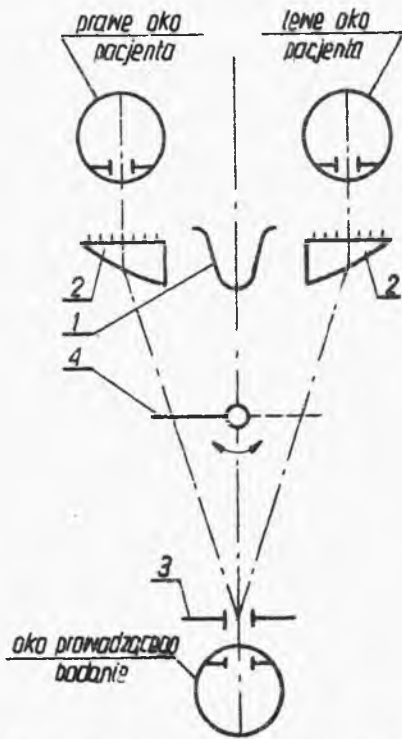
Kaseta okulistyczna zawiera komplet szkieł próbnych, w specjalnych oprawkach z uchwytemi dla ułatwienia manipulacji. Kasety są obecnie produkowane w kraju przez Śląskie Zakłady Mechaniczno-Optyczne w Katowicach. Kasety te zawierają zestaw szkieł próbnych w oprawkach z masy plastycznej, wymagany do poprawnego badania wzroku, nie ustępujący zestawom kaset zagranicznych. Do kompletu kaset krajowych wchodzi następujące szkła:

- 1) szkła sferyczne od 0,25 do 20 dptr,
- 2) szkła cylindryczne od 0,25 do 6 dptr,
- 3) szkła pryzmatyczne od 1,0 do 10,0 dptr,
- 4) oprawki z otworkami i szczelinami,
- 5) cylinder Maddoxa oraz filtry czerwony i zielony.

#### Oprawa do szkieł próbnych

Uniwersalna oprawa do szkieł próbnych ma regulację umożliwiającą takie dostosowanie do głowy pacjenta, aby oba szkła próbne były w nią włożone centrycznie ze źrenicami. Poza tym ma ona dla każdego oka po 3 gniazda na szkła próbne od przodu i po 1 gnieździe od tyłu, podziałkę kątową Tabo i podziałki rozstawienia źrenic.

Przyrząd do badania rozstawienia źrenic (pupilometr)



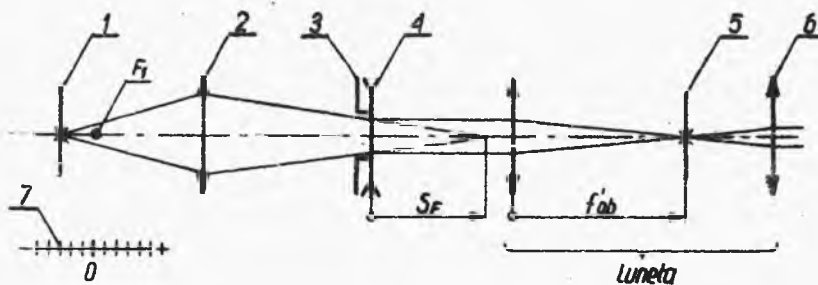
Zasada działania przedstawiona jest na rys.24.11. Podczas badania przyrząd opiera się gniazdem 1 na nosie pacjenta. Pacjent przez soczewkę 2 obserwuje przysłonę 3 (umieszczoną w ognisku soczewki 2). Prowadzący badanie przez otwór 3 i soczewkę 2 obserwuje źrenice oczu pacjenta.

Na tle źrenic widoczna jest podziałka przyklejona do soczewki 2, na której można odczytać rozstawienie źrenic pacjenta. Obrotowa przysłona 4 umożliwia odczyt położenia lewej lub prawej źrenicy w stosunku do nasady nosa. Dzięki soczewce 2 pacjent fiksuje na nieskończoność (osie widzenia obu oczu ustawione są równoległe).

Rys.24.11. Schemat pupilometru

Dioptrymierz optyczny (frontofokometr)

Na rys.24.12 przedstawiony jest schemat dioptrymiera służącego do pomiaru mocy szkieł okularowych. Przyrząd umożliwia pomiar mocy szkieł sferycznych, torycznych i pryzmatycznych. Ponadto możliwe jest oznaczenie środka szkła, wyznaczenie kierunku przekrojów głównych dla szkieł torycznych i pryzmatycznych.



Rys.24.12. Schemat dioptrymiera

Przed pomiarem przesuwem dioptryjnym okularu 6 należy doprowadzić do ostrego widzenia płytki ogniskowej 5 przez pomiarowca. Badane szkło 4 (w oprawie okularowej lub bez) opiera się na pierścieniu 3. Obserwując przez okular 6, przesuwem płytki 1 doprowadza się do ostrego widzenia znaku na płytce 1 w płaszczyźnie rysunku płytki 5. Oznacza to, że obraz znaku z płytki 1 dany przez obiektyw 2 znalazł się w ognisku przedmiotowym badanego szkła okularowego. Na podziałce 7 odczytuje się moc czokową badanego szkła w dioptriach

$$D_c = \frac{1}{S/P'} \cdot \quad (8)$$

### 3.1.2. Czynności wstępne przed badaniem wzroku

Przed przystąpieniem do właściwego badania należy wykonać następujące czynności:

- uzyskać od pacjenta niezbędne informacje,
- przygotować pacjenta do badania.

Informacje, które należy uzyskać są następujące: wiek pacjenta, jego zawód, czy używał już szkieł oraz na jakie zaburzenia w widzeniu się uskarża. Takie informacje mogą przyspieszyć i ułatwić badanie i pozwalają niejednokrotnie na wstępne określenie rodzaju wady wzroku.

**P r z y k ł a d 1.** Pacjent ma lat 42, jest księgowym, dotychczas nie nosił okularów. Skarży się, że przy pracy ma od pewnego czasu trudności. Bola go oczy, a litery widzi niewyraźnie. Dalekie przedmioty widzi tak samo dobrze, jak dawniej. Można domyślić się nadwzroczności, która ujawniła się w związku ze zmniejszającym się z wiekiem zakresem akomodacji.

**P r z y k ł a d 2.** Pacjent - dziecko lat 7-8. Rodzice zauważyli, że przy czytaniu ma trudności, mruży oczy i przekrzywia głowę. Należy przypuszczać, że mamy do czynienia z astygmatyzmem.

