

ĆWICZENIE 6

Hologram gruby

1. Wprowadzenie

Na jednym z poprzednich ćwiczeń zapoznaliśmy się z cienkim (powierzchniowo zapisanym) hologramem Fresnela, który daje nam możliwość zapisu obiektu przestrzennego. Pewnym ograniczeniem tego typu hologramu jest to, iż możemy go odtwarzać tylko w świetle spójnym czasowo i przestrzennie. Jest to łatwe, ale w warunkach laboratoryjnych.

Jeżeli odtworzenie powyższego hologramu przeprowadzimy używając tego samego lasera, który był użyty do zapisu, obrazy pojawią się przed i za kliszą w takiej odległości od niej, w jakiej znajdował się holografowany przedmiot (pod warunkiem, że wiązka odniesienia i wiązka odtwarzająca są falami płaskimi). Jeśli jednak użyjemy światła o innej długości fali, hologram również się odtworzy, jednak rozmiary i położenie obrazu zmieniają się. W związku z tym oglądanie hologramu cienkiego w świetle białym daje obraz tęczy i rozmyty. Przyczyną jest tu fakt, że światło białe składa się z fal o różnych długościach, przez co otrzymamy wiele nakładających się obrazów o różnych rozmiarach i w różnych odległościach od płytki.

Dużą atrakcją byłaby możliwość zobaczenia zapisanego obiektu przy oświetleniu hologramu światłem białym. Istnieje sposób zapisu hologramu cienkiego tak, aby było to możliwe, ale konieczne jest ograniczenie efektu paralaksy tylko do jednego kierunku tak, aby w kierunku prostopadłym mogła powstać tęcza. Taki hologram był wykonywany na jednym z poprzednich ćwiczeń i nosi nazwę hologramu Bentona lub inaczej hologramu tęczowego. Możliwość obserwacji w świetle białym mają również hologramy grube, które będą przedmiotem niniejszego ćwiczenia.

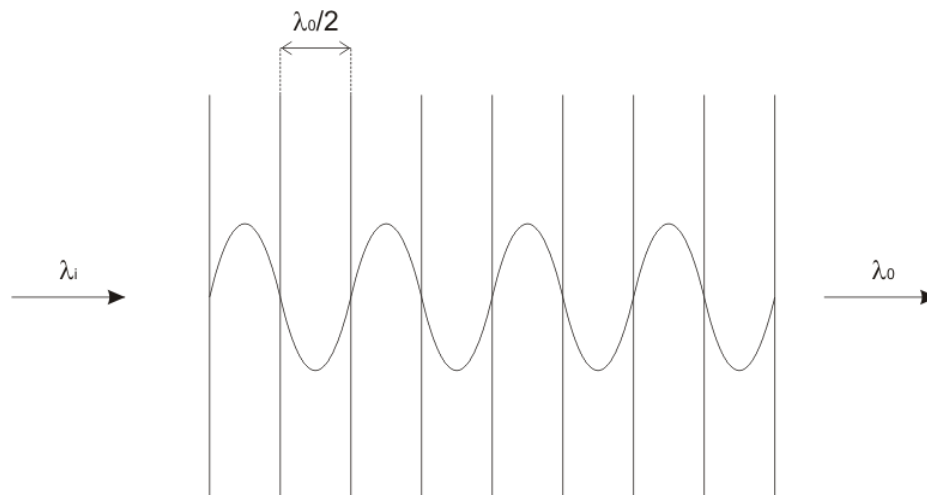
2. Hologram gruby

Obraz zapisany na hologramie grubym będzie dobrze widoczny przy oświetleniu o wysokiej spójności przestrzennej (małe rozmiary kątowe źródła) i niskiej spójności czasowej (światło zawierające różne długości fali), co daje nam możliwość obserwacji np. w świetle odległej żarówki halogenowej lub w bezpośrednio padającym świetle słonecznym.

