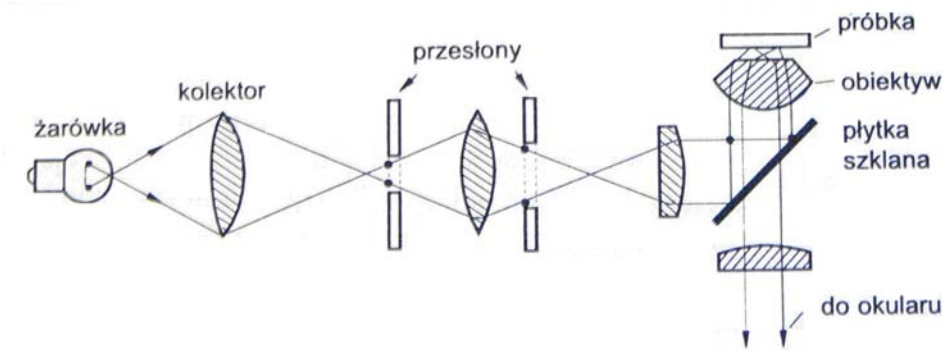


## 6. Badania mikroskopowe proszków i spieków

Najprostszy układ optyczny stanowią dwie współosiowe soczewki umieszczone na końcach tubusu (rysunek 42). Odwzorowanie mikroskopowe jest dwustopniowe: obiektyw (ob) tworzy odwrócony i powiększony obraz pośredni A'B' przedmiotu AB. Obraz A''B'' jest pozorny i odwrócony względem przedmiotu, ale prosty w stosunku do obrazu pośredniego. Obraz pośredni tworzony jest przez obiektyw w ognisku okularu  $F_{ok}$ .



Rysunek 42. Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych

### 6.1. Powiększenie obiektywu i okularu

Powiększenie obiektywu wyrażone jest równaniem (91) a powiększenie okularu - zależnością (92):

$$\beta_{ob} = -\frac{t}{f'_{ob}} \quad (91)$$

$$\Gamma_{ok} = \frac{250}{f'_{ok}} \quad (92)$$

gdzie:  $f'_{ob}$  - ogniskowa obrazowa obiektywu,  $t$  - długość optyczna tubusu mikroskopu (odległość obrazu pośredniego od ogniskowej obrazowej obiektywu  $F'_{ob}$ ),  $f'_{ok}$  - ogniskowa obrazowa okularu

### 6.2. Powiększenie całkowite mikroskopu

Powiększenie całkowite jest iloczynem powiększenia własnego obiektywu i okularu (93)

$$\Gamma = \beta_{ob} * \Gamma_{ok} = -\frac{t}{f'_{ob}} * \frac{250}{f'_{ok}} \quad (93)$$

$$\text{warunek : } \Gamma = (500 - 1000) * A$$

Obiektyw ma zdolność rozróżniania szczegółów w obserwowanym obiekcie; okular daje tylko obraz utworzony przez obiektyw (powiększenie puste).

### 6.3. Zdolność rozdzielcza obiektywu

Zdolnością rozdzielczą (94) nazywamy najmniejszą odległość pomiędzy dwoma punktami na próbce, które mogą być rozróżniane podczas obserwacji.

$$\delta = \frac{\lambda}{n * \sin \frac{\sigma}{2}} \quad (94)$$

Jeśli przyjmiemy, że

$$n_{\text{powietrza}} = 1 \quad (95)$$

wówczas:

$$\delta = \frac{\lambda}{\sin \frac{\sigma}{2}} \quad (96)$$

oraz

$$n * \sin \frac{\sigma}{2} = A \quad (97)$$

gdzie:  $\delta$  - zdolność rozdzielcza,  $\lambda$  - długość fali świetlnej,  $n$  - współczynnik przenikania światła w ośrodku,  $\sigma$  - kąt wierzchołkowy stożka skrajnych promieni świetlnych wychodzących z osiowego punktu przedmiotowego do obiektywu,  $A$  - apertura numeryczna

Zdolność rozdzielczą mikroskopu można zwiększyć zmniejszając długość fali świetlnej  $\lambda$  i zwiększając aperturę numeryczną  $A$ . Przyjmując, że minimalna długość fali świetlnej  $\lambda$  dla światła niebieskiego  $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ , to zwiększenie apertury numerycznej  $A$  może nastąpić poprzez zwiększenie współczynnika przenikania światła  $n$  w danym ośrodku poprzez zastosowanie cieczy imersyjnych (np.  $n$  olej cedrowy = 1,515 lub  $n$  woda = 1,33), umieszczanych pomiędzy próbką a soczewką obiektywu.

