

HOLOGRAFIA

SPIS TREŚCI

Cel ćwiczenia	2
Proponowany ogólny program ćwiczenia	2
Literatura	2
Zasady BHP	2
INTERFEROMETRIA	
Interferometria – badanie spójności światła	3
Przebieg ćwiczenia i opracowanie wyników – interferometria	6
HOLOGRAFIA	
Wprowadzenie do holografii	7
Podstawy holografii	8
Rejestracja hologramu transmisyjnego (metoda Leitha Upatnieksa)	8
Odtwarzanie hologramu transmisyjnego	9
Holografia objętościowa	10
Rodzaje siatek holograficznych	11
Materiały fotograficzne i ich obróbka fotochemiczna	11
Podstawowe zasady wykonywania hologramów	13
Przebieg ćwiczenia – holografia	14
Uwagi dotyczące zeszytu laboratoryjnego	14
Wskazówki do zadania 3	15

CEL ĆWICZENIA

Ćwiczenie jest doświadczeniem z dziedziny interferometrii oraz rejestracji obrazów trójwymiarowych. W trakcie ćwiczenia konstruowany jest interferometr Michelsona, pozwalający na wykonanie pomiarów parametrów spektralnych światła z lasera He-Ne. Mierzona tu droga spójności lasera jest bardzo istotnym parametrem, wpływającym na jakość wykonywanych w kolejnych częściach ćwiczenia hologramów typu transmisyjnego (klasycznego i cyfrowego) oraz objętościowego.

W ćwiczeniu używany jest laser He-Ne, zestaw elementów optycznych (lustra, soczewki, filtry, płytki światłodzielące), a w holografii również klisze fotograficzne o podwyższonej zdolności rozdzielczej oraz odczynniki chemiczne do obróbki klisz fotograficznych. Bezpośrednie cele tego ćwiczenia to:

1. Skonstruowanie interferometru Michelsona i pomiar parametrów spektralnych światła laserowego.
2. Zapoznanie się z zasadami i techniką rejestracji hologramów – rejestracja hologramów: transmisyjnego i opcjonalnie objętościowego.
3. Odtwarzanie obrazów z hologramów otrzymanych powyższymi metodami.
4. Rejestracja i komputerowe odtwarzanie hologramów cyfrowych (ćwiczenie opisane w osobnej instrukcji).

PROPONOWANY OGÓLNY PROGRAM ĆWICZENIA

- pierwszy tydzień: zestawienie interferometru Michelsona i pomiar drogi spójności lasera,
- drugi tydzień: wykonanie i odtwarzanie hologramu transmisyjnego oraz opcjonalnie hologramu objętościowego,
- trzeci tydzień: rejestracja i odtwarzanie hologramu cyfrowego (osobna instrukcja Z28B).

Szczegółowy plan pracy jest podany na stronach 6 (interferometria) i 14 (holografia).

LITERATURA

(numeracja identyczna jak w skróconej instrukcji do ćwiczenia Z28). Wszystkie poniższe materiały można ściągnąć ze strony Pracowni, po zalogowaniu się.

- [2] P. Hlubina, *Temporal coherence and mode structure of the He-Ne laser beam spectrum*, Opto-Electr. Rev. **4**, 117 (1996)
- [3] W. Demtröder, *Spektroskopia laserowa* (Wydawnictwo Naukowe PWN 1993) – spójność światła
- [4] B. Hariharan, *Basics of Holography* (Cambridge University Press 2002)
- [5] J. R. Meyer-Arendt, *Wstęp do optyki* (PWN 1977) – holografia: teoria, technika, zastosowania

W zrozumieniu zagadnień mogą pomóc artykuły:

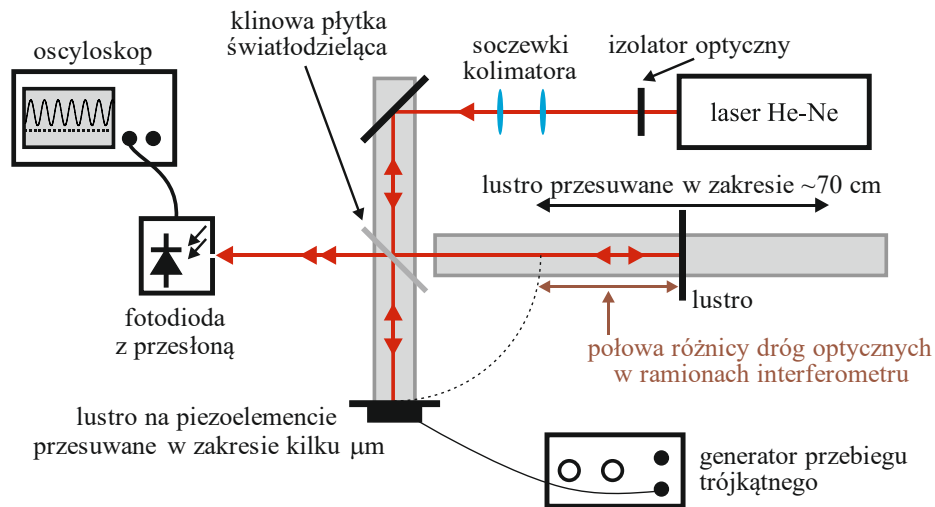
T. Kawalec, *Interferencja światła – kiedy możemy ją zaobserwować?* część I i II w numerach 150 oraz 151/152 czasopisma Foton.

ZASADY BHP

- **Nie wolno patrzeć wprost w wiązkę laserową!** Może to spowodować trwałe uszkodzenie oka. Powyższa uwaga jest szczególnie istotna przy oglądaniu hologramów transmisyjnych.
- Należy pamiętać, że równie niebezpieczne może być światło z lasera odbite od lusterek, ale też pierścionków, bransoletek i zegarków.
- **Zaleca się używanie okularów ochronnych będących na wyposażeniu zestawu eksperymentalnego.**

INTERFEROMETRIA – BADANIE SPÓJNOŚCI ŚWIATŁA

Spójność czasową światła laserowego, bardzo istotną z punktu widzenia holografii, można badać przy pomocy interferometru Michelsona. Jego schemat, wraz z uproszczonym biegiem wiązki, jest przedstawiony na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru spójności czasowej lasera He-Ne. Wiązka powracająca z interferometru w stronę lasera powinna trafiać w środek izolatora optycznego.

