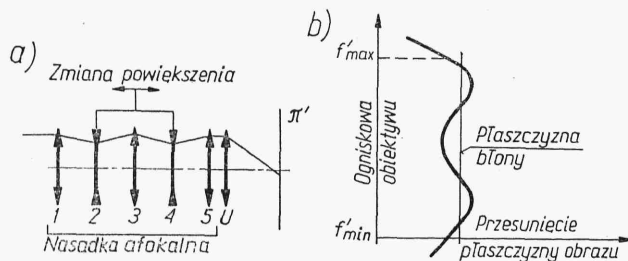


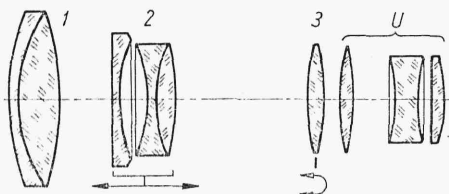
Przed obiektywem U którego ognisko obrazowe pokrywa się z płaszczyzną emulsji π' znajduje się *nasadka afokalna*, której powiększenie zmienne jest za pomocą wspólnego przesuwu elementów 2 i 4. Dla przedmiotu leżącego w nieskończoności afokalność takiej nasadki jest możliwa tylko dla skończonej liczby położeń i wtedy obraz dokładnie pokrywa się



Rys. 5.55

z płaszczyzną odbiornika. W pozostałych przedziałach występuje pewne przesunięcie obrazu zilustrowane wykresem w prawej części rysunku. Maksymalna wielkość przesunięcia będzie rosła wraz ze wzrostem przedziału zmian powiększenia nasadki i należy tak dobrać rozstawienie poszczególnych elementów, ich moce oraz przedział zmian ogniskowej, aby przesunięcie obrazu nie wykraczało poza określoną wielkość. Jest to przykład układu z kompensacją optyczną.

Ruchome elementy układu mogą mieć również przesuwu niezależne, przykładem czego jest obiektyw Angenieux (rys. 5.56). Wraz ze zmianą



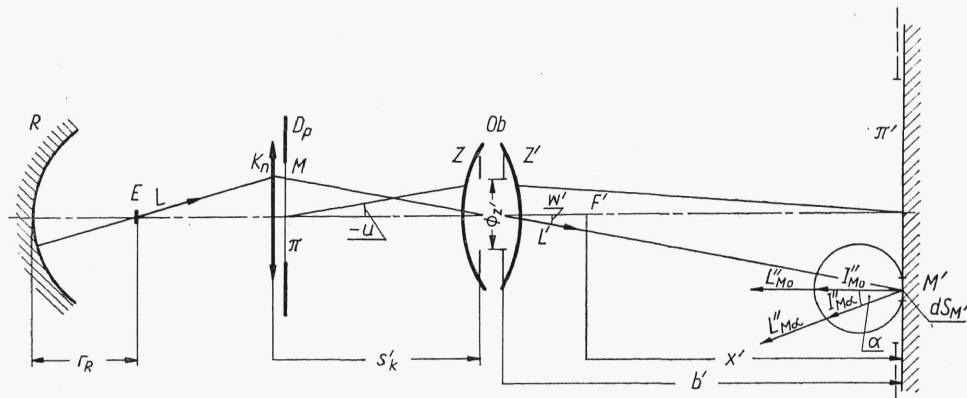
Rys. 5.56

ogniskowej przy jednokierunkowym ruchu elementu 2 występuje złożony (ze zwrotem) przesuw elementu 3 za pomocą krzywki. Jest to przykład kompensacji mechanicznej, przy której w porównaniu z kompensacją optyczną, układy mają mniejszą liczbę elementów i większy przedział zmian ogniskowych sięgający 4–8 razy (optycznie 3–6), natomiast wymagają one precyzyjniejszego wykonania części mechanicznych. Kształty elementów optycznych pokazane na rys. 5.56 wynikają z warunków korekcyjnych aberracji. W przypadku przedmiotów położonych na skończonych odległościach w jednym i drugim przypadku ogniskowanie wykonywane jest przesuwem elementu 1.

