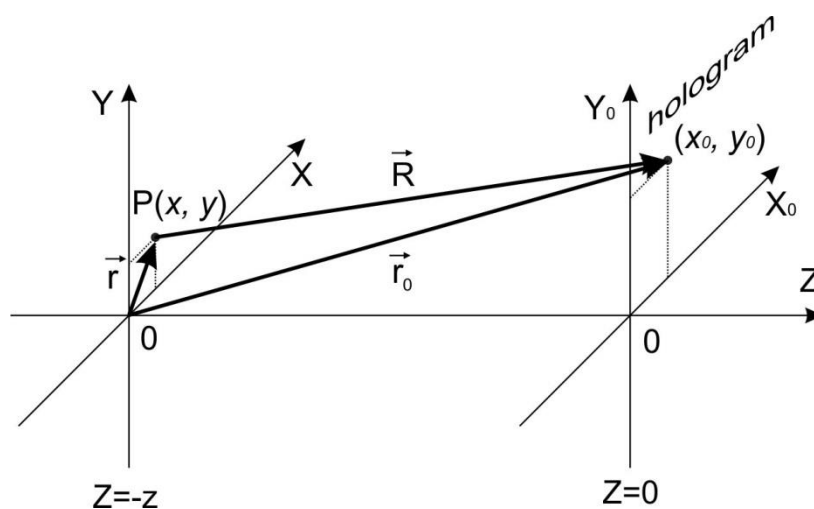


Ćwiczenie 9

Hologram Fresnela

Wprowadzenie teoretyczne

Holografia umożliwia zapis pełnej informacji o obiekcie optycznym, zarówno amplitudowej, jak i fazowej. Dzięki temu można m.in. odtwarzać trójwymiarowe obiekty w ich naturalnym, przestrzennym kształcie. Technika holograficzna polega na rejestracji natężeniowego pola świetlnego, powstającego w wyniku interferencji wzajemnie spójnych fal: wiązki przedmiotowej pochodzącej od obiektu i wiązki odniesienia. Rys. 1 przedstawia geometrię dla obiektu punkowego P leżącego w płaszczyźnie $Z = -z$ o współrzędnych (x, y) . Płaszczyzna hologramu $Z = 0$ odpowiada współrzędnym (x_0, y_0) .

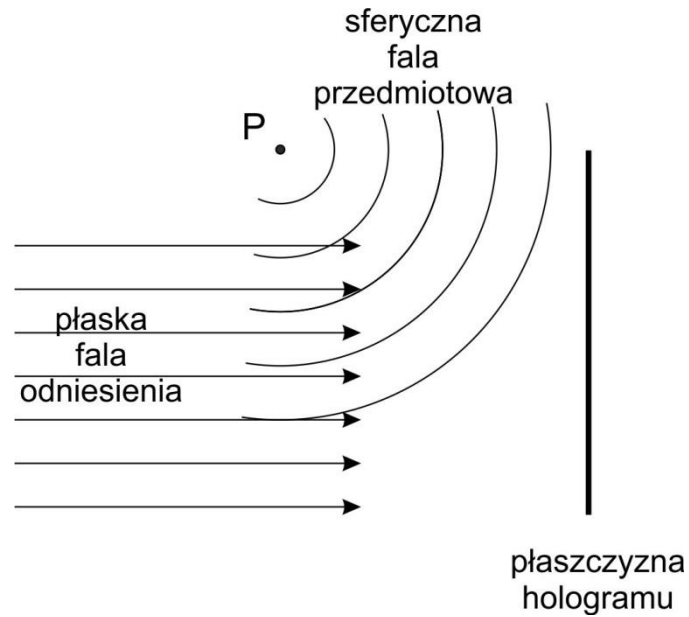


Rys. 1 – Geometria układu.

Punkt $P(x, y)$ emituje falę sferyczną o długości λ , której amplituda zespolona w płaszczyźnie hologramu ma postać $U \frac{e^{ikR}}{R}$, gdzie $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ i zgodnie z Rys. 1 mamy:

- $U = const.$ - amplituda przedmiotowej fali sferycznej.
- $\vec{r} = [x, y, 0]$ - promień wodzący punktu P w płaszczyźnie OXY.
- $\vec{r}_0 = [x_0, y_0, 0]$ - promień wodzący punktu (x_0, y_0) z płaszczyzny hologramu zaczepiony w punkcie $O(0, 0, -z)$.
- $R = |\vec{R}|$ oraz $\vec{R} = \vec{r}_0 - \vec{r}$.

Dla uproszczenia założymy, że fala odniesienia jest falą płaską Ae^{ikz} , gdzie $A = const.$, i że propaguje się prostopadłe do płaszczyzny hologramu, jak to pokazano na Rys. 2.



