

HOLOGRAFIA

1 Wstęp

Podstawy teoretyczne holografii były znane od 1948 r., kiedy Denis Gabor (nagroda Nobla w 1971 r. za holografie) przedstawił nową metodę obrazowania bezsoczewkowego¹. Właściwa historia holografii zaczęła się znacznie wcześniej, a mianowicie od prac E. Abbego z 1883 r. i polskiego fizyka M. Wolfkego z 1920 r. o możliwości wytwarzania, a następnie rekonstrukcji obrazu dyfrakcyjnego. Technika zapisu i odtwarzania trójwymiarowego obrazu holograficznego rozwinęła się dopiero po wynalezieniu laserów (1960 r.). Dobrej jakości obraz można otrzymać wyłącznie dzięki zastosowaniu światła przestrzennie i czasowo koherentnego. Przełomowe w zastosowaniach były prace J. Denysiuka z 1962 r. dotyczące związków fotografii kolorowej i holografii.

Przez termin *holografia*² rozumiemy sposób zapisu fali świetlnej³ rozproszonej na obiekcie, tak że w ośrodkach światłoczułych (*hologram*) rejestrowane są informacje nie tylko o natężeniu pola świetlnego pochodzącego od obiektu, ale również o fazie fali w strukturze prążków interferencyjnych. Jeżeli zrekonstruuje się zapisaną falę, to obserwator zobaczy obraz przedmiotu, który był rejestrowany na hologramie, czyli również w trzech wymiarach. Występuje tzw. *paralaksa*, co daje możliwość obserwacji obrazu przedmiotu z pod różnymi kątami, przy zachwaniu stosunków odległościowych w przestrzeni.

Obraz holograficzny jest wynikiem nałożenia fali rozproszonej na obiekcie (odbitej) i fali odniesienia na płycie holograficznej. Fala użyta do oświetlenia obiektu i fala odniesienia pochodzi z tego samego źródła (lasera). W klasycznym układzie wiązkę lasera dzieli się za pomocą płytki światłodzieliącej na dwie (holografia dwuwiązkowa). Jedna pada na obiekt, druga – na kliszę fotograficzną. W wyniku tego na kliszy powstaje obraz interferencyjny w postaci zaczerwień, których położenie i wielkość zależy od faz i natężeń interferujących wiązek.

Materiały używane do zapisu holograficznego są różne. By otrzymać dobrej jakości hologram wymagana jest zdolność rozdzielcza materiału lepsza niż długość fali, (od 200 nm, to ok. 5000 linii/mm), czyli 5 – 10 razy lepsza niż zwykłej emulsji fotograficznej. Poza płytą fotograficzną o dużej rozdzielczości stosuje się fotorezystory (takie jak w fotolitografii), fo-

¹D. Gabor, *A new microscopic principles*, Nature, 4098, 777 (1948).

²*Holos* po grecku to kompletny, całkowity (gr. *χóλος*), a *grapho* oznacza zapis (gr. *γράφειν*).

³Mogą być użyte fale również spoza zakresu optycznego, jak również fale akustyczne.

topolimery o podobnym działaniu, ośrodki fotochromatyczne, zmieniające swoją barwę (absorpcję) pod wpływem światła i fotorefrakcyjne, w których zmienia się współczynnik załamania. Popularna w przypadku holografii fazowej jest żelatyna dichromatyczna, w których naświetlenie wywołuje wiązania międzycząsteczkowe. Niezwiązany materiał wypłukuje się, a otrzymany hologram charakteryzuje się dużą wydajnością dyfrakcyjną (powyżej 90%). Materiały fotoplastyczne pozwalają na produkcję hologramów wielokrotnego zapisu z pomocą zjawisk elektrostatycznych i termicznych.

Materiały holograficzne mogą być nieodwracalne, takie które poddaje się obróbce chemicznej (np. emulsja fotograficzna, żelatyna dichroiczna) i odwracalne (np. kryształy elektrooptyczne i fotochromatyczne). Najczęściej wykorzystuje się te pierwsze. Stan ten nie powinien trwać długo ze względu na możliwość zastosowań holografii w układach wymazywalnych pamięci o niespotykanej wcześniej pojemności.

2 Podstawy holografii

W zwykłej fotografii, jeśli na emulsję (element CCD) pada fala sygnałowa

$$\begin{aligned} E(x, y, t) &\equiv S(x, y) \exp(i\omega t) = \\ &= |U_S(x, y)| \exp[i\phi(x, y)] \exp(i\omega t), \end{aligned}$$

to zaczerwienie płyty fotograficznej (liczba par dziura – elektron) jest proporcjonalne do natężenia i

$$I(x, y) \propto |S(x, y)|^2.$$

Wielkość zaczerwienia zależy od *ekspozycji* zdefiniowanej następująco

$$B(x, y) = \int_0^{t_B} I(x, y, t) dt = \int_0^{t_B} E(x, y, t) E^*(x, y, t) dt,$$

gdzie t_B jest czasem ekspozycji.

Amplitudowy współczynnik transmisji płyty, przy założeniu natężenia dalekiego od nasycenia ośrodka fotoczułego wynosi

$$t = a - bt_B I(x, y),$$

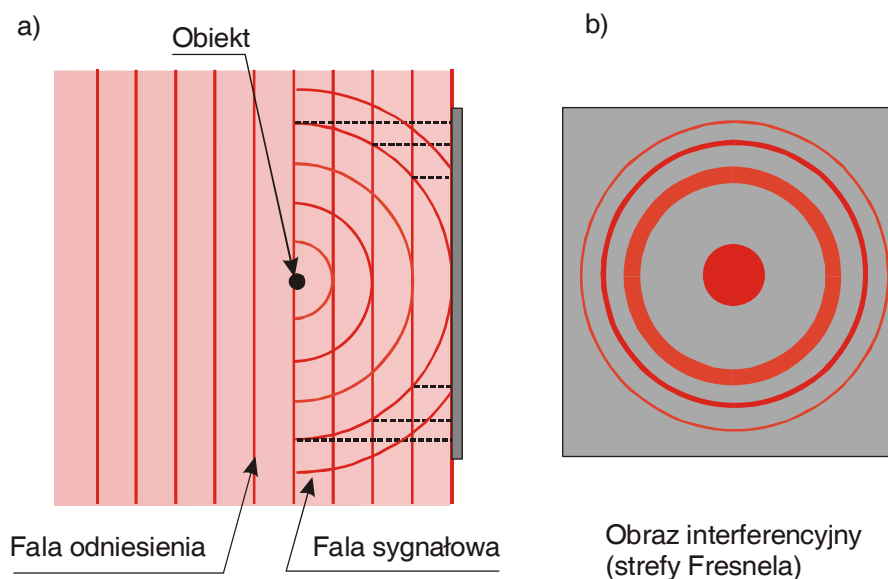
gdzie a i b są stałymi, które zależą od właściwości płyty i sposobu obróbki.

Jeżeli oświetlimy płytę jednorodnie, wtedy natężenie przechodzącego promieniowania wynosi

$$I_T(x, y) \propto [a - bt_B |S(x, y)|^2]^2$$

i nie zawiera informacji o fazie pola rozproszonego od fotografowanego przedmiotu.

