

ĆWICZENIE 5

Sprzężanie fazy

1. Wprowadzenie

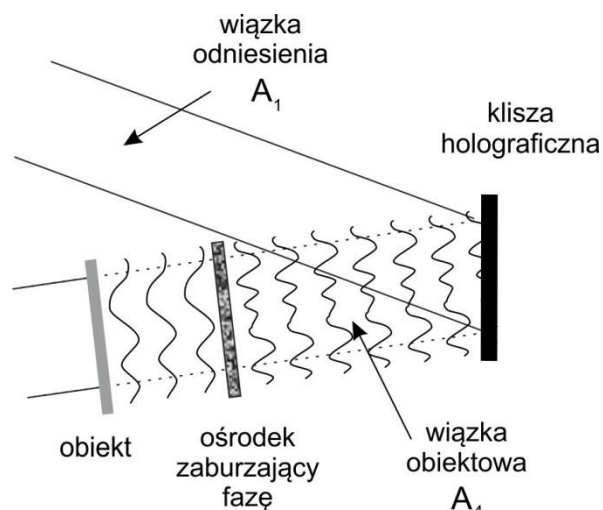
Ćwiczenie polega na praktycznym wykorzystaniu zjawiska sprzężania fazy. Efekt sprzężenia fazy realizowany będzie w sposób holograficzny. Podstawowym zadaniem będzie odtworzenie zapisanego wzorca, który umieszczony zostanie za elementem zaburzającym fazę.

2. Zapis hologramu cienkiego i jego odtworzenie za pomocą sprzężonej wiązki odniesienia

Zapis hologramu polega na zapisie prążków interferencyjnych powstających w wyniku interferencji pomiędzy wiązką odniesienia, a wiązką obiektową. Rozkład natężenia fali świetlnej w płaszczyźnie hologramu można opisać równaniem:

$$I_h = |A_4 + A_1|^2 = (A_4 + A_1)(A_4^* + A_1^*) = |A_4|^2 + |A_1|^2 + A_4A_1^* + A_4^*A_1, \quad (1)$$

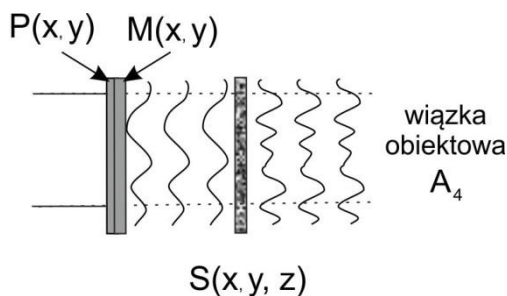
gdzie: $A_1(x, y)$ oraz $A_4(x, y)$ oznaczają amplitudy wiązek obiektowej oraz odniesienia w płaszczyźnie hologramu $z = 0$. Rys. 1 przedstawia schematycznie powstawanie wiązki obiektowej i jej interferencję z wiązką odniesienia.



Rysunek 1. Zapis cienkiego hologramu

Warto zauważyć, że obiekt powinien być dyfuzyjny, a więc może to być w najprostszym przypadku przezroczyste z matówką. Rys. 2 przedstawia część wykorzystywanego układu

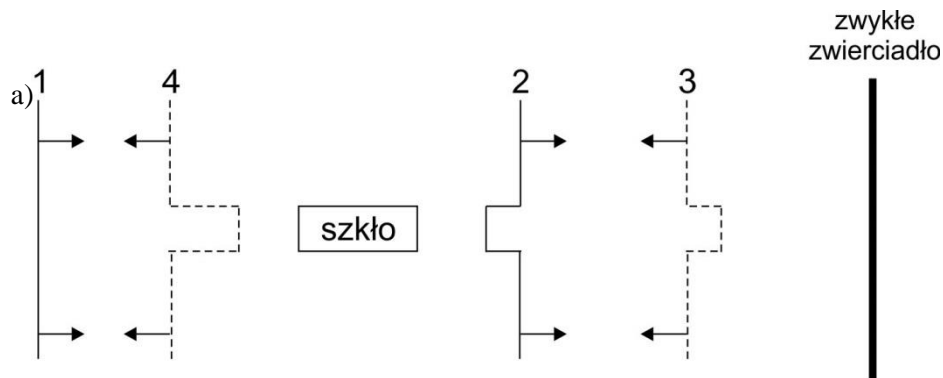
opisującą powstawanie wiązki obiektowej, gdzie: $P(x, y)$ – funkcja przezroczca, $M(x, y)$ – funkcja matówki, $S(x, y, z)$ – funkcja ośrodka zniekształcającego.

