

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Fizyki  
Instytut Fizyki Doświadczalnej



# Hologramy i holografia

Marcin Paweł Sadowski

Wydanie III  
Warszawa, maj 2005

**Tytuł:** „Hologramy i holografia”

**Autor:** Marcin Paweł Sadowski

**Skład komputerowy:** autor. Dokument przygotowany został w programie Microsoft® Office Word 2003. Konwersja do formatu Portable Document Format (PDF) wykonana została programem PrimoPDF (<http://www.primoPDF.com>).

**Prawa autorskie:** Copyright © 2004–2005 by Marcin Paweł Sadowski

**Wydanie aktualne:** III — Warszawa, maj 2005

**Wydania poprzednie:** II — czerwiec 2004; I — styczeń 2004

**Data ostatniej modyfikacji:** poniedziałek, 18 kwietnia 2005

**Informacje o dokumencie:** Dokument może być dowolnie rozpowszechniany i drukowany, ale tylko w celach dydaktycznych oraz z podaniem informacji o jego autorze i źródle pochodzenia.

**Strona WWW:** Aktualną wersję tego skryptu można znaleźć na stronie internetowej: <http://www.fuw.edu.pl/~msadow/hologram/>

**E-mail do autora:** [m.sadowski@fuw.edu.pl](mailto:m.sadowski@fuw.edu.pl)

## Spis treści

<b>Spis treści .....</b>	<b>3</b>
<b>Przedmowa.....</b>	<b>5</b>
<b>O autorze .....</b>	<b>6</b>
<b>Rozdział 1. Wprowadzenie .....</b>	<b>7</b>
<b>Rozdział 2. Historia holografii .....</b>	<b>9</b>
2.1. (Przed)wczesne początki .....	10
2.2. Sformułowanie praw holografii .....	11
2.3. Po wynalezieniu lasera .....	12
2.4. Holografia odbiciowa .....	14
2.5. Interferometria.....	15
2.6. Rok 1967 .....	15
2.7. Hologramy tęczowe.....	15
2.8. Hologramy tłoczone .....	16
2.9. Lata siedemdziesiąte .....	16
2.10. Z hologramami spotykamy się coraz częściej.....	18
2.11. Pożegnanie .....	19
<b>Rozdział 3. Rodzaje hologramów.....</b>	<b>20</b>
3.1. Podział ze względu na to, co widzimy .....	20
3.2. Podział ze względu na technikę produkcji .....	21
3.3. Podział ze względu na rodzaj wykorzystanych fal.....	22
3.3.1. Widmo fal elektromagnetycznych .....	22
3.3.2. Światło widzialne .....	22
3.3.3. Dźwięki .....	22
<b>Rozdział 4. Hologramy objętościowe .....</b>	<b>23</b>
4.1. Cechy hologramów objętościowych .....	23
4.2. Muzea hologramów .....	23
<b>Rozdział 5. Trochę fizyki .....</b>	<b>25</b>
5.1. Funkcja falowa .....	25
5.2. Spójność (koherencja) fal .....	27
5.3. Interferencja fal .....	28
<b>Rozdział 6. Holografia, czyli tworzenie hologramu .....</b>	<b>31</b>
6.1. Holografia transmisyjna .....	31
6.1.1. Tworzenie hologramu .....	31
6.1.2. Odtwarzanie obrazu.....	32
6.2. Holografia odbiciowa .....	32
6.2.1. Tworzenie hologramu .....	32
6.2.2. Odtwarzanie obrazu.....	33
6.3. Informacje dodatkowe.....	34
6.3.1. Stabilność stanowiska i układu holograficznego .....	34
6.3.2. Hologram i zdjęcie w powiększeniu .....	35

6.3.3. Cały obraz w każdym punkcie .....	35
<b>Rozdział 7. Zastosowanie holografii .....</b>	<b>36</b>
7.1. Zastosowania w życiu codziennym .....	36
7.2. Zastosowania naukowe .....	36
7.2.1. Interferometria .....	37
7.2.2. Wykrywanie mikroodkształceń .....	37
7.2.3. Obserwowanie drgań .....	38
<b>Rozdział 8. Dodatki .....</b>	<b>39</b>
8.1. Lasery .....	39
8.1.1. Laser helowo-neonowy HeNe .....	39
8.1.2. Laser impulsowy .....	39
8.2. Diody laserowe .....	40
8.3. Materiały światłoczułe .....	41
8.3.1. Halogenek srebra (ang. <i>silver halide</i> ) AgBr lub AgCl .....	41
8.3.2. Fotopolimer (ang. <i>photopolymer</i> ) .....	41
8.3.3. Żelatyna dwuchromianowa (ang. <i>dichromated gelatin</i> ) DCG .....	41
8.3.4. Folia tłoczona (ang. <i>embossed foil</i> ) .....	42
<b>Rozdział 9. Test wiadomości .....</b>	<b>43</b>
9.1. Pytania .....	43
9.2. Odpowiedzi .....	44
<b>Bibliografia .....</b>	<b>45</b>
<b>Index .....</b>	<b>46</b>

## Przedmowa

Niniejszy skrypt powstał w 2003 roku na potrzeby wystawy „Zabawki i fizyka”, która organizowana jest na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w ramach corocznego „Festiwalu Nauki”. Aktualne wydanie jest jego trzecią, poprawioną i uzupełnioną wersją.

Przedstawia on krótką historię hologramu, jak również zasadę jego tworzenia oraz sposób odtwarzania obrazu przestrzennego. Jego adresatami są głównie osoby, które nie mają do czynienia z fizyką na poziomie akademickim (na przykład uczniowie gimnazjów i szkół średnich) a chciałyby trochę dokładniej zapoznać się z „trójwymiarowymi obrazkami”.

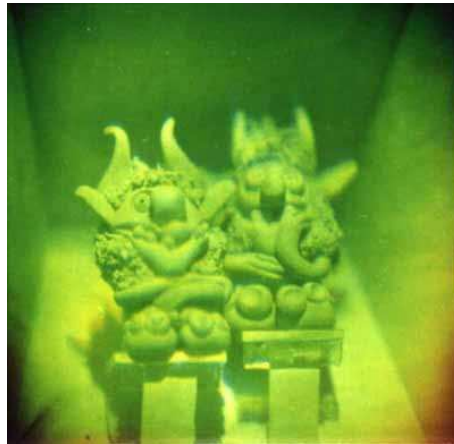
Fragmety dygresyjne oraz bardziej skomplikowane (zawierające wzory i wyprowadzenia) wyróżnione zostały poprzez zapisanie ich czcionką mniejszą oraz poprzedzenie symbolem ¶ i zakończenie – ¶. Czytanie tych partii materiału nie jest konieczne dla zrozumienia dalszego tekstu i można je, bez straty na ciągłości wykładu, pominąć.

## O autorze

Autorem tego skryptu jest Marcin Paweł Sadowski. Jest on studentem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Swoją pracę licencjacką pisał w roku 2003, a pracę magisterską obecnie przygotowuje w Zakładzie Fizyki Jądra Atomowego, Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Dalszą swoją karierę naukową planuje związać z tym miejscem. Od kilku lat systematycznie bierze udział w wystawie „Zabawki i fizyka” prowadząc (między innymi) stanowisko, na którym prezentowane są hologramy. Holografia należy do jego zainteresowań.

E-mail kontaktowy, pod którym autor tego skryptu czeka na uwagi, sugestie i zapytania czytelników, to: [m.sadowski@fuw.edu.pl](mailto:m.sadowski@fuw.edu.pl)

## Rozdział 1. Wprowadzenie



Rysunek 1. Hologram „Dwie figurki” [1]

Co wspólnego ze sobą mają: karty kredytowe, podzespoły urządzeń mechanicznych i materiały reklamowe – i wcale nie chodzi o to, że najpierw te części się reklamuje, a potem kupuje płacąc kartą kredytową? Ten wspólny element łączący wymienione przedmioty to **holografia**.

Z hologramami spotykamy się każdego dnia. Umieszczane one są na banknotach, biletach czy też kartach kredytowych. Niejednokrotnie znajdujemy je na kasetach i płytach CD. Wykorzystywane one tam są jako środki zabezpieczające i jako gwarancja oryginalności produktu. Powód zastosowania do tego celu właśnie hologramów jest prosty: są po one bardzo trudne do podrobienia – co prawda można skserować lub zeskanować hologram, jednakże staje się on wówczas zwykłym, dwuwymiarowym rysunkiem, na którym zazwyczaj nie można niczego rozpoznać.

Wiele firm umieszcza proste hologramy na swoich materiałach reklamowych oraz opakowaniach sprzedawanych produktów. Ma to na celu uatrakcyjnienie tych wyrobów i przyciągnięcie uwagi klienta.

Holografię stosuje się też w przemyśle do testowania różnych przedmiotów. **Interferometria** – bo tak się nazywa ta technika – służy do sprawdzania, czy na przykład jakiś element urządzenia mechanicznego został dobrze wykonany i czy nie posiada mikrouszkodzeń i mikropęknięć. Daje to możliwość bardzo precyzyjnego i, co jest niejednokrotnie bardzo ważne, bezdotykowego zbadania przedmiotu i szybkiego stwierdzenia, czy urządzenie będzie pracowało tak, jak byśmy chcieli i czy nie ulegnie szybko uszkodzeniu.

**Nazwa hologramu** pochodzi od greckich słów **hōlos** (χόλος) i **grápho** (γράφω) lub **grámma** (γράμμα), które po polsku oznaczają: pełna informacja lub cały rysunek. Przyczyną nadania takiej nazwy jest fakt, że hologram przedstawia obraz trójwymiarowy (rysunek 2), w odróżnieniu od zwykłej fotografii, która jest dwuwymiarowa. Można również regulować umiejscowienie przestrzeni w hologramie – wirtualny obiekt lub scena może się znajdować „za” kliszą holograficzną, „przed nią” lub też częściowo „za i przed”.



Rysunek 2. Hologram „Skacząca żabka”

Zwykła fotografia zapisuje jedynie natężenie światła odbitego od obiektu – całkowicie tracona jest informacja o długości drogi przebytej przez światło. Właśnie ta informacja o długości drogi stanowi o głębi przedmiotu i jego trójwymiarowym postrzeganiu. Natomiast w hologramie, rejestrując i amplitudę, i fazę promieniowania, zapisywane są wszystkie dane niezbędne do odtworzenia obrazu przestrzennego. Ale jak to się dzieje, jeżeli wszystkie materiały fotograficzne reagują tylko na natężenie fali, które związane jest z jej amplitudą a nie fazą?

Zapisanie informacji o fazie uzyskuje się poprzez wprowadzenie dodatkowej wiązki światła. Jedna, „oryginalna” wiązka skierowana jest na przedmiot, odbija się od niego, a następnie trafia na kliszę fotograficzną. Druga wiązka – skierowana jest bezpośrednio na kliszę. Informacja o fazie zapisywana jest w postaci wzorca interferencyjnego powstałego z nakładania się tych dwóch wiązek światła.

Kolejną różnicą holografii od tradycyjnej fotografii jest to, że do produkcji hologramu nie jest potrzebny ani aparat, ani kamera – hologram uzyskuje się bez wykorzystania soczewek i obiektywów.

## Rozdział 2. Historia holografii

Tabela 1. Chronologia holografii

Rok	Wydarzenie
1920	Mieczysław Wolfke przedstawia podstawową zasadę wykorzystywaną w holografii
1947	Dennis Gabor formułuje podstawy teoretyczne holografii
1960	Wynalezienie lasera umożliwia rozwój holografii jako nauki i techniki
1962	Opracowanie przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa obecnie stosowanego mechanizmu produkcji hologramów Pomysł połączenia holografii z fotografią kolorową wysunięty przez Jurija Denisiuka
1964	Emmet Leith i Juris Upatnieks wykonują pierwszy hologram z użyciem lasera
1965	Robert Powell i Karl Stetson publikują pierwszy artykuł o interferometrii holograficznej Trzy zespoły naukowców z Uniwersytetu w Michigan, Laboratoriów Bell'a oraz Batelle Memorial Institute pomyślnie wykonują hologram odbiciowy
1967	Shankoff i Pennington opracowują nowy środek do zapisu hologramów – żelatynę dwuchromianową Hologramy stają się dostępne dla „zwykłych ludzi” (nie naukowców) i zaczynają pojawiać się (między innymi) na okładkach czasopism i książek Larry Siebert do wykonania hologramu wykorzystuje laser impulsowy
1968	Steven A. Benton przedstawia hologramy tęczowe Udostępnienie zwiedzającym pierwszej na świecie wystawy hologramów (patrz rozdział 4.2. na stronie 23)
1970	Lloyd Cross i Gerry Pethick projektują system stabilnego stołu do produkcji hologramów, co czyni holografię dostępną artystom
1971	Denis Gabor dostaje Nagrodę Nobla z fizyki za odkrycie zasad holografii
1971	Lloyd Cross otwiera pierwszą Szkołę Holografowania
1972	Lloyd Cross opracowuje technikę produkcji ruchomych, trójwymiarowych obrazów Tung Jeong organizuje letnie warsztaty mające na celu zapoznanie z techniką holograficzną
1974	Michael Foster przedstawia technikę produkcji hologramów tłoczonych
1976	Victor Komar przedstawia prototyp projektora filmów holograficznych
1983	Pierwsze holograficzne zabezpieczenie karty kredytowej zastosowane przez firmę MasterCard International, Inc.
1984	Magazyn National Geographic jako pierwszy umieszcza hologram na swojej okładce
9 XI 2003	Umiera Stephen A. Benton

## 2.1. (Przed)wczesne początki



Rysunek 3. Mieczysław Wolfke (1883–1947) [17]

Wszystko zaczęło się w pierwszej połowie XX wieku. W roku 1920 wybitny polski fizyk, **Mieczysław Wolfke**<sup>1</sup> (rysunek 3), podczas rozważań nad możliwością wykorzystania interferencji fal do zapisywania informacji, zaproponował pewien sposób obrazowania na płycie fotograficznej sieci krystalicznych (czyli tego, jak rozłożone są atomy w kryształach). Podał tedy podstawową zasadę wykorzystywaną w holografii.