Wiązka światła lasera He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$) przechodzi przez izolator optyczny, układ kolimacyjny złożony z dwóch soczewek płasko-wypukłych i odbita od płaskiego zwierciadła pada na dzielnik wiązki, tzw. płytkę światłodzielną w postaci płytki klinowej. Na każdej z jej powierzchni część światła (kilka procent) ulega odbiciu, a reszta przechodzi na wprost, zmieniając jedynie nieco kierunek swojego biegu. Wiązki odbite od klina propagują w kierunku lustra zamontowanego na ławie optycznej, a przechodząca pada na lustro zamocowane na elemencie piezoelektrycznym. Następnie, wiązki odbite od lusterek propagują wstecz, w kierunku płytki światłodzielną. Wiązki odbita i przechodząca w kierunku detektora nakładają się i interferują ze sobą na wyjściu z interferometru. Natężenie światła na wyjściu interferometru Michelsona dla światła monochromatycznego przyjmuje postać (patrz np. wykład i ćwiczenia z optyki):

$$I(\Delta x) = I_0(1 + \cos k\Delta x), \quad (1)$$

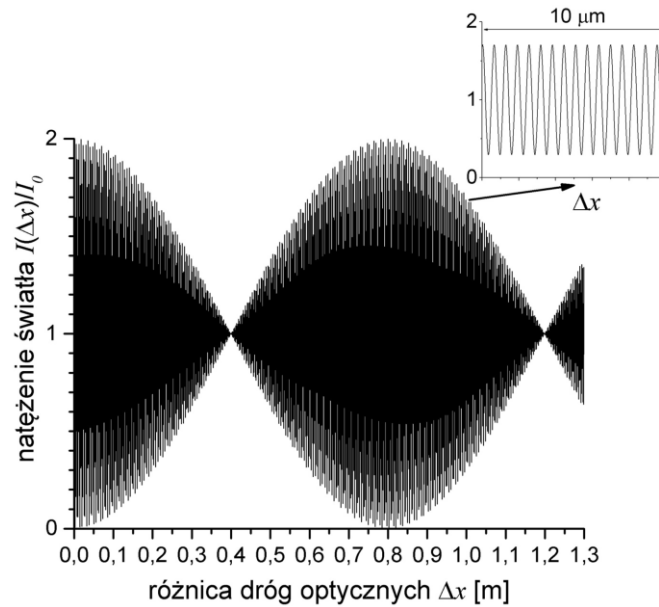
gdzie I_0 to natężenie światła laserowego na wejściu interferometru, Δx to różnica dróg optycznych w ramionach interferometru, a k to długość wektora falowego światła. W przypadku światła laserowego o **dwóch modach podłużnych** (wektory falowe mają długości k_1 i k_2 , a częstotliwości to ω_1 i ω_2), amplituda pola elektrycznego na wyjściu interferometru może być zapisana jako:

$$E(x, \Delta x, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 (\cos(k_1 x - \omega_1 t) + \cos(k_2 x - \omega_2 t) + \cos(k_1 x - \omega_1 t + k_1 \Delta x) + \cos(k_2 x - \omega_2 t + k_2 \Delta x)). \quad (2)$$

Dwa czynniki $1/\sqrt{2}$ uwzględniają podział wiązki wejściowej na dzielniku interferometru oraz zakładany równy podział natężenia światła I_0 między dwoma modami podłużnymi. E_0 to amplituda pola elektrycznego na wejściu interferometru, a oś x jest skierowana wzdłuż wiązek opuszczających interferometr. Pamiętajmy przy tym, że $I_0 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |\vec{E}_0|^2$ i ogólnie $I = \epsilon_0 c |\vec{E}|^2$. We wzorze (2) pominięto zapis wektorowy, ze względu na to, że polaryzacje interferujących wiązek są tu takie same. Po podniesieniu $E(\Delta x, t)$ do kwadratu, wykonaniu średniowania po czasie i odpowiednich przekształceniach, otrzymujemy (proszę przeliczyć):

$$I(\Delta x) = I_0 \left(1 + \cos \Delta x \frac{k_1 + k_2}{2} \cos \Delta x \frac{k_1 - k_2}{2} \right). \quad (3)$$

Pierwsza funkcja cosinus odpowiada za bardzo szybkie zmiany natężenia wraz ze zmianami różnicy dróg optycznych Δx i opisuje powstawanie prążków interferencyjnych. Z kolei druga funkcja cosinus zmienia się powoli z Δx i moduluje widzialność (kontrast) tych prążków.

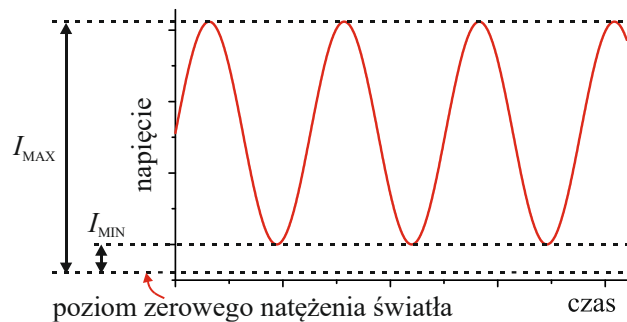


Rys. 2. Natężenie światła na wyjściu interferometru Michelsona w funkcji różnicy dróg optycznych Δx dla światła z dwumodowego lasera He-Ne.

Ze wzoru (3) widać, że prążki znikają w pierwszej kolejności, gdy $\Delta x(k_2 - k_1)/2 = \pi/2$. Wartość Δx spełniająca ten warunek jest nazywana drogą spójności światła. Po krótkich przekształceniach i skorzystaniu ze wzoru na przedział dyspersji (v_{FSR} , *free spectral range* – FSR) rezonatora laserowego o długości d ($v_{FSR} = c/2d$), warunek ten przyjmuje postać $\Delta x = d$. Natężenie światła opisane wzorem (3) jest przedstawione na Rys. 2 w funkcji różnicy dróg optycznych Δx dla $d = 40$ cm.

W celu opisu stopnia spójności źródła światła definiuje się wielkość zwaną kontrastem lub widzialnością prążków interferencyjnych postaci:

$$V(\Delta x) = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}}, \quad (4)$$



gdzie I_{MAX} to największe, a I_{MIN} to najmniejsze natężenie światła w prążku interferencyjnym, dla danej różnicy dróg optycznych Δx . Widzialność zmienia się w przedziale od 1 do 0, przy czym dla $V = 1$ mamy do czynienia ze źródłem całkowicie spójnym, a w przypadku $V = 0$ ze źródłem niespójnym. We wszystkich pozostałych przypadkach mówimy o źródłach częściowo spójnych.

Można pokazać (patrz [3] i [2]), że kontrast prążków interferencyjnych V jest równy modułowi tak zwanej funkcji stopnia spójności $|\gamma(\Delta x)|$ światła badanego interferometrem. Przy założeniu, że natężenie interferujących wiązek jest sobie równe, postać tej funkcji dla dowolnej liczby N modów podłużnych lasera jest następująca:

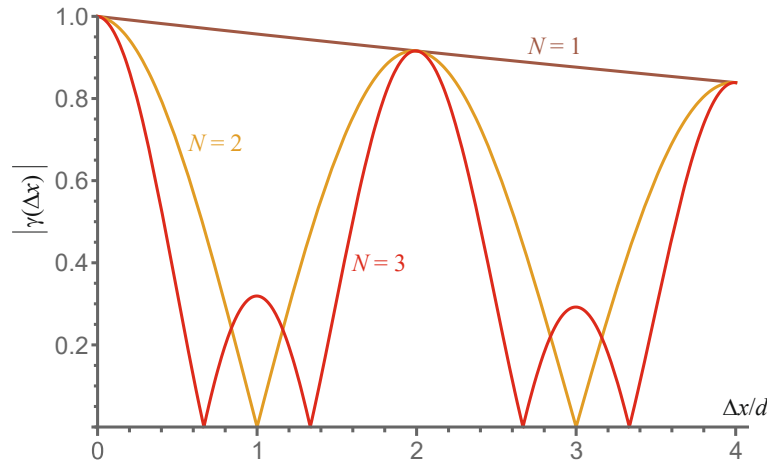
$$V(\Delta x) = |\gamma(\Delta x)| = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \exp\left(-\frac{\Gamma|\Delta x|}{c}\right) \exp\left(-in \frac{2\pi v_{FSR} \Delta x}{c}\right) \exp\left(-i\omega_0 \frac{\Delta x}{c}\right) \right|, \quad (5)$$

gdzie ω_0 to częstość środkowego modu podłużnego lasera, a Γ to szerokość spektralna pojedynczego modu w sensie krzywej Lorentza. Gdy liczymy interesujący nas moduł $|\gamma(\Delta x)|$, dla jednego modu ($N = 1$) otrzymujemy jedynie eksponencjalny zanik, a dla $N = 2$ i $N = 3$ dostajemy odpowiednio:

$$|\gamma(\Delta x)| = \exp\left(-\frac{\Gamma|\Delta x|}{c}\right) \left|\cos\left(\pi \frac{\Delta x}{2d}\right)\right| \text{ oraz} \quad (6)$$

$$|\gamma(\Delta x)| = \frac{1}{3} \exp\left(-\frac{\Gamma|\Delta x|}{c}\right) \left|1 + 2 \cos\left(\pi \frac{\Delta x}{d}\right)\right|. \quad (7)$$

Funkcja (5) jest przedstawiona na Rys. 3 dla 1, 2 i 3 modów:

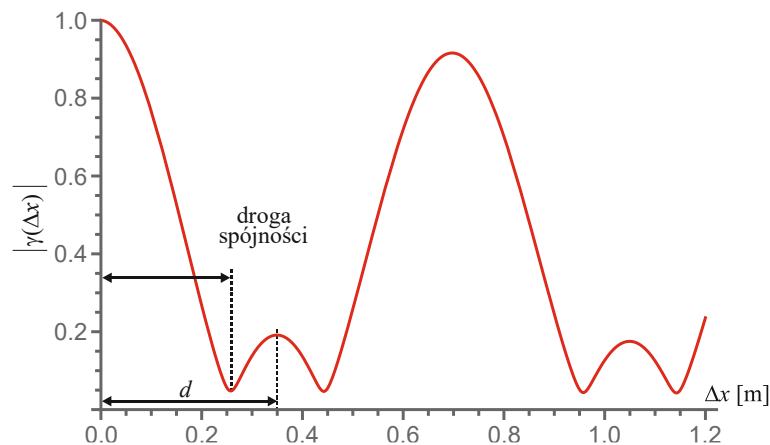


Rys. 3. Moduł funkcji spójności $|\gamma(\Delta x)|$ dla liczby modów równej 1, 2 i 3.

W praktyce okazuje się jednak, że sytuacja jest bardziej skomplikowana, gdyż natężenia poszczególnych modów podłużnych lasera nie są sobie równe. Po uwzględnieniu tego faktu funkcja (5) przyjmuje dla trzech modów postać:

$$V(\Delta x) = |\gamma(\Delta x)| = \left| \frac{1}{3} \sum_{n=-1}^1 A_n \exp\left(-\frac{\Gamma|\Delta x|}{c}\right) \exp\left(-in \frac{2\pi \nu_{FSR} \Delta x}{c}\right) \right|, \quad (8)$$

gdzie A_n to względne natężenia modów, sumujące się do 3. Przykładowy przebieg funkcji (8) jest przedstawiony na Rys. 4.



Rys. 4. Moduł funkcji spójności $|\gamma(\Delta x)|$ dla liczby modów równej 3 oraz względnych natężeń modów wynoszących: $A_{-1} = 0.8$, $A_0 = 1.2$, $A_{+1} = 1.0$.

Zwróćmy jeszcze uwagę, że w tym ćwiczeniu obserwujemy prążki interferencyjne powstające w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji wiązek wychodzących z interferometru. Korzystamy przy tym z delikatnej rozbieżności wiązek oraz ich nieidealnej równoległości – niewielkie zmiany Δx pojawiają się „automatycznie”, ze względu na geometrię propagacji wiązek.

PRZEBIEG ĆWICZENIA I OPRACOWANIE WYNIKÓW – INTERFEROMETRIA

1. Proszę zestawić i wyjustować interferometr tak, aby obie wiązki wychodzące z interferometru w kierunku fotodiody jak najlepiej się pokrywały – na całej długości. Należy ponadto zadbać, aby wiązki biegły poziomo względem stołu optycznego oraz równoległe do ław optycznych. Jednocześnie należy zwrócić uwagę na to, aby wiązka powracająca z interferometru w stronę lasera padała dokładnie na środek izolatora optycznego (czyli na jego okienko).
2. Proszę precyzyjnie wstawić fotodiode w tor wiązek oraz włączyć generator sterujący piezoelementem i dojustować interferometr tak, aby na oscyloskopie podłączonym do fotodiody były widoczne wyraźne prążki o jak największym kontraście.
3. Proszę zaobserwować, jaki wpływ na stabilność prążków mają drgania mechaniczne układu.
4. W celu zbadania stopnia spójności światła laserowego należy, zgodnie ze wzorem (4), wyznaczyć kontrast prążków interferencyjnych w funkcji różnicy dróg optycznych i przedstawić w postaci wykresu. Zmianę różnicy dróg optycznych zapewniamy przesuwając lustro interferometru wzdłuż ławy optycznej w zakresie 0-70 cm. **Po przesunięciu lustra zazwyczaj jest konieczne delikatne dojustowanie układu tak, aby kontrast prążków był w danej sytuacji maksymalny.** Otrzymany wykres zmian kontrastu zazwyczaj przypomina kształtem ten z Rys. 4.
5. Nie jest konieczne zapisywanie wszystkich przebiegów z oscyloskopu – wystarczy do sprawozdania zarejestrować dwa przykładowe, a parametry prążków odczytywać bezpośrednio z ekranu, na przykład używając kursorów. Dobre parametry startowe to: częstotliwość generatora 10 Hz, amplituda 50-100; podstawa czasu oscyloskopu 10 ms, czułość 500 mV/div.

I_{MAX} i I_{MIN} ze wzoru (4) należy wyznaczać względem sygnału z fotodiody przy zasłoniętej wiązce lasera (czyli z uwzględnieniem tła od światła rozproszonego). W praktyce jest to poziom bardzo bliski 0 V.

6. Zamiast fotodiody można tymczasowo wstawić soczewkę rozpraszającą, a prążki interferencyjne obserwować wprost na ekranie, umieszczonym około 2 m za soczewką. Proszę wykonać aparatem zdjęcia tych prążków – dla przypadku maksymalnego i minimalnego kontrastu prążków i zamieścić te zdjęcia w sprawozdaniu.
7. Do danych eksperymentalnych albo dopasowujemy wprost funkcję (8) np. w programie *Mathematica*, albo korzystamy z postaci przekształconej:

$$V(\Delta x) = \frac{A_0}{3} \exp\left(-\frac{\Gamma|\Delta x|}{c}\right) \sqrt{1 + \tilde{A}_{+1}^2 + \tilde{A}_{-1}^2 + 2(\tilde{A}_{+1} + \tilde{A}_{-1}) \cos\left(\frac{\pi\Delta x}{d}\right) + 2\tilde{A}_{+1}\tilde{A}_{-1} \cos\left(\frac{2\pi\Delta x}{d}\right)}, \quad (9)$$

gdzie $\tilde{A}_{+1} = A_{+1}/A_0$, a $\tilde{A}_{-1} = A_{-1}/A_0$.