Następną czynnością wstępną jest przygotowanie pacjenta do badania, polegające na dopasowaniu mu oprawy szkieł próbnych i usadowienie go w odległości 6 m od tablicy. Dopasowanie oprawy polega na takim jej wyregulowaniu, aby środki szkieł próbnych były centrowane ze źrenicami, a oprawa obsadzona była pew-

nie i nie uciskała w sposób drażniący. W celu odpowiedniego wyregulowania rozstawienia połówek oprawy należy zmierzyć rozstawienie źrenic pacjenta, posługując się przyrządem do pomiaru rozstawienia źrenic lub w braku takiego - linijką. Na podstawie dokonanego pomiaru, korzystając z podziałek znajdujących się na oprawie i odpowiednich pokręteł, ustawia się połówki oprawy próbnej, a dalej - przez regulowanie nanośnika i zauszników - dopasowuje się oprawę do głowy pacjenta.

Ponieważ zwykle rozpoczyna się badanie od oka prawego, należy przed oko lewe założyć oprawę z nieprzezroczystą zasłoną.

### 3.1.3. Badanie nadwzroczności i krótkowzroczności

Aby badania dały rezultaty możliwie szybko, dokładnie i z najmniejszym zmęczeniem pacjenta, należy stosować odpowiednią metodykę.

Przed wszystkim bada się ostrość wzroku pacjenta, polecając mu czytać znaki literowe na tablicy do badania ostrości bez szkła, a następnie zakłada się szkła o różnej mocy.

Jeżeli pacjent czyta rząd  $D = 6$ , badanie rozpoczyna się od założenia szkła  $+0,5$  dptr. Jeżeli nastąpiło pogorszenie ostrości oznacza to, że oko jest miarowe. Jeżeli po próbie czytania ze szkłem  $+0,5$  dptr, nie stwierdza się pogorszenia ostrości oko jest nadwzroczne. W celu ustalenia stopnia nadwzroczności zakłada się do oprawy coraz mocniejsze szkła dodatnie, aż do chwili, gdy nastąpi pogorszenie ostrości. Najmocniejsze szkło dodatnie, przy którym nie nastąpiło jeszcze pogorszenie ostrości, będzie szkłem poprawnie korygującym nadwzroczność.

Niekiedy - przy wyższych nadwzrocznościach - badany (z powodu przyzwyczajenia do akomodacji), po włożeniu szkła  $+0,5$  dptr widzi gorzej i dopiero zastosowanie szkieł dodatnich o wyższym dioptrażu wyjaśnia sytuację.

Jeżeli pacjent bez szkieł nie czyta ani jednego rzędu liter dowodzi to, że oko ma wadę refrakcji albo jest niedowidzące, lub obie te wady występują razem. Aby ułatwić rozpoznanie, można przeprowadzić próbę z otworem stenopeicznym. Przed oko wkłada się oprawkę z otworem o średnicy 1,5 mm; jeżeli przy obserwacji przez otworek ostrość wzrośnie, można stwierdzić, że oko ma wadę refrakcji lub ewentualnie wadę refrakcji z niedo-

widzeniem łącznie. Gdy polepszenie ostrości nie nastąpi, można sądzić, iż jest to przypadek tylko niedowidzenia.

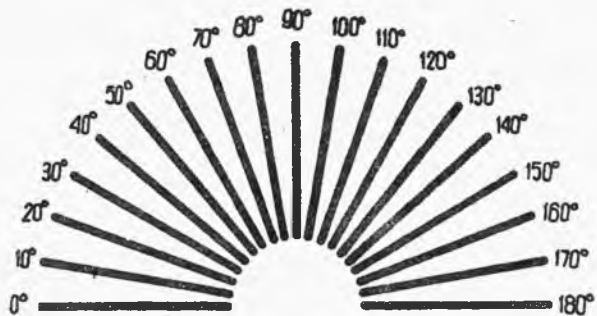
Jeżeli po zastosowaniu otworka ostrość się polepszyła, szuka się wad refrakcji, podejrzewając przede wszystkim krótkowzroczność. Zakłada się więc do oprawy sukcesywnie coraz mocniejsze szkła ujemne. Jeżeli ostrość przestaje poprawiać się mimo zakładania coraz mocniejszych szkieł ujemnych należy sądzić, że oko już akomoduje. Najsłabsze szkło ujemne, przy którym otrzymuje się najlepszą ostrość, jest szkłem poprawnie korygującym krótkowzroczność.

#### 3.1.4. Badanie astygmatyzmu

Jeżeli przeprowadzone uprzednio badania nie doprowadziły do osiągnięcia dostatecznej ostrości wzroku, należy sądzić, że jest to oko astygmatyczne; do stwierdzenia astygmatyzmu można posłużyć się figurą promienistą (rys. 24.13).

Jeżeli uprzednio stwierdzono, że najlepszą, chociaż niedostateczną, ostrość osiągnięto bez szkła (po dokonaniu próby ze słabym szkłem dodatnim), poleca się pacjentowi obserwować figurę promienistą bez szkła próbnego.

Jeżeli zaś stwierdzono, iż najlepszą, chociaż niedostateczną ostrość osiągnięto ze szkłem sferycznym (np. -2 dptr lub +4 dptr), poleca się pacjentowi obserwować figurę promienistą, pozostawiając w oprawie to szkło. Jeżeli pacjent nie widzi wszystkich kresek figury promienistej jednakowo ostro, dowodzi to, iż oko jest astygmatyczne, przy czym kierunek najostrej widzianej kreski (lub kresek) wyznacza pierwszy przekrój główny, zaś kierunek najmniej ostro widzianych kresek drugi przekrój główny, prostopadły do pierwszego.



Rys. 24.13. Figura promienista Snellena

Na przykład: najlepszą ostrość uzyskano bez szkła próbnego, pacjent zaś widzi - najostrej kreskę pionową, a najslabiej kreski poziome. Oznacza to, iż oko w przekroju pionowym jest miarowe, a w przekroju poziomym niemiarowe. Jeżeli teraz wstawić do oprawy słabe szkło cylindryczne (np. +0,25 dptr) tak, aby oś cylindra była pozioma, kreski na oprawce szkła próbnego powinny się pokryć z kreskami 0-180° podziałki Tabo znajdującej się na oprawie. O ile po założeniu szkła nastąpi polepszenie, to znaczy, że rozszerzy się sektor dość ostro widzianych kresek (np. bez szkła cylindrycznego możliwie ostro widać kreski od 70 do 110°, a po założeniu szkła - od 50 do 130°). Dowodzi to, że korekcję przeprowadza się we właściwym kierunku i wobec tego należy zakładać sukcesywnie coraz mocniejsze szkła cylindryczne dodatnie aż do chwili, gdy osiągnie się zrównanie ostrości wszystkich kresek figury promienistej.

Szkło cylindryczne, przy którym nastąpiło zrównanie ostrości będzie szkłem korygującym astygmatyzm.

