

bardziej pracochłonne, i co gorsze, przez swą szczegółowość gubią często ogólną ocenę układu.

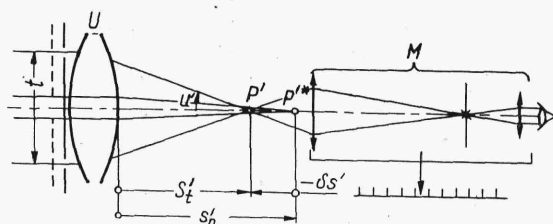
Jak wspomniano wybór metody zależy od celu. I tak w przypadku badania prototypu lub układu nieznanego powinny one być bardziej wszechstronne, a więc biorące pod uwagę również metody różnicujące. Pomiar aberracji pozwala wtedy z jednej strony porównać dane eksperymentalne z rezultatami otrzymanymi w obliczeniach, z drugiej strony, dla nieznanymi elementów, ustalić stan korekcji i potem świadomie kierować się ich doborem przy zestawianiu układu. Przy sprawdzaniu seryjnej produkcji, kiedy układ ma znaną charakterystykę wystarczy ograniczyć się do wyznaczenia kilku parametrów, które w prosty i możliwie dokładny sposób charakteryzują tylko poprawność wykonania części i prawidłowość ich montażu.

7.1. Pomiar aberracji układu

Istnieją dwie zasadnicze grupy pomiaru aberracji. Pierwsza odnosi się do wyznaczenia wielkości związanej z płaszczyzną obrazu. Będą to więc aberracje promienia lub odcinki mierzone wzdłuż osi, jak krzywizna pola, podłużna aberracja sferyczna i chromatyzm położenia, które mają bezpośredni związek z aberracjami promienia. Do drugiej grupy należą metody, które pozwalają ustalić kształt powierzchni falowej, a ściślej biorąc jej odchylenia od powierzchni falowej dla układu stygmatycznego. Obie grupy pomiarów są nawzajem równoważne, gdyż znajomość mierzonych parametrów jednej grupy pozwala na drodze analitycznej ustalić parametry drugiej.

7.1.1. Pomiar aberracji geometrycznych

W stosunkowo prosty sposób można pomierzyć aberrację dla środka pola, a więc aberrację sferyczną i chromatyczną położenia. Przed układem badany U (rys. 7.1) wstawiona jest przysłona z dwoma otworami symetrycznie rozmieszczonymi względem jego osi optycznej. Promienie wycho-



Rys. 7.1

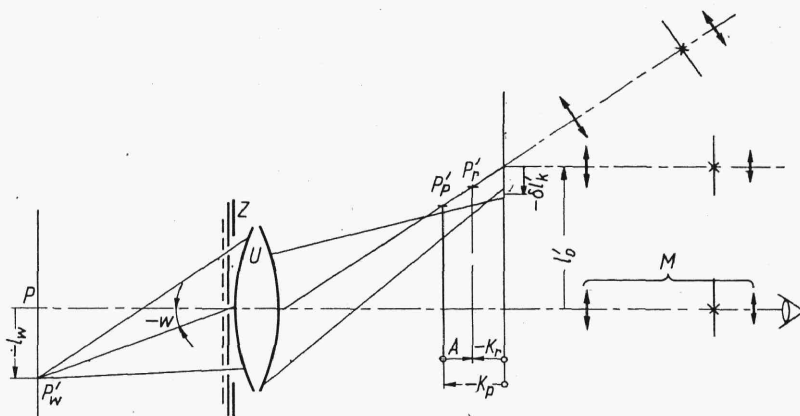
dzące z punkowego i monochromatycznego źródła światła w zależności od rozpatrywanego rozstawienia t otworów będą się przecinały w różnych odległościach S'_t od ostatniej powierzchni układu. Położenie tego przecięcia ustalone jest za pomocą mikroskopu M z mierzonym przesuwem wzdłuż osi obiektywu. Aby wyznaczyć wartości aberracji podłużnej należałoby znaleźć położenie obrazu punktu P^* w przestrzeni przyosiowej, czyli dla dostatecznie małej średnicy przysłony zaznaczonej na rysunku linią prze-

rywaną. Lecz zgodnie z p. 3.3.3 wraz ze zmniejszeniem otworu względnego układu maleje dokładność ustalenia położenia płaszczyzny obrazu i dla zbyt małej średnicy otworu staje się to praktycznie niemożliwe. Stąd wyznaczenie położenia obrazu w przestrzeni przysiosowej, a więc i ogniska obrazowego (wtedy przedmiot jest nieskończenie odległy) jest obarczone pewnym systematycznym błędem zależnym od stopnia korekcji układu wynikającym z przyjętego kompromisu między dokładnością ustalenia położenia obrazu i zgodnością z teorią przestrzeni przysiosowej.