Z dopasowania znajdujemy parametry d , Γ oraz względne natężenia modów A_n . Z długości rezonatora lasera d wyliczamy ν_{FSR} oraz szacujemy drogę spójności światła.

8. Na bazie znalezionych wartości ν_{FSR} oraz A_n odtwarzamy strukturę modową lasera. Chociaż mamy do dyspozycji także wartość Γ , to jednak w tych pomiarach nie jest ona wiarygodna (dlaczego?).
9. W sprawozdaniu zamieszczamy opis i schemat interferometru oraz krótko omawiamy właściwości promieniowania laserowego. Następnie przedstawiamy przykładowe zdjęcia uzyskanych prążków interferencyjnych oraz otrzymane wyniki pomiarów kontrastu prążków, wraz z dwoma przykładowymi przebiegami z oscyloskopu oraz dopasowaną funkcją (8) lub (9) i znalezionymi parametrami Γ , ν_{FSR} , A_n , d (z niepewnościami) oraz oszacowaną drogą spójności światła. Rozwiązanie zadania 1 zamieszczamy w Dodatku.

WPROWADZENIE DO HOLOGRAFII

Holografie można zdefiniować jako proces zbierania i magazynowania informacji optycznej o trójwymiarowym przedmiocie w emulsji fotograficznej. W zwykłej fotografii rejestruje się wyłącznie rozkład natężenia (amplitudy) fali przedmiotowej. Tracona jest jednak informacja o drogach optycznych do różnych części przedmiotu, co stanowi o głębi przedmiotu i jego trójwymiarowym postrzeganiu. Cechą charakterystyczną holografii jest rejestracja zarówno rozkładu amplitudy jak i fazy fali przedmiotowej. Ponieważ wszystkie materiały fotograficzne reagują tylko na natężenie fali, wobec tego konieczna jest zamiana informacji o zmianach fazy na zmiany natężenia. Uzyskuje się to poprzez wprowadzenie dodatkowej wiązki światła, zwanej referencyjną i pochodzącej z tego samego, co wiązka przedmiotowa, źródła światła spójnego. Informacja o relacji pomiędzy fazami wiązki przedmiotowej i referencyjnej zapisywana jest w postaci obrazu interferencyjnego.

Ponieważ w każdym punkcie interferogramu natężenie zależy również od fazy wiązki przedmiotowej, to powstały hologram zawiera informację i o fazie, i o amplitudzie fali przedmiotowej. Dodatkowo, w odróżnieniu od zwykłej fotografii, holografia nie wymaga stosowania soczewek w celu wytworzenia obrazu przedmiotu na kliszy. W chwili, gdy powstały hologram oświetlimy pierwotną wiązką referencyjną, to odtworzona zostaje pierwotna fala przedmiotowa. Patrząc przez hologram widać idealny, trójwymiarowy obraz, charakteryzujący się perspektywą i głębią.

Pierwszy hologram wykonany został przez Denisa Gabora (Rys. 5) w 1948 roku. Przezrocze, składające się z równoległych czarnych linii na przezroczystym tle, było oświetlone skolimowaną, monochromatyczną wiązką światła. Powstały obraz interferencyjny był wynikiem interferencji pomiędzy wiązką przechodzącą bezpośrednio przez przezrocze (wiązka referencyjna) a wiązką rozproszoną na ciemnych liniach (wiązka przedmiotowa). Kiedy otrzymany hologram został oświetlony wiązką skolimowaną (tak, jak w trakcie rejestracji) powstały dwie fale ugięte. Jedna fala odtwarzała obraz przedmiotu w jego oryginalnym położeniu, druga zaś, o tej samej amplitudzie, ale przeciwnej fazie, tworzyła obraz sprzężony. Główną wadą tej techniki była słaba jakość powstałego obrazu na skutek nakładania się na powstały obraz, obrazu sprzężonego oraz wiązki bezpośrednio przechodzącej przez hologram.



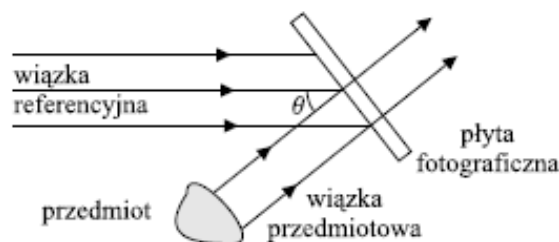
Rys. 5. Dennis Gabor (1900-1979). Laureat Nagrody Nobla w 1971 roku za wynalezienie i rozwój holografii.

Problem nakładania się obrazów został rozwiązany przez Leitha i Upatnieksa w 1962 roku przez zastosowanie techniki pozaosiowej wiązki referencyjnej, której idea przedstawiona jest na Rys. 6. W tej technice, do rejestracji obrazu interferencyjnego, używa się oddzielnej wiązki referencyjnej padającej na kliszę pod znacznym kątem w stosunku do wiązki przedmiotowej. W ten sposób, w trakcie rekonstrukcji fali przedmiotowej, powstałe obrazy (pozorny i rzeczywisty) są odseparowane o znaczny kąt zarówno od wiązki bezpośrednio przechodzącej przez hologram jak i jeden od drugiego. Rozwój techniki „wiązki pozaosiowej” i wynalezienie lasera jako silnego źródła światła spójnego przyczyniły się do szybkiego rozwoju holografii i jej zastosowań.

PODSTAWY HOLOGRAFII

REJESTRACJA HOLOGRAMU TRANSMISYJNEGO (METODA LEITHA UPATNIEKSA)

Podstawowy układ optyczny do rejestracji hologramu jest przedstawiony na Rys. 6. Obiekt, którego hologram chcemy otrzymać, jest oświetlony światłem spójnym. Światło spójne emitowane przez źródło światła spójnego (np. laser) to takie, którego fotony reprezentować można za pomocą elementarnych ciągów falowych posiadających stałe w czasie (*spójność czasowa*) i przestrzeni (*spójność przestrzenna*) różnice faz.



Rys. 6. Rejestracja hologramu typu Leitha-Upatnieksa.