$$A_{\text{max}} = 1,66 \Rightarrow \delta_{\text{min}} = \frac{0,4}{1,66} = 0,24 \mu\text{m} \quad (98)$$

#### 6.4. Głębia ostrości

Głębią ostrości (99) nazywamy zakres odległości w kierunku osi optycznej obiektywu, w którym obserwowane szczegóły są ostre.

$$g = \frac{71,5}{A * \Gamma} * \left(1 + \frac{1}{\Gamma}\right) \quad (99)$$

Jeśli przyjmiemy, że:

$$A = 0,95 \quad i \quad \Gamma = 300x \quad (100)$$

uzyskamy głębię ostrości na poziomie  $g = 0,8 \mu\text{m}$ . Jeśli przy tej samej wartości apertury numerycznej zwiększymy powiększenie mikroskopu do 1000x, głębia ostrości wynosić będzie 75 nm. wynika z tego, że dość trudno jest wykonać ostre zdjęcie przy dużym powiększeniu.

#### 6.5. Powiększenie użyteczne mikroskopu

Zwiększanie powiększenia okularu nie może wpłynąć na ujawnienie nowych szczegółów (powiększenie „puste”). Zbyt małe powiększenie obiektywu wpływa na nieujawnienie wszystkich szczegółów. Powiększenie użyteczne (101) odpowiada najkorzystniejszemu doborowi okularu i obiektywu.

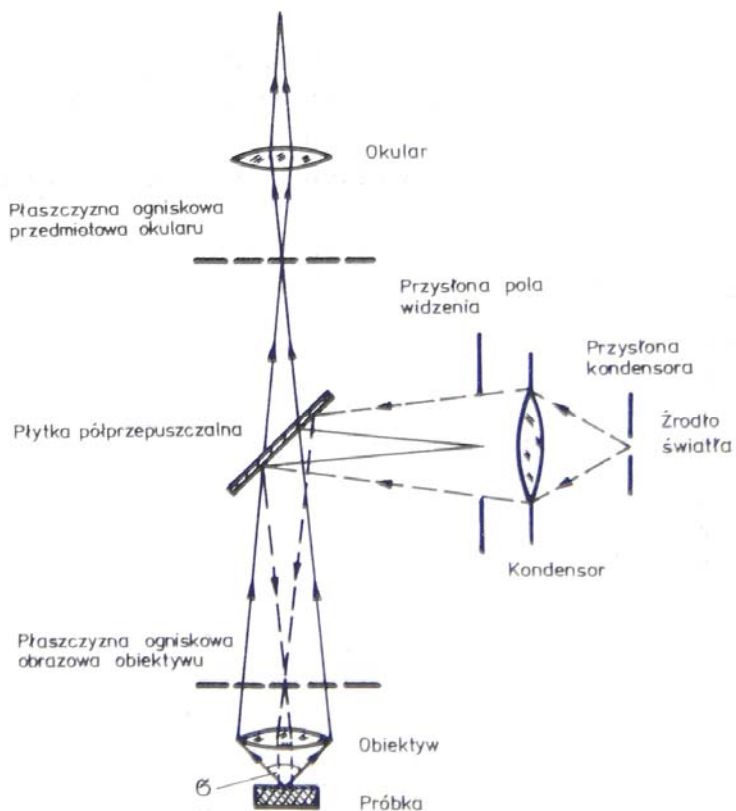
$$\Gamma_u = \frac{l_o}{d} = \frac{2 * 250 \text{tg}(2 - 4')}{\frac{\lambda}{A}} = \frac{2 * 250 \text{tg}(2 - 4') * A}{\lambda} \quad (101)$$