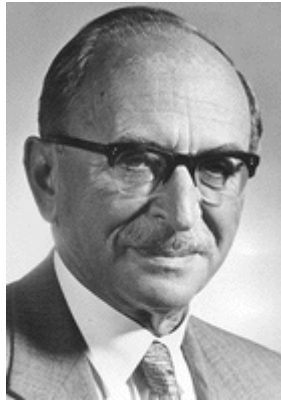
Metoda ta w literaturze zwana jest „metodą Wolfkego–Bragga”. Proces ten przebiega dwuetapowo: Najpierw na płycie fotograficznej zapisywany jest obraz powstały z oświetlenia kryształu promieniami X. Następnie prześwietla się tę płytę monochromatycznym światłem widzialnym – pozwala to uzyskać prawdziwy obraz przedmiotu. Już sam obraz jest powiększony, a po zastosowaniu dodatkowego układu optycznego staje się możliwa obserwacja struktur cząsteczkowych. [11]

Co prawda Wolfke opublikował swoje prace w czasopiśmie *Physikalische Zeitschrift* [19], ale niestety nie docenił wagi swego odkrycia – zajęty był pracami nad innymi zagadnieniami fizycznymi.

---

<sup>1</sup> Zbierając informacje do tego artykułu przeglądałem między innymi zasoby Internetu. Muszę z przykrością stwierdzić, iż na żadnej z zagranicznych stron WWW (i na większości polskich) poświęconych holografii nie znalazłem nawet wzmianki o Mieczysławie Wolfke!

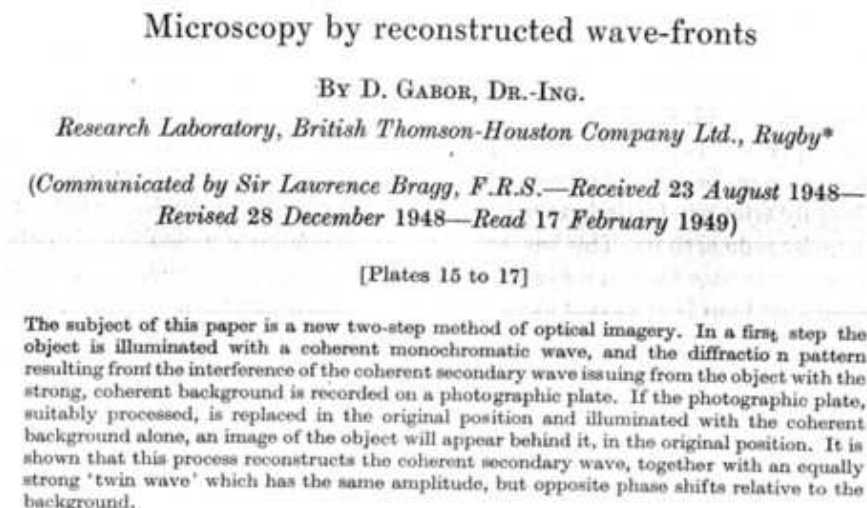
## 2.2. Sformułowanie praw holografii



Rysunek 4. Denis Gabor (1900–1979) [15]

Dopiero dwadzieścia parę lat po Mieczysławie Wolfke holografia zajął się **prof. Dennis Gabor** (rysunek 4) z University of London's Imperial College of Science and Technology – uczony brytyjski pochodzenia węgierskiego, i to właśnie Gabor uważany jest za wynalazcę hologramu.

Podczas pracy w 1947 roku w Wielkiej Brytanii nad udoskonaleniem mikroskopu elektronowego sformułował on podstawy teoretyczne (jak również w pewnym stopniu eksperymentalne) holografii. W celu potwierdzenia swojej teorii odnośnie hologramu wykonywał on doświadczenia zwane fachowo „rekonstrukcją czoła fali”. Już pierwsze artykuły Gabora dotyczące holografii [3][4][5] wywołał bezpośrednią reakcję ze strony naukowców z całego świata.



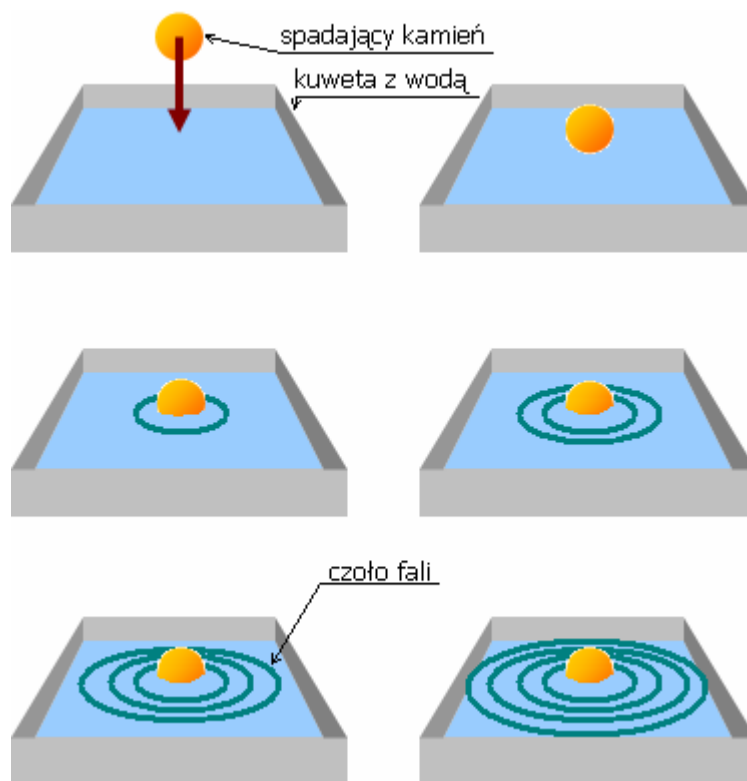
Rysunek 5. Początek artykułu D. Gabora opublikowanego w Proceedings of the Royal Society of London, w roku 1949 [4]

Działo się to jednak kilkanaście lat za wcześnie – jeszcze przed wynalezieniem i opisaniem zasady działania lasera. Z tego powodu jego eksperymenty z hologramami nie przynosiły oczekiwanych rezultatów. W tamtych latach jedynie lampa rtęciowa dawała

wystarczająco spójne światło, nadające się do produkcji hologramów. Jednakże nie było ono wystarczająco spójne, aby uzyskiwane hologramy posiadały wystarczającą głębię – powodowało to ograniczenia w stosowalności holografii w nauce technice.

Holografia Gabora ograniczała się tylko do przedmiotów przezroczystych lub półprzezroczystych. Ponadto powodowała zniekształcenia obrazu i pojawianie się niechcianych odbić. Mimo tych niedogodności odkryte przez Gabora zasady holografii były jak najbardziej poprawne, za co otrzymał w roku 1971 Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki<sup>2</sup>. W przemówieniu, jakie wygłosił podczas odbierania nagrody wymienił prof. Wolfkego jako prekursora holografii.

▮ **Czoło fali** jest to powierzchnia, do której (w danej chwili czasu) właśnie dotarła fala. Z jednej strony tej powierzchni występują już drgania (z tej strony jest fala), a z drugiej – jeszcze nie (tutaj jeszcze fala nie dotarła). Kształt czoła fali zależy między innymi od ośrodka, w którym ta fala się rozchodzi oraz od kształtu powierzchni, od której fala się odbija.



Rysunek 6. Kamień wpadający do kuwety z wodą jako ilustracja powstawania czoła fali

Dla przykładu na rysunku 6 przedstawiony został kamień wpadający do kuwety z wodą. Widać, jak z punktu, w którym kamień dotknął powierzchni wody rozchodzą się fale kołowe. Fale te tworzą współśrodkowe okręgi. Zaznaczone też są na tym rysunku położenia czoła fali w kolejnych chwilach czasu.

▮

### 2.3. Po wynalezieniu lasera

Bariera związana z brakiem wystarczająco spójnego światła została przekroczona w 1960 roku po wynalezieniu lasera. Jego czyste, intensywne światło nadawało się idealnie do produkcji hologramów.

<sup>2</sup> Dla zainteresowanych podaję adres strony internetowej z autobiografią Gabora. Strona ta znajduje się w „e-muzeum noblowskim”: <http://www.nobel.se/physics/laureates/1971/gabor-autobio.html>



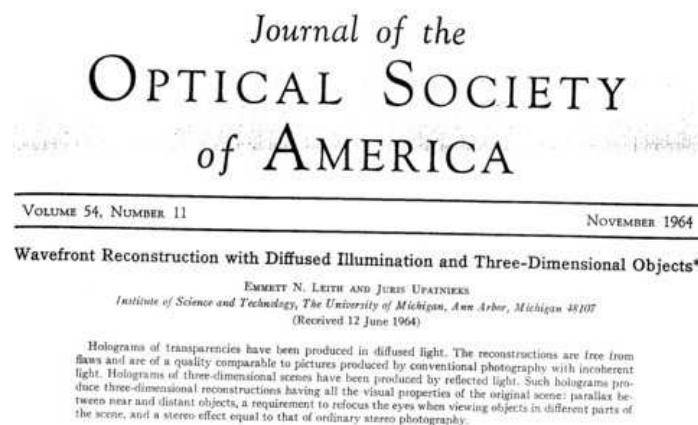
Rysunek 7. Emmet Leith [6]



Rysunek 8. Juris Upatnieks [6]

Obecnie stosowany mechanizm produkcji hologramów zaproponowany i opracowany został roku przez amerykańskich naukowców: **Emmeta Leitha** (rysunek 7) i **Jurisa Upatnieksa** (rysunek 8) z Uniwersytetu w Michigan. W 1962 roku przeczytali oni artykuł Gabora i z czystej ciekawości zdecydowali się zapożyczyć technikę Gabora do prowadzonych przez siebie badań nad radarami. W 1964 roku wykorzystując laser helowo-neonowy równoległe z teorią Gabora uzyskali hologram dość dobrej jakości. Pierwszymi kiedykolwiek holografowanymi przez nich przedmiotami były: zabawkowy pociąg oraz ptaszek. Przedstawione one są na rysunku 10. [12][13][14]

Tak produkowane hologramy, nazywane **hologramami transmisyjnymi**, dawały wyraźne obrazy i posiadały naturalną głębię. Jednakże wymagały wykorzystania lasera do odtworzenia obrazu.



Rysunek 9. Początek artykułu E. Leitha i J. Upatnieksa opublikowanego w Journal of the Optical Society of America, w roku 1964 [14]



Rysunek 10. Jeden z pierwszych hologramów wykonanych w 1964 przez Emmeta Leitha oraz Jurisa Upatnieksa. Napis na tabliczce widocznej w dolnej części zdjęcia brzmi: „Radar and Optics Laboratory Institute of Science and Technology University of Michigan” – Laboratorium Radarów i Optyki, Instytutu Nauki i Technologii Uniwersytetu w Michigan. [6]

Właśnie od tego momentu datuje się faktyczny rozwój holografii jako nauki i techniki. Prace Leitha i Upatnieksa legły u podstaw zestandaryzowania sprzętu używanego do produkcji hologramów. Dzisiaj tysiące laboratoriów i studiów posiada jednakowe, wymagane wyposażenie: laser, elementy optyczne (soczewki, lustro, szczeliny) do ukierunkowania wiązki laserowej, uchwyty na błony światłoczułe oraz stoły izolowane od drgań, na których dokonuje się naświetlań. Mechanizm Leitha i Upatnieksa jest ciągle podstawową metodą holograficzną.

#### **2.4. Holografia odbiciowa**



Rysunek 11. Jurij Denysiuk [6]

W 1962 roku radziecki fizyk **Jurij Denysiuk** (rysunek 11) połączył holografię z fotografią kolorową. Jest on pomysłodawcą **hologramów odbiciowych**. Zmieniając konfigurację optyczną zastosowaną przez Leitha i Upatnieksa, Denysiuk zrobił hologram, który można oglądać pod zwykłym światłem białym, co było dużym postępem – hologramy mogły być oglądane i wystawiane wszędzie, nie trzeba było już iść do laboratorium i używać do ich zobaczenia lasera tak jak w przypadku hologramów transmisyjnych.

Jak tylko prace Denysiuka stały się znane w Ameryce, trzy zespoły rozpoczęły badania nad odbiciową techniką zapisu hologramów. Byli to w pierwszej grupie: E. Leith, J.

Upatnieks, A. Kozma, J. Marks i N. Massey z Uniwersytetu w Michigan; G. Stroke, A. Labeyrie z Uniwersytetu w Michigan wraz z K. Pennington'em i L. Lin'em z Laboratoriów Bell'a w drugiej grupie oraz C. Schwartz i N. Hartmann (który później stał się posiadaczem amerykańskiego patentu na holografię odbiciową) z Batelle Memorial Institute – w trzeciej. Na jesieni 1965 roku każda z ekip miała na swoim koncie pomyślnie zakończone doświadczenie nad zapisem hologramu techniką Denisuka.

## 2.5. Interferometria

W 1965 roku Robert Powell i Karl Stetson opublikowali pierwszy artykuł o interferometrii holograficznej. W tej technice, małe różnice pomiędzy dwoma hologramami tego samego obiektu – jednym wykonanym w spoczynku, a drugim wykonanym podczas działania siły na obiekt – objawiają się jako poziomicę na obrazie. Interferometria holograficzna jest przydatna jako bezdotykowy test materiałów, analiza płynów cieczy i test jakości.

