

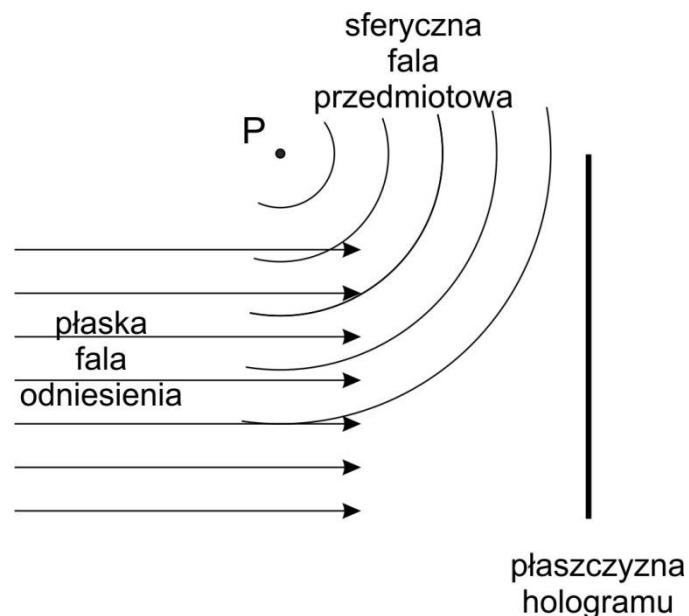
Ćwiczenie 3

Wybrane techniki holografii

Hologram – podstawy teoretyczne

Holografia umożliwia zapis pełnej informacji o obiekcie optycznym. Dzięki temu można m.in. odtwarzać trójwymiarowe obiekty w ich naturalnym, przestrzennym kształcie. Informacja o amplitudzie i fazie danego frontu falowego pochodzącego od rejestrowanego przedmiotu jest zapisywana w postaci natężeniowej. Oznacza to, że rejestrowany jest rozkład pola świetlnego, powstającego w wyniku interferencji wzajemnie spójnych fal: wiązki przedmiotowej pochodzącej od obiektu i wiązki odniesienia.

Na początku założymy, że obiekt jest punktowy. Punkt $P(x, y)$ emituje falę sferyczną o długości λ . Natomiast fala odniesienia jest falą płaską i propaguje się prostopadłe do płaszczyzny hologramu, jak to pokazano na Rys. 1.



Rys. 1 – Schemat rejestracji hologramu punktu.

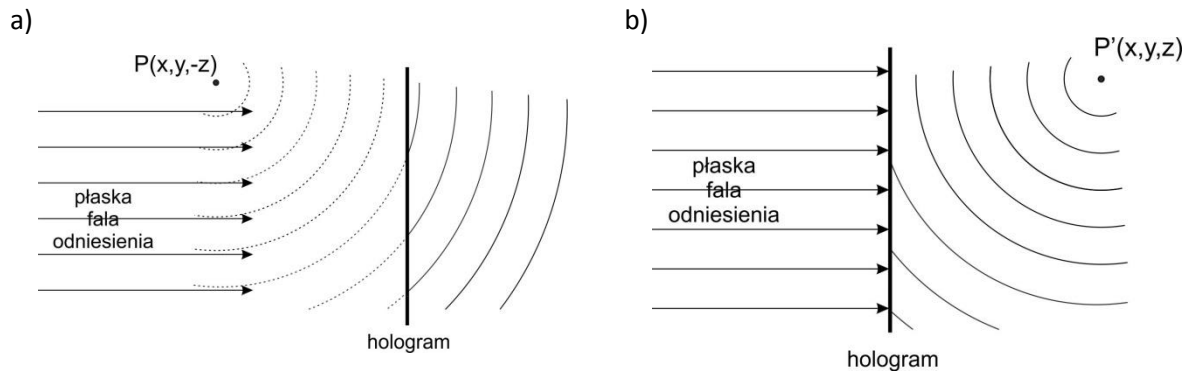
W płaszczyźnie hologramu powstaje wzór interferencyjny, który następnie rejestrowany jest na kliszy holograficznej lub na matrycy światłoczułej (jako rozkład natężenia, ponieważ taką wielkość fizyczną rejestrują detektory, w tym ludzkie oko).

