

J. R. Meyer-Arendt

wstęp do optyki



WARSZAWA - 1979
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

Odkrycia czynione są często dlatego, że nadszedł właściwy moment. Niektórych odkryć dokonywali jednocześnie i niezależnie od siebie różni odkrywcy. Inaczej rzecz ma się z *hologafią*, której odkrycie jest dziełem jednego człowieka — Dennisa Gabora¹⁾ z University of London's Imperial College of Science and Technology. Jego odkrycie przyszło w czasie, gdy technika nie była w pełni na nie przygotowana. Dopiero w kilka lat później, po wynalezieniu lasera, odkrycie Gabora mogło zostać w pełni zrealizowane.

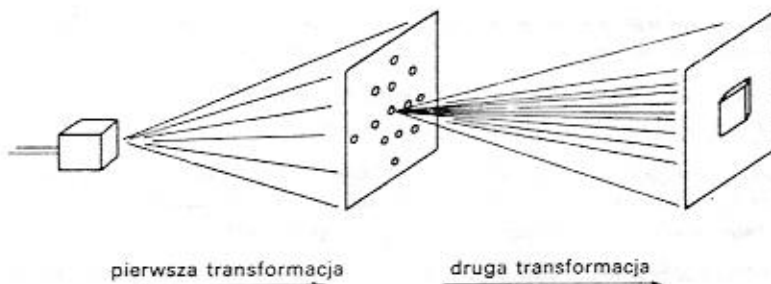
Tak jak i inne transformacje, o których mówiliśmy w poprzednim rozdziale, również holografia jest procesem dwuwymiarowej transformacji. Poświęcamy jej osobny rozdział tylko ze względów praktycznych — ogromne zainteresowanie jakie towarzyszy jej w ostatnich latach sprawiło, że zgromadzony materiał jest nadzwyczaj obszerny.

REKONSTRUKCJA POWIERZCHNI FALOWEJ

Pierwotnie Gabor traktował hologafię, albo jak ją wówczas nazywano — „rekonstrukcję powierzchni falowej”, jako środek na skorygowanie naturalnej aberracji sferycznej występującej w mikroskopie elektronowym. Jak na ironię problem ten do tej pory nie został rozwiązany, a holografia stała się głównym, szeroko spopularyzowanym osiągnięciem optyki w ostatnich latach. Doniosłość holografii zawiera się w tym, że dostarcza ona najbardziej przekonującego dowodu na to, że *każdy proces wytwarzania obrazu jest procesem złożonym z dwóch etapów*.

Termin *holografia* wywodzi się z greckiego — *ὅλος* = wszystko, lub całe, *γραφειν* = = pisać. Hologafię można zdefiniować jako proces zbierania i magazynowania informacji optycznej o przedmiocie w emulsji fotograficznej — *hologramie*. Nie jest do tego potrzebna soczewka. W drugim etapie, etapie rekonstrukcji, informacja jest odzyskiwana z hologramu, stając się przy tym widzialną pod postacią obrazu optycznego. W zasadzie również i na tym etapie nie jest potrzebna soczewka.

Rekonstrukcja diagramów Lauego. Przekonał się poprzednio, że obraz jest wynikiem dwóch kolejnych transformacji Fouriera. W procesie powstawania zwykłego obrazu, transformacje te są natychmiastowe i w obu uczestniczy światło o tej samej długości fali.



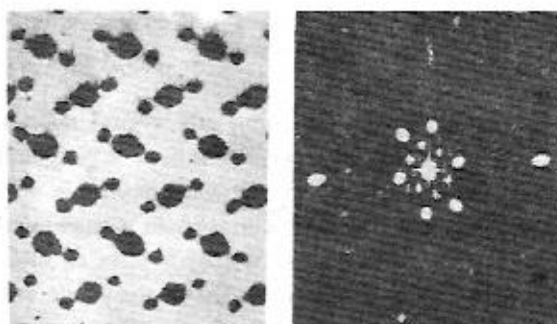
Rys. 1. Powstawanie obrazu jest w istocie sumą dwóch transformacji

¹⁾ Dennis Gabor (ur. 1900), z pochodzenia Węgier, inżynier elektryk i fizyk. D. Gabor, *A New Microscopic Principle*, Nature, London 161 (1948), 777.

Ale tak wcale być nie musi. Można np. dokonać pierwszej transformacji przy użyciu promieni X. Jeżeli przedmiotem byłby kryształ, to transformacja struktury jego sieci, chociaż niekoniecznie transformacja Fouriera, dawałaby *diagram Lauego* (Rozdz. 2.7). W zasadzie możliwe powinno być dalsze przetworzenie diagramu Lauego i zamienienie go na obraz kryształu (Rys. 1).