#### 6.6. Techniki badawcze stosowane w mikroskopii świetlnej

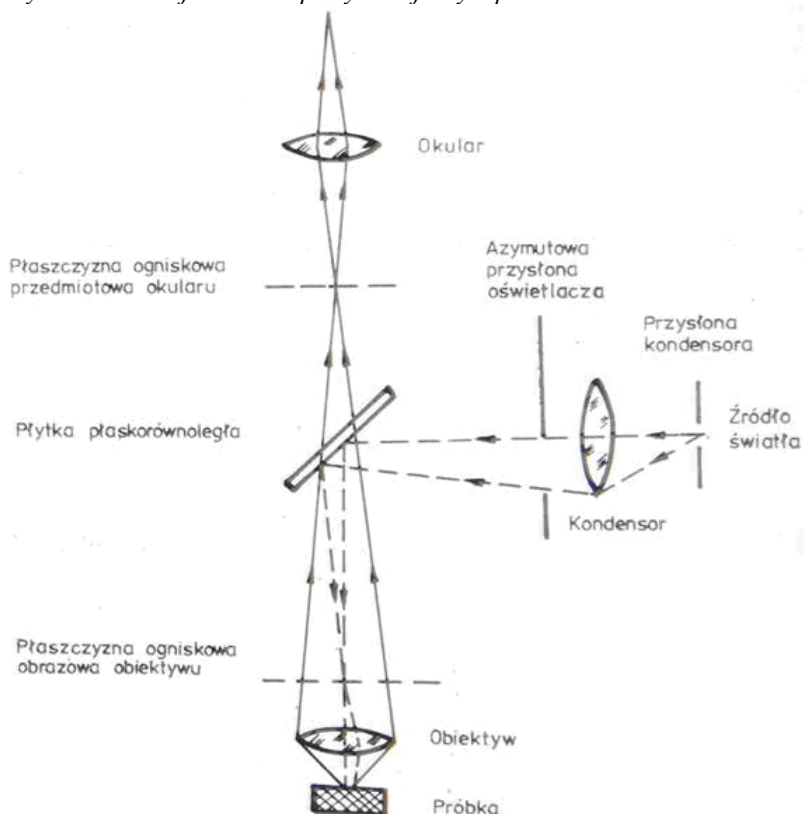
Do technik badawczych stosowanych w mikroskopii świetlnej zaliczyć możemy (rysunek 43-48):

1. obserwacje w jasnym polu widzenia (+filtry światła),

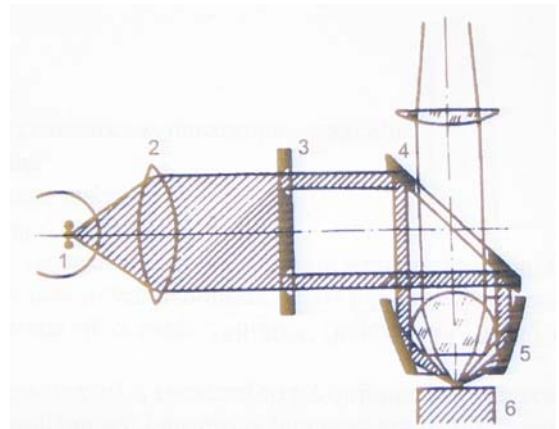
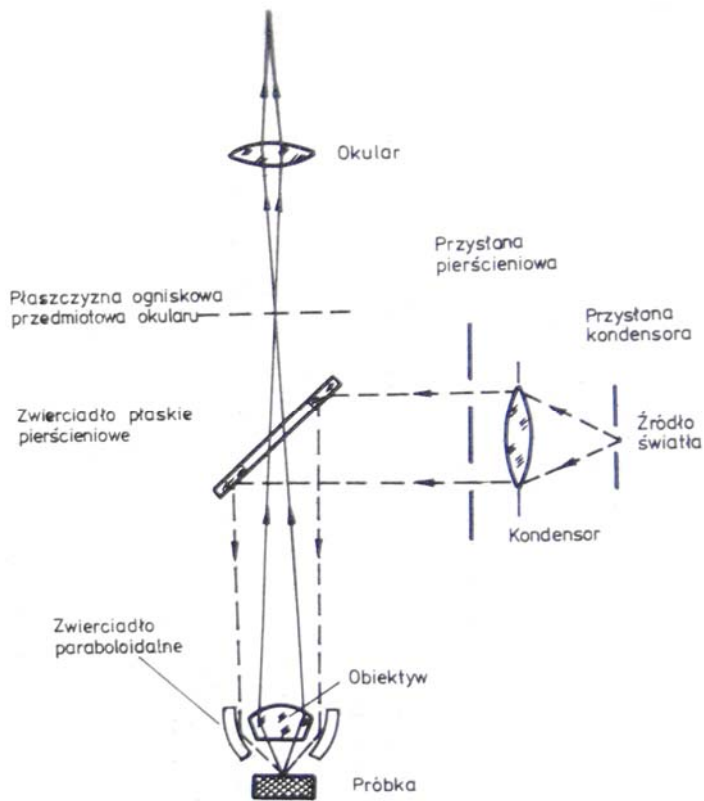
2. obserwacje w świetle ukośnym,
3. obserwacje w ciemnym polu widzenia,
4. obserwacje z kontrastem fazowym,
5. obserwacje w świetle spolaryzowanym,
6. mikroskopię interferencyjną.