Rys. 2 – Schemat rejestracji hologramu punktu.

Natężenie pola interferencyjnego w płaszczyźnie $Z = 0$ ma postać:

$$I(x_0, y_0) = \left| U \frac{e^{ikR}}{R} + A \right|^2 = \frac{|U|^2}{R^2} + |A|^2 + U \frac{e^{ikR}}{R} \cdot A^* + U^* \frac{e^{-ikR}}{R} \cdot A \quad (1)$$

gdzie " * " oznacza operator sprzężenia zespolonego. Powyższe natężenie można zarejestrować na kliszy holograficznej (klisza fotograficzna o wysokiej rozdzielczości) otrzymując płaski element optyczny o transmitancji $I(x_0, y_0)$. Jest to właśnie hologram. Po odtworzeniu hologramu falą płaską identyczną z falą odniesienia zostaje wygenerowane pole świetlne o amplitudzie zespolonej $AI(x_0, y_0)$, składające się zgodnie z równaniem (1) z następujących frontów falowych:

a)

$$U_1 = A \left(\frac{|U|^2}{R^2} + |A|^2 \right) \quad (2)$$

Wyrażenie w nawiasie nie zawiera żadnego czynnika fazowego, zatem pole (2) propaguje się zawsze zgodnie z kierunkiem fali odtwarzającej. Nie zawiera ono istotnej informacji o obiekcie i z punktu widzenia holografii Fresnela jest to zbędny szum.

b)

$$U_2 = U \frac{e^{ikR}}{R} \cdot |A|^2 \quad (3)$$

Jeżeli $|A|^2 = const.$ (czyli tak jak w naszym przypadku) wówczas U_2 przedstawia dokładne odtworzenie sferycznego frontu falowego emitowanego przez punkt P . W związku z tym obserwator widzi na hologramie pozorny obraz punktu P odtworzony przez pole (3).

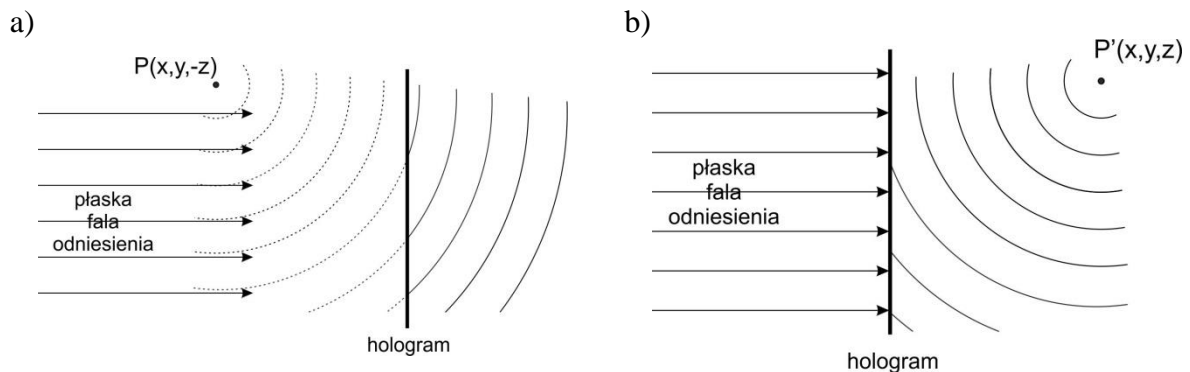
c)

$$U_3 = U^* \frac{e^{-ikR}}{R} \cdot |A|^2 \quad (4)$$

Wzór (4) opisuje falę sferyczną zbieżną. Ponieważ wielkość R występuje jednocześnie we wzorach (3) i (4), zatem konfiguracja obu frontów sferycznych zbieżnego i rozbieżnego jest

taka sama, z tym, że ze względu na odtworzenie hologramu z lewej strony (Rys. 2) fala zbiega się w płaszczyźnie $Z > 0$. Z powyższego wynika, że jeżeli punkt przedmiotowy ma współrzędne $P(x, y, Z = -z)$, wówczas front sferyczny zbiega się w punkcie $P'(x, y, Z = z)$. P' jest obrazem rzeczywistym punktu przedmiotowego P .

Zgodnie z naszą dyskusją punkty P i P' są symetryczne względem płaszczyzny hologramu $Z = 0$. Geometrię odtworzenia ilustruje Rys. 3.