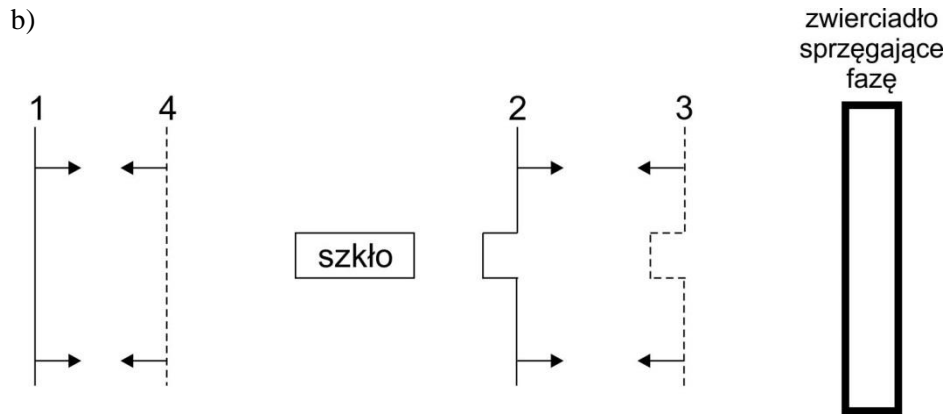


Rysunek 2. Część wykorzystywanego układu – powstawanie wiązki obiektowej

Funkcja $P(x, y)$ oznacza obiekt 2D, który ma być zapisany i odtworzony z hologramu. Obraz $P(x, y)$ jest mnożony przez funkcję losowej fazy $M(x, y)$, czyli matówkę. Iloczyn $P(x, y) \cdot M(x, y)$ po propagacji na zadaną odległość jest mnożony przez drugą funkcję losowej fazy $S(x, y, z)$, która jest niezależna od funkcji $M(x, y)$. Funkcja $S(x, y, z)$ odpowiada elementowi zaburzającemu fazę. Funkcja $M(x, y)$ oraz $S(x, y, z)$ są tak dobrane, aby były losowymi funkcjami fazy $e^{[i\phi_1(x,y)]}$ oraz $e^{[i\phi_2(x,y)]}$, gdzie $\phi_1(x, y)$ oraz $\phi_2(x, y, z)$ są z przedziału $[0; 2\pi]$.

Aby zrozumieć istotę zjawiska wyobraźmy sobie sytuację, w której pewien front falowy („1” na Rys. 3) propaguje się przez ośrodek zaburzający, którym w tym przypadku jest szkło. Ta jego część, która przeszła przez szkło doznała opóźnienia fazowego „2”, więc kształt tego frontu się zmienił. W przypadku, gdy taka fala odbije się od zwykłego zwierciadła to kształt tego frontu falowego nie zmieni się („3” na Rys. 3a – te fragmenty frontu falowego, które były „z przodu” są dalej „z przodu”, a te co były za nimi dalej są za nimi), a jedynie będzie się on poruszał w przeciwną stronę (przeciwbieżnie względem „2”). Przy ponownym przejściu przez ośrodek zaburzający (szkło) front falowy dozna kolejnego opóźnienia i utworzy falę zupełnie inną „4” niż fala początkowo padająca na nasz układ „1”. Natomiast w przypadku odbicia frontu falowego „2” od zwierciadła sprzęgającego fazę – nie dość, że front „3” będzie się poruszał przeciwbieżnie to jeszcze będzie miał sprzężony rozkład fazy względem frontu „2” – fragmenty frontu falowego, które były „z przodu” są teraz z tyłu i na odwrót. Dlatego po ponownym przejściu przez ośrodek zaburzający propagujący się front falowy „4” będzie miał rozkład fazy taki sam jak padający front falowy „1”.



