

Wydział MINI	Dzień/godz Data	Środa 14.15 23.04.2025	Nr zespołu 4 + Karol Socha
Nazwisko i Imię 1. Przeździecka Alicja 2. Skoczyła Katarzyna 3. Zieliński Miłosz 4. Socha Karol	Ocena z przygotowania	Ocena z sprawozdania	Ocena końcowa
Prowadzący		Podpis	

Hologram

1 Wstęp

Celem ćwiczenia jest rejestracja hologramu cienkiego wykorzystując zjawisko interferencji wiązek światła laserowego oraz wyznaczenie kąta między wiązką przedmiotową a odniesienia wraz z oszacowaniem niepewności pomiarowej. Aby lepiej zrozumieć istotę zjawiska, warto przybliżyć ogólne zasady powstawania hologramów oraz ich podstawowe typy.[1]

Holografia to technika umożliwiająca rejestrację i odtworzenie trójwymiarowych obrazów obiektów dzięki zapisaniu pełnej informacji o strukturze przestrzennej. Wyróżnia się trzy główne grupy hologramów wydzielonych ze względu na technikę wykonania.

Hologramy klasyczne

Hologramy klasyczne wykorzystują do zapisu światło spójne, które podzielone na dwie wiązki (przedmiotową i odniesienia) tworzy na materiale światłoczułym prążki interferencyjne. W skrócie ten rodzaj hologramów jest rejestrowany w układzie laser-płytkę holograficzną. Obiekt podczas zapisu tego typu hologramu musi być fizycznie obecny. Ze względu na konieczność użycia na przykład lasera do zapisu, a czasami i odczytu oraz konieczność zachowania stabilności układu nie są dzisiaj szeroko wykorzystywane, ale stanowią podstawę zrozumienia bardziej zaawansowanych zagadnień. Do tej grupy hologramów należą:

1. Hologramy cienkie (powierzchniowe)

Hologramy cienkie są rejestrowane na powierzchni emulsji światłoczułej, stąd ich nazwa. Grubość emulsji jest mniejsza niż okres prążków interferencyjnych. Zapis takiego hologramu powstaje dzięki dwóm wiązkom (przedmiotowej i odniesienia) przecinających się na płytce holograficznej. Odczyt tego typu hologramów odbywa się dzięki światłu monochromatycznemu, czyli na przykład wiązce lasera. Ciekawą własnością jest obecność paralaksy w pionie jak i w poziomie.

2. Hologramy grube (objętościowe)

Do zapisu tego typu hologramów grubość emulsji światłoczułej musi być znacznie większa niż w przypadku hologramów cienkich. Zapis odbywa się dzięki dwóm przeciwbieżnym wiązkom. Powstająca siatka Bragga wybiera ze światła białego długość fali użytą do zapisu, co umożliwia odczyt hologramu za pomocą światła białego.

Hologramy syntetyczne

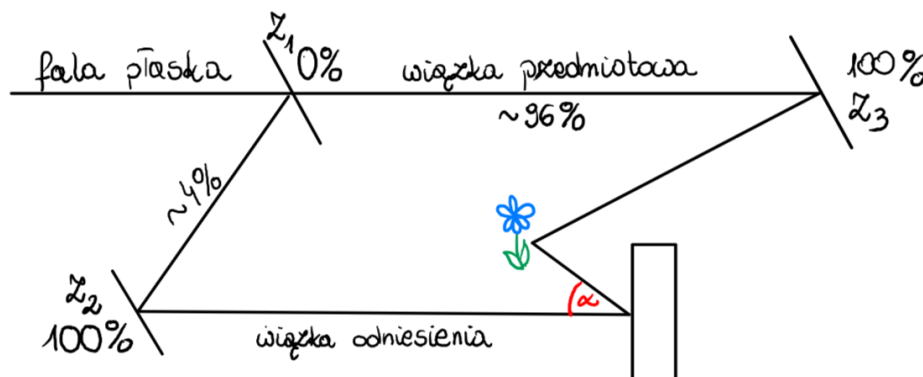
W odróżnieniu od klasycznych, hologramy syntetyczne są zapisywane komputerowo za pomocą metod numerycznych, bez potrzeby użycia fizycznego obiektu. Obiekt może być wirtualny - zaprojektowany na komputerze. W holografii syntetycznej komputer wylicza i tworzy specjalny wzór (strukturę dyfrakcyjną), który po naświetleniu pozwala uzyskać praktycznie dowolny kształt fali świetlnej – nie tylko taki, jaki powstałby od prawdziwego przedmiotu, ale także zupełnie fikcyjny obiekt.[2]

Hologramy cyfrowe

Hologramy cyfrowe powstają przez rejestrację matrycą CCD/CMOS, a rekonstrukcja obrazu odbywa się komputerowo. Hologramy cyfrowe wykorzystują techniki używane przez hologramy klasyczne, czyli rejestrowanie światła odbitego od rzeczywistego obiektu oraz syntetyczne, czyli generowanie komputerowe. Wykorzystuje się je między innymi do potwierdzania autentyczności dokumentów. [3]

2 Układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego wykorzystanego w ćwiczeniu został przedstawiony na Rysunku 1.



Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego.

Wiązka lasera helowo-neonowego o długości fali $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, po przejściu przez pinholę, czyli mały otwór o średnicy $20 \mu\text{m}$, utworzyła falę sferycznie rozbieżną (o malejącym natężeniu i zwiększającej się średnicy). Następnie, po przejściu przez kolejny otwór umieszczony w ognisku soczewki, uformowana została fala płaska, czyli taka o stałym natężeniu i średnicy. Została ona skierowana na pierwsze zwierciadło Z_1 , które teoretycznie odbija 0% światła, jednak w rzeczywistości — z uwagi na to, że żadna powierzchnia szklana nie jest idealnie gładka — odbijane jest około 4% światła. Odbita część, nazywana wiązką odniesienia, pada na drugie zwierciadło Z_2 o odbijalności 100%, a następnie trafia na folię Geola PFG-01. Natomiast druga część wiązki, nazywana wiązką przedmiotową, która przeszła przez zwierciadło Z_1 i ma natężenie równe 96% początkowego natężenia, odbija się w całości od zwierciadła Z_3 , a następnie od obiektu i również pada na folię.

Po odpowiednio długim oświetlaniu folii w ciemności należało poddać ją obróbce chemicznej. Przez 2 minuty była ona zanurzona w wywoływaczu, który przekształca obraz utajony w obraz widoczny. Następnie folia została wypłukana w wodzie i zanurzona w kolejnym roztworze chemicznym — odbielaczu. Po tym etapie folia została ponownie wypłukana w wodzie, aby usunąć resztki odbielacza. Ostatnim etapem było wysuszenie folii.

3 Opracowanie pomiarów oraz analiza niepewności pomiarów

Aby zapis hologramu w dobrej jakości był możliwy, należy spełnić następujące warunki:

1. Równość dróg optycznych wiązki przedmiotowej i odniesienia.
2. Kąt α , czyli kąt pomiędzy wiązką odniesienia a wiązką przedmiotową padającymi na folię, powinien spełniać warunek: $\alpha < 30^\circ$.
3. Przybliżona równość natężeń wiązki odniesienia i wiązki przedmiotowej.
4. Stabilność mechaniczna układu.

W celu zapewnienia równości dróg optycznych odległości porównywaliśmy sznurkiem, dlatego nie został opracowany tu błąd tego pomiaru.

Aby zapewnić, że oznaczony na Rysunku 1 kąt $\alpha < 30^\circ$ wybrano punkt leżący na przedłużeniu prostej pomiędzy hologramem a obiektem. Następnie przy użyciu miary taśmowej o niepewności 1mm wyznaczono 3 boki trójkąta, którego wierzchołkami były: hologram, wybrany punkt i zwierciadło Z_2 . Długości boków wynosiły: $a = 60,5 \text{ cm}$, $b = 55 \text{ cm}$ oraz $c = 25,2 \text{ cm}$, gdzie ostatni bok znajdował się naprzeciwko kąta α . Korzystając z twierdzenia cosinusów (w przekształconej formie poniżej) jesteśmy w stanie wyznaczyć wartość cosinusa kąta α

$$\cos \alpha = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}. \quad (1)$$

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru (1) otrzymujemy $\alpha = 24,62^\circ$. W celu obliczenia niepewności tego wyniku skorzystaliśmy z metody propagacji niepewności. Niepewność pomiarów boków jest niepewnością typu B

$$u(a) = u(b) = u(c) = \frac{0,1\text{cm}}{\sqrt{3}} \approx 0,0577\text{ cm.} \quad (2)$$

