

1100-4BW12, rok akademicki 2021/22

WSTĘP DO OPTYKI FOURIEROWSKIEJ

dr hab. Rafał Kasztelanic

- Układy holograficzne:
 - Odbiciowe
 - Transparentne
 - Fourierowskie
 - Tęczowe
 - Kolorowe – grube
 - Plazmoneczne
- Hologramy generowane komputerowo
- Kodowanie amplitudy i fazy
- Zabezpieczenia
- IFTA
- Pamięci holograficzna
- Kino/Projektory holograficzne

Holografia - historia

Nazwa 'hologram' pochodzi od greckich słów hōlos (χῶλος) i grápho (γράφω) lub grámma (γράμμα), które po polsku oznaczają: pełna informacja lub cały rysunek.

Najważniejsze wydarzenia historyczne:

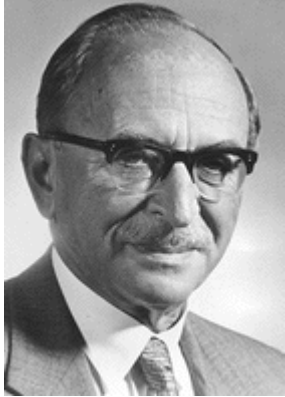


Rok	wydarzenie
1920	Mieczysław Wolfke przedstawia podstawową zasadę wykorzystywaną w holografii
1947	Dennis Gabor formułuje podstawy teoretyczne holografii
1960	Wynalezienie lasera umożliwia rozwój holografii jako nauki i techniki. Opracowanie przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa obecnie stosowanego mechanizmu produkcji hologramów
1962	Pomysł połączenia holografii z fotografią kolorową wysunięty przez Jurija Denisiuka
1964	Emmet Leith i Juris Upatnieks wykonują pierwszy hologram z użyciem lasera. Robert Powell i Karl Stetson publikują pierwszy artykuł o interferometrii holograficznej
1965	Hologram odbiciowy. Nowy środek do zapisu hologramów – żelatyna dwuchromianowa. Hologramy stają się dostępne dla „zwykłych ludzi” (nie naukowców) i zaczynają pojawiać się na okładkach czasopism i książek.

Holografia - historia

Rok	wydarzenie
1967	Larry Siebert do wykonania hologramu wykorzystuje laser impulsowy. Steven A. Benton przedstawia hologramy tęczowe.
1968	Udostępnienie zwiedzającym pierwszej na świecie wystawy hologramów
1970	System stabilnego stołu do produkcji hologramów, co czyni holografię dostępną artystom.
1971	Denis Gabor dostaje Nagrodę Nobla z fizyki za odkrycie zasad holografii. Lloyd Cross otwiera pierwszą Szkołę Holografowania. Lloyd Cross opracowuje technikę produkcji ruchomych, trójwymiarowych obrazów.
1974	Technikę produkcji hologramów tłoczonych.
1976	Prototyp projektora filmów holograficznych
1983	Pierwsze holograficzne zabezpieczenie karty kredytowej (MasterCard International, Inc.)
1984	Magazyn National Geographic jako pierwszy umieszcza hologram na swojej okładce

Holografia - historia



Denis Gabor



Emmet Leith



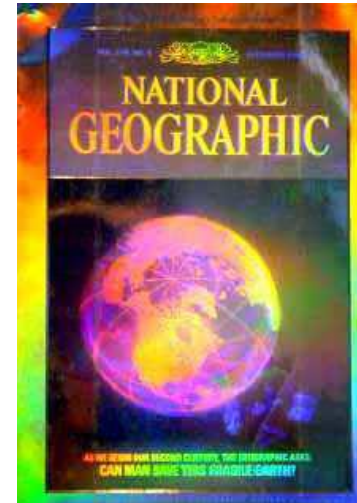
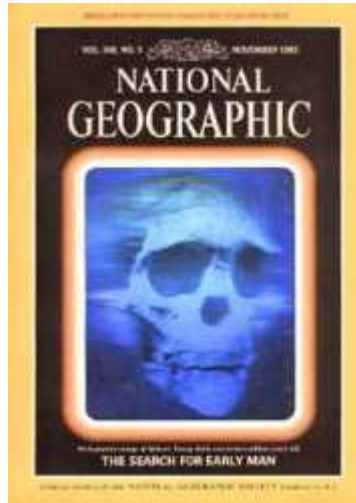
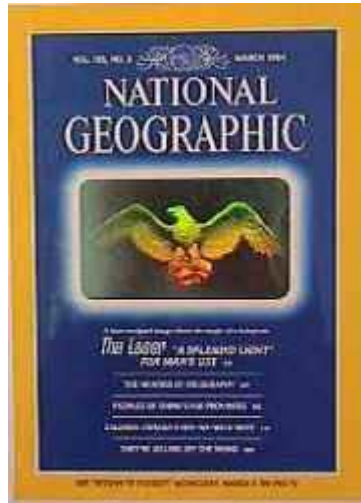
Juris Upatnieks



Jurij Denysiuk



Steven A. Benton



Hologram transmisyjny –

Metoda opracowana przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa.

Podczas tworzenia hologramu fale świetlne – zanim dotrą do kliszy – przechodzą przez przedmiot.

Hologram odbiciowy –

Metoda opracowana przez Jurija Denisyuka. Fale świetlne po odbiciu od przedmiotu kierowane są na kliszę.

Hologram tęczowy –

Metoda opracowana przez Stevena Bentona. Hologramy takie mają małą głębokość (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.

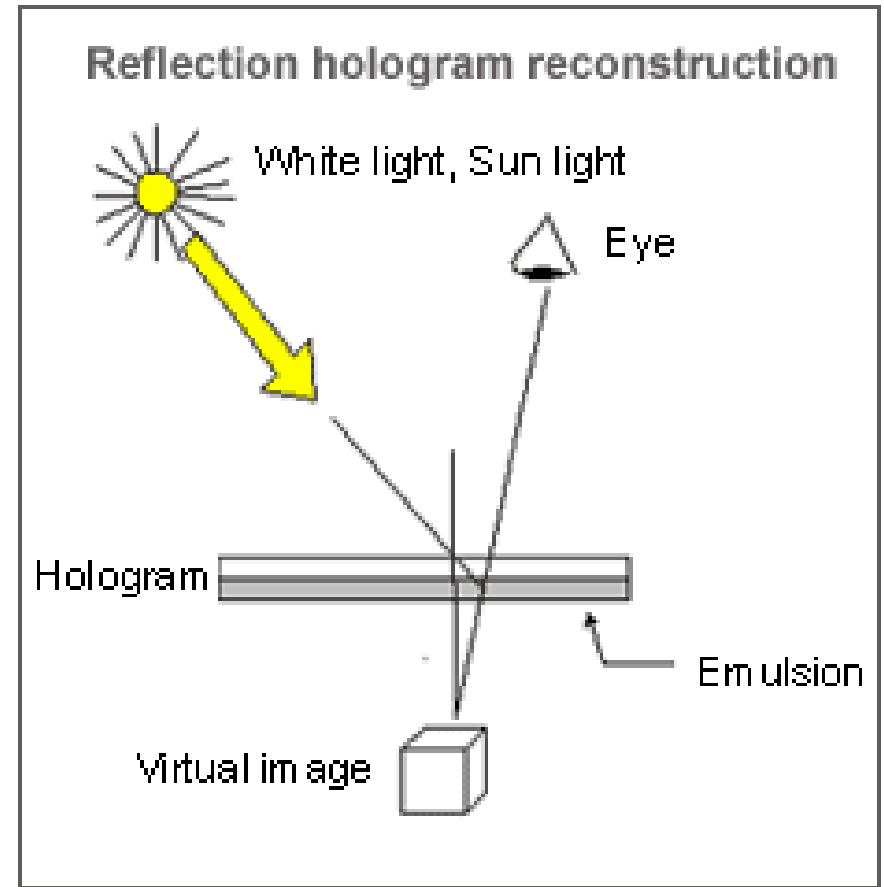
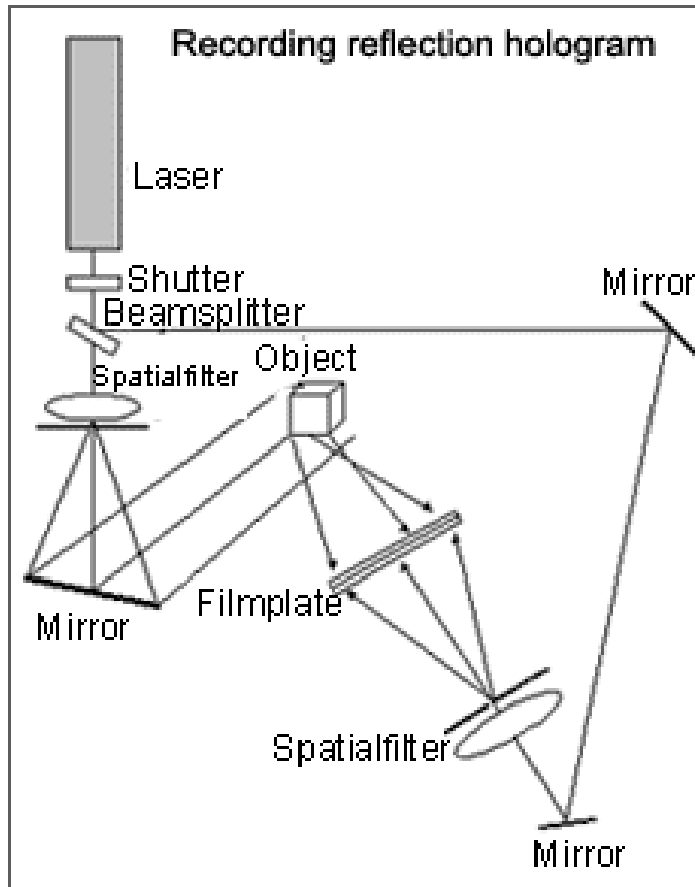
Hologram objętościowy

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.