Do wyjaśnienia zasady rejestracji i odtwarzania hologramu wystarcza skalarna teoria światła. Hologram jest obrazem, powstającym w wyniku interferencji wiązki rozproszonej S od obiektu z wiązką odniesienia R . Interferencja pozwala na przedstawienie informacji o fazie frontu falowego w postaci rozkładu natężenia. Najprostszy hologram tworzą dwie interferujące płaskie niekolinearne fale. Łatwo sprawdzić, że rozkład natężenia światła zarejestrowanego na płycie fotograficznej jest zmodulowane sinusoidalnie. Załóżmy teraz, że fala pada płaska na punkt (rys. 1), który staje się źródłem fali kulistej. Do płyty fotograficznej dochodzi więc fala kulista, która interferuje z płaską falą odniesienia. Interferencyjny obraz ma kształt współśrodkowych pierścieni (*strefy Fresnela*). Geometrię rejestracji hologramu i hologram punktu przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Rejestracja hologramu (a) i hologram punktu (b)

Dla dalszych rozważań przyjmijmy, że płyta fotograficzna jest płaszczyzną (x, y) . Pole elektryczne fali elektromagnetycznej w punkcie (x, y) jest sumą pola fali sygnałowej $S(x, y)$ i pola fali odniesienia $R(x, y)$

$$E(x, y) = [S(x, y) + R(x, y)] \exp(i\omega t) .$$

W fazie zawarta jest informacja o miejscu geometrycznym obiektu, w którym nastąpiło rozproszenie, czyli o kształcie obiektu. Stąd natężenie promieniowania padającego na płytę wynosi

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |S + R|^2 = (S + R)(S + R)^* = \\ &= (SS^* + RR^*) + (R^*S + RS^*). \end{aligned} \quad (1)$$

Pierwszy nawias w (1) jest zwykłą sumą natężeń wiązki odbitej i wiązki odniesienia bez informacji o fazie wiązki sygnałowej i odniesienia. Drugi nawias jest sumą czynników interferencyjnych zawierających informacje natężeniowe i fazowe. Na obraz holograficzny składają się jasne i ciemne miejsca odpowiadające interferencji wiązek sygnałowej i odniesienia.

Odtworzenie zapisanego obrazu odbywa się przez oświetlenie hologramu amplitudowego wiązką odniesienia. Przy założeniu liniowej zależności zaczernienia od czasu ekspozycji amplitudowy współczynnik transmisji hologramu jest równa

$$\begin{aligned} t &= a - bt_B I(x, y) = \\ &= a - bt_B [(SS^* + RR^*) + (R^*S + RS^*)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Jeżeli oświetlimy teraz hologram⁴ wiązką odniesienia, to po przejściu otrzymamy sygnał

$$\begin{aligned} E_T(x, y) &\propto R[a - bt_B I(x, y)] = \\ &= aR - bt_B R \{SS^* + RR^* + \\ &\quad + R^*S + RS^*\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Pierwszy czynnik w nawiasie w (3)

$$(a - bt_B R^2) R \propto R$$

reprezentuje prążek zerowego rzędu, czyli wiązkę odniesienia przechodzącą na wprost. W tej wiązce nie ma informacji o fali sygnałowej.

⁴Dla hologramów fazowych sytuacja jest analogiczna. Faza światła przechodzącego przez odpowiednio przygotowany hologram może się zmieniać. Zatem zespolony amplitudowy współczynnik transmisji możemy zapisać w postaci

$$t = t_0 \exp \{i\phi [I(x, y)]\}.$$

Dla $\phi(I) \ll \pi/2$, jeśli $\phi(I) = b't_B I(x, y)$, to rozwijając eksponent w szereg otrzymujemy

$$t \approx t_0 [1 + i\phi(I)] = ct_B I(x, y).$$

Wynik będzie taki sam jak dla hologramu amplitudowego z dokładnością do stałej.

Drugi wyraz

$$bt_B S^2 R$$

jest również polem odniesienia z amplitudą zmodulowaną przez czynnik $|S|^2$, czego efektem są plamki (ang. *speckles*) [15]. Zwykle jest on bardzo mały i do zaniedbania w porównaniu z pierwszym wyrazem i tym wyrazie również nie ma informacji o relacjach fazowych.

Najważniejszy jest trzeci czynnik

$$bt_B R^2 S.$$

Jeśli $|R|^2 = \text{const.}$, to cały wyraz ten jest proporcjonalny do amplitudy fali rozproszonej na przedmiocie S i odtworzony obraz urojony – obraz ortoskopowy, znajduje się w położeniu obiektu.

Zapiszmy

$$S(x, y) = |U_S(x, y)| \exp[i\phi_S(x, y)] \text{ i } R(x, y) = |U_R(x, y)| \exp[i\phi_R(x, y)],$$

to (3), zakładając, że pole sygnałowe jest znacznie słabsze od referencyjnego

$$\begin{aligned} & -\beta |U_R(x, y)|^2 |U_R(x, y)| \exp[i\phi_R(x, y)] - \\ & +\beta |U_S(x, y)| \exp[i\phi_S(x, y)] |R(x, y)|^2 - \\ & +\beta |U_S(x, y)|^* \exp[-i\phi_S(x, y)] |U_R(x, y)|^2 \exp[2i\phi_R(x, y)], \end{aligned}$$

gdzie $\beta = bt_B$.

Falę sygnałową reprezentuje drugi wyraz. Jeśli geometria rekonstrukcji jest identyczna z geometrią zapisu, wtedy obraz znajduje się dokładnie w miejscu przedmiotu.

Ostatni składnik przedstawia wiązkę reprezentującą obraz sprzężony – rzeczywisty. Cechą charakterystyczną tego obrazu – obrazu *pseudoskopowego*, jest fakt, że ze względu na przeciwną krzywiznę frontu falowego obraz jest symetryczny względem powierzchni hologramu i znajduje się przed hologramem od strony obserwatora. Może być obserwowany na ekranie ponieważ jest rzeczywisty. Obraz dyfrakcyjny zawiera zatem prążek zerowego rzędu i po obu stronach prążki pierwszego rzędu – rzeczywisty i pozorny.

Rozważmy dokładniej położenie tworzonych obrazów (rys. 2).

Pole pochodzące od punktu znajdującego się w odległości d osiagające płaszczyznę (x, y) zapiszemy w postaci (patrz Uzupełnienie)

$$S(x, y) = \frac{A \exp(ikr)}{i\lambda r},$$

gdzie $r = \sqrt{d^2 + x^2 + y^2}$.

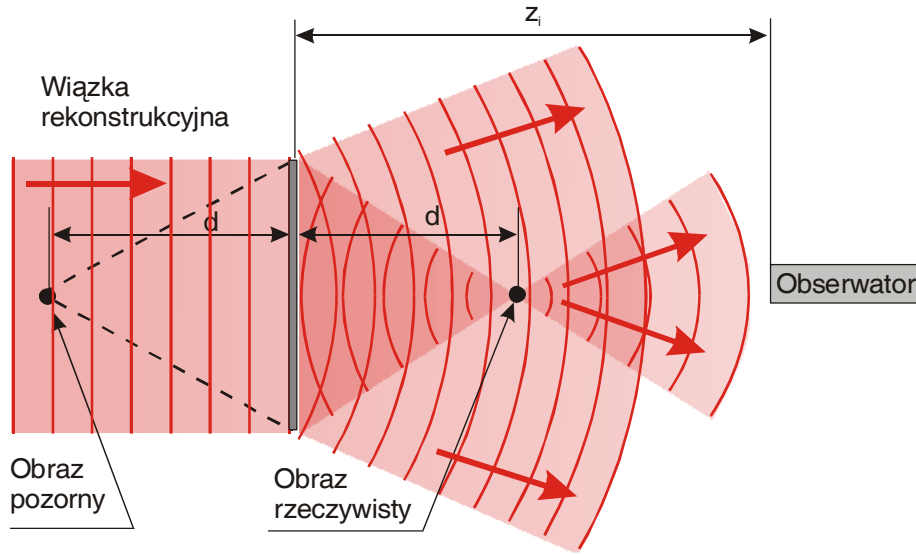
Jeśli $d \gg x, y$, to

$$S(x, y) = \frac{A}{i\lambda d} \exp \left\{ ik \left[d + \frac{x^2 + y^2}{2d} \right] \right\}.$$

Założmy, że wiązka odniesienia jest falą płaską i ma postać

$$R = R_0 \exp(ikz), \quad (4)$$

gdzie R_0 jest liczbą rzeczywistą.