Podobnie na drodze kompromisu wybierana jest średnica otworów strefowych w przysłonie. Z geometrycznego punktu widzenia średnice te winny być nieskończenie małe, gdyż wtedy „wydzielane” są dwa promienie definiujące dokładnie położenie punktu P' . Z uwagi na aberracje układu sąsiednie promienie mogą się przecinać już w innym punkcie. Lecz dla nieskończenie małego otworu równocześnie energia takiego promienia jest nieskończenie mała, i dodatkowo, z uwagi na zjawiska dyfrakcji, rozpostarta w całej płaszczyźnie obrazu. Dlatego dobierane są takie średnice otworów, aby były zachowane pewne proporcje między błędami wnoszonymi z jednej strony przez trudności w ustalaniu położenia plamki dyfrakcyjnej, a z drugiej przez brak precyzji w zdefiniowaniu punktu P' .

Aberracje chromatyczne mierzone są przez wyznaczenie zmian położenia punktów P' i P'^* wraz ze zmianą długości fali. Pomiar realizowany jest na drodze wymiany monochromatycznych źródeł światła.

W celu zmierzenia aberracji pozaosiowych układu badany jest obraz punktu P'_w znajdujący się poza osią (rys. 7.2). Wtedy mikroskop oprócz przesuwu wzdłuż osi optycznej układu powinien mieć również ruch mierzony w kierunku prostopadłym do niej oraz, jeżeli apertura mikroskopu jest niewystarczająca do przejścia wszystkich promieni, obrót wokół jego środka płaszczyzny przedmiotowej.



Rys. 7.2

Koma południkowa $\delta l'_k$ wtedy zgodnie z jej definicją (rys. 2.60) wyznaczona jest w płaszczyźnie Gaussa przez ustawienie w płaszczyźnie przysłony aperturowej diafragmy z trzema otworami. Na rys. 7.2 przysłona odniesiona do źrenicy wejściowej zaznaczona linią ciągłą. Astygmatyzm $K_p - K_r$ i krzywizna pola $(K_p + K_r)/2$ mierzone są przez wyznaczenie odległości K_p i K_r astygmatycznych ognisk P'_p i P'_r od płaszczyzny Gaussa.

Wówczas przysłona ma tylko jeden otwór na osi układu zaznaczony linią przerywaną o odpowiednio dobranej średnicy. Z jednej strony z uwagi na dokładność ustalenia położenia obrazów powinna być ona jak największa, z drugiej strony w celu usunięcia wpływu aberracji sferycznej i komy — jak najmniejsza.

Dystorsję określa się przez wyznaczenie odległości l'_0 śladu promienia głównego w płaszczyźnie Gaussa od osi optycznej. Zgodnie z oznaczeniami na rysunku stosunek

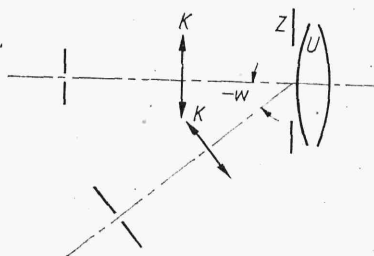
$$\beta_w = \frac{l'_0}{l_w}$$

daje powiększenie poprzeczne dla kąta pola w . Wyznaczając tę wartość dla różnych odległości l_w ustalona zostanie zmiana powiększenia wraz z kątem pola. Dla znalezienia teoretycznej wartości dystorsji powinna być znana wartość powiększenia poprzecznego w przestrzeni przysiosowej. Ponieważ jednak dokładność pomiaru β_w maleje wraz ze zmniejszeniem się odległości l_w , w związku z czym, podobnie jak i przy wyznaczaniu innych aberracji, na drodze kompromisu za wartość powiększenia układu doskonałego przyjmuje się wielkość wyznaczoną dla skończonej wartości kąta w . Można zresztą przy dokładnej analizie na podstawie zmian powiększenia poprzecznego układu dla większych kątów pola widzenia ekstrapolować jego wartości dla małych kątów.

