



Portrety w więcej niż dwóch wymiarach

HOLOGRAFIA OPTYYCZNA (i co dalej?)

Zdzisław Jankiewicz

Podziel się wiedzą- WAT, Warszawa, 20.05.2018

Streszczenie

Tworzenie (zapis i odtwarzanie) obrazów trójwymiarowych na płaskich mediach rejestrujących należy niewątpliwie do technik niezwykłych. Takie możliwości oferuje holografia. Sama nazwa sugeruje, że holografia zapewnia „pełny zapis” rejestrowanego obiektu, a więc także to, że jest przestrzenną „bryłą”, a nie jej rzutem na płaszczyznę, z czym mamy do czynienia w przypadku klasycznej fotografii.

Jeżeli dołożymy do tego, że do zapisu obrazów holograficznych i ich odtworzenia wymagany jest laser, to nie powinno dziwić, że HOLOGRAFIĘ pozwałem sobie włączyć do zastosowań laserów o „znaczeniu globalnym, warunkującym rozwój współczesnej cywilizacji”.

Holografia odkrywana była dwukrotnie, przy czym odkrywca powtórny o pierwszym nie wiedział (tu jednak znak zapytania?). To się zdarzało już wcześniej (nie pierwszy raz i pewnie nie ostatni), ale tym razem jest to o tyle przykre, że dotyczyło naszego rodaka, pracownika Politechniki Warszawskiej prof. Mieczysława Wolfke. Opublikował on ideę holografii w 1920 r., zaś Denis Gabor ją opatentował w 1947r., gdy M. Wofke już nie żył. Najdziwniejsze jest to, że obydwaj Panowie chcieli osiągnąć ten sam efekt. Uwidocznic (zobrazować i powiększyć) przestrzenną strukturę materii: M. Wofke - rozpraszanego w kryształach promieni Roentgena, D. Gabor - obrazów z mikroskopu elektronowego.

Jak wspomniano, do zapisu holograficznego wymagane jest promieniowanie (światło) laserowe i to o dużym (od tego zależy głębia rejestrowanej sceny) stopniu spójności.

Do „pełnego zapisu” informacji o holografiowanym obiekcie wymagana jest rejestracja „frontu falowego” fali świetlnej odbitej od obiektu, a nie tylko jej energii (intensywności). Dlatego rejestrowany przedmiot musi być oświetlony falą opisywaną „pojedynczą sinusoidą”. Taką można wytworzyć tylko w laserze.

W prelekcji podane są elementarne wiadomości z interferencji fal, typy hologramów, sposoby ich zapisywania i odtwarzania. Niektóre z nich, hologramy objętościowe Denisyuka, mogą być odtwarzane w skolimowanym świetle białym. Umożliwia to łatwe wykorzystanie ich w prezentacji obrazów holograficznych kopii obiektów muzealnych, zamiast ich oryginałów.

Porównując holografię do fotografii wiemy, że fotografując obiekty ruchome musimy skracać czas ekspozycji; inaczej obraz będzie nie ostry. W holografii zagadnienie występuje znacznie ostrzej, chociaż efekt przemieszczenia się obiektu w trakcie ekspozycji jest inny. Aby powstał obraz holograficzny, obiekt w trakcie ekspozycji nie może przemieścić się więcej niż $\sim 0,2 \lambda$. Efektem przemieszczania nie jest „rozmycie”, „nieostrość” obrazu, ale zanik jego jasności. Przedmioty, które przemieszczają się o ok. $0,5 \lambda$ nie zarejestrują się. Do zapisu holograficznego obiektów ruchomych wymagane jest odpowiednie skrócenie ekspozycji tzn. użycie do zapisu lasera impulsowego. Nakłada to dodatkowe wymagania na cały zestaw i odbija się na głębi zapisywanej na hologramie sceny.

Każda nowe odkrycie czeka na praktyczne wykorzystanie. Z odkryciem holografii natychmiast skojarzono i pojawiły się w marzeniach przestrzenne obrazy w kinie i telewizji. Odpowiedź była twierdząca: jest to możliwe, ale.....Tych „ale” jest co najmniej kilka.

1. Ludzie postrzegają „przestrzenność” w sposób ograniczony, ubogi. Nasze oko zbudowane jest podobnie jak kamera fotograficzna i jak aparat fotograficzny wyposażone jest w obiektyw (soczewkę). Jak w kamerze obraz rzutowany jest na światłoczułą „siatkówkę” i jest płaski. Przestrzenność odczuwamy dzięki perspektywie (przedmioty dalsze widzimy jako mniejsze), a przede wszystkim paralaksie (jesteśmy „dwuoczni”). Każde oko widzi obiekt pod nieco innym kątem. Złożenie obu obrazów pozwala naszej doskonałej maszynie matematycznej – mózgowi dawać nam wrażenie widzenia przestrzennego, ale tylko „w poziomie”. „W pionie” przestrzennie nie widzimy i o dziwo nam to nie przeszkadza. Ten wysoco za długi wywód o sprawach powszechnie znanych ma na celu uświadomienie, że niedoskonałość naszego postrzegania przestrzenności pozwala dać nam to wrażenie w sposób znacznie prostszy, bez uciekania się do holografii. Zagadnienie jest już rozwiązane i mamy zarówno kino jak i telewizję pozwalającą na oglądanie scen przestrzennych. Holografii do tego nie potrzeba.

2. Słońce, które zrodziło i ożywia naszą egzystencję, ma cechy „ciała doskonale czarnego” emitującego promieniowanie w szerokim pasmie długości fal, które do zapisu i odtwarzania hologramów nie nadaje się. Z drugiej strony nasze zmysły – wzrok – ukształtowany został do odbierania tego rodzaju bodźców. Istnieje przekonanie (nawet pewność), że dłuższa obserwacja scenerii oświetlonych promieniowaniem laserowym byłaby męcząca i szkodliwa.

3. Do przesłania dowolnej informacji potrzebne jest zaangażowanie pewnego pasma częstotliwości w promieniowaniu służącym do jego transmisji. Do przesłania sygnału mowy wystarczy pasmo o górnej częstotliwości 3 kHz ($\sim 10^3$ Hz), muzyki – 20 kHz ($\sim 10^4$ Hz), telewizji 8,4 MHz ($\sim 10^7$ Hz). Obliczono, że do przesłania typowego hologramu potrzebne byłoby pasmo o górnej częstotliwości $\sim 10^{11}$ Hz, o cztery rzędy wielkości szersze niż już istniejące w łączach telewizyjnych. Dla przesyłania obrazów holograficznych wymagana byłaby kompletna przebudowa istniejącej już sieci łączy telewizyjnych, a zysk raczej iluzoryczny.

Jak z powyższego wynika, zastosowań holografii należy poszukiwać raczej w innych dziedzinach nauki i techniki. Spośród dość dużej gamy rozlicznych możliwości, w prezentacji wybrano dwie: interferometrię holograficzną i holograficzny zapis, odczyt, gromadzenie i przesyłanie informacji.

Pierwsze poruszam nie tylko ze względu na jego praktyczną użyteczność, ale także osobiste (także moich kolegów, współpracowników) zajmowanie się konstrukcją laserów do tych zastosowań. Poruszone tu zagadnienia są zaledwie wąskim fragmentem bardzo szerokiego zagadnienia porównania z sobą frontów falowych do których należy interferometria holograficzna (patrz [1]).

Brak odniesienia się chociażby do metod deszyfracji obrazów prążkowych i powiązania ich z rzeczywistą deformacją obiektów. Nie jest to zagadnienie łatwe i należy bardziej do informatyki niż optoelektroniki. Nas interesuje głównie zaangażowanie laserów w tych zastosowaniach i przy tym pozostajmy.

W zagadnieniu drugim trwa nieprzerwana konkurencja różnych technik. Obecnie powszechnie stosowane pamięci dyskowe (z udziałem, należy to z naciskiem podkreślić, laserowego zapisu i odczytu informacji bitowych) oraz elektroniczne raczej w pełni opanowały rynek. Nie ma wątpliwości, że zapis i odtwarzanie dźwięku i obrazów to ogromne pole zastosowań elektroniki, optoelektroniki i optyki, a udział w nim techniki laserowej należy zaliczyć do grona globalnych zastosowań laserów. Stąd, korzystając z tej okazji, poświęcam nieco miejsca dla ich omówienia.

Pamięci holograficzne mają jednak pewien walor, którego pozbawione są pozostałe. Zapamiętuje się w nich obrazy: np. całe strony tekstu, lub przestrzenne scenerie. To prawda, że do przesłania takiej informacji potrzebny jest kanał łączności optycznej zdolny do przenoszenia ogromnego ($\sim 10^{11}$ Hz) pasma częstotliwości. Dla specyficznych jednak celów, np. łączności satelitarnej lub międzyplanetarnej, takie kanały mogą i pewnie będą budowane.

Ogólnie rzecz biorąc, uważam, że holografia nie wykazała jeszcze wszystkich swoich możliwości jeżeli chodzi o jej wykorzystanie w technice, a w szczególności w nauce. Dlatego ten końcowy akapit w tytule prezentacji „i co dalej”. No właśnie, czym zaskoczy nas jeszcze holografia w przyszłości?

I. Wstęp

Śledząc wpływ laserów na rozwój współczesnej cywilizacji, nie sposób pominąć holografii optycznej.

Holografia realizowana jest przy użyciu monochromatycznych fal optycznych, a więc takich jakie są wytwarzane przez lasery.

Definicje:

Z języka greckiego: HOLOS – całość; GRAPHO – piszę
HOLOGRAFIA ↔ PEŁNY ZAPIS [1]

1. Holografia optyczna jest działem optyki zajmującej się metodami zapisu i rekonstrukcji frontu falowego promieniowania świetlnego rozproszonego od powierzchni obiektu.
2. Przez rekonstrukcję frontu falowego rozumiemy odtworzenie nie tylko amplitudy (intensywności) lecz także fazy fali odbitej od obiektu.
3. Do zapisu obrazu holograficznego a także przeważnie do odtworzenia obrazu wymagane jest spójne światło laserowe.
4. Podstawową i niezwykłą cechą obrazów obiektów otrzymanych metodą holograficzną jest ich trójwymiarowość.

[1] Pluta M. (redakcja) „Holografia optyczna – Podstawy fizyczne i zastosowania” PWN, Warszawa 1980.

Historia odkrycia HOLOGRAFII

HOLOGRAFIA odkrywana była dwukrotnie:

- w 1920 roku przez Mieczysława WOLFKE [2]
- w 1947 roku przez Dennisa GABORA [3]

*To dość typowa sytuacja, gdy odkrycie pojawia się zbyt wcześnie.
Technika światowa musi dojrzeć do przyjęcia nowych idei.
Idee pojawiające się zbyt wcześnie zostają po prostu zapomniane.*

*Mimo pierwszeństwa publikacji M. Wolfkego, jako wynalazca holografii uważany jest Dennis Gabor i on po zbudowaniu lasera i sukcesach holografii otrzymał w 1971 nagrodę Nobla.
Mieczysław Wolfke już wtedy nie żył (zmarł w 1947r).*

[2] Wolfke M, "Über die Möglichkeit der optischen Abbildung vom Molekulargittern", ("About the possibility of optical imaging of molecular lattices") *Physikische Zeitschrift*, 21, 495-7, 1920.

[3] Gabor D. „GB685286 GB patent British Thomson- Houston Company”, published 1947

Jak było naprawdę!

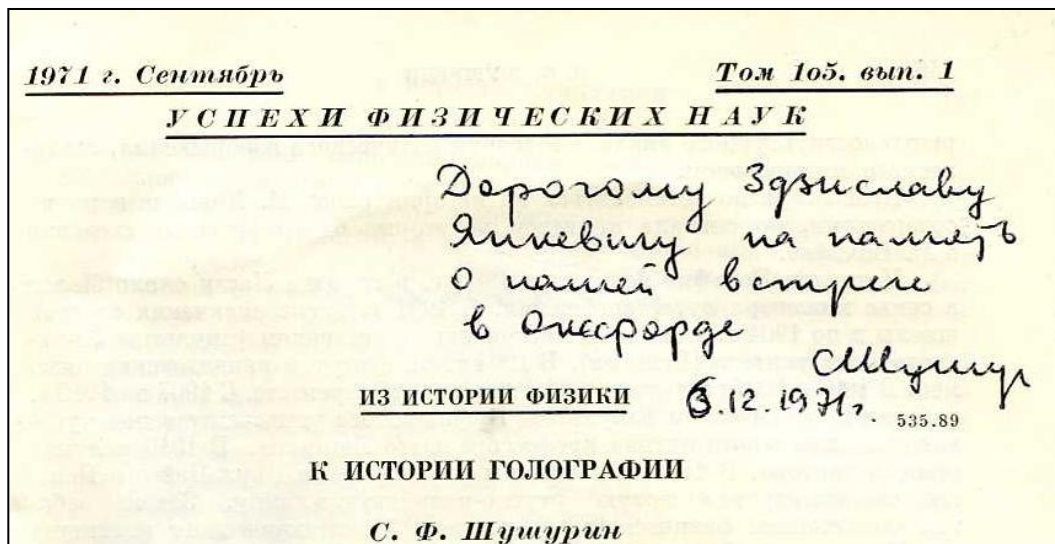


- M. Wolfke urodził się w Łasku k/ Łodzi w 1883;
- Gimnazjum kończy w Częstochowie i Sosnowcu;
- 1902 – studia na wydziale fizyki w Liege i Paryżu;
- 1910 – stopień doktora za rozprawę z optyki;
- 1913 – habilitacja na uniwersytecie w Zurichu;
- 1920 – publikacja art. w *Physikalische Zeitschrift* „O możliwości optycznego odwzorowania siatki molekularnej” – idea holografii ident. z Gabora.
- 1922 – tytuł profesora i Zakład Fizyki w Pol. War.
- 1937 – powołanie Zakładu Niskich Temperatur;
- wojna w Warszawie, ruch oporu, tajne komplety;
- wysiedlenie, Kraków, powrót do Zak. Fiz. PW;
- 1947 – nagła śmierć Profesora w czasie podróży do Zurichu

Mieczysław Wolfke (1883 – 1947)

Komu zawdzięczamy pamięć o M. Wolfke

– przykro powiedzieć, że nie sobie, nie jego rodakom.



Dedykacja S. Szuszurina
na przysłanej mi przez niego
kopii artykułu.

Tłumaczenie:
Zdzisławowi Jankiewiczowi
na pamiątkę naszego
spotkania w Oksfordzie.