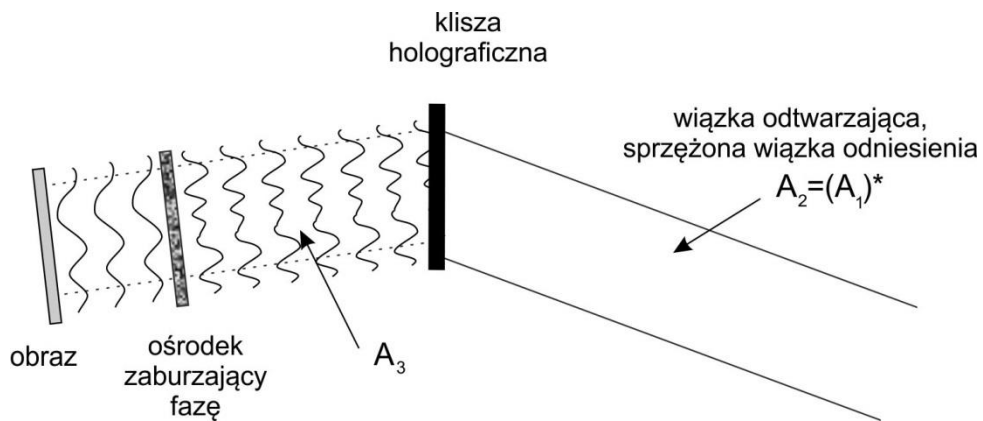


Rysunek 3. Zasada działania a) zwykłego zwierciadła oraz b) zwierciadła sprzęgającego fazę

Wprowadzane przez ośrodek zaburzenie fazowe może zostać zniwelowane poprzez wygenerowanie fali do niego sprzężonej i propagację takiej fali przez ośrodek zaburzący (co schematycznie pokazuje rys. 3, który ilustruje różnicę pomiędzy odbiciem zwykłym oraz sprzężonym).

Należy pamiętać, że w przypadku klasycznych zwierciadeł padający front falowy jest odbijany w taki sposób, że po odbiciu otrzymujemy front falowy wyglądający tak samo jak przed odbiciem, czyli tak jakby nie było zwierciadła na drodze propagacji, ale propaguje się on przeciwbieżnie. Gdybyśmy odbili front falowy od zwierciadła „sprzęgającego fazę”, front odbity byłby identyczny z frontem padającym. Falą sprzężoną do fali sferycznej rozbieżnej jest fala sferycznie zbieżna o tym samym promieniu krzywizny. W przypadku fali płaskiej, falą sprzężoną będzie fala płaska propagująca się w przeciwną stronę (będzie względem niej przeciwbieżna).

W przypadku rekonstrukcji zapisanego hologramu, tak aby wiązka odtwarzająca była sprzężona do wiązki odniesienia, musi on być oświetlony jedną wiązką odtwarzającą $A_2(x, y)$ przeciwbieżną do wiązki odniesienia i padającą na hologram z prawej strony.



Rysunek 4. Optyczne odtworzenie hologramu cienkiego

Odtwarzając hologram wiązką $A_2(x, y)$, która ma sprzężoną fazę do wiązki odniesienia $A_1(x, y)$, otrzymujemy zależność $A_2 = A_1^*$, a więc pole po lewej stronie hologramu jest w takiej sytuacji opisane wzorem:

$$A_3 = TA_2 \propto (|A_4|^2 + |A_1|^2 + A_4A_1^* + A_4^*A_1)A_1^* = (|A_4|^2 + |A_1|^2)A_1^* + (A_1^*)^2A_4 + |A_1|^2A_4^* \quad (2)$$

Pierwszy składnik w zależności (2): $(|A_4|^2 + |A_1|^2)A_1^*$ - jest proporcjonalny do pola $A_2 = A_1^*$.

W przypadku cienkiego hologramu możemy powiedzieć, że składnik $(A_1^*)^2A_4$ ma czynnik fazowy $e^{[-i(2\vec{k}_1 - \vec{k}_4) \cdot \vec{r}]}$, w którym faza jest niedopasowana. Interesuje nas składnik $|A_1|^2A_4^* = |A_1A_2|A_4^* \propto A_3$, który dla $z < 0$ odpowiada „odwróceniu czasowemu” sprzężonej fazy wiązki obiektowej A_4 .