Praktyczna realizacja takiej idei jest znacznie trudniejsza niż samo jej sformułowanie, głównie dlatego zresztą, że emulsja fotograficzna nie rejestruje fazy światła. Informacja o fazie jest tracona. Problem można jednak rozwiązać i dokonał tego Buerger²⁾ obliczając fazę każdego maksimum diagramu Lauego. Następnie w odpowiednie miejsca w masce wprowadził odpowiednio nachylone, małe płaskie zwierciadła, które zapewniły odpowiednią różnicę faz przy rekonstrukcji.

Rezultatem jest ogromnie powiększony obraz struktury atomowej kryształu, dla którego wykonano diagram Lauego. Powiększenie zależy od stosunku długości fal uczestniczących w obu etapach. W znakomitej rekonstrukcji struktury markazytu FeS_2 ,



Rys. 2. Rekonstrukcja diagramów Lauego. Kryształ markazytu FeS_2 — z lewej i atomy węgla w cząsteczce sześciometylobenzenu $\text{C}_6(\text{CH}_3)_6$ — z prawej. [Fotografia z lewej wg M. J. Buerger, J. Appl. Physics 21 (1950), 909. Fotografia z prawej wykonana przez Autora]

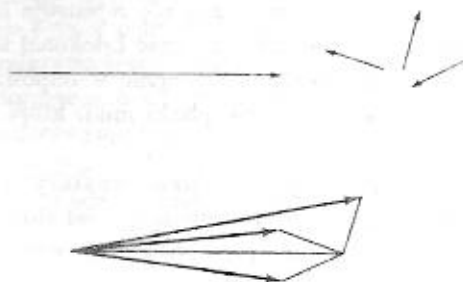
uzyskano powiększenie $2,6 \cdot 10^7$ razy, wyraźnie ujawniając zarówno centralne atomy żelaza, jak i dwa atomy siarki, które występują po obu stronach każdego atomu żelaza (Rys. 2, z lewej).

Sześć wewnętrznych kółek na rys. 2 (z prawej) wyobraża heksagonalny pierścień benzenowy cząsteczki sześciometylobenzenu $\text{C}_6(\text{CH}_3)_6$. W tym przypadku rekonstruowany był obraz dyfrakcyjny Fraunhofera rysunku struktury molekularnej sześciometylobenzenu (zastosowano w tym przypadku *obiektyw typu oka owadziego* — złożony z wielu soczewek).

Tło oświetlenia spójnego (wiązka odniesienia). W tym właśnie punkcie istotnego postępu dokonał Gabor pokazując, że do rekonstrukcji *każdego* obiektu, niekoniecznie kryształu, przy nieznaności związków fazowych konieczne jest dodatkowe „spójne tło”. Błona fotograficzna, tak jak każdy inny detektor energii promienistej, nie może zanotować fazy światła. Notuje ona jedynie amplitudę. Ale fazę można kontrolować wykorzystując interferencję światła rozpraszanego przez przedmiot ze światłem stanowiącym dodatkowe

²⁾ Buerger M. J., *Generalized Microscopy and the Two-Wavelength Microscope*, J. Appl. Physics 21 (1950), 909.

tło. Jeżeli te obie części światła mają ze sobą interferować, to muszą być one w dostatecznym stopniu spójne. Stąd też wymaganie, ażeby tło było spójne. Nawet jeżeli amplitudy sygnałów mają przypadkową orientację, a tak na pewno jest, gdy dyfrakcja zachodzi na nieregularnym przedmiocie, to amplituda silnego tła sprawia, że *wypadkowe wektory amplitudy niewiele się różnią* (Rys. 3).



Rys. 3. Dodawanie silnego tła (u góry z lewej) i sygnału o przypadkowych fazach (u góry z prawej) daje niewiele różniące się wektory wypadkowe (u dołu)

Jak może powstawać zadowalający hologram, gdy sygnał ma niskie natężenie, a do tego natężenie tła jest wysokie? Otóż przyczyną jest to, że w przypadku światła spójnego sumują się nie natężenia, lecz amplitudy. Na przykład natężenie sygnału może stanowić jeden procent natężenia tła, ale wtedy amplituda sygnału stanowi dziesięć procent. Przypuśćmy, że w granicznych przypadkach dwie wiązki światła są albo dokładnie w fazie, albo mają dokładnie przeciwnie fazy, wtedy wypadkowe natężenie zmieniać się będzie od $(1+0,1)^2 = 1,21$ do $(1-0,1)^2 = 0,81$. A to wystarcza do tego, aby hologram miał rozsądnie wysoki kontrast. W praktyce natężenie tła powinno być od około 3 do nie więcej niż 10 razy wyższe od natężenia sygnału.