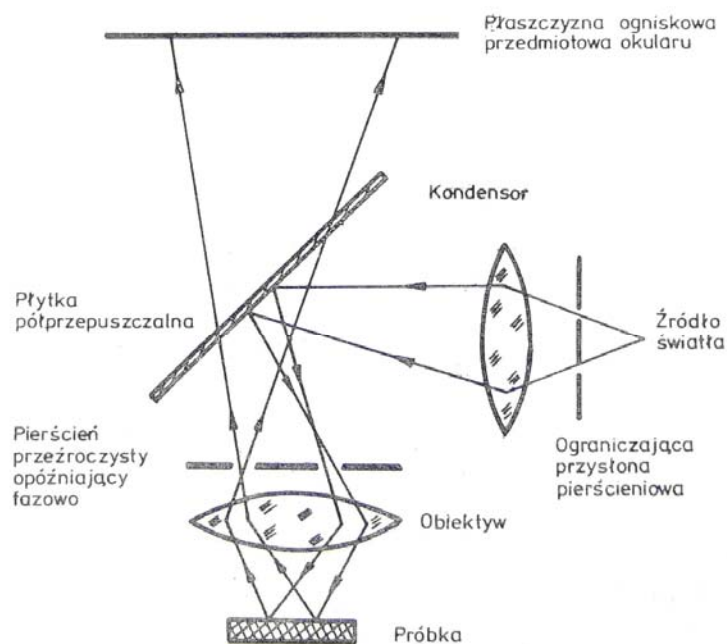
**Rysunek 43.** Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych w jasnym polu widzenia



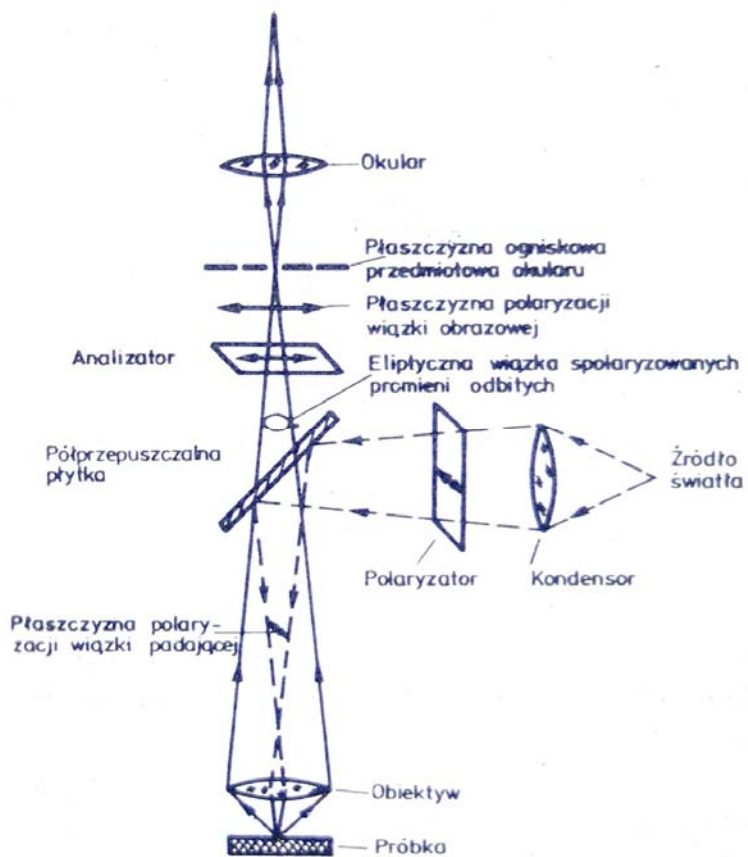
**Rysunek 44.** Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych w świetle ukośnym



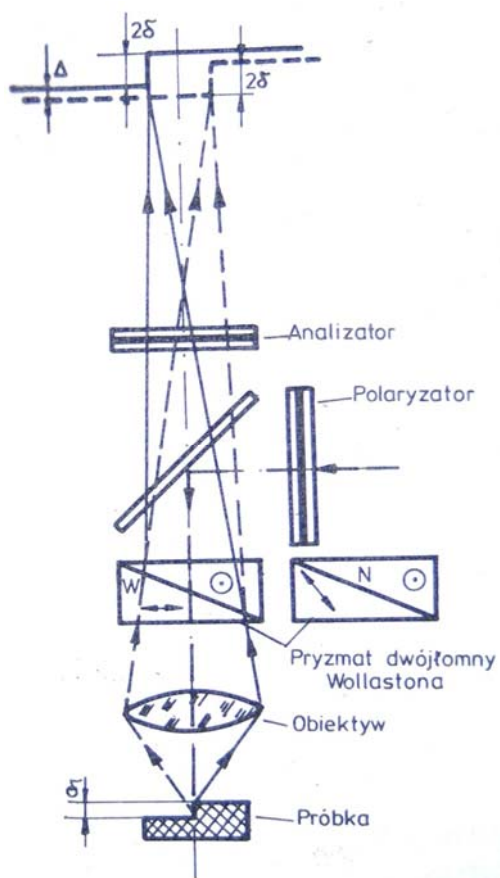
**Rysunek 45.** Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych w ciemnym polu widzenia: 1 - źródło światła, 2 - soczewka, 3 - pierścień, 4 - pierścień-lustro, 5 - obiektyw, 6 - próbka