3. Realizacja sprzężenia fazowego

Jeśli rozumiemy już ideę zapisu i odczytu hologramu cienkiego przejdźmy teraz do części, w której przedstawiona zostanie idea wykorzystywana w naszym ćwiczeniu, a mianowicie realizacja sprzężenia fazowego. Wiązka propagująca się przez ośrodek zaburzający fazę w kierunku z powoduje zaburzenie frontu falowego opisane następującym równaniem:

$$E_1(\vec{r}, t) = \text{Re}[\Psi(\vec{r})e^{i(\omega t - kz)}] = \text{Re}[A_1(\vec{r})e^{i\omega t}]. \quad (3)$$

Zależność pomiędzy Ψ oraz \vec{r} odzwierciedla modulację przestrzenną frontu falowego pochodzącego od informacji wejściowej, efektów zniekształceń oraz dyfrakcji. W niektórych obszarach przestrzeni bliskich odległości z_0 wygenerowane zostanie pole $E_2(\vec{r}, t)$, które lokalnie można by było opisać przez:

$$E_2(\vec{r}, t) = \text{Re}[\Psi^*(\vec{r})e^{i(\omega t + kz)}] = \text{Re}[A_2(\vec{r})e^{i\omega t}]. \quad (4)$$

Wówczas $A_2(\vec{r}) = A_1^*(\vec{r})$ dla każdego $z < z_0$.

Pole $E_2(\vec{r}, t)$ nazwa się zespolonym sprzężeniem pola $E_1(\vec{r}, t)$. Sprzężanie fazy oznacza zmianę znaku w funkcji eksponencjalnej, ale aby otrzymać pole E_2 z pola E_1 należy wziąć pod uwagę tylko sprzężenie części przestrzennej, pozostawiając czynnik $e^{i\omega t}$ bez zmian.

Aby docenić praktyczne konsekwencje sprzężenia fazy, rozważmy pole E_1 propagujące się od lewej do prawej strony poprzez ośrodek zaburzający fazę. Powoduje to utratę przez front falowy wszelkiej dotychczasowej informacji o modulacji fazy jaką mógłby ten front nieść lub też powoduje nabycie niepożądanych właściwości przestrzennych rozkładu jego fazy. W skutek tego nie jesteśmy w stanie powiedzieć jaki był kształt frontu falowego przed przejściem przez ośrodek zaburzający. Jeśli jednak zostanie wygenerowane pole E_2 będące zespolonym sprzężeniem pola przechodzącego przez ośrodek zaburzający, wówczas taki front falowy przejdzie przez ośrodek rozpraszający w przeciwną stronę, co spowoduje odtworzenie wartości pola E_1 . W ten sposób możliwe jest odtworzenie oryginalnej i niezaburzonej postaci wejściowego frontu falowego.

Powyższe założenia mogą być zweryfikowane poprzez rozważenie propagacji wiązki optycznej $E_1(\vec{r}, t) = \text{Re}[\Psi(\vec{r})e^{i(\omega t - kz)}]$. Należy założyć, że propagacja odbywa się od lewej

do prawej strony przez „atmosferę”, której stała dielektryczna ma wartość $\varepsilon(\vec{r})$. Skalarne równanie falowe ma zatem następującą postać:

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu \varepsilon(\vec{r}) E = 0. \quad (5)$$

Podstawiając (3) otrzymujemy:

$$\nabla^2 \Psi + [\omega^2 \mu \varepsilon(\vec{r}) - k^2] \Psi - 2ik \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Sprężenie zespolone (6) jest zatem opisane zależnością:

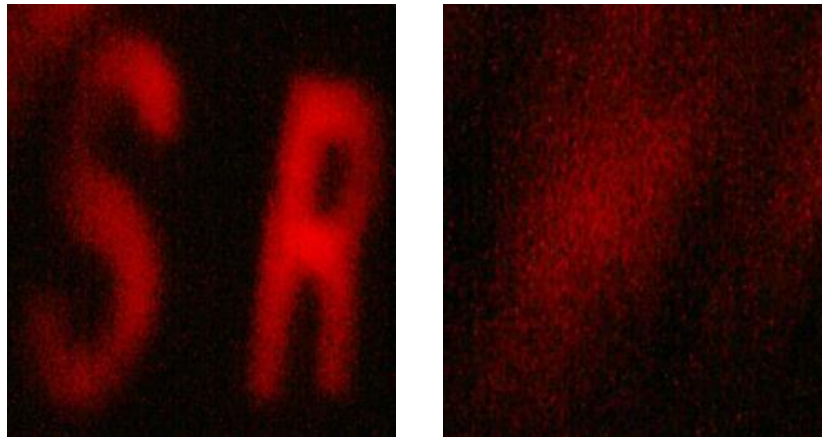
$$\nabla^2 \Psi^* + [\omega^2 \mu \varepsilon(\vec{r}) - k^2] \Psi^* + 2ik \frac{\partial \Psi^*}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