Odbite od przedmiotu światło rejestrowane jest na płycie fotograficznej (przyszły hologram) wraz z wiązką referencyjną. Rejestrowane na kliszy natężenie światła jest wynikiem sumowania się amplitud fal przedmiotowej $S(x,y,t)$ i referencyjnej $R(x,y,t)$. W punkcie (x,y) kliszy amplituda wypadkowego pola elektrycznego, $E(x,y,t)$, interferujących fal świetlnych wynosi

$$E(x, y, t) = S(x, y, t) + R(x, y, t), \quad (10)$$

gdzie pomiędzy falami przedmiotową i referencyjną istnieje przesunięcie fazowe reprezentowane przez czynnik $\cos(\Phi_R - \Phi_S)$. Jeśli używamy światła monochromatycznego tzn. $P(x, y, t) = P(x, y) \exp(-i\omega t)$ i obiekt jest nieruchomy w trakcie ekspozycji, to rejestrowany na kliszy przestrzenny rozkład natężenia fali świetlnej wynosi

$$I(x, y) = |R(x, y) + S(x, y)|^2 = RR^* + SS^* + R^*S + RS^*. \quad (11)$$

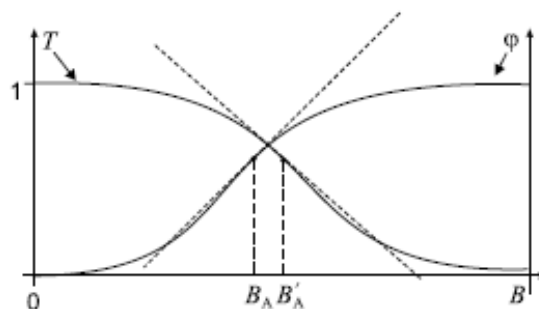
Emulsja fotograficzna używana do rejestracji hologramu jest czuła na zaabsorbowaną w czasie ekspozycji t_B całkowitą energię przypadającą na jednostkę powierzchni. Pochłonięta energia powoduje zmianę gęstości optycznej (zaczernienie) kliszy oraz zmianę jej współczynnika załamania. Ekspozycja (energia/powierzchnia) zdefiniowana jako

$$B(x, y) = \int_0^{t_B} I(x, y) dt, \quad (12)$$

prowadzi do zespolonej transmitancji negatywu (klisza po wywołaniu i utrwaleniu)

$$\tau = \tau(x, y) = T(x, y) \exp(i\phi(x, y)). \quad (13)$$

Transmitancja hologramu zawiera pełną informację o amplitudzie i fazie fali przedmiotowej zapisaną w postaci modulacji swojej amplitudy i fazy. Rozróżniamy dwa typy hologramów: amplitudowe ($\phi = \text{const}$) i fazowe ($T = \text{const}$). Dany hologram otrzymujemy poprzez odpowiednią obróbkę chemiczną naświetlonej emulsji fotograficznej. Hologram fazowy ma tę przewagę nad amplitudowym, że prawie nie absorbuje padającego nań światła dając, wobec tego jaśniejsze obrazy podczas odtwarzania.



Rys. 7. Krzywa zaczernień typowej emulsji fotograficznej w funkcji ekspozycji.

Zależność transmitancji emulsji fotograficznej od ekspozycji dla typowych materiałów fotograficznych pokazana jest na Rys. 7.

Rejestrację holograficzną zwykle prowadzi się w liniowej części tych charakterystyk, w pobliżu punktów ekspozycji B_A lub B'_A . W tym obszarze transmitancja może być przybliżona następującymi zależnościami

$$\tau \approx T = T_0 + \beta_1 t_B I + \beta_2 (t_B I)^2 + \dots \quad (14)$$

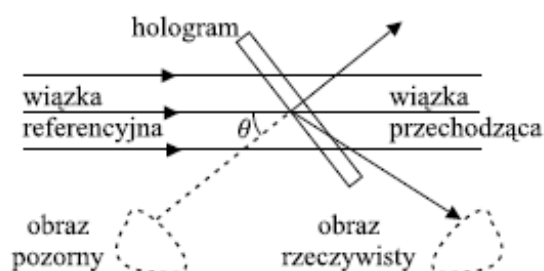
$$\tau \approx \exp(i\varphi(I)) = 1 - i\varphi(I) - 0.5\varphi^2(I) + \dots \quad (15)$$

odpowiednio dla hologramu amplitudowego i fazowego. Stałe T_0 i β_i zależą od rodzaju emulsji i sposobu jej obróbki chemicznej. Na podstawie równań (11 i 14), ograniczając się do wyrazów liniowych względem ekspozycji, możemy napisać, że dla hologramu amplitudowego zachodzi

$$T(x, y) = T_0 + \beta_1 t_B (|R|^2 + |S|^2 + R^*S + RS^*). \quad (16)$$

ODTWARZANIE HOLOGRAMU TRANSMISYJNEGO

Aby zrekonstruować obraz przedmiotu (czoło fali przedmiotowej) z hologramu oświetlamy go wiązką światła równoważną wiązce referencyjnej użytej w procesie rejestracji (Rys. 8). W czasie rekonstrukcji, wiązka przechodząca przez hologram jest modulowana przez transmitancję hologramu. W przypadku hologramu amplitudowego dla fali przechodzącej $O(x, y)$ przez hologram otrzymujemy



Rys. 8. Odtwarzanie obrazu przedmiotu z hologramu.

$$O(x, y) = T(x, y) \cdot R(x, y) = RT_0 + \beta_1 t_B R (|R|^2 + |S|^2 + R^*S + RS^*). \quad (17)$$

Poszczególne składniki równania (17) mają następującą interpretację fizyczną:

1.	$(T_0 + \beta_1 t_B R ^2)R$	zerowy rząd dyfrakcji, fala referencyjna pomnożona jest przez stały czynnik
2.	$\beta_1 t_B S ^2 R$	poszerzony zerowy rząd dyfrakcji, zmodulowany przez $ S ^2$ (obraz w postaci plamek–spekli),
3.	$\beta_1 t_B R ^2 S$	„+1” rząd dyfrakcji dający <i>obraz pozorny</i> (pierwotny) przedmiotu, zwany <i>ortoskopowym</i> ,
4.	$\beta_1 t_B R^2 S^*$	„-1” rząd dyfrakcji dający <i>obraz rzeczywisty</i> (sprzężony) przedmiotu, zwany <i>pseudoskopowym</i> .

Jeżeli jako fali referencyjnej używamy fali płaskiej, wówczas trzeci człon opisuje pierwotną falę przedmiotową, z wyjątkiem stałego czynnika. Tak więc, fala przedmiotowa zostaje zrekonstruowana z hologramu poprzez jego oświetlenie kopią fali referencyjnej. Czwarty człon równania (17) również opisuje obraz przedmiotu z tym, że jest to obraz sprzężony do obrazu pierwotnego, będący obrazem rzeczywistym i *pseudoskopowym*, tzn. zamianie uległy przód i tył przedmiotu. Części przedmiotu widoczne głębiej są częściami oryginalnie leżącymi bliżej obserwatora, w odróżnieniu od obrazu *ortoskopowego* (człon trzeci), proporcjonalnego do amplitudy fali odbitej, znajdującego się w miejscu obiektu.

Układ do rejestracji hologramu metodą Leitha-Upatnieksa został przedstawiony na Rys. 9. Gdy obraz jest zrekonstruowany z hologramu fazowego, wtedy efekty nieliniowe są wyraźniejsze niż w przypadku hologramów amplitudowych. Wynika to między innymi z większej jasności hologramów fazowych, co w efekcie prowadzi do powstania dodatkowych obrazów w wyższych rzędach dyfrakcji (kolejne wyrazy rozwinięcia eksponenty w równaniu (15)). Podstawową wadą hologramów otrzymywanych za pomocą wyżej opisaney metody jest konieczność używania światła laserowego w procesie odtwarzania obrazu przedmiotu.