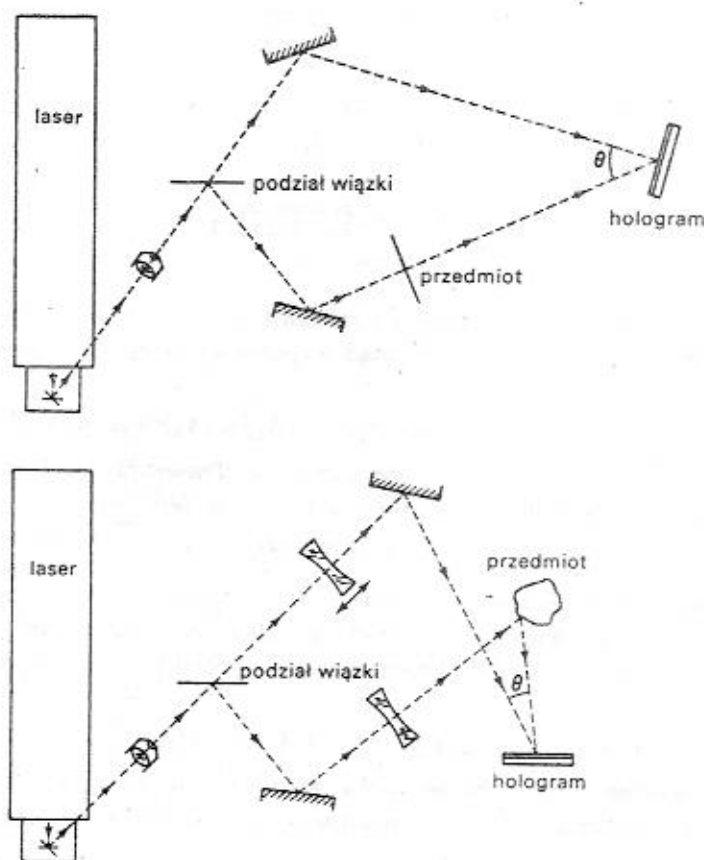
WYKONYWANIE HOLOGRAMU

Jednym z ograniczeń procedury Gabora jest to, że łatwo można uzyskać hologram przedmiotu takiego jak np. nieprzezroczysta litera na przezroczystym tle, trudny jest natomiast przypadek odwrotny. Ponadto zazwyczaj w procesie rekonstrukcji powstają obrazy bliźniacze. Tego typu ograniczenia nie występują w metodzie otrzymywania hologramów opracowanej przez Leitha i Upatnieksa. W metodzie tej wiązka odniesienia nie przechodzi bezpośrednio przez przedmiot, ale jest dodawana oddzielnie, pod kątem do wiązki przedmiotowej (sygnału), a nie współosiowo z nią.

Istnieje wiele sposobów realizacji takiego przepisu. Przede wszystkim światło z odpowiedniego źródła dzielone jest na dwie wiązki. Tym źródłem nie musi być konieczne laser, ale jego jasność, spójność przestrzenna i monochromatyczność bardzo ułatwiają sprawę. Jedna z wiązek przechodzi przez przedmiot lub odbijana jest od niego, druga natomiast omija przedmiot. Obie kombinują na błonie fotograficznej (Rys. 4).

Zazwyczaj układ składa się z obiektywu mikroskopowego (do zwiększenia rozbieżności wiązki), zwierciadła półprzezroczystego (do podziału wiązki) i kilku płaskich zwierciadeł,

zmontowanych na ciężkiej podstawie. Dwie rozpraszające soczewki, z których jedna jest ruchoma, umożliwiają właściwe dopasowanie natężeń wiązki przedmiotowej i wiązki odniesienia. W emulsji fotograficznej obie wiązki interferują, wytwarzają układ blisko siebie leżących prążków, które tworzą hologram.



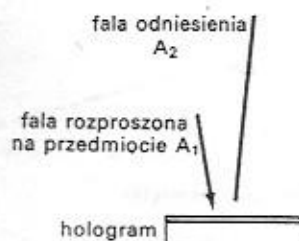
Rys. 4. Układy doświadczalne do wytwarzania hologramu przedmiotu przezroczystego (u góry) i nieprzezroczystego (u dołu). Kąt θ powinien być raczej mały

TEORIA HOLOGRAFII

Teorię holografii zajmowało się wielu autorów³⁾. W zasadzie hologram jest zapisem obrazu interferencyjnego. Interferują amplitudy fali przedmiotowej A_1 rozproszonej na przedmiocie i fali odniesienia A_2 . Nakładając się na siebie wytwarzają one prążki inter-

³⁾ Klasyczny opis holografii można znaleźć w: Gabor D., *Microscopy by reconstructed wave-fronts*, Proc. Roy. Soc. London **A197** (1949), 454; *Microscopy by Reconstructed Wave Fronts: II*, Proc. Physical Soc. **B64** (1951), 449. A także w: Goodman J. W., *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill Book Company, New York 1968. Foleppa E. J., *Biomedical Applications of Holography*, Physics Today **22** (July 1969), 25. Leith E. N. and Upatnieks J., *Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects*, J. Opt. Soc. Am. **53** (1963), 1377. Leith E. N. and Upatnieks J., *Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects*, J. Opt. Soc. Am. **54** (1964), 1295.

ferencyjne, które zostają zarejestrowane w emulsji fotograficznej wytwarzając hologram (Rys. 5). Ponieważ konfiguracja obrazu interferencyjnego zależy od fazy i względnych amplitud kombinujących fal, wobec tego fale te podczas rejestrowania muszą mieć ustalony związek fazowy — muszą być one spójne.



