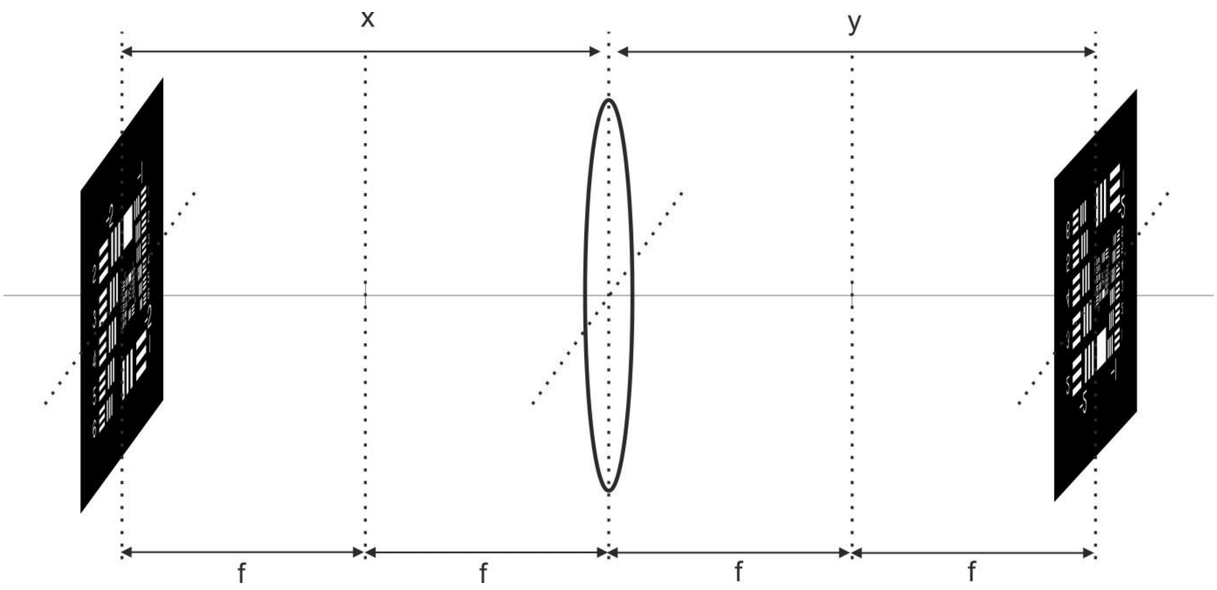
Ćwiczenie 15

Obrazowanie.

Celem ćwiczenia jest zbudowanie układów obrazujących w świetle monochromatycznym oraz zaobserwowanie różnic w przypadku obrazowania za pomocą różnych elementów optycznych, zwracając szczególną uwagę na ich głębię ostrości.

Układy obrazujące

Jest wiele układów obrazujących, które formują obraz rzeczywisty przedmiotu z powiększeniem równym 1. Najprostszym układem tego typu jest tzw. układ 2f-2f, w którym wykorzystuje się pojedynczą cienką soczewkę skupiającą o znanej ogniskowej f. Schemat układu przedstawia Rys. 1. Obraz powstaje odwrócony.



Rys. 1 – Schemat układu obrazującego 2f-2f

W celu osiągnięcia powiększenia jednostkowego istotne jest, by zarówno przedmiot (przeźrocze z matówką), jak i płaszczyzna macierzy światłoczułej znajdowały się w odległości równej podwójnej ogniskowej soczewki, według równania soczewki:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