5.4.2. Układy projekcyjne

Układy projekcyjne można podzielić na *diaskopowe* i *episkopowe*. Pierwsze wykorzystują światło przechodzące przez przedmiot, którego obraz jest odwzorowywany na ekranie (na przykład projektor filmowy, powiększalnik) drugie — światło odbite (episkop).

Najbardziej typowy układ projekcyjny dla światła przechodzącego pokazano na rys. 5.57. Obraz źródła światła E jest odwzorowany za pomocą kondensora K_n w żrenicy wejściowej Z obiektywu, natomiast obraz oświetlonej płaszczyzny przedmiotu π na płaszczyźnie ekranu π' . Przysłona pola w układzie jest zwykle przysłoną leżącą w płaszczyźnie przedmiotu, oznaczoną tu przez D_p dzięki czemu luka wyjściowa znajduje się w płaszczyźnie ekranu i ostro ogranicza pole projektowanego obrazu.



Rys. 5.57

Najważniejszym parametrem w układzie projekcyjnym, obok powiększenia, jest natężenie oświetlenia obrazu. W celu wyznaczenia go niech dla prostoty luminancja źródła E będzie stała, a więc niezależna od rozpatrywanego kąta (źródło świeci zgodnie z prawem *Lamberta*) oraz rozpatrywanego punktu w całym obszarze źródła. Ponieważ obraz źródła dany przez kondensor i obiektyw znajduje się w żrenicy wyjściowej Z' obiektywu, to zgodnie z wyrażeniem (2.147) jego luminancja L' wyniesie

$$L' = \tau_{ko} \tau_p L \quad (5.43)$$

gdzie:

τ_{ko} — współczynnik przepuszczania łącznie kondensora i obiektywu,

τ_p — współczynnik przepuszczania przedmiotu.

Zakłada się przy tym, że obydwa współczynniki z wystarczającą dokładnością są stałe w rozpatrywanym przedziale widma i stąd zależność (5.43) zapisana jest dla wielkości fotometrycznych.

Jeżeli bezwzględna wartość powiększenia obiektywu $|\beta|$ między sprzężonymi płaszczyznami π i π' jest znacznie większą niż 1, wówczas średnica żrenicy wyjściowej $\Phi_{z'}$ obiektywu jest również znacznie mniejsza od jej odległości b' od ekranu i obiektyw można uważać za źródło quasipunktowe charakteryzując go zgodnie z zależnością (2.135) przez światłość zależną od kąta pola

$$I'_{w'} = L' \Delta Z' \cos w' \quad (5.44)$$

Przez $\Delta Z'$ należy rozumieć tu powierzchnię obrazu źródła światła E w płaszczyźnie żrenicy wyjściowej Z' . Jeżeli obraz ten, będzie większy od żrenicy wyjściowej obiektywu wówczas Z' będzie powierzchnią samej żrenicy wyjściowej obiektywu, a przysłona aperturowa całego układu będzie przysłoną aperturową obiektywu. Gdy obraz źródła jest mniejszy od żre-

nicy wyjściowej, to z punktu widzenia energetycznego przysłoną aperturową układu jest źródło światła i źrenicą wyjściową jest jego obraz dany przez kondensor K_n i obiektyw Ob . Można wtedy powiedzieć, że obiektyw został zaprojektowany ze zbytecznym nadmiarem, albo konstrukcja kondensora nie wykorzystuje możliwości jakie daje obiektyw.