Rys. 5. Dwie fale, z których tworzony jest hologram

Po dotarciu do emulsji obie składowe kombinują ze sobą, dając $A_1 + A_2$. Ale emulsja fotograficzna rejestruje tylko natężenie, stąd wypadkowe natężenie w płaszczyźnie x, y jest

$$I(x, y) = (A_1 + A_2)^2 = (A_1 + A_2)(A_1 + A_2)^* = |A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2, \quad (4.4-1)$$

gdzie znak (*) oznacza wielkość zespoloną sprzężoną. Transmitancja T emulsji fotograficznej, naświetlanej światłem o natężeniu I w czasie Δt , jest

$$T = E^{-\gamma/2}, \quad (4.4-2)$$

gdzie E jest naświetleniem $I\Delta t$, a γ — nachyleniem charakterystyki, tzw. krzywej Hurtera-Driffelda. Czynniki $1/2$ w wykładniku pojawia się, ponieważ i tym razem chodzi o amplitudę, a nie o natężenie będące kwadratem amplitudy. Stąd dla stałego przedziału czasu Δt ,

$$T \sim I^{-\gamma/2} = (|A_1|^2 + |A_2|^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2)^{-\gamma/2}. \quad (4.4-3)$$

Pokazaliśmy wcześniej (na rys. 3), że $|A_1|^2 + |A_2|^2$ — natężenie wiązki odniesienia, musi być duże w porównaniu z dwoma ostatnimi wyrazami $A_1 A_2^* + A_1^* A_2$ reprezentującymi natężenie wiązki przedmiotowej.

W procesie rekonstrukcji wprowadzana jest trzecia fala A_3 . Fala ta pada na hologram (Rys. 6) wytwarzając falę A_4 zmodulowaną przez hologram

$$A_4 = A_3 T(x, y). \quad (4.4-4)$$

Biorąc pod uwagę tylko część przedmiotową światła ugiętego, zauważymy, że

$$A_4 \sim A_3 A_1 A_2^* + A_3 A_1^* A_2 \quad (4.4-5)$$

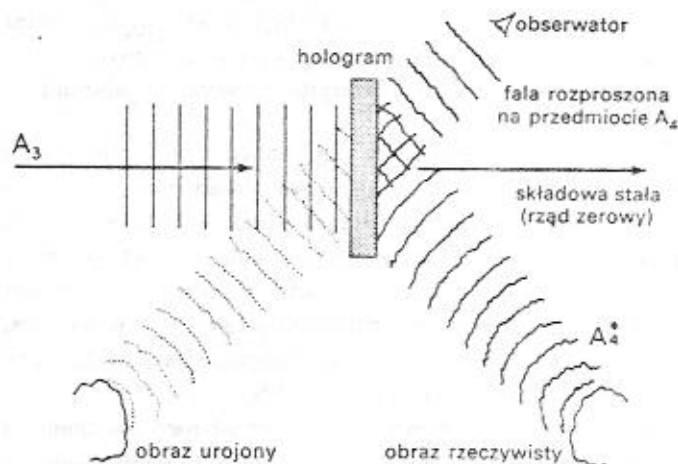
Jeżeli amplituda A_3 jest identyczna z amplitudą wiązki odniesienia A_2 , lub też jeżeli pozostaje z nią w ustalonym związku, to wyrazy w równaniu (4.4-5) będą stałe i

$$A_4 \sim A_1. \quad (4.4-6)$$

Tak więc światło uginane przez hologram rzeczywiście przypomina amplitudę światła rozproszonego na przedmiocie — obraz jest rekonstrukcją przedmiotu.

Gdy A_2 i A_3 są falami płaskimi, to $A_2 = A_2^*$ i powstają obrazy urojony i rzeczywisty, każdy z jednakowym powiększeniem. Kiedy jednak hologram oświetlany jest falą kulistą, wówczas obraz rzeczywisty jest powiększony, a obraz urojony zmniejszony.

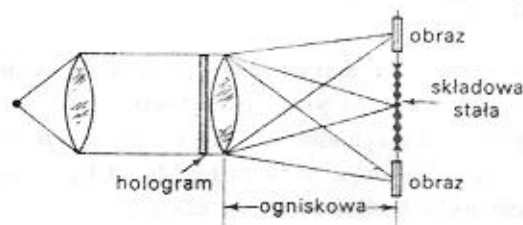
Powstawanie obrazu urojonego można objaśnić stosunkowo łatwo. Wiązka rekonstruująca przechodząc przez hologram przyjmuje amplitudę i fazę wiązki przedmiotowej. I dlatego wydaje się, iż przychodzi ona z punktów poza płytką hologramu, z odległości równej tej, w jakiej znajdował się przedmiot wtedy, gdy sporządzono hologram. Obraz rzeczywisty jest, co do swego położenia i orientacji, odbiciem zwierciadlanym obrazu



Rys. 6. Proces rekonstrukcji. Hologram ugina światło padające A_3 w wyniku czego powstają obraz rzeczywisty i urojony

urojonego, w płaszczyźnie hologramu. Rekonstrukcję można poprawić nachylając nieco hologram tak, ażeby zwiększyła się eksponowana powierzchnia, w stronę obrazu urojonego bądź rzeczywistego, w zależności od potrzeby.