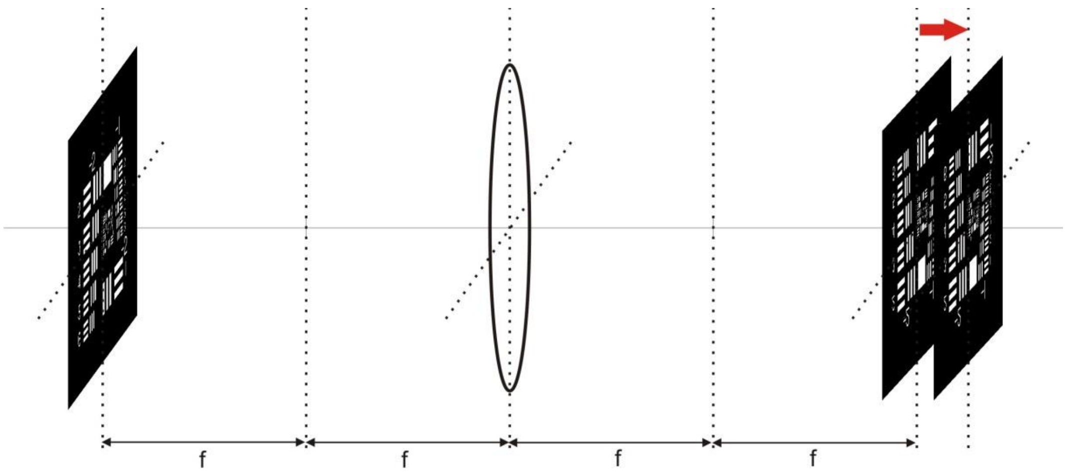
oraz:

$$\frac{y}{x}=1, \tag{2}$$

a więc:

$$x=y=2f. \tag{3}$$

W praktyce układ zestawiony „na ostro”, czyli z rozogniskowaniem równym 0, pozwala na uzyskanie obrazu ostrego, lecz rozmytego ze względu na skończoną aperturę elementu obrazującego (czyli soczewki). W przypadku układu rozogniskowanego płaszczyzna akwizycji obrazu rzeczywistego jest przesunięta wzdłuż osi optycznej układu (tak, jak pokazuje Rys. 2).



Rys. 2 – Schemat układu obrazującego 2f-2f z rozogniskowaniem

Obraz uzyskany w takim układzie będzie nieostry. Wielkość rozogniskowania układu można wyrazić liczbowo przy użyciu parametru w_{20}, zdefiniowanego według poniższych zależności:

$$\varepsilon = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} - \frac{1}{f}, \tag{4}$$

oraz

$$w_{20} = \frac{\varepsilon \cdot d^2}{8\lambda}, \tag{5}$$

gdzie:

x – odległość przedmiotowa,
y – odległość obrazowa,
f – ogniskowa soczewki,
d – średnica soczewki,
λ – długość fali światła.

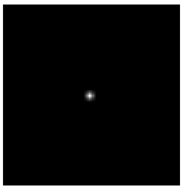
Odpowiedź impulsowa układu

Odpowiedź impulsową układu można zdefiniować, jako obraz punktowego źródła światła uzyskany w badanym układzie obrazującym. W rzeczywistych układach optycznych odpowiedź impulsową można zbadać poprzez umieszczenie w płaszczyźnie przedmiotowej quasi-punktowego źródła światła takiego, jak pinhola. Drugim sposobem jest użycie soczewki skupiającej dobrej jakości i wypozycjonowanie jej tak, aby ognisko znalazło się w płaszczyźnie przedmiotowej badanego układu obrazującego.
Można powiedzieć, że liniowy układ optyczny przy oświetleniu quasi-monochromatycznym i koherentnym przestrzennie jest liniowy ze względu na zespoloną amplitudę. Układ taki opisujemy przez podanie odpowiedzi impulsowej układu h, która jest funkcją zespoloną.
Natomiast liniowy układ optyczny oświetlony światłem quasi-monochromatycznym i niekoherentnym przestrzennie jest układem liniowym ze względu na natężenie światła.

Wtedy opisujemy go za pomocą funkcji rozmycia punktu (czyli z ang. PSF – Point Spread Function).