i może być postrzegane jako równanie fali opisującej propagację wiązki: $E_2(\vec{r}, t) = \text{Re}[\Psi^*(\vec{r})e^{i(\omega t + kz)}]$. Propaguje się ona w kierunku $(-z)$, czyli przeciwbieżnie do $E_1(\vec{r}, t)$ i posiada w każdym punkcie zespoloną amplitudę równą sprzężeniu zespolonemu $E_1(\vec{r}, t)$.

Taki związek pomiędzy obiema falami umożliwia odseparowanie efektów zniekształcających front falowy pochodzący od obiektu poprzez odtworzenie hologramu wiązką sprzężoną do wiązki odniesienia.

4. Wykonanie ćwiczenia

Hologram zapisywany jest za pomocą dwóch wiązek – przedmiotowej i odniesienia. Bardzo ważnym elementem podczas ustawiania układu jest to, aby wiązka odniesienia oraz wiązka odtwarzająca były dokładnie przeciwbieżne. Po naświetleniu i obróbce chemicznej należy zasłonić wiązki przedmiotową oraz odniesienia oraz odsłonić wiązkę przeciwbieżną do wiązki odniesienia. Dzięki tej wiązce odtworzy nam się hologram w miejscu, gdzie znajdował się obiekt. Klisza holograficzna podczas zapisu i obróbki chemicznej będzie znajdowała się w uchwycie umożliwiającym jej wywołanie bez poruszenia kliszą (na tzw. szubienicy). W przypadku nie poruszenia kliszy w miejscu obiektu zaobserwujemy bardzo dobrej jakości obraz (przykładowy obraz pokazuje rys. 5a). Po wyjęciu z układu elementu zaburzającego fazę zaobserwujemy obraz, który pokazuje rys. 5b. Nastąpiło rozmazanie obrazu i nie będziemy potrafili powiedzieć jaki obiekt był holografowany.