## 2.6. Rok 1967

W roku 1967 Shankoff i Pennington opracowali nowy środek do zapisu hologramów – **żelatynę dwuchromianową**. Dzięki temu możliwe stało się utrwalanie obrazu holograficznego na dowolnej, jasnej i nieporowatej powierzchni. Żelatynę tę cechuje bardzo duża jasność i ostrość obrazu – maksymalnie możliwa do uzyskania. Hologramy dwuchromianowe zwykle są bardzo małych rozmiarów, spotykane najczęściej w postaci zegarków, breloczków, często używają je jubilerzy do prezentacji biżuterii.

We wczesnych latach sześćdziesiątych holografia ciągle ograniczała się tylko do laboratoriów naukowych. W roku 1967 rocznik naukowy „*Word Book Encyclopedia*” jako pierwszy umieścił hologram na swojej okładce – był to trójwymiarowy obrazek o wymiarach 4 cale na 3 cale przedstawiający szachownicę. Towarzyszył mu artykuł opisujący produkcję hologramów i przedstawiający podstawowe informacje historyczne. Ciekawostką może być to, iż do utworzenia hologramu tylko na jedną okładkę użyto 50mV lasera helowo-neonowego ustawionego na dziewięciu tonowym, granitowym stole, a ekspozycja trwała 30 sekund.

Rokiem 1967 datuje się też wykonanie pierwszego hologramu człowieka. Dokonał tego **Larry Siebert** z Conductron Corporation wykorzystując **laser impulsowy**. Conductron Corporation odegrała ważną rolę w udostępnianiu hologramów „zwykłym ludziom” – osobom spoza grona naukowców. Możliwość masowej produkcji i duże rozmiary hologramów (nawet do 18 na 24 cale) były cechami, dzięki którym holografia szybko została zauważona przez rynek i zastosowana w celach promocyjnych.

## 2.7. Hologramy tęczowe



Rysunek 12. Steven A. Benton [6]

Ważnego postępu w produkcji hologramów dokonał w 1968 roku **dr. Steven A. Benton** (rysunek 12) z laboratorium firmy Polaroid. Wykonał on kolejny typ hologramów – **hologramy tęczowe**. Są one najczęściej spotykanym i znanym rodzajem – produkowane masowo i mogą być oglądane w zwykłym, białym świetle. Dzięki kolorystyce, głębi i jasności obrazu są one atrakcyjne dla artystów. Zaadaptowali oni tę technikę do swoich potrzeb i przybliżyli holografii publicznej świadomości.

## 2.8. Hologramy tłoczone

Wynalazek Bentona jest szczególnie znaczący, ponieważ umożliwił masową produkcję hologramów używając techniki wytłaczania. W technice tej opracowanej w 1974 roku przez **Michaela Fostera** i przystosowanej do komercyjnego użytku przez **Steve’a McGrewa** w 1979, informacja holograficzna przenoszona jest z płyty światłoczułej na nikłowy podkład tłoczony. Obrazy holograficzne są „drukowane” przez odciskanie wzoru w plastiku – mogą być one duplikowane miliony razy. Hologramy tłoczone są konsekwentnie wykorzystywane w wydawnictwach, reklamach, bankowości i ochronie.

## 2.9. Lata siedemdziesiąte



Rysunek 13. Lloyd Cross [7]

W 1970 roku fizyk **Lloyd Cross** (rysunek 13) oraz kanadyjski rzeźbiarz **Gerry Pethick** zaprojektowali system stabilnego stołu przystosowanego do produkcji hologramów, który nie wymagał drogiego laboratoryjnego sprzętu optycznego i dodatkowych narzędzi tłumiących drgania w czasie naświetlania kliszy. Wszystkie części składowe układu stabilizowane były poprzez użycie rurek z PCV wprowadzonych w piasek.

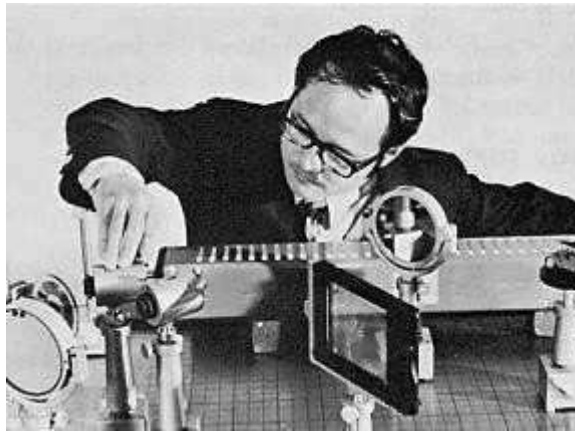
Było to rewolucyjne rozwiązanie, które uczyniło holografii dostępną artystom. I już rok później (w 1971 roku) Cross ze swoim asystentem otwiera School of Holography w San Francisco – szkołę holografowania. Była ona pierwszym takim miejscem, w którym artyści i naukowcy mogli uczyć się o holografowaniu.

Rok 1971 przyniósł też Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki dla Dennisa Gabora za sformułowanie praw holografii.

W roku 1972 Lloyd Cross łącząc holografie tęczową z konwencjonalną kinematografią opracował technikę produkcji ruchomych, trójwymiarowych obrazów – rysunek 14. W metodzie tej sekwencja dwuwymiarowych, holograficznych obrazów obracającego się przedmiotu zapisywana jest na płycie światłoczułej. Podczas oglądania tego złożonego obrazu w mózgu tworzony jest pełen, trójwymiarowy wizerunek.



Rysunek 14. Trójwymiarowy, ruchomy obraz [7]



Rysunek 15. Tung Jeong [7]

Również w roku 1972 Tung Jeong (rysunek 15) rozpoczął organizowanie letnich warsztatów dla „nie fizyków” na Lake Forest College w stanie Illinois. Celem tych spotkań było instruowanie jak nauczać holografii. Ponadto przeznaczony był dla studentów, którzy widzieli w holografii nowe medium wyrażania swoich wizji.

W 1976 roku **Victor Komar** wraz z współpracownikami z NIFKI<sup>3</sup> w Związku Radzieckim opracował prototyp projektora filmów holograficznych. Obraz był nagrywany z użyciem specjalnej, impulsowej kamery z szybkością 20 klatek na sekundę. Wywołany film był rzutowany na ekran, który ogniskował przestrzenny obraz w różnych punktach widowni. Ten pierwszy pokaz obejrzały dwie lub trzy osoby i trwał tylko 47 sekund. Komar zamierzał wydłużyć nagranie do 20 lub nawet 30 minut oraz przystosować projekcję tak, aby trójwymiarowy obraz mogło jednocześnie oglądać 200-300 osób, ale te plany nigdy nie zostały zrealizowane.

---

<sup>3</sup> All-Union Cinema and Photographic Research Institute – Instytut Badań nad Kinematografią i Fotografiami (???)

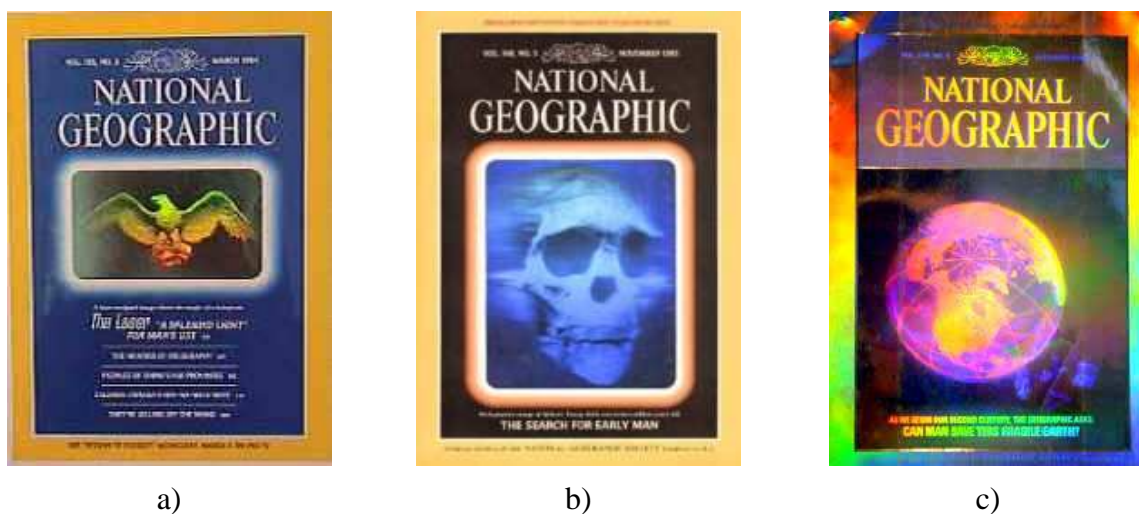
## 2.10. Z hologramami spotykamy się coraz częściej



Rysunek 16. Duże litery „MC” w dolnym, prawym rogu to pierwsze zabezpieczenie karty kredytowej hologramem. [7]

W 1983 roku pojawiło się pierwsze holograficzne zabezpieczenie karty kredytowej. Zastosowane ono zostało przez firmę MasterCard International, Inc. (rysunek 16).

Magazyny „*Scientific American*” oraz „*National Geographic*” były pierwszymi, które zastosowały hologramy na swoich okładkach. Były to numery „*National Geographic*” z marca 1984 roku (nakład prawie 11 milionów egzemplarzy) oraz listopada 1985 roku (rysunek 17a, b). Natomiast numer z grudnia 1988 roku miał okładkę całą wykonaną z hologramu! Hologram ten prezentował kulę ziemską na przedniej okładce, trójwymiarowy napis na grzbiecie oraz reklamę z tyłu (rysunek 17c).



Rysunek 17. Okładki magazynu National Geographic: a) z marca 1984 roku; b) z listopada 1985 roku; c) z grudnia 1988 roku [7]

## **2.11. Pożegnanie**

W dniu 9 listopada 2003 zmarł Steven A. Benton twórca holografii tęczowej. Dwa dni później 260-ciu jego przyjaciół i współpracowników zebrało się na w symposium zatytułowanym „Wizje Bentona”, aby wspominać jego ogromny wkład w dziedzinę holografii oraz w sztukę.

## Rozdział 3. Rodzaje hologramów

W zależności od zastosowanej techniki produkcji można uzyskać różnego rodzaju hologramy.



Rysunek 18. Hologram „Papugi”

### **3.1. Podział ze względu na to, co widzimy**

**Hologram tęczy płaski (2D)** — Hologram taki posiada płaski obraz o tęczy zmieniających się kolorach przy pochylaniu góra-dół.

**Hologram tęczy płasko-przestrzenny (2D–3D)** — Płaski obraz o tęczy zmieniających się kolorach przy patrzeniu pod różnymi kątami, a elementy obrazu widoczne są w co najmniej dwóch płaszczyznach tworzących perspektywiczną głębię.

**Hologram tęczyowy przestrzenny (3D)** — Klasyczny hologram tęczyowy obiektu trójwymiarowego wykonanego w skali 1:1. Charakteryzuje się on stosunkowo wysokimi kosztami wykonania (rysunek 18)

**Stereogram tęczyowy** — Efekt podobny jak wyżej, lecz osiągnięty przez użycie do zapisu hologramu serii ujęć obiektu z różnych kątów lub sekwencji wideo. Umożliwia to zrobienie hologramu animowanego (zawierającego sekwencję ruchu) i dowolne manipulowanie powiększeniem obrazu.

Tabela 2. Porównanie typów hologramów – podział ze względu na to, co widzimy

	typ hologramu			
	2D	2D-3D	3D	tęczyowy
• obraz płaski jednopłaszczyznowy	✓	✗		
• obraz płaski wielopłaszczyznowy (perspektywa)	✗	✓		
• obraz trójwymiarowy	✗	✗	✓	✓
• animacja			✗	✓
• obraz w skali 1:1			✓	✓
• obraz w dowolnej skali			✗	✓

### 3.2. Podział ze względu na technikę produkcji

**Hologram transmisyjny** — Metoda opracowana przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa. Podczas tworzenia hologramu tą metodą obiekt holografowany i klisza fotograficzna ustawione są na jednej linii, przedmiot musi być raczej przezroczysty, a fale świetlne – zanim dotrą do kliszy – przechodzą przez przedmiot („transmisja” czyli „przejście przez”).

**Hologram odbiciowy** — Metoda opracowana przez Jurija Denisyuka. Przedmiot holografowany ustawiony jest obok kliszy fotograficznej, a fale świetlne dopiero po odbiciu od przedmiotu kierowane są na kliszę.

**Hologram tęczyowy** — Metoda opracowana przez Stevena Bentona. Hologramy takie mają małą głębię (do 5 cm) albo nie mają jej wcale -- możemy zobaczyć różne widoki obiektu przesuując głowę na przykład z lewej strony do prawej względem kliszy, a ruszając głową góra-dół zobaczymy zmieniające się kolory tęczy.

**Hologram objętościowy** — patrz rozdział 4.

**Hologram impulsowy** — Metoda opracowana przez Larry’ego Siebersa. Do produkcji hologramu impulsowego używa się szybkiego lasera, dającego krótką i intensywną wiązkę światła, a zapis obrazu trwa ułamki sekund.