Niech przez $\Phi_{z'}$ oznaczona będzie średnica źrenicy wyjściowej układu projekcyjnego, wtedy równanie (5.44) przyjmie postać

$$I'_{w'} = L' \frac{\pi \Phi_{z'}^2}{4} \cos w' \quad (5.45)$$

Uwzględniając zależności (2.131) oraz (5.43) natężenie oświetlenia w punkcie M' pochodzące od źródła o światłości $I'_{w'}$ wyniesie

$$E'_M = \frac{\pi \Phi_{z'}^2}{4b'^2} L \tau_{ko} \tau_p \cos^4 w' \quad (5.46)$$

Jeżeli F' jest ogniskiem obrazowym obiektywu, to ponieważ $|\beta| \gg 1$ wówczas można przyjąć

$$\beta = -\frac{x'}{f'_{ob}} \approx -\frac{b'}{f'_{ob}} = -\frac{b'}{N\Phi_{z'}} \quad (5.47)$$

gdzie f'_{ob} — ogniskowa obiektywu

$$N = \frac{f'_{ob}}{\Phi_{z'}} \text{ — liczba otworu układu}$$

a więc

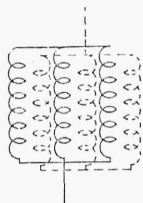
$$E'_M = \frac{\pi}{4} \tau_{ko} \frac{L}{(N\beta)^2} \tau_p \cos^4 w' \quad (5.48)$$

Zwraca się uwagę, że we wzorze (5.48) przez 1.: N należy rozumieć otwór względny układu, który tylko wtedy pokrywa się z otworem względnym obiektywu Ob jeżeli obraz źródła światła E o luminancji L wypełnia całkowicie przysłoną aperturową obiektywu.

Pomijając chwilowo wpływ przedmiotu i kąta pola w' , ze wzoru (5.48) wynika, że natężenie oświetlenia ekranu będzie tym większe, im wyższy jest współczynnik przepuszczania układu optycznego τ_{ko} , wyższa luminancja źródła światła L , większy otwór względny układu 1.: N oraz mniejsze powiększenie $|\beta|$ między przedmiotem a obrazem. Na otwór względny układu wpływają trzy elementy: obiektyw, kondensor oraz wymiar źródła światła; stąd ich parametry powinny być wzajemnie dopasowane. Naturalnie im wyższy otwór względny obiektywu, tym większe możliwości ma układ projekcyjny pod względem energetycznym, ale będą one dopiero wtedy wykorzystane, jeżeli obraz źródła światła dany przez kondensor pokryje całą powierzchnię przysłony aperturowej obiektywu. Po spełnieniu tego warunku, dalsze zwiększenie powiększenia poprzecznego kondensora, o ile luminancja źródła jest stała, nie daje wzrostu natężenia oświetlenia w płaszczyźnie ekranu.

Zagadnienie jest bardziej złożone, gdy luminancja nie jest stała i np. zależy od rozpatrywanego punktu źródła światła. Z takim przypadkiem mamy do czynienia przy żarowych źródłach światła, kiedy żarnik jest w postaci układu skrętek (rys. 5.58). Luminancja samej skrętki zawiera się między 15—35 Mnt (zależnie od temperatury), natomiast w obszarze

między skrętkami $L = 0$. Z teoretycznego punktu widzenia, gdyby można było zbudować kondensator o takim powiększeniu, aby sam obraz skrętki pokrywał całą przysłonę aperturową obiektywu, wówczas spełniałby on dla danego obiektywu optymalne warunki świetlne. Z uwagi na ograniczoną odległość s'_k źrenicy wejściowej obiektywu od kondensatora przy ustalonym wymiarze przysłony pola D_p , również ograniczone jest powiększenie poprzeczne kondensatora i stąd konieczność stosowania źródeł o dość znacznych nieraz wymiarach żarnika i wtedy przez L we wzorze (5.48) rozumie