U w a g a: Ponieważ kreski figury promienistej są wykreślone co 10°, pacjent nie może dokładniej niż w granicach 10° podać kierunku przekroju głównego. Wobec czego, w celu dokładniejszego ustalenia kierunku osi, wskazane jest dokonanie retuszu ustawienia osi cylindra przez niewielkie zmiany kierunku jego osi, polecając pacjentowi obserwowanie trudniejszej litery testu literowego, np. E. Najbardziej wyraźne widzenie tej litery wyznaczy najwłaściwsze położenie osi cylindra.

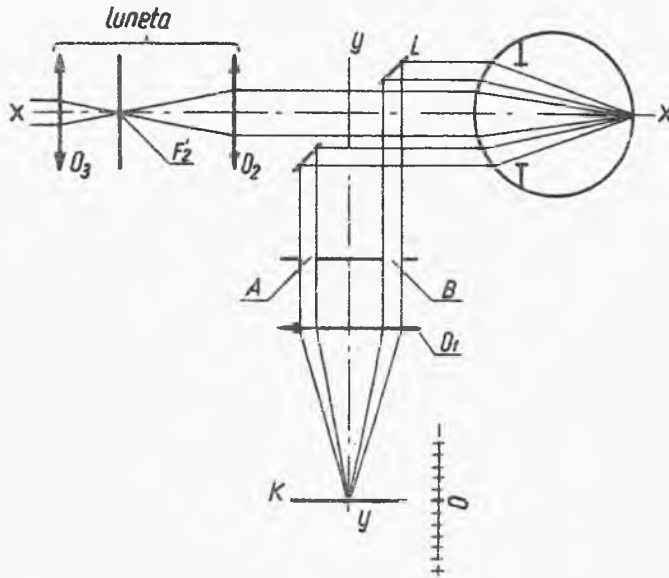
### 3.2. Badanie refrakcji refraktometrem (wg prof.Hartingera)

Schemat refraktometru przedstawiony jest na rys.24.14. Oko badane znajduje się przed lustrem L. Test K może się poruszać wzdłuż osi y-y. Za lustrem, na osi x-x, znajduje się luneta z obiektywem O<sub>2</sub> i okular O<sub>3</sub>. Gdy test K znajdzie się w ognisku obiektywu O<sub>1</sub>, to z tego obiektywu wyjdzie pęk promieni równoległych, który odbije się od lusterka L i trafi do badanego oka.

Gdy oko badane jest miarowe nieakomodujące - na siatkówce tego oka utworzy się obraz. Z oka badanego wyjdzie więc pęk promieni równoległych i trafi do lunety. Obiektyw lunety O<sub>2</sub>



utworzy obraz testu  $K$  i obraz siatkówki w ognisku  $F'_2$ . Obraz ten obserwuje badający przez okular lunety  $O_3$ . Badający dostrzeże jednocześnie naczynia krwionośne siatkówki i krzyż



Rys.24.14. Schemat refraktometru

testu. Jeśli badający ma wadę refrakcji, może przez przesuwanie okularu nastawić obraz na ostrość.

Gdy oko badanego jest krótkowzroczne - obraz testu  $K$  utworzy się przed siatkówką, a na siatkówce powstanie rozmazany obraz testu. Z oka badanego wyjdzie teraz pęk promieni zbieżnych, a obraz  $K''$  siatkówki nie utworzy się w ognisku obiektywu lunety  $F'_2$ , lecz w punkcie leżącym bliżej obiektywu  $O_2$ . Wsuwając okular  $O_3$  badający będzie widział ostry obraz siatkówki, ale nieostry obraz testu. Aby obraz testu stał się ostry, należy test  $K$  przesunąć tak, aby jego obraz utworzył się na siatkówce oka pacjenta. Przesunięcie testu będzie proporcjonalne do refrakcji oka pacjenta. Na podziałce do pomiaru przesuwu testu można odczytywać refrakcję oka pacjenta w dioptriach. Kryterium w momencie odczytywania podziałki stanowi takie położenie testu, przy którym badający zobaczy jednocześnie ostro krzyż i naczynia krwionośne na siatkówce.

Pacjent podczas badania obserwuje test. Chcąc wykluczyć akomodację pacjenta (co jest warunkiem dokładnego pomiaru), należy tak manipulować testem, aby dla osiągnięcia ostrości zbliżyć się z obrazem spoza zasięgu akomodacji. W tym celu odsuwa się test od obiektywu  $O_1$ , następnie przesuwa się go aż do chwili, gdy w polu widzenia lunety krzyż będzie widziany ostro.

Refraktometr Zeissa (wg prof. Hartingera) jest refraktometrem koincydencyjnym. Do tworzenia obrazów na siatkówce wykorzystano w nim dwa wąskie pęki promieni.

Gdy oko jest miarowe i nieakomodujące - dwa wąskie pęki promieni równoległych odbijają się od L i - po trafieniu do badanego oka - przetną się na siatkówce, dając obraz pojedynczy.

Gdy oko jest krótkowzroczne lub nadwzroczne - powstaną dwa obrazy. Aby w oku krótkowzrocznym doprowadzić te dwa obrazy do pokrycia się, należy wprowadzić odpowiednią rozbieżność pęków, w oku nadwzrocznym zaś - zbieżność pęków wpadających do oka, co można uzyskać przez odpowiednie przesunięcie testu w urządzeniu projektującym test na siatkówkę badanego oka. Rys.24.15 podaje obraz testu refraktometru.

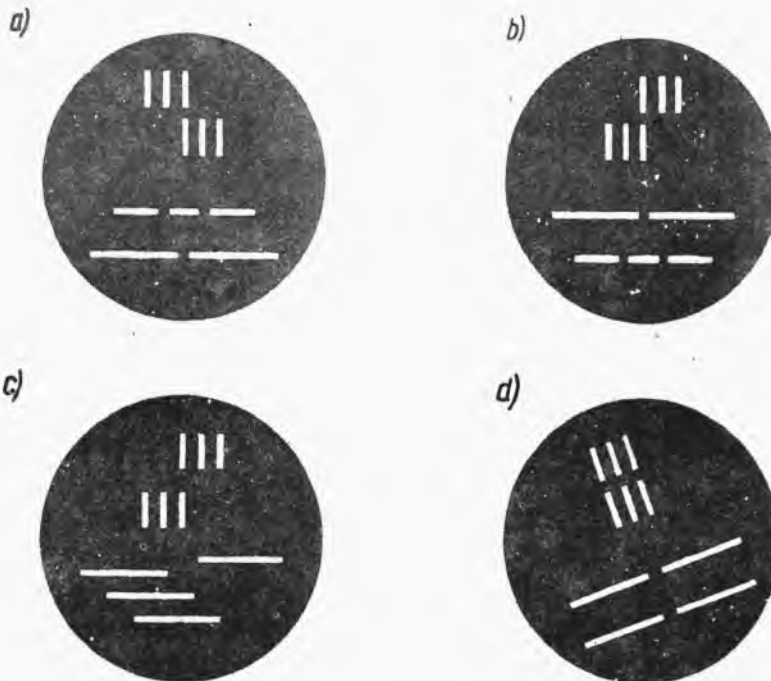


Rys.24.15. Obraz testu w refraktometrze Zeissa

Trzy górne kreski pionowe oraz pozioma górna prawa i dolna lewa są projektowane razem przez pęk A, a trzy pionowe dolne oraz pozioma górna lewa i dolna prawa - przez pęk B.