### 3.3. Podział ze względu na rodzaj wykorzystanych fal

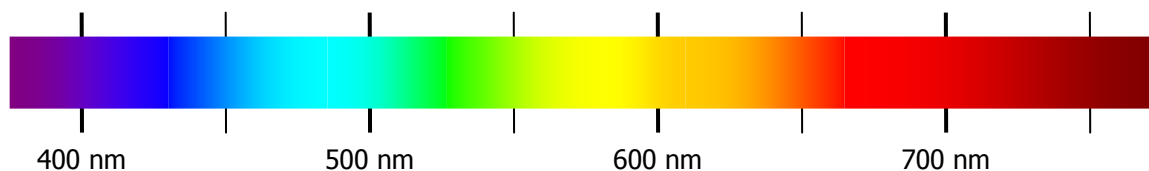
W holografii wykorzystywane są głównie fale elektromagnetyczne – tabela 3. Wówczas mamy do czynienia hologramią mikrofalową, optyczną – światło widzialne, rentgenowską – promienie X oraz hologramią gamma – promieniowania  $\gamma$ . Można też używać fal mechanicznych – dźwięków. Stosowane one są w holografii akustycznej.

#### 3.3.1. Widmo fal elektromagnetycznych

Tabela 3. Widmo fal elektromagnetycznych [18]

Nazwa zakresu		Długość fali w próżni [m]	
promieniowanie kosmiczne		$10^{-16} \div 10^{-14}$	100 am $\div$ 10 fm
promieniowanie $\gamma$		$10^{-14} \div 10^{-10}$	10 fm $\div$ 1 pm
promieniowanie rentgenowskie (X)		$10^{-12} \div 10^{-8}$	1 pm $\div$ 10 nm
nadfiolet		$5 \cdot 10^{-9} \div 3,9 \cdot 10^{-7}$	5 nm $\div$ 390 nm
światło widzialne		$3,9 \cdot 10^{-7} \div 7,9 \cdot 10^{-7}$	390 nm $\div$ 790 nm
podczerwień		$7,9 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-5}$	790 nm $\div$ 30 $\mu$ m
fale radiowe	mikrofale	$10^{-5} \div 10^0$	10 $\mu$ m $\div$ 1 m
	ultrakrótkie	$10^0 \div 10^1$	1 m $\div$ 10 m
	krótkie	$10^1 \div 10^2$	10 m $\div$ 100 m
	średnie	$10^2 \div 10^3$	100 m $\div$ 1 km
	długie	$10^3 \div 10^4$	1 km $\div$ 10 km

#### 3.3.2. Światło widzialne



Rysunek 19. Widmo światła białego

#### 3.3.3. Dźwięki

**Dźwiękami** nazywamy zazwyczaj fale mechaniczne, które wywołują efekt słyszenia w naszym uchu. Nie są to fale elektromagnetyczne, więc nie zostały ujęte w tabeli 3. Są to fale o częstotliwości od 20Hz do 20.000Hz (nie można tutaj jednoznacznie podać długości takich fal, ponieważ zależy ona w znacznym stopniu od ośrodka, w którym się te dźwięki rozchodzą). Dźwięki nierejestrowalne przez ludzkie ucho, o częstotliwości mniejszej niż 20 Hz, to tzw. infradźwięki, a powyżej 20.000 Hz – ultradźwięki.

## Rozdział 4. Hologramy objętościowe

### 4.1. Cechy hologramów objętościowych

Hologramy objętościowe<sup>4</sup> powstają na kliszach fotograficznych z warstwami emulsji fotograficznej o znacznej grubości. Mają one wiele właściwości, które wyróżniają je korzystnie spośród innych rodzajów hologramów. Na uwagę zasługuje tu w szczególności magazynowanie informacji w całej objętości ośrodka rejestrującego (kliszy lub płyty fotograficznej). Podkreślić należy, że charakterystyczną cechą hologramów objętościowych jest tworzenie tylko jednego obrazu (rzeczywistego lub pozornego).

Zaletą takich hologramów jest też to, że przy oglądaniu nie trzeba ich oświetlać tym samym światłem lasera, którym dany hologram został utworzony. Należy jednak pamiętać, iż musi to być ostre, punktowe światło białe na przykład słońce (najlepsze źródło), lampa halogenowa, zwykła żarówka. Natomiast oglądany obraz będzie rozmyty, jeżeli będziemy używać światła rozproszonego takiego, jakie daje świetlówka, lampa ultrafioletowa (UV) czy zachmurzone niebo.

### 4.2. Muzea hologramów



Rysunek 20. Hologram rzeźby

Hologramy objętościowe znajdują zastosowanie do rejestracji kompozycji artystycznych i niedostępnych dla zwiedzających muzea dzieł sztuki (rysunek 20) oraz takich jak na przykład biżuteria i różne wartościowe i unikalne przedmioty.

Pierwsza wystawa hologramów zaprezentowana została w 1968 roku na Cranbrook Academy of Art w mieście Michigan. Natomiast druga miała miejsce w Nowym Jorku, w Finch College gallery, w 1970 roku i silnie przyciągnęła uwagę środków masowego przekazu. Pierwsze **muzeum hologramów** założone zostało w Nowym Jorku w 1976 roku jako międzynarodowe centrum rozwoju i zrozumienia holografii – patrz rysunek 21. Muzea takie, gdziekolwiek się pojawiają, cieszą się ogromnym zainteresowaniem - 22<sup>5</sup>.

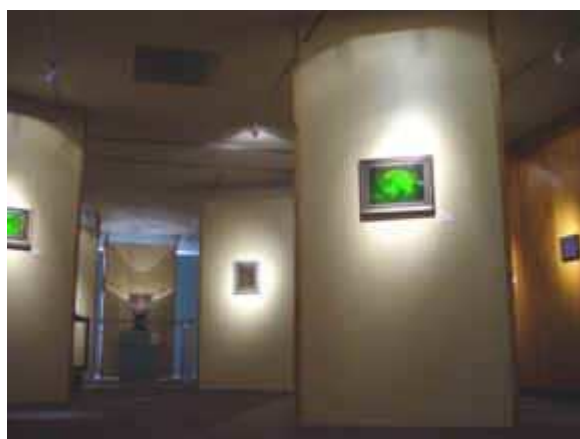
Nowojorskie muzeum hologramów zostało zamknięte w marcu 1992, a w styczniu 1993 jego eksponaty przeszły w posiadanie MIT Museum w Cambridge tworząc największą i najpełniejszą kolekcję hologramów na świecie.

<sup>4</sup> W języku angielskim nazywane one są **hologramami światła białego** (*white-light holography*).

<sup>5</sup> Słyszałem, że w Polsce (gdzieś nad morzem) też jest takie muzeum. Gdyby, któryś z czytelników wiedział coś więcej na temat tego polskiego muzeum hologramów, bardzo proszę o kontakt: [m.sadowski@fuw.edu.pl](mailto:m.sadowski@fuw.edu.pl)



Rysunek 21. Muzeum hologramów w Nowym Jorku znajdujące się na Mercer Street pod numerem 11 [7]



a)



b)

Rysunek 22. W jednym z muzeum hologramów: a) ogólny wygląd sali wystawowej; b) niektórzy próbują nawet dotknąć trójwymiarowego przedmiotu [7]

## Rozdział 5. Trochę fizyki

### 5.1. Funkcja falowa

**Falą** nazywamy rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie, na przykład ośrodka sprężystego (mamy wówczas do czynienia z falami sprężystymi) lub pola elektromagnetycznego (fale elektromagnetyczne – w tym światło). Zaburzenie takie powstaje w wyniku wytrącenia układu z położenia równowagi. **Ośrodek sprężysty** możemy zdefiniować jako taki ośrodek, w którym występują odkształcenia sprężyste, to znaczy, gdy czynniki wywołujące przemieszczenia cząstek znikną, to cząstki te powrócą do pierwotnych położenia.

Falę opisujemy przy użyciu tak zwanej funkcji falowej:

$$f(x, y, z, t) \quad (1)$$

która informuje nas jak w danym punkcie przestrzeni (o współrzędnych  $x$ ,  $y$  i  $z$ ) oraz w danej chwili czasu ( $t$ ) zachowuje się ośrodek, w którym rozchodzą się fale. Funkcja falowa (1) zależy od trzech parametrów:

- **amplitudy** (oznaczenie:  $A$ ),
- **fazy** (oznaczenie:  $\varphi$ ) i
- **częstości** (oznaczenie:  $\omega$ ).

Częstość ( $\omega$ ) jest wielkością zamiennie stosowaną z **długością fali** ( $\lambda$ ) – na przykład optycy preferują „długość fali”, a w fizyce jądrowej częściej spotyka się „częstość”. Długość fali jest to odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi maksymami (szczytami) fali. Natomiast częstość mówi nam jak często (w jednostce czasu, na przykład w ciągu jednej sekundy) w danym miejscu przestrzeni fala jest w swoim najwyższym położeniu. Na potrzeby tego skryptu wystarczy, że powiem, iż częstość jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali: dłuższa fala ma mniejszą częstość, krótsza fala – większą częstość.

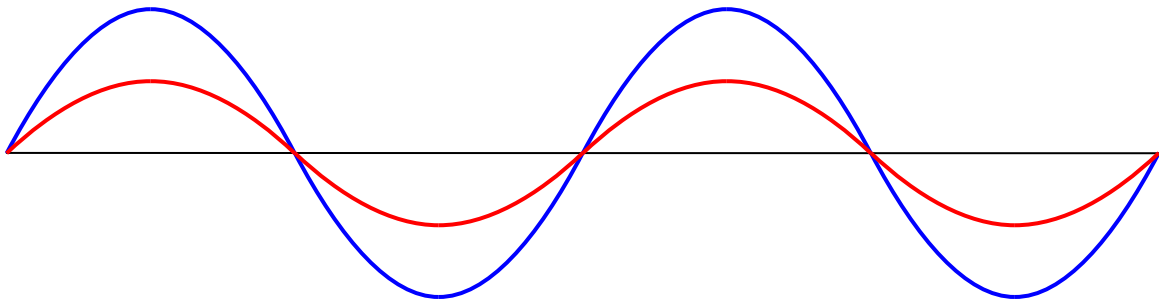
Rysunek 23 przedstawia dwie fale o takich samych wartościach częstości i fazy lecz o różnych amplitudach. Kolejny rysunek – 24 – przedstawia dwie fale różniące się fazą, a mające takie same amplitudy i częstości. Mówimy, że są one przesunięte w fazie. Natomiast fale na ostatnim rysunku 25 różnią się tylko częstością (długością).

Zaznaczone na tych rysunkach osie poziome mogą być **osiąmi przestrzennymi** lub **osiąmi czasowymi**. W pierwszym przypadku zaznaczone krzywe obrazują „fotografię” fali (na przykład fali na wodzie) wykonaną w pewnej chwili czasu, natomiast w drugim – obrazują jak zmienia się *cecha ośrodka*, w którym rozchodzi się fala w danym punkcie przestrzeni wraz z upływem czasu. *Cechą ośrodka* może być wychylenie fragmentu struny, stopień zagęszczenia powietrza (w przypadku fal dźwiękowych) czy też wartość natężenia pola elektrycznego czy magnetycznego (w przypadku światła).

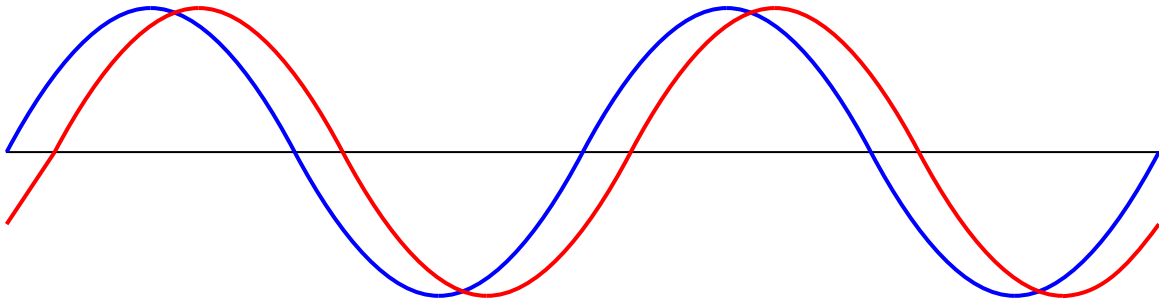
Aby zrozumieć zasadę działania hologramu trzeba zapoznać się ze zjawiskiem **interferencji fal** oraz **spójności fal**. Dla uproszczenia rozważmy falę jednowymiarową, na przykład rozchodzącą się wzdłuż struny w gitarze. Zapiszemy ją symbolicznie jako:

$$f(x, t) \quad (2)$$

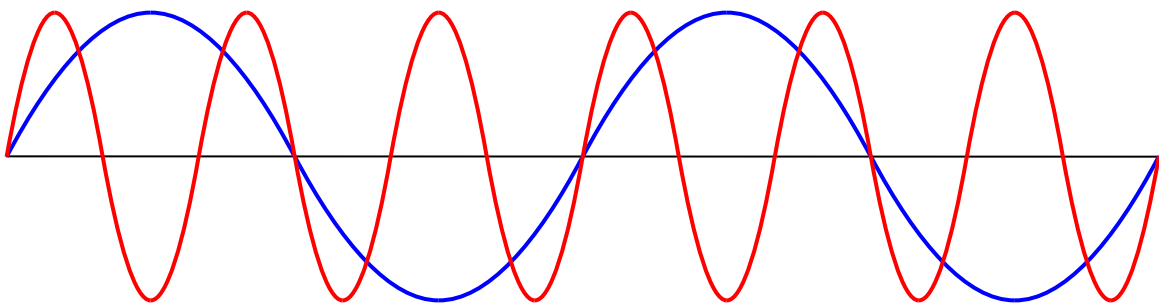
W rzeczywistości fale rozchodzące się w przestrzeni mogą być dwuwymiarowe lub trójwymiarowe.



Rysunek 23. Fale różniące się amplitudą  $A$ . Amplituda fali zaznaczonej linią niebieską jest dwa razy większa od amplitudy fali zaznaczonej linią czerwoną.