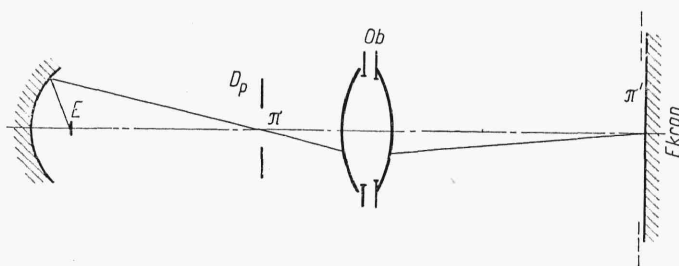


Rys. 5.58

się wartość uśrednioną dla całej jego powierzchni. W celu podwyższenia wartości średniej z tyłu źródła dostawione jest zwierciadło sferyczne R o promieniu r_R (rys. 5.57) ze środkiem krzywizny leżącym w płaszczyźnie E . Wówczas obraz źródła dany przez promienie odbite od zwierciadła tworzy się również w płaszczyźnie źródła, przy czym tak dobierane jest położenie środka krzywizny, aby obraz odbity wypełnił wolne miejsce między skrętkami (rys. 5.58).

Zmianę natężenia oświetlenia ekranu wraz z kątem pola we wzorze (5.48) opisują dwa czynniki: τ_p i $\cos^4 w'$. Czynniki ostatni jest zgodny z prawem naturalnego winietowania (2.153). Zmiana współczynnika przepuszczania τ_p przedmiotu wraz z kątem pola w' będzie elementem, który utworzy w płaszczyźnie ekranu strukturę obrazu.

Jeżeli w układzie projekcyjnym średnica źrenicy wejściowej obiektywu jest znacznie większa od średnicy przysłony pola, wówczas łatwiej jest zrealizować układ, w którym obraz źródła światła jest odwzorowany w płaszczyźnie projektowanego przedmiotu. Jest to typowy przypadek projekcji filmowej i schemat takiego układu z asferycznym kondensorem zwierciadlanym pokazany jest na rys. 5.59. Pod względem wydajności świetlnej



Rys. 5.59

przy tych samych otworach względnych obiektywów i właściwym dobraniu parametrów kondensatorów obydwa układy (rys. 5.57 i 5.59) są równoważne.

Wadą projektowania źródła w płaszczyznę przedmiotu jest konieczność stosowania źródeł o stałej luminancji na całej powierzchni zapewniających jednorodne oświetlenie całego przedmiotu.

W celu umożliwienia obserwowania obrazu przez pewną grupę osób, strumień padający na dostatecznie małe elementy powierzchni ekranu powinien zostać rozproszony w taki sposób, aby z każdego z nich, będącego quasipunktowym źródłem światła, docierała do obserwatorów odpowiednia część energii. Jest to sformułowanie podstawowej zasady pracy ekranu. Charakterystyka rozproszenia zależy od rozmieszczenia osób względem ekranu może być bardzo różna. Rozpatrzmy najpierw przykład ekranu odbiciowego, który rozprasza światło zgodnie z prawem *Lamberta*. Zaletą takiego ekranu jest niezależność luminancji poszczególnych elementów obrazu od kierunku patrzenia. Celem naszym jest wyznaczenie zależności między luminancją L_M'' światła odbitego od ekranu i natężeniem światła E_M' padającego na ekran. Niech powierzchnia elementu ekranu wokół punktu M' (rys. 5.57) wynosi $dS_{M'}$, wówczas strumień nań padający Φ_M'

$$\Phi_M' = E_M' dS_{M'} \quad (5.49)$$

Oznaczając przez ϱ współczynnik odbicia ekranu równy z definicji stosunków strumienia odbitego Φ_M'' do padającego Φ_M' wówczas

$$\Phi_M'' = \varrho \Phi_M' = \varrho E_M' dS_{M'} \quad (5.50)$$

Jest to strumień, który zostaje rozproszony w kącie bryłowym półsfery. Zgodnie z zależnością (2.135) luminancja w dowolnym kierunku tworzącym kąt α z normalną do ekranu wyniesie

$$L_{M\alpha}'' = \frac{d\Phi_M''}{dS_{M'} d\omega \cos \alpha} = \frac{I_{M\alpha}''}{dS_{M'} \cos \alpha}$$

gdzie $I_{M\alpha}''$ — jest światłością całego elementu w tym samym kierunku.