Płaski element optyczny o transmitancji $I(x_0, y_0)$ 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 z następujących frontów falowych:

- propagującego się zawsze zgodnie z kierunkiem fali odtwarzającej, który nie zawiera istotnej informacji o obiekcie i z punktu widzenia holografii jest to zbędny szum;

- opisany przez falę sferyczną rozbieżną i przedstawiający dokładne odtworzenie sferycznego frontu falowego emitowanego przez punkt P (w związku z tym obserwator widzi na hologramie pozorny obraz punktu – P);
- opisany przez falę sferyczną zbieżną i przedstawiający obraz rzeczywisty punktu przedmiotowego P .

Zgodnie z naszą dyskusją punkty P i P' są symetryczne względem płaszczyzny hologramu $Z = 0$. Geometrię odtworzenia ilustruje Rys. 2.



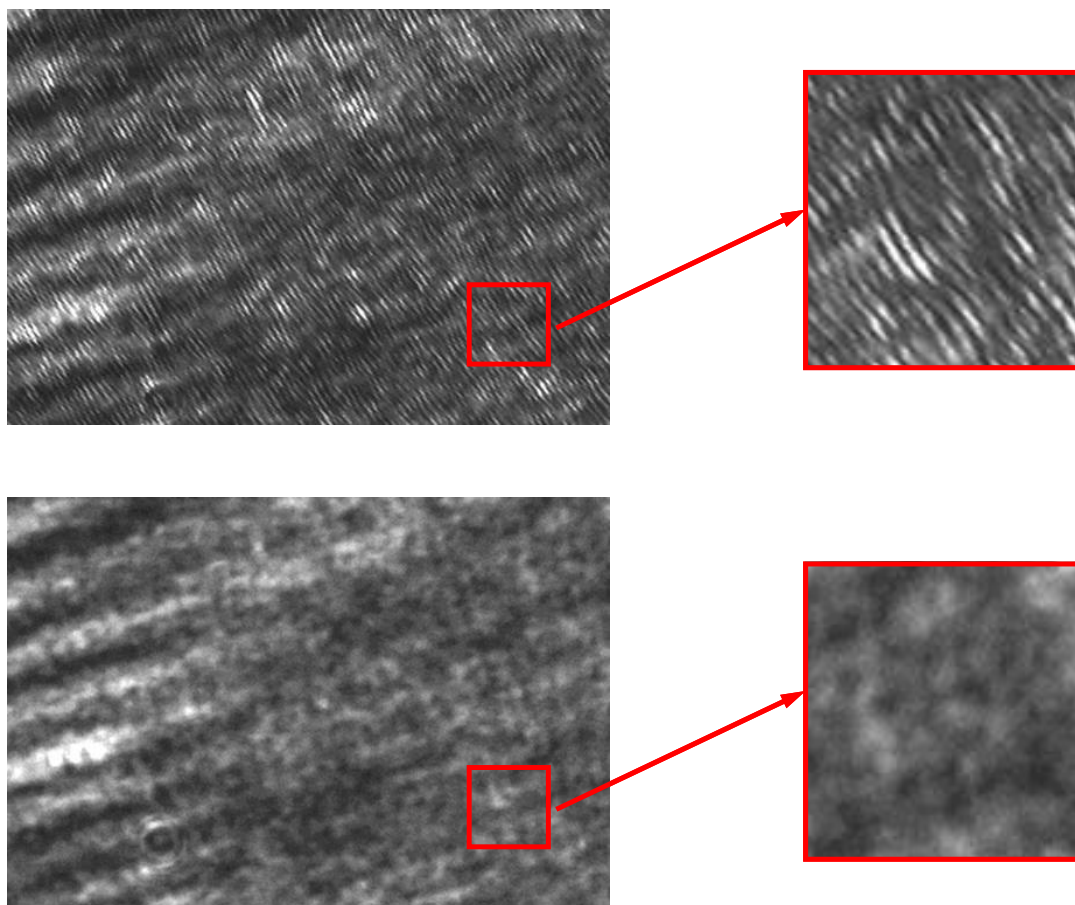
Rys. 2 – Odtworzenie hologramu. Fala sferyczna rozbieżna formująca obraz pozorny punktu P (a) i fala sferyczna zbieżna tworząca w punkcie P' rzeczywisty obraz punktu.