Hologramy odbiciowe

- Zapis z 2 stron
- Wysoka energia wiązki
- Pozwala na tworzenie hologramów grubych

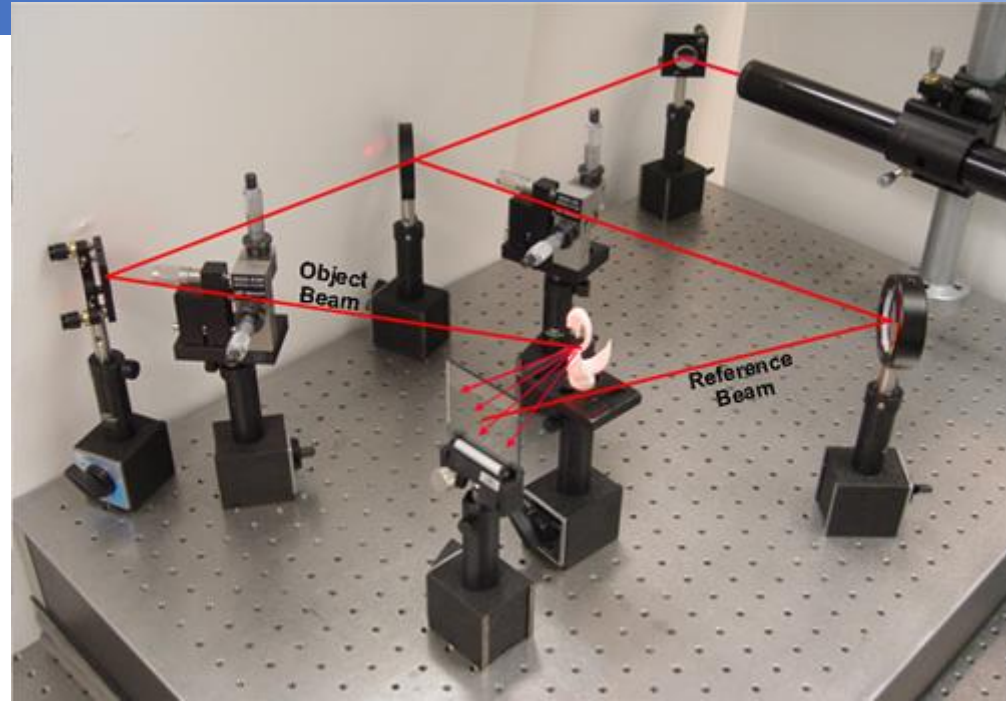
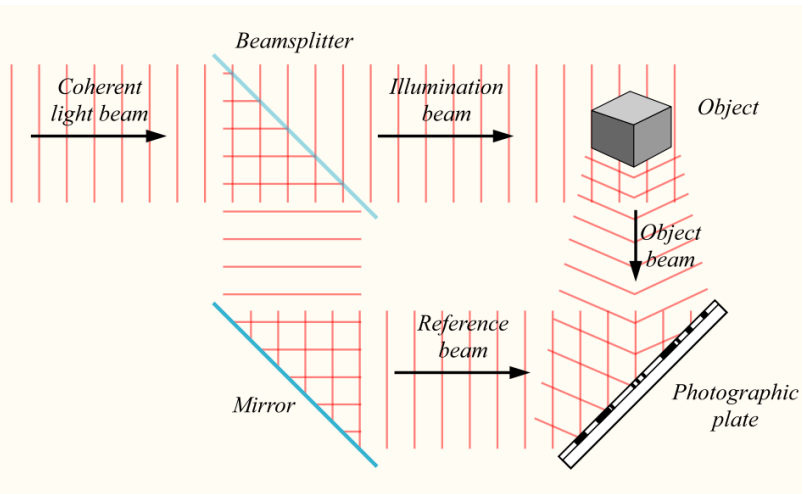