Jeżeli przez I_{M0}'' oznaczona będzie światłość w kierunku normalnym, to z prawa *Lamberta* (2.121) $I_{M\alpha}'' = I_{M0}'' \cos \alpha$, a więc

$$L_M'' = \frac{I_{M0}''}{dS_{M'}} \quad (5.51)$$

dla dowolnego kąta α .

Pozostaje jeszcze do wyznaczenia zależność między I_{M0}'' i Φ_M'' . Zgodnie ze wzorem (2.133)

$$\Phi_M'' = \int_{\Omega} I_{M\alpha}'' d\omega = \int_0^{2\pi} d\Theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{M\alpha}'' \sin \alpha d\alpha$$

gdzie Θ jest kątem azymutalnym. Elementarny kąt bryłowy $d\omega = \sin \alpha d\alpha d\Theta$. Znak Ω oznacza, że całkowanie przeprowadzone jest po półsfery. Po podstawieniu zależności *Lamberta* i scałkowaniu otrzymuje się

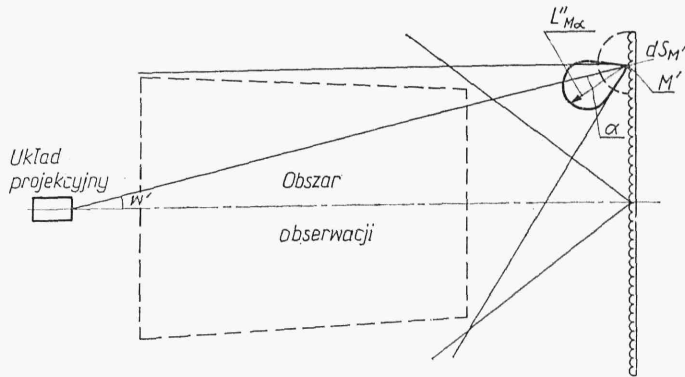
$$\Phi_M'' = \pi I_{M0}'' \quad (5.52)$$

Uwzględniając wyrażenia (5.50a), (5.51) oraz (5.52) ostatecznie pozostanie

$$L_M'' = \varrho \frac{E_M'}{\pi} \quad (5.53)$$

Jeżeli na ekran o lambertowskiej charakterystyce rozproszenia i współczynniku odbicia ρ pada światło o natężeniu oświetlenia $E'_M(lx)$, to jego luminancja $L''_M(nt)$ wyrażona jest zależnością (5.53).

Najczęściej obraz obserwowany jest z ograniczonego obszaru zaznaczonego przykładowo na rys. 5.60 linią przerywaną (dla prostoty rozważania prowadzone są tylko w jednym z przekrojów) i ze względów energetycznych najwłaściwszym rozwiązaniem jest zastosowanie ekranu o takiej charakterystyce rozproszenia, aby z każdego elementu $dS_{M'}$ światło docierało tylko do wspomnianego obszaru.



Rys. 5.60

Dla wygody przez analogię do wyrażenia (5.53) zależność między luminancją $L''_{M\alpha}$ światła odbitego i natężeniem oświetlenia E'_M światła padającego opisana jest również wzorem

$$L''_{M\alpha} = \varrho_{M\alpha} \frac{E'_M}{\pi} \quad (5.54)$$

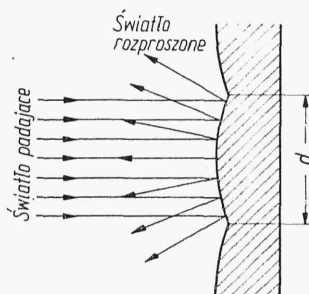
przy czym wtedy $\varrho_{M\alpha}$ i $L''_{M\alpha}$ są funkcjami kąta α i położenia rozpatrywanego elementu na ekranie. Współczynnik $\varrho_{M\alpha}$ nosi nazwę *współczynnika wzmocnienia ekranu* i dla wybranych kierunków może on przybierać wartości większe od 1, natomiast dla pozostałych być bliski zeru. Współczynnik ten wskazuje na zmianę luminancji ekranu dla danego elementu $dS_{M'}$ i kąta α , w stosunku do luminancji ekranu o rozproszeniu lambertowskim i współczynniku odbicia $\rho = 1$.