Hologramy Fraunhofera i Fresnela. Do tej pory zakładaliśmy, że hologram dla każdego punktowego przedmiotu ma własności przypominające nieco własności płytki strefowej. Taki hologram nazywa się *hologramem Fresnela*. Na przykład płytka strefowa jest hologramem Fresnela punktu. Przypomnijmy sobie, że rzeczywiście ogniskuje ona światło do punktu



Rys. 7. Rekonstrukcja hologramu Fouriera

tu. Gdy nie występują takie własności ogniskujące, to do zogniskowania czoł fali przechodzących przez hologram potrzebna jest soczewka. Taki hologram nazywa się *hologramem Fraunhofera* lub *hologramem Fouriera* (Rys. 7).

Hologram Fraunhofera można wytworzyć przez wprowadzenie płytki rozpraszającej, np. matówki tuż przed przedmiotem⁴⁾. Płytkę rozpraszającą wraz z oryginalnym przed-

⁴⁾ Leith E. N. and Upatnieks J., J. Opt. Soc. Am. 54 (1964), 1295.

miotem stanowią teraz przedmiot. Przy rekonstrukcji hologramu obraz urojony będzie reprodukcją przedmiotu i płytki rozpraszającej. Płytkę rozpraszającą nie zawiera jednak żadnych interesujących szczegółów i w przypadku, gdy przedmiot jest przezroczysty, służy po prostu do uwidocznienia go na hologramie.

W procesie rekonstrukcji, tak jak poprzednio, wytwarzane są dwa obrazy, ale oba powstają w nieskończoności. Są one symetryczne względem zerowego rzędu (porównaj rys. 7). Jednak wytwarzany w procesie rekonstrukcji obraz urojony jest inny niż normalny obraz urojony. Jest on trójwymiarowy, bez konieczności obserwacji stereoskopowej i wykazuje przy tym paralaksę pomiędzy obszarami bliższymi i dalszymi.

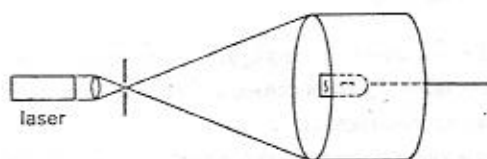
Materiały fotograficzne w holografii. Odstępy pomiędzy prążkami w hologramie spełniają zwykle równanie siatki dyfrakcyjnej $d \sin \theta = m\lambda$. Jeżeli przy otrzymywaniu hologramu wiązka przedmiotowa tworzy duży kąt z wiązką odniesienia, to wtedy odległość pomiędzy prążkami może być bardzo mała i oczywiście potrzebna jest wtedy emulsja fotograficzna o skrajnie wysokiej rozdzielczości. Najwyższą rozdzielczość, rzędu około 2000 linii/mm, mają obecnie emulsje spektrograficzne Kodak 649-F lub 649-GH. Inna emulsja, Kodak SO-243 ma rozdzielczość 500—1000 linii/mm. Używane są również szeroko takie emulsje, jak emulsja holograficzna Agfa-Gevaert 10E70 i Polaroid 55 P/N.

Każda część powierzchni hologramu, niezależnie od tego jak mała, reprodukuje cały przedmiot. Ale gdy element powierzchni zmniejsza się, rozdzielanie maleje, ponieważ jest ono funkcją apertury układu odwzorowującego.

Inną cechą szczególną holografii jest to, że rekonstrukcja nie daje negatywów. Jeżeli wykona się kopię hologramu i hologram zostanie odwrócony (w czarnym i białym), rekonstruowany obraz pozostaje pozytywnym i poza pewnym obniżeniem jego jakości niczym nie różni się od oryginalnej rekonstrukcji. Wynika to stąd, że informacja w hologramie jest zmagazynowana w wielkości odstępów pomiędzy prążkami i ich kontraście, a żaden z tych parametrów nie jest zmieniany przez odwrócenie stosunku gęstości optycznej.

Hologramy fazowe mają zmienną grubość przezroczystego materiału (a nie gęstość optyczną). Można je otrzymywać ze zwykłych hologramów przez odpowiednią obróbkę termoplastyczną, bądź też wykorzystując do celów holografii pewne kryształy, o czym będziemy zaraz mówili.