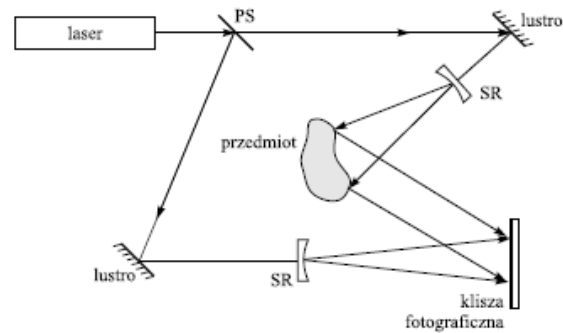
HOLOGRAFIA OBJĘTOŚCIOWA

Rodzajem holografii pozwalającej na odtwarzanie hologramów nie w świetle laserowym, a w świetle białym jest holografia objętościowa. Jeżeli grubość emulsji fotograficznej jest znacznie większa niż średnia odległość pomiędzy powstającymi prążkami interferencyjnymi, to transmitancja powstałego hologramu wykazuje modulację nie tylko na powierzchni kliszy, ale w całej swojej objętości.

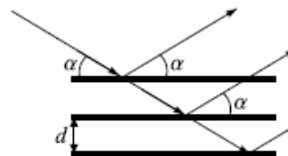
Jeżeli w procesie rejestracji hologramu spójne wiązki – przedmiotowa i referencyjna – padają na kliszę z przeciwnych stron, to prążki formują się zasadniczo jako warstwy równoległe do powierzchni kliszy. Kiedy tak otrzymany hologram oświetlimy wiązką światła białego w kierunku sprzężonej wiązki referencyjnej (R^*), to poszczególne warstwy odbijają fale świetlne, które następnie interferują ze sobą konstruktywnie tylko dla pewnych kierunków (patrz Rys. 10). Jeśli przez d oznaczmy odległość pomiędzy kolejnymi warstwami, a kąt obserwacji wynosi α , to z warunku Bragga na konstruktywną interferencję fal o długości λ otrzymujemy:

$$2d \sin \alpha = n\lambda, n = 1, 2. \quad (18)$$

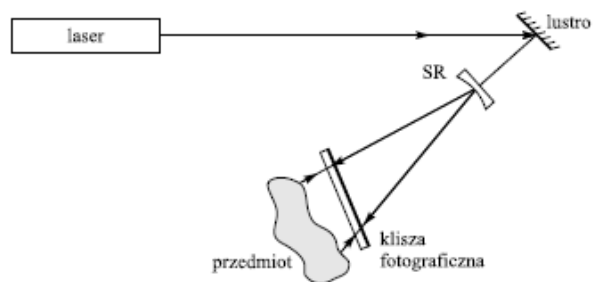
Dla $n = 1$ interferencja konstruktywna odbitych fal zachodzi tylko dla długości fali λ_α . Dlatego, gdy hologram obserwowany jest pod kątem α , to obraz widoczny jest tylko dla długości fali λ_α bez jakiegokolwiek zaburzenia pochodzącego od interferencji dla innych długości fal. Prosty układ do rejestracji hologramu objętościowego pokazany jest na Rys. 11.



Rys. 9. Przykładowy układ optyczny do rejestracji hologramu metodą Leitha-Upatnieksa. PS – płytka światło-dzieląca, SR – soczewki rozpraszające.



Rys. 10. Odbicie typu Bragga.

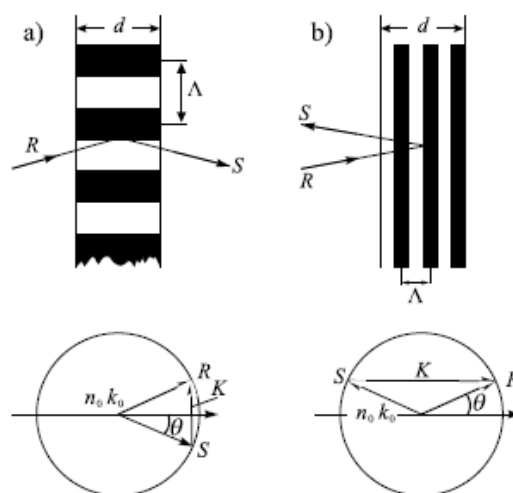


Rys. 11. Najprostszy układ do rejestracji hologramu objętościowego. SR – soczewka rozpraszająca.

RODZAJE SIATEK HOLOGRAFICZNYCH

Jak wiadomo, podstawowym zjawiskiem odpowiedzialnym w holografii za tworzenie się trójwymiarowych obrazów jest dyfrakcja (ugięcie) fali świetlnej na hologramie. Hologram stanowi pewnego rodzaju siatkę dyfrakcyjną, w której zapisana jest pełna informacja (amplituda i faza) o fali przedmiotowej. Informacja ta zapisana jest w postaci przestrzennego rozkładu współczynników absorpcji i załamania kliszy. Zasadniczo wyróżniamy *siatki cienkie*, gdy zmiany transmitancji zachodzą głównie na powierzchni kliszy oraz *siatki grube*, gdy zmiany te zachodzą w całej jej objętości. Ponadto, poprzez odpowiednią obróbkę chemiczną, możemy wytwarzać *siatki amplitudowe* lub *fazowe* charakteryzujące się odpowiednio zmianą współczynnika absorpcji lub załamania.

Hologram składa się z warstw odpowiadających periodycznym zmianom transmisji lub współczynnika załamania. Jeśli obie fale, przedmiotowa i referencyjna, padają na kliszę z tej samej strony (holografia transmisyjna), to warstwy te są w przybliżeniu prostopadłe do powierzchni kliszy i odtwarzany z hologramu obraz powstaje w świetle przechodzącym (patrz Rys. 12a). Jeżeli z kolei obie interferujące wiązki padają na kliszę z przeciwnych stron (holografia odbiciowa, objętościowa), wówczas warstwy interferencyjne układają się w przybliżeniu równoległe do powierzchni kliszy (Rys. 12b). W tym przypadku odtwarzana z hologramu fala przedmiotowa powstaje w świetle odbitym. W obu przypadkach amplituda fali ugiętej przyjmuje wartość maksymalną, gdy spełniony jest warunek Bragga



Rys. 12. Objętościowe siatki (a) transmisyjna i (b) odbiciowa wraz z ich diagramami dla padania pod kątem Bragga.