S. Szuszurin
6.12.1971r.

1971 – publikacja S. F. Szuszurina [4] przypominająca udział Mieczysława Wolfkego w historii odkrycia holografii.

(Dedykacja z 6.grudnia 1971)

[4] S. F. Szuszurin „K istorii golografii”, Uspechi Fizyceskich Nauk tom 105, 1, 145-148, 1971

Co zapamiętał świat!



Dennis Gabor (1900-1979)

1. *Ur. 05.czerwca 1900 w Budapeszcie;*
2. *1924 studia elektrotechn. w Berlinie;*
3. *1927 obrona doktoratu – Berlin;*
4. *1933 wyjazd do Anglii–optyka elektr.;*
5. **1947 patent dot. rekonstrukcji czoła fali obrazów otrzymanego z mikroskopu elektronowego – zasada holografii [3];**
6. *1971 Nagroda Nobla po zbudowaniu lasera i sukcesach optycznej holografii.*

Idee Wolfkego i Gabora były tożsame.

Dotyczyły rekonstrukcji w zakresie optycznym obrazów zapisanych promieniowaniem X (Wolfke) lub w mikroskopie elektronowym (Gabor).

Chcieli uwidocznić w powiększeniu przestrzenną strukturę materii.

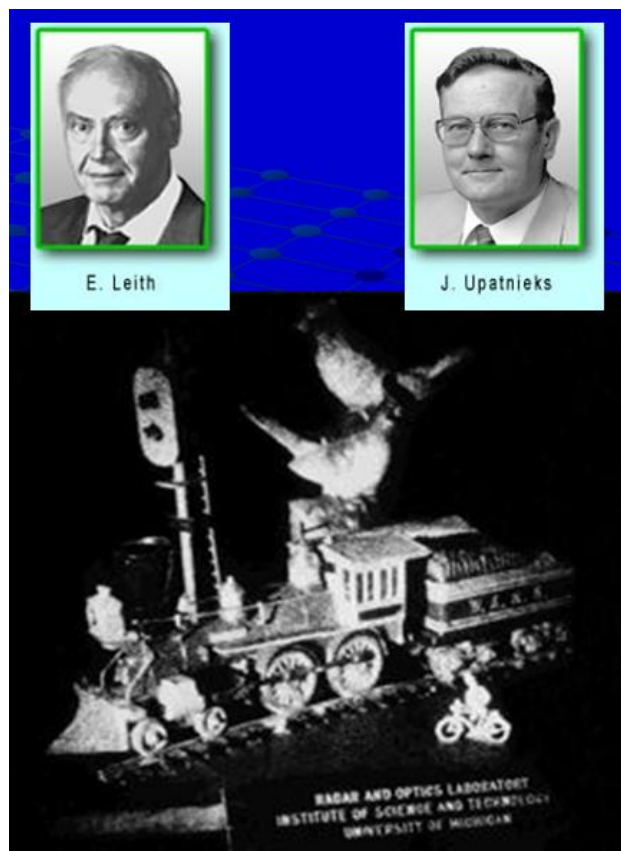
Czy D. Gabor wiedział o pracy M. Wolfkego?

„Opracowując zasadę rekonstrukcji frontu falowego, stałem na ramionach dwóch wielkich fizyków – Williama L.Bragga i F. Zernikego.”

„Nie wiedziałem wówczas - podobnie jak Bragg, że Mieczysław Wolfke zaproponował tę metodę w 1920 r., nie podejmując jednakże próby jej doświadczalnej realizacji”.

Wybrane fragmenty wykładu D. Gabora przy odbiorze Nagrody Nobla

Twórcy pierwszych hologramów optycznych i ich dzieła



[5]



Yuri Denisyuk – twórca hologramów odtwarzanych w świetle białym [6] – 1962. State Optical Institute in Leningrad (obecnie Petersburg)

University of Michigan 1961

[5] Leith E. N., Upatnieks J., „New techniques in wavefront reconstruction” J. Opt. Soc. Amer., 51, 1469-1475 (1961).

[6] Yu.N.Denisyuk, Dokl. Akad. Nauk SSSR 144, 1275 (1962).

Hologram tęczowy



**Polaroid Research
Laboratory - 1968**



Hologram odbiciowy. Specjalna, skomplikowana technika zapisu, a odtwarzania w świetle białym. Nazwa pochodzi od zmieniających się kolorów przy oglądaniu hologramu pod różnymi kątami [7]

[7] Benton S.A.), „Hologram reconstructions with extended incoherent sources”, J. Optical Society of America, 59, 1545-1546,(1969)

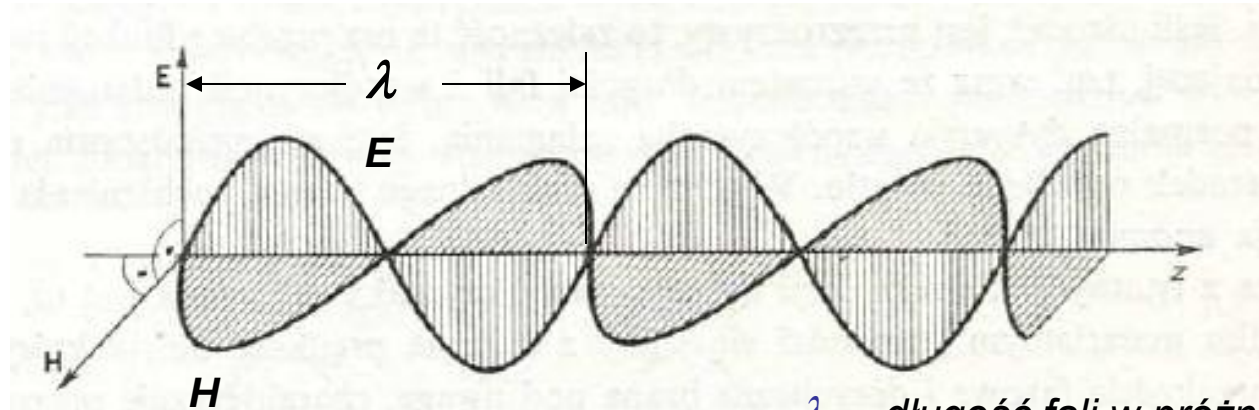
Dalsze ważniejsze wynalazki

- 1965 – Zasady interferometrii holograficznej - R. Powell, K. Stetson [8];**
- 1967 – Hologram impulsowy (obiektów żywych) – L. Siebert;**
- 1972 – Technika holograficznych obrazów ruchomych – L. Cross;**
- 1974 – Druk (tłoczenie) hologramów – M. Foster;**
- 1976 – Projektor Filmów holograficznych – V. Komar;**
- 1983 – MasterCard zabezpiecza swoją kartę kredytową hologramem;**
- 1984 – „National Geografik” drukuje (tłoczy) hologram na okładce.**

[8] Stetson K. A., Powell R. I. „Holograms Interferometry”, Annual Meeting of the OSA, Paper WF13, J. Opt. Soc. Amer. 55, 11, (1965)

II. Interferencja fal optycznych ***(kilka elementarnych informacji)***

Fala monochromatyczna [1]



Dla próżni:

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

λ_0 - długość fali w próżni;

ν - częstotliwość; T - okres drgań;

$c=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ - szybkość światła w próżni;

$\omega = 2\pi\nu$ - pulsacja; k - wektor faliowy

$$E = a \cos(\omega t - kz + \varphi) = a \exp[i(\omega t - kz + \varphi)]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Zasada superpozycji

Jeżeli w danym punkcie przestrzeni spotyka się więcej niż jedna fala e-m, to zaburzenie wypadkowe jest prostą sumą wartości chwilowych pól.
Konsekwencją zasady superpozycji jest interferencja

Superpozycja dwóch fal monochromatycznych o polaryzacji kolinearnej

$$E_1 = a_1 \sin(\omega t - \varphi_1); E_2 = a_2 \sin(\omega t - \varphi_2) \quad - \text{ dla punktu w przestrzeni: } z=0$$

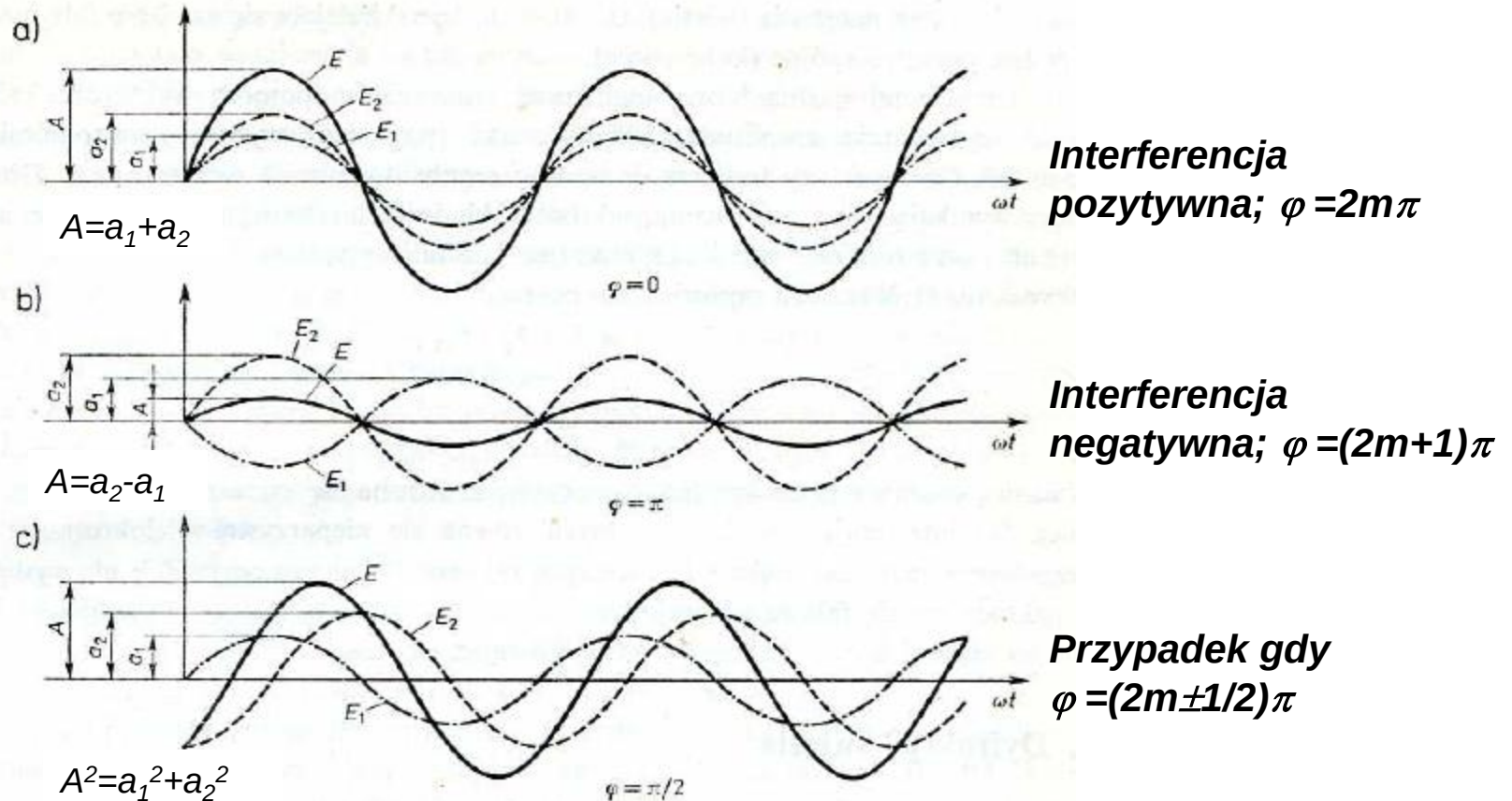
Pole wypadkowe:

$$E = E_1 + E_2 = A \sin(\omega t - \phi); \quad \phi = f(\varphi_1, \varphi_2)$$

Amplituda pola
wypadkowego:

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Zasada superpozycji graficznie



Natężenie promieniowania

W zakresie optycznym nie ma możliwości śledzenia za oscylacjami w czasie; możliwa jest jedynie obserwacja (pomiar) parametrów energetycznych promieniowania: natężenia promieniowania - I [W/cm²]

$$I = 2\langle E^2 \rangle = \frac{1}{2T} \int_{T=-\infty}^{T=+\infty} EE^* dt$$

Wprowadzając oznaczenia:

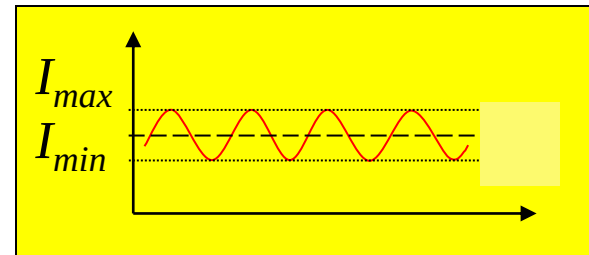
$$I_1 = a_1^2; \quad I_2 = a_2^2; \quad \varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$$

(człon interferencyjny)

$$I = 2\langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = I_1 + I_2 + I_{12};$$

$$I_{12} = 4\langle E_1 E_2 \rangle \cos \varphi = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$$

$$I_{\min, \max} = \left(\sqrt{I_1} \mp \sqrt{I_2} \right)^2 \quad \{ \cos \delta = \mp 1 \}$$



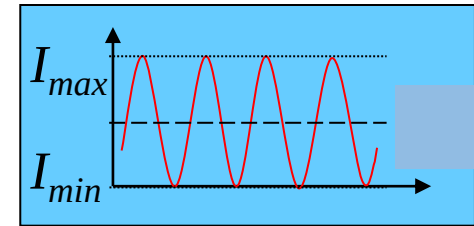
Przypadki szczególne

1. **Interferujące fale mają takie same amplitudy:** $a_1=a_2=a$

$$I = A^2 = 2a^2(1 + \cos \varphi) = 4a^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

$I_{\max}=4a^2$; $I_{\min}=0$; dla pozytywnej interferencji $\varphi=2m\pi$

$I_{\max}=I_{\min}=0$; dla negatywnej interferencji $\varphi=(2m-1)\pi$

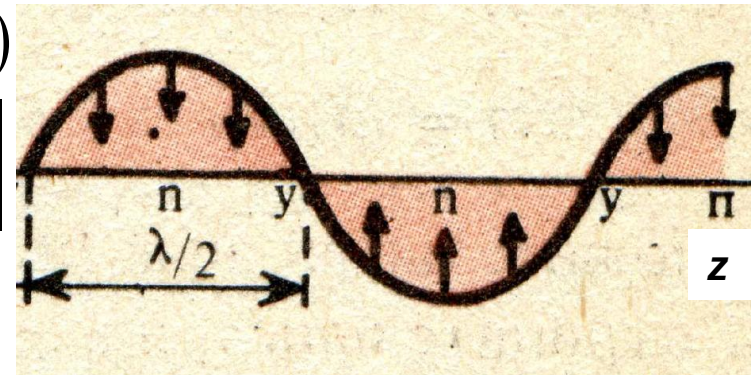


2. **Fala stojąca** – interferujące fale są przeciwbieżne: $a_1=a_2=a$

$$E_1 = a \cos(\omega t - kz); E_2 = a \cos(\omega t + kz)$$

$$E = E_1 + E_2 = 2a \cos(kz) \cos(\omega t)$$

Fala tworzy węzły oddalone o $\lambda/2$, które są nieruchome, nie przemieszczają się w czasie.