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 rzeczywiste i pozorne 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.

Prażki interferencyjne

Na Rys. 3 na pierwszy rzut oka zdjęcia niczym się od siebie nie różnią. Jednak przedstawiają one dwie różne sytuacje. Na zdjęciu na górze zarejestrowane są dwie interferujące za sobą wiązki (hologram), natomiast na zdjęciu z prawej strony została zasłonięta wiązka odniesienia, czyli hologram po prostu nie zapisał się.



Rys. 3 – Zdjęcie hologramu - dwie interferujące wiązki (na górze) oraz zdjęcie tylko jednej wiązki (na dole).

Dopiero przy odpowiednim powiększeniu widać różnicę między zapisanymi obrazami. Niewątpliwie na dolnym zdjęciu, które przedstawia Rys. 3, nie został zapisany hologram. Jest to zwykle zdjęcie wiązki obiektowej, które nie zawiera żadnej dodatkowej informacji o obiekcie. Natomiast z górnego zdjęcia, które przedstawia Rys. 3, możemy odtworzyć holograficzny obraz zarejestrowanego obiektu, ponieważ zawiera ono również informację o fazie zapisaną w postaci prążków interferencyjnych.

Zjawisko paralaksy.

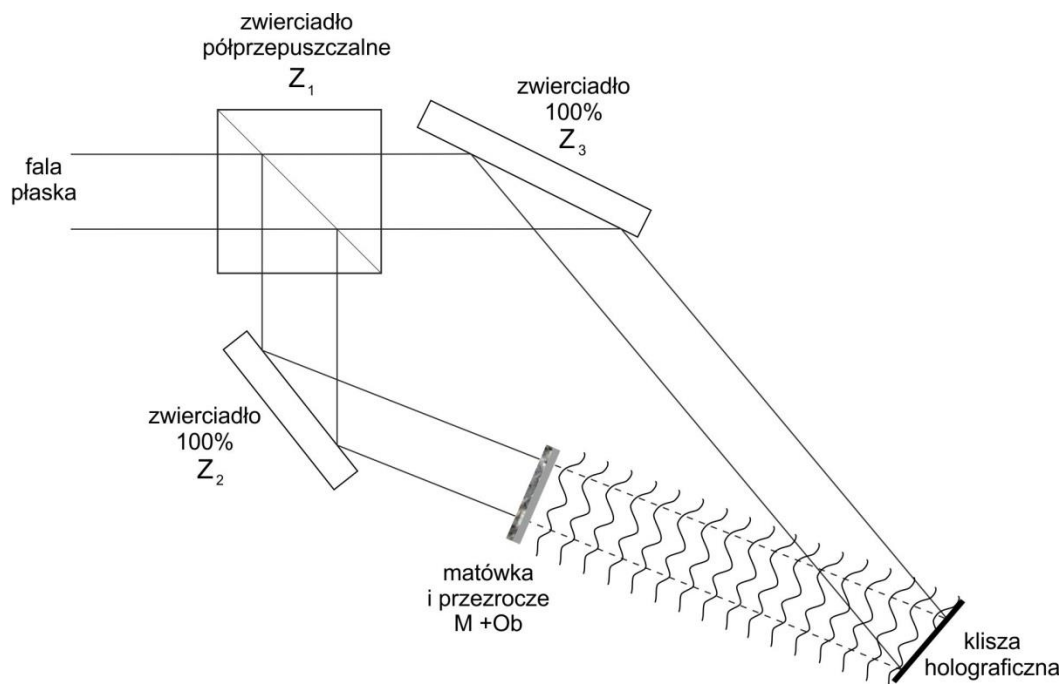
Zjawisko paralaksy na pozornej zmianie położenia dwóch obiektów względem siebie, widzianych przez obserwatora z różnych perspektyw. Innymi słowy w przypadku hologramu dwupłaszczyznowego (przeważnie w przypadku hologramów cyfrowych) zjawisko paralaksy polega na zmianie położenia odtwarzających się obrazów względem siebie w zależności od tego z jakiego fragmentu hologramu są one odtwarzane. Zjawisko paralaksy ma dużo większe znaczenie w przypadku hologramów obiektów trójwymiarowych lub trójwymiarowych scen przestrzennych (składających się z wielu płaszczyzn). Sprawia ono, że obserwator może obejrzeć obiekt z różnych stron – zarówno z prawej, jak i lewej, ale także z góry i z dołu. W przypadku obserwacji z jednej perspektywy widzimy szczegóły obiektu, które są niewidoczne z innej.