Na rys.24.15 pokazany jest obraz testu na siatkówce oka miarowego. Na rys.24.16a pokazany jest obraz testu na siatkówce oka krótkowzrocznego. Na rys.24.16b pokazany jest obraz testu na siatkówce oka nadwzrocznego. Na rys.24.16c pokazany jest obraz testu na siatkówce oka astygmatycznego. Pomiaru dokonuje się doprowadzając test do koincydencji (rys.24.15 lub 24.16d). Ustawienie kresek na jednej wysokości uzyskuje się przez obrót przyrządu dookoła jego osi, doprowadzenie zaś do koincydencji - przez pokręcenie pierścieniem. Przez lupę odczytuje się kierunek przekroju głównego na podziałce Tabo. W polu widzenia

tej samej lupy znajdują się jeszcze dwie podziałki dioptryjne - podziałka refrakcji i podziałka mocy szkła potrzebnych do korekcji tej refrakcji, uwzględniająca odległość szkła od oka.



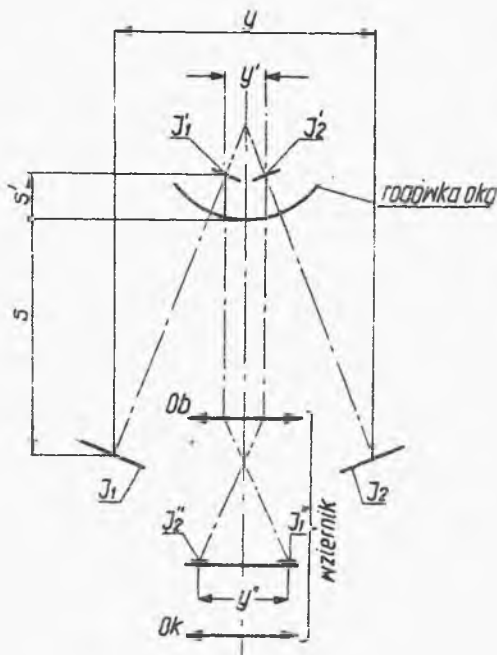
Rys.24.16. Obraz testu: a) przy oku nadwzrocznym; b) przy oku krótkowzrocznym; c) przy oku astygmatycznym; d) przy oku astygmatycznym, ustawionym w przekroju głównym i po doprowadzeniu do koincydencji

### 3.3. Pomiar promienia rogówki

#### 3.3.1. Zasada pomiaru

Pomiar promienia rogówki realizowany jest pośrednio przez pomiar wielkości obrazu figur Jawala danego przez powierzchnię rogówki. Podczas pomiaru powierzchnia rogówki traktowana jest jak lustro wypukłe. Dwie figury Jawala położone w stałej odległości od siebie, ustawione są w określonej odległości od rogówki. Wielkość obrazu tych figur zależy od promienia rogówki i mierzone jest za pomocą specjalnego układu optycznego.

Rys.24.17 wyjaśnia zasadę pomiaru.



Rys.24.17. Schemat oftalmometru

$I_1$  i  $I_2$  figury Jawala są na stałe związane z wziernikiem. Ponieważ podczas pomiaru obraz figur Jawala dany przez obiektyw  $Ob$  tworzy się na płycie ogniskowej wziernika ( $y''$ ) z uwagi na małą głębokość ostrości wziernika można uważać, że wielkość  $s-s'$  jest stała. Wtedy  $y'' = y' \beta_{Ob}$ , ponieważ

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

oraz

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{2}{r};$$

ostatecznie

$$\frac{2}{r} = 1 - \frac{y''}{y \beta_{Ob}}.$$

Pomiaru  $y''$  dokonuje się specjalnym układem pomiarowym wbudowanym do wziernika pomiędzy obiektyw i okular. Układ ten powoduje zdwojenie obrazów figur Jawala. Podczas pomiaru należy doprowadzić do styku środkowe obrazy figur.

### 3.3.2. Oftalmometr Zeissa

Przygotowanie przyrządu do pomiaru. Po włączeniu oświetlenia ustawia się na ostrość lupę do odczytywania podziałek, a następnie okular lunety.

Ustawienie okularu lunety przeprowadza się w sposób następujący: w odległości ok. 10 cm przed przyrządem ustawia się kartkę białego papieru, aby oświetlić wnętrze przyrządu; pokręcając okulariem ustawia się go tak, aby krąg centrujący umieszczony w polu widzenia lunety (rys.24.18a) był ostro widoczny. Trzeba pamiętać, iż tylko przy takim ustawieniu okularu pomiaru będą dokładne, wobec czego przy dalszych manipulacjach nie

należy już poruszać okularem. Następnie umiejscawia się głowę pacjenta; do tego służy wspornik na brodę i pałąk do oparcia czoła. Pokrętka pozwala na regulację wspornika. Po zasłonięciu oka niebadanego zasłonką, poleca się pacjentowi patrzeć na biały krążek na przyrządzie i przystępuje do ustawienia przyrządu względem oka badanego.

Aby pomiary dały dokładne wyniki muszą być spełnione dwa warunki:

1) przyrząd musi być wycentrowany w stosunku do źrenicy badanego oka, tzn. oś optyczna lunety musi przechodzić przez środek źrenicy badanego oka;