**Rysunek 46.** Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych z kontrastem fazowym



Rysunek 47. Układ optyczny do obserwacji mikroskopowych w świetle spolaryzowanym

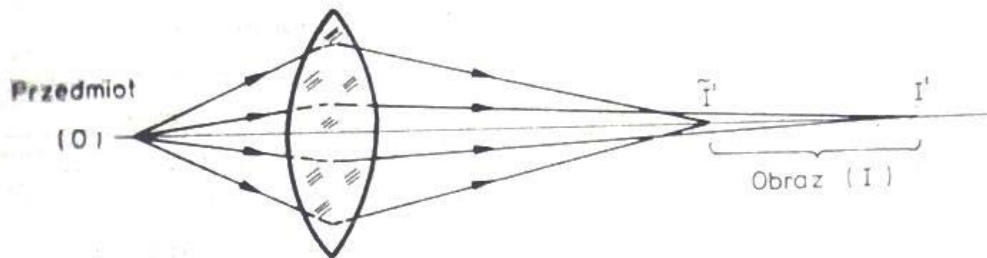


Rysunek 48. Układ optyczny do mikroskopii interferencyjnej

## 6.7. Podstawowe wady odwzorowania optycznego

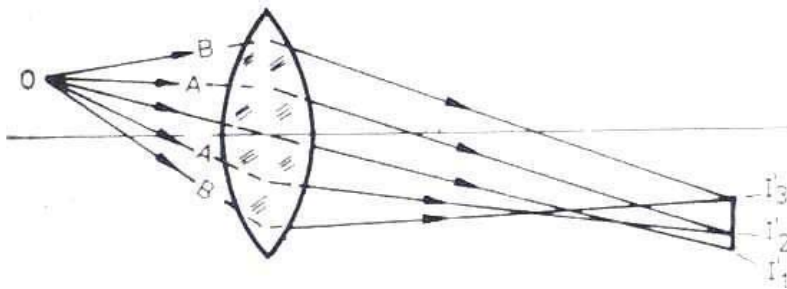
Do podstawowych wady odwzorowania w świetle monochromatycznym zaliczyć możemy (rysunek 49-53): aberrację sferyczną, aberrację komatyczną, aberrację astygmatyczną, krzywiznę pola oraz dystorsję.

Aberracja sferyczna (rysunek 49) polega na tym, że promienie świetlne, wychodzące z punktu przedmiotowego leżącego na osi optycznej soczewki i przechodzące przez różne jej strefy skupiają się w różnych punktach obrazowych na osi optycznej. Punkt skupienia promieni świetlnych przyosiowych  $I'$  leży dalej lub bliżej soczewki niż punkt obrazowy skupienia promieni brzegowych  $\sim I'$ .



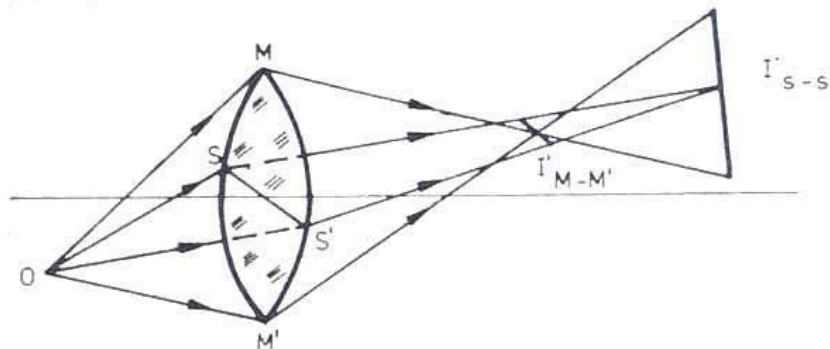
Rysunek 49. Aberracja sferyczna

Przyczyną aberracji komatycznej (rysunek 50) jest niesymetryczność wiązki promieni świetlnych wychodzących z punktów przedmiotowych nie leżących na tej osi. W wyniku tego uzyskuje się niesymetryczne załamanie światła w różnych strefach soczewki, a utworzony obraz punktów na kształt przecinka  $I_1' I_2' I_3'$ .