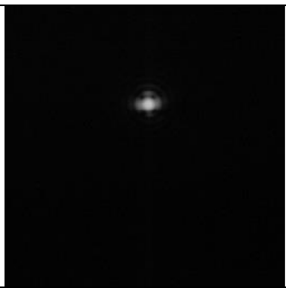
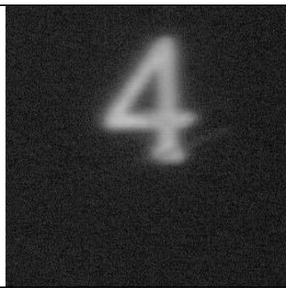
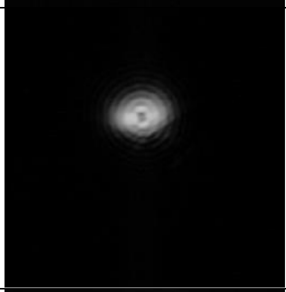
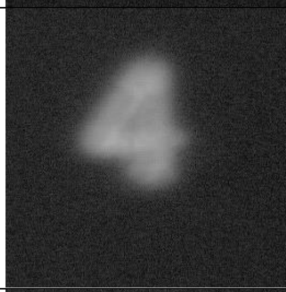
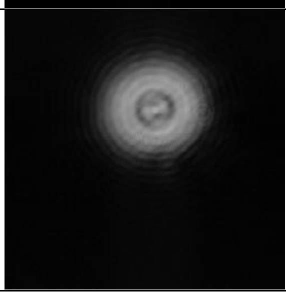
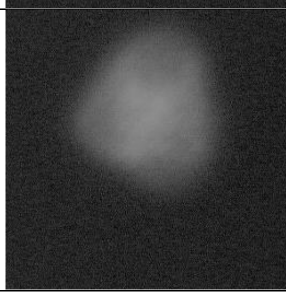
$$PSF = |h|^2, \tag{6}$$

Przykładowy kształt funkcji PSF dla układu bez rozogniskowania przedstawia Rys. 3.



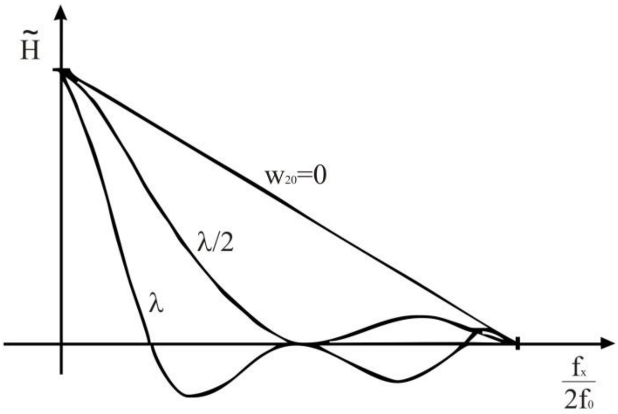
Rys. 3 – Kształt funkcji PSF dla układu bez rozogniskowania.

W przypadku idealnym funkcja PSF powinna być punktem, jednakże w wyniku ograniczonych rozmiarów apertury układu obrazującego jest ona zawsze rozmyta. Poniższa ilustracja prezentuje wyniki eksperymentalnego pomiaru kształtu PSF przy zwiększającym się rozogniskowaniu układu optycznego. Pokazany jest też wpływ rozogniskowania na ostrość uzyskanego obrazu – przeźrocza zawierającego cyfrę „4".

w_{20}	PSF	Obraz
0,5 λ		
1 λ		
2 λ		

Rys. 4 – Kształt funkcji PSF (z lewej) i otrzymany obraz (z prawej) dla układu o zwiększającym się rozogniskowaniu.

Transformata Fouriera funkcji PSF nosi nazwę optycznej funkcji przenoszenia (z ang. OTF – Optical Transfer Function), a jej moduł to funkcja przenoszenia modulacji (czasem też nazywana funkcją przenoszenia kontrastu, czyli z ang. MTF - Modulation Transfer Function). Funkcja OTF pokazuje stopień przenoszenia kontrastu dla poszczególnych częstości przestrzennych, co ilustruje Rys. 5.