Holografia

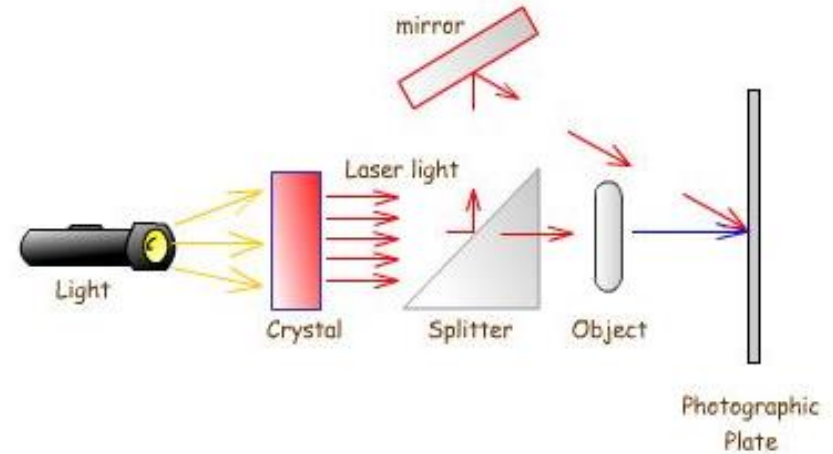
Hologramy transparentne - zapis

- Zapis z 1 strony
- Niska energia wiązki
- Hologramy cienkie

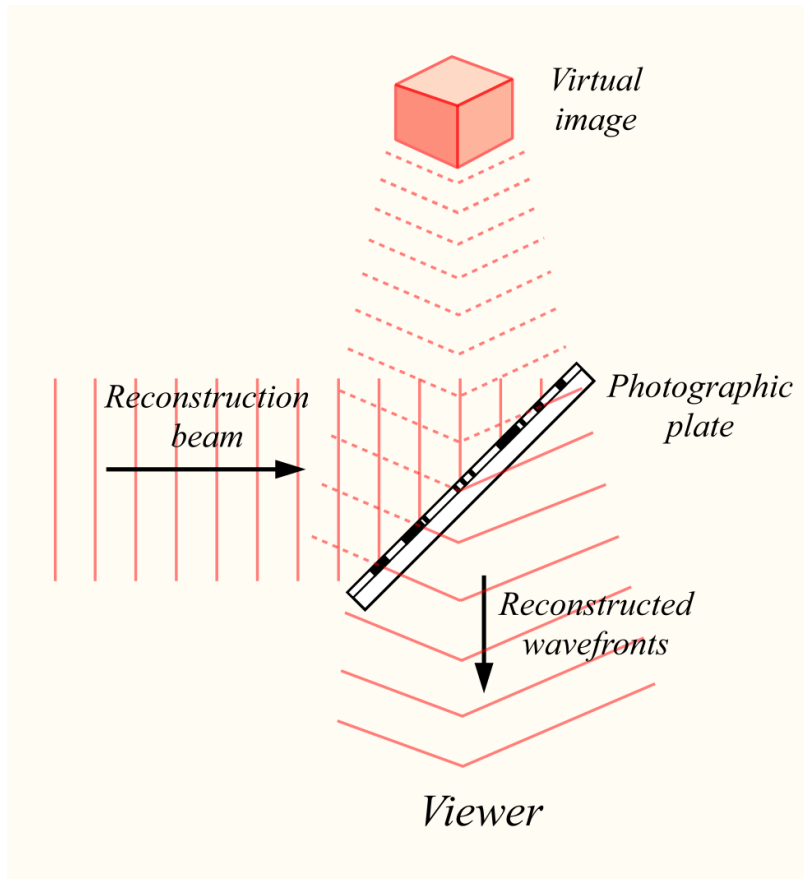
Obiekt odbiciowy



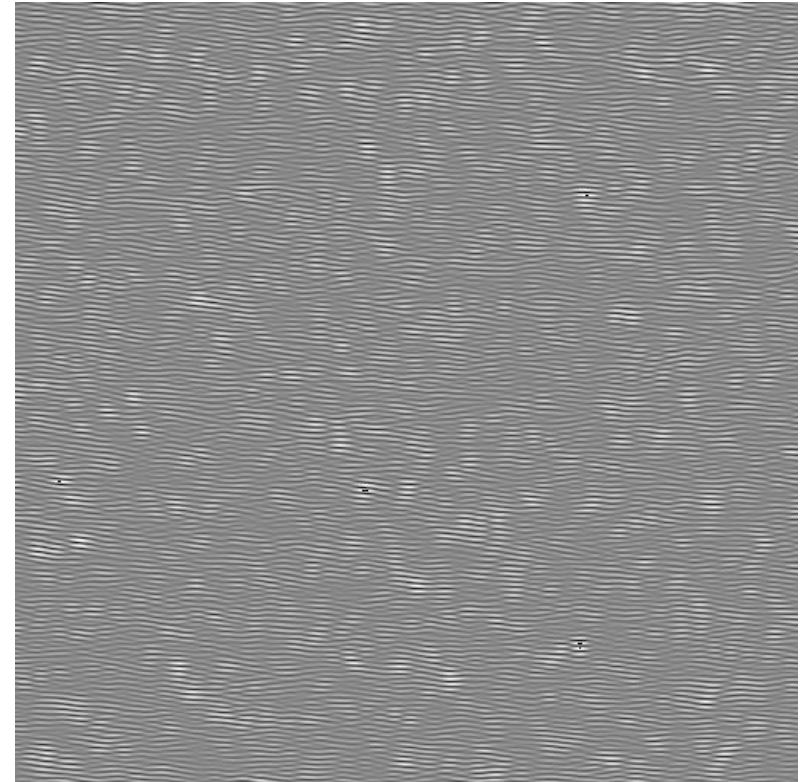
Obiekt transparentny



Hologramy transparentne – odczyt (rekonstrukcja)



Prążki - fringe



Podstawowe równanie holografii

Założenia:

- Grubość emulsji < długości fali
- Wiązka przedmiotowa A_0 i wiązka odniesienia A_r spójne (amplitudy zespolone)

Pole falowe na powierzchni hologramu dane jest wzorem:

$$I_H(x, y) = |A_0(x, y) + A_r(x, y)|^2 = |A_0|^2 + |A_r|^2 + A_0 A_r^* + A_0^* A_r$$

Przyjmujemy liniową zależność transmitancji amplitudowej (t_H) uzyskanego hologramu od intensywności pola świetlnego:

$$t_H(x, y) = \alpha I_H(x, y)$$

gdzie α jest stałą proporcjonalności.

Rekonstrukcja przez oświetlenie hologramu wiązką A_i :

$$u_H(x, y) = t_H(x, y) A_i(x, y) \sim |A_0|^2 A_i + |A_r|^2 A_i + \underbrace{A_0 A_r^* A_i + A_0^* A_r A_i}_{\text{Tu są rekonstruowane obrazy}}$$

Tu są rekonstruowane obrazy

Czyli pole falowe za hologramem składa się z **4 składników**.

Podstawowe równanie holografii

Założmy, że fala odniesienia (referencyjna) ma postać:

$$A_r(x, y) = A \exp[-ik \sin \theta y] \quad (\text{fala płaska pod kątem } \theta)$$

Wtedy sygnał zarejestrowany na kliszy:

$$I_H(x, y) \sim |A|^2 + |A_0(x, y)|^2 + A_0 A \exp[ik \sin \theta y] + A_0^* A \exp[-ik \sin \theta y]$$

Gdy oświetlimy ją teraz prostopadle padającą wiązką B , to rozkład amplitudy zespolonej za hologramem:

$$u_H(x, y) \sim |A|^2 B + |A_0(x, y)|^2 B + B A A_0 \exp[ik \sin \theta y] + B A A_0^* \exp[-ik \sin \theta y]$$

Holografia

Podstawowe równanie holografii

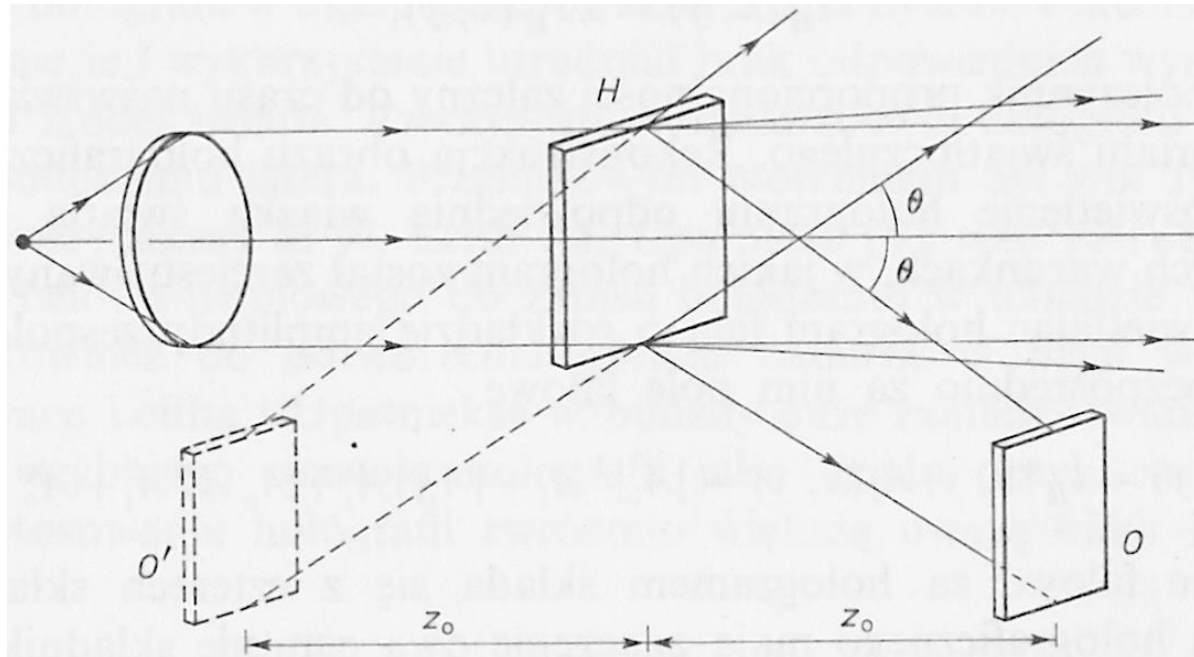
Quasi-płaska fala o amplitudzie zmodyfikowanej rozkładem intensywności w wiązce przedmiotowej

Wiązka zbieżna rozchodząca się w kierunku θ
Proporcjonalna do amp. sprz. zesp. fali przedmiotowej.
Obraz rzeczywisty w takiej samej odległości jak przy rejestracji

$$u_H(x, y) \sim |A|^2 B + |A_0(x, y)|^2 B + BAA_0 \exp[ik \sin \theta y] + BAA_0^* \exp[-ik \sin \theta y]$$

Równomiernie osłabiona
Fala płaska prostopadła do hologramu

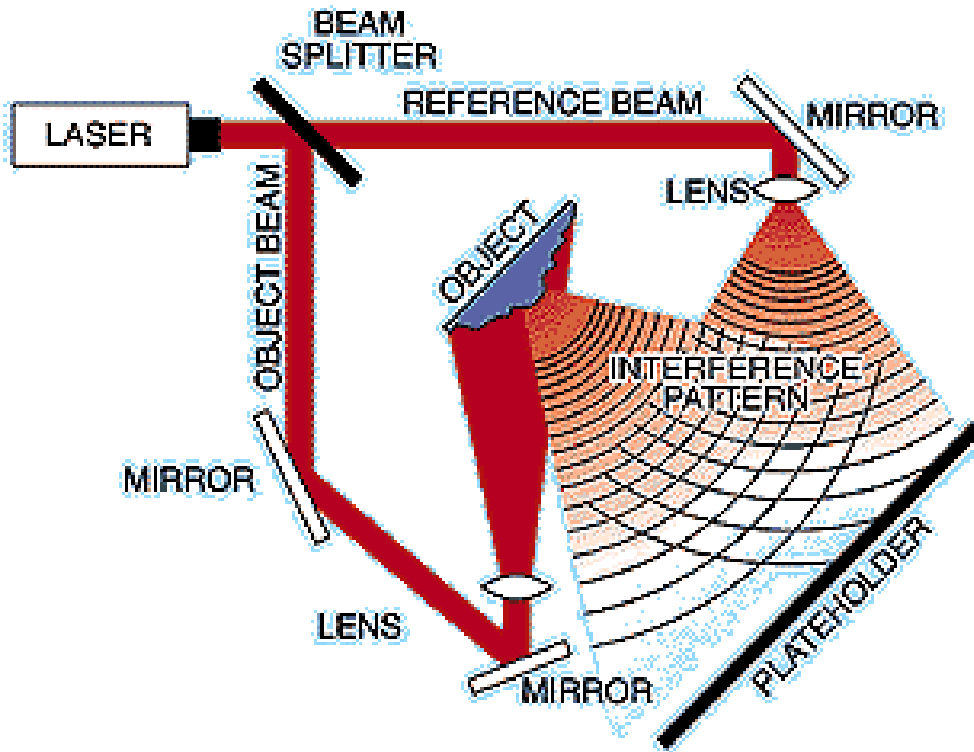
Wiązka rozbieżna rozchodząca się w kierunku θ
Proporcjonalna do amp. zesp. fali przedmiotowej.
Obraz pozorny w takiej samej odległości jak przy rejestracji