Hologramy rejestrowane w układach opisanych powyżej są hologramami Fresnela z boczną wiązką odniesienia. Użycie takiej konfiguracji i geometrii układu pozwala na doskonałą obserwację pełnej dwukierunkowej paralaksy. Dostyc istotną zaletą wykonywanych w ten sposób hologramów jest możliwość odtwarzania obrazu z dowolnej ich części.

Hologram Fresnela

Holografia jest bardzo rozległą dziedziną optyki i na pewno nie dziwi fakt, że istnieją hologramy różnego typu. W zależności od metody zapisu hologramu, podczas jego odtwarzania uzyskamy inne własności obrazu. Pewnym ograniczeniem w przypadku wielu hologramu jest to, iż możemy je odtwarzać tylko w świetle spójnym czasowo i przestrzennie (np. laser). Jest to łatwe, ale jedynie w warunkach laboratoryjnych.

Hologram Fresnela dwuwymiarowego obiektu można zapisać w układzie pokazanym na Rys. 4. Konieczne jest oświetlenie koherentne w przypadku rejestracji i źródło quasi-monochromatyczne do odtworzenia hologramu.



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 przezroczny), 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.

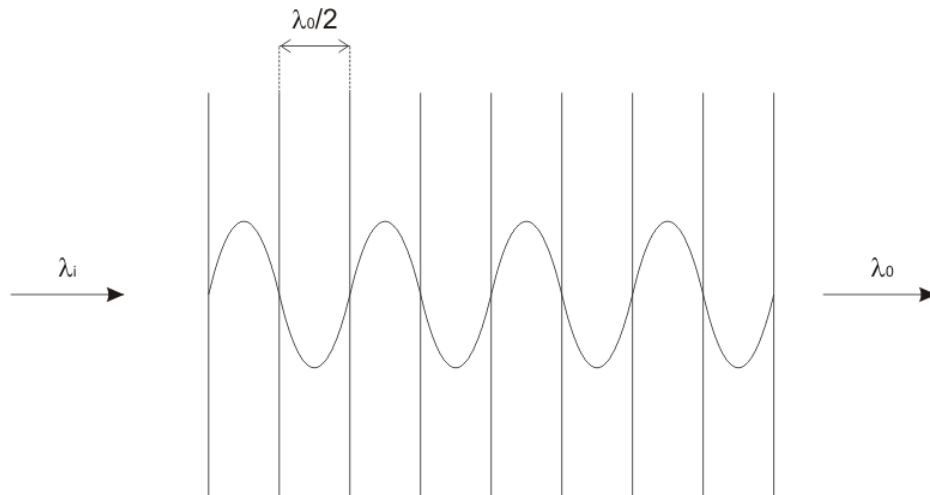
Hologram objętościowy (gruby)