Rysunek 24. Fale różniące się fazą  $\varphi$  – jedna fala jest przesunięta wzdłuż osi względem drugiej



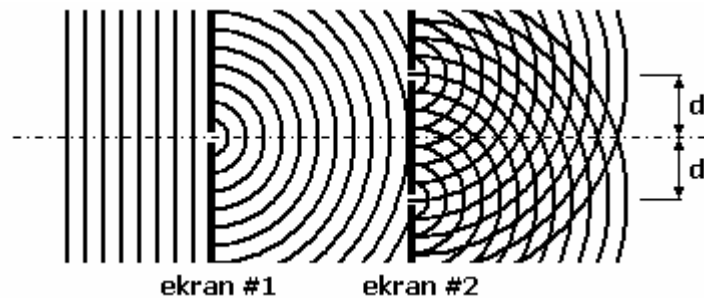
Rysunek 25. Fale różniące się częstością  $\omega$ . Stosunek częstości zaznaczonych fal wynosi 1:3. Oznacza to, że w czasie, gdy fala zaznaczona linią czerwoną wykona 3 pełne wahnięcia, to fala zaznaczona linią niebieską – tylko jedno.

## 5.2. Spójność (koherencja) fal

Dwie fale nazywamy spójnymi (koherentnymi), jeżeli różnica ich faz (rysunek 24) jest niezmienna w czasie, co można zapisać za pomocą takiego równania:

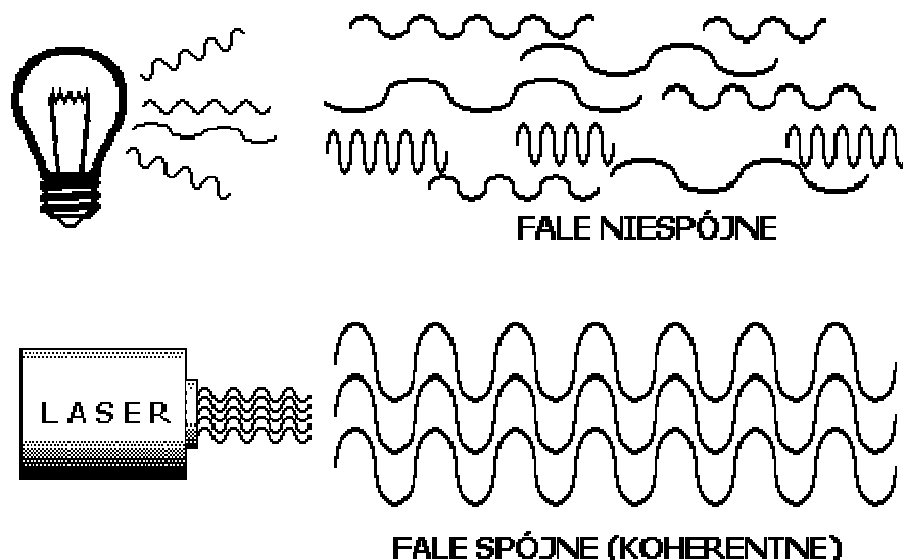
$$\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \text{const} \quad (3)$$

Jedną z metod wytwarzania fal spójnych zaproponował w 1802 roku Thomas Young. Polega ona na umieszczeniu na drodze fal nieprzezroczystego ekranu, w którym znajduje się jedna szczelina (ekran 1 na rysunku 26), a za nim ekranu, w którym znajdują się dwie szczeliny (ekran 2). W ten sposób fale, które przeszły przez ten drugi ekran są falami spójnymi (i mogą ze sobą interferować).



Rysunek 26. Otrzymywanie fal spójnych metodą zaproponowaną w 1802 roku przez Thomasa Younga.

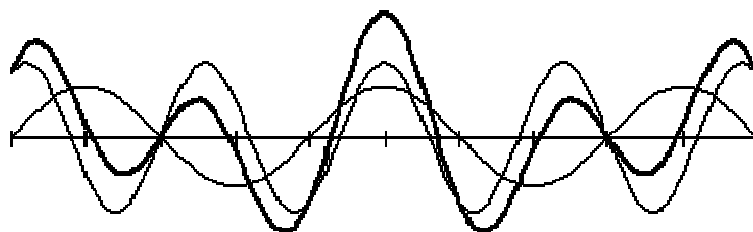
Ze „zwykłych” źródeł – takich jak żarówki, świetlówki, palniki gazowe – nie uzyskamy światła spójnego. Przyczyną jest to, że drgające atomy lub cząsteczki (na przykład metalu włókna żarówki, czy palącego się gazu), będące źródłem fal, wysyłają te fale zupełnie niezależnie (niespójnie), a światło emitowane jest w postaci oddzielnych krótkich impulsów (patrz rysunek 27). Impulsy te wysyłane są przez bardzo dużą liczbę atomów lub cząsteczek (źródło), a każde źródło „produkuje” w ciągu sekundy bardzo dużą liczbę impulsów. Dlatego postrzegamy światło jako ciągłe, a nie pulsujące. Jednakże ta dysharmonia uniemożliwia wytworzenie hologramu. W roku 1960 udowodniono, że można skonstruować takie źródła światła widzialnego, w których atomy działałyby wspólnie, przez co emitowałyby fale spójne. Takimi urządzeniami są właśnie **lasery**.



Rysunek 27. Schematyczne porównanie fal niespójnych i fal spójnych

### 5.3. Interferencja fal

Interferencją fal nazywamy takie zjawisko nakładania się na siebie dwóch (lub więcej) fal spójnych, w którym punkty ich wzmacniania i wygaszania nie zmieniają swojego położenia w czasie.



Rysunek 28. Suma dwóch fal (linie cienkie) daje inną falę (linia gruba).

□ Ogólnie równanie fali sinusoidalnej można zapisać w postaci:

$$f = A \sin\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (4)$$

Jak już wcześniej wspomniałem osie poziome przedstawione na rysunkach można rozważać na dwa sposoby:

- **oś pozioma jest osią czasu** — zmienna  $x$  we wzorze (4) jest ustalona, czynnik  $x/\lambda$  jest stały i można go włączyć do fazy  $\varphi$ :  $f(x) = A \sin(\omega t + \varphi)$
- **oś pozioma jest osią przestrzenną** — tym razem ustalona jest zmienna  $t$ , czynnik  $\omega t$  jest stały i można go włączyć do fazy  $\varphi$ :  $f(x) = A \sin\left(\frac{x}{\lambda} + \varphi\right)$

Zajmijmy się tym drugim przypadkiem – to, co widzimy na rysunku 28 jest jakby „fotografią” fali rozchodzącej się (na przykład) wzdłuż struny. Wówczas fale zaznaczone na tym rysunku liniami cienkimi zadane będą wzorami:

$$\begin{cases} f_1 = A_1 \sin\left(\frac{x}{\lambda_1} + \varphi_1\right) \\ f_2 = A_2 \sin\left(\frac{x}{\lambda_2} + \varphi_2\right) \end{cases} \quad (5)$$

gdzie  $\lambda_i$  jest długością  $i$ -tej fali ( $i = 1$  lub  $i = 2$ ) i łączy się z częstotliwością następującą zależnością ( $v$  – prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku, dla fal elektromagnetycznych jest  $v = c$ ):

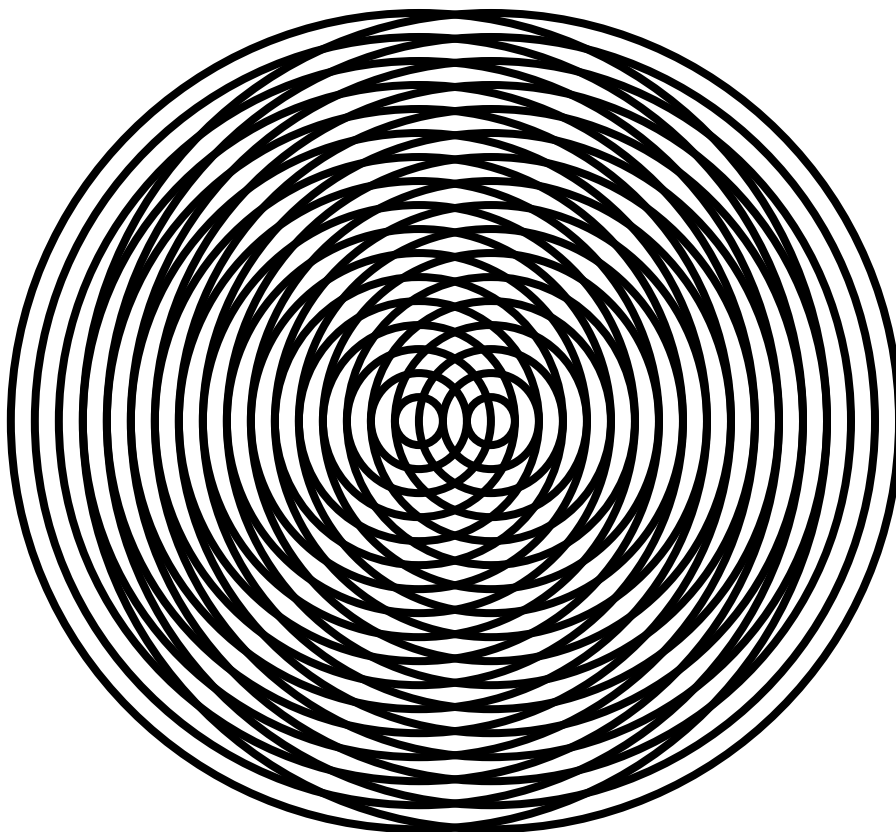
$$\lambda_i = \frac{2\pi v}{\omega_i} \quad (6)$$

Są to proste **fale harmoniczne** opisane funkcjami sinus (lub kosinus). Suma tych fal też jest falą (w ogólności nie harmoniczną, lecz bardziej złożoną) i zadana jest wzorem:

$$\begin{aligned} F(x) &= f_1(x) + f_2(x) \\ &= A_1 \sin\left(\frac{x}{\lambda_1} + \varphi_1\right) + A_2 \sin\left(\frac{x}{\lambda_2} + \varphi_2\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Takie składanie fal (niekoniecznie tylko dwóch) nosi w fizyce nazwę **zasady superpozycji**.

—



Rysunek 29. Interferencja dwóch fal

Na rysunku 29 widać jak z dwóch punktów rozchodzą się w postaci współśrodkowych okręgów dwie fale – mogą to być na przykład fale na wodzie wywołane równoczesnym

wrzuceniem dwóch kamieni. Czarne okręgi odpowiadają maksimum fal, natomiast przerwy między nimi – minimum. Po przymrużeniu oczu widać promieniście rozchodzące się ze środka rysunku na przemian ciemne i jasne linie interferencyjnego wzmacniania i wygaszania fal.

Na rysunku 29 przedstawiona jest interferencja dwóch fal, ale oczywiście nakładać się może na siebie też większa ich liczba.

## Rozdział 6. Holografia, czyli tworzenie hologramu

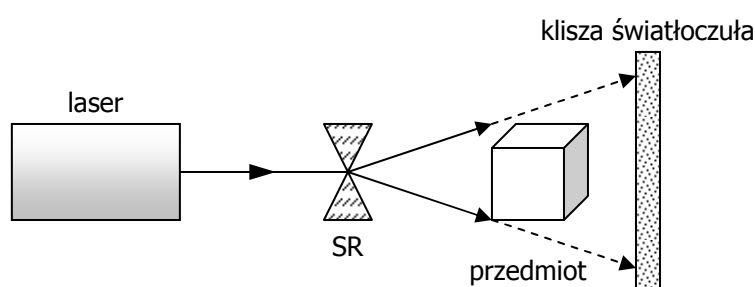
Holografia jest to proces zbierania i magazynowania informacji optycznej o przedmiocie w emulsji fotograficznej (hologramie). Jednym z zastosowań holografii jest otrzymywanie przestrzennych obrazów. W odróżnieniu od fotografii lub malowidła hologram może przedstawiać przedmiot z zachowaniem pełnej trójwymiarowości – odtwarza on wszystko to, co nasze oczy spostrzegają (głębokość, rozmiar, kształt, teksturę i wzajemne położenie obiektów) w zależności od kierunku patrzenia.

Holografia opiera się na zjawisku interferencji fal. W zwykłym zdjęciu, na kliszy fotograficznej zapisywane są tylko informacje o amplitudzie (natężeniu) fali, tzn. czy punkt jest jasny, czy ciemny? Przy tworzeniu hologramu zapisywane są też informacje o fazie fali świetlnej.

Istnieją dwa podstawowe typy hologramów: transmisyjne oraz odbiciowe. Różnią się one sposobem oświetlania przedmiotu holografowanego i kliszy światłoczułej.

### 6.1. Holografia transmisyjna

#### 6.1.1. Tworzenie hologramu



Rysunek 30. Tworzenie hologramu transmisyjnego w układzie holograficznym Gabora [9].  
„SR” – soczewka rozpraszająca

Pierwszy typ hologramu, tzw. **hologram osiowy** lub „w linii” (ponieważ przedmiot holografowany i klisza fotograficzna znajdują się na jednej linii) lub **hologram transmisyjny** (ponieważ fale świetlne przechodzą przez półprzezroczysty przedmiot), został zaproponowany przez Gabora i pierwszy raz wykonany przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa.