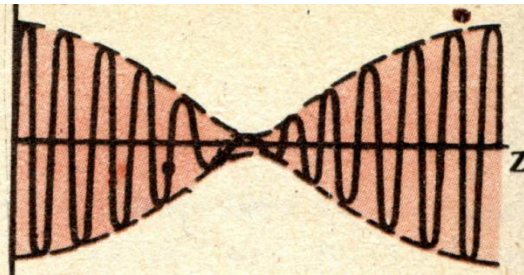


3. *Dudnienia*

Interferencja fal o różnych częstotliwościach: $a_1=a_2=a$

$$E_1 = a \cos(\omega_1 t - k_1 z); \quad E_2 = a \cos(\omega_2 t - k_2 z) \quad \text{Pola składowe}$$

$$E = E_1 + E_2 = 2a \cos(\Delta\omega t - \Delta k z) \cos(\langle\omega\rangle t - \langle k\rangle z) \quad \text{Pole wypadkowe}$$



gdzie:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \ll \omega_1 \approx \omega_2; \quad \Delta k = \frac{k_1 - k_2}{2}$$

$$\langle\omega\rangle = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}; \quad \langle k\rangle = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

Fala propaguje się ze średnią częstotliwością - $\langle\omega\rangle$ (wektorem falowym - $\langle k\rangle$), a jej amplituda zmienia się z częstotliwością różnicową $\Delta\omega$. Nazywamy to „dudnieniem”.

Interferencja pól częściowo spójnych

Częściowa spójność źródeł promieniowania może mieć charakter czasowy (spójność czasowa) lub przestrzenny (spójność przestrzenna). Drugi przypadek odnosi się do źródeł rozciągłych i w zasadzie nie dotyczy laserów generujących w modzie podstawowym. Należy ograniczyć się do spójności czasowej.

$$I_{12} = 2 \langle E_1 E_2^* \rangle = 2 \sqrt{I_1 I_2} g(\tau) \cos \varphi$$

τ - opóźnienie interferujących ciągów falowych z tego samego źródła punkowego.

$$g(\tau) = \frac{\langle E(t) E^*(t + \tau) \rangle}{\langle E(t) E^*(t) \rangle}; \quad 0 \leq g(\tau) \leq 1$$

$g(\tau)$ - opisują zdolność źródła promieniowania do interferencji.

$$|g(\tau)| \propto V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Bezwzględne wartości funkcji $g(\tau)$ pokrywają się z wartościami współczynnika widzialności V

Promieniowanie nie w pełni monochromatyczne

Rozmycie widmowe jest przyczyną niepełnej spójności, a stopień spójności czasowej zależy od szerokości widma i kształtu linii. Im większa szerokość pasma tym mniejszy czas i droga spójności. Dotyczy również promieniowania spontanicznego.

dla linii Gaussa:

$$|g_D(\tau)| = \exp\left[-\left(\frac{\pi\tau\Delta\nu_D}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right]$$

dla linii Lorentza:

$$|g_L(\tau)| = \exp(-\pi\tau\Delta\nu_L)$$

Stopień spójności promieniowania lasera o N jednakowej intensywności modach wzdluznych:

$$|g_N(\tau)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\pi c\tau}{2L}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi c\tau}{2L}\right)} \right|$$

gdzie:

$$N \leq \frac{\Delta\nu_L}{\Delta\nu_q} = \frac{2L(\Delta\nu_L)}{c}$$

L – długość rezonatora

$\Delta\nu_q$ - odstęp między modami

Miary stopnia spójności źródeł promieniowania

Używanymi wielkościami do oceny stopnia spójności źródeł tj. zdolności do interferencji generowanego przez nie promieniowania jest czas koherencji - τ_{max} , lub droga koherencji – ΔL .

$$\Delta L = c \tau_{max}$$

Światło można uznać za spójne gdy:

$$|g(\tau)| \geq 0,707$$

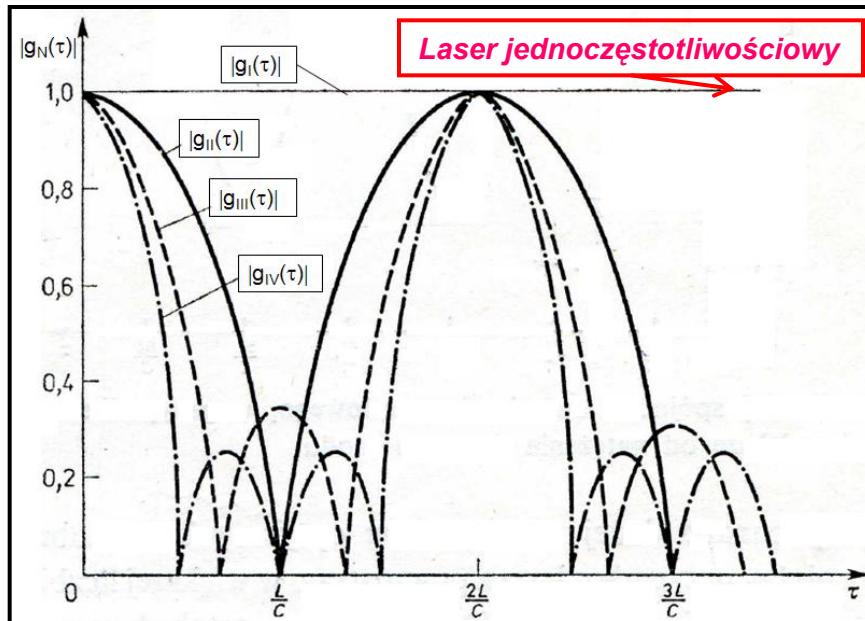
Warunek powyższy jest spełniony dla $\tau_{D \max} \leq 0,32$; i $\tau_{L \max} \leq 0,11$.

Drogi koherencji źródeł uznanych za spójne powinny wynosić nie mniej niż:

$$\Delta L_D = \frac{0,32}{\Delta \nu_D} c; \quad \Delta L_L = \frac{0,11}{\Delta \nu_L} c$$

Graficzny obraz stopnia spójności lasera wieloczęstotliwościowego

Widmo składa się z N modów wzdłużnych o jednakowych intensywnościach



Charakterystyka:

1. $g_N(\tau)$ – ma przebieg okresowy;
2. Biorąc wartość $|g(\tau)| \geq 0,707$, droga spójności pierwszego listka zawsze $\Delta L_{sp} < L$;
3. Pod uwagę można brać lasery o kilku modach $N \leq 4$.

Analiza tych zależności wskazuje, że do holografii powinniśmy dysponować laserami o jednym modzie wzdłużnym. Nazywamy je laserami jednoczęstotliwościowymi.

III. Podstawy holografii

Zasada holografii

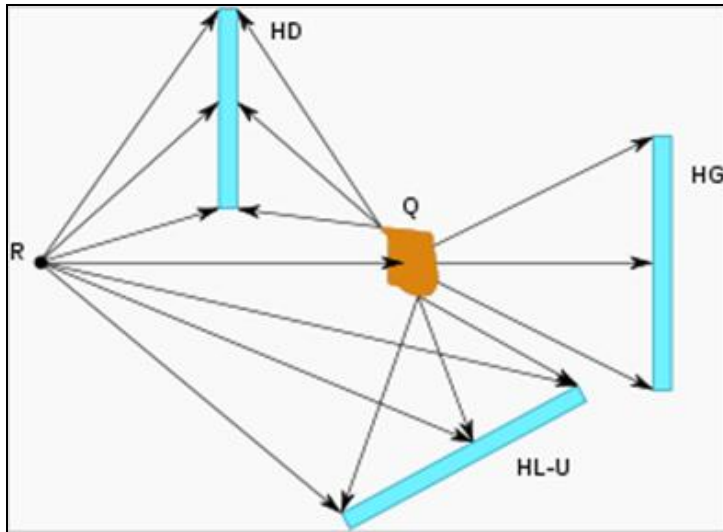
- 1. Holografia** – technika uzyskiwania obrazów przestrzennych (3-wym.) metodą rekonstrukcji frontu falowego światła rozproszonego od obiektu.
- 2. Światło spójne (monochromatyczne)** – konieczne do zapisu hologramu. Światło białe ma ciągłe widmo częstotliwości i zawiera continuum składowych, a wyróżnienie ich frontów falowych nie jest możliwe.
- 3. Interferencja** – metoda zapisu (utrwalenia) amplitudy i fazy światła rozproszonego od obiektu, niezbędnych do odtworzenia frontu falowego.
- 4. Hologram** – uogólniona siatka dyfrakcyjna powstała z zapisu na kliszy fotograficznej (medium światłoczułym) pola interferencyjnego fali rozproszonej od obiektu i fali nie zaburzonej zwanej wiązką referencyjną.
- 5. Rekonstrukcja frontu falowego** - odbywa się przez oświetlenie hologramu światłem identycznym (lub zbliżonym) do wiązki referencyjnej. Obserwator ma możliwość odtworzyć w pełni przestrzenny obraz zapisanej wcześniej scenerii (nic wspólnego z tzw. pseudo stereoskopia).

Holografia a fotografia

– podstawowe różnice

1	<i>Zapis amplitudy i fazy fali</i>	<i>Zapis tylko amplitudy</i>
2	<i>Nie wymaga układów optycznych</i>	<i>Wymagany obiektyw</i>
3	<i>Obraz ostry na całej głębokości</i>	<i>W zakresie głębi ostrości obiektywu</i>
4	<i>Obraz przestrzenny, trójwymiarowy</i>	<i>Obraz płaski, dwuwymiarowy</i>
5	<i>Informacja o obrazie obiektu – zapisana na całym hologramie</i>	<i>Przyporządkowanie punktów obiektu i obrazu</i>
6	<i>Obraz pozytywowowy</i>	<i>Obraz negatywowowy</i>
7	<i>Zapis wymaga światła spójnego</i>	<i>Przeważnie używa się światła białego</i>
8	<i>Obraz zaszyfrowany</i>	<i>Obraz bezpośrednio czytelny</i>
9	<i>Komplikacja aparatury - duża</i>	<i>Komplikacja aparatury - mała</i>
10	<i>Rozdzielczość zapisu informacji pow. 1000linii/mm</i>	<i>Rozdzielczość zapisu informacji ok. 50linii/mm</i>

Zasadnicze układy zapisu (typy) hologramów



Podział wynika z wzajemnego usytuowania źródła, obiektu i płyty holograficznej (rys.)

HG – Układ współosiowy - Gabora (dla ośrodków przeziernych). Mało korzystny ze względu na pokrywanie się wiązek przedmiotowej i odniesienia.

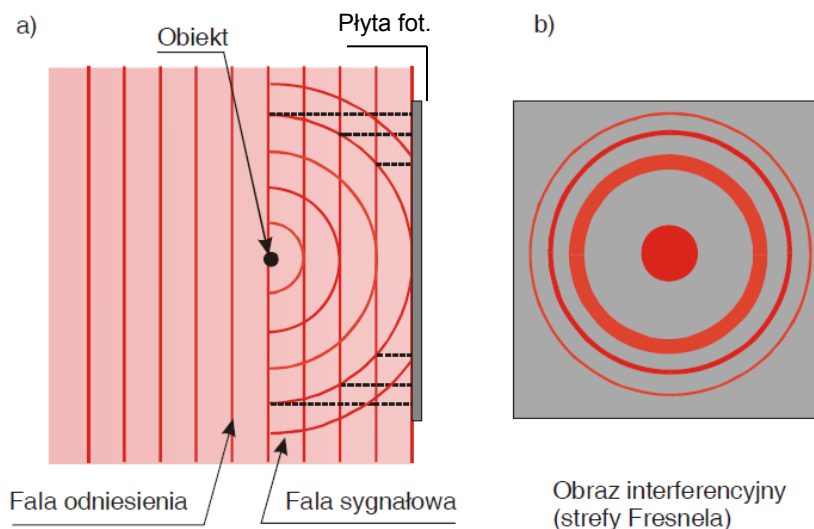
HL-U – Układ z boczną wiązką odniesienia (Leitha-Upatnieksa). Wiązki przedmiotowa i odniesienia padają na płytę pod kątem, stąd przy odtwarzaniu nie pokrywają się.

HD – Układ z wiązkami przeciwbieżnymi (Denisyuka). Dla tak skierowanych wiązek prążki interferencyjne zapisują się w objętości materiału. Emulsja powinna być gruba, a zapisany w ten sposób hologram może być odtwarzany za pomocą światła białego.

Zapis frontu falowego (HG- hologram Gabora)

Holograficzny zapis jednego z punktów z przestrzeni dowolnego obiektu.

Istnienie więcej punktów da obraz bardziej skomplikowany, gdyż zapiszą się one jako ich suma.



Zapis w układzie Gabora (a). Obrazem interferencyjnym (hologramem) punktu są koncentryczne okręgi (b) – strefy Fresnela.