Dużą atrakcją byłaby możliwość zobaczenia zapisanego obiektu przy oświetleniu hologramu światłem polichromatycznym (np. białym, słonecznym). Taką właściwość mają hologramy grube (objętościowe), które będą przedmiotem tego ćwiczenia. Obraz zapisany na

hologramie grubym będzie dobrze widoczny przy oświetleniu o wysokiej spójności przestrzennej i niskiej spójności czasowej (np. odległa żarówka, słońce).

Hologramy powstają na skutek interferencji dwóch wiązek (obiektywnej i odniesienia), dzięki której powstają prążki interferencyjne. Ich obraz jest zapisywany na kliszy holograficznej. Hologram gruby powstaje na skutek zapisania się prążków w całej objętości grubej emulsji holograficznej, tworząc w niej przestrzenną strukturę.

Wyobraźmy sobie strukturę periodyczną mającą okres $\lambda_0/2$, jak na Rys. 5.

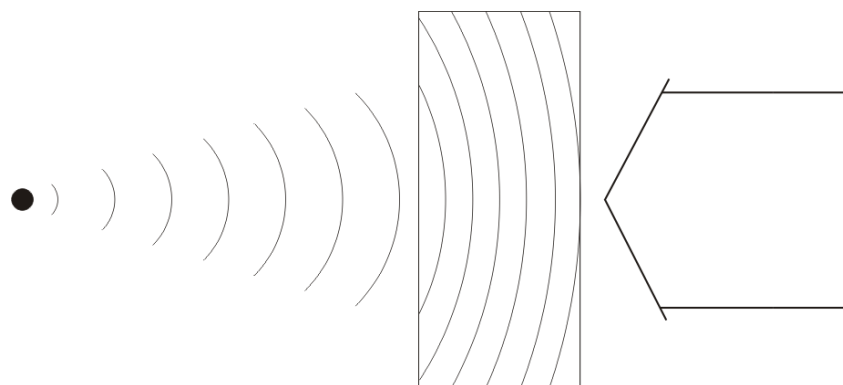


Rys. 5 – Schemat struktury periodycznej.

Jeżeli oświetlimy ją światłem składającym się z wielu fal o różnych długościach, przez strukturę przejdzie jedynie „dopasowana” składowa, czyli ta o długości λ_0 . Taką właściwość posiada struktura, która jest zapisywana w całej jej objętości, a nie tylko na jej powierzchni.

W przypadku cienkiej kliszy, zapisywaliśmy jedynie przecięcia sfer z jej powierzchnią. Używając kliszy, która wykazuje efekt światłoczuły w całej swojej objętości, możemy zapisać wycinki owych sfer. Stąd pochodzi nazwa tego typu hologramów – informacje zapisujemy w objętości, a nie na powierzchni. Grubość kliszy powinna być rzędu $\sim 100\lambda$, gdzie λ jest długością fali użytej do zapisu (w naszym wypadku $\lambda = 632,8\text{nm}$).

Hologram taki można zarejestrować umieszczając źródło z jednej strony kliszy (punktowy obiekt), a falę odniesienia z drugiej. Interferencja zajdzie wewnątrz płytki światłoczułej. Zapis hologramu grubego obiektu punktowego jest pokazany na Rys. 6.



Rys. 6 – Schemat układu do zapisu hologramu grubego obiektu punktowego.

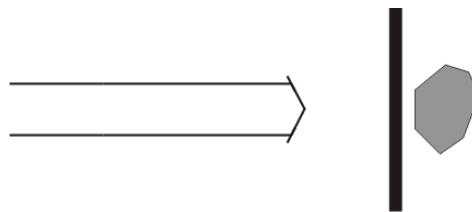
Otrzymaliśmy zatem strukturę periodyczną. Jeśli oświetlimy ją światłem białym (mieszaniną różnych kolorów), zostanie wyfiltrowana jedynie ta długość fali, która była użyta do zapisu – do odtworzenia hologramu nie będziemy już potrzebować lasera.

W odróżnieniu od hologramu Fresnela, hologram gruby nie daje obrazów rzeczywistego i urojonego jednocześnie. W zależności od tego, w którą stronę ustawimy płytkę, możemy oglądać albo obraz rzeczywisty, albo urojony.

Zapis hologramu grubego

Aby hologram w ogóle się zapisał i był dobrej jakości, układ optyczny musi spełniać pewne warunki wymienione w dalszej części opisu.

Układ optyczny do rejestracji hologramu grubego można skonstruować na kilka sposobów. Na Rys. 7 pokazano jeden z prostszych sposobów ustawienia takiego układu. Fala płaska przechodzi przez kliszę, odbija się od obiektu i interferuje z nieodbitym częścią fali wewnątrz płytki. Ten układ posiada jednak wady – nie można wyrównać natężeń wiązek ani dróg optycznych. Dobrej jakości hologramy dają się zapisać w tej konfiguracji tylko dla obiektów położonych blisko kliszy i odbijających dużą ilość światła.



Rys. 7 – Schematyczny układ do rejestracji hologramu grubego.

Warunki poprawnej rejestracji hologramu

Aby hologram mógł zostać poprawnie zarejestrowany i był dobrej jakości, układ optyczny 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) 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 odbłyski).
- 3) 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.
- 4) Drogi optyczne wiązki odniesienia oraz wiązki przedmiotowej powinny być równe. Im mniejsza jest różnica dróg optycznych, tym większy uzyskamy kontrast prążków i tym lepszej jakości będzie odtworzenie hologramu.
- 5) Natężenia wiązki przedmiotowej oraz wiązki odniesienia powinny być w przybliżeniu jednakowe. 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.
- 6) 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 cienkich kąt nie powinien przekraczać 30° , w przeciwnym wypadku prążki byłyby węższe niż rozmiary cząstek wykazujących efekt światłoczuły i informacja o hologramie nie zostałaby zapisana.

W przypadku rejestracji hologramu grubego ostatnie 3 warunki nie do końca mogą być spełnione. Wynika to z zastosowania klisz grubych oraz innej konfiguracji układu do rejestracji hologramu.

Komputerowy hologram Fouriera.

W klasycznej holografii w wyniku interferencji dwóch wiązek otrzymujemy zestaw prążków interferencyjnych (tak zwany interferogram). Ten skomplikowany wzór po zapisaniu na emulsji holograficznej można traktować jako zbiór wielu mikroskopijnych siatek dyfrakcyjnych. Przy oświetleniu takiej struktury siatki uginają światło w taki sposób, że na ekranie (elemente światłoczułym), bądź siatkówce oka tworzy się obraz rzeczywisty zarejestrowanego przedmiotu.

Wspomniany wzór prążków interferencyjnych jest niezwykle gęsty i złożony, tym niemniej istnieją metody numeryczne pozwalające na obliczenie interferogramu obiektu płaskiego (przeźroczca) przy pomocy komputera (stąd nazwa „hologram komputerowy”).

Hologramy możemy umownie podzielić w zależności od odległości odtwarzanego obrazu rzeczywistego na:

- hologram Fresnela – odtwarza obraz w skończonej odległości,
- hologram Fouriera – odtwarza obraz w nieskończoności.

Numeryczne zaprojektowanie hologramu Fresnela wymaga obliczania propagacji światła na odległość, w której ma być rekonstruowany obraz. W przypadku hologramu Fouriera projektowanie jest o wiele prostsze, gdyż zakłada jedynie obliczenie transformaty Fouriera obiektu.

Hologram Fouriera jest w istocie zapisem widma obiektu wejściowego, tj. transformaty Fouriera transmitancji tego obiektu. Przy oświetleniu takiego hologramu falą płaską front falowy za hologramem musi zostać poddany wtórnej transformacji Fouriera, by uzyskać rekonstruowany obraz rzeczywisty.

Aby poprawić jakość odtwarzanego obrazu stosuje się różne algorytmy obliczania rozkładu fazy hologramu Fouriera. Najprostszym w implementacji i przez to bardzo popularnym jest algorytm IFTA (ang. *Iterative Fourier Transform Algorithm*). Jest to szczególny przypadek algorytmu Gerchberga-Saxtona, opublikowanego po raz pierwszy w 1972 roku.

Zasadę działania metody IFTA można sformułować następująco:

„Faza podlega modyfikowaniu tak, by:

- a) w płaszczyźnie obrazowej otrzymać żądany obraz
- b) w płaszczyźnie hologramu jednorodną amplitudę.”

O ile punkt a) jest oczywisty, o tyle punkt b) wymaga dodatkowego wyjaśnienia. Istotne jest, by zaprojektowany hologram posiadał jak najwięcej informacji o przedmiocie zapisanej w rozkładzie fazy, natomiast jak najmniej w części amplitudowej (co wynika z faktu, że modulowanie amplitudy a więc i natężenia światła prowadzi do jego absorpcji i strat). W idealnym przypadku część amplitudowa nie będzie niosła żadnej informacji (tj. amplituda będzie jednakowa na całej powierzchni hologramu) - w takim przypadku pominięcie części amplitudowej nie usunie żadnej informacji i nie zmieni jakości rekonstruowanego obrazu.

Biorąc pod uwagę wyżej sformułowane wymagania dotyczące amplitudy i fazy w płaszczyznach: hologramu i obrazowej, powyższy schemat algorytmu IFTA jest uzasadniony – w każdej iteracji w płaszczyźnie hologramu wymuszamy jednorodną amplitudę, w płaszczyźnie obrazu wymuszamy amplitudę żądanej bitmapy. Mówiąc inaczej, optymalizacja wprowadzana przez IFTA wykorzystuje fakt, że ludzkie oko nie dostrzega

rozkładu fazy, dlatego może być ona dowolnie zmieniana, by uzyskać najwierniejsze odtworzenie amplitudy zakodowanego obrazu.

Przebieg ćwiczenia

Niniejsze ćwiczenie obejmuje następujące etapy:

- 1) Hologram Fresnela - obserwacja
 - a. obserwacja układu do rejestracji hologramu
 - b. obserwacja głębi obrazu i zjawiska paralaksy
 - c. obserwacja prążków interferencyjnych pod mikroskopem (porównanie obrazu wiązki odniesienia, wiązki obiektowa i obu wiązek)
- 2) Hologram w konfiguracji Denisiuka
 - a. zbudowanie układu
 - b. umieszczenie przyniesionego na zajęcia przedmiotu trójwymiarowego
 - c. pomiar natężenia światła (w skali EV) i dobór czasu ekspozycji
 - d. ekspozycja i wywołanie hologramu
 - e. ogląd w świetle białym i laserowym
 - f. dokumentacja zjawiska paralaksy, przestrzenności
- 3) Hologram Fouriera
 - a. obliczenie rozkładu hologramu przyniesionego z domu obrazu w formacie BMP w programie LightSword
 - b. wyświetlenie wykonanego hologramu na przestrzennym modulatorze światła (SLM)
 - c. dokumentacja fotograficzna

W sprawozdaniu należy:

- Opisać wykonywane czynności ilustrując je zdjęciami z adekwatnym i wyczerpującym opisem.
- Zasygnalizować wady i zalety technik.
- Sporządzić subiektywny ranking technik, które zrobiły najlepsze wrażenie.