Jedną z możliwości konstrukcyjnego rozwiązania ekranu pokazano na rys. 5.60, kiedy złożony on jest z uporządkowanego zbioru pewnych elementów odbijających. Zasadę pracy jednego z elementów wyjaśniono na rys. 5.61. Wymiar d powinien być tak mały, aby mikrostruktura ekranu była niezauważalna z obszaru obserwacji i wtedy element uważany jest przez obserwatora za quasipunktowe źródło światła. Kształt elementu zależy od charakterystyki rozproszenia i teoretycznie powinien się zmieniać wraz z jego położeniem na ekranie. Ze względu na trudności wykonawcze zwykle pozostaje on niezmienny i dla poprawienia charakterystyki rozproszenia, a szczególnie osiągnięcia dla poszczególnych obserwatorów odpowiedniej równomierności rozkładu luminancji obrazu na całym ekranie wprowadza się pewne wygięcie ekranu.

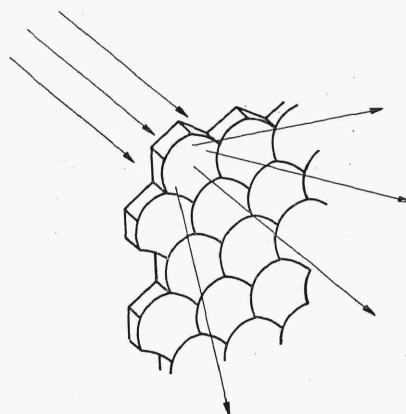
W celu wykazania w sposób poglądowy korzyści wynikających z zastosowania ekranów o kierunkowej charakterystyce rozproszenia, na rys. 5.60

narysowano linią przerywaną rozkład luminancji przy rozproszeniu lambertowskim ($L = \text{const}$), a linią ciągłą przykładowy rozkład o rozproszeniu kierunkowym.

Oprócz ekranów typu odbiciowego istnieją również *ekrany przepuszczające światło*. Kształt jednego elementu takiego ekranu i zasadę pracy pokazano na rys. 5.62.



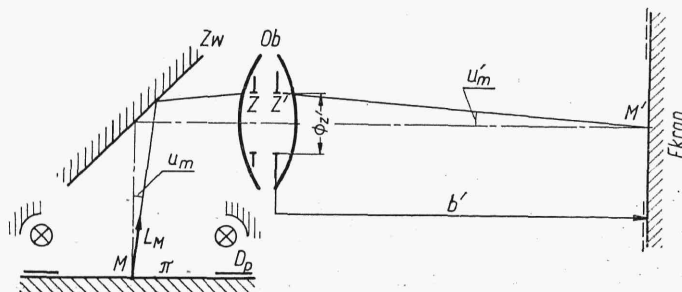
Rys. 5.61



Rys. 5.62

Podstawowe rozważania dotyczące zagadnień rozproszenia niczym się nie różnią od wyżej przytoczonych, z tym, że w miejsce współczynnika odbicia we wzorze (5.53) wprowadzony jest współczynnik przepuszczania. Wzór (5.54) i definicja współczynnika wzmocnienia pozostają bez zmiany.

Na zakończenie punktu dotyczącego układów projekcyjnych zostanie omówiona zasada pracy episkopu. Typowy jego układ optyczny pokazano na rys. 5.63. Płaszczyzna π nieprzezroczystego przedmiotu, np. ilustracja



Rys. 5.63

z książki, oświetlona jest przez z boku ustawione źródła z reflektorami zwierciadlanymi w taki sposób, aby uzyskać w jego płaszczyźnie na obszarze czynnym przysłony pola D_p odpowiednio duże i w przybliżeniu stałe natężenie oświetlenia E_M . W przypadku stosowania ekranu odbiciowego zwierciadło płaskie Z_w pozwala uzyskać prosty obraz w obu płaszczyznach południkowych (p. 5.2.4).