Rysunek 50. Aberracja komatyczna

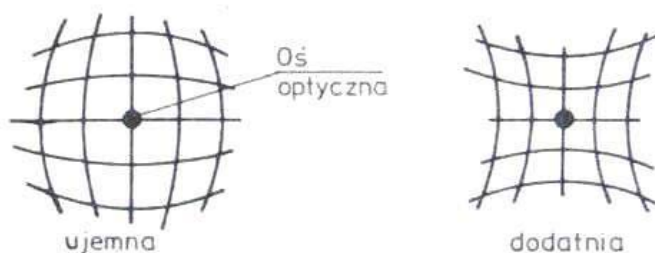
Aberracja astygmatyczna (rysunek 51) polega na tym, że wąska wiązka promieni świetlnych wychodząca z punktu przedmiotowego leżącego poza osią optyczną soczewki nie skupia się w jednym punkcie obrazowym, lecz wzdłuż dwóch prostopadłych odcinków południkowych  $I'M-M'$  i równoleżnikowych  $I'S-S'$  wzajemnie rozsuniętych o odległość zwaną różnicą astygmatyczną.



Rysunek 51. Aberracja astygmatyczna

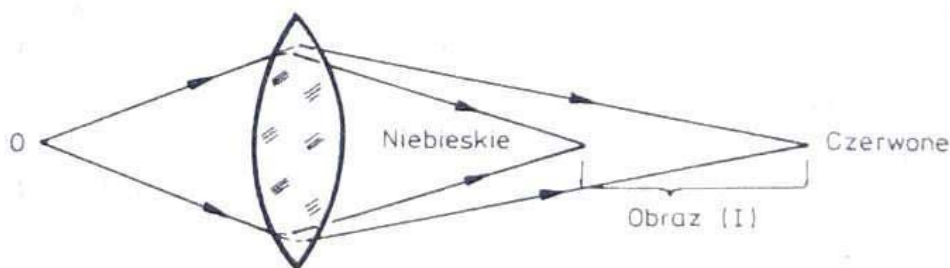
Krzywizna pola jest aberracją ściśle związaną z astygmatyzmem. W płaszczyźnie przedmiotowej soczewki może być nieskończenie wiele punktów mieszczących się w polu widzenia soczewki (punkt O) i każdemu z nich odpowiadają dwa punkty obrazowe  $I'M-M'$  i  $I'S-S'$ , których zbiory tworzą dwie po-

wierzchnie wygięte w symetrii obrotowej. Zakrzywienie to jest zwane krzywizną pola. W mikroskopie objawia się to niemożliwością otrzymania jednakowo ostrego obrazu próbki jednocześnie w środku i na brzegu pola widzenia. Dystorsja jest to aberracja typu pozaosiowego, wynikająca z różnicy w powiększeniu poprzecznym soczewki w obszarach brzegowym i przyosiowym. Może być ona ujemna lub dodatnia (rysunek 52).



Rysunek 52. Dystorsja ujemna i dodatnia

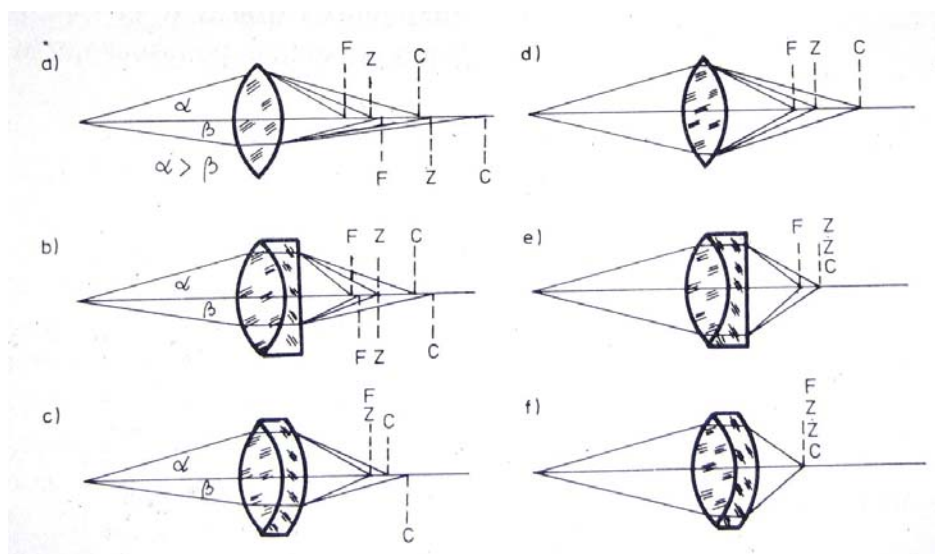
Wadą odwzorowania optycznego w świetle białym jest aberracja chromaticzna (rysunek 53), która zależna jest od długości fali świetlnej. Przyczyną aberracji chromaticznej jest fakt, że współczynnik załamania światła dla materiałów, z których wykonane są soczewki jest różny w zależności od długości fali świetlnej. Z uwagi na fakt, że współczynnik ten jest cechą materiału, aberracja występuje w poza- i w przyosiowym obszarze soczewki. Istotą tego zjawiska jest utworzenie obrazu tego samego punktu przez promienie o różnej  $\lambda$ . W wyniku aberracji pojedynczy punkt przedmiotowy światła białego jest barwną plamką o innych kolorach na brzegu i w środku.