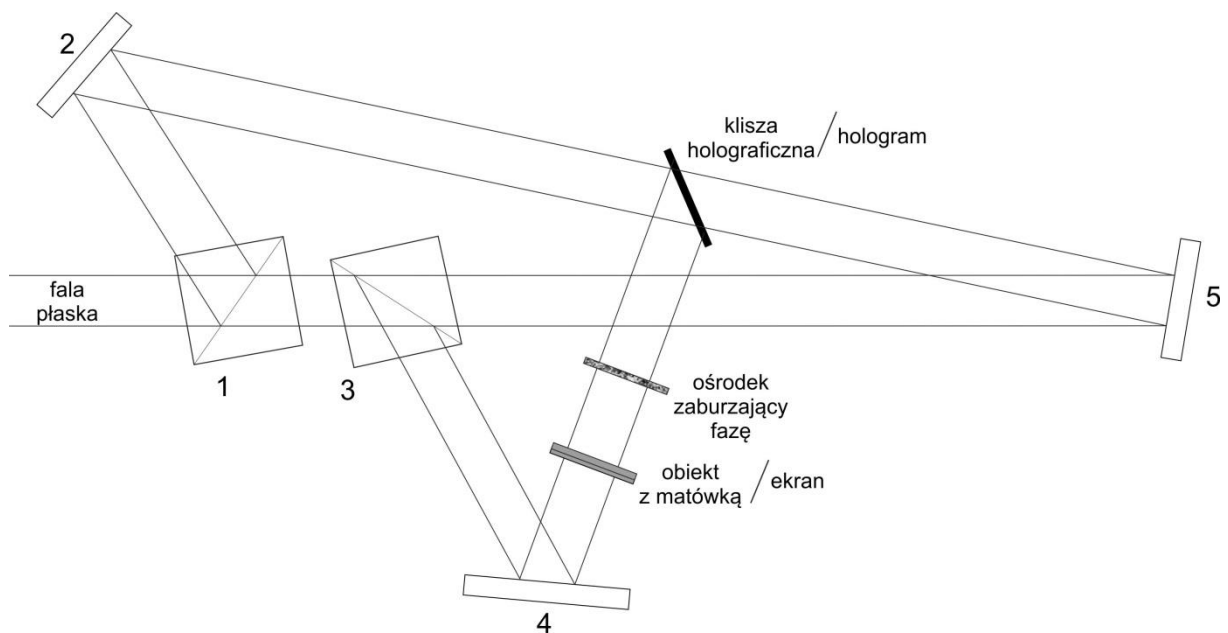


Rysunek 5. Obraz odtworzony z hologramu
 a) gdy wiązka tworząca obraz przechodzi z powrotem przez ośrodek zaburzający fazę
 b) gdy wiązka tworząca obraz nie przechodzi przez ośrodek zaburzający fazę

Schematy układów:

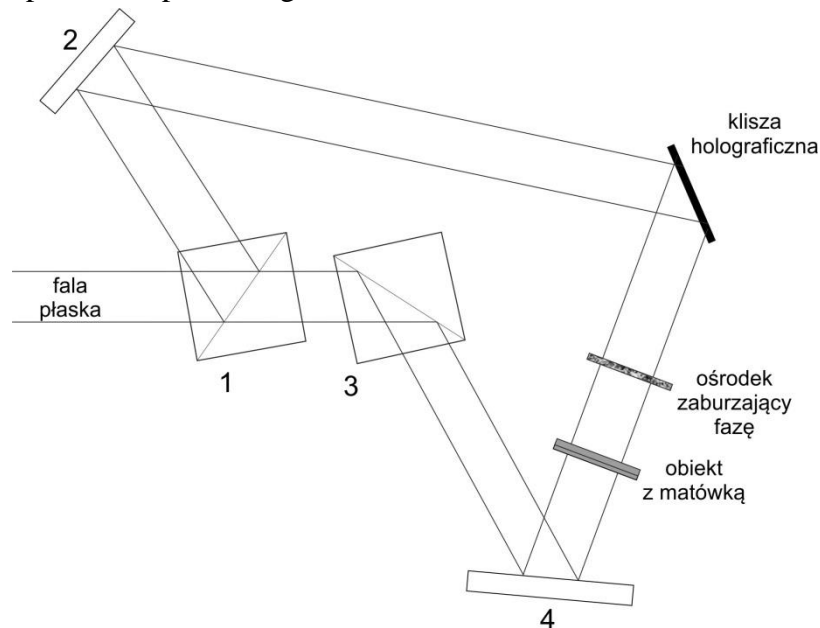
Rys. 6 przedstawia schemat układu do zapisu hologramu i jego odtworzenia za pomocą wiązki sprzężonej. Układ trzeba od początku precyzyjnie ustawić biorąc pod uwagę, że wiązka odtwarzająca musi być przeciwbieżna do wiązki odniesienia. W układzie na rys. 6:

- „2”, „4”, „5” są zwierciadłami 100%,
- „3” jest zwierciadłem 50%,
- „1” jest zwierciadłem 0%.



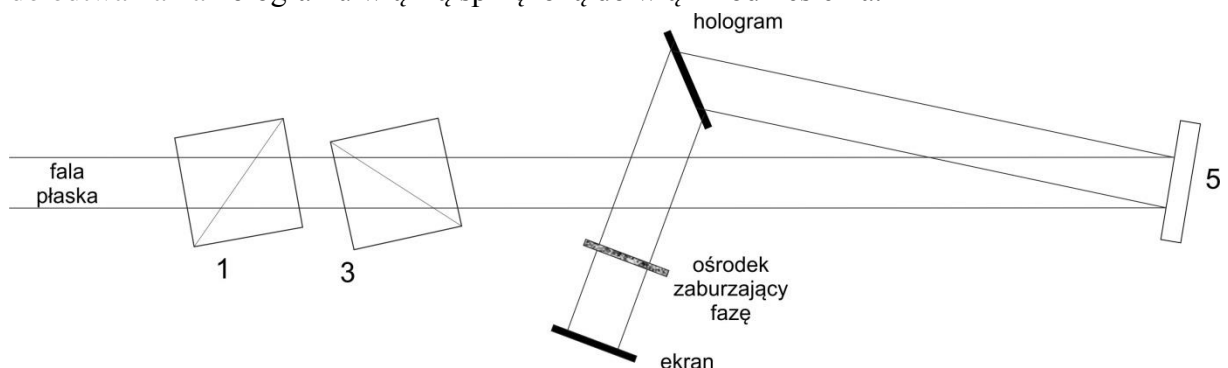
Rysunek 6. Schemat układu do zapisu hologramu i jego odtworzenia za pomocą wiązki sprzężonej do wiązki odniesienia