Holografia

Podstawowe równanie holografii

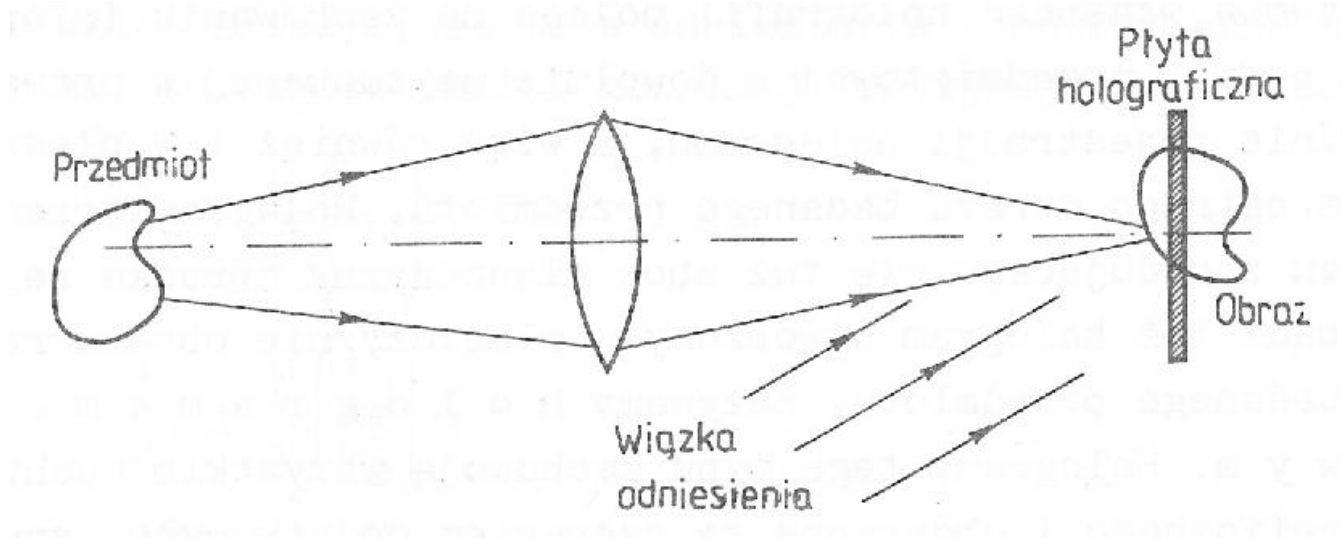
Ze względu na możliwe pokrywanie się sygnałów i **możliwość skalowania** często stosuje się jako wiązkę oświetlającą i/lub referencyjną falę sferyczną. Odczyt również za pomocą fali sferycznej.



Zmieniając położenie źródła fali sferycznej odczytującej względem położenia fali referencyjnej zmienia się skala rekonstruowanego przedmiotu.

Hologramy obrazowe

Jest to szczególny rodzaj hologramów gdy płaszczyzna rejestracji hologramu pokrywa się z obrazem obiektu (wiązka odniesienia o dowolnej geometrii):

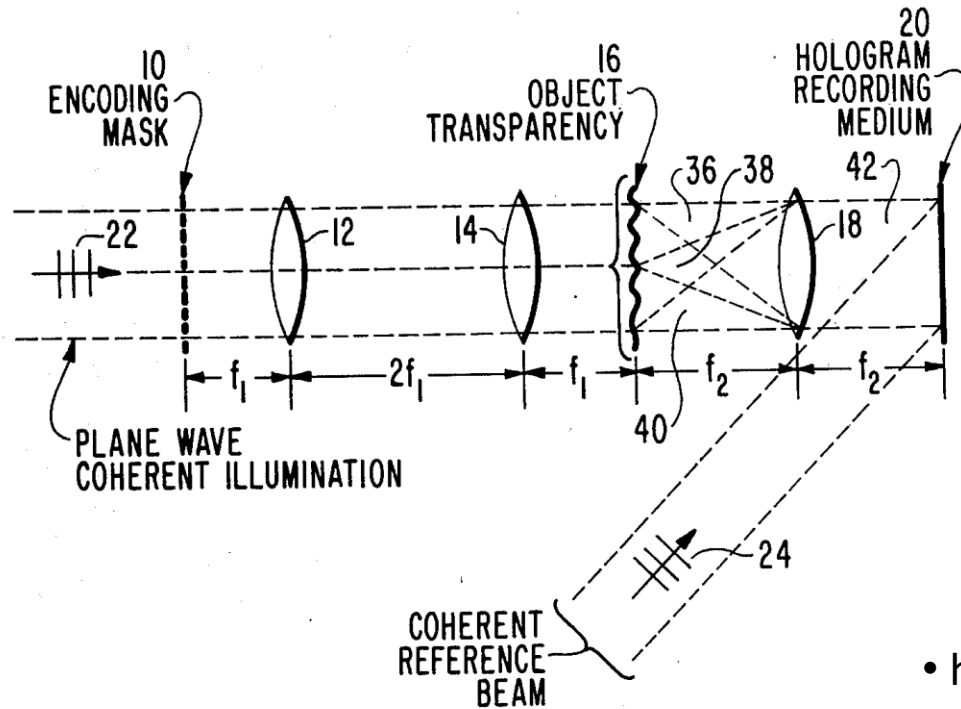


Dzięki temu przy rekonstrukcji obraz pojawia się blisko płaszczyzny hologramu z pełnym wrażeniem 3D i paralaksą.

Przy oświetleniu światłem białym powstają obrazy wielobarwne, ale ze względu na małą średnicę źrenicy oka i przy nie za dużej głębi można uzyskać obrazy z małym zniekształceniem. Warunkiem jest punktowe źródło światła.

Hologram Fourierowski

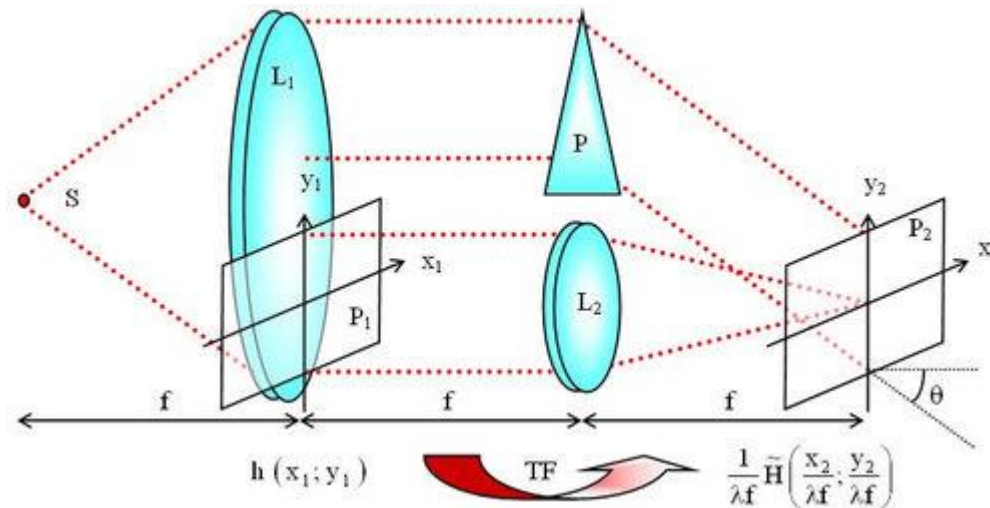
Hologramy gdzie zapisywany jest wynik interferencji fali referencyjnej z widmem obiektu:



- hologram Fresnela – odtwarza obraz w skończonej odległości,
- hologram Fouriera – odtwarza obraz w nieskończoności.