Rysunek 53. Aberracja chromaticzna

### 6.7.1. Korekta wad soczewek

Na rysunku 54 zamieszczono schematy korekcji wad soczewek.



Rysunek 54. Korygowanie aberracji sferycznej (a, b, c) i chromaticznej (d, e, f) w przypadku soczewek zwykłych (a, d) achromatycznych (b, e) i apochromatycznych (c, f); F - fioletowy, Ż - żółty, C - czerwony, Z - zielony

## 6.8. Charakterystyka podstawowych elementów optycznych mikroskopu

### 6.8.1. Obiektywy

#### 6.8.1.1. Obiektywy achromatyczne

Obiektywy te są skorygowane achromatycznie dla promieni zielonych i czerwonych oraz sferycznie dla pośredniego promieniowania zielonożółtego. Korzystne jest tu stosowanie filtrów zielonych. Podstawowym elementem tego obiektywu jest dublet achromatyczny złożony z dwóch soczewek dodatniej ze szkła kronowego i ujemnej ze szkła flintowego połączone klejem optycznym.

#### 6.8.1.2. Fluotary (półapochromaty, semiapochromaty, achromaty fluorytowe) i neoachromaty

W obiektywach tych zamiast szkła kronowego zastosowany został fluoryt (bardziej czystszy niż w przypadku achromatów), co pozwala na poprawę jakości obrazu. Obiektywy neoachromatyczne mają skorygowaną częściowo astygmatyczną krzywiznę pola.

#### 6.8.1.3. Obiektywy planachromatyczne

Zostały zbudowane podobnie jak achromaty, ale wykazują całkowicie skorygowaną krzywiznę pola. Obrazy przez nie uzyskane cechują się korekcją chromatyczną dla 2 długości fali aż do brzegów pola widzenia.

#### 6.8.1.4. Obiektywy apochromatyczne

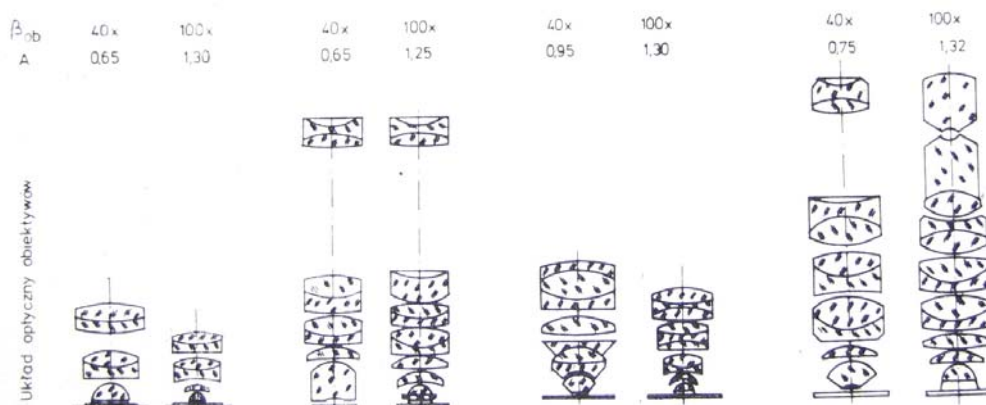
Obiektywy skorygowane chromatycznie dla 3 długości fali (fiolet, zieleń, czerwień) oraz sferycznie dla zieleni i fioletu. W układach obiektywów apochromatycznych występują soczewki ze specjalnych gatunków szkła optycznego lub z fluorytu.

#### 6.8.1.5. Obiektywy planpochromatyczne

Są to obiektywy skorygowane chromatycznie i sferycznie, wykazujące całkowicie skorygowaną krzywiznę pola. Posiadają najwyższy stopień korekcji aberracji. Charakteryzują się wysoką ceną.

#### 6.8.1.6. Obiektywy do badań w ciemnym polu widzenia

Ich konstrukcja umożliwia oświetlenie badanej próbki wiązką świetlną ukształtowaną w pusty stożek o wewnętrznym kącie wierzchołkowym większym od kąta wierzchołkowego  $\sigma$  rozwarcia obiektywu. Posiadają dwa układy optyczne - wewnętrzny spełnia rolę właściwego obiektywu, a zewnętrzny spełnia rolę kondensora (katoptryczny = zwierciadlany, katadioptryczny = zwierciadlano-soczewkowy lub soczewkowy). Na rysunku 55 zamieszczono schematy układów optycznych.