Rys. 5 – Przykładowy wykres funkcji OTF dla trzech różnych parametrów rozogniskowania (gdzie f_0 to częstość odcięcia dla oświetlenia koherentnego przestrzennie).

Element „Miecz Świetlny" i powiększona głębia ostrości

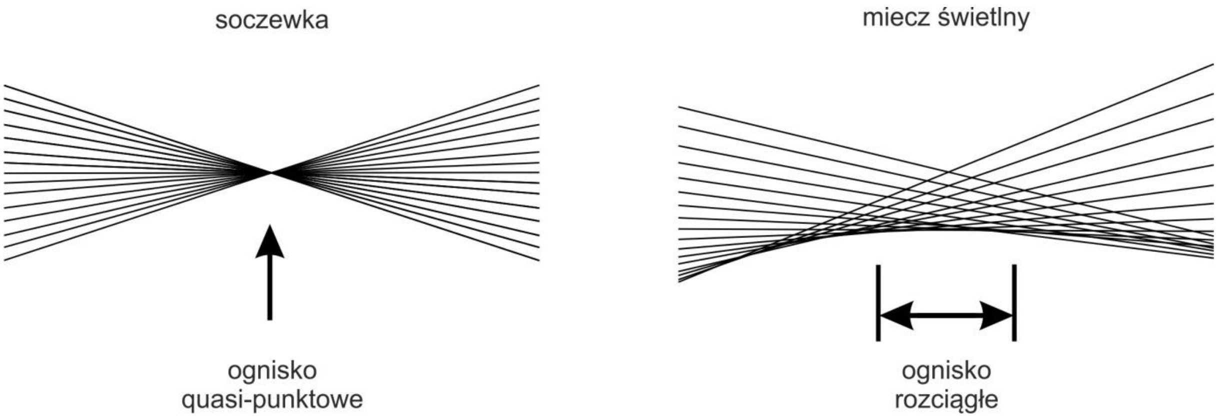
Transmitancja fazowa takiego elementu może zostać zdefiniowana w następujący sposób:

$$Pha(R,T) = \frac{-\pi R^2}{\lambda \cdot \left(f + \frac{\Delta f(T-\pi)}{\pi}\right)}, \tag{7}$$

gdzie:

R – współrzędna radialna,
T – współrzędna azymutalna.

Element ten posiada właściwość skupiania wiązki nie w punkt, ale w „odcinek ogniskowy" tworzący wzdłuż osi optycznej linię śrubową o długości zależnej od parametru Δf. W związku z tym, jako element obrazujący charakteryzuje się on zwiększoną głębią ostrości, co ilustruje Rys. 6.



Rys. 6 – Porównanie biegu promieni światła za soczewką (po lewej) i za elementem Miecz Świetlny (po prawej). Zaznaczono obszar powiększonej głębi ostrego obrazowania.

W ćwiczeniu należy zaobserwować rozciągłe ognisko i zwiększoną głębię ostrości w przypadku obrazowania wykorzystującego element *Miecz Świetlny* dla różnych parametrów rozogniskowania.

Przebieg ćwiczenia

1) Zarejestrowanie odpowiedzi impulsowej układu obrazującego z wykorzystaniem syntetycznej soczewki Fresnela.
2) Zarejestrowanie odpowiedzi impulsowej układu obrazującego z wykorzystaniem syntetycznego elementu typu miecz świetlny.
3) Wykonanie obrazowania za pomocą syntetycznej soczewki Fresnela oraz obserwacja obrazu podczas różnego rozogniskowania układu.
4) Wykonanie obrazowania za pomocą syntetycznego elementu typu miecz świetlny oraz obserwacja obrazu podczas różnego rozogniskowania układu.
5) Obrazowanie gwiazdy Siemensa – obserwacja odwrócenia kontrastu i zwiększonej głębi ostrości.