Hologram Fourierowski

Stosowane są przede wszystkim w przetwarzaniu obrazów – filtry Vander Lugta, oraz w pamięciach holograficznych:



Przezroczce h po przejściu przez soczewkę L_2 w płaszczyźnie P_2 daje sygnał:

$$u_p(v_x, v_y) = \frac{\exp(ikf)}{\lambda f} H(v_x, v_y)$$

Wiązka odchylona przez pryzmat:

$$u_r(v_x, v_y) = A \exp(-i2\pi v_y f \sin \theta)$$

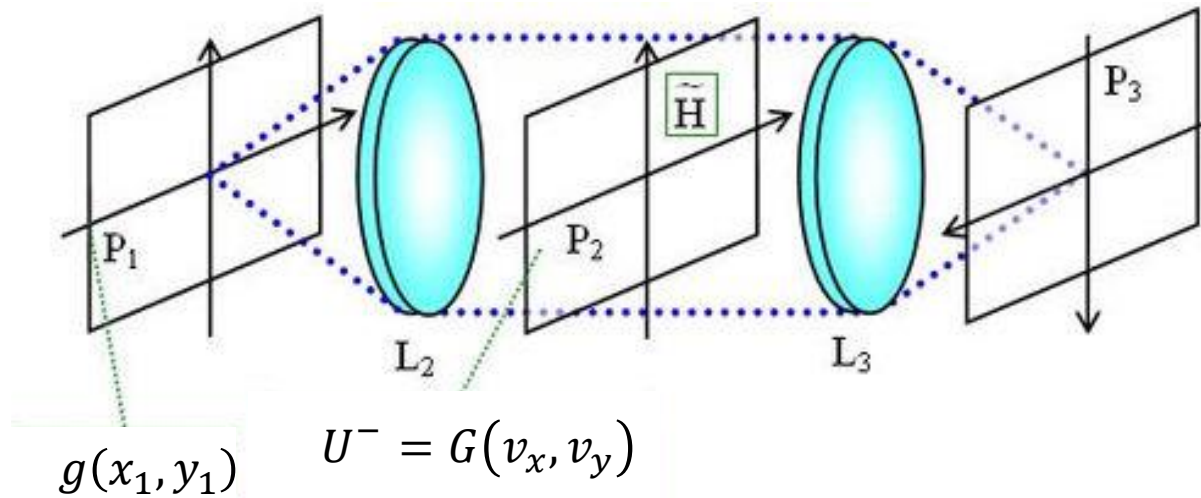
Hologram Fourierowski

W wyniku interferencji dostajemy (to jest zapisane na hologramie/filtrze):

$$\begin{aligned} I(v_x, v_y) &\sim \left| A \exp(-i2\pi v_y f \sin \theta) + \frac{1}{\lambda f} H(v_x, v_y) \right|^2 = \\ &= A^2 + \frac{1}{\lambda^2 f^2} |H(v_x, v_y)|^2 + \frac{A}{\lambda f} H(v_x, v_y) \exp(i2\pi v_y f \sin \theta) + \frac{A}{\lambda f} H^*(v_x, v_y) \exp(-i2\pi v_y f \sin \theta) \end{aligned}$$

Hologram Fourierowski

Filtracja:



Transformata Fouriera przezroczca P_1 (z zapisanym sygnałem g) oświetla filtr H :

$$U^+(v_x, v_y) = U^-(v_x, v_y)H(v_x, v_y) =$$

$$\frac{1}{\lambda f} A^2 G + \frac{1}{\lambda^3 f^3} H^2 G + \frac{1}{\lambda^2 f^2} AHG \exp(i2\pi v_y f \sin\theta) + \frac{1}{\lambda^2 f^2} AHG \exp(-i2\pi v_y f \sin\theta)$$

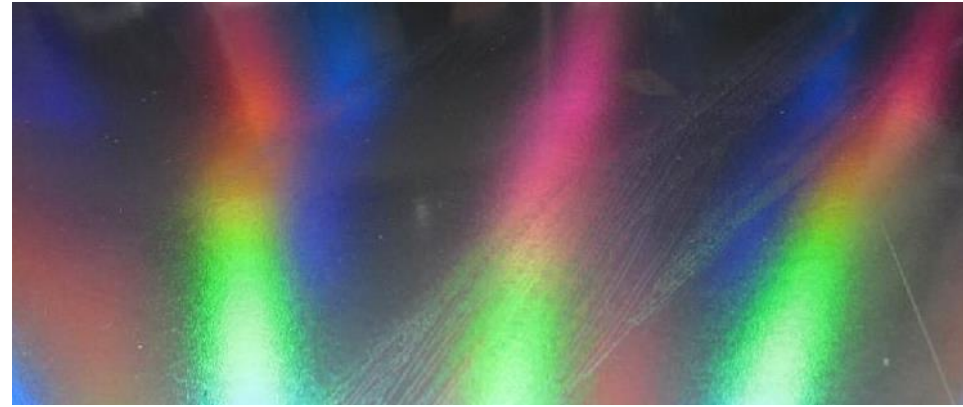
Holografia

Hologramy tęczowe

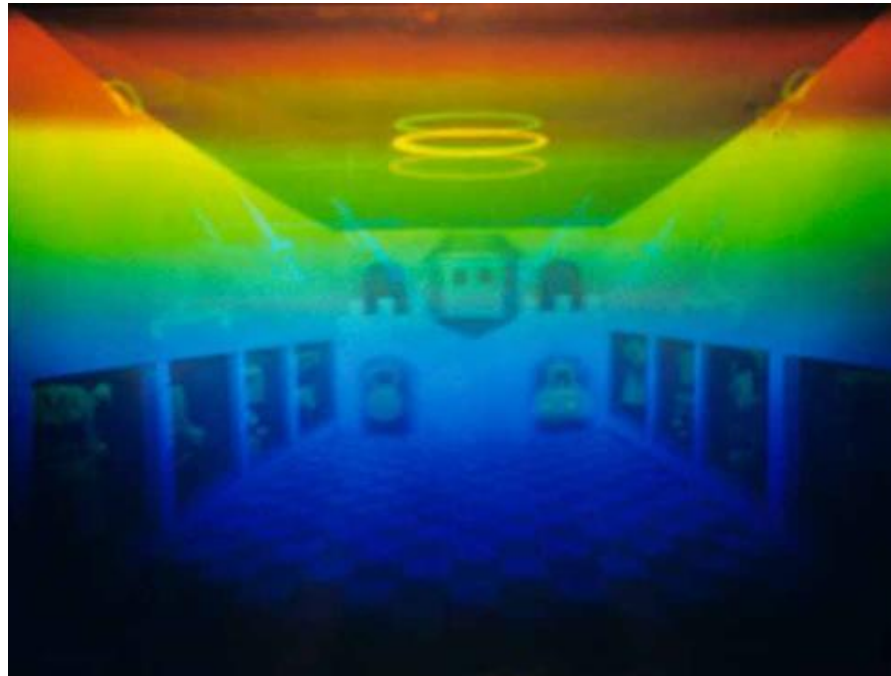
Problem przy oświetleniu niekoherentnym:

$$BAA_0^* \exp[-ik \sin \theta y]$$

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



Jak uzyskać ostre obrazy przy oświetleniu rozciągniętym światłem białym?