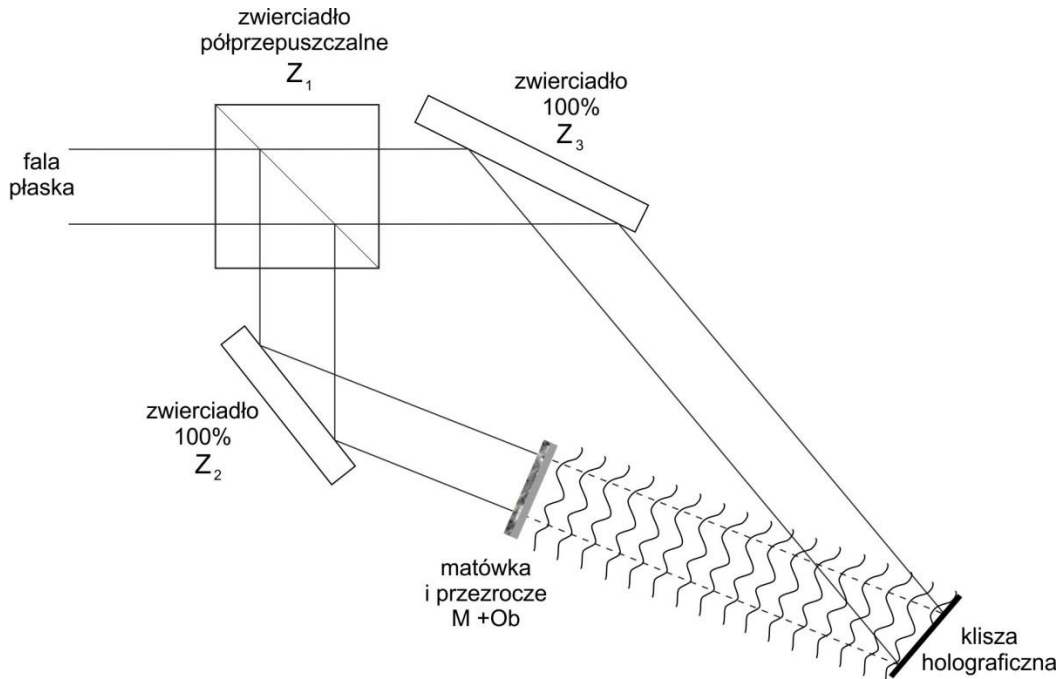
Rys. 3 – Odtworzenie hologramu. Fala sferyczna rozbieżna formująca obraz pozorny punktu P (a) i fala sferyczna zbieżna tworząca w punkcie P' rzeczywisty obraz punktu.

Ponieważ dowolny obiekt jest continuum punktów, zatem powyższą dyskusję można przeprowadzić dla każdego punktu obiektu osobno i końcowy wniosek sprowadza się do możliwości holograficznego odtworzenia rozciągniętych przedmiotów trójwymiarowych. Jeżeli tak jak, to było w naszym przykładzie, wiązka odniesienia i wiązka odtwarzająca są płaskimi falami, propagującymi się prostopadłe do płaszczyzny hologramu, wówczas obraz pozorny obiektu powstaje dokładnie w miejscu oryginału. Ponadto obrazy rzeczywisty i pozorny są symetryczne względem płaszczyzny hologramu.

W ogólności zarówno zespolona amplituda pola odniesienia, jak i pola odtwarzającego, może być zmienna w płaszczyźnie hologramu. Wtedy określenie położenia obrazu pozornego i obrazu rzeczywistego wymaga szczegółowej analizy. Mogą pojawić się dodatkowo aberracje, które wpływają na wierność odtworzenia holograficznego. Dobierając odpowiednią geometrię fali odniesienia i fali odtwarzającej można również uzyskiwać różne powiększenia obiektu (zarówno poprzeczne, jak i podłużne) przy odtworzeniu holograficznym.

Przebieg ćwiczenia

Ze względu na ograniczony czas zajęć, ćwiczenie dotyczy zapisu prostego hologramu Fresnela dwuwymiarowego obiektu dyfuzyjnego. Doświadczenie można przeprowadzić w układzie pokazanym na Rys. 4.



Rys. 4 - Przykładowy układ do zapisu hologramu Fresnela.

Zwierciadło półprzepuszczalne Z_1 jest oświetlone falą płaską. Część padającego frontu falowego odbija się od Z_1 , a następnie od zwierciadła odbiciowego Z_2 i pada na matówkę M umieszczoną tuż przed dwuwymiarowym obiektem Ob (w tym przypadku jest to przezroczce), którego hologram chcemy zapisać. Pole przedmiotowe po przejściu przez Ob interferuje w płaszczyźnie kliszy holograficznej z falą przechodzącą przez Z_1 i odbitą od zwierciadła odbiciowego Z_3 , która stanowi wiązkę odniesienia.