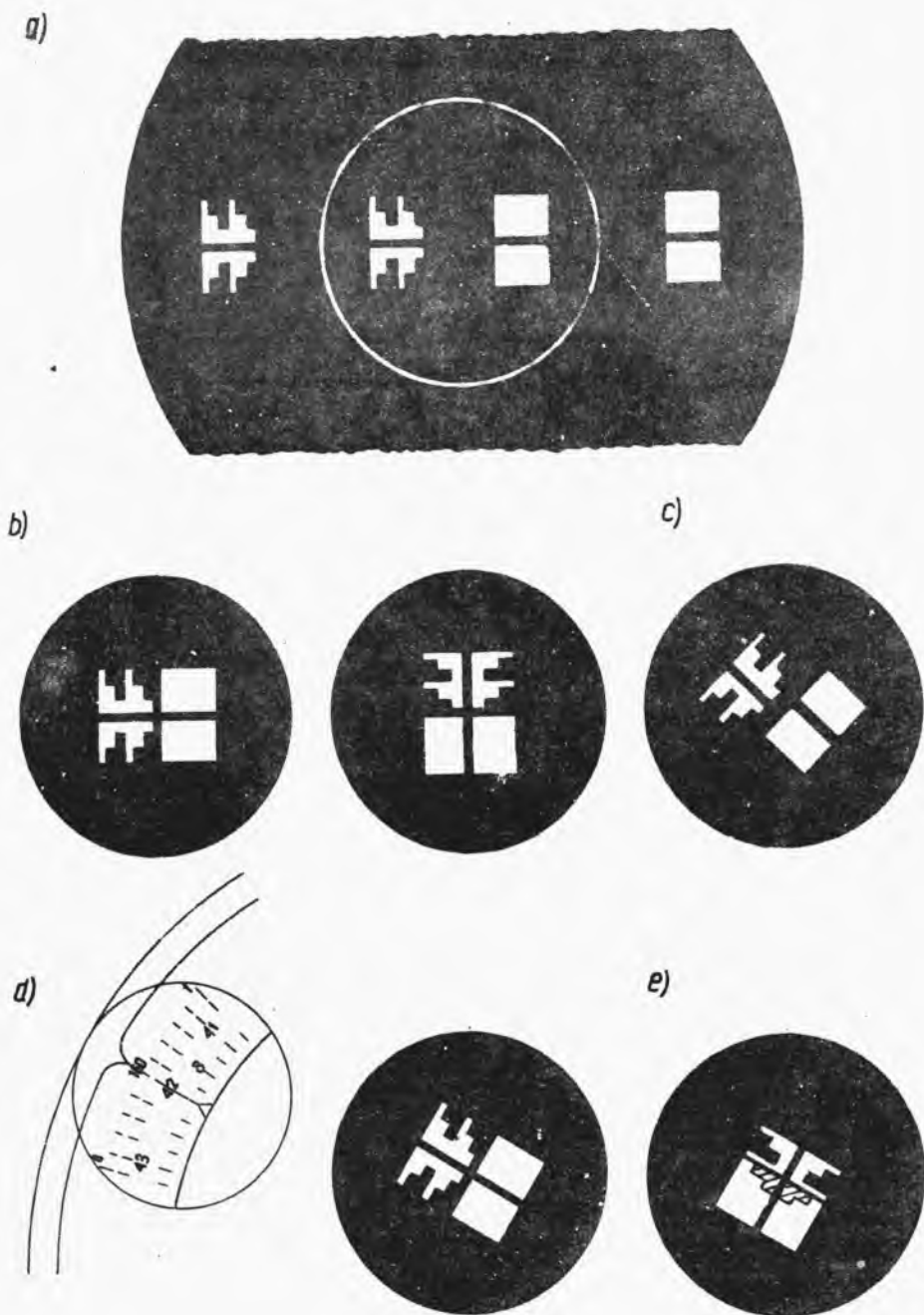
2) odległość figur Javala od oka pacjenta musi być równa odległości  $s$ , którą ustalił konstruktor.

Do wycentrowania przyrządu i ustawienia go na właściwą odległość  $s$  służy drążek, który umożliwia przesuwanie przyrządu w prawo, lewo oraz zgodnie z kierunkiem osi wzornika.

Obserwując figury Javala, które powinny się pojawić w polu widzenia przy prowizorycznym wyregulowaniu, manipuluje się drążkiem i pokrętką tak, aby otrzymać ostry obraz figur w środku pola widzenia jak na rys.24.18a. Obraz figur może mieć również wygląd jak na rys.24.18c, ważne jest tylko, aby figury leżały w środku kręgu centrującego. Dokładny pomiar zależy w znacznym stopniu od dobrego ustawienia na ostrość, gdyż to gwarantuje utrzymanie odległości  $s$ .

Dla obserwatora obrazy figur mogą być położone w pewnej odległości (rys.24.18), stykać się ze sobą albo częściowo na siebie zachodzić. Badający trzymając ręką za uchwyt i pokręcając palcem pierścień sterujący układ optyczny przesuwa obrazy doprowadza obrazy leżące w środku kręgu do zetknięcia (rys.24.18a). Jeżeli obrazy figur (prostokątna i schodkowa) leżą na jednej wysokości, tj. kreski przechodzące przez środek figur leżą na jednej linii - płaszczyzna pomiaru jest zgodna z przekrojem głównym. Jeżeli - po obróceniu przyrządu dokoła osi o  $90^{\circ}$  - figury pozostają zetknięte, a kreski znajdują się na jednej linii (rys.24.18b) oznacza to, że rogówka jest sferyczna.

Za pomocą lupy można odczytać promień rogówki  $r$  na skali koloru zielonego oraz moc rogówki na skali czerwonej.



Rys.24.18. Obrazy figur widziane przez okular oftalmometru Zeissa: a) w pewnej odległości; b) przy rogówce sferycznej; c) przy astygmatyzmie rogówki; d) przy astygmatyzmie rogówki po zgraniu figur (I przekrój główny); e) obraz w II przekroju głównym

Jeżeli figury leżą na różnej wysokości lub jeżeli przy obrocie zmienia się wysokość ich położenia (rys.24.18c), dowodzi to astygmatyzmu rogówki. W celu wyznaczenia przekroju głównego i pomiaru mocy w tym przekroju, przekręca się przyrząd za pomocą uchwyty do chwili, gdy kreski na figurach znajdują się na jednej linii, a jednocześnie, pokręcając palcem pierścien, doprowadza się figury do zetknięcia (rys.24.18d). Za pomocą lupy można odczytać jak uprzednio promień  $r$  i moc  $D$ . Na skali czarnej, zewnętrznej odczytuje się kąt położenia przekroju głównego według skali Tabo. Przekręcając następnie przyrząd o  $90^{\circ}$ , wyznacza się drugi przekrój główny. Jeżeli obraz będzie teraz wyglądał jak na rys.24.18e, można bezpośrednio na figurze schodkowej odczytać astygmatyzm rogówki. W tym przypadku skryły się dwa schodki, czyli astygmatyzm rogówki wynosi 2 dptr.

Należy pamiętać, iż odczyt bezpośredni, według figury schodkowej, daje wymagane dokładności tylko przy niedużym astygmatyzmie i przy promieniach krzywizny rogówki w pobliżu 8 mm. Przy większym astygmatyzmie i przy promieniach znacznie odbiegających od 8 mm, należy figury doprowadzić powtórnie do zetknięcia się i dokonać odczytu przez lupę.