Rys. 2. Rekonstrukcja hologramu Gabora punktu

Z (2) w $z = 0$

$$\begin{aligned} t(x, y) &= t_0 - \beta |R_0 + S(x, y)|^2 = \\ &= t_0 - \beta \left[R_0^2 + |S(x, y)|^2 + R_0 S(x, y) + R_0 S^*(x, y) \right]. \end{aligned}$$

Przy rekonstrukcji obrazu używamy wiązki (4) i pole transmitowane wynosi

$$U_T(x, y) \propto R_0^3 + R_0 |S(x, y)|^2 + R_0^2 S(x, y) + R_0^2 S^*(x, y). \quad (5)$$

Hologram umieszczamy w $z = 0$, a obraz dyfrakcyjny jest obserwowany w płaszczyźnie (x_i, y_i) punkcie z_i . Obraz dyfrakcyjny jest związany z trzecim i czwartym wyrazem (5). Korzystając z (8) znajdziemy wyrażenie na

trzeci, najbardziej interesujący wyraz (5)

$$U_{To}(x_i, y_i) = R_0^2 \frac{A}{i\lambda z_i} \exp \left\{ ik \left[z_i + d + \frac{x^2 + y^2}{2z_i} \right] \right\} \times \\ \times \frac{A}{i\lambda d_0} \mathcal{F} \left\{ \exp \left(ik \frac{x^2 + y^2}{2d} \right) \exp \left(ik \frac{x^2 + y^2}{2z_i} \right) \right\}_{f_x, f_y}.$$

Z relacji Fouriera otrzymujemy pole obrazu ortoskopowego w postaci

$$U_{To}(x_i, y_i) = AR_0^2 \frac{\exp [ik(z_i + d)]}{i\lambda(z_i + d)} \exp \left[ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2(z_i + d)} \right].$$

Podobnie można wyznaczyć czwarty wyraz

$$U_{Tp}(x_i, y_i) = AR_0^2 \frac{\exp [ik(z_i - d)]}{i\lambda(z_i - d)} \exp \left[ik \frac{x_i^2 + y_i^2}{2(z_i - d)} \right].$$

Jak widać z otrzymanych wyrażeń, dla obserwatora znajdującego się w odległości z_i od hologramu punktowe źródło fali kulistej znajduje się w odległości $z_i + d_0$. Obraz pseudoskopowy znajduje się przed hologramem w odległości d_0 od niego ($z_i - d_0$ od obserwatora).

Jeżeli obserwacja hologramu odbywa się na wprost źródła światła, to obserwator widzi trzy fale: dwie obrazowe i tła z pokrywającymi się frontami falowymi. Jest to podstawowa wada tego typu hologramów – *hologramów Gabora*. By możliwa stała się obserwacja tylko obrazu ortoskopowego, który jest związany z repliką fali sygnałowej, należy przestrzennie rozdzielić obrazy odpowiadające poszczególnym wyrazom równania (3). Dla rozdzielenia wiązek wystarczy dokonać oświetlenia przedmiotu i obserwacji hologramów pozaosiowo. Wiązka referencyjna pada wtedy na płytę pod pewnym kątem. θ do normalnej do powierzchni hologramu (rys. 3)

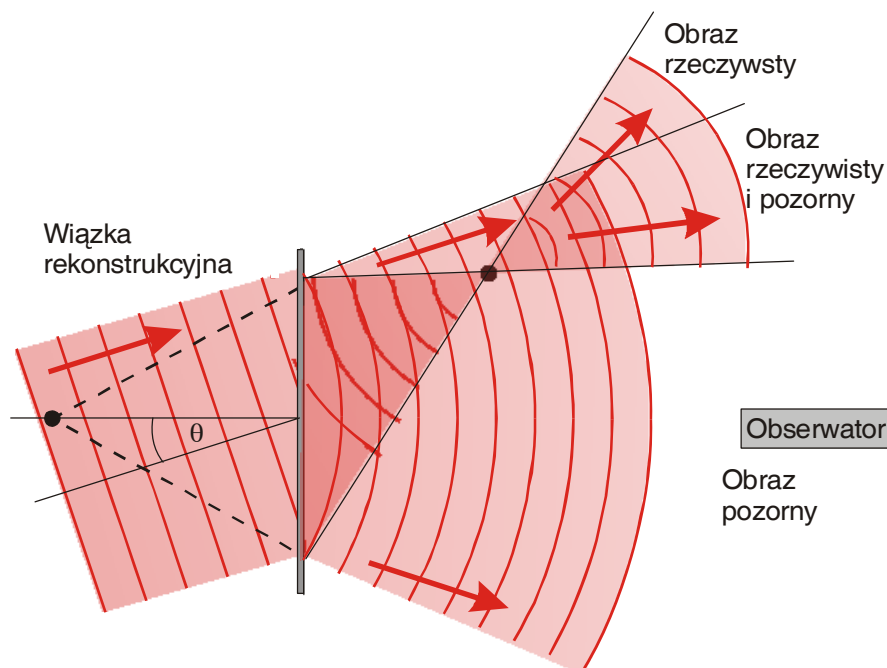
$$U_R \equiv |U_R| \exp(-i\vec{k}\vec{r}) = |U_R| \exp[-ik(x \sin \theta + z \cos \theta)]$$

i (3) pole po przejściu przez hologram umieszczony w punkcie $z = 0$ przyjmie postać

$$U_T(x, y) = U_R t \propto \\ \propto -bt_B |U_R|^2 |U_R| \exp(-ikx \sin \theta) - \\ - |U_S|^2 |U_R| \exp(-ikx \sin \theta) - |U_R|^2 U_S + \\ - U_S^* |U_R|^2 \exp(-2ikx \sin \theta).$$

Pierwsze dwa wyrazy, podobnie jak wyżej, opisują wiązki odpowiadające wiązce rekonstrukcyjnej, które praktycznie nie są zmodulowane przestrzennie i poruszają się pod kątem θ do powierzchni hologramu, trzeci wyraz

stanowi obraz pozorny i położenie obrazu nie zależy od kąta padania wiązki odtwarzającej. Położenie obrazu odpowiada położeniu obiektu, jeśli tylko wiązka odtwarzająca jest identyczna z referencyjną. Jeśli kąty θ są małe, wtedy rzeczywisty, ostatni obraz znajduje się pod kątem 2θ .



Rys. 3. Rekonstrukcja hologramu pozaosiowego punktu

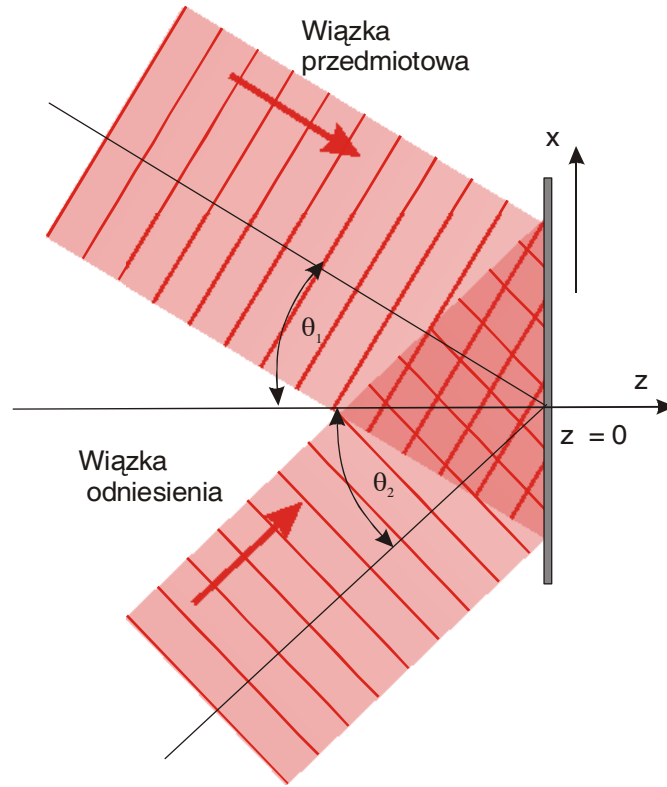
W przypadku, gdy wiązka odniesienia i odtwarzająca są prostopadłe do płaszczyzny hologramu to rozmieszczenie obrazów jest takie, jak na rys. 3. Jest to bardzo uproszczony opis najwcześniejszego typu hologramu. Taki schemat rejestracji może być zastosowany dla obiektów przezroczystych. W przypadku przedmiotów nieprzezroczystych najczęściej wiązka odniesienia i wiązka sygnałowa tworzą kąt (rys. 4).