Aby hologram mógł zostać poprawnie zarejestrowany i był dobrej jakości, układ z Rys. 4 musi spełniać następujące warunki:

- 1) Wiązka odniesienia i wiązka oświetlająca obiekt muszą być koherentne (czyli posiadać stałą w czasie różnicę faz), aby mogła zajść interferencja.
- 2) Kąt pomiędzy wiązką odniesienia i wiązką obiektową powinien być jak najmniejszy. Kąt ten wpływa na gęstość prążków pojawiających się w płaszczyźnie hologramu – im mniejszy kąt, tym prążki mają większą stałą. W przypadku używanych w laboratorium klisz kąt nie powinien przekraczać 30° , w przeciwnym wypadku prążki byłyby węższe niż rozmiary cząstek wykazujących efekt światłoczuły i informacja o hologramie nie zostałaby zapisana.
- 3) Drogi optyczne wiązki odniesienia (przechodzącej przez Z_1 , odbitej od Z_3 i padającej na kliszę holograficzną) oraz wiązki przedmiotowej (odbijającej się od Z_1 , następnie od Z_2 , przechodzącej przez M i Ob i padającej na kliszę holograficzną) powinny być równe. Im mniejsza jest różnica dróg optycznych, tym większy uzyskamy kontrast po odtworzeniu hologramu.
- 4) Obiekt musi być dobrze oświetlony – każdy jego punkt, który chcemy potem obserwować w trakcie odtworzenia hologramu, powinien „emitować” w przybliżeniu falę sferyczną (trzeba zwrócić szczególną uwagę na niepożądane cienie i odbłyски).
- 5) Cały układ powinien być stabilny mechanicznie. Jeśli ten warunek nie byłby spełniony to prążki interferencyjne przesuwałyby się i informacje zapisałyby się „jedna na drugiej”, uniemożliwiając ich późniejsze odtworzenie.
- 6) Natężenia wiązki przedmiotowej oraz wiązki odniesienia powinny być w przybliżeniu jednakowe. Ten warunek można zrealizować wstawiając odpowiednią ilość szarych

filtrów w mocniejszą wiązkę lub stosując zwierciadła 0% i 50%. Spełnienie tego warunku powoduje, że czas naświetlania ze względu na obie wiązki jest taki sam (lub podobny), co pozwala na uzyskanie prążków interferencyjnych o dobrym kontraście.

Zapisu hologramu dokonujemy przy użyciu lasera He-Ne o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$. W tym ćwiczeniu ważne jest, aby wiązka odniesienia była falą płaską o dobrej jakości frontu falowego (kontrola interferometryczna). Taka konfiguracja układu umożliwi nam odtworzenie nieprzeskalowanego obrazu naszego przezrocza. Wtedy powstające obrazy rzeczywisty i urojony będą się znajdowały dokładnie w tej samej odległości od kliszy holograficznej co obiekt.

Po rejestracji pola interferencyjnego na kliszy otrzymujemy hologram. Po wywołaniu i utrwaleniu wstawiamy kliszę z powrotem w płaszczyźnie zapisywanego pola. Usuwamy zwierciadło Z_2 (lub zasłaniamy je) i obserwujemy odtworzony obraz urojony dyfuzyjnego obiektu dwuwymiarowego (przezrocza z matówką). Widoczny obraz rejestrujemy aparatem cyfrowym. Odtworzenia hologramu dokonujemy przy użyciu lasera He-Ne o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$.

Następnie badamy obraz rzeczywisty. Odtworzenia hologramu dokonujemy przy użyciu lasera He-Ne o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$. Ważne jest, aby fala odtwarzająca była falą płaską o dobrej jakości frontu falowego (kontrola interferometryczna). Należy dokonać pomiaru odległości odtworzonego obrazu od hologramu oraz poprzecznych rozmiarów obrazu.

Następnie badamy obraz rzeczywisty odtwarzany w fali sferycznej zbieżnej oraz rozbieżnej. Odtworzenia hologramu dokonujemy przy użyciu lasera He-Ne o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$. W tym przypadku należy dokonać pomiaru odległości odtworzonego obrazu od hologramu oraz poprzecznych rozmiarów obrazu.

W kolejnym punkcie dokonujemy odtworzenia hologramu przy użyciu lasera zielonego o długości fali $0,532 \mu\text{m}$. Ważne jest, aby fala odtwarzająca była falą płaską o dobrej jakości frontu falowego (kontrola interferometryczna). Należy dokonać pomiaru odległości odtworzonego obrazu od hologramu (kliszy holograficznej) oraz poprzecznych rozmiarów obrazu.