Rys. 7 przedstawia część układu, która podczas wykonywania ćwiczenia zostanie wykorzystana do procesu zapisu hologramu.



Rysunek 7. Schemat układu do rejestracji hologramu

Natomiast rys. 8 przedstawia tę część układu, która zostanie wykorzystana do odtwarzania hologramu wiązką sprzężoną do wiązki odniesienia.



Rysunek 8. Schemat układu do odtwarzania hologramu

UWAGA!!! Podczas wykonywania ćwiczenia należy wziąć pod uwagę następujące fakty:

- Ustawienie układu należy rozpocząć od wypoziomowania wiązki laserowej przechodzącej przez zwierciadła oraz wiązki odbitej od nich. Po zbadaniu równoległości wiązki względem stołu można rozpocząć ustawianie docelowego układu.
- Pierwszą czynnością, jaką można wykonać po zbadaniu równoległości wiązek, jest ustawienie odpowiedniego kąta pomiędzy wiązką odniesienia, a wiązką przedmiotową ($\alpha < 30^\circ$).
- Następujące elementy układu (1)-(3)-(5) powinny być ustawione w miarę możliwości w linii prostej. Prawie w tej samej linii powinna się znajdować również klisza holograficzna, aby umożliwić ustawienie przeciwbieżnej do odniesienia wiązki

odtworzącej i kąta pomiędzy wiązkami przedmiotową a odniesienia nie większego niż 30° .

- Następnie można przystąpić do ustawienia odpowiednich długości dróg optycznych. Dla ułatwienia można przyjąć, że wszystkie 3 drogi: przedmiotowa, odniesienia, odtwarzająca powinny mieć taką samą długość.
- Wiązka przechodząca przez zwierciadło (3) przed odbiciem od zwierciadła (5) musi ominąć kliszę holograficzną.
- Wiązka omijająca kliszę holograficzną, po odbiciu od zwierciadła (5) powinna przejść przez płytkę holograficzną i pokryć się z wiązką odniesienia w tym samym miejscu na lustrze (2). Położenie tej wiązki regulujemy śrubami przy zwierciadłach (2) i (5).
- Zwierciadło (5) za kliszą powinno posiadać łatwą regulację położenia w płaszczyźnie pionowej wykorzystującą sprężynę.
- Podczas pojawienia się wielu odbić na kliszy holograficznej, należy przeanalizować czy dobre wiązki zostały wykorzystane (na kliszy mogą pojawić się zbędne odbicia od kliszy).
- Podczas naświetlenia wiązka odtwarzająca musi być zasłonięta.
- Podczas odtwarzania hologramu wiązka przedmiotowa oraz wiązka odniesienia są zasłonięte.

UWAGA!!! Podstawowe warunki zapisu hologramu muszą być spełnione:

- Wyrównane drogi optyczne wiązek przedmiotowej i odniesienia od chwili ich podziału do połączenia się na powierzchni kliszy holograficznej.
- Stabilność mechaniczna całego układu.
- Wyrównane natężenia obu interferujących wiązek.
- Kąt pomiędzy wiązkami: przedmiotową i odniesienia, padającymi na emulsję holograficzną, nie powinien przekraczać 30° .

5. Literatura

1. A. Yariv, „Phase Conjugate Optics and Real-Time Holography”, IEEE journal of quantum electronics QE-14, 650-660 (1978).
2. G. Unnikrishnan, J. Joseph, K. Singh, „Optical encryption system that uses phase conjugation in photorefractive crystal,” Appl. Opt. 37, 8181-8185 (1998).
3. J. Joseph, K. Singh, P. K. C. Pillai, „A New Phase-Conjugate One-Way Scheme for Phase-Distortion Correction,” Appl. Phys. B 51, 219-221 (1990).