Fala sygnałowa:

$$S(x, y, t) = S(x, y) \exp(i\omega t)$$
$$S(x, y) = a_s(x, y) \exp[i\Phi(x, y)]$$

Fala odniesienia (referencyjna):

$$R(x, y, t) = a_R \exp(i\omega t)$$

Wprowadźmy pojęcie „intensywności”:

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

Oddziaływanie promieniowania z medium światłoczułym

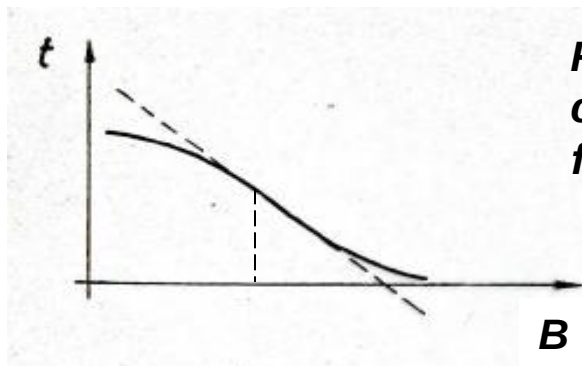
Zaczernienie płyty holograficznej; t_B – czas ekspozycji

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

**Dawka energii
zaczerniająca płytę**

Transmisja płyty; intensywność pola odpowiednia (daleka od nasycenia ośrodka)

$$t = T_0 - bt_B I(x, y) \quad - T_0, b \text{ – stałe zależne od materiału płyty i jej obróbki chemicznej}$$



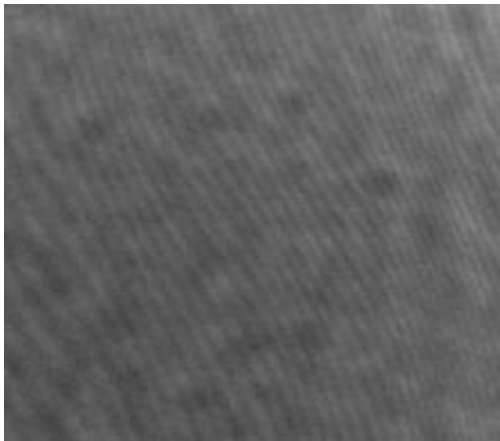
**Rzeczywista i idealizowana (liniowa)
charakterystyka zaczernienia emulsji
fotograficznej płyty. Zakres liniowy**

Zapis frontu falowego na materiale światłoczułym

Na płytę pada pole sygnału S i odniesienia R . Wypadkowa intensywność wynosi:

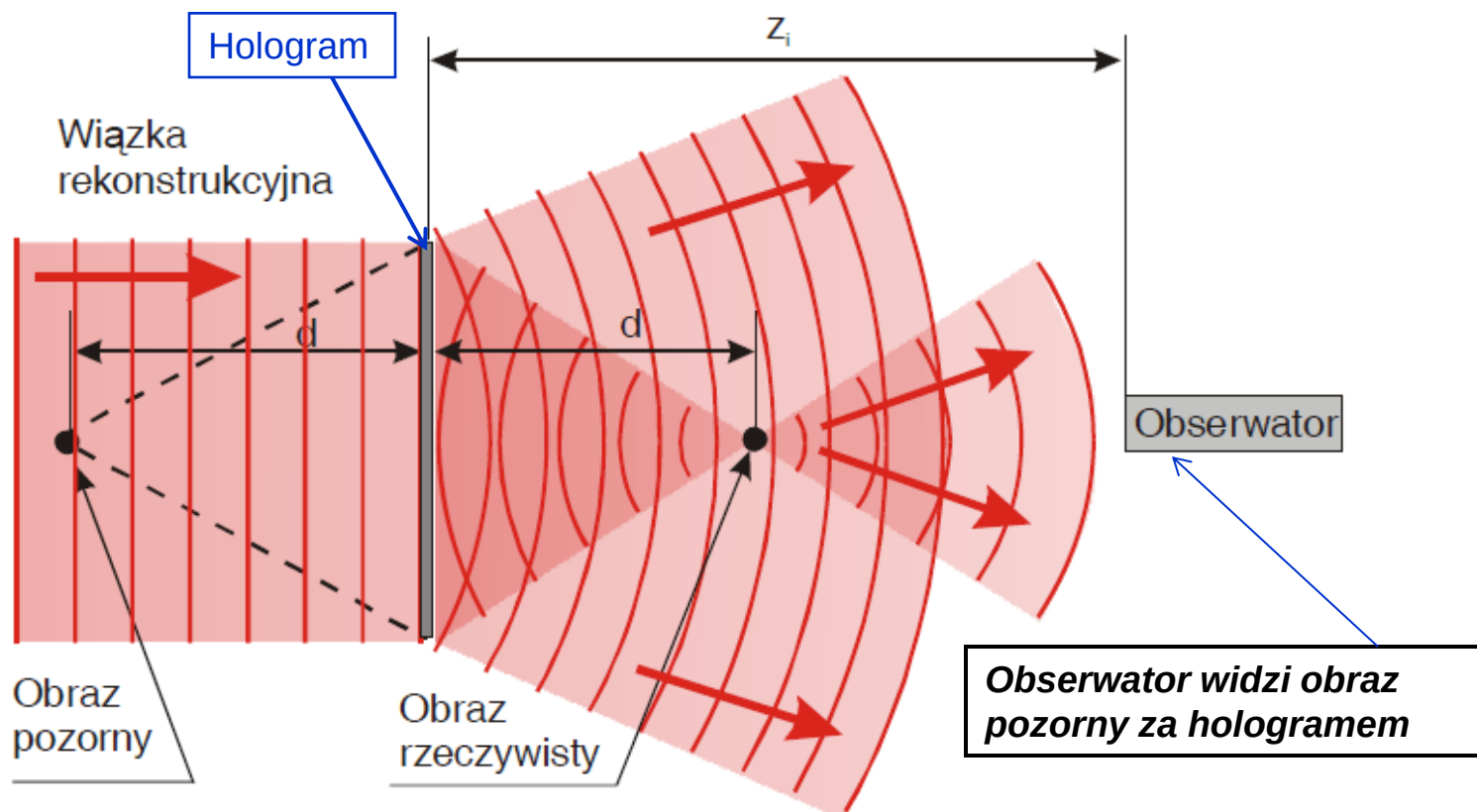
$$I(x, y) = |S + R|^2 = (S + R)(S + R)^* = (SS^* + RR^*) + (R^*S + RS^*)$$

Informacje o obiekcie zawarte są w członach interferencyjnych, a więc członach znajdujących się w drugim nawiasie.



W przypadku bardziej skomplikowanego obiektu, obraz na hologramie niczym nie przypomina obrazu obiektu. Obraz obiektu jest zaszyfrowany w prążkach interferometrycznych i może zostać odtworzony dopiero po oświetleniu hologramu światłem laserowym.

Odtworzenie frontu falowego (obraz graficzny)



Wiązka rekonstrukcyjna pokrywa się z wiązką odniesienia.

Obraz rzeczywisty może być widoczny w środowisku rozpraszającym

Odtwarzanie frontu falowego

Obraz zostanie prawidłowo odtworzony gdy hologram oświetlimy promieniowaniem laserowym odpowiadającym ściśle wiązce referencyjnej.

$$S^o(x, y) \propto R \left[T_0 + bt_B (SS^* + RR^* + R^*S + RS^*) \right]$$

Człony sygnałowe:

$$bt_B R_0^2 S$$

- Człon proporcjonalny do S , obraz **pozorny (ortoskopowy)** powstaje w położeniu obiektu przy zapisie

$$bt_B R_0^2 S^*$$

- Człon reprezentujący obraz **rzeczywisty (pseudoskopowy)**, znajduje się przed hologramem od strony obserwatora.

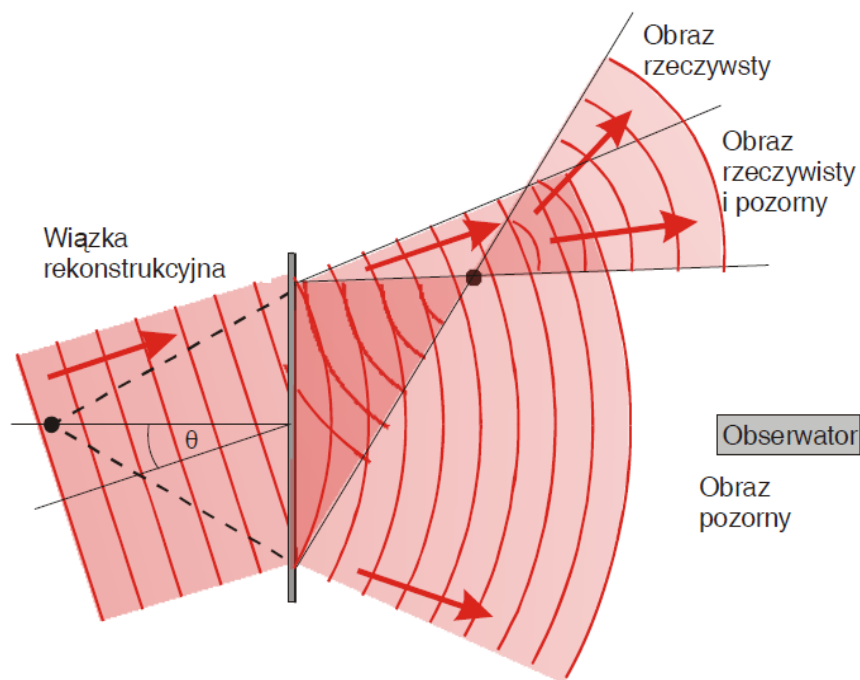
Patrząc przez hologram (rys.) widzimy obraz ortoskopowy, pozorny. Aby uwidocznić obraz rzeczywisty (pseudoskopowy) należy wprowadzić do ośrodka od strony obserwatora czynnik rozpraszający.

IV. Rodzaje hologramów

Hologramy Leitha – Upatnieksa (HL-U)

obiekty przeziernie

Zasadniczą wadą konfiguracji Gabora jest pokrywanie się torów wiązek sygnałowej i rzędu zerowego (odniesienia) przy odtwarzaniu hologramu. Nie ma tej niedogodności konfiguracja **L-U**, w której wiązka odtwarzająca jest nachylona w stosunku do normalnej do hologramu pod pewnym kątem θ .

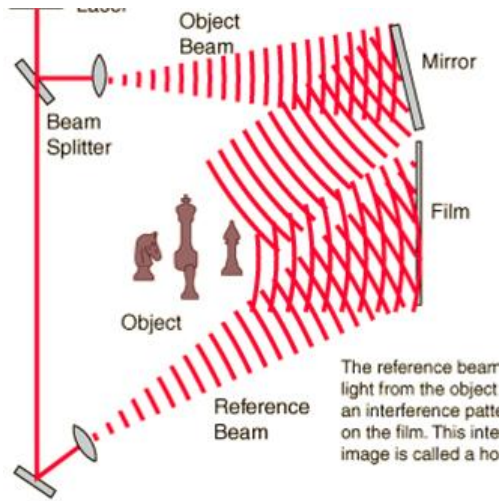


Zapis i odtwarzanie obiektów przeziernych odbywa się w praktycznie identycznych układach.

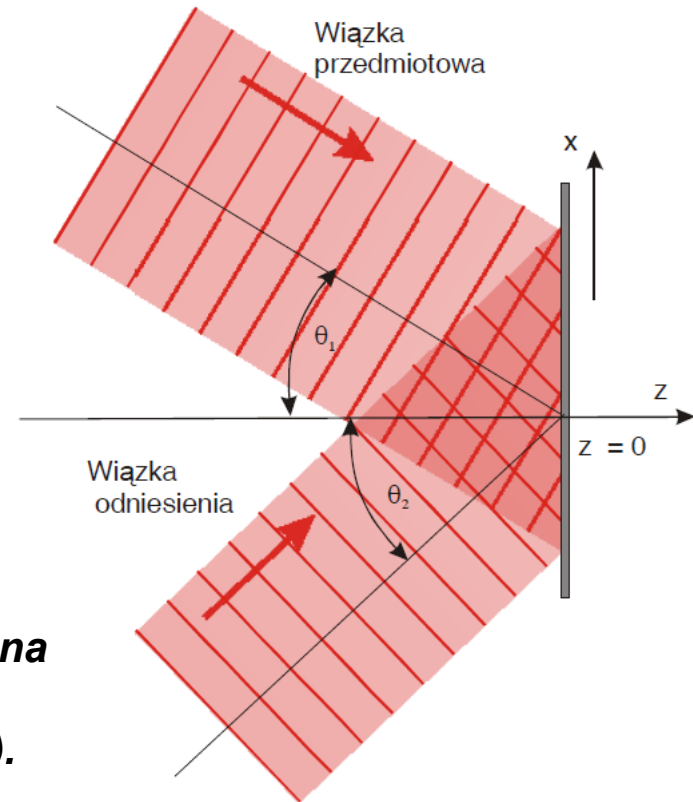
Przy odtwarzaniu obserwacja obrazu pozornego, (ortoskopowego) nie jest zakłócona obecnością innych wiązek.

Hologramy obiektów nieprzeziernych

układ: HL-U - zapis

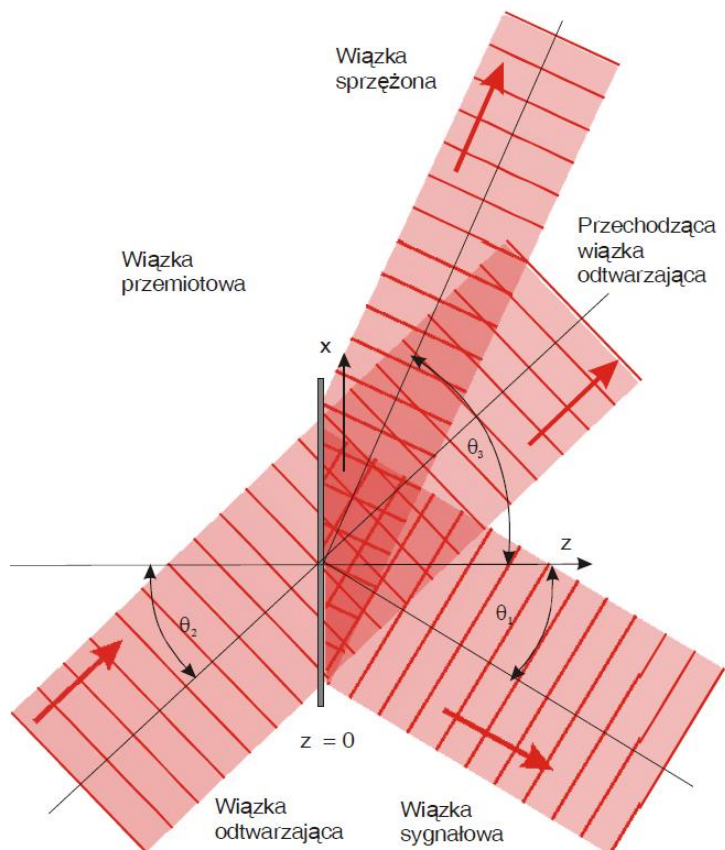


Wiązki: rozproszona od obiektu (przedmiotowa) i odniesienia padają na płytę holograficzną pod stosunkowo dużymi kątami (gęsty układ prążków).