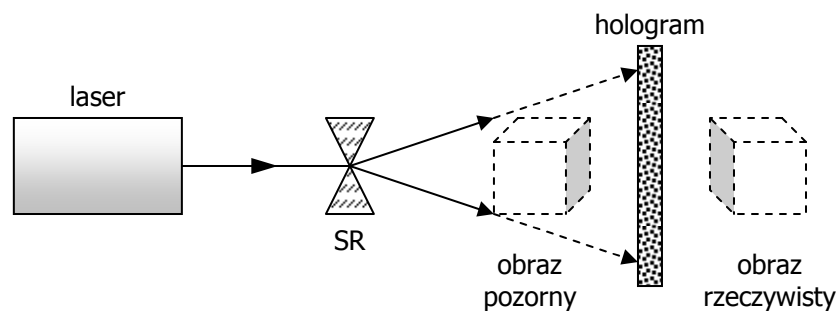
Układ optyczny stosowany do tworzenia hologramu Gabora przedstawiony jest na rysunku 30. Wiązka światła monochromatycznego z lasera rozszczepiana jest i kierowana na holografowany przedmiot. Klisza światłoczuła umieszczona jest za przedmiotem. Na skutek interferencji fal ugiętych na przedmiocie z nieugiętymi na kliszy fotograficznej utworzony zostaje hologram.

Użyta do produkcji hologramu fala musi być **falą monochromatyczną**, czyli falą o jednej, ustalonej długości, czyli falą „niosącą” jeden, konkretny kolor. W rzeczywistości nie jest możliwe wytworzenie fali dokładnie monochromatycznej o określonej długości  $\lambda$ . Fale świetlne wypromieniowywane są w postaci ciągów o skończonej długości, co powoduje, że długość fali „rozmywa się” z jednej wartości, na pewien zakres  $[\lambda - \Delta\lambda; \lambda + \Delta\lambda]$  (gdzie  $\Delta\lambda$

jest wielkością małą w porównaniu z  $\lambda$ ). Powoduje to nieznaczne zmniejszenie kontrastu hologramu.

Stosowalność tej techniki ogranicza to, że holografowane mogą być tylko przedmioty przezroczyste (w jednych miejscach mniej, w innych bardziej, ale ogólnie: przepuszczające światło) i dodatkowo ustawione na jasnym tle.

### 6.1.2. Odtwarzanie obrazu



Rysunek 31. Odtwarzanie obrazu zarejestrowanego metodą Gabora [9]. „SR” – soczewka rozpraszająca

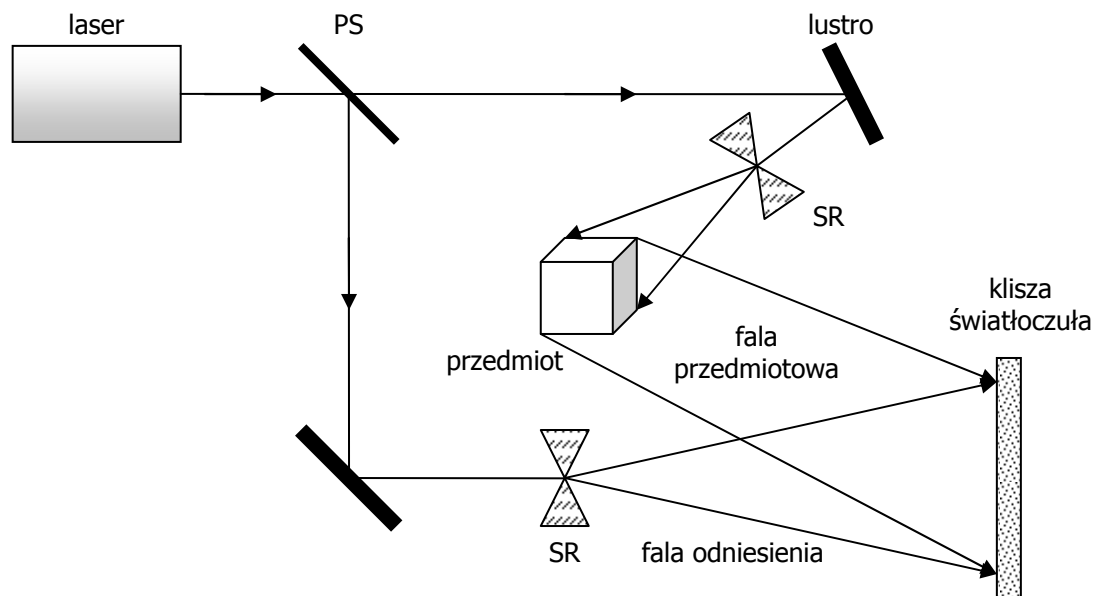
Oglądając hologram transmisyjny Gabora– (rysunek 31) oświetlamy go wiązką z lasera równoważną fali stosowanej w procesie rejestracji obrazu. Światło ugięte na hologramie tworzy – symetrycznie względem płaszczyzny hologramu – dwa obrazy: obraz pozorny oraz obraz rzeczywisty.

## 6.2. Holografia odbiciowa

### 6.2.1. Tworzenie hologramu

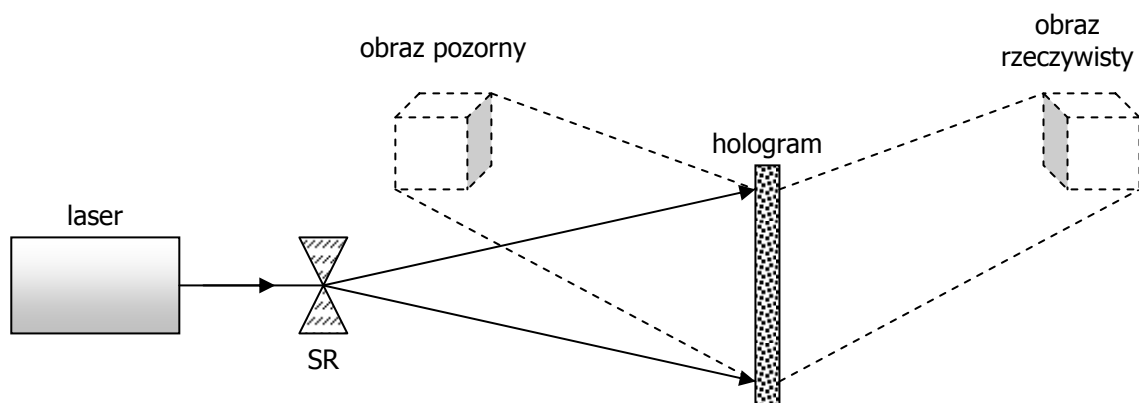
Inną zasadę tworzenia hologramów schematycznie przedstawia rysunek 32. Metoda ta nosi nazwę **holografii odbiciowej** (z angielskiego: *off-axis holography*) i jak wspomniałem wcześniej pomysłodawcą tej techniki jest radziecki fizyk Jurij Denisiuk.

Na kliszę światłoczułą padają jednocześnie, nakładają się na siebie i interferują ze sobą dwie fale: **fala odniesienia** bezpośrednio z lasera oraz **fala sygnałowa** (lub inaczej **przedmiotowa**) odbita od przedmiotu. Fale te pochodzą z jednego źródła, są falami monochromatycznymi, mają ustalone wartości amplitudy oraz fazy i są falami spójnymi. Po wywołaniu kliszy zarejestrowany na niej obraz nazywam hologramem.



Rysunek 32. Tworzenie hologramu odbiciowego [10]. „PS” – płyta światłdzieląca (lustro półprzepuszczalne), „SR” – soczewka rozpraszająca

### 6.2.2. Odtwarzanie obrazu



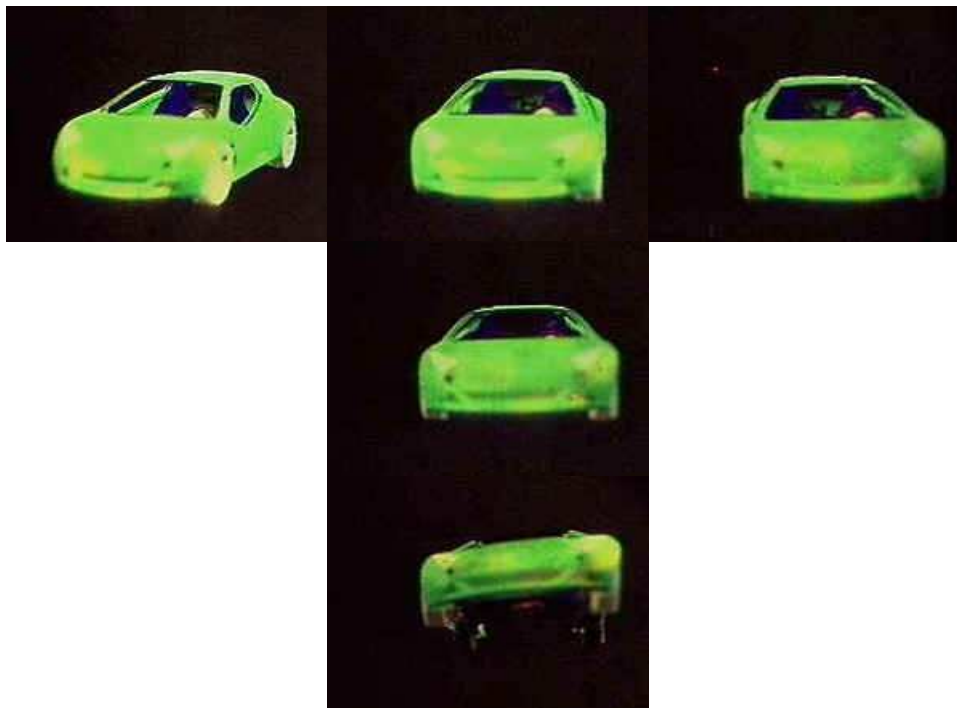
Rysunek 33. Oglądanie hologramu odbiciowego – odtwarzanie obrazu przedmiotu

Odtworzenie obrazu przedmiotu z jego **hologramu odbiciowego**, utworzonego drugą metodą przedstawioną na rysunku 32 realizuje się metodą zobrażowaną na rysunku 33 poprzez oświetlenie hologramu falą odniesienia, pochodzącą z tego samego lasera, którym hologram został stworzony. Fala padająca na hologram ulega załamaniu<sup>6</sup> na nim i w wyniku tego powstają dwa obrazy przedmiotu: rzeczywisty i pozorny. Obraz pozorny znajduje się w tym samym miejscu względem hologramu, co przedmiot holografowany względem kliszy fotograficznej. Obraz rzeczywisty znajduje się po drugiej stronie hologramu. Wisi on jak

<sup>6</sup> Fizycy używają różnych dziwnych słów na opisanie prostych zjawisk i tak zamiast mówić o **załamaniu fali** używają określenia **dyfrakcja**.

gdyby w powietrzu przed hologramem i jest lustrzanym odbiciem przedmiotu holografowanego.

Cechami obrazu pozornego są: tożsamość z przedmiotem, przestrzenność oraz zmienna perspektywa – patrz rysunek 34. Dzięki temu można poruszając głową zaglądać za przedmiot i obserwować te jego fragmenty, które na zdjęciu fotograficznym były by zasłonięte.



Rysunek 34. Oglądanie tego samego hologramu spod różnych kątów

### 6.3. Informacje dodatkowe

#### 6.3.1. Stabilność stanowiska i układu holograficznego

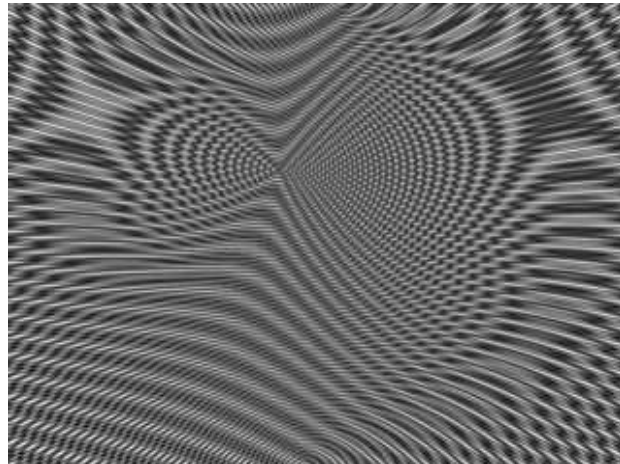
W holografii informacja o obiekcie zakodowana jest w postaci prążków interferencyjnych na materiale światłoczułym. Jeśli zatem nie zapewni się odpowiednich warunków podczas ekspozycji kliszy, to rekonstrukcji obrazu holograficznego może nie być możliwa. Dlatego wśród wielu czynników decydujących o jakości uzyskiwanych hologramów podstawowym jest wyeliminowanie drgań i strąsów stanowiska i układu holograficznego, powodujących względne przemieszczanie się poszczególnych elementów układu. Jeżeli hologram przesunie się względem obiektu (lub na odwrót), to wtedy nastąpi niezgodność fazy wiązki odniesienia i przedmiotowej, a wtedy otrzymamy bardzo ciemny obraz lub też nic nie uzyskamy.

Tak więc cały układ optyczny, w szczególności zaś klisza i przedmiot muszą być umieszczone na tzw. stole antywibracyjnym wytłumiającym wszelkie drgania zewnętrzne na przykład tupanie po podłodze. Ważny jest również sam obiekt – musi solidnie stać na podłożu, nie może się na nim ruszać na boki, chwiać itp., jeżeli nie ma przeciwwskazań to najlepiej przykleić go do stołu żeby uzyskać absolutną stabilność. Istotne znaczenie ma materiał, z którego jest wykonany przedmiot. Dobre są tworzywa twarde, nieodkształcające się typu drewno, metal, kamień, niedopuszczalne są obiekty wykonane z tkaniny, „żywe”

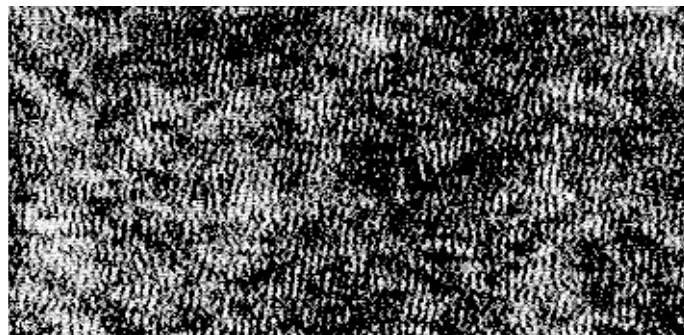
materiały typu płatki kwiatów, ptasie pióra itp., które mogą się deformować nawet pod wpływem zawirowań powietrza w pomieszczeniu.