$$\cos(\Psi - \theta_B) = K / (2 n_0 k_0), \quad (19)$$

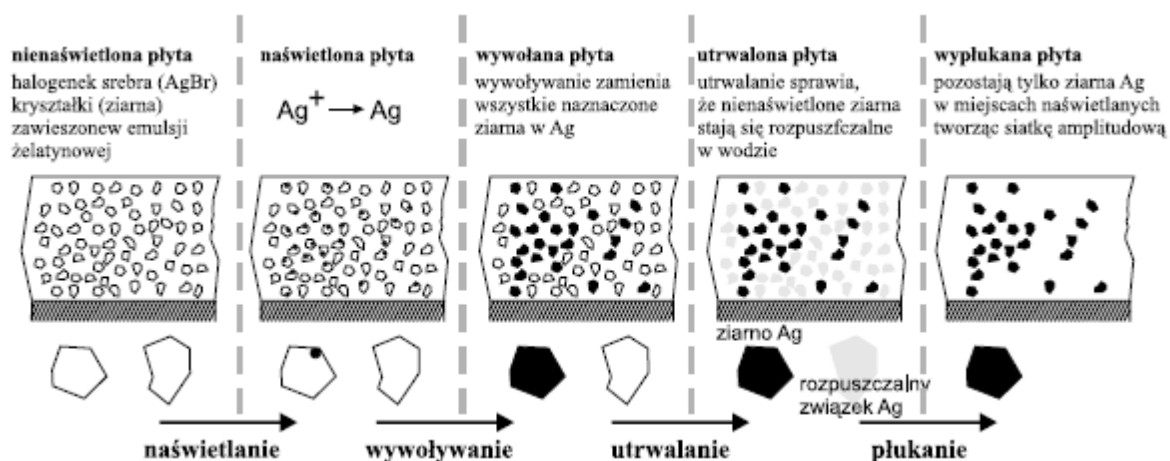
gdzie n_0 jest średnim współczynnikiem załamania hologramu, $K = 2\pi/\Lambda$ jest wektorem siatki prostopadłym do powierzchni warstw interferencyjnych (Λ to stała siatki), a $k_0 = 2\pi/\lambda$. Ψ to kąt pomiędzy osią prostopadłą do powierzchni kliszy a kierunkiem wektora K i wynosi zatem 90° w przypadku a) i 0° w przypadku b). Z uwagi na dużą selektywność kątową i długości fali, hologramy objętościowe oświetlone światłem białym dają ostre, monochromatyczne obrazy. Wydajność dyfrakcyjna tego typu hologramów sięga niemal 100%.

MATERIAŁY FOTOGRAFICZNE I ICH OBRÓBKĄ FOTOCHEMICZNA

Najczęściej używanymi materiałami do rejestracji hologramów są klisze i płytki fotograficzne. Obecnie na II Pracowni Fizycznej stosowane są płytki na podkładzie szklanym. Charakteryzują się one relatywnie dużą czułością oraz możliwością „uczulania” na długości fal odpowiadające długościom fal powszechnie używanych laserów.

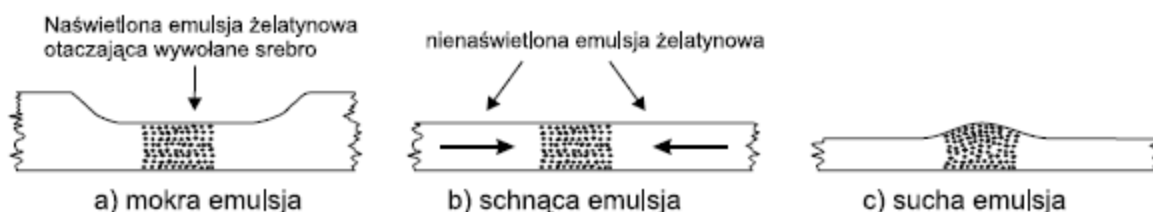
Zwykły proces obróbki kliszy fotograficznej prowadzi do wytworzenia hologramu amplitudowego. Wskutek usuwania w trakcie utrwalania nienaświetlonych ziaren halogenku srebra następuje kurczenie się emulsji fotograficznej o około 15%. Redukcja grubości emulsji może prowadzić do pewnego zniekształcenia zarejestrowanych prążków interferencyjnych oraz zmniejszenia odległości pomiędzy nimi. W przypadku hologramu objętościowego, zmniejszenie odległości pomiędzy płaszczyznami prążków objawia się zmianą koloru obrazu, który odtwarzany jest na długości fali krótszej niż to ma miejsce w trakcie procesu rejestracji.

Proces obróbki chemicznej hologramu jest bardzo podobny do tego, jaki stosowany jest w przypadku fotografii czarno-białej i został schematycznie przedstawiony na Rys. 13.



Rys. 13. Proces obróbki kliszy holograficznej.

W skład emulsji fotograficznej wchodzi mikrokrystałki (ziarenka) halogenku srebra (AgBr lub AgCl) zawieszone w emulsji żelatynowej. Całość naniesiona jest na podłoże szklane lub plastikowe. W czasie ekspozycji kliszy fotony z wiązki światła są absorbowane przez krystałki halogenku srebra i produkują pary elektron-dziura. Powstałe elektrony, dzięki swej ruchliwości, przedostają się na powierzchnię krystalu i rekombinują tam z jonami srebra tworząc małe klustery metalicznego srebra. Im dłuższy czas ekspozycji, tym więcej mikrokrystałków halogenku zostaje częściowo zamienianych na metaliczne srebro. Następnie, w procesie wywołania, zaznaczone mikrokrystałki halogenku srebra zostają całkowicie zamienione na metaliczne srebro. Konwersja ta odbywa się dzięki działaniu wywoływacza, który jest dostarczycielem elektronów.



Rys. 14. Powstawanie hologramu fazowego.

Po określonym czasie wywołania, klisza zostaje umieszczona w utrwalczu, który rozpuszcza nienaświetlone i niewywołane ziarna pozostawiając jedynie nieprzezroczyste ziarna srebra. Na koniec klisza płukana jest pod bieżącą wodą, co pozwala usunąć wszelkie pozostałe związki srebra. Pozostałe na kliszy ziarna metalicznego srebra tworzą strukturę prążków interferencyjnych, na której następuje ugięcie światła.

Hologramy amplitudowe rejestrowane na materiałach fotograficznych, oprócz przestrzennego rozkładu współczynnika absorpcji światła, charakteryzuje również przestrzenny rozkład współczynnika załamania. Otóż, po zakończeniu procesów wywołania i utrwala, obszary nienaświetlone mają grubość pięć razy większą niż normalnie (patrz Rys. 14). Naświetlona emulsja żelatynowa absorbuje znacznie mniej wody, więc schnie znacznie szybciej. Kurczenie się emulsji żelatynowej w trakcie schnięcia powoduje wciąganie miękkiej emulsji z obszarów nienaświetlonych do obszarów naświetlonych. Po całkowitym wyschnięciu emulsji obszary naświetlone mają większą grubość, a co za tym idzie większy współczynnik załamania niż obszary nienaświetlone. Ponieważ wydajność dyfrakcyjna hologramu fazowego (związanego z rozkładem współczynnika załamania) jest zdecydowanie większa niż hologramu amplitudowego, więc w celu jego otrzymania stosuje się tzw.

wybielanie hologramu amplitudowego. W procesie tym nieprzezroczyste obszary metalicznego srebra zamieniane są z powrotem w przezroczyste obszary halogenku srebra o dużym współczynniku załamania.