### 3.4. Badanie widzenia dwuocznego

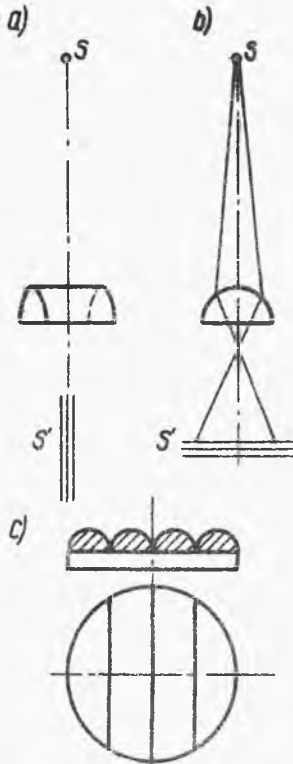
#### Badanie zezą ukrytego

Najprostszym urządzeniem do badania zezą jest przyrząd Maddoxa lub inaczej pałeczka Maddoxa; jest to bardzo mocne szkło cylindryczne.

Szkło cylindryczne w przekroju przechodzącym przez oś cylindra działa jak płytko płasko-równoległa (nie zmienia obrazu), a w przekroju prostopadłym do osi - jak soczewka. Obraz krążka świetlnego widziany przez takie szkło ma wygląd kreski. Kierunek kreski będzie zależał od kierunku osi cylindra; przy osi poziomej kreska będzie pionowa i odwrotnie (rys.24.19a,b).

Przyrząd Maddoxa jest to płytko szklana z przyklejonymi półcylindrami z czerwonego szkła, wprawiona do oprawki próbnej (rys.24.19c).

Gdy pacjent obserwuje oddalony, biały, świecący punkt obocznie, a przed prawe oko wstawi się aparacik Maddoxa, to oko lewe będzie widziało biały punkt świetlny, a oko prawe - czerwoną kreskę. W mózgu pacjenta dwa te obrazy nie będą skojarzone, wobec tego osie oczu ustawią się w położeniu spoczynkowym.



W przypadku ortophorii osie widzenia będą się przecinały w punkcie fiksacji. Ponieważ osie przecinają się w punkcie fiksacji, to obrazy w lewym i prawym oku powstaną na odpowiadających sobie punktach siatkówki, a więc pacjent zobaczy i lewym, i prawym okiem punkt świetlny w tym miejscu, gdzie się on znajduje. Punkt będzie się pokrywał z kreską pionową. Gdy natomiast występuje zez ukryty, osie nie przetną się w punkcie fiksacji.

Gdy osie cylinderek Maddoxa będą poziome, to czerwone kreski będą pionowe i odwrotnie, przy osiach pionowych - kreski będą poziome, wobec czego heterophorię można sprawdzić również w płaszczyźnie pionowej, ustawiając osie cylinderek pionowo. Gdy występuje heterophoria, w płaszczyźnie pionowej kreska będzie widziana nad albo pod punktem świetlnym.

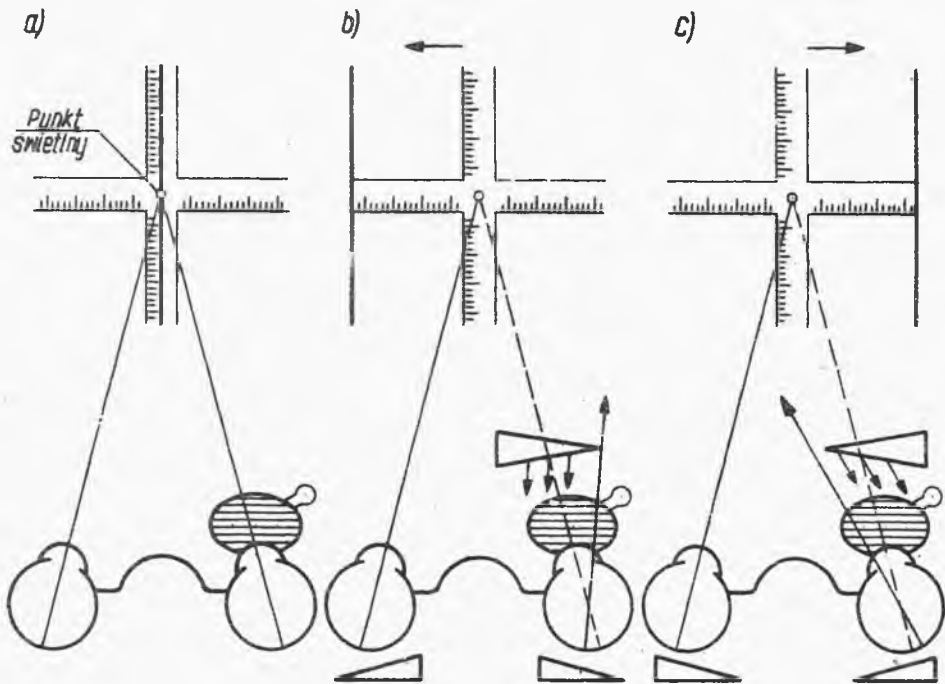
Rys.24.19. Przyrząd Maddoxa

W celu ustalenia metodyki badań, aparacik Maddoxa ustawia się zawsze przed prawym okiem pacjenta.

Do pomiaru wielkości zezu stosuje się tzw. krzyż Maddoxa. Tworzą go dwie listwy skrzyżowane z podziałkami i punktem świetlnym w środku skrzyżowania (rys.24.20). Podziałki naniezione są w jednostkach katowych używanych w okulistyce - dioptriach pryzmatycznych. Krzyż Maddoxa do dali ustawia się w odległości 5 m, a podziałki odpowiadające 1 dptr pryzmatycznej są wykreślone co 5 cm. Krzyż Maddoxa do bliży ustawia się w odległości 30 cm, a podziałki kreśli się co 3 mm. Jeżeli



oczy są wolne od zezów, to kreska przetnie się z punktem świetlnym w środku krzyża (rys.24.20a). W przypadku zezów rozbieżnego, kreska przesunie się (rys.24.20b). Aby skorygować ten zez, należy dać szkło pryzmatyczne podstawą do nosa (jak wskazuje rysunek).



Rys.24.20. Przesunięcie kresek Maddoxa przy zezach

Stąd wynika reguła: gdy przy badaniu przyrządem Maddoxa kreska jest przesunięta w kierunku nosa, podstawa pryzmatu musi stać po stronie nosa.

Jeśli przesunięcie kreski wynosi np. 8 działek na skali, oznacza to, że dla zupełnej korekcji zezów należy dać szkło pryzmatyczne 8 prdptr. Ponieważ zazwyczaj koryguje się tylko połowę wady, należy użyć szkła 4 prdptr. W celu symetrycznego rozłożenia ciężaru szkła, dzieli się tę moc pryzmatyczną na oba oczy, czyli po 2 prdptr na każde oko (rys.24.20b).