Niepewność złożona wyrażenia $\cos \alpha$ dana jest wzorem:

$$u(\cos \alpha) = \sqrt{\left(\frac{\partial \cos \alpha}{\partial a} \cdot u(a)\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \alpha}{\partial b} \cdot u(b)\right)^2 + \left(\frac{\partial \cos \alpha}{\partial c} \cdot u(c)\right)^2}, \quad (3)$$

gdzie pochodne cząstkowe wynoszą:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \alpha}{\partial a} &= \frac{a^2 - b^2 + c^2}{2a^2b} \\ \frac{\partial \cos \alpha}{\partial b} &= \frac{-a^2 + b^2 + c^2}{2ab^2} \\ \frac{\partial \cos \alpha}{\partial c} &= \frac{-c}{ab}. \end{aligned}$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości otrzymujemy $u(\cos \alpha) = 0,001$. W celu wyznaczenia niepewności kąta jeszcze raz należy skorzystać z propagacji dla funkcji jednej zmiennej. Wzór przedstawia się w postaci:

$$u(\alpha) = \frac{u(\cos \alpha)}{|\sin \alpha|}. \quad (4)$$

Podstawiając do tego wzoru $u(\cos \alpha) = 0,001$ oraz za $\alpha = 24,62^\circ$ otrzymujemy $u(\alpha) = 0,13^\circ$.

$$\alpha = 24,62(13)^\circ$$

Widzimy, że wyznaczona przez nas $\alpha < 30^\circ$, co spełnia warunek 2.

Do zmierzenia natężeń wiązek wykorzystano światłomierz cyfrowy o niepewności 0,1EV (wartość ekspozycji). Dokonaliśmy 3 pomiarów natężenia wiązek: 8,2EV - wiązka przedmiotowa, 7,8EV - wiązka odniesienia, 8,8EV - wiązka padająca na hologram. Niepewność każdego z tych pomiarów wynosiła:

$$u(\text{natężenie}) = \frac{0,1\text{EV}}{\sqrt{3}} \approx 0,0577\text{EV} \quad (5)$$

Różnica wartości pomiędzy natężeniem wiązki przedmiotowej i odniesienia powinna być mniejsza niż 1EV. Taka też była w przypadku naszego układu, więc warunek 3 został spełniony. Na podstawie uzyskanego wyniku natężenia światła padającego na hologram, przy wykorzystaniu tabliczki przeliczeniowej, ustalono czas naświetlania na 5 sekund. Warunek 4 został spełniony poprzez dokręcenie zwierciadeł do stojaków.

4 Podsumowanie

Celem ćwiczenia było zarejestrowanie i odtworzenie hologramu z wykorzystaniem lasera He-Ne $\lambda = 632,8\text{ nm}$ oraz folii Geola PFG-01. W pełni zrealizowano wszystkie etapy eksperymentu:

- **Przygotowanie układu.** Przy pomocy układu soczewka-pinhola sformowano falę sferyczną, a następnie –po umieszczeniu otworka w ognisku drugiej soczewki – falę płaską. Precyzyjnie ustawiono zwierciadła Z_1 , Z_2 i Z_3 , zapewniając koherencję obu wiązek oraz ich stabilność mechaniczną.
- **Weryfikacja warunków rejestracji.** Zmierzone geometrią trójkąta wartości boków pozwoliły określić kąt między wiązką odniesienia a przedmiotową: $\alpha = 24,62(13)^\circ < 30^\circ$. Natężenia obu wiązek różniły się o 0,4EV, czyli znacznie poniżej dopuszczalnej granicy 1EV.

- **Ekspozycja i obróbka chemiczna.** Dla ustalonego czasu ekspozycji $t = 5$ s hologram naświetlono w całkowitej ciemności, a następnie poddano standardowej sekwencji: wywołывacz (2 min) → płukanie → odbielacz → płukanie → suszenie.

Uzyskany hologram cechuje się wysokim kontrastem i brakiem zauważalnych zniekształceń, co świadczy o spełnieniu teoretycznych kryteriów: równych dróg optycznych, zbliżonych natężeń wiązek, poprawnej koherencji oraz stabilności układu. Niewielkie niepewności pomiarów ($\pm 0,13^\circ$ dla α , $\pm 0,058$ EV dla natężeń) wskazują, że dominującym źródłem błędów pozostaje precyzja ustawień zwierciadeł; można ją ograniczyć dalszą izolacją drgań i dokładnym pomiarem dróg optycznych.



Rysunek 2: Otrzymany hologram

Eksperyment potwierdził praktyczne zastosowanie teorii holografii oraz umożliwił zapoznanie się z techniką zapisu i obróbki hologramów.

Literatura

- [1] Nieznany. Hologram gruby (objętościowy). *Centralne Laboratorium Fizyki*, 2025.
- [2] Nieznany. Ćwiczenie 10/11 holografia syntetyczna. *Wydział Fizyki PW*.
- [3] Nieznany. Ćwiczenie 14 hologram cyfrowy. *Wydział Fizyki PW*.

5 Wkład poszczególnych osób w wykonanie ćwiczenia:

- 1. Katarzyna Skoczyła: układ pomiarowy
- 2. Alicja Przeździecka: wstęp
- 3. Miłosz Zieliński: obliczenie niepewności
- 4. Karol Socha: podsumowanie