### 6.3.2. Hologram i zdjęcie w powiększeniu

Oglądając hologram przy użyciu mocnej lupy (powiększenie kilkaset lub kilka tysięcy razy) można dopatrzeć się drobnych, chaotycznie rozłożonych linii będących maksymami i minimami interferencyjnymi – porównaj z rysunkiem 35. Linie te nie wykazują żadnego podobieństwa do obrazowanego przedmiotu. Natomiast na kliszy fotograficznej w powiększeniu widać jedynie jasne i ciemne punkty – porównaj z rysunkiem 36.



Rysunek 35. Fragment hologramu oglądany przy silnym powiększeniu [20]



Rysunek 36. Fragment tradycyjnego zdjęcia oglądany przy silnym powiększeniu

### 6.3.3. Cały obraz w każdym punkcie

Obraz interferencyjny w każdym punkcie hologramu pochodzi od światła rozpraszane przez wszystkie punkty przedmiotu. Dlatego też dowolny wycinek hologramu zawiera pełną informację o wyglądzie całego przedmiotu. Po stłuczeniu hologramu na każdym jego kawałku widnieje dokładna kopia całego hologramu. Ale im mniejsze są te kawałki, tym mniejsza ilość światła ulega załamaniu i obserwowany obraz traci jasność i pogarsza się jego ostrość.

## Rozdział 7. Zastosowanie holografii



Rysunek 37. Hologram „Mumie”

### 7.1. Zastosowania w życiu codziennym

- środki zabezpieczające, bardzo trudne do podrobienia;
- gwarancja oryginalności produktu (np. płyty CD);
- materiały reklamowe – atrakcja i przyciągnięcie uwagi klienta;
- rejestracja kompozycji artystycznych i niedostępnych dla zwiedzających muzea dzieł sztuki (rysunek 37);
- szyfrowanie informacji – w tym przypadku zapisanie i odczytanie szyfru możliwe jest jedynie przy użyciu tych samych fal;

### 7.2. Zastosowania naukowe

Holografia ma bardzo wiele zastosowań w nauce i technice. Już Wolfke próbował wykorzystywać ją do obrazowania struktury materii z atomową zdolnością rozdzielczą. W pierwszej połowie 2001 roku pewne osiągnięcia w tej dziedzinie uzyskali fizycy z Akademii Górniczo–Hutniczej i Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Osiągnięcia te zostały uznane przez American Institute of Physics za jedno z ważniejszych w roku 2001. [2]

Obecny rozwój technologii wymaga stosowania coraz dokładniejszych metod pomiarowych, umożliwiających szybkie i dokładne wyznaczenie kształtu oraz wymiarów części mechanicznych, zespołów, a nawet całych wyrobów. Bardzo często żąda się przy tym, aby pomiar obejmował całą powierzchnię obiektu i był prowadzony w sposób bezdotykowy. Żaden mechaniczny przyrząd pomiarowy nie jest w stanie spełnić wszystkich tych wymagań. Natomiast w dużym stopniu mogą one być spełnione przez interferencyjne metody optyczne, które charakteryzują się wysoką czułością, dużą dokładnością i działają w sposób bezdotykowy, umożliwiając jednoczesny pomiar kształtu na dużej powierzchni.

Niektóre z zastosowań holografii (obecnie stosowane, jak również te, będące ciągle w fazie badań) prezentuje poniższa lista:

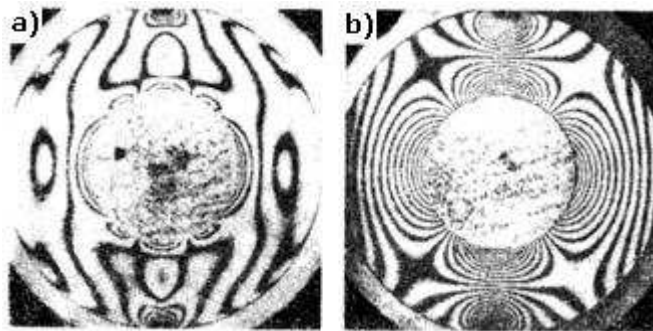
- rozpoznawanie obiektów oraz ich cech wspólnych – to zastosowanie wykorzystywane jest w medycynie, pozwala śledzić rozwój komórek rakowych, które mają mikroskopijne rozmiary;

- defektoskopia – wykrywanie defektów (braków, pęknięć itp.) w przedmiotach;
- modelowanie funkcji logicznych i pamięci optycznych – zastosowanie pamięci holograficznej w komputerze spowoduje, że twarde dyski w komputerach będą miały miliony razy większą pojemność niż obecnie;
- stereoskopowa technika audiowizualna do generowania ruchomych obiektów – stąd już tylko krok do trójwymiarowego kina lub telewizji bez potrzeby używania ekranu kinowego i telewizora;
- holografia akustyczna – za pomocą skomplikowanych urządzeń można uzyskać na przykład obraz człowieka „prześwietlonego dźwiękiem”.

### 7.2.1. Interferometria

Interferometria to badanie obiektów za pomocą prążków interferencyjnych. Metody interferometryczne pozwalają mierzyć małe zmiany wielkości fizycznych (długość, ciśnienie, temperatura), które wpływają na propagację światła. Interferometria bazuje na porównywaniu faz fal świetlnych: fali odbitej od przedmiotu nieprzezroczystego lub przez ten przedmiot przechodzącej – jeżeli przedmiot jest przezroczysty – oraz fali odniesienia.

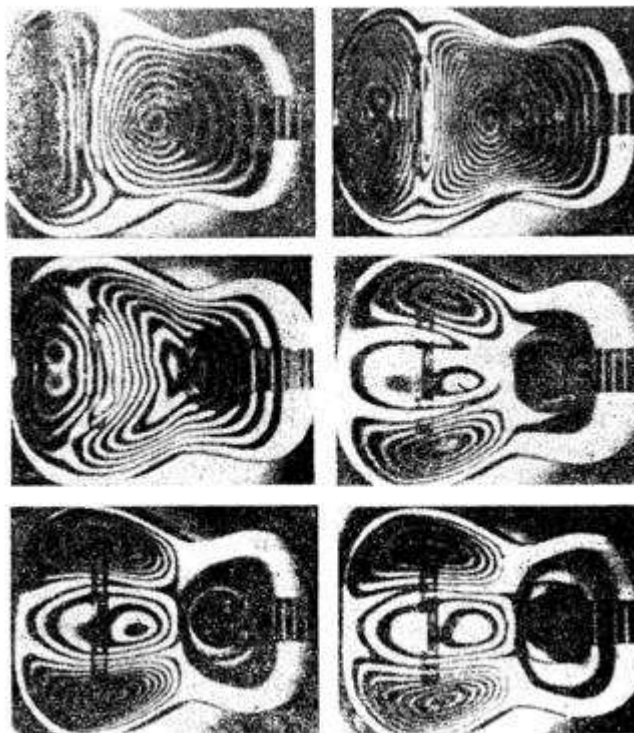
### 7.2.2. Wykrywanie mikroodkształceń



Rysunek 38. Pierścień ściskany wzdłuż średnicy (pionowo) – interferogramy wykonane dwoma różnymi metodami [16]

Na rysunku 38 przedstawione są dwa interferogramy pierścienia ściskanego pionowo – mikroodkształcenia, niewidoczne dla człowieka, powodują zmianę fazy odbijanego światła. W rezultacie na zdjęciu uzyskujemy układ jaśniejszych i ciemniejszych pasków, z których można odczytać, w jakim stopniu ugiął się każdy fragment pierścienia. Podobnie jak w przypadku wyżej opisanej gitary – każde, ewentualne zaburzenie we wzorze interferencyjnym informowałoby o ukrytych wadach przedmiotu.

### 7.2.3. Obserwowanie drgań



Rysunek 39. Interferogramy drgającej gitary [16]

W zależności od tego, jaki dźwięk zagramy na gitarze, jej pudło rezonansowe będzie drgało w różny sposób. Drgania te są zbyt delikatne, aby zobaczyć je bezpośrednio ludzkim okiem w świetle widzialnym, ale zastosowanie metod interferencyjnych umożliwia ich dostrzeżenie (rysunek 39). Wszelkie wady w drewnie pudła rezonansowego widoczne są jako zaburzenia w układzie prążków interferencyjnych.

*i wiele innych zastosowań,  
które przyniesie nam bliższa lub dalsza przyszłość...*

## Rozdział 8. Dodatki

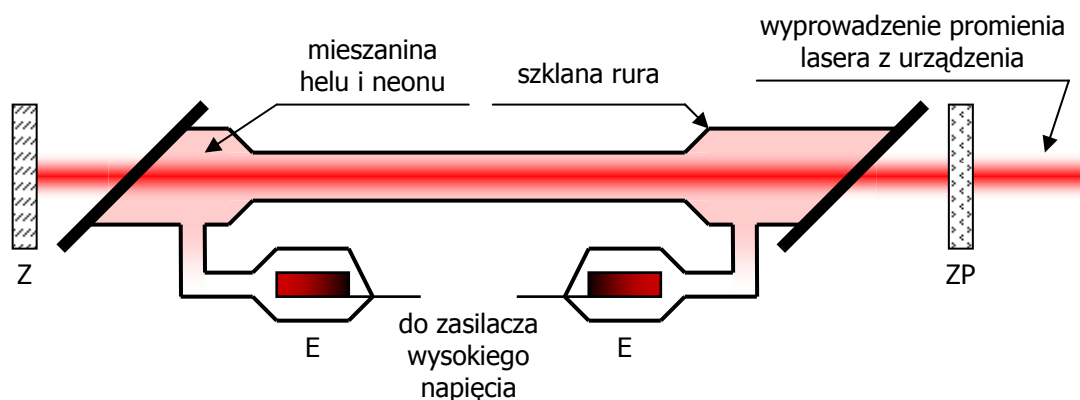
### 8.1. Lasery

Słowo **laser** jest skrótem utworzonym z angielskich słów *light amplification by stimulated emission of radiation* (wzmacnianie światła poprzez wymuszenie emisji promieniowania). W laserze wytwarzana jest wąska wiązka światła o tej samej długości i fazie (światło spójne), która może przebywać duże odległości bez rozpraszania i skupiać w sobie niezwykle dużą gęstość energii. Każda substancja, w której większość atomów lub cząsteczek może ulec wzbudzeniu, może być zastosowana w laserze.

#### 8.1.1. Laser helowo-neonowy HeNe

Podstawowym laserem używanym w holografii jest laser helowo-neonowy (HeNe) – rysunek 40 – dający ciągły promień. Światło czerwone o długości fali  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  ( $632,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ ) jest emitowane ze szklanej tuby wypełnionej mieszaniną dwóch gazów: helu i neonu w stosunku 10:1. Rura z dwóch stron zakończona jest zwierciadłami – jedno z nich jest półprzepuszczalne i to właśnie przez nie promień wyprowadzany jest z urządzenia.

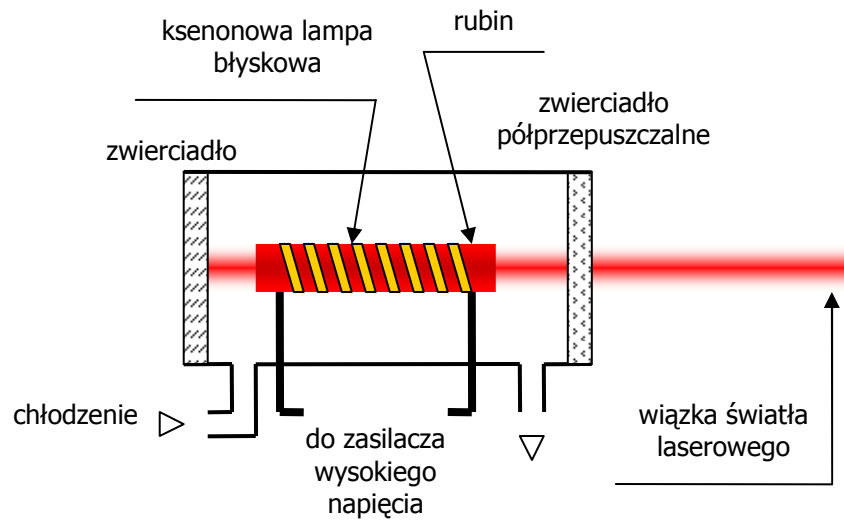
Jest on najtańszym i najczęściej spotykanym typem przy nie masowej i podstawowej produkcji hologramów. Ceny jak na potrzeby amatorskie lub hobbystyczne są spore i wahają się od ok. \$300 do ok. \$1200.



Rysunek 40. Budowa lasera helowo-neonowego. „Z” – zwierciadło, „ZP” – zwierciadło półprzepuszczalne „E” - elektrody

#### 8.1.2. Laser impulsowy

Przy produkcji hologramów najlepiej jest używać lasera impulsowego emitującego błysk światła o bardzo dużej energii w krótkim czasie rzędu jednej milionowej części sekundy ( $1/1.000.000 \text{ sek} = 1\mu\text{s}$ ). Najczęściej stosuje się **lasery rubinowe** (rysunek 41), wytwarzające promieniowanie o długości fali  $\lambda = 694,3 \text{ nm}$  (barwa czerwona).