W przypadku zezów zbieżnych pacjent widzi kreskę przesuniętą w kierunku jego skroni, wobec tego szkło pryzmatyczne należy dać podstawą w kierunku kreski, czyli od strony skroni

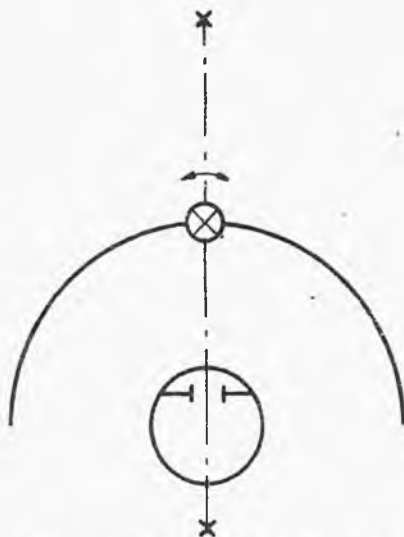
(rys.24.20c). Moc szkła potrzebnego do korekcji odczytuje się na skali krzyża. Szklka podzielone na oba oczy powinny być ustawione jak na rys.24.20c.

### 3.5. Badanie widzenia barwnego

Badanie widzenia barwnego dokonuje się za pomocą tablic Yshichary. Tablice składają się z szeregu rysunków zawierających różnej wielkości i różnego koloru kropki i kółka. Dla oka prawidłowo reagującego na barwy, jednobarwne kropki układają się w określone litery lub cyfry. W przypadku zaburzeń w widzeniu barw pacjent nie widzi żadnych znaków lub przy wadach częściowych odczytuje inne znaki niż osobnik bez zaburzeń. Do tablic dołączony jest opis każdego z rysunków.

### 3.6. Badanie pola widzenia

W przypadku miejscowych wad siatkówki (odklejenia, rozwarstwienia) lub zespołów włókien nerwowych istnieje konieczność zbadania obszarów, w których istnieją zaburzenia widzenia.



Rys.24.21. Schemat kamimetru

Pomiarów pola widzenia dokonuje się na przyrządzie zwanym kamimetrem. Po unieruchomieniu głowy w położeniu, w którym badane oko znajduje się w środku łuku kamimetru i zasłonięciu oka nie badanego poleca się pa-  
trzyć pacjentowi na światło fiksu-  
jące położenie gałki ocznej  
(rys.24.21). Łuk wycechowany  
jest w podziałce kątowej. Prze-  
suwając po łuku kolorowy znak  
możemy określić miejsca, w któ-  
rych pacjent nie widzi znaku.  
Łuk kamimetru obraca się dookoła  
osi x-x. Dzięki temu można do-  
konać badania w różnych przekro-  
jach. Wyniki notowane są na specjalnych formularzach, które w

przypadku kamimetru projekcyjnego Zeissa można mocować na

przyrządzie. Pisak porusza się wtedy synchronicznie z ruchem punktu śledzonego przy badaniu.

#### 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W ćwiczeniu należy wykonać badanie własnego wzroku:

##### 1. Pomierzyć:

- ostrość wzroku metodą Dondersa,
- refrakcję oczu za pomocą refraktometru,
- promień krzywizny rogówki.

##### 2. Wykonać badanie:

- zeza,
- widzenia barwnego,
- pola widzenia.

Sprawozdanie powinno zawierać wyniki pomiarów według powyższych punktów oraz ewentualną receptę na szkła korekcyjne.

#### 5. LITERATURA

Józwicki R.: Optyka instrumentalna. WNT. Warszawa 1970.  
Hein A., Sidorowicz A., Wagnerowski T.: Oko i okulary. Wyd. Przem.Lekk. i Spoż. Warszawa 1960.

#### 6. PYTANIA KONTROLNE

- Omówić wady refrakcji oka.
- Omówić własności rozpoznawcze oka.
- Metody badania ostrości wzroku.
- Pomiar refrakcji oka.
- Pomiar promienia krzywizny rogówki.
- Badanie zeza.
- Badanie pola widzenia.

## SKRYPTY WPW

wydane

- ŻYDANOWICZ J., Zagadnienia wybrane z techniki zabezpieczeń przekąźnikowych, 1975, ark. wyd. 8, cena zł 11.—
- ANDERS Z. i in., Ćwiczenia z geodezji II, 1975, ark. wyd. 19, cena zł 25.—
- POREMBSKI J., Przyrządy i uchwyty obróbkowe. Podstawy teoretyczne i zasady projektowania, 1975, ark. wyd. 25, cena zł 33.—
- AMBORSKI K., MARUSAK A., Ćwiczenia z automatyki, cz. II. Układy nieliniowe, 1975, ark. wyd. 7, cena zł 9.—
- HOLEJKO D., KOSCIELNY W., NIEWCZAS W., Zbiór zadań z podstaw automatyki, wyd. 4, 1975, ark. wyd. 21, cena zł 27.—
- ŁĄCZYŃSKI B., Tworzywa sztuczne, 1975, ark. wyd. 12, cena zł 16.—
- ELBAUM J., Obwody magnetyczne w aparatach elektroenergetycznych, 1975, ark. wyd. 8,1, cena zł 11.—
- SIDOROWICZ J., PRZYWARA G., Laboratorium podstaw i automatyki napędu elektrycznego, 1975, ark. wyd. 15, cena zł 19.—
- SOCHOCKI R., Wstęp do teorii elektromechanicznego przetwarzania energii, 1975, ark. wyd. 5, cena zł 6.—
- SKORUPSKI A., SOSNOWSKI J., ZABRODZKI J., Półprzewodnikowe układy techniki cyfrowej, 1975, ark. wyd. 12, cena zł 16.—
- BZYMEK Z., GRYZC J., MARKS W., Podstawowe wiadomości o projektowaniu mostów betonowych, wyd. 2, 1975, ark. wyd. 24, cena zł 32.—
- POREMBSKI J., POZNAŃSKI J., KUBALSKI A., Przyrządy i uchwyty obróbkowe. Ćwiczenia laboratoryjne, 1975, ark. wyd. 10, cena zł 13.—
- WOLSKA-BOCHENEK J. i in., Zarys teorii równań różniczkowych cząstkowych i równań całkowych, cz. II, 1975, ark. wyd. 14, cena zł 18.—
- RYDEL M., Transmisja sygnałów w torach przewodowych, 1975, ark. wyd. 9, cena zł 12.—
- KAMIŃSKA-CZYŻ K., PEKAŁSKI M., Wybrane działy geodezji inżynierskiej, 1975, ark. wyd. 16, cena zł 21.—
- JEZIERSKI J., Analiza tolerancji i zamienności części maszyn. Zbiór zadań, wyd. 3 całkowicie zmienione, 1975, ark. wyd. 16, cena zł 21.—
- SORBJAN Z., Podstawy numerycznych prognoz pogody, 1975, ark. wyd. 10, cena zł 13.—
- CISZEWSKI A., RADOMSKI T., SZUMMER A., Laboratorium badania metali, 1975, ark. wyd. 17, cena zł 22.—
- ZAJĄCZKOWSKA-STEMPŁOWSKA A., ZIĘTEK J., Wybrane urządzenia do przeróbki osadów ściekowych, 1975, ark. wyd. 6, cena zł 8.—
- JEŻEWSKI M., MUSZYŃSKI J., ŻEKANOWSKI Z., Matematyka, cz. I, wyd. 2, 1976, ark. wyd. 15, cena zł 19.—
- ŁĄCZYŃSKI B., Makromolekułologia, 1975, ark. wyd. 12, cena zł 15.—
- PRACA ZBIOROWA pod redakcją W. WASILUKA. Laboratorium napędów elektrycznych dla wydziałów mechanicznych, 1975, ark. wyd. 9,5, cena zł 12.—
- WNEK B. Normowanie i badanie metod pracy. Ćwiczenia, 1975, ark. wyd. 11,5, cena zł 15.—
- KOPYT T., SZYDŁOWSKI W. Zbiór zadań z teorii mechanizmów i części maszyn, 1975, ark. wyd. 9,5, cena zł 12.—
- CZUPRATOWSKA M., Język rosyjski dla studentów Wydziału Chemicznego, 1975, ark. wyd. 5, cena zł 6.—
- CZYRKO M. Teksty do nauczania języka rosyjskiego dla Wydziału Inżynierii Łądowej, 1975, ark. wyd. 7, cena zł 9.—
- JASZCZUK W. Ćwiczenia laboratoryjne z urządzeń mechanicznych informatyki, 1975, ark. wyd. 9, cena zł 12.—
- ROMICKI S., SZACKA K. Laboratorium teorii układów dynamicznych, 1975, ark. wyd. 13, cena zł 17.—
- ANTONIUK E. Zadania z mechaniki ogólnej. Cz. II. Kinematyka, 1975, ark. wyd. 16, cena zł 21.—