Hologramy obiektów nieprzeziernych

układ HL-U - odtwarzanie



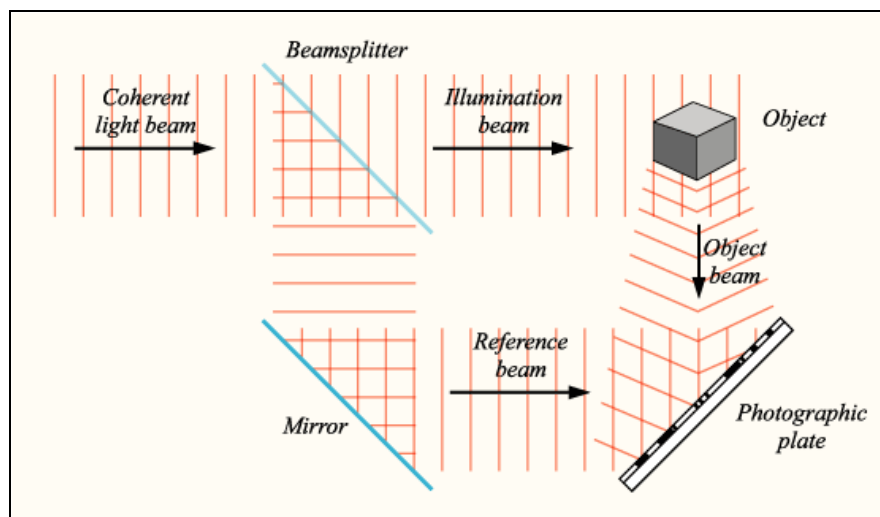
Wiązka odtwarzająca powinna w przybliżeniu być usytuowana tak, jak zapisująca wiązka referencyjna.

Zasadą jest takie usytuowanie elementów zestawu, by wiązka sygnałowa (niosąca obraz pozorny – ortodoksyjny) nie była zakłócana wiązką zerowego rzędu oraz wiązką niosącą obraz sprzężony (rzeczywisty).

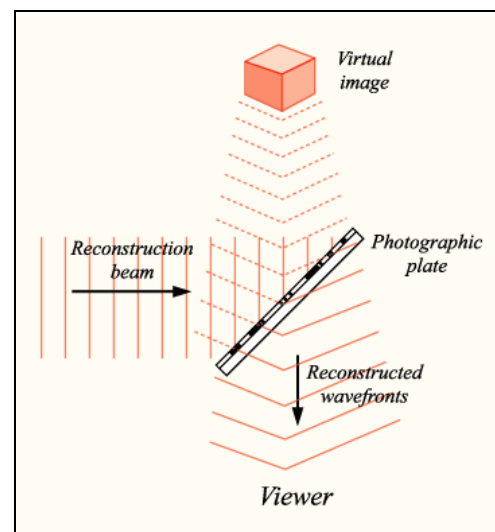
Hologramy obiektów nieprzeziernych

układy HL-U – przykład 1.

Zapis

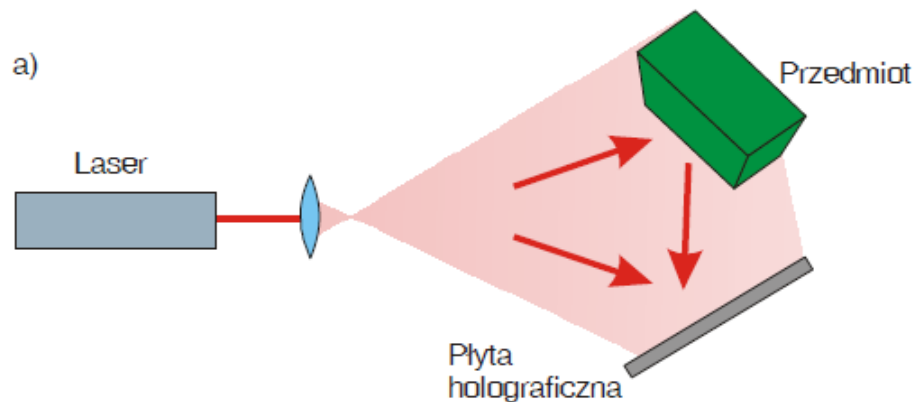


Odtwarzanie

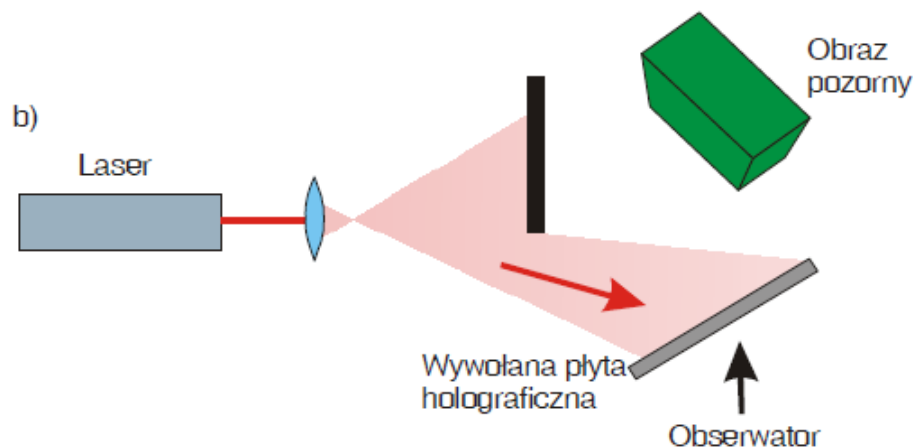


Hologramy obiektów nieprzeziernych

układy H L-U – przykład 2.



Zapis

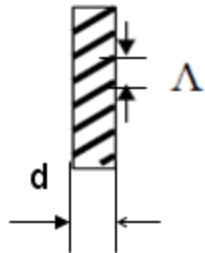


Odtwarzanie

Hologramy odbiciowe – układ HD (zasada)

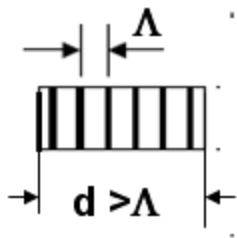
Cecha podstawowa: możliwość odtwarzania w świetle białym

Realizacja hologramów odbiciowych wiąże się z użyciem grubowarstwowych materiałów światłoczułych (grubość warstwy $\gg$ długości fali)



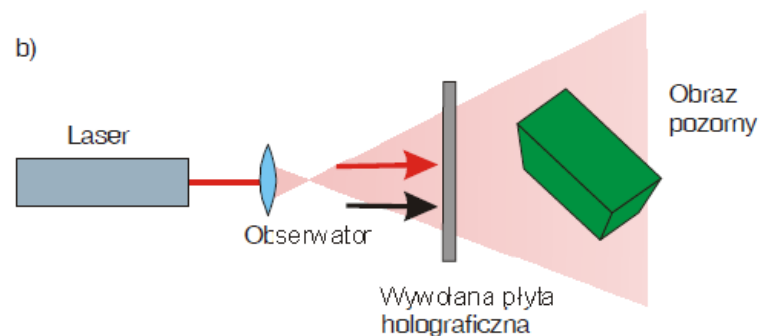
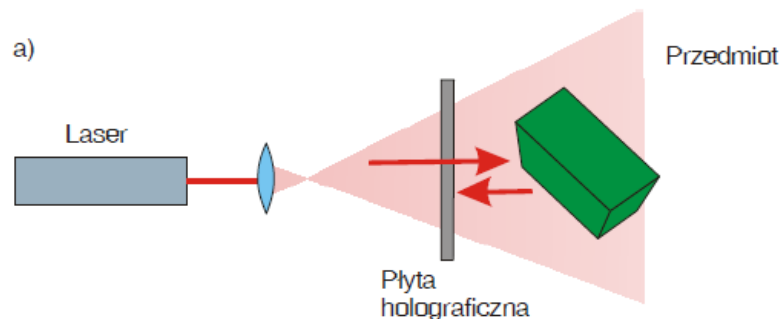
Materiały cienkowarstwowe – średni odstęp zapisu prążków interferencyjnych jest większy od grubości warstwy.

Stosowane są w typowych układach **HL-U**, w których wiązki sygnałowa i rząd zerowy przy odtwarzaniu transmitują się przez hologram.

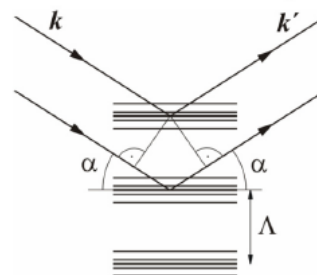
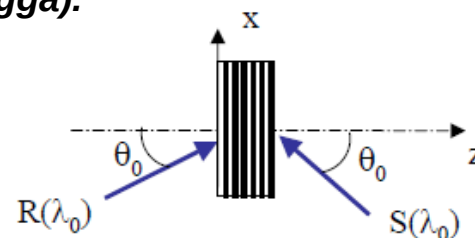


Materiały grubowarstwowe - odstęp zapisu prążków interferencyjnych jest wielokrotnie mniejszy od grubości warstwy ($d \gg \Lambda \sim \lambda/2$). Zapisany tak hologram stanowi filtr odbiciowy. Obraz widoczny w skolimowanej wiązce światła białego.

Hologramy odbiciowe – *układ HD (realizacja)*



**Zapis wiązkami przeciwbieżnymi.
Prążki równoległe do powierzchni,
ułożone w objętości materiału (siatka
Bragga).**



**Wiązka odtwarzająca
odbija się dając jasny
obraz pozorny. Obraz
sprzężony nie występuje.**

Hologramy odbiciowe – **układ HD (własności)**

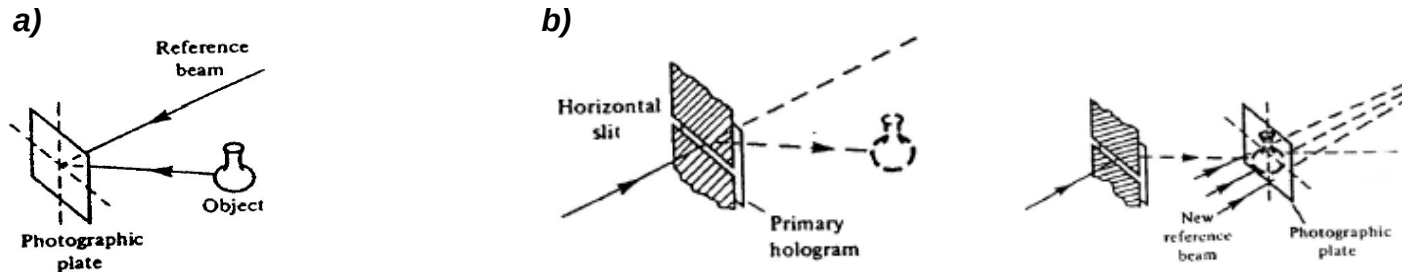
*Hologramy odbiciowe zaproponował w 1962 r. Y. Denisyuk.
Charakterystyczną ich własnością jest możliwość odtwarzania
w świetle białym (dobrze skolimowaną wiązką np. słońce).*

*Hologram odbiciowy HD stanowi filtr Bragga odbijający
promieniowanie o długości fali równej długości fali przy pomocy
której zapisane zostały prążki interferencyjne. Pozostałe długości
fali (przy odtwarzaniu światłem białym) są transmitowane i
rozpraszane. Ponieważ warstwa materiału światłoczułego jest
obrabiana na mokro (wywoływanie, utrwalanie itp.), kolor
odtworzonego obiektu przeważnie różni się istotnie od barwy
światła zapisującego hologram.*

Hologramy tęczowe (zasada)

(zaproponowane w 1968 r przez S. Bentona)

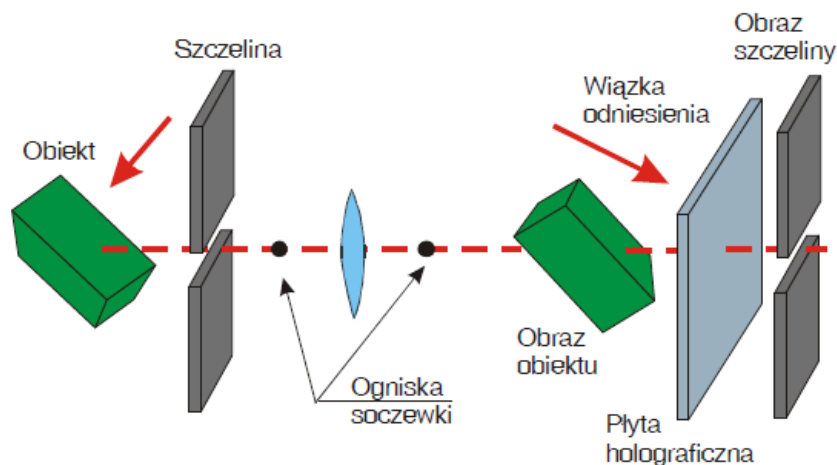
Należą do hologramów odbiciowych, odtwarzanych w świetle białym.



Procedura zapisu może być podwójna lub pojedyncza:

1) – W pierwszym przypadku najpierw tworzy się normalny hologram obiektu (HL-U) (rys. a), a następnie jego obraz odtworzony przez wąską szczelinę (pozbawiony paralaksy pionowej) zapisuje się płycie fotograficznej ustawionej w blisko miejsca odtworzenia obiektu stosując lekko zbieżną wiązkę odniesienia, koherentną z wiązką odtwarzającą hologram pierwotny (rys. b).

Hologramy tęczowe - 2



W przedstawionym układzie zachowano wszystkie funkcje układu z podwójną ekspozycją. Obraz obiektu widziany przez wąską szczelinę, przeniesiony w pobliże płyty światłoczułej interferuje z wiązką odniesienia zapisując hologram tęczowy.

Nazwa „tęczowy” pochodzi od zmian barwy obrazu przy zmianie kąta obserwacji (odtworzenie światłem białym).

Hologramy tęczowe umieszczane są na zabezpieczanych przed fałszowaniem dokumentach (banknotach, kartach kredytowych itp.)