Hologramy specjalne. Można otrzymywać hologramy pokrywające pełne 360° . W tym celu umieszcza się błonę fotograficzną wewnątrz cylindra, emulsją do środka⁵⁾ (Rys. 8). Przedmiot znajduje się w środku cylindra. Obiektyw mikroskopowy wytwarza rozbieżną wiązkę światła laserowego, której część pada na przedmiot i jest rozpraszana w kierunku błony, a pozostała część pada bezpośrednio na błonę i służy jako wiązka odniesienia.



Rys. 8. Holografia w kącie 360°

⁵⁾ Jeong T. H., Rudolf P. and Luckett A., *360° Holography*, J. Opt. Soc. Am. **56** (1966), 1263.

Również przy oglądaniu błona tworzy pętlę. Obraz ogląda się używając światła z lampy rtęciowej lub łuku sodowego.

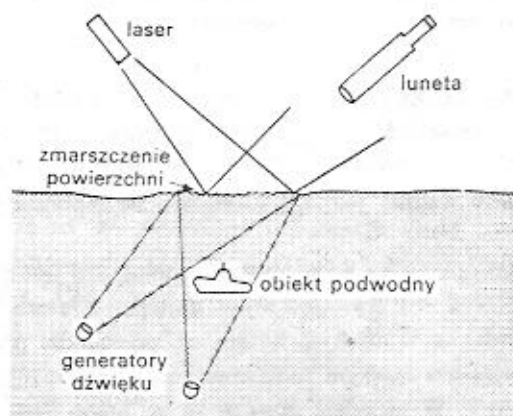
Przy użyciu dostatecznie grubej warstwy emulsji można zarejestrować w niej jednocześnie kilka hologramów tego samego przedmiotu, używając dla każdej rejestracji światła o innej barwie. Każdej barwie odpowiada wtedy inny układ prążków⁶⁾. Kiedy taki *objętościowy* hologram jest następnie rekonstruowany przy użyciu światła białego, zrekonstruowany obraz jest w pełni barwny.

Sztuczne hologramy to szeregi linii i krzywych rysowane piórem i atramentem⁷⁾. Płytką strefowa jest np. hologramem punktu. Hologramy można generować również za pomocą komputera⁸⁾. Nawet zwykły interferogram, z dużą ilością blisko siebie położonych linii, może być uważany za hologram i można go rekonstruować⁹⁾.

ZASTOSOWANIA HOLOGRAFII

Wykorzystanie holografii w fotografii, mikroskopii, astronomii, przy rozpoznawaniu znaków, zaczęło zaledwie wydawać pierwsze owoce. Najważniejszym ze wszystkich jest jej *heurystyczna wartość* — fakt, że wykazano, iż proces wytwarzania obrazu składa się z dwóch oddzielnych procesów transformacji Fouriera lub Fresnela.

Holografia akustyczna. Oryginalnie, rekonstrukcja powierzchni falowych wynaleziona została dla celów skorygowania aberracji w mikroskopii elektronowej. Następnie rozciągnięto ją na obszar promieni X i dalekiej podczerwieni. Uzyskano nawet hologramy mikro-



Rys. 9. Holografia akustyczna

⁶⁾ Denisjuk Y. N., *On the reproduction of the optical properties of an object by the wave field of its scattered radiation*, Optics and Spectroscopy **15** (1963), 279. Lin L. H. and LoBianco C. V., *Experimental Techniques in Making Multicolor White Light Reconstructed Holograms*, Applied Optics **6** (1967), 1255.

⁷⁾ Rogers G. L., *Artificial Holograms and Astigmatism*, Proc. Roy. Soc. Edinburg **A63** (1951—52), 313.

⁸⁾ Lohmann A. W. and Paris D. P., *Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer*, Applied Optics **6** (1967), 1739.

⁹⁾ Bryngdahl O. and Lohmann A. W., *Interferograms are Image Holograms*, J. Opt. Soc. Am. **58** (1968), 141.

falowe nie zmieniając przy tym podstawowych zasad metody *Holografię akustyczną* można zrealizować montując pod wodą, blisko siebie, dwa generatory fal akustycznych. Fala akustyczna wytwarzana przez jeden z nich przechodzi przez podwodny obiekt (Rys. 9). Obraz zmarszczeń na powierzchni wody, wytwarzany przez interferencję obu fal dźwiękowych, jest hologramem. Odbite od powierzchni wody światło laserowe rekonstruuje obraz¹⁰⁾.

Analiza naprężeń. Zazwyczaj hologramy są rejestrowane w warunkach wysokiej stabilności mechanicznej. Dlatego też każde odchylenie od takiej stabilności może być łatwo wykryte. Na tej zasadzie opiera się wykorzystanie holografii do badania napięć i naprężeń oraz wywoływanych przez nie deformacji powierzchni¹¹⁾. Otrzymano również hologramy przedmiotów wykonujących drgania¹²⁾. Rekonstrukcja pozwala uzyskać w takich przypadkach kontury stałej amplitudy drgań.