Hologramy powstają na skutek interferencji wiązek: obiektowej i odniesienia. Prążki interferencyjne zapisane są najczęściej na kliszy holograficznej. W odróżnieniu od hologramu cienkiego, gdzie prążki zapisane są w jednej płaszczyźnie, hologram gruby powstaje na skutek zapisania się prążków w całej objętości grubej emulsji holograficznej, tworząc w niej przestrzenną strukturę periodyczną. Emulsja światłoczuła używana do zapisu hologramów grubych musi mieć grubość dużo większą niż długość fali światła używanego do zapisu. W takim przypadku dyfrakcja światła na strukturze hologramu możliwa jest tylko

w postaci dyfrakcji Bragga. Prążki interferencyjne zapisane w całej objętości emulsji tworzą w pewien sposób periodyczne zaburzenia. Każda taka warstwa może być porównana np. do kolejnych warstw periodycznej struktury atomowej kryształu. W przypadku kryształu, promieniowanie X ulega dyfrakcji na każdym jego atomie, a warunek Bragga zakłada, że dla pewnej zależności fale odbite od kolejnych warstw kryształu ulegną konstruktywnej interferencji ($n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$). W przypadku światła widzialnego, prążki interferencyjne zapisane w grubej emulsji światłoczułej stanowią warstwy z pewnym periodycznym rozkładem współczynnika załamania. Każda warstwa powoduje częściowe odbicie fali światła. Gdy optyczna odległość pomiędzy warstwami (uwzględniająca współczynnik załamania światła dla danego ośrodka) ma grubość około połowy długości padającej fali to wiele odbitych fal tworzy interferencję konstruktywną i taki hologram będzie miał dużą wydajność dyfrakcyjną.

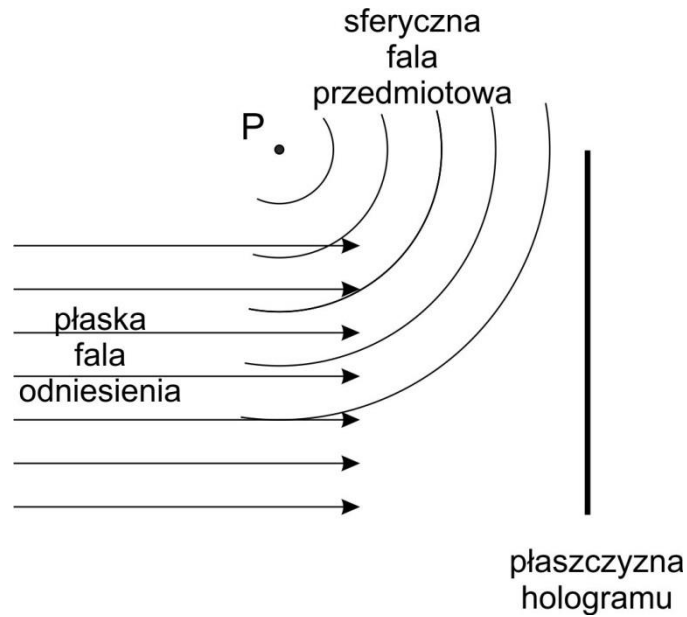
Przykładowo dwie przeciwbieżne fale płaskie o długości λ_0 zapiszą w objętości emulsji „płaszczyzny” odległe od siebie o pół długości fali. Przykład tak otrzymanej struktury periodycznej pokazuje rys. 1.



Rysunek 1. Struktura periodyczna otrzymana na skutek interferencji dwóch przeciwbieżnych fal płaskich o tej samej długości fali

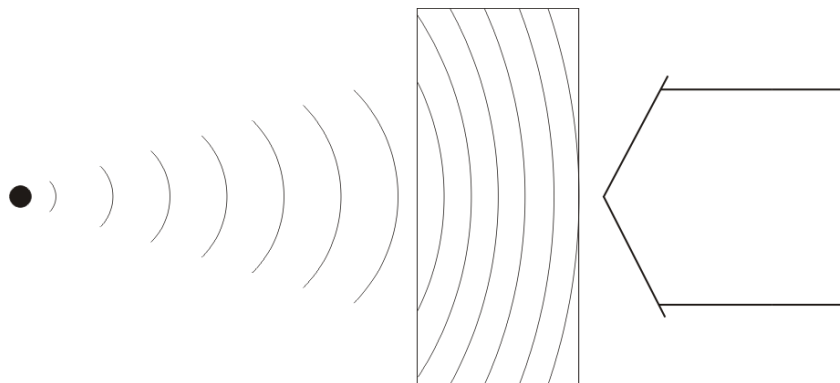
Jeżeli oświetlimy taką periodyczną strukturę światłem składającym się z wielu fal o różnych długościach, przez strukturę przejdzie jedynie „dopasowana” składowa, czyli ta o długości λ_0 .