Wygodnie jest badać dystorsję nie za pomocą jednego punktu, ale analizując obraz zbioru punktowych źródeł światła rozmieszczonych w płaszczyźnie przedmiotowej na linii prostej. Jeżeli prosta jest przesunięta poza oś optyczną, wówczas zgodnie z p. 2.6.1 obraz linii staje się zakrzywiony, skąd na drodze analitycznej z kształtu linii można ustalić wartości dystorsji dla różnych kątów pola.

Ostatnią aberrację, chromatyzm wielkości, wyznacza się z różnicy położenia śladów promienia głównego w płaszczyźnie Gaussa dla różnych długości fali.

Dla układów z płaszczyzną przedmiotową nieskończenie odległą źródło światła realizowane jest za pomocą układu kolimacyjnego, przy czym wpływ aberracji obiektywu kolimatora na mierzone aberracje układu powinien być pomijalnie mały. W celu zbadania aberracji pozaosiowych kolimator obracany jest dookoła osi przechodzącej przez środek źrenicy wejściowej układu badanego (rys. 7.3). Można również zastosować układ

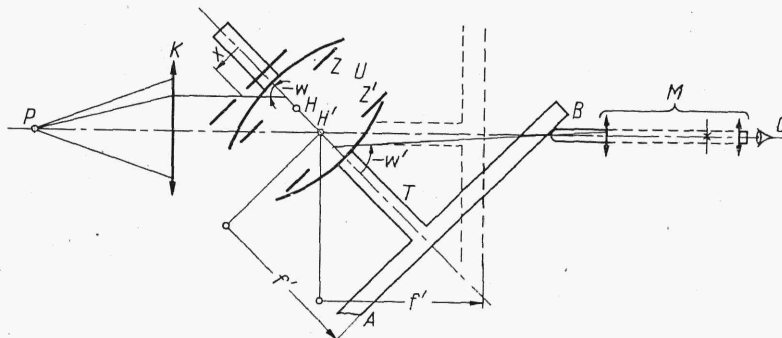


Rys. 7.3

kolimatorów ustawionych pod różnymi kątami w do osi. Takie rozwiązanie jest szczególnie korzystne przy pomiarze dystorsji, gdyż wtedy istotna jest dokładna znajomość kąta w , który można uprzednio wyznaczyć za po-

mocą teodolitu. Teoretycznie zamiast kilku kolimatorów można byłoby zastosować jeden kolimator szerokokątny z odpowiednio rozmieszczonymi w jego przestrzeni przedmiotowej punktowymi źródłami światła, konstrukcja takiego układu z wysuniętą źrenicą i odpowiednio skorygowanymi aberracjami jest jednak technicznie trudna do realizacji.

Gdy przedmiot jest nieskończenie odległy zamiast kolimatora można również obracać badany układ. Zakładając, że średnica obiektywu kolimatora K (rys. 7.4) jest dostatecznie duża, aby cała źrenica wejściowa Z



Rys. 7.4

układu była jednorodnie oświetlona dla każdego kąta pola w , wówczas najwygodniej jest dobrać oś obrotu przechodzącą przez główny punkt obrazowy H' układu badanego. Gdyby układ był pozbawiony dystorsji, wówczas promień główny, niezależnie od kąta w będzie przecinał płaszczyznę ogniskową obrazową układu badanego na osi $H'O$. W związku z tym warunek położenia punktu H' na osi obrotu sprawdza się obserwując ślad promienia głównego w płaszczyźnie obrazu przy obrocie układu o odpowiedni mały kąt, dla którego można założyć, że wpływ dystorsji jest pomijalnie mały. Brak poprzecznych przesunięć śladu promienia obserwowanego przez mikroskop M świadczy o jego spełnieniu. Zwraca się uwagę, że kąt obrotu nie może być zbyt mały, gdyż wtedy zmniejsza się dokładność sprawdzenia wspomnianego warunku.