Rysunek 41. Budowa lasera rubinowego

W jego przypadku w ogóle nie trzeba dbać o stabilność mechaniczną układu optycznego ponieważ w czasie tak krótkiego błysku nie następuje niezgodność faz wiązek odniesienia i przedmiotowej nawet przy dużych przesunięciach obiektu i kliszy. Dzięki temu możliwe jest robienie hologramów dowolnych obiektów, na przykład bardzo efektowne są wizerunki ludzi, zwierząt i roślin (rysunek 42).



Rysunek 42. Hologram „Owad”

Jednak lasery impulsowe są dość niebezpieczne, wymagają wcześniejszego przeszkolenia ich operatora oraz są bardzo drogi – ich ceny kształtują się w przedziale od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy dolarów.

## 8.2. Diody laserowe

Nowością w holografii są półprzewodnikowe diody laserowe spotykane w handlu najczęściej w postaci tanich wskaźników laserowych. Zwykle mają one niewielką moc i emitują falę świetlną w kolorze czerwonym. Lasery diodowe mają wielokrotnie większą drogę, na której emitowane światło jest spójne (nawet 4,5 metra) w porównaniu z laserami

HeNe (30-40 cm). Praktyka wykazała, że dioda laserowa o mocy 5 mW jest doskonałym substytutem lasera HeNe o tej samej mocy, tyle tylko, że stanowi ułamek jego ceny – wskaźnik kosztuje ok. \$15 a laser HeNe ok. \$300-\$400.

### 8.3. Materiały światłoczułe

Najczęściej używanymi materiałami do rejestracji hologramów są klisze i filmy fotograficzne. Charakteryzują się one stosunkowo dużą czułością oraz możliwością uczulania na długości fal odpowiadające długościom fal używanych laserów. Powinny one być w stanie zapisać obraz odpowiednio dokładnie, czyli powinny posiadać odpowiednio dużą zdolność rozdzielczą, sięgającą nawet 1000–3000 linii/mm. Ziarna reagujące na światło na takiej kliszy mają rozmiary około  $1/3 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$ ). Natomiast typowa emulsja fotograficzna nie udostępnia więcej niż 100 linii/mm – na ogół jest to tylko 60 linii/mm.

W trakcie obróbki chemicznej kliszy światłoczułej, w skutek usuwania w trakcie utrwalania nienaświetlonych ziaren halogenku srebra, następuje kurczenie się emulsji fotograficznej o około 15%. Może to prowadzić do obrotu zarejestrowanych prążków interferencyjnych oraz zmniejszenia się odległości pomiędzy nimi. W przypadku hologramów objętościowych objawia się to zmianą koloru obrazu, który odtwarzany jest na długości fali krótszej niż to ma miejsce w trakcie procesu rejestracji.

Istnieją cztery podstawowe rodzaje materiałów światłoczułych używanych w holografii w różnych sytuacjach. Są to:

#### 8.3.1. Halogenek srebra (ang. *silver halide*) AgBr lub AgCl

Emulsja rozpuszczona w żelatynie, która najczęściej jest napyłona na szklane lub plastikowe płytki różnych rozmiarów – najbardziej klasyczny materiał używany w holografii. Jest podobny, choć nie identyczny, do emulsji stosowanej w fotografii czarno-białej, charakteryzuje się doskonałą jakością zapisanych obrazów (najlepsza głębia i ostrość).

Materiał ten nie jest stosowany na rynku masowo – używa się go do robienia hologramów o charakterze prezentacyjnym spotykanych w galeriach, muzeach itp. Materiały na podkładzie szklanym są dość drogie, ale jest dostępna w handlu emulsja naniesiona na folię plastikową, która jest o rząd wielkości tańsza od szklanych płyt (jednocześnie ma nieco gorszą jakość).

#### 8.3.2. Fotopolimer (ang. *photopolymer*)

Specjalna plastikowa folia reagująca na światło laserowe opracowana przez firmy Polaroid i Dupont. Do ich wywoływania nie używa się chemikaliów, tylko naświetla się je promieniami UV i podczerwonymi (wysoka temperatura). Hologramy robione na tym nośniku są odrobinę gorsze od hologramów produkowanych na emulsji srebrzej, ale są od nich o wiele tańsze w produkcji i mogą być wytwarzane masowo (w fabryce przy pomocy maszyn).

Ostatnio fotopolimery często zastępują materiały srebrze w galeriach i wystawach właśnie ze względu na niski koszt produkcji; materiały te mają najlepszy stosunek cena/jakość w porównaniu do innych emulsji. Nowością są pełnokolorowe hologramy fotopolimerowe produkowane w Japonii od 1999 roku.

#### 8.3.3. Żelatyna dwuchromianowa (ang. *dichromated gelatin*) DCG

Emulsja robiona na bazie dwuchromianu potasu lub amonu napyłana na szklane płyty. Cechuje ją bardzo duża jasność i ostrość obrazu – maksymalnie możliwa do uzyskania, chociaż głębia jest ograniczona w porównaniu do poprzednio wymienionych emulsji. Hologramy dwuchromianowe można oglądać w normalnym świetle białym, bez potrzeby używania specjalnych żarówek punktowych. Hologramy dwuchromianowe zwykle są bardzo

małych rozmiarów, spotykane najczęściej w postaci zegarków, breloczków, często używają je jubilerzy do prezentacji biżuterii.

#### **8.3.4. Folia tłoczona (ang. *embossed foil*)**

Srebrzysta plastikowa folia, najbardziej rozpowszechniony i znany materiał (również najtańszy), używany do masowej produkcji hologramów tęczywch powszechnie stosowanych między innymi jako znaki towarowe i zabezpieczające.

## Rozdział 9. Test wiadomości

Sprawdź swoje wiadomości o hologramach i holografii zdobyte po przeczytaniu niniejszego skryptu. Poniżej znajduje się seria pytań testowych z kilkoma odpowiedziami przy każdym pytaniu. W niektórych pytaniach poprawna jest tylko jedna odpowiedź, a w niektórych – więcej niż jedna.

### 9.1. Pytania

1. Kogo uważamy za ojca holografii?
  - a) Emmeta Leitha
  - b) Jurisa Upatnieksa
  - c) Dennisa Gabora
  - d) Isaaka Newtona
2. Od jakiej angielskiej nazwy pochodzi słowo *laser*?
  - a) *light and sensors energized in red* – światło i czujniki pobudzone światłem czerwonym
  - b) *light amplification by the stimulated emission of radiation* – wzmacnianie światła poprzez wymuszenie emisji promieniowania
  - c) *lazing secondary radiation* – opóźniona emisja wtórna
  - d) *large assortment of scanning and energy recovery* – dużo możliwości wyszukiwania i odzyskiwania energii
3. Światło białe (słoneczne) jest światłem koherentnym?
  - a) tak
  - b) nie
  - c) w zależności od sytuacji
4. Kto wymyślił obecnie stosowaną technikę produkcji hologramów?
  - a) Emmet Leith
  - b) Juris Upatnieks
  - c) Dennis Gabor
  - d) Isaak Newton
5. Z jakiego języka pochodzi nazwa *hologram*?
  - a) łacińskiego
  - b) hebrajskiego
  - c) angielskiego
  - d) greckiego
6. Podczas tworzenia hologramu należy zwrócić szczególną uwagę, aby nie występowały:
  - a) wahania wilgotności powietrza w pomieszczeniu, w którym tworzony jest hologram
  - b) drgania stołu, na którym tworzony jest hologram
  - c) zmiany w kolorze wykorzystywanego lasera lub diody laserowej
  - d) przemieszczenia holografowanego przedmiotu

7. Jaki materiał światłoczuły stosowany jest do produkcji hologramów umieszczanych między innymi na kartach kredytowych i banknotach?
- halogenek srebra
  - żelatyna dwuchromianowa
  - fotopolimer
  - folia tłoczona
8. Która wiązka w holografii odbiciowej kierowana jest na przedmiot?
- przedmiotowa
  - obiektowa
  - sygnałowa
  - odniesienia

## 9.2. Odpowiedzi

1. C	2. B	3. B	4. A, B	5. D
6. B, D	7. D	8. A, C	9.	10.
11.	12.	13.	14.	15.

## Bibliografia

- [1] “Andy’s Holo-Gallery” <http://home.t-online.de/home/wappelt/>
- [2] „Biuletyn Informacyjny Pracowników Akademii Górniczo–Hutniczej”  
[http://www.biuletyn.agh.edu.pl/archiwum\\_bib/2001/88/08.88.html](http://www.biuletyn.agh.edu.pl/archiwum_bib/2001/88/08.88.html)
- [3] D. Gabor “*A new microscopic principles*”, *Nature* **161**, 777 (1948)
- [4] D. Gabor “*Microscopy by reconstructed wavefronts*”, *Proc. Roy. Soc. (London) A* **197**, 454 (1949)
- [5] D. Gabor “*Microscopy by reconstructed wavefronts: II*”, *Proc. Roy. Soc. (London) B* **64**, 449 (1951)
- [6] “History of holography” <http://www.holography.ru/histeng.htm>
- [7] “Holophile, Inc.” <http://www.holophile.com/>
- [8] “Interactive Holography Module”  
<http://teched.vt.edu/gcc/CurriculumMaterials/HoloProject/HTML/>
- [9] E. Jagoszewski „*Holografia optyczna*”, PWN, Warszawa 1986
- [10] B. M. Jaworski, A. A. Dietłaf „*Fizyka – poradnik encyklopedyczny*”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000
- [11] A. Kiejna „*Mieczysław Wolfke: życie i działalność naukowa*”, *Postępy Fizyki* **54**, 113 (2003)
- [12] E. N. Leith, J. Upatnieks “*New techniques in wavefront reconstruction*”, *J. Opt. Soc. Amer.* **51**, 1469 (1961)
- [13] E. N. Leith, J. Upatnieks “*Wavefront reconstruction with continuous tone transparencies*”, *J. Opt. Soc. Amer.* **53**, 1377 (1963)
- [14] E. N. Leith, J. Upatnieks “*Wavefront reconstruction with diffused illumination and threedimensional objects*”, *J. Opt. Soc. Amer.* **54**, 1295 (1964)
- [15] “Nobel e-Museum” <http://www.nobel.se/>
- [16] praca zbiorowa pod red. M. Pluty „*Holografia optyczna*”, PWN, Warszawa 1980
- [17] M. Sufczyński „*Mieczysław Wolfke*”, *Postępy Fizyki* **23**, 559 (1972)
- [18] „*Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne i astronomiczne*”, Wydawnictwo Sponsor-Apewu, 1994
- [19] M. Wolfke „*O możliwości optycznego odwzorowywania siatki molekularnej*”, *Physikalische Zeitschrift* **21**, 495-497 (1920)
- [20] <http://www.olsza.krakow.pl/~konrad/teoria/teoria.html>

## Index

### A

AgBr, halogenek srebra, 41  
AgCl, halogenek srebra, 41  
amplituda fali, 25

### B

Benton, Steven A., 16

### C

Cross, Lloyd, 16  
częstość fali, 25  
czoło fali, 12

### D

DCG, 41  
Denisiuk, Jurij, 14, 32  
diody laserowe, półprzewodnikowe, 40  
długość fali, 25  
dźwięki, 22

### F

fala, 25  
  amplituda, 25  
  częstość, 25  
  czoło, 12  
  długość, 25  
  faza, 25  
  harmoniczna, 29  
  monochromatyczna, 31  
  odniesienia, 32  
  przedmiotowa, 32  
  sinusoidalna, 28  
  sygnałowa, 32  
fale  
  interferencja, 28  
  koherencja, 27  
  spójność, 27  
falowa, funkcja, 25  
faza fali, 25  
folia tłoczona, 42  
Foster, Michael, 16  
fotopolimer, 41

funkcja falowa, 25

### G

Gabor, Dennis, 11

### H

halogenek srebra, 41  
HeNe, laser, 39  
holografia, 7, 31  
  zastosowanie, 36  
holograficzne, muzea, 23  
hologram  
  2D, 20  
  2D–3D, 20  
  3D, 21  
  impulsowy, 21  
  nazwa, 7  
  objętościowy, 21, 23  
  odbiciowy, 14, 21  
    oglądanie, 33  
    tworzenie, 32  
  osiowy, 31  
  tęczowy, 16, 21  
  płaski, 20  
  płasko-przestrzenny, 20  
  przestrzenny, 21  
  tłoczony, 16  
  transmisyjny, 13, 21  
    oglądanie, 32  
    tworzenie, 31  
  w linii, 31

### I

impulsowy  
  hologram, 21  
  laser, 15  
interferencja fal, 28  
interferometria, 7, 15, 37

### J

Jeong, Tung, 17

**K**

koherencja fal, 27  
Komar, Victor, 17

**L**

laser, 27, 39  
helowo-neonowy, 39  
HeNe, 39  
impulsowy, 15, 39  
rubinowy, 39  
Leith, Emmet, 13, 31

**M**

materiały światłoczułe, 41  
McGrew, Steve, 16  
metoda Wolfkego–Bragga, 10  
mochromatyczna fala, 31  
muzea holograficzne, 23

**O**

odniesienia, fala, 32  
ośrodek sprężysty, 25

**P**

Pethick, Gerry, 16  
półprzewodnikowe diody laserowe, 40  
przedmiotowa, fala, 32

**R**

rekonstrukcja czoła fali, 11

**S**

Siebert, Larry, 15  
spójność fal, 27  
sprężysty, ośrodek, 25  
stereogram tęczy, 21  
sygnałowa, fala, 32

**Ś**

światłoczułe, materiały, 41

**U**

Upatnieks, Juris, 13, 31

**W**

Wolfke, Mieczysław, 10  
Wolfkego–Bragga, metoda, 10

**Y**

Young, Thomas, 27

**Ż**

żelatyna dwuchromianowa, 15, 41