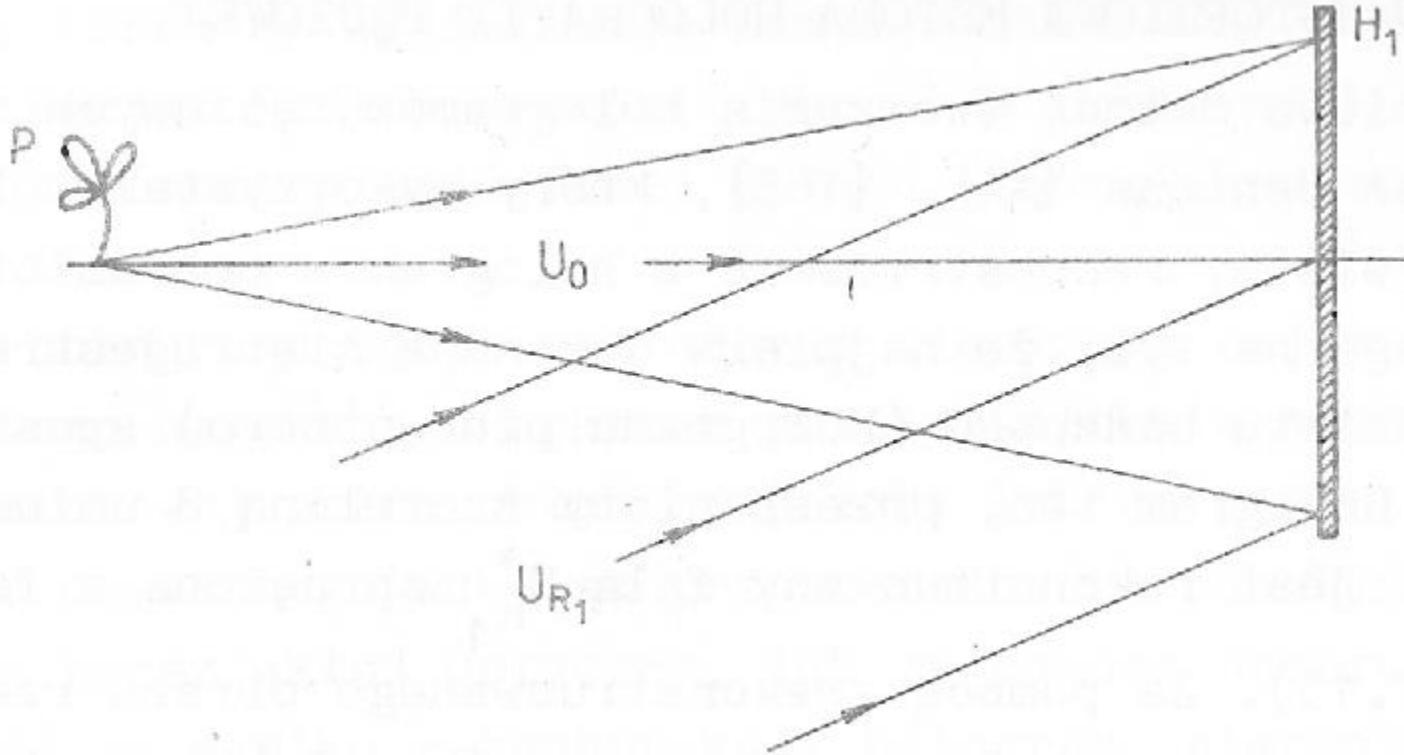


Hologramy tęczowe

Metoda dwustopniowa:

1. Zapis zwykłego hologramu obrazowego (H_1),

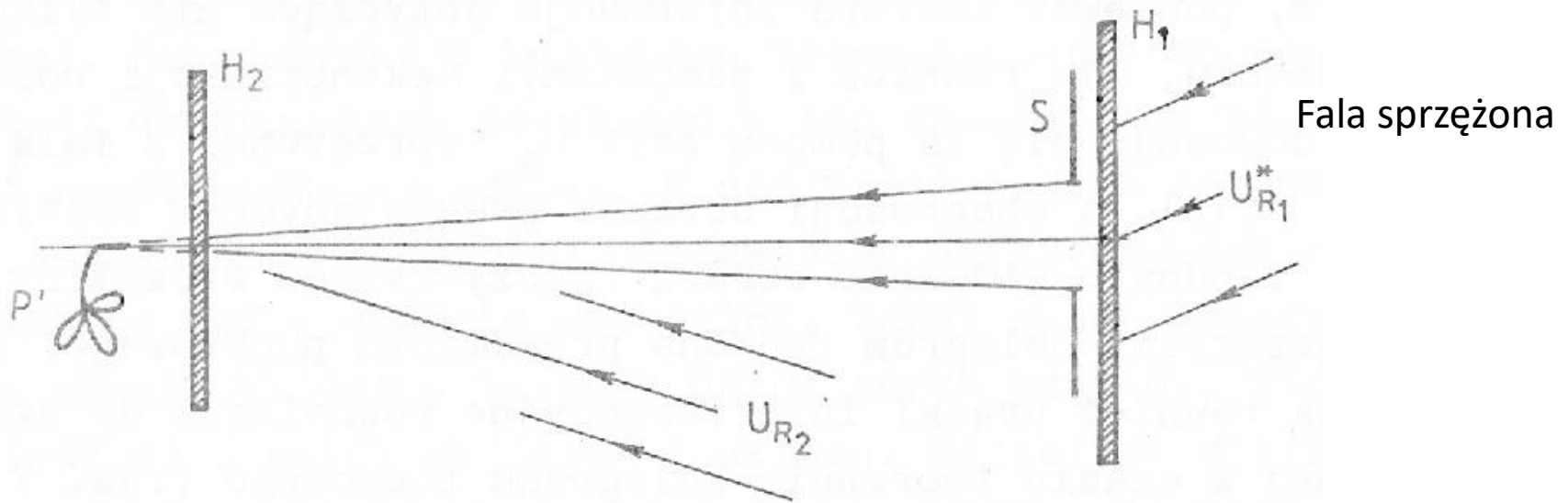
Zapis H_1 :



Hologramy tęczowe

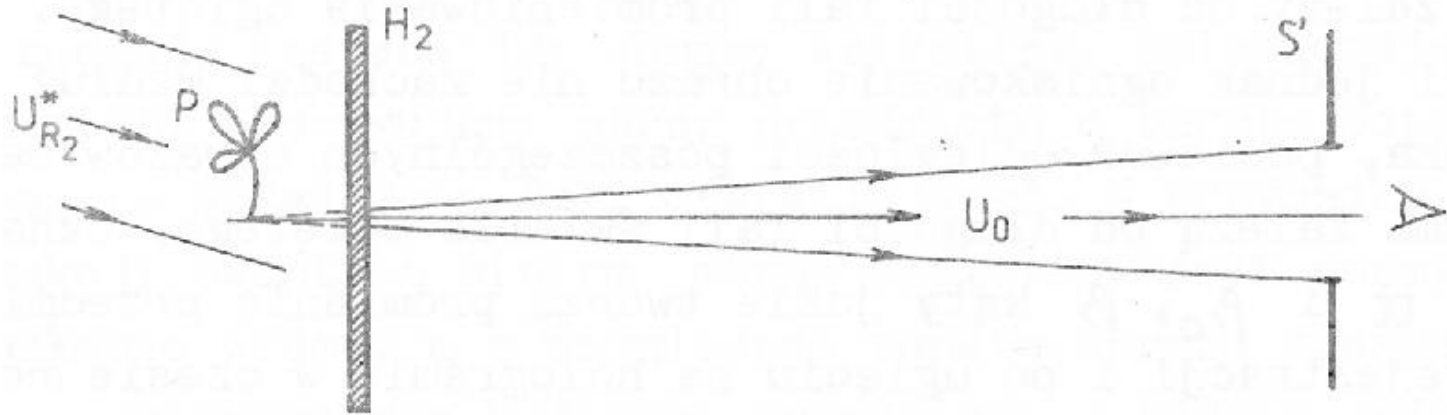
Zapis hologramu H_2 :

2. Rekonstrukcja hologramu H_1 falą sprzężoną do wiązki referencyjnej przez szczelinę i zapis z tego hologramu H_2 .



Hologramy tęczowe

Rekonstrukcja:



Powstały obraz przy rekonstrukcji światłem monochromatycznym widoczny jest tak jak byśmy patrzyli na oryginalny przedmiot przez szczelinę (brak paralaksy w jednym kierunku).

Przy oświetleniu światłem białym dla każdej długości fali mamy szczelinę w innym miejscu lub przez daną szczelinę widzimy obraz tęczowy.

Aby obraz nie był rozmyty w szczelinie (w trakcie rejestracji hologramu) umieszcza się soczewkę cylindryczną o ogniskowej takiej aby na hologramie H_2 powstał obraz szczeliny.

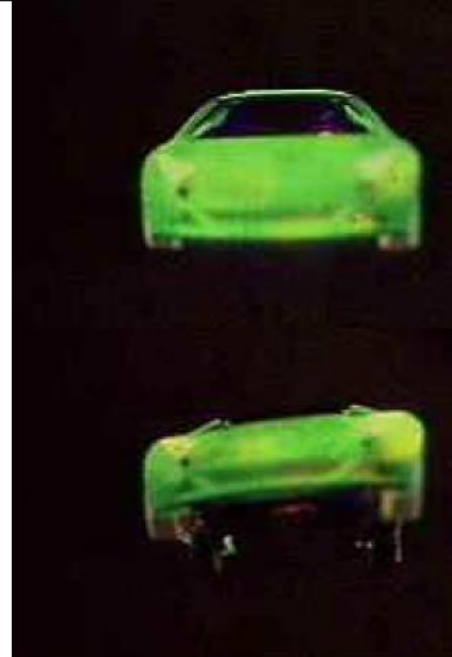
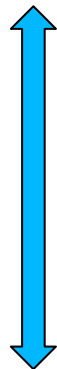
WADA: Ograniczenie paralaksy w jednym kierunku.