Dla ułatwienia pomiarów badany obiektyw montuje się na podstawie w kształcie litery T (rys. 7.4). Do poprzecznego ramienia AB podstawy dociskana jest w kierunku wzdłużnym karetki z mikroskopem M . Jeżeli płaszczyzna ogniskowa obrazowa badanego obiektywu pokrywa się z płaszczyzną styku AB i płaszczyzna przedmiotowa mikroskopu M przechodzi przez punkt styku karetki mikroskopu i podstawy T , wówczas przez mikroskop obserwowana będzie płaszczyzna ogniskowa obrazowa badanego obiektywu. Zakłada się przy tym, że poprzeczne ramie jest prostoliniowe i wpływ zaokrąglenia styku karetki jest pomijalnie mały. Konieczność obserwowania śladu promienia głównego w tej płaszczyźnie jest o tyle istotna, że źrenica wyjściowa obiektywu zwykle nie pokrywa się z płaszczyzną główną obrazową i wtedy, gdyby nawet nie było dystorsji, to promień główny nie pokrywa się z osią $H'O$, a tylko przecina ją w płaszczyźnie ogniskowej obrazowej.

Istota pomiarów aberracji zarówno przy obracanym obiektywie, jak i ruchomym przedmiocie (rys. 7.2 i 7.3) pozostaje ta sama i została już omówiona poprzednio. Różnica polega tylko na kierunku pomiarów aberracji. Przykładowo komę południkową czy chromatyzm powiększenia,

zgodnie z rys. 7.4, wyznacza się w płaszczyźnie AB . Ponieważ mikroskop ma ruchy pomiarowe na karetkie w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do swojej osi, stąd istnieje potrzeba odpowiedniego przeliczenia wartości mierzonych. Łatwiej natomiast ustalić jest tu wartość dystorsji, której miarą jest przesuw śladu promienia głównego w płaszczyźnie AB przy obrocie obiektywu o kąt przekraczający zakres regulacji położenia punktu głównego H' na osi obrotu obiektywu.

Ogólnie biorąc oś obrotu obiektywu nie musi się pokrywać z jego obrazowym punktem głównym H' . Wystarczy jeżeli znana jest z dostateczną dokładnością odległość osi obrotu badanego obiektywu od jego płaszczyzny ogniskowej obrazowej. Naprowadzenie punktu głównego obiektywu na jego oś obrotu z jednej strony nosi charakter tego pomiaru, z drugiej upraszcza pomiar dystorsji.

Opisane tu metody pomiaru pozwalają ustalić wpływ poszczególnych aberracji układu, nazywanych również *aberracjami Seidla*, na jakość odwzorowania. Ich zaletą jest ścisła korelacja z parametrami wyznaczonymi w czasie obliczeń. Pomiaru te są jednak pracochłonne, a poza tym dla aberracji pozaosiowych kłopotliwe, gdyż źrenice w obiektywach są najczęściej pozorne. Ponieważ przysłony można dostawiać na zewnątrz obiektywu wówczas dla wydzielenia promienia przechodzącego przez ustalony punkt źrenicy, np. promienia głównego, trzeba programować dla każdego kąta pola przesuw x otworu (rys. 7.4) poza oś optyczną. Dodatkową trudność przy pomiarze powoduje winietowanie geometryczne. Podobnie jak przy obliczeniach należy odtworzyć kształt źrenicy wejściowej, a więc przedział wartości $x(x_a, x_b)$, dla którego światło dochodzi do płaszczyzny obrazu. Położenie otworu przysłony ustalającego przebieg promienia głównego wyznaczane jest przez $x_g = (x_a + x_b)/2$.

Jeżeli znalezienie korelacji z obliczeniami jest mniej ważne, a chodzi głównie o wyznaczenie ostatecznych zniekształceń obrazu wnoszonych przez układ, np. dystorsji lub krzywizny pola, wówczas pomiary układu należy wykonywać bez przysłaniania części źrenicy, które poprzednio miało na celu izolowanie wpływów poszczególnych aberracji *Seidla*. Ponadto źródło światła nie powinno być monochromatyczne, a rozkład widmowy emitowanego światła powinien być dopasowany do warunków pracy danego układu. Powodem tego jest nakładanie się na siebie wpływów różnych aberracji. Na dystorsję układu w sensie ogólnym, a więc zakrzywienie obrazu linii prostej w polu widzenia, składa się nie tylko dystorsja *Seidla*, określana jako przesunięcie śladu promienia głównego względem obrazu wyznaczonego z praw optyki przyosiowej, ale także koma i chromatyczne zmiany kształtu plamki w polu. Dotyczy to między innymi chromatyzmu wielkości, ponieważ położenie obrazu punktu w płaszczyźnie odbiornika określane jest przez środek „ciężkości” reakcji odbiornika dla tego obrazu.