SKI

- PRACA ZBIOROWA pod red. J. ERSELA. Informacje o organizatorach i organizacjach, 1974, ark. wyd. 14, cena zł 19.—
- GODZISZEWSKI J. Grammatik und Englisch, 1974, ark. wyd. 16, cena zł 21.—
- WASILEWSKI Z. Mechanizmy części maszyn budowlanych. Pod red. B. KALABINSKIEGO, 1974, ark. wyd. 24, cena zł 32.—
- PRACA ZBIOROWA pod red. J. ERSELA. Encyklopedia technik wytwarzania stosowanych w przemyśle maszynowym, t. I, 1974, ark. wyd. 14, cena zł 18.—
- BEŁDOWSKI T. Stacje elektroenergetyczne, 1974, ark. wyd. 12, cena zł 16.—
- GUK A. i in. Laboratorium wytrzymałości materiałów, 1974, ark. wyd. 14, cena zł 19.—
- KONARZEWSKI Z. Podstawy mechaniki ciała stałego, 1974, ark. wyd. 15, cena zł 19.—
- MAKOWIECKI J. Klimatyzacja. Ćwiczenia, 1974, ark. wyd. 17,3, cena zł 23.—
- LAPINSKI M. Miernictwo elektryczne, 1974, ark. wyd. 15,7, cena zł 20.—
- KLONOWSKA M., PROSNAK W. J. Funkcje gazodynamiczne. Podstawy teoretyczne. Procedury w języku ALGOL 1204. Tablice liczbowe i wykresy, 1974, ark. wyd. 10,4, cena zł 14.—
- KACZOREK T. Teoria układów regulacji automatycznej. Cz. II, z. 1 i 2, 1974, wyd. 3 zmienione, ark. wyd. 29, cena z. 1 i 2 zł 38.—
- OCIOSZYŃSKI J. Laboratorium elektrotechniki samochodowej, 1974, ark. wyd. 7, cena zł 9.—
- STEFANASZKO H. Energetyczny modułarny język problemowy 1974, ark. wyd. 16, cena zł 21.—
- STEFANIŃSKI A., STEFANASZKO H., ZUBEREK W. Organizacja maszyn cyfrowych. Laboratorium, 1974, ark. wyd. 22,4, cena z. 1, 2 i 3 zł 29.—
- OCIOSZYŃSKI J. Zadania z maszyn i napędu elektrycznego, 1974, ark. wyd. 5, cena zł 6.—
- PRACA ZBIOROWA. Zbiór zadań z metod numerycznych ALGOL 1204, wyd. 2, 1975, ark. wyd. 4,5, cena zł 6.—
- SKRZYPCZAK S. Transport. Wybór tekstów technicznych w jęz. francuskim, 1974, ark. wyd. 10, cena zł 17.—
- SIUTAK M., NOWAKOWSKI W. Schematy blokowe algorytmów. Zbiór zadań, 1974, ark. wyd. 5, cena zł 8.—
- KOZIELSKI M. Fizyka współczesna, 1974, ark. wyd. 11, cena zł 15.—
- KOCOSKO W. Obliczanie zwarć w systemach elektroenergetycznych, 1974, ark. wyd. 8, cena zł 11.—
- PRACA ZBIOROWA. Zbiór zadań z sieci elektroenergetycznych, 1974, ark. wyd. 10, cena zł 14.—
- ALAN Z. STOK, J. MAKSYMIAK. Budowa łączników elektroenergetycznych wysokiego napięcia, 1974, ark. wyd. 11, cena zł 14.—
- DUBIŃCZAK M. Teoria mechanizmów i części maszyn, 1974, ark. wyd. 10, cena zł 12.—
- CZYRKO M. Teksty do nauczania języka rosyjskiego dla Wydz. Geodezji i Kartografii, 1974, ark. wyd. 5, cena zł 6.—
- PRACA ZBIOROWA. Zarys teorii równań różniczkowych cząstkowych i równań całkowych. Cz. I, 1974, ark. wyd. 8,7, cena zł 11.—
- KOJ J., KRYSIŃSKA A., NIEWCZAS W. Ćwiczenia laboratoryjne z podstaw autorstatyki, 1975, ark. wyd. 11, cena zł 15.—
- SŁOWAŃSKI L. Wytrzymałość materiałów. Metody i przykłady badań doświadczalnych, 1975, ark. wyd. 15, cena zł 19.—
- ANDERS Z. i in. Ćwiczenia z geodezji II, 1975, ark. wyd. 19, cena zł 25.—
- PIETRASZEK P. Ćwiczenia laboratoryjne z technologii osadów ściekowych, 1973, ark. wyd. 3, cena zł 4.—
- ZYDANOWICZ J. Zagadnienia wybrane z techniki zabezpieczeń przekafnikowych, 1975, ark. wyd. 8, cena zł 11.—
- OLEKSIŃK W. Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji przyrządów precyzyjnych, 1975, ark. wyd. 11, cena zł 15.—