PODSTAWOWE ZASADY WYKONYWANIA HOLOGRAMÓW

- **Proszę nie dotykać powierzchni luster ani innych elementów optycznych zestawu!**
- Należy dbać o stabilność mechaniczną układu, starając się wyeliminować wszystkie możliwe źródła zakłóceń jak np. trzaskanie drzwiami, drgania lasera itp. **Elementy układu powinny być dobrze zamocowane do powierzchni stołu optycznego** za pomocą śrub aretujących.
- Do **osłabienia wiązki** odniesienia (referencyjnej) można wykorzystać filtry neutralne.
- Dla stosowanego lasera He-Ne długość spójności wiązki wynosi ok. **30 cm**. Należy zadbać o **zminimalizowanie różnicy dróg optycznych** pomiędzy wiązkami przedmiotową i odniesienia.
- Należy dbać o to, aby wiązki światła propagowały na tej samej wysokości nad stołem optycznym.
- Podczas naświetlania hologramów ustawiamy kliszę tak, aby **wiązki światła laserowego padały bezpośrednio na emulsję**; strona kliszy pokryta emulsją jest wyczuwalna np. za pomocą nawilżonego palca jako bardziej lepka.
- Należy zadbać o **właściwy kąt** pomiędzy wiązką przedmiotową i odniesienia (patrz zadanie 3).
- Przedmiot, którego hologram będzie wykonywany, musi być oświetlony w całości i jak najbardziej równomiernie. Układ musi być tak zaprojektowany, aby światło laserowe, po rozproszeniu na przedmiocie, trafiało na kliszę.
- **Hologramy wykonuje się i wywołuje przy zgaszonym świetle i zamkniętych drzwiach na korytarz**. W razie konieczności można używać zielonego światła (lampa wolnostojąca).
- Kolejne **etapy obróbki chemicznej naświetlonej kliszy holograficznej** w trakcie wytwarzania hologramów amplitudowych i fazowych (patrz tabela poniżej):

	Proces	Rodzaj hologramu	Czas trwania
1	Wywoływanie	<u>amplitudowy</u>	2 min.
		<i>fazowy</i>	2 min..
2	Płukanie pod bieżącą wodą	<u>amplitudowy</u>	15 –20 min.
		<i>fazowy</i>	2-3 min.
3	Wybielanie	<i>Fazowy</i>	do momentu zniknięcia zaczernienia kliszy
4	Płukanie pod bieżącą wodą	<i>Fazowy</i>	15-20 min.
5	Płukanie ze „zmiękcaczem”	<u>amplitudowy</u>	1 min.
		<i>fazowy</i>	1 min.
6	Suszenie	<u>amplitudowy</u>	do <u>całkowitego</u> wyschnięcia
		<i>fazowy</i>	

- Kliszę holograficzną wywołujemy emulsją do góry.

PRZEBIEG ĆWICZENIA – HOLOGRAFIA

1. Projektujemy układ do holografii transmisyjnej, dbając o to, żeby spełniał warunki podane na poprzedniej stronie.
2. Budujemy układ optyczny i rejestrujemy oraz wywołujemy hologram transmisyjny.
3. Po całkowitym wyschnięciu kliszy odtwarzamy hologram w wiązce referencyjnej i wykonujemy zdjęcie uzyskanego obrazu.
4. Jeśli wystarczy czasu – budujemy układ i rejestrujemy oraz wywołujemy hologram odbiciowy (objętościowy).
5. Po wyschnięciu kliszy odtwarzamy hologram w świetle białym z rzutnika oraz próbujemy wykonać zdjęcie uzyskanego obrazu (zadanie jest dość trudne, ze względu na światło odbite wprost od kliszy).
6. Sprawozdanie z wykonania ćwiczenia powinno zawierać krótki opis podstaw holografii, opisy (rysunki schematów, łącznie z podanymi odległościami) zbudowanych układów optycznych do rejestracji hologramu transmisyjnego i ewentualnie objętościowego. Proszę podać różnice dróg optycznych pomiędzy wiązkami: referencyjną i przedmiotową dla każdego z rejestrowanych hologramów oraz zamieścić zdjęcia odtworzonych hologramów.

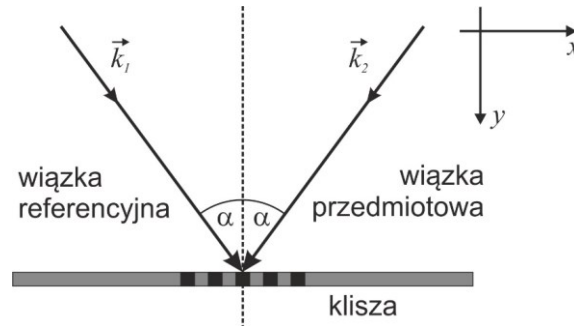
UWAGI DOTYCZĄCE ZESZYTU LABORATORYJNEGO

W zeszycie laboratoryjnym należy zamieścić:

1. Daty wykonywania ćwiczeń, nazwisko prowadzącego, a także ewentualnie nazwisko drugiej osoby, z którą wykonuje się ćwiczenie.
2. Schematy budowanych układów – do interferometru i holografii, wraz z istotnymi odległościami między elementami optycznymi i kątami między wiązkami.
3. Istotne parametry pomiarów drogi spójności i stopnia spójności światła lasera – różnice dróg optycznych w interferometrze i odpowiadające im parametry prążków obserwowanych na oscyloskopie.
4. Główne parametry procesu wykonywania hologramu – czasy naświetlania, wywoływania, płukania.

WSKAZÓWKI DO ZADANIA 3

Zadanie to można rozwiązać na kilka sposobów – na przykład metodą geometryczną lub korzystając (z uzasadnieniem) z równania dla siatki dyfrakcyjnej, w wersji z dowolnym (a nie tylko prostopadłym) kątem padania światła na siatkę. Poniżej przedstawiony jest szkic jednego z rozwiązań. Schemat układu jest przedstawiony na Rys. 15.



Rys. 15. Geometria układu rozważanego w zadaniu.

Zakładamy, że obie wiązki są spolaryzowane prostopadle do płaszczyzny rysunku i pole elektrycznie traktujemy tutaj skalarnie. Wiązki pochodzą z tego samego lasera, mają zatem tę samą częstotliwość i długość wektora falowego:

$$|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (20)$$

Natężenie światła interferujących wiązek to:

$$I(\vec{r}) = \varepsilon_0 c \overline{|E(\vec{r}, t)|^2} = \varepsilon_0 c \overline{\left| E_0 \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t) + E_0 \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t) \right|^2}. \quad (21)$$

W powyższym wzorze E_0 to amplituda pola elektrycznego każdej z wiązek z osobna. Pozioma kreska oznacza średnią po czasie. Na podstawie geometrii układu wnioskujemy, że:

$$\vec{k}_1 \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y, \quad \vec{k}_2 \cdot \vec{r} = -k_x x + k_y y. \quad (22)$$

Przekształcamy wzór (21), wykonujemy średnią po czasie, korzystamy z faktu, że $I_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c |E_0|^2$ i otrzymujemy:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos \left(x \frac{4\pi}{\lambda} \sin \alpha \right) \right). \quad (23)$$

Zgodnie z oczekiwaniami (symetria), prążki interferencyjne tworzą się w płaszczyźnie kliszy. Z powyższego wzoru na natężeniowy profil prążków interferencyjnych wzdłuż osi x , należy wyliczyć ich okres δx . Stąd wyliczamy szukany kąt 2α , pamiętając, że okres prążków powinien być przynajmniej dwa razy większy niż rozdzielczość kliszy (dlaczego?), wynosząca w zadaniu $1\mu\text{m}$.