V. Przestrzenność widzenia

Miraże i rzeczywistość

Holografia zrodziła marzenia o trójwymiarowych obrazach w telewizji i kinie

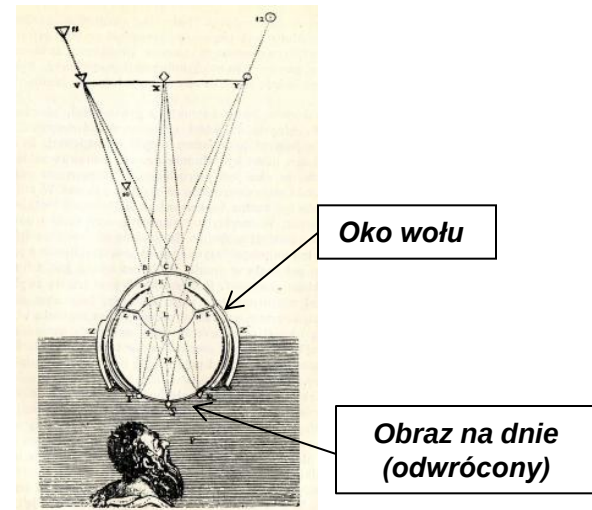
Do oceny takich dążeń trzeba znać zasady trójwymiarowego widzenia, poznać ułomność naszych zmysłów i wiedzieć jak widzimy przestrzeń.



**Johannes Kepler
(1571-1630)**

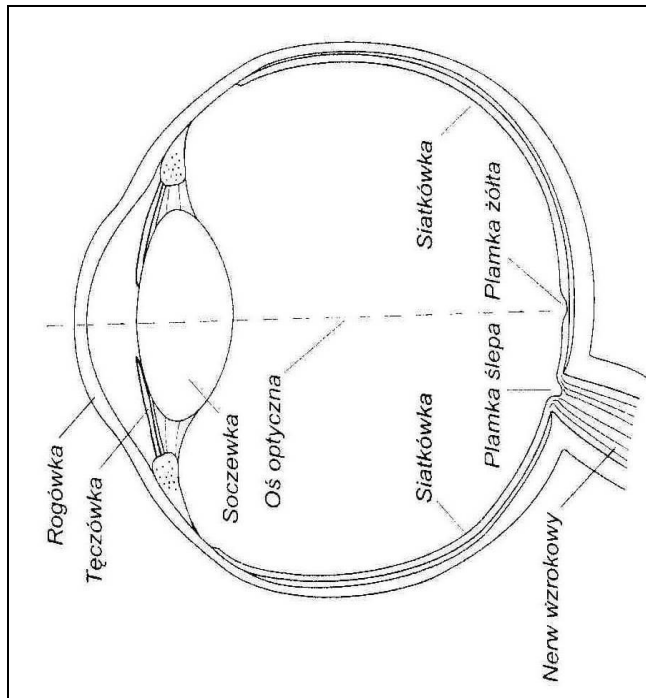


**Rene Descartes –
Kartezjusz (1596-1650)**



**J. Kepler jako pierwszy w 1604 porównał oko do „kamery”.
Kartezjusz udowodnił (wykazał) ten fakt doświadczalnie.**

Budowa oka a przestrzenność widzenia



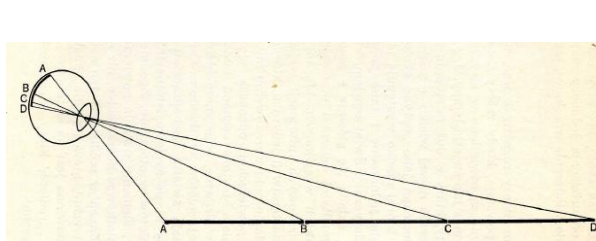
Oko budową przypomina aparat fotograficzny. **Układ optyczny** złożony z **rogówki i soczewki** rzutuje otaczającą nas, oświetloną światłem widzialnym scenerię, na siatkówkę spełniającą rolę warstwy światłoczułej. Scenerię powyższą obserwujemy przez 2 - 3 mm otwór - źrenicę.

Na siatkówkę rzutowany jest więc obraz dwuwymiarowy - płaski.

Czynniki decydujące o przestrzennym widzeniu

Przestrzeń odczuwamy (widzimy) na tyle, na ile pozwala nam fizjologia widzenia

1. Perspektywa – przedmioty dalsze widzimy jako mniejsze



2. Paralaksa pozioma - widzenie dwuoczne – każde oko w poziomie widzi przedmiot pod nieco innym kątem. Obraz złożony z nich jest przestrzenny.

3. Brak paralaksy w pionie. Nie mamy wrażenia widzenia przestrzennego w pionie i w zasadzie nie odczuwamy dyskomfortu z tego powodu.

Wniosek.

Obraz, który widzimy jest bardziej produktem obróbki informacji przez nasz ośrodek centralny – mózg, niż odzwierciedleniem obrazu przestrzennego obiektu.

Obraz holograficzny **jest rzeczywiście trójwymiarowy**

(Pierwsze, niedoskonałe próby w IOE WE WAT zapisów holograficznych postaci żywych)

Obiekty na hologramie są oddalone od siebie o ok. 2 m

Ostrość ustawiona na postać pierwszą



Ostrość ustawiona na postać drugą



Aparatem fotograficznym nie można jednocześnie wykonać ostrego zdjęcia obu postaciom – mamy do czynienia z obrazem holograficznym jako obiektem przestrzennym

Przestrzenne obrazy w telewizji i w kinie (marzenia i rzeczywistość)

„Z punktu widzenia fizyki, prawie wszystko jest możliwe”

Michio Kaku: „Fizyka rzeczy niemożliwych”

Problemy rozwiązywalne: hologramy odtwarzane w świetle białym, lub w trzech kolorach

Przeszkoda: Pasmo częstotliwości wymagane do przesyłania hologramu jest $\sim 10^{11}$ Hz, a pasmo kanału TV ma tylko 8,4 MHz – jest o 4 - rzędy za małe.

Rozwiązania: 1. Budowa nowej sieci łączy telewizyjnych w pasmie optycznym (?)
2. Sztuczne zawężenie pasma obrazów holograficznych
- przesyłanie **sub-hologramów** fragmentów zmiennych w czasie;
- przesyłanie **małych fragmentów** składanych następnie w obraz;

Rzeczywistość: **Rezygnacja z holo-telewizji.** Dotychczasowe metody wystarczą. **Holo-TV**, oprócz komplikacji aparatury, nie wniesie lepszego komfortu widzenia.

VI. Holografia obiektów ruchomych

Lasery impulsowe (jednoczęstotliwościowe)

W klasycznej fotografii dla zapisu obiektów w ruchu musimy:

1. Skrócić odpowiednio czas ekspozycji;
2. Zapewnić wystarczające oświetlenie scenerii.

Konsekwencją zbyt długiego czasu ekspozycji jest **nieostry obraz**.

W holografii wymagania te są znacznie bardziej rygorystyczne:

1. W czasie ekspozycji obiekt nie powinien przemieścić się o $\sim 0,2\lambda$
2. Wystarczające oświetlenie musi zapewnić **laser impulsowy**.

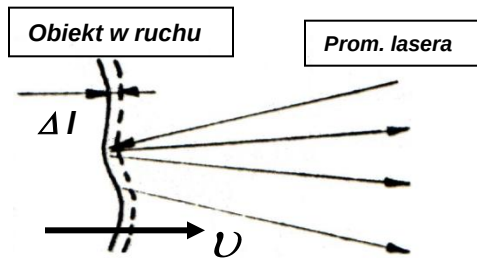
Konsekwencją zbyt długiego czasu ekspozycji jest **brak obrazu**.

Obraz holograficzny jest zawsze ostry.

Warunkiem koniecznym do holografowania obiektów ruchomych jest posiadanie jednoczęstotliwościowych laserów impulsowych.

Zasady holografii impulsowej

Zasadniczy problem holografii: *stabilność zestawu zapewniająca widzialność prążków interferencyjnych nie gorszą niż: $V \geq 0,707$.* Wymaganie powyższe nakłada ograniczenia na dopuszczalne przemieszczenia się elementów zestawu holograficznego względem siebie w trakcie trwania jego zapisu $\Delta l \leq 0,2\lambda$.



H

$$\Delta \varphi_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l_{\max} \leq \varepsilon \pi$$

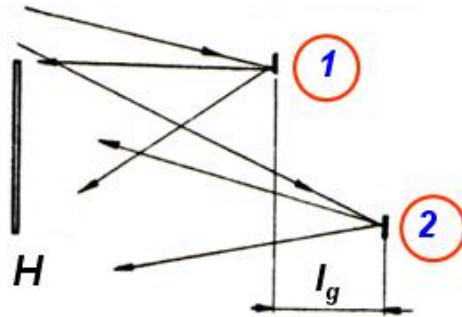
$$\varepsilon \approx 0,2 \div 0,8$$

Przedmiot w ruchu: $\Delta l \approx v \tau_i$;
gdzie: τ_i - czas trwania impulsu

$$v_{\max} \leq \frac{0,2\lambda}{\tau_i}$$

τ_i [ns]	---	100	50	10	1	0.1
690 [nm]	v [m/s]	3,04	6,07	30,4	303,6	3036
530 [nm]	v [m/s]	2,33	4,66	23,3	233,2	2332

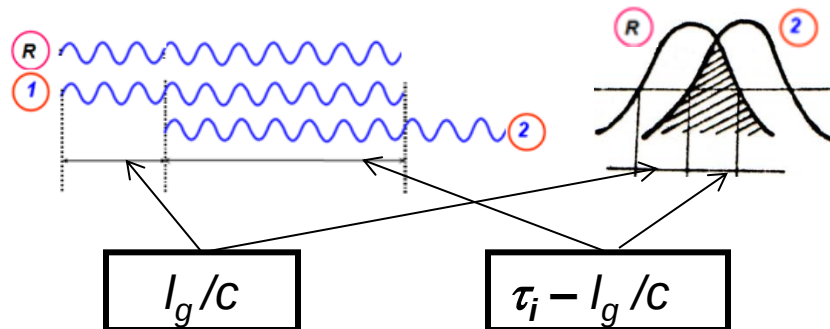
Ograniczenie głębokości sceny – (1)



Głębokość sceny przedstawmy jako dwa elementy oddalone od siebie o: l_g

1. - początek sceny; 2. – koniec sceny

Impuls referencyjny zsynchronizowany z 1.



Zapis hologramu odbywa się w czasie trwania impulsu referencyjnego. Przedmioty planu dalszego 2. dają sygnał opóźniony o l_g/c . Głębokość sceny wyznacza czas trwania impulsu.

$$l_{g \max} \leq \tau_i c$$

Ograniczenie głębokości sceny – (2)

Holografia impulsowa wprowadza **dwa ograniczenia** na **głębokość sceny**:

1. **czas ekspozycji** wyznaczony przez czas trwania impulsu;
2. **czas spójności** gdy ten jest krótszy od czasu trwania impulsu.

W takim przypadku głębokość sceny dana jest w przybliżeniu

$$l_{g \max} \leq \tau_s \cdot C \leq l_s$$

gdzie: l_s - droga spójności promieniowania laserowego

Maksymalne głębokości sceny wyznaczone przez czas ekspozycji dla różnych czasów trwania impulsów podaje tabela . Mogą być one zmniejszone przez ograniczony czas koherencji.

$\tau_i [ns]$	100	50	20	10	1	0,1
$l_g [m]$	30	15	6	3	0,3	0,03

Pierwszy hologram impulsowy – 1967 Larry Siebert (Conductron Corporation)

Holografia obiektów dynamicznie zmiennych

(zdjęcie z hologramu wykonanego holokamerą HS-1P)

Oprac. IOE WAT – 1978 r.



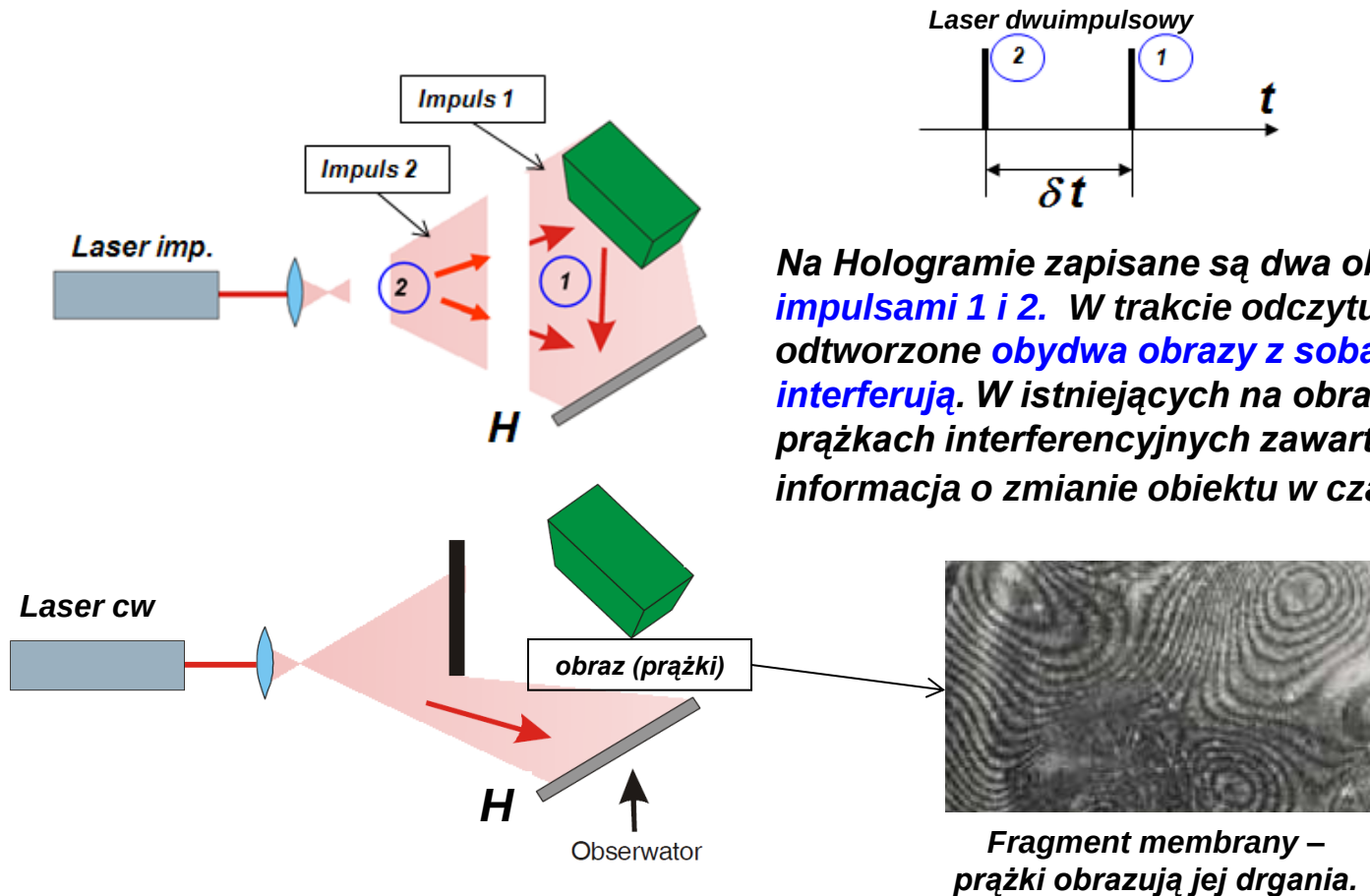
Portret w 3-wymiarach: - hołd pamięci płk dr inż. W. Bobaka