Hologramy tęczowe

Paralaksa:



Tak albo tak, nie jednocześnie
(hologramy tęczowe)



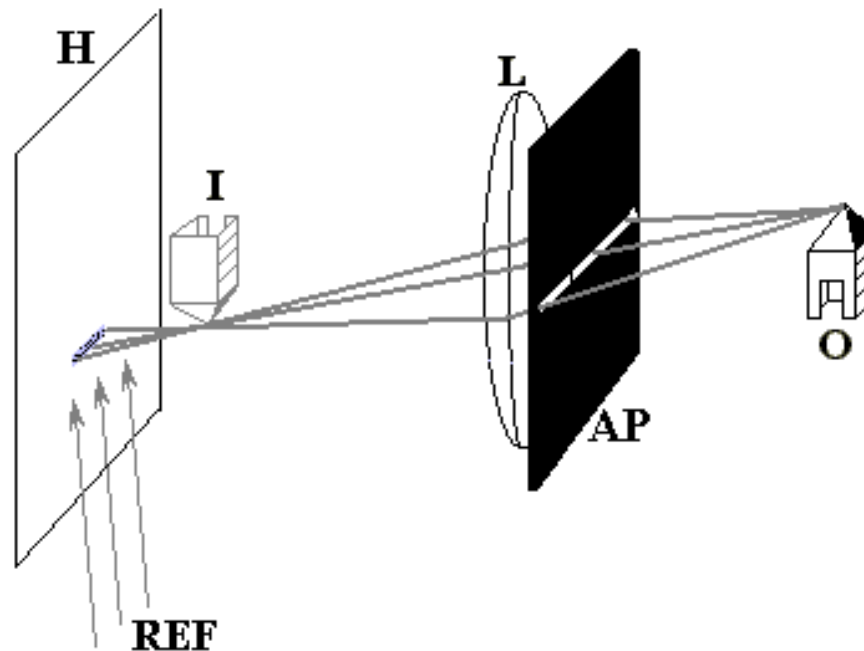
Hologramy tęczowe

Metoda jednostopniowa:

Rejestracja obiektu *O* na hologramie. Rzeczywisty obraz *I* powstaje przed hologramem.

Na hologramie ostro jest szczelina.

Przy rekonstrukcji powstaje rzeczywisty obraz szczeliny, przez którą oglądamy obiekt.



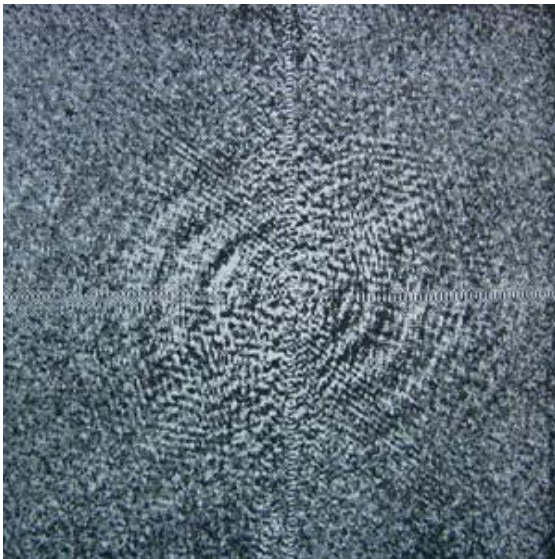
Hologramy kolorowe – grube / objętościowe

- Rejestracja na materiale objętościowym tj. takim, którego grubość jest większa od okresu przestrzennego rejestrowanych prążków interferencyjnych.
- Przy rekonstrukcji powstaje tylko jeden obraz pozorny lub rzeczywisty.
- Cechują się selektywnością **przestrzenną** i **chromatyczną**.
- Duża gęstość zapisu dzięki zapisowi objętościowemu.
- Ścisła analiza rejestracji i odtworzenia hologramu objętościowego możliwa przez rozwiązywanie równania falowego w ośrodku o zmiennym współczynniku załamania lub zgodnie z teorią fal sprzężonych.

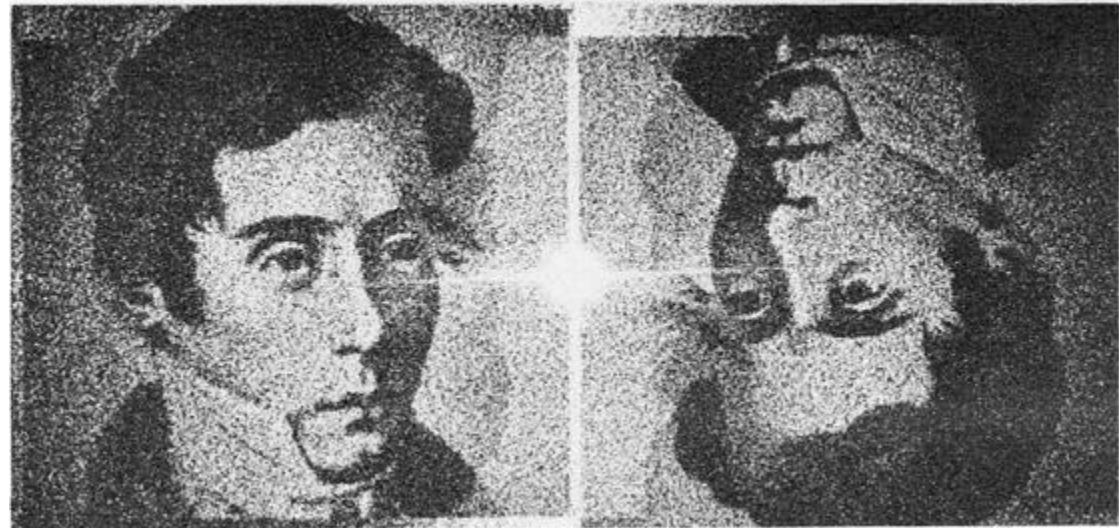


Hologramy generowane komputerowo - CGH

- Modelowanie obiektu
- Obliczanie rozkładu prążków w płaszczyźnie hologramu,
- Możliwość wybrania interesujących nas składowych
- Zapis w materiale lub na urządzeniu – **potrzebne kodowanie**
- Najprostsze hologramy Fraunhofera (duża odległość), wtedy zwykła FFT
- Zadana amplituda i dowolna faza w odtwarzanym obrazie (kinoform)



hologram



rekonstrukcja

Hologramy generowane komputerowo - CGH

Widmo obrazu:

$$G(v_x, v_y) = FT \{g(x, y)\}$$

mające być zapisane na hologramie, dyskretyzujemy (próbujemy):

$$G(v_x, v_y) = \sum_n \sum_m G(n\Delta v_x, m\Delta v_y) \delta(v_x - n\Delta v_x, v_y - m\Delta v_y)$$

gdzie: $\Delta v_x, \Delta v_y$ odstęp między punktami próbkowania.

$$G_{nm} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Amplituda}}}{A_{nm}} \exp(-i \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Faza}}}{\phi_{nm}})$$

Hologramy generowane komputerowo - CGH

Metoda Lohmana:

Każdej próbce: $G_{nm} = G(n\Delta v_x, m\Delta v_y)$

odpowiada jedna komórka dyskretyzacji

o środku w punkcie $v_{nx} = n\Delta v_x, v_{my} = m\Delta v_y$

Faza i amplituda kodowane są jako prostokątna apertura w nieprzezroczystym tle.

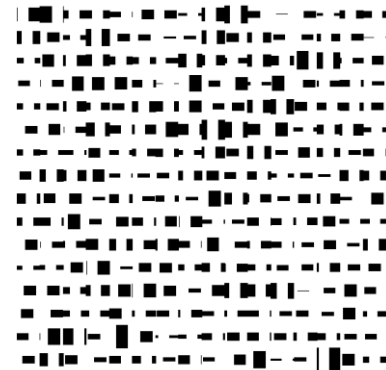
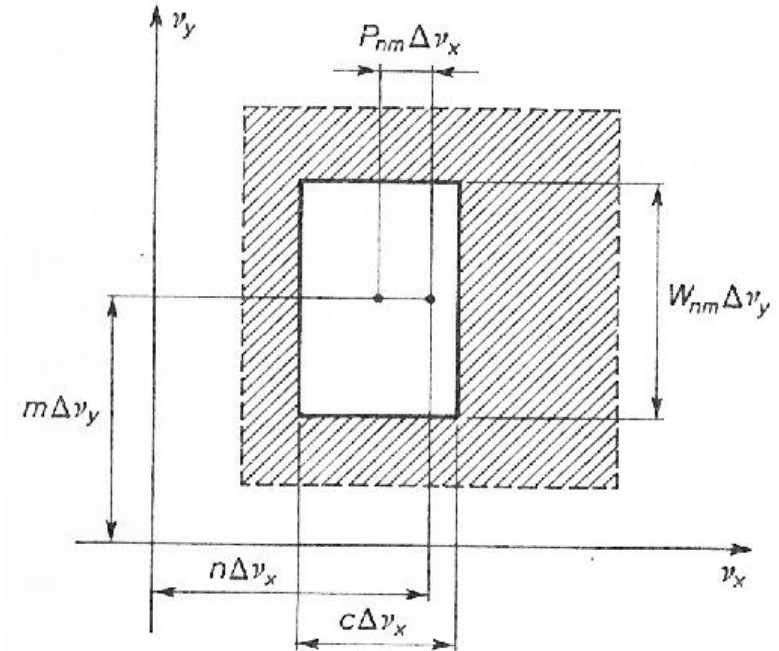
Szerokość apertur $c\Delta v_x$ jest taka sama.