Ustalona zostanie obecnie zależność między natężeniami oświetlenia E'_M obrazu (w płaszczyźnie ekranu) i przedmiotu E_M , przy czym dla prostoty pominie się tu poprzednio już wyznaczony wpływ winietowania natural-

nego. Światło padające na płaszczyznę przedmiotu zostanie przez nią rozproszone i niech rozproszenie będzie zgodne z prawem *Lamberta*, co jest dość dobrą aproksymacją np. dla papieru matowego. Oznaczając przez ϱ_M współczynnik odbicia przedmiotu w punkcie M , to zgodnie z wyrażeniem (5.53) luminancja przedmiotu w tym punkcie wyniesie

$$L_M = \varrho_M \frac{E_M}{\pi} \quad (5.55)$$

Ponieważ $L_M = \text{const}$ dla danego punktu M , to zgodnie z wzorami (2.149) i (5.55) ostatecznie

$$E'_M = \tau \varrho_M \frac{\sin^2 u_m}{\beta^2} E_M \quad (5.56)$$

gdzie:

- $\tau = \varrho_z \tau_{ob}$ jest współczynnikiem przepuszczania układu projekcyjnego uwzględniającym straty przy odbiciu na zwierciadle ϱ_z i przy przejściu światła przez obiektyw τ_{ob} ,
- β — powiększenie poprzeczne obiektywu,
- u_m — maksymalny kąt aperturowy przestrzeni przedmiotowej.

Wartość E'_M można również uzależnić od otworu względnego $1:N$ obiektywu. Zakładając, że $|\beta| \gg 1$, wówczas kąt u'_m (rys. 5.63) jest mały i łącznie z (5.47) otrzymuje się

$$\sin u'_m \approx \text{tg } u'_m = \frac{\Phi_{z'}}{2b'} = \frac{1}{2N\beta}$$

Korzystając z zależności (2.148c) i (5.55) dla $n = n'$ ostatecznie pozostanie

$$E'_M = \frac{\tau \varrho_M}{4} \frac{E_M}{(N\beta)^2} \quad (5.57)$$

Wzrost natężenia oświetlenia E'_M obrazu w płaszczyźnie ekranu wiąże się ze wzrostem natężenia oświetlenia płaszczyzny przedmiotu i otworu względnego $1:N$ obiektywu oraz zmniejszeniem powiększenia β między obrazem a przedmiotem. Zmiana współczynnika ϱ_M przedmiotu wraz z położeniem punktu M tworzy strukturę obserwowanego obrazu.

Literatura

1. *Szymoński J.*: Instrumentoznawstwo geodezyjne, t. II. Warszawa 1956. PPWK.
2. *Brouwer W.*: Matrix Methods in Optical Instruments Design. New York 1964. W. A. Benjamin.
3. *Kingslake R.*: Applied Optics and Optical Engineering, t. III. New York 1965. Academic Press.
4. *Кравков С. В.*: Глаз и его работа. Москва 1950. Изд. Академии Наук СССР.
5. *Clark George L.*: The Encyclopedia of Microscopy. New York 1961. Reinhold Publishing Corporation.
6. *Pluta M.*: Mikroskopia fazowo-kontrastowa i interferencyjna. Warszawa 1965. PWN.
7. *Appel L., Kowalczyk R.*: Mikroskop, budowa i użytkowanie. Warszawa 1966. WNT.
8. *Stüper J.*: Die wissenschaftliche und angewandte Photographie, t. II. Die photographische Kamera. Wien 1962, Springer Verlag.
9. *Weise H.*: Die wissenschaftliche und angewandte Photographie. t. III. Die kinematographische Kamera. Wien 1955. Springer Verlag. (tłum. na ros.).
10. *Flügge J.*: Die wissenschaftliche und angewandte Photographie. t. I. Das Photographische Objektiv. Wien 1955. Springer Verlag.
11. *Flügge S.*: Encyclopedia of Physics, t. XXIX. Optical Instruments. Berlin 1967. Springer Verlag.