VI. Wybrane zastosowania holografii
Interferometria holograficzna

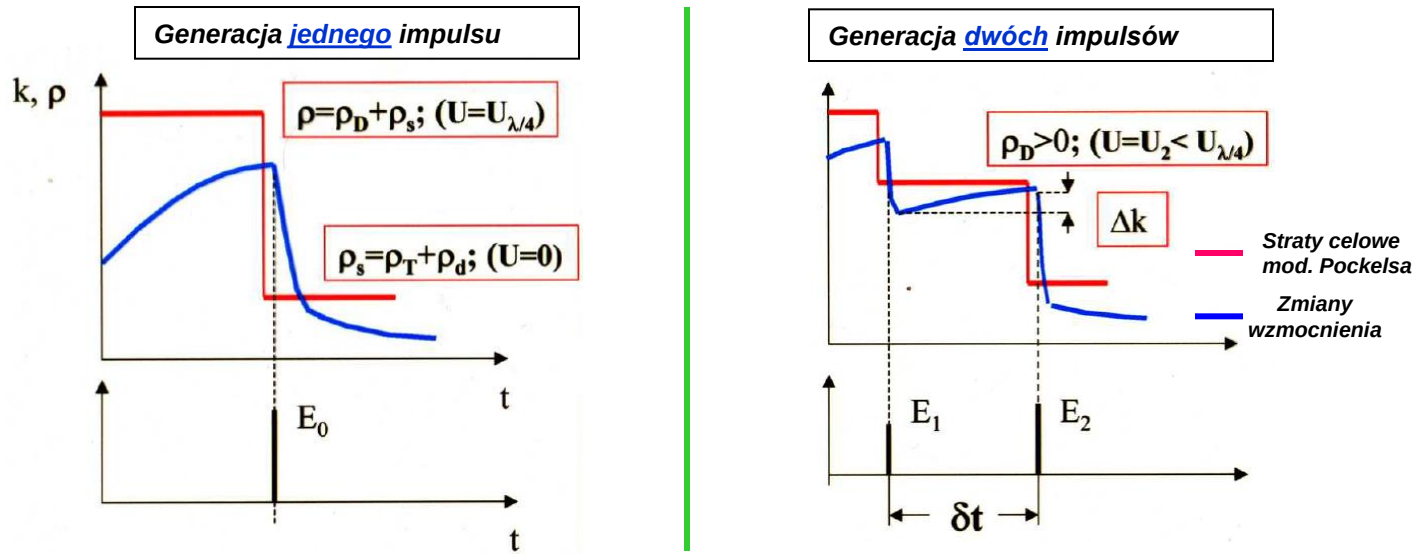
Interferometria holograficzna

Interferometria holograficzna – technika pomiarowa polegająca na porównywaniu dwóch (rzadko więcej) obrazów holograficznych metodą ich interferencji w trakcie odtwarzania. Wykonujemy kolejno dwa hologramy obiektu w dwu różnych czasach: t_1 i t_2 . Jeżeli obrazy nie różnią się (są identyczne) widzimy je jak obraz pojedynczy. Różnice kształtu, (deformacje) powierzchni widzimy jako prążki interferencyjne na obrazie obiektu. Położenie prążków (ich gęstość i kształt) świadczą o przemieszczeniu obrazów między sobą. Analiza pola prążkowego pozwala wyznaczyć wartości przemieszczeń punktów powierzchni obiektu w czasie pomiędzy t_2 i t_1 .

Zasada interferometrii holograficznej (dwuimpulsowej)



Zasada generacji dwóch impulsów stopniowe wyłączania strat rezonatora



Subtelna lecz **zasadnicza** różnica w generacji „jednego” i „dwóch” impulsów

$$\rho_s = \begin{cases} \rho_d \\ \rho_T \end{cases}$$

Straty celowe ρ_D mogą mieć charakter **rozproszeniowy** lub **użyteczny**

Problem: **nie ważny** przy $\rightarrow E_0$; **istotny** $\rightarrow (E_1 + E_2)$.

[9] Z. Jankiewicz: „Generation of a train of laser pulses by partially switching off resonator losses”, Sov. J. Quantum Electron., vol. 12(7), 1982, p. 847

Podstawowe zastosowania holografii

1. Interferometria holograficzna - dwuimpulsowa

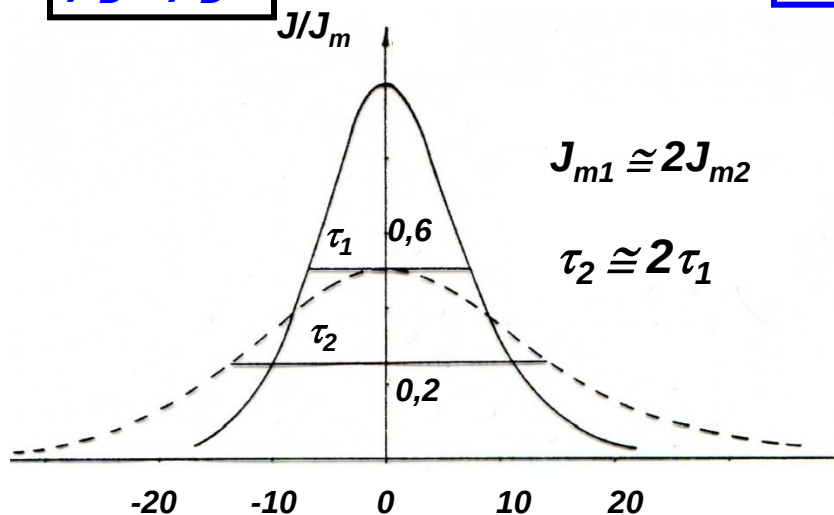


Portret w 4-wymiarach – zasadnicza trudność: jak z układu prążków określić ruch – przemieszczenia fragmentów powierzchni obiektów.

Problemy generacji impulsów podwójnych

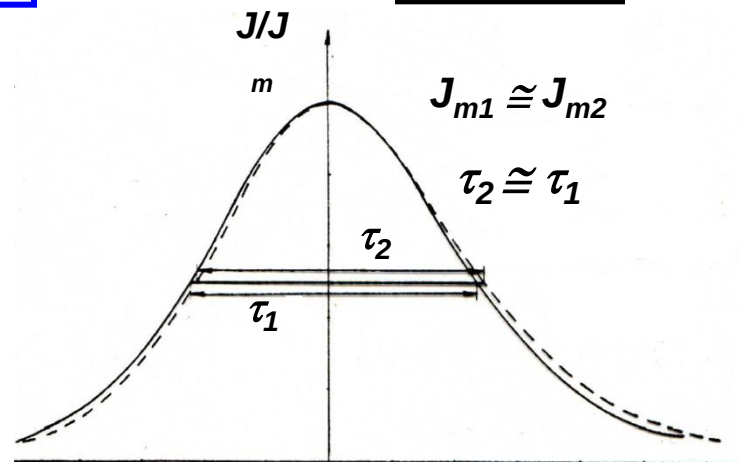
Relacje pomiędzy kolejnymi impulsami (E) lub (Im) oraz wydajność energetyczna generacji impulsów podwójnych zależą od kwalifikacji strat dodatkowych: „ ρ_D^T ” lub „ ρ_D^d ” – wyniki są zasadniczo różne

$$\rho_D = \rho_D^d$$



$$\eta = \frac{E_1 + E_2}{E_0} \simeq e^{-1} \simeq 0,57$$

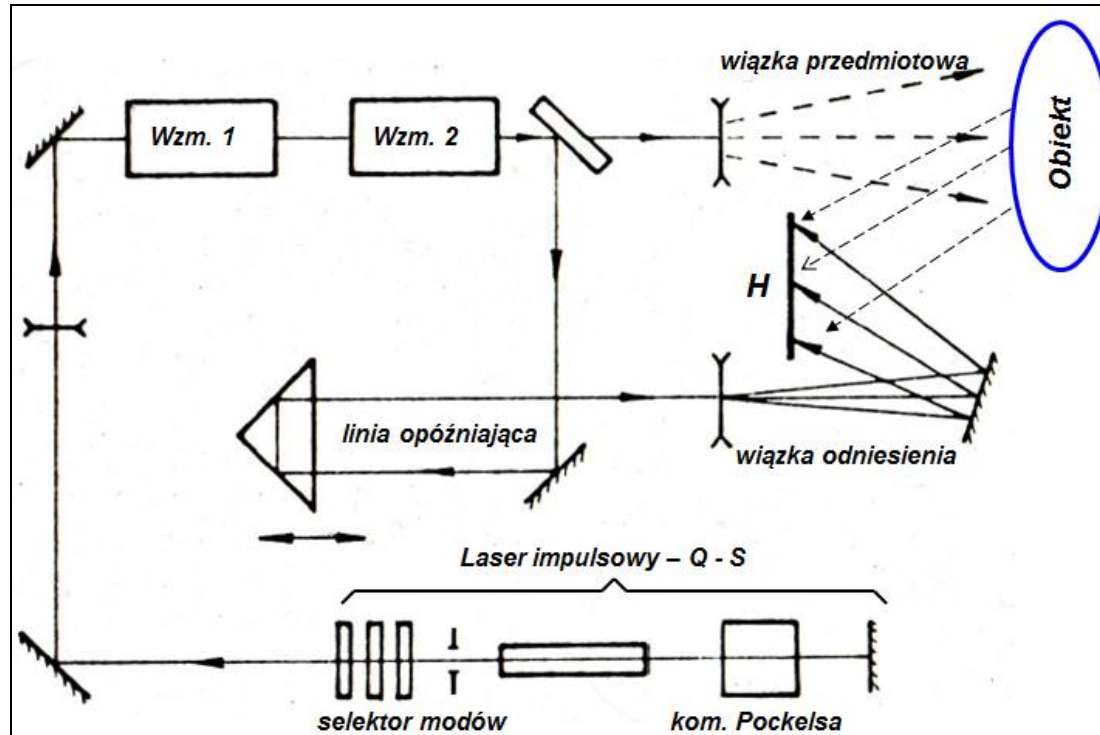
$$E_1 = E_2$$



Impulsy prawie
identyczne

$$\eta = \frac{E_1 + E_2}{E_0} = 1$$

Schemat funkcjonalny holokamery HL-1P

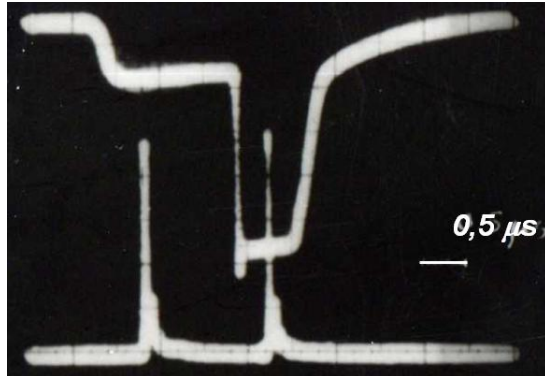


Schemat wyjaśnia istotę działania:

1. Laser impulsowy Q – S z modulatorem Pockelsa;
2. Jednoczęstotliwość zapewnia płytkowy selektor modów;
3. Wzmacniacze - Intensywność wystarczającą do oświetlenia powierzchni $\sim (2 - 3) \text{ m}^2$
4. Linia opóźniająca – ten sam czas padania na hologram wiązek przedmiotowej i odniesienia.

Zbudowana w ramach Programu 06.12. holokamera (koniec lat 70 – tych) była jedną z nielicznych wówczas wykorzystywanych (Rotenkolber).

Podstawowe parametry holokamery HL-1P



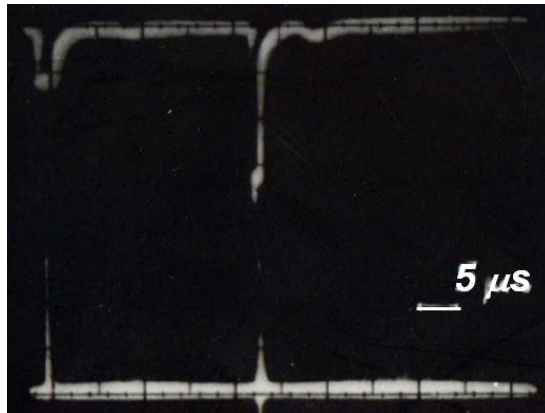
Energia: do 0,5 J w każdym z imp.;

Odstęp pomiędzy imp.: $\delta t \geq 1 \mu s$;

Droga spójności: $l_{gs} \leq 2 \text{ m}$;

Czas trwania imp.: $\sim (30 \div 50) \text{ ns}$;