Wysokość apertury $W_{nm}\Delta v_y$ jest proporcjonalna do wartości amplitudy A_{nm}

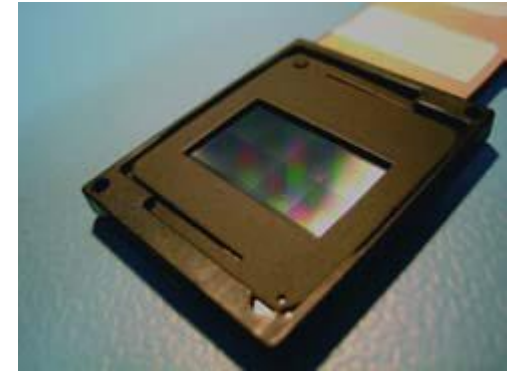
Przesunięcie $P_{nm}\Delta v_x$ koduje fazę φ_{nm}

Spełnione musi być: $W_{nm} \leq 1, |P_{nm}| + \frac{c}{2} \leq \frac{1}{2}$

Komórka dyskretyzacji

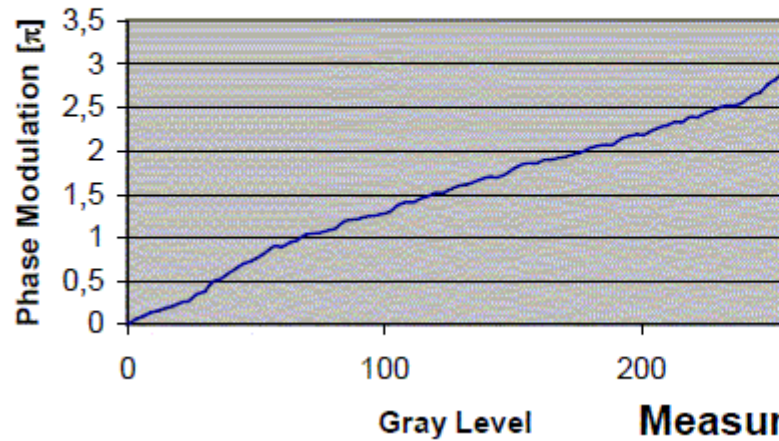


Hologramy generowane komputerowo - CGH

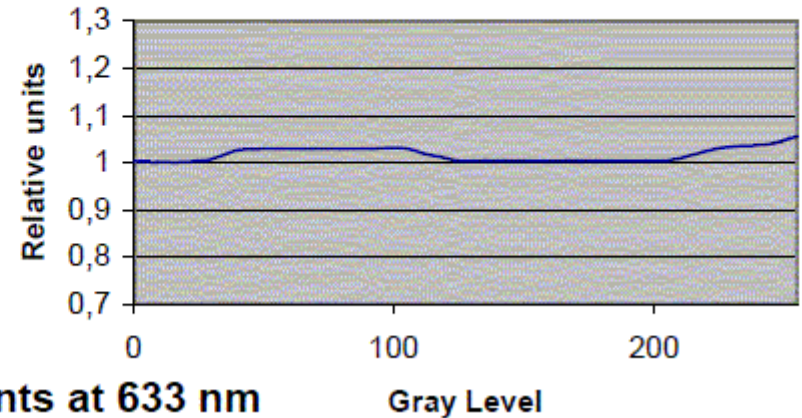


Phase- and intensity modulation

Polariser 90°



Intensity Modulation
Polariser 90° Analyser 90°



Measurements at 633 nm

Gray Level

Kodowanie amplitudy i fazy

Stosowane podejścia:

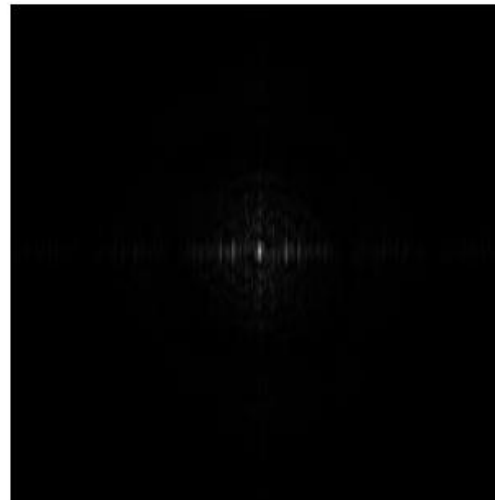
- metoda montecarlo
- Gerchberg-Saxton
- **IFTA**
- algorytmy genetyczne
- wyżarzanie

Pozwalają na optymalizację kodowania przy ograniczonej dziedzinie dostępnych parametrów:

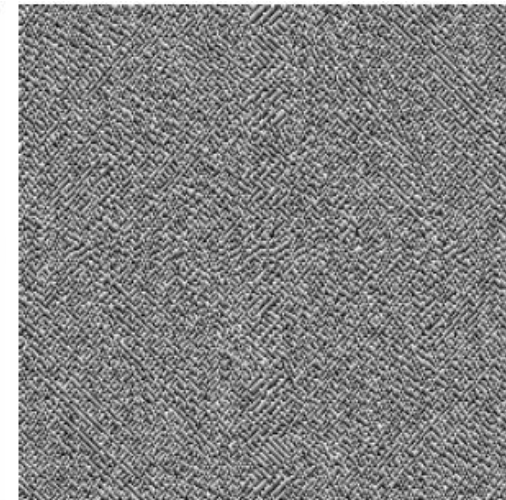
- amplituda
- faza
- amplituda-faza
- głębia
- długość fali
- DOE, HOE, CGH



obraz



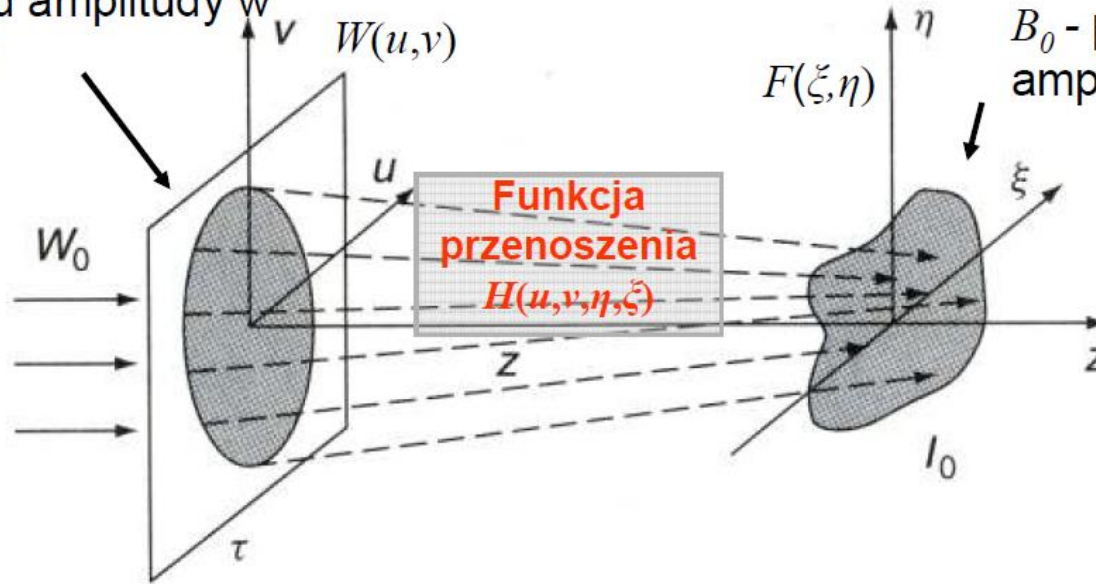
amplituda



faza

Holografia

A_0 – rozkład amplitudy w hologramie



B_0 – pożądany rozkład amplitudy rekonstrukcji