Badania rozmiarów i rozkładów przestrzennych. Wykorzystując holografię można badać rozmiary i rozkłady przestrzenne kropelek wody i aerozoli. Ponieważ cząsteczki takie są w stałym ruchu, wobec tego badanie musi mieć charakter natychmiastowy, tzn. cząsteczki muszą być fotografowane. Jednak zwykła fotografia nie znajduje tutaj zastosowania, bo czas trwania ekspozycji nie pozwala nawet na zogniskowanie układu na pojedynczej cząsteczce, nie mówiąc już o fotografowaniu całego zespołu takich cząsteczek.

Inaczej jest z holografią. Hologram wykonuje się używając lasera impulsowego. W trakcie trwania impulsu ruch cząsteczek jest „zamrożony” i po rekonstrukcji można spokojnie badać pojedyncze cząsteczki, ich rozmiary i ich przestrzenny rozkład odpowiadający chwili, w której wykonywano hologram¹³⁾.

Mikroskopia holograficzna. Zwykle mikroskopy, o dużej zdolności rozdzielczej, mają szczególnie małą głębię ostrości. *Mikroskopia holograficzna*, całkiem przeciwnie, charakteryzuje się tak dużą głębią ostrości, że niepotrzebne jest ogniskowanie. Nawet jeżeli hologram był rejestrowany wzdłuż jednego kierunku, to rekonstrukcja jest i tak trójwymiarowa.

W zasadzie mikroskop oparty na wykorzystaniu holografii jest podobny do interferometru Macha-Zehndera (Rys. 10). Światło spójne, najlepiej z lasera, dzielone jest na dwie nierówne części. Jedna wiązka, o niższym natężeniu, przechodzi przez przedmiot, druga natomiast omija go. Wiązka o niższym natężeniu niesie informację, wiązka o wyższym natężeniu większość energii. W układzie opracowanym przez Gabora, dla rekonstrukcji dostępne jest całe natężenie i informacja o fazie, co eliminuje obraz sprzężony. Uzyskuje

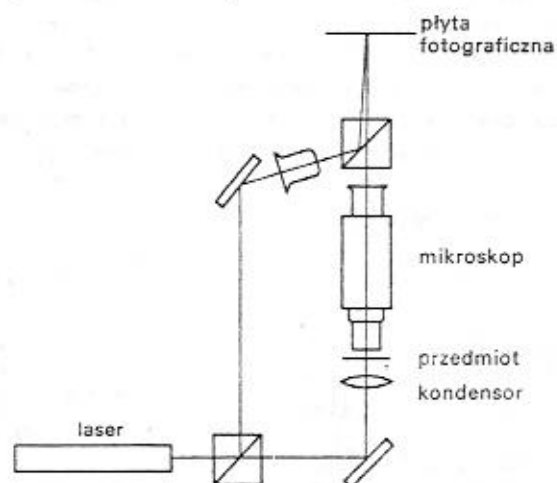
¹⁰⁾ Metherell A. F., El-Sum H. M. A., Dreher J. J. and Larmore L., *Introduction to Acoustical Holography*, J. Acoust. Soc. Am. **42** (1967), 733.

¹¹⁾ Haines K. A. and Hildebrand B. P., *Surface-Deformation Measurement Using the Wavefront Reconstruction Technique*, Applied Optics **5** (1966), 595.

¹²⁾ Powell R. L. and Stetson K. A., *Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction*, J. Opt. Soc. Am. **55** (1965), 1593.

¹³⁾ Thompson B. J., Ward J. H. and Zinky W. R., *Application of Hologram Techniques for Particle Size Analysis*, Applied Optics **6** (1967), 519.

się to używając drugiego, dopełniającego hologramu i światła przesuniętego w fazie o 90° , które kombinuje ze światłem z oryginalnego hologramu dzięki zastosowaniu układu pryzmatów podobnego do kostki Abbego¹⁴⁾.



Rys. 10. Mikroskop holograficzny

Magazynowanie informacji. Hologramy są rejestrowane normalnie w emulsji fotograficznej. Ale do celu takiego można wykorzystać również i inne ośrodki. Obiecujące pod tym względem wydają się być np. monokryształy niobatu litu LiNbO_3 . W kryształach takim można zmagazynować do tysiąca hologramów w objętości 1 cm^3 . Współczynnik załamania tego kryształu zmienia się pod wpływem naświetlania. Rozdzielenie przekracza 1600 linii/mm. Do wytwarzania i magazynowania hologramów w kryształach używane jest światło o długości 488 nm z lasera argonowego. Rekonstrukcję można wykonać wykorzystując to samo światło, bądź też używając światła z lasera He-Ne o długości fali 633 nm¹⁵⁾. Zagadnienie jednoczesnego magazynowania wielu hologramów jest obecnie bardzo intensywnie rozwijającą się dziedziną.