Rysunek 55. Schematy układów optycznych obiektywów: achromatycznych planachromatycznych apochromatycznych planapochromatycznych



## **6.8.2. Okulary**

### **6.8.2.1. Okulary zwykłe Huyghensa**

Są to okulary złożone z dwóch płaskowypukłych soczewek, zwróconych wypukłościami w stronę obiektywu. Dla ograniczenia pola obrazowego w płaszczyźnie ogniskowej przedmiotowej okularu umieszcza się przysłonę połową. W okularach tych skorygowane są częściowo aberracja chromatyczna poprzeczna, komatyczna i astygmatyczna. Powszechnie stosowane z obiektywami achromatycznymi, głównie do obserwacji wizualnej. Kątowe pole widzenia nie przekracza  $30^\circ$ .

### **6.8.2.2. Okulary symetryczne**

Okulary symetryczne składają się z dwóch symetrycznych dubletów soczewek. Umożliwiają zwiększenie kąтового pola widzenia do  $40^\circ$ . Stosowane głównie jako okulary mikrometryczne lub w mikrografii.

### **6.8.2.3. Okulary ortoskopowe**

Okulary ortoskopowe złożone są z tripletu klejonego i pojedynczej soczewki płaskowypukłej. Ich kątowe pole widzenia wynosi  $50^\circ$ . Cechują się dobrze skorygowaną aberracją chromatyczną poprzeczną i astygmatyczną oraz dobrą korekcją dystorsji.

### **6.8.2.4. Okulary kompensacyjne**

Konstrukcja okularów kompensacyjnych podobna jest do zwykłych okularów, w których soczewki pojedyncze są zastąpione dubletami klejonymi (dodatnia soczewka kronowa i ujemna flintowa). Kompensują aberrację chromatyczną współpracujących z nimi obiektywów (specjalnie wprowadzona aberracja chromatyczna poprzeczna). Stosowane są we współpracy z obiektywami apochromatycznymi, semiapochromatycznymi, planachromatycznymi i planapochromatycznymi. Kątowe pole widzenia wynosi  $45^\circ$ .

### **6.8.2.5. Okulary periplanatyczne i hiperplanatyczne**

Okulary zwane są także komplanatycznymi lub planokularami. W swej konstrukcji zbliżone są do okularów kompensacyjnych, ale składają się z większej ilości soczewek. Mają tak skorygowane aberracje astygmatyczną i chromatyczną powiększenia oraz krzywizną pola, aby kompensowały te same aberracje, co obiektywy z którymi współpracują. Kątowe pole widzenia tych okularów wynosi  $50^\circ$ . Współpracują z obiektywami apochromatycznymi, semiapochromatycznymi, planachromatycznymi i planapochromatycznymi.

### **6.8.2.6. Okulary fotograficzne i projekcyjne**

Ta grupa okularów stosowana jest w mikrografii. Korygowane na skończoną odległość obrazu w celu sprowadzenia obrazu mikroskopowego na płaszczyznę kliszy fotograficznej.

## **6.9. Budowa mikroskopu metalograficznego**

W skład typowego, produkowanego obecnie mikroskopu do badań metalograficznych (rysunek 56) wchodzi: korpus, urządzenie oświetlające (oświetlacz), stolik przedmiotowy (czasem zautomatyzowany w osiach XY lub XYZ), tubus obserwacyjny, regulacja ostrości oraz obiektywy i okulary. Obecnie stosowane mikroskopy metalograficzne umożliwiają bezpośrednią rejestrację obrazu badanych mikrostruktur za pomocą zainstalowanych na nich kamer cyfrowych. Wyposażenie dodatkowe mikroskopu stanowić mogą: płytka fazowa do kontrastu fazowego, polaryzator, filtry do światła oraz wkładka do interferencyjnego kontrastu różniczkowego.



*Rysunek 56. Nowoczesny mikroskop do badań metalograficznych wraz z, polaryzatorem, filtrami świetlnymi oraz do interferencyjnego kontrastu różniczkowego*

### **6.10. Wykonanie ćwiczenia**

1. Przeprowadzić obserwację przygotowanych zgładów z wykorzystaniem różnych technik badawczych.
2. Wyjaśnić różnice w obserwowanych mikrostrukturach.
3. W sprawozdaniu podać skład fazowy badanych zgładów, powiększenie mikroskopu oraz metodę wytwarzania lub zastosowanie obserwowanego materiału.