Tak przedstawione rozwiązanie jest poprawne dla odbiorników dających tylko reakcję ilościową, a więc takich jak fotoodbiorników, czy emulsji czarno-białej. Zagadnienie komplikuje się jeszcze bardziej, gdy odbiornikiem jest oko lub emulsja barwna, kiedy nakłada się jeszcze oprócz rozkładu intensywności, zróżnicowanie obrazu punktu pod względem barwnym.

W podobnie złożony sposób można rozważać i krzywiznę pola, która ponadto będzie funkcją charakteru winietowania i kryterium wyboru płaszczyzny najlepszego odwzorowania.

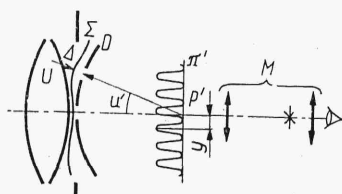
Podsumowując zagadnienia pomiaru aberracji geometrycznych, wydaje się dostatecznie uzasadnione stwierdzenie, że jakość odwzorowania obrazu punktu, czy zbioru punktów, w tym również dystorsji i krzywizny pola rozumianych w ogólnym sensie, a nie jako wyizolowanych aberracji *Seidla*, nie jest wielkością związaną tylko z układem optycznym, ale również zależy od źródła światła (w tym przypadku od rozkładu widmowej emitowanej energii) i od zastosowanego odbiornika (od jego czułości widmowej, liniowości reakcji i ziarnistości).

W niniejszym punkcie przedstawiono tylko zasady pomiaru aberracji geometrycznych. Na ich podstawie zostały opracowane bardziej kompleksowe metody (Hartmana, Wetthauera) pozwalające przyspieszyć sam proces pomiaru [4], [5].

7.1.2. Pomiar aberracji falowych

Do pomiaru aberracji falowych powszechnie wykorzystywane są zjawiska interferencji.

Na rys. 7.5 pokazano jedną z metod, po raz pierwszy zastosowaną przez *Michelsona*. Niech Σ będzie aberracyjnym czołem fali dla ustalonego punkowego przedmiotu świecącego światłem monochromatycznym.



Rys. 7.5

π' jest płaszczyzną odbiornika obserwowaną za pomocą mikroskopu M . Wyznaczenie odchylenia kształtu fali Σ od sfery ze środkiem w punkcie P' można przeprowadzić przez badanie układu prążków powstających w płaszczyźnie π' przy przesłonięciu źrenicy przysłoną D z dwoma otworami. Przykładowo rozkład intensywności w płaszczyźnie π' zaznaczono symbolicznie w kładzie. Aberracja falowa Δ powoduje powstanie różnicy fazowej $2\pi\Delta/\lambda$ między promieniami wychodzącymi z obydwu otworów i interferującymi w punkcie P' . Jeżeli jeden z otworów np. środkowy ma stałe położenie, natomiast drugi jest przemieszczany w źrenicy, wówczas wraz ze zmianą Δ następuje zmiana położenia centralnego prążka i jego przemieszczenia w polu widzenia mikroskopu. Odległość y jest miarą aberracji falowej dla danego kąta u' . Można wykazać, że dla małego kąta u'

$$\Delta = yu'$$

Wadą tej metody jest badanie kształtu fali kolejno punkt po punkcie i dlatego, mimo prostoty urządzenia, większe zastosowanie znalazł interferometr *Twymana-Greena* (rys. 7.6) pozwalający wyznaczyć jednocześnie zniekształcenie czoła fali w całej źrenicy. Sposób działania i pomiaru interferometru opisany został w p. 3.2.9, tu zwrócona zostanie tylko uwaga na pewne aspekty związane z badaniem układów optycznych.

Gdyby układ badany U był bezaberracyjny wówczas czoło fali Σ dla punkowego źródła światła byłoby sferyczne i jeżeli środek sfery Σ po-