Wróćmy do hologramu punktu w konfiguracji pozaosiowej. Załóżmy, że punkt jest oddalony od płyty, tak że fala rozproszona może być traktowana jako płaska, poruszająca się w kierunku z (rys. 4) pod kątem θ_1 do płyty

$$S(x, y) = U_S \exp [i (kx \sin \theta_1 - kz \cos \theta_1)] .$$

Wiązka odniesienia również będzie falą płaską, padającą na hologram pod kątem θ_2

$$R(x, y) = U_R \exp [i (-kx \sin \theta_2 - kz \cos \theta_2)] .$$



Rys. 4. Układ pozaosiowy stosowany w rejestracji hologramów obiektów nieprzezroczystych

Współczynnik transmisji płyty wynosi w punkcie $z = 0$

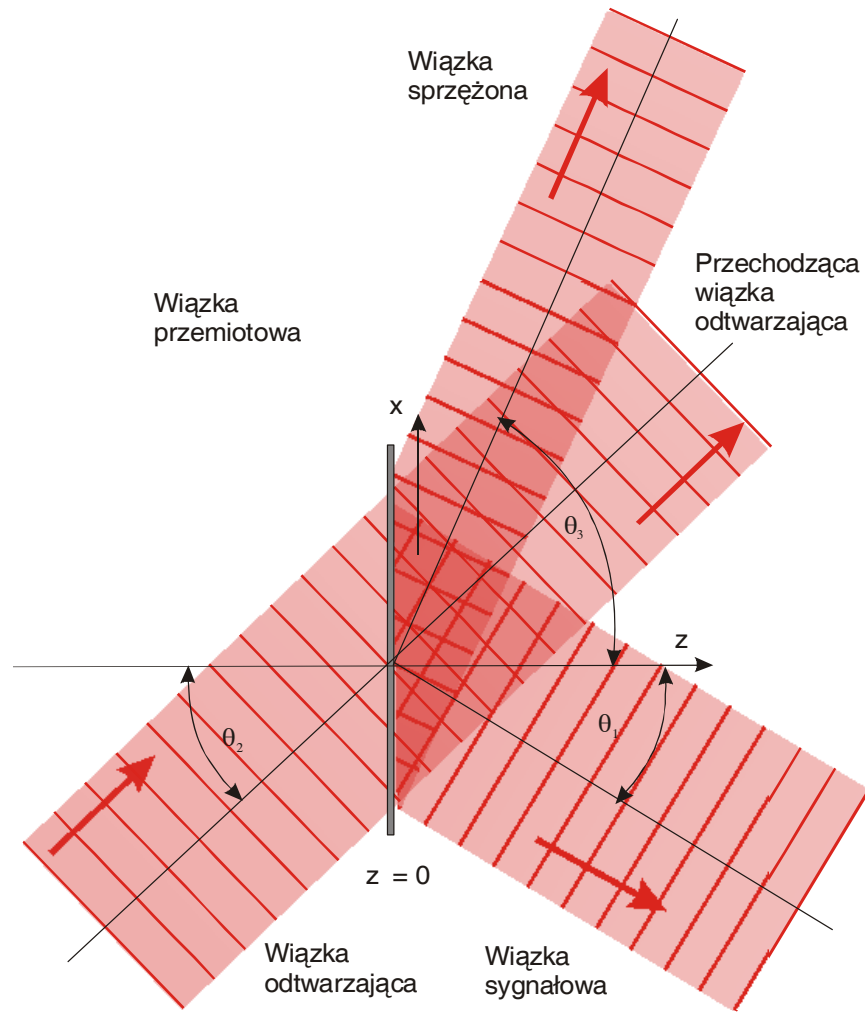
$$\begin{aligned} t(x) &= t_0 - \beta |U_S \exp(kx \sin \theta_1) + U_R \exp(-kx \sin \theta_2)|^2 = \\ &= t_0 - \beta U_S^2 - \beta U_R^2 - 2\beta U_S U_R \cos[k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)x]. \end{aligned}$$

Otrzymujemy regularny rozkład jasnych i ciemnych prążków na płycie holograficznej. Odległość między prążkami wynosi

$$d = \frac{2\pi}{k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}.$$

Jeśli oświetlimy płytę wiązką odniesienia, wtedy pole po przejściu przez płytę posiada czynnik interferencyjny w postaci

$$\begin{aligned} & -\beta U_S U_R^2 \cos[k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)] \cos(\omega t - kx \sin \theta_2) = \\ & = -\beta U_R^2 [U_S \cos(\omega t + kx \sin \theta_1) + U_S \cos(\omega t - 2kx \sin \theta_2 - kx \sin \theta_1)]. \end{aligned}$$



Rys. 5. Położenie wiązek przy odtwarzaniu holgramów pozaosiowych.

Pierwszy wyraz w nawiasie odpowiada fali przedmiotowej

$$-\beta U_R^2 [U_S \cos(\omega t + kx \sin \theta_1 - kz \cos \theta_1)],$$

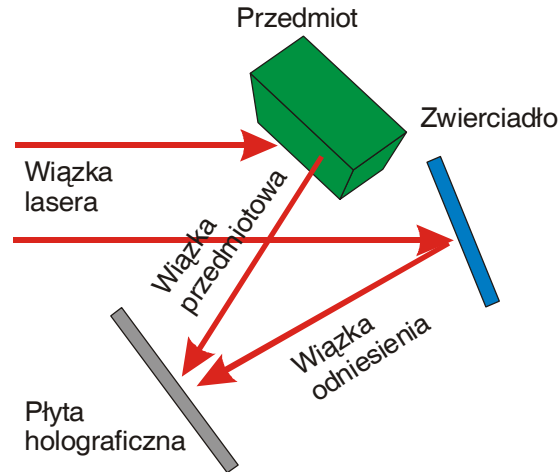
natomiast drugi reprezentuje falę rozchodzącą się pod kątem θ_3 w stosunku do płyty

$$\begin{aligned} & -\beta U_R^2 [U_S \cos(\omega t - 2kx \sin \theta_2 - kx \sin \theta_1)] = \\ = & -\beta U_R^2 [U_S \cos(\omega t - kx \sin \theta_3 - kz \cos \theta_3)], \end{aligned}$$

gdzie

$$\sin \theta_3 = 2 \sin \theta_2 + \cos \theta_1.$$

Tak więc wiązka odtwarzająca powoduje powstanie dwóch fal: jednej poruszającej się w tym samym kierunku co fala przedmiotowa i drugiej – tworzącej obraz rzeczywisty pod kątem θ_3 (rys.5).



Rys. 6. Jedną z możliwości rejestracji hologramu przedmiotu nieprzezroczystego

Jedną z możliwych konfiguracji stosowanych do rejestracji hologramu przedstawia rys. 6.

3 Rodzaje holografii

Po wywołaniu płyty fotograficznej informacja o natężeniu i fazie fali rozproszonej na przedmiocie jest zawarta w układzie prążków interferencyjnych, czyli jaśniejszych i ciemniejszych obszarach zmieniających np. absorpcję płyty w przypadku *hologramów absorpcyjnych*. Jeśli pod wpływem światła w ośrodku światłoczułym zmienia się współczynnik załamania lub grubość nośnika, wtedy hologram jest przezroczysty, ponieważ obraz interferencyjny jest zapisany w rozkładzie współczynnika załamania (ogólniej – grubości optycznej) hologramu, a hologram nosi nazwę *fazowego*. Największą zaletą tego typu hologramów jest duża jasność obrazów, znacznie większa niż w hologramach absorpcyjnych.

Są hologramy *grube (objętościowe)* i *cienkie (powierzchniowe)*. Pierwotnie ten podział był związany z grubością ośrodka, w którym zapisywano obraz. Teraz odnosi się do dyfrakcyjnych charakterystyk hologramu, które mają związek z grubością. Cienkim będziemy nazywali hologram, w którym grubość materiału fotoczułego jest mała w stosunku do średniej odległości między prążkami interferencyjnymi. Za cienkie hologramy możemy uznać

takie, których grubość nie przekracza długości fali. W cienkich hologramach wytwarza się wiele rzędów dyfrakcji. W przypadku objętościowych hologramów otrzymuje się tylko jeden rząd dyfrakcji na obszarach w objętości hologramu, jeśli światło monochromatyczne pada na hologram pod kątem Bragga. W istocie stanowią przestrzenne siatki dyfrakcyjne Bragga, a grubość ośrodka może sięgać kilku milimetrów przy odległości między prążkami rzędu mikrometrów. Dla rekonstrukcji niezbędne jest spełnienie warunku Bragga, wynikającego z zachowania energii i pędu

$$m\lambda = 2\Lambda \sin \theta_B.$$

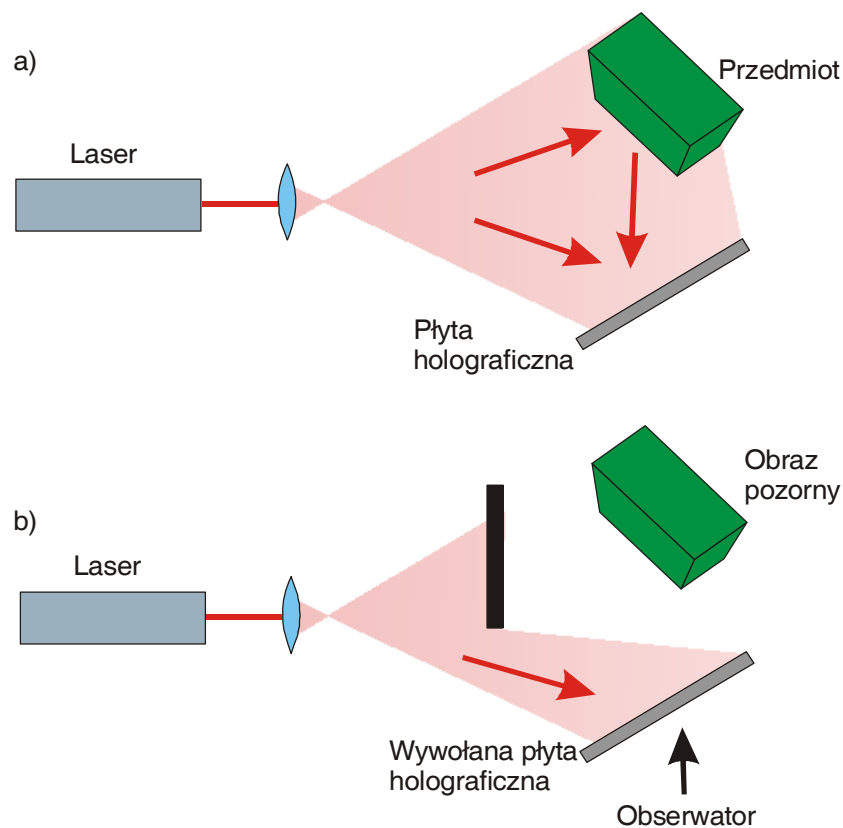
Kierunek wektorów falowych sygnału odniesienia i rekonstruowanego względem płyty holograficznej jest podstawą podziału na *hologramy transmisyjne* i *odbiciowe*. Rekonstrukcji obrazu możemy dokonać w świetle przechodzącym w przypadku hologramów transmisyjnych lub w świetle odbitym, jeśli są to hologramy odbiciowe. W transmisyjnych hologramach wiązki referencyjna i sygnałowa przechodzą przez hologram, a w przypadku hologramu odbiciowego – przechodzi tylko referencyjna. Odbiciowe hologramy wymagają też zastosowania znacznie grubszego ośrodka niż stała siatki. W istocie są one wąskopasmowymi interferencyjnymi filtrami, co umożliwia ich obserwację w świetle białym.

Wreszcie mamy do czynienia z *hologramami statycznymi* i *dynamicznymi*. Hologramy, które nie wpływają na wiązkę sygnałową bądź referencyjną w trakcie zapisu noszą nazwę statycznych. Są to hologramy, które wymagają obróbki np. fotograficznej. Jeśli istnieje sprzężenie zwrotne między hologramem a zapisywanymi wiązkami, to mówimy o hologramach dynamicznych.

3.1 Hologramy transmisyjne

Światło z obrazu rekonstruowanego przez hologram ma ten sam kierunek i to samo natężenie co światło pochodzące od oryginału (przy tzw. *wydajności dyfrakcyjnej*⁵ równej 100%), zatem nie powinno być różnic między rzeczywistym i pozornym obiektem. Rysunek 7 przedstawia schemat układu do rejestracji i odtwarzania hologramu transmisyjnego.

⁵Wydajność dyfrakcyjna jest jednym z parametrów określających jakość hologramu. Definiuje się ją podając stosunek natężenia obrazu holograficznego do natężenia światła wiązki odtwarzającej.

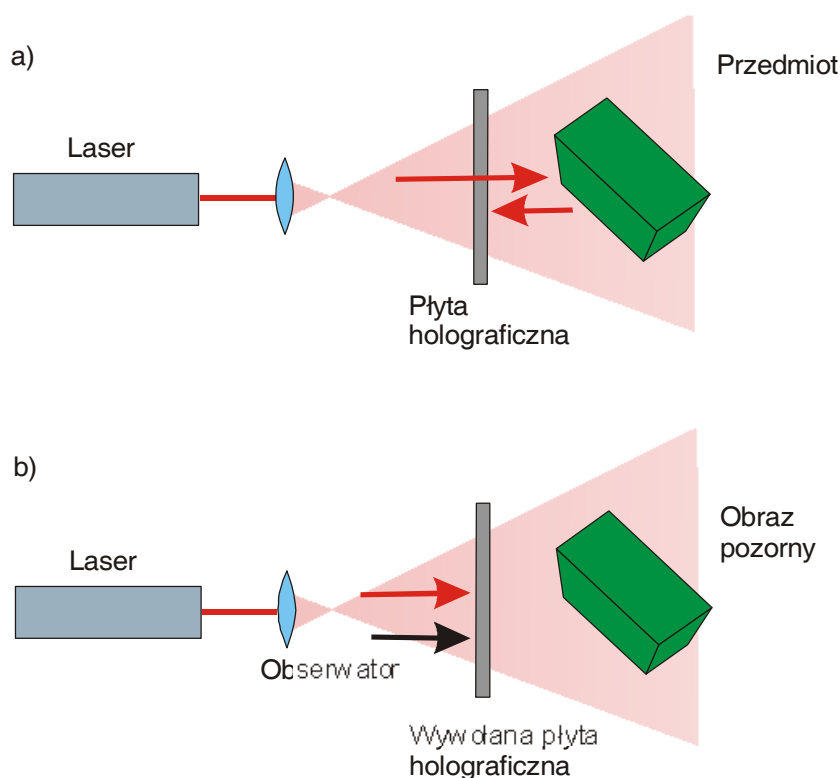


Rys. 7. Rejestracja (a) i odtwarzanie hologramu transmisyjnego przedmiotu (b)

Jest to jedna z najprostszych realizacji. Modyfikacja metody polega na użyciu wielu wiązek oświetlających i dzięki temu przedmiot jest jednorodnie oświetlony.

3.2 Hologramy odbiciowe

Hologram odbiciowy jest wynikiem złożenia fali padającej i przechodzącej przez płytę fotograficzną pokrytą warstwą emulsji i biegnącej na przeciw fali odbitej przedmiotowej (rys. 8). Nazwa bierze się stąd, że rekonstrukcja zachodzi w świetle odbitym, a nie w świetle przechodzącym, jak w przypadku hologramu transmisyjnego. Powstająca fala stojąca jest rejestrowana w warstwie emulsji w postaci obrazu interferencyjnego. Podstawową zaletą hologramów odbiciowych jest możliwość odtwarzania obrazu za pomocą światła białego, którego użycie dodatkowo eliminuje rozkład plamkowy. Płaszczyzny Bragga w naświetlonej emulsji układają się równoległe do powierzchni płyty.



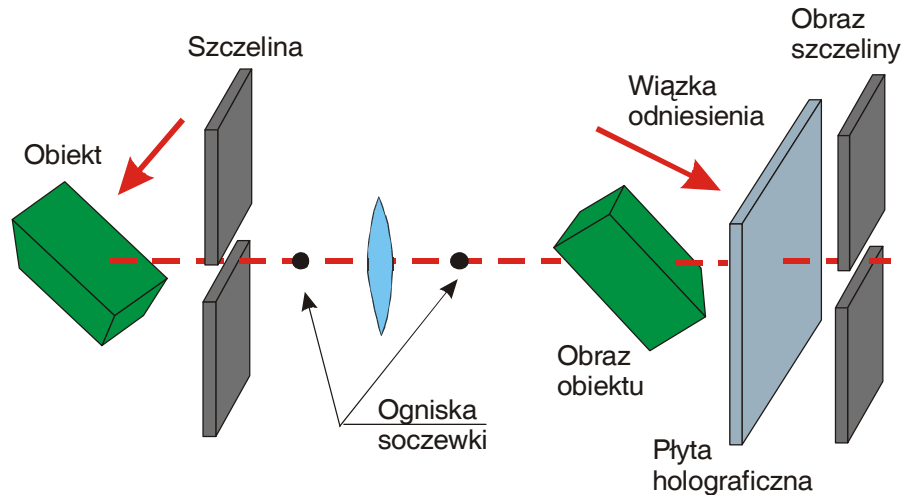
Rys. 8. Rejestracja (a) i odtwarzanie hologramu odbiciowego przedmiotu (b)

Warunek Bragga jest spełniony tylko dla fal o takiej długości, jak fale użyte do rejestracji. Jeżeli objętościowy hologram odbiciowy oświetlimy światłem białym, to odbijają się fale o długościach użytych do rejestracji, a inne są absorbowane lub rozpraszane. Jeżeli do zapisu hologramu użyje się polichromatycznego światła koherentnego, wtedy jest możliwe uzyskanie kolorowego obrazu trójwymiarowego obserwowanego za pomocą światła białego. Emulsja fotograficzna ma grubość ok. $10\ \mu\text{m}$ i więcej, zatem struktura interferencyjna może powstać wewnątrz emulsji. Musi być spełniony warunek Bragga, zatem nie występuje obraz sprzężony. Poza tym układ działa jak wielowiązkowy filtr interferencyjny, a może być odczytywany w świetle białym i jest zabarwiony ponieważ właściwa barwa jest „wybierana” przez warunki interferencji. Wydajność dyfrakcyjna takich hologramów osiąga 100 %.

Ze względu na to, że proces rekonstrukcji przypomina odkryty przez Lippmanna (1900 r.) proces prowadzący do barwnej fotografii ten rodzaj hologramów nosi nazwę *Lippmanna – Bragga*, a pierwszym, który zaproponował taką konfigurację był J. Denysiuk w 1962 r.

3.3 Hologramy tęczowe

Oświetlenie hologramu światłem białym spowoduje powstanie zamazanego obrazu będącego wynikiem dyfrakcji wszystkich, a nie tylko biorących udział w rejestracji długości fal⁶.



Rys. 9. Jednostopniowa metoda rejestracji hologramu tęczowego (za [14])

Problem rekonstrukcji hologramów w świetle białym wynika z przesunięcia różnokolorowych obrazów względem siebie. Jedną z możliwych metod eliminacji dyspersji jest jej korekcja za pomocą siatki dyfrakcyjnej. Okazuje się, że dyspersję można zmniejszyć też przez zmniejszenie informacji zawartej w hologramie przez zastosowanie w procesie rejestracji wąskiej poziomej szczeliny umieszczonej przed płytą holograficzną tracąc zaniebdywalną ilość szczegółów. Usuwa się w ten sposób paralaksę pionową, mniej ważną w punktu widzenia obserwatora. Powstają tzw. *hologramy tęczowe*⁷.

Najbardziej popularna jest dwustopniowa metoda rejestracji hologramów tęczowych:

- rejestruje się hologram metodą tradycyjną (*hologram podstawowy*).
- hologram podstawowy rekonstruuje się poprzez wąską szczelinę, a rzeczywisty obraz rejestruje się na *hologramie wtórnym* przy użyciu zbieżnej wiązki odniesienia.

Zamazanie barwy w obrazie holograficznym minimalizuje się umieszczając płytę do hologramu wtórnego jak najbliżej płaszczyzny obrazowej. Jeżeli

⁶Ta uwaga nie dotyczy przypadku hologramu odbiciowego, dlatego, że hologram jest jednocześnie filtrem barwnym.

⁷S. Benton, *Hologram reconstructions with extended incoherent sources*, J. Opt. Soc. Am., 59, 1545 (1969).

rekonstrukcja odbywa się w rozbieżnym świetle białym, to widoczne są (w zależności od kąta obserwacji) różnobarwne, w kolorach tęczy, rozdzielone przestrzennie obrazy. Otrzymany z rekonstrukcji hologramu wtórnego urojony obraz nie zawiera, jak wspomnieliśmy, informacji o paralaksie pionowej przedmiotu.

Możliwa jest realizacja jednostopniowego zapisu hologramu tęczowego (rys. 9). W tej metodzie nie wykonuje się hologramu podstawowego.

Hologramy tęczowe zawdzięczają swoją nazwę obecności w obrazie barw tęczy przy rekonstrukcji hologramu białym światłem. Opisaną techniką otrzymujemy hologramy jaśniejsze z bardziej nasyconymi barwami niż wytwarzane innymi technikami. Są najpopularniejszymi hologramami stosowanymi, między innymi, jako znaki towarowe.

3.4 Holografia kolorowa

Ciągle wyzwaniem dla uczonych i wynalazców jest holografia w pełni kolorowa⁸. Hologram bowiem jest wynikiem zapisu interferencji fali monochromatycznej. Próby odtworzenia hologramu różnymi długościami fal powoduje zmianę wielkości i kierunku otrzymanego obrazu, a obraz tym samym jest rozmyty. Teoretycznie jest możliwe zapisanie trzech hologramów trzema różnymi wiązkami światła: czerwonym, zielonym i niebieskim na jednym zdjęciu⁹. W dwustopniowej metodzie wykonuje się trzy podstawowe hologramy dla trzech podstawowych długości fal, które składa się w czwarty hologram. Do odczytu należy użyć źródła o trzech barwach podstawowych. Oczywiście odtwarzanie jest utrudnione, ponieważ przy oświetleniu hologramu światłem np. zielonym nie tylko hologram zapisany za pomocą światła zielonego jest rekonstruowany. Można się z tym częściowo uporać stosując cienkie hologramy i charakterystyczną dla nich selekcję kątową. Metoda jest skomplikowana technicznie.

Inną techniką w holografii barwnej jest *stereogram*. Trzy hologramy dla trzech długości fal rejestruje się światłem czerwonym, zielonym i niebieskim oświetlającym obiekt pod różnymi kątami. Metoda obserwacji jest skomplikowana i mało praktyczna. Obraz mianowicie musi padać na oko pod różnymi kątami, zatem obserwator musi być odpowiednio umieszczony.

Badania nad fotografią i kinematografią trójwymiarową trwają i nie ograniczają się tylko do holografii.

⁸P. Hariharan, *Colour holography*, w *Progress in Optics*, tom 20, ed. E. Wolf, North - Holland, Amsterdam 1983.

⁹S. A. Benton, *Hologram Reconstructions with Extended Light Sources*, *J. Opt. Soc. of America*, 59, 1545 (1969).

3.5 Hologram syntetyczny

Proces rejestracji hologramu jak i jego rekonstrukcję można symulować za pomocą odpowiednich algorytmów komputerowych. Mówimy wtedy o cyfrowej lub syntetycznej holografii [7-8]. Zadany matematycznie przedmiot poddaje się obróbce matematycznej prowadzącej do otrzymania dyfrakcyjnego obrazu. Każdy punkt przedmiotu jest źródłem fali kulistej wnoszącej wkład, wraz z zadaną numerycznie falą odniesienia, w zespoloną amplitudę fali na powierzchni hologramu. Zadanie polegające w istocie na obliczeniu transmisji hologramu jest w zasadzie proste, ale bardzo czasochłonne. Opracowano wiele metod na efektywną realizację hologramów syntetycznych¹⁰.

Rekonstrukcja hologramu odbywa się klasycznie, za pomocą światła spójnego¹¹. Holografia cyfrowa ma potencjalnie wielkie zastosowania w rozpoznawaniu obrazów¹².

3.6 Hologram 360°

4 Zastosowania holografii

4.1 Inerferometria holograficzna

Interferometria holograficzna jest znaczącym rozwinięciem technik pomiarowych opartych na interferencji światła.

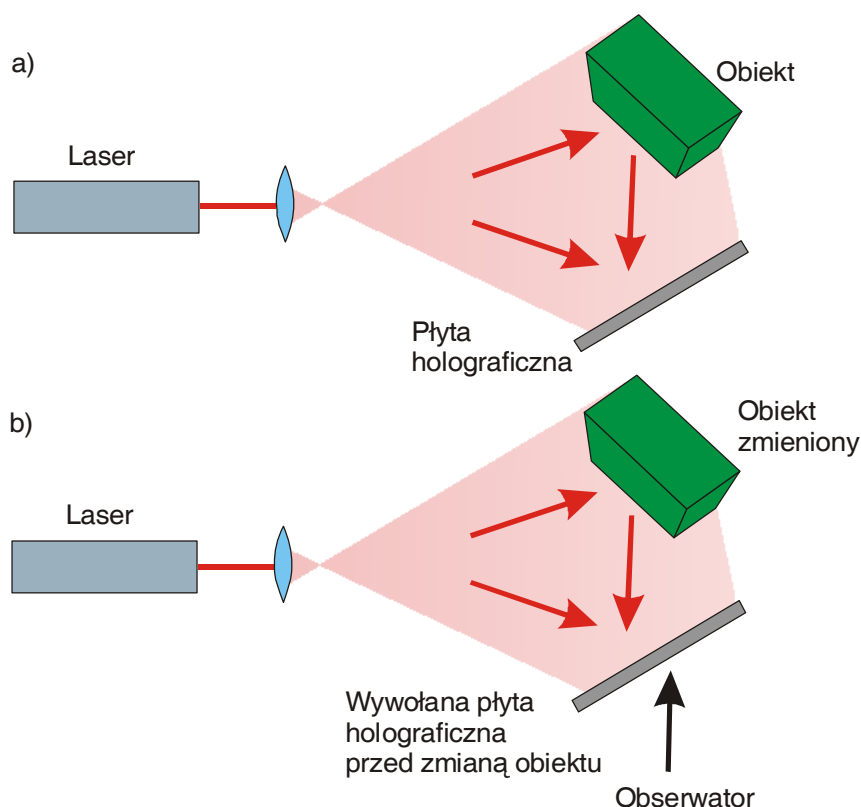
Najważniejszą techniką holograficzną stosowaną w przemyśle jest *podwójna ekspozycja*. Polega na tym, że wykonuje się dwa zdjęcia holograficzne: przed i po odkształceniu. W zwykły sposób rekonstruuje się hologramy, ale dwie wiązki obrazowe doprowadza się do interferencji otrzymując obraz złożony z prążków interferencyjnych, których układ świadczy o rozkładzie odkształceń. Możliwe są pomiary bardzo małych odkształceń powierzchni. Metoda jest bardzo szybka i stosowana zwłaszcza przy badaniach obciążeniowych różnego rodzaju konstrukcji (mostów, silników, kadłubów statków, śmigłowców, raket, skrzydeł samolotów itd.), ale też np. w konserwacji zabytków w badaniach nieniszczących do wykrywania miejsc odwarstwień warstwy malarskiej od podłoża, gdzie delikatne podgrzanie obiektu zmienia wielkość pęcherza powietrza pod warstwą malarską.

¹⁰W. H. Lee, *Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications*, w *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, tom 26, wyd. North-Holland Pub., Amsterdam 1978.

O. Bryngdahl, F. Wyrowski, *Digital Holography-Computer-generated holograms*, w *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, tom 28, wyd. North-Holland Pub., Amsterdam 1983.

¹¹S. Paśko, R. Józwicki, *Novel Fourier approach to digital holography*, *Opto-electronics*, 10, 89 (2002).

¹²T.M. Kreis, W.P.O. Jüpter, J. Geldmacher, *Digital holography: methods and applications*, *Proc. SPIE 3407*, 169 (1998).



Rys. 10. Rejestracja (a) i odtwarzanie hologramu w metodzie interferometrii holograficznej w czasie rzeczywistym (b)

W metodzie *interferometrii holograficznej w czasie rzeczywistym* obserwacje zmiany przedmiotu dokonuje się przez płytę holograficzną przygotowaną w sposób podany powyżej, na której zarejestrowano stan wyjściowy umieszczoną w pierwotnej pozycji (rys. 10). Światło pochodzące od obiektu interferuje ze światłem rekonstruowanego hologramu. Obserwuje się obrazy interferencyjne zależne od zmian kształtu przedmiotu z dokładnością do ćwiartki długości fali. O jakości obrazu interferencyjnego w zasadzie decyduje właściwe umieszczenie płyty, co może w praktyce być trudne technicznie.

Modyfikacja tej metody polega na zarejestrowaniu, ale niewywołaniu hologramu obiektu. Drugą ekspozycję wykonuje się przy użyciu tej samej płyty fotograficznej. Wywołany hologram zawiera złożony obraz obiektu przed i po zmianie. Zmiana obiektu (w obiekcie) widoczna jest w postaci prążków interferencyjnych.

W drgającym przedmiocie można wyróżnić nieruchome obszary węzłowe i powierzchnie o różnej od zera amplitudzie drgań. Obraz holograficzny

przedmiotu składa się z jasnych figur odpowiadających węzłom i rozmytych miejsc – części drgających. Wykorzystując lasery impulsowe wykonuje się hologramy elementów wirujących, np. łopatek turbin. Podobną zasadę można zastosować w przypadku holografii transmisyjnej.

Podczas badań wolno zmiennych charakterystyk przestrzennych o dużej amplitudzie stosuje się *interferometrię uśrednioną w czasie*.

Interferometria holograficzna jest bardzo ważną metodą badań bezinwazyjnych.

4.2 Holograficzne pamięci komputerowe

Badania zastosowania holografii do magazynowania informacji są bardzo intensywnie prowadzone, ponieważ teoretycznie w mm^3 zmieści się 10^{10} bitów. Spodziewamy¹³ się, że pojemność dysku holograficznego o wymiarach standardowej płyty *CD* będzie wynosić 200 *GB*. Zapis i odczyt jest równoległy, tzn. wszystkie bity informacji są obrabiane równocześnie, a informacja zawarta jest w dwuwymiarowej matrycy. Wiązka detekcyjna za pomocą układu soczewek kierowana jest na hologram pod różnymi kątami. Obrazy dyfrakcyjne są rejestrowane za pomocą detektora *CCD*. Adresowanie odbywa się za pomocą przełączników optoelektronicznych.

Poza pojemnością i szybkością działania jest jeszcze kilka zalet pamięci holograficznej w stosunku do innych typów pamięci

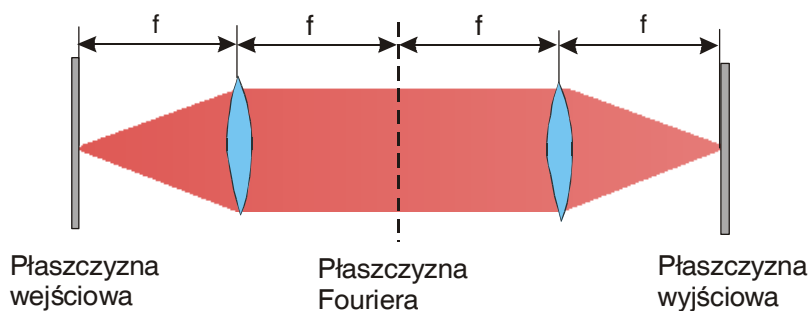
- informacja jest zawarta na całej powierzchni płyty, zatem hologram nie jest zatem czuły na miejscowe uszkodzenia,
- hologram jest mniej wrażliwy na przesunięcia i wibracje. Jest możliwa rejestracja obrazu holograficznego w kilku płaszczyznach grubej emulsji.

Największą niedogodnością jest możliwość tylko jednokrotnego zapisu płyty holograficznej, ale pracuje się nad tym problemem i wszystko wskazuje na to, że zostanie wkrótce rozwiązany. Nadzieje wiąże się z materiałami polimerowymi, termoplastycznymi, fotoprzewodzącymi, magnetoptycznymi (np.: *MnBi*) oraz elektrofotokromatycznymi (np. *KCl*).

4.3 Optyczne przetwarzanie danych

Holografia szeroko jest wykorzystywana w optycznym przetwarzaniu informacji, w transformacjach optycznych. Hologram transmisyjny umieszcza się w płaszczyźnie Fouriera. Zwykle filtrowanie przestrzenne realizuje się w układzie $4f$ (rys. 11.).

¹³M. Haw, *Holographic data storage*, Nature, 422, 556 (2003).



Rys. 11. Układ optyczny z holograficznym filtrem przestrzennym

W pierwszym kroku przezroczysty obiekt umieszcza się w położeniu płaszczyzny wejściowej [10]. Wykonuje się hologram Fouriera¹⁴ na płycie umieszczonej w płaszczyźnie Fouriera w obecności wiązki odniesienia. Wywołany nośnik umieszcza się w płaszczyźnie Fouriera. Zestaw może służyć do porównywania obiektów odniesienia z obrazem holograficznym.

Taki sam układ wykorzystuje się do filtracji przestrzennej. Dzięki temu możliwa staje się zmiana kształtu impulsu (patrz „Kontrola kształtu impulsu”), polepszenie niektórych parametrów obrazu, np. ostrości krawędzi obiektu, co jest ważne technice rozpoznawania obrazów.

4.4 Inne zastosowania

Powszechnie mamy do czynienia z holograficznymi znakami towarowymi. Do zabezpieczeń towarów wykorzystuje się hologramy, które ulegają zniszczeniu przy próbie ich odklejenia.

Jako znaki towarowe są wykorzystywane hologramy różnych typów:

- hologramy 2D, bez głębi, natomiast w zależności od kąta obserwacji pojawiają się efekty barwne,
- hologramy 2D/3D, które są złożeniem hologramów 2D w wielu płaszczyznach, co wywołuje efekt trójwymiarowego widzenia,
- hologramy 3D.

Te ostatnie mogą być hologramami grubymi, odbiciowymi rejestrowanymi za pomocą światła laserowego. W objętości płyty tworzą się płaszczyzny Bragga. Oglądany w świetle białym hologram w zależności od kąta obserwacji zmienia barwę, ponieważ zmienia się długość fali konstruktywnie interferującej na płaszczyznach Bragga. Również wykorzystuje się hologramy tęcze również widoczne w świetle białym.

¹⁴Zapis transformacji Fouriera zespolonej amplitudy obiektu i fali referencyjnej jest hologramem fourierowskim. Elementem realizującym optyczną transformację Fouriera jest soczewka.

Szerokie zastosowania stały się możliwe dzięki odkryciu w 1974 r. *hologramów tłoczonych*. Zawartość płyty holograficznej jest przenoszony na blachę niklową, na której tworzy się relief. Wytworzona w ten sposób matryca służy do tłoczenia dowolnej liczby kopii w foliach metalowych lub plastikowych.

W optyce coraz częściej stosuje się holograficzne elementy optyczne, np. soczewki, siatki czy pryzmaty. Podstawowymi wadami takich elementów jest to, że są przystosowane tylko dla światła o określonej długości i ich wydajność dyfrakcyjna jest mniejsza od 100 %. Zaletą jest np. to, że mogą być umieszczone na dowolnej powierzchni, w tym zakrzywionej, są małe i lekkie.

Holograficzne techniki są już stosowane w badaniach materiałowych struktury atomowej, cząsteczkowej i krystalicznej, w badaniach biologicznych i medycznych. Na przykład w endoskopii holograficznej sygnał i wiązka odniesienia może być przenoszona nawet jednym włóknem światłowodowym. Użycie wiązki światłowodów umożliwia zapis i obserwacje trójwymiarowych obrazów wewnątrz ciała.

Zastosowań jest znacznie więcej, a rozwój techniki sprawi, że wpływ holografii na nasze życie stanie się jeszcze większy.

5 Uzupełnienie

Załóżmy [5], że punkt $P(x_0, y_0)$ jest źródłem fali kulistej. Przyczynę do pola w punkcie (x_i, y_i) odległym o r od punktu P wynosi

$$dU_S(x_i, y_i) = \frac{\exp(ikr)}{r} U_S(x_0, y_0) dx_0 dy_0,$$

gdzie

$$r = \sqrt{z_i^2 + (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}.$$

Zatem

$$U_S(x_i, y_i) = \frac{1}{i\lambda} \iint \frac{\exp(ikr)}{r} U_S(x_0, y_0) dx_0 dy_0. \quad (6)$$

Jest to *dyfrakcyjna całka Fresnela-Kichhoffa*. Dla dużych z w porównaniu z x i y

$$z_i^2 \gg (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2,$$

po rozwinięciu w szereg otrzymujemy

$$\begin{aligned} r &= z_i \left(1 + \frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}{2z_i^2} \right) = \\ &= z_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} - \frac{x_i x_0 + y_i y_0}{z_i} + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_i}. \end{aligned} \quad (7)$$

Obszar z_i dla którego spełniona jest relacja (7) nosi nazwę *obszaru Fresnela* lub *obszaru bliskiego pola*. Ze wzrostem z_i przy skończonych wymiarach źródła ostatni wyraz (7) staje się mały, aż

$$r = z_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} - \frac{x_i x_0 + y_i y_0}{z_i}.$$

Mówimy wtedy o przybliżeniu *obszaru dalekiego (obszaru Fraunhofera)*.

Podstawiając do (6), otrzymujemy dla przybliżenia Fraunhofera

$$U_S(x_i, y_i) = \frac{1}{i\lambda z_i} \exp \left[ikz_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right] \times \\ \times \iint U_S(x_0, y_0) \exp[-2\pi i(f_x x_0 + f_y y_0)] dx_0 dy_0,$$

gdzie $f_x = x_i/\lambda z_i$ i $f_y = y_i/\lambda z_i$.

Całka jest dwuwymiarową transformacją Fouriera pola ze współrzędnych częstotliwościowych f_x, f_y do współrzędnych przestrzennych, czyli inaczej, oznaczając przez \mathcal{F} transformację Fouriera

$$E(x_i, y_i) = \frac{1}{i\lambda z_i} \exp \left[ikz_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right] \mathcal{F} \{ U_S(x_0, y_0) \}_{f_x, f_y}.$$

Całka dyfrakcyjna Fresnela–Kichhoffa w obszarze Fresnela na pole elektryczne fali przyjmuje postać

$$E(x_i, y_i) = \frac{1}{i\lambda z_i} \exp \left[ikz_i + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_i} \right] \mathcal{F} \left\{ U_S(x_0, y_0) \exp \left(ik \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_i} \right) \right\}_{f_x, f_y} \quad (8)$$

6 Literatura

1. K. J. Gåsvik, *Optical metrology*, John Wiley & Sons, New York 1995.
2. A. K. Ghatak, K. Thyagarajan, *Optical electronics*, Cambridge University Press, Cambridge 1989.
3. P. Harihan, *Optical Holography. Principles, techniques and applications*, Cambridge University Press, Cambridge 1996.
4. *Laboratorium podstaw optoelektroniki i miernictwa optoelektronicznego*, red. J. Helsztyński, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.
5. K. Iizuka, *Elements of Photonics*, John Wiley & Sons, New York 2002.

6. M. Kujawińska, K. Patorski, M. Rafałowski, A. Szapiel, *Laboratorium optyki falowej*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985.
7. W. Lauterborn, T. Kurz, W. Wiesenfeldt, *Coherent Optics*, Springer-Verlag, Berlin 2002.
8. S. G. Lipson, H. Lipson, D. S. Tannhauser, *Optical Physics*, ed. III, Cambridge University Press, Cambridge 1995.
9. *Encyclopedia o Laser and Technology*, ed. R. A. Meyers, Academic Press Inc., New York 1991.
10. A. Piekara, *Nowe oblicze optyki*, PWN, Warszawa 1976.
11. *Holografia optyczna*, red. M. Pluta, PWN, Warszawa 1980.
12. *Springer Handbook of Lasers and Optics*, ed. F. Träger, Springer, New York 2007.
13. M. Young, *Optics and Lasers*, Springer-Verlag, Berlin 2000.
14. F. T. S. Yu, I. C. Khoo, *Principles of optical engineering*, John Wiley & Sons, New York 1990.
15. B. Ziętek, *Lasery*, Wyd. Nauk.UMK, Toruń 2008.