Proporcje między imp.: $E_1 \cong E_2$

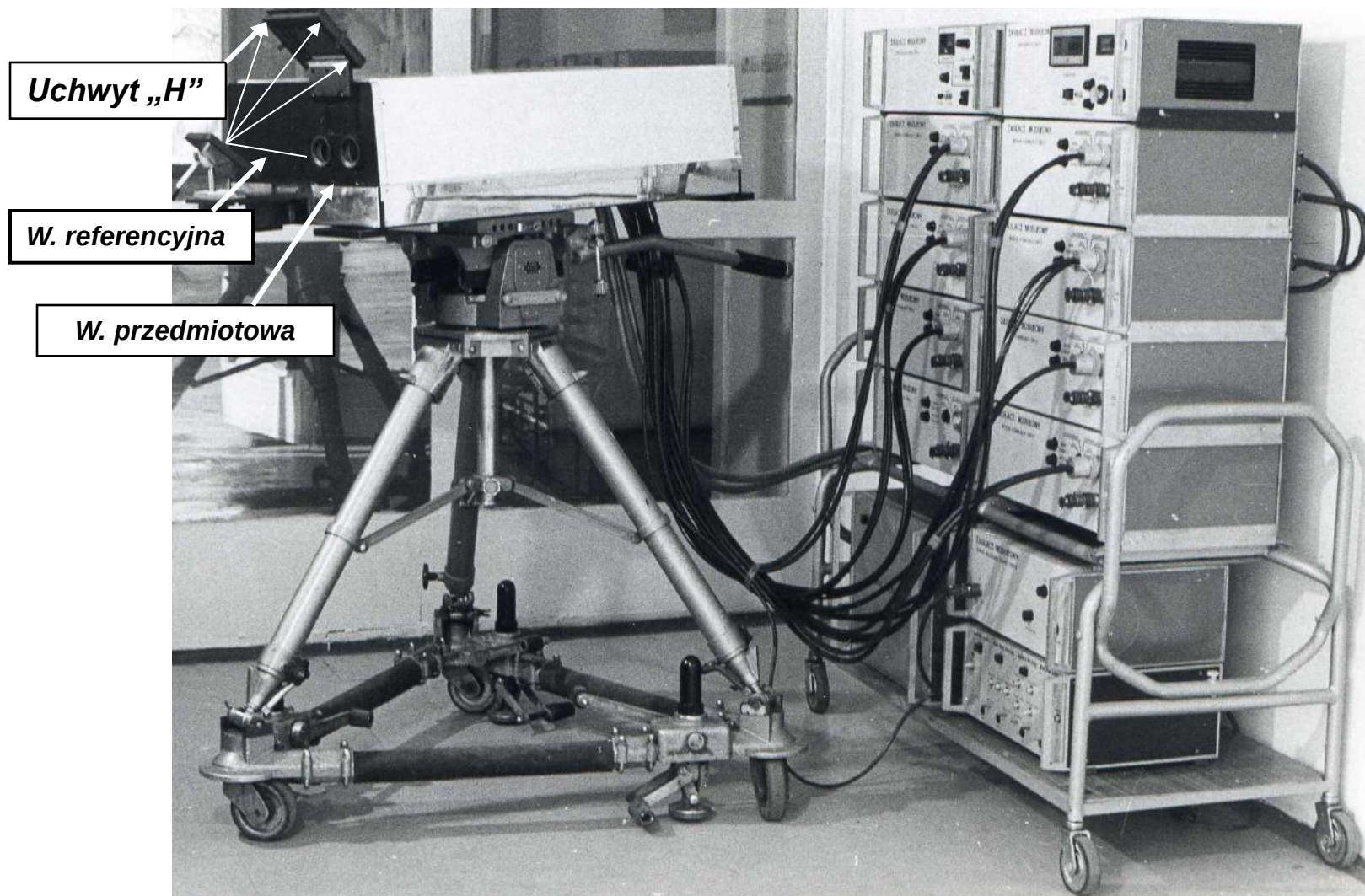


Zdzisław Jankiewicz

GENERACJA
SERII IMPULSÓW LASEROWYCH
METODĄ
STOPNIOWEGO WYŁĄCZANIA
STRAT REZONATORA

[10] Z. Jankiewicz: „Generacja serii impulsów laserowych metodą stopniowego wyłączania strat rezonatora” Rozprawa habilitacyjna
- Dodatek do Biuletynu WAT Nr 8 (336), Warszawa 1980

Holokamera HL-1P (wersja przewoźna)



Przeznaczenie Holokamer

Interferometria holograficzna (dwu impulsowa i inne) jest powszechnie wykorzystywana do badania deformacji powierzchni obiektów w celu:

1. Badania dynamiki ruchu obiektu – **tworzenie map przemieszczeń** powierzchni;
2. Wykrywania **miejsc spiętrzeń naprężeń** przy zadanych wymuszeniach;
3. Wykrywania **ukrytych wad** materiałowych, pęknięć, wtrąceń, pęcherzy itp.;
4. Porównania **kształtu obiektów z wzorcami** w postaci holograficznej;
5. Monitoringu **odkształceń konstrukcji grożących** katastroficznymi **wypadkami**.

Metody powyższe są powszechnie stosowane i trudno obecnie sobie wyobrazić rezygnację z nich. Nie mogą być one jednocześnie stosowane bez laserów.

W WAT wykonano dwie wersje: przewoźna – IOE WE WAT;
stacjonarna – CLO (INOS).

Możliwości holokamery HL -1P (1)

Rozmiary holografowanej sceny



Holografowana scena obejmuje twarze pięciu osób i gazetę.

Możliwości holokamery HL -1P (2)

Zmienność rejestrowanych procesów



Zarejestrowane drgania sklejki podczas wiercenia w niej otworu

Możliwości holokamery HL -1P (3)

Zmienność rejestrowanych procesów



Zarejestrowany (utrwalona) strumień przelewanej wody

Pamięci holograficzne

Pamięci zbiorów informacji (o dużej pojemności) można rozumieć dwojako:

1. Gromadzenie (udostępnianie) kopii dokumentów zamiast ich oryginałów;
2. Zapis, przesyłanie i odtwarzanie powszechnej informacji – muzyki, filmów.

Pomysł wykorzystania holografii do gromadzenia dokumentów (1), z jej cennej własności – w każdym fragmencie hologramu zapisany jest cały obraz.

Lata 60 -70 : „fiszki”- rozmiar $\sim 1\text{cm}^2$; hologram rozmiar $\sim 1\text{mm}^2$ – zysk oczywisty *)

Równolegle rozwój technik zapisu , transmisji i odtworzenia dźwięku i obrazu.

Analogowy: mechaniczny $\rightarrow$ magnetyczny

Cyfrowy: dyski (CD) – konieczność zastosowania laserów

*) Tematyka podjęta w IOE WE WAT w początkach lat 80. – dysertacja dr inż. Wiesława Bobaka „Analiza holograficznych metod zapisu i odczytu dokumentów piśmienniczych” – 1981. Tematyka zaniechana na skutek szybkich postępów laserowego zapisu informacji na dyskach.

2. Pamięci holograficzne

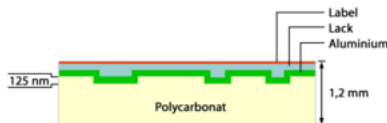
A. Laserowy (bitowy) zapis i odczyt informacji

Laserowy zapis i odczyt informacji zademonstrowany był (Philips & Sony) w 1978; w sprzedaży rynkowej od 1982 – w wielu wersjach ROM i Audio.



CD – odczyt
CD-R – zapis x1
CD-RW – zapis x1k

700 MB
Laser 780nm



Zapis jedno lub dwu-
stronny, jedno lub
dwu warstwowy.

(4,7 ÷ 17,08) GB
Laser 650 nm

1995



Możliwy zapis
dwu- stronny i
trójwarstwowy

(15 ÷ 60) GB
Laser 405 nm

2005

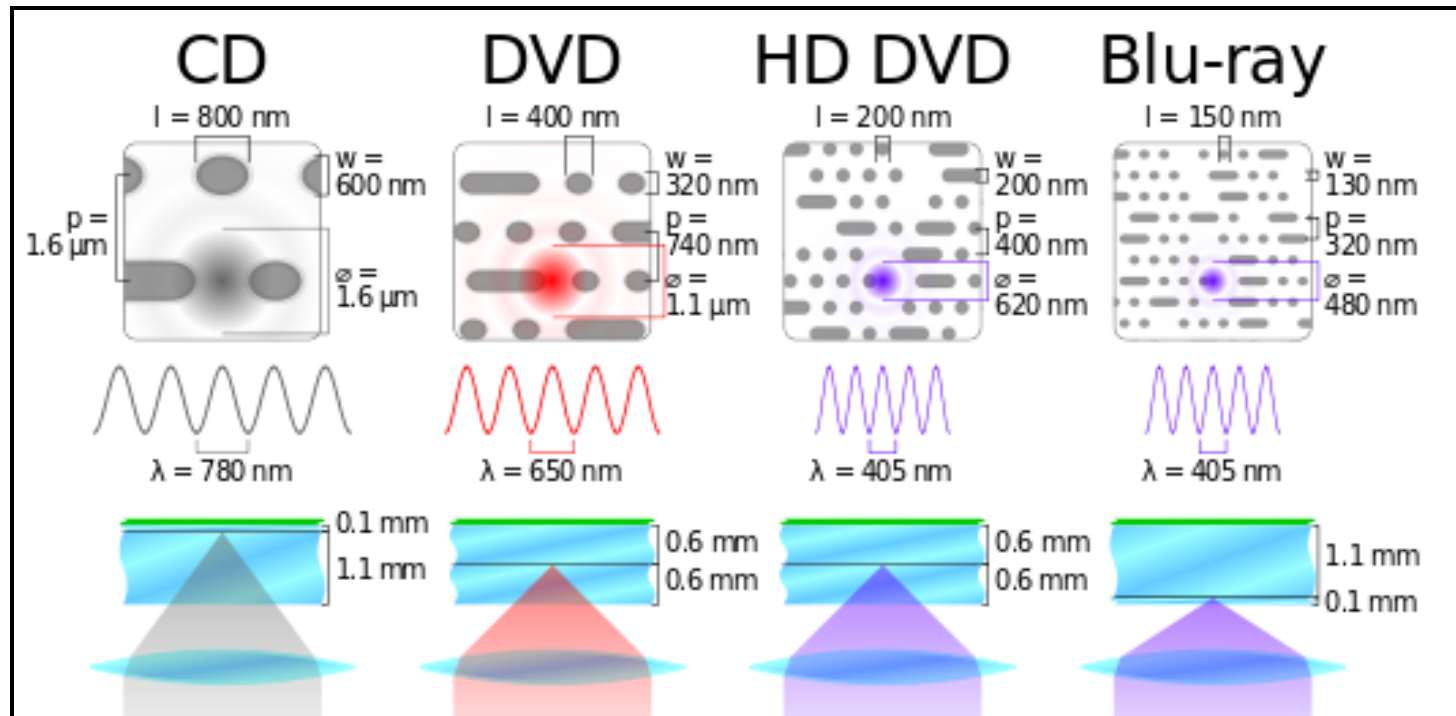


(25 ÷ 200) GB
Laser 405 nm

2005

Liczby podkreślone - wartości możliwe teoretycznie

Porównanie systemów laserowego zapisu i odczytu informacji

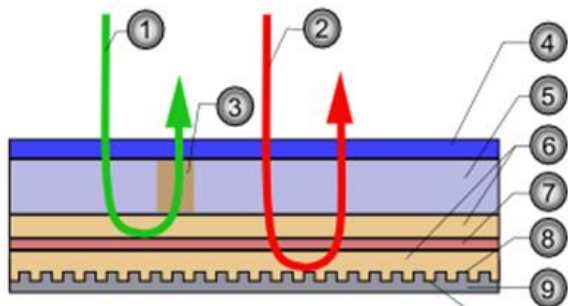


B. Holograficzny zapis i odczyt informacji

1963 – Idea holograficznego zapisu i odczytu informacji;
2004 – **Optware** przedstawia nośniki i głowicę zapis - odczyt

Nośniki: 1. m. fotorefrakcyjny - kryształ niobianu litu (jony Fe);
2. polimery – zapis termiczny, pamięci trwałe – odczyt.

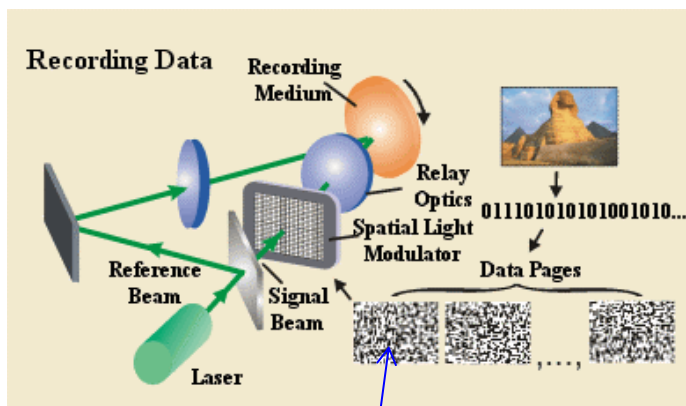
HVD – (Holographic Versatile Disc) - „Optware” $\lambda_o=532\text{nm}$, $\lambda_a=650\text{nm}$, do 3,9TB



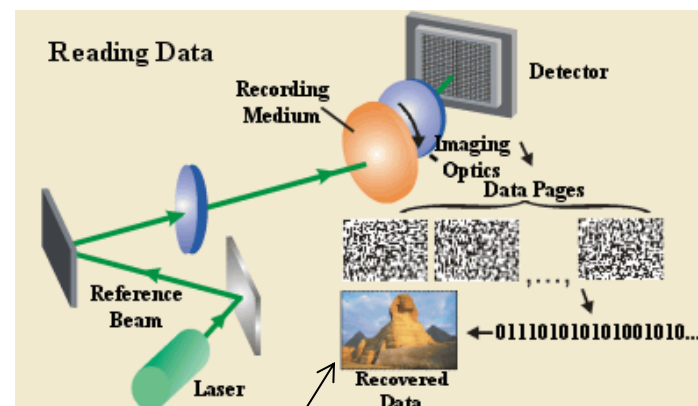
1. Laser odczytowy;
2. Laser adresowy;
3. Obszar zapisu informacji (hologram);
4. Warstwa poliwęglowa (zabezpieczająca);
5. Warstwa informacyjna np. fotopolimer;
6. Warstwy dystansujące;
7. Warstwa dichroiczna (odbicie $\lambda_o = 532 \text{ nm}$);
8. Podłoże z rastrem adresowym.

Zasada zapisu i odczytu HVD

Zasada działania oparta o Przestrzenny Modulator Światła:
(**SLM** - **S**patial **L**ight **M**odulator)



Obrazy w postaci cyfrowej modują transmitowane promieniowanie lasera, które z wiązką referencyjną tworzy hologramy na wirującym dysku.



Odtworzoną wiązką referencyjną obraz pada na macierz detektorów odczytywany w postaci cyfrowej i przetwarzany na obraz widzialny

TEZA: „Holografia (współczesne metody jej wykorzystania) świadczy o fundamentalnym znaczeniu odkrycia lasera dla rozwoju współczesnej cywilizacji”

Czy udało się udowodnić tak sformułowaną tezę?

Podsumowanie:

1. **Holografia optyczna** zawdzięcza swe istnienie **laserom**;
2. Ze względu na fizjologię widzenia holografia w TV i kinie - **mało istotna**;
Przestrzenne obrazy w kinie i TV są otrzymywane innymi metodami;
3. Zasadnicze zastosowania holografii: interferometria holograficzna;
4. **Holograficzny zapis, odczyt i przesyłanie informacji możliwe w łączach optycznych (taka potrzeba możliwa w łączności kosmicznej)**

Dziękuję za uwagę