Istnieją dowody na to, że generalnie informacja może być lepiej magazynowana i efektywniej odzyskiwana jako hologram, czy inny wynik transformacji Fouriera, niż jako obraz rzeczywisty. Prawdopodobnie pod taką właśnie postacią, noszącą wówczas nazwę *engramów*, magazynowane są informacje w mózgu. Taki pogląd pozwala przynajmniej zrozumieć niezbyt udane próby zlokalizowania „ośrodków” w mózgu, oraz to dlaczego często poważne uszkodzenia mózgu nie wywołują przewidywanych defektów.

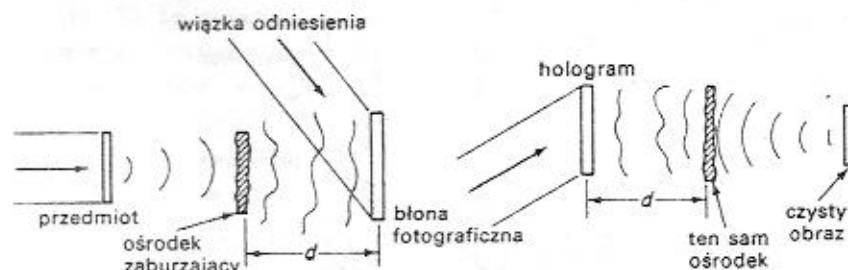
Wpływ zaburzeń ośrodka. Bardzo istotnym problemem, któremu obecnie poświęca się wiele uwagi, jest problem wytwarzania obrazów w warunkach, gdy światło przechodzi przez zaburzone ośrodki, np. przez zaburzoną atmosferę. Tak na przykład fotografia wykonywana przez płytkę szkła groszkowanego jest tak zniekształcona, że często w ogóle

¹⁴⁾ Gabor D. and Goss W. P., *Interference Microscope with Total Wavefront Reconstruction*, J. Opt. Soc. Am. **56** (1966), 849. Van Ligten R. F. and Osterberg H., *Holographic microscope*, Nature **211** (1966), 282.

¹⁵⁾ Chen F. S., LaMacchia J. T. and Fraser D. B., *Holographic Storage in Lithium Niobate*, Applied Physics Letters **13** (1968), 223.

nie można rozpoznać fotografowanego przedmiotu. To samo dotyczy zaburzonej atmosfery. Opracowano kilka sposobów przezwyciężenia tych trudności, a niektóre z tych sposobów opierają się na wykorzystaniu holografii. Podajemy za Goodmanem¹⁶⁾ trzy różne sytuacje:

1. Światło od przedmiotu przechodzi przez zakłócający ośrodek, stały w czasie (taki jak np. płytka szkła grożkowanego), natomiast wiązka odniesienia omija ten ośrodek. W rezultacie powstaje hologram ze zniekształconej wiązki przedmiotowej i nie zniekształconej wiązki odniesienia. Jeżeli w procesie rekonstrukcji wprowadzimy, z dokładną



Rys. 11. Wytwarzanie hologramu i kompensacja w ośrodkach zaburzających

koincydencją, ten sam ośrodek zakłócający, lub jego replikę, to zniekształcenia zniosą się i otrzymamy czysty, nie zaburzony obraz (Rys. 11).

2. Sporządza się najpierw hologram źródła punktowego przez zaburzający ośrodek. Hologram ten używany jest następnie jako płytka kompensacyjna. Jeżeli teraz punktowe źródło światła zostanie zastąpione przedmiotem, a hologram umieścimy w tym samym miejscu, w którym był rejestrowany, to zniekształcenia w oryginalnych falach zniosą się i powstaje obraz, tak jak przy zwykłej rekonstrukcji.

3. Zarówno wiązka przedmiotowa jak i wiązka odniesienia przechodzą przez zaburzający ośrodek, przy czym ośrodek ten znajduje się tuż przed płytką fotograficzną. W takim przypadku interferencja dwóch zniekształconych fal daje obraz interferencyjny, który nie jest zaburzony przez obecność ośrodka. Rekonstrukcję można wówczas przeprowadzać bezpośrednio bez kompensacji.

Zalecana literatura uzupełniająca

- Gabor D., *Diffraction Microscopy*, Research, London 4 (1951), 107.
 Leith E. N. and Upatnieks J., *Photography by Laser*, Sci. American 212 (June 1965), 24.
 Goodman J. W., *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill Book Company, New York 1968.
 Smith H. M., *Principles of Holography*, Interscience Publishers, Inc., John Wiley and Sons, Inc., New York 1969.
 Françon M., *Holographie*, Masson et Cie., Paris 1969.
 De Velis J. B. and Reynolds G. O., *Theory and Applications of Holography*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts 1967.
 Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H., *Optical Holography*, Academic Press, New York 1971.
 Cathey T., *Przetwarzanie informacji optycznej i holografia*, PWN, w druku.

¹⁶⁾ Goodman J. W., Huntley W. H., Jr., Jackson D. W. and Lehmann M., *Wavefront-Reconstruction Imaging Through Random Media*, Applied Physics Letters 8 (1966), 311.