Technika holograficzna polega na rejestracji natężeniowego pola świetlnego, powstającego w wyniku interferencji wzajemnie spójnych fal: przedmiotowej (pochodzącej od obiektu) i odniesienia. Rys. 2 przypomina jaka była geometria zapisu hologramu dla obiektu punktowego P , który emituje falę sferyczną rozbieżną. Dla uproszczenia założymy, że fala odniesienia jest falą płaską propagującą się prostopadle do płaszczyzny hologramu.



Rysunek 2. Schemat zapisu najprostszego hologramu

W przypadku cienkiej kliszy, zapisywaliśmy jedynie przecięcia sfer z jej powierzchnią. Zmieniając konfigurację układu możemy skierować falę z przeciwnej strony. Hologram taki można skonstruować umieszczając źródło z jednej strony kliszy, a falę odniesienia z drugiej. Interferencja zajdzie wewnątrz płytki światłoczułej. Pokazuje to rys. 3. Używając kliszy, która wykazuje efekt światłoczuły w całej swojej objętości, możemy zapisać wycinki sfer, w wyniku czego otrzymamy strukturę podobną do tej, którą przedstawia rys. 1. Stąd pochodzi nazwa tego typu hologramów – gruby, objętościowy – informacje zapisujemy w objętości, a nie tylko na powierzchni emulsji. Grubość kliszy powinna być rzędu $\sim 10-100 \lambda_0$, gdzie λ_0 jest długością fali użytą do zapisu.



Rysunek 3. Zapis hologramu grubego

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

W odróżnieniu od hologramu cienkiego, hologram gruby nie daje obrazów rzeczywistego i urojonego widocznych jednocześnie. W zależności od tego, w którą stronę ustawimy

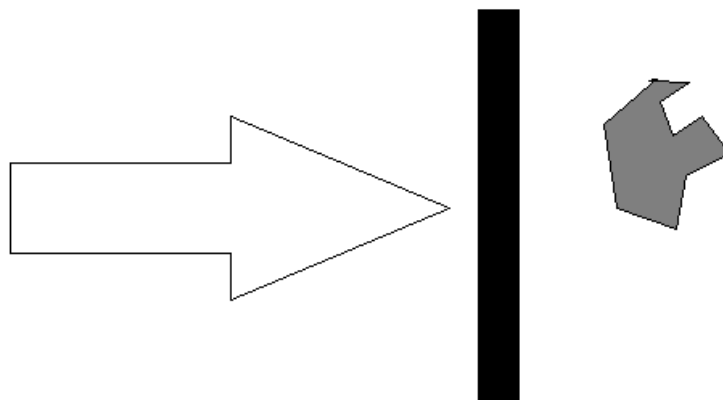
płytkę, możemy oglądać albo obraz rzeczywisty, albo urojony. W przypadku próby obserwacji obrazu pozornego przy płytce ustawionej nieprawidłowo, uzyskamy tzw. obraz sprzężony, charakteryzujący się odwróconą paralaksą.

3. Układy do rejestracji hologramu grubego

Aby hologram w ogóle się zapisał i był dobrej jakości, układ optyczny musi spełniać następujące warunki:

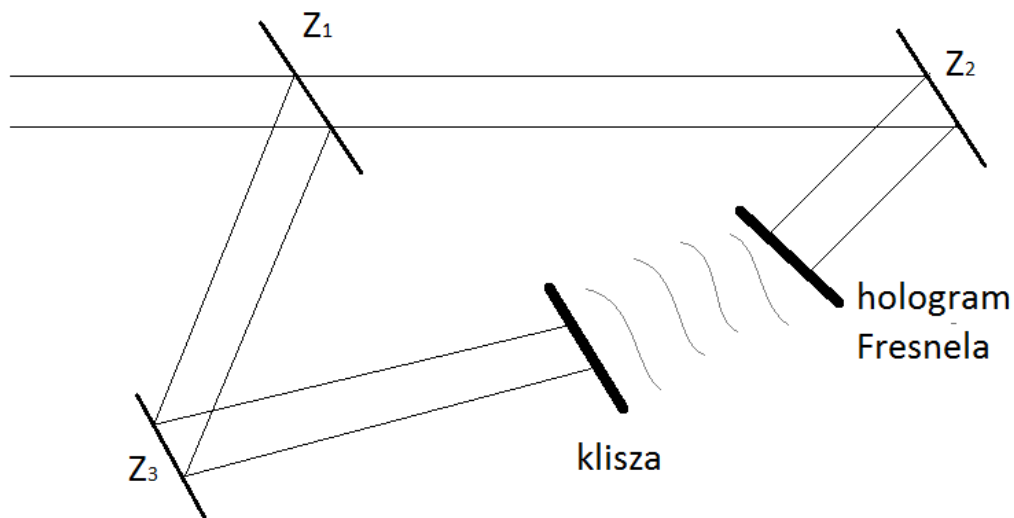
- fala odniesienia i fala oświetlająca obiekt muszą być koherentne (czyli posiadać stałą w czasie różnicę faz), aby mogła zajść interferencja
- drogi optyczne wiązki odniesienia oraz wiązki oświetlającej powinny być równe. Im mniejsza różnica dróg, tym większy kontrast zapisanych prążków interferencyjnych i tym większa wydajność dyfrakcyjna po odtworzeniu hologramu
- obiekt musi być dobrze oświetlony – każdy jego punkt, który chcemy potem obserwować w trakcie odtworzenia hologramu, powinien „emitować” w przybliżeniu falę kulistą
- cały układ powinien być stabilny, jeśli ten warunek nie byłby zachowany to prążki interferencyjne przesunęłyby się i informacje zapisałyby się „jedna na drugiej”, uniemożliwiając ich późniejsze odtworzenie
- natężenia wiązki przedmiotowej oraz wiązki odniesienia powinny być porównywalne

Poniżej przedstawione są dwie konfiguracje do zapisu hologramu grubego. Rys. 4 pokazuje jeden ze sposobów zapisu. Fala płaska przechodzi przez kliszę, odbija się od obiektu i interferuje z falą nieodbitą 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.



Rysunek 4. Bardzo prosty układ do zapisu hologramu grubego

Innym rozwiązaniem jest zapis hologramu objętościowego w sposób dwuetapowy. W pierwszym etapie zapisujemy (cienki/powierzchniowy) hologram Fresnela, a następnie wykorzystujemy go do zapisu hologramu grubego. Zasadę działania przedstawia rys. 5.



Rysunek 5. Układ do zapisu hologramu grubego – II etap

Zwierciadło półprzepuszczalne Z_1 rozdziela falę płaską na dwie, których natężenia są bardzo zbliżone do siebie. Zwierciadła całkowicie odbijające Z_2 służy do skierowania fali płaskiej na gotowy hologram Fresnela, który utworzy obraz rzeczywisty wcześniej zapisanego obiektu w płaszczyźnie kliszy holograficznej. Obraz odtworzony z hologramu Fresnela stanowi wiązkę przedmiotową. Druga wiązka po odbiciu od zwierciadła półprzepuszczalnego Z_1 jest odbijana przez całkowicie odbijające zwierciadło Z_3 i pada na kliszę holograficzną tworząc wiązkę odniesienia.

4. Wykonanie ćwiczenia

Doświadczenie należy przeprowadzić w dwóch etapach.

Część I:

Zapis hologramu cienkiego (Fresnela) o dobrej wydajności dyfrakcyjnej. Rejestracja aparatem cyfrowym obrazów odtworzonych z hologramu cienkiego oświetlonego światłem białym (głównego i sprzężonego).

Część II:

Zapis hologramu grubego (rys. 5). Rejestracja aparatem cyfrowym obrazów odtworzonych z hologramu grubego oświetlonego światłem białym (głównego i sprzężonego).

5. Literatura

1. N. Kamiya, "Rigorous Coupled-Wave Analysis for Practical Planar Dielectric Gratings: 1. Thickness-Changed Holograms and Some Characteristics of Diffraction Efficiency," Appl. Opt. 37, 5843-5853 (1998).
2. Samuel C. Barden ; James A. Arns and Willis S. Colburn, "Volume-phase holographic gratings and their potential for astronomical applications", Proc. SPIE 3355, Optical Astronomical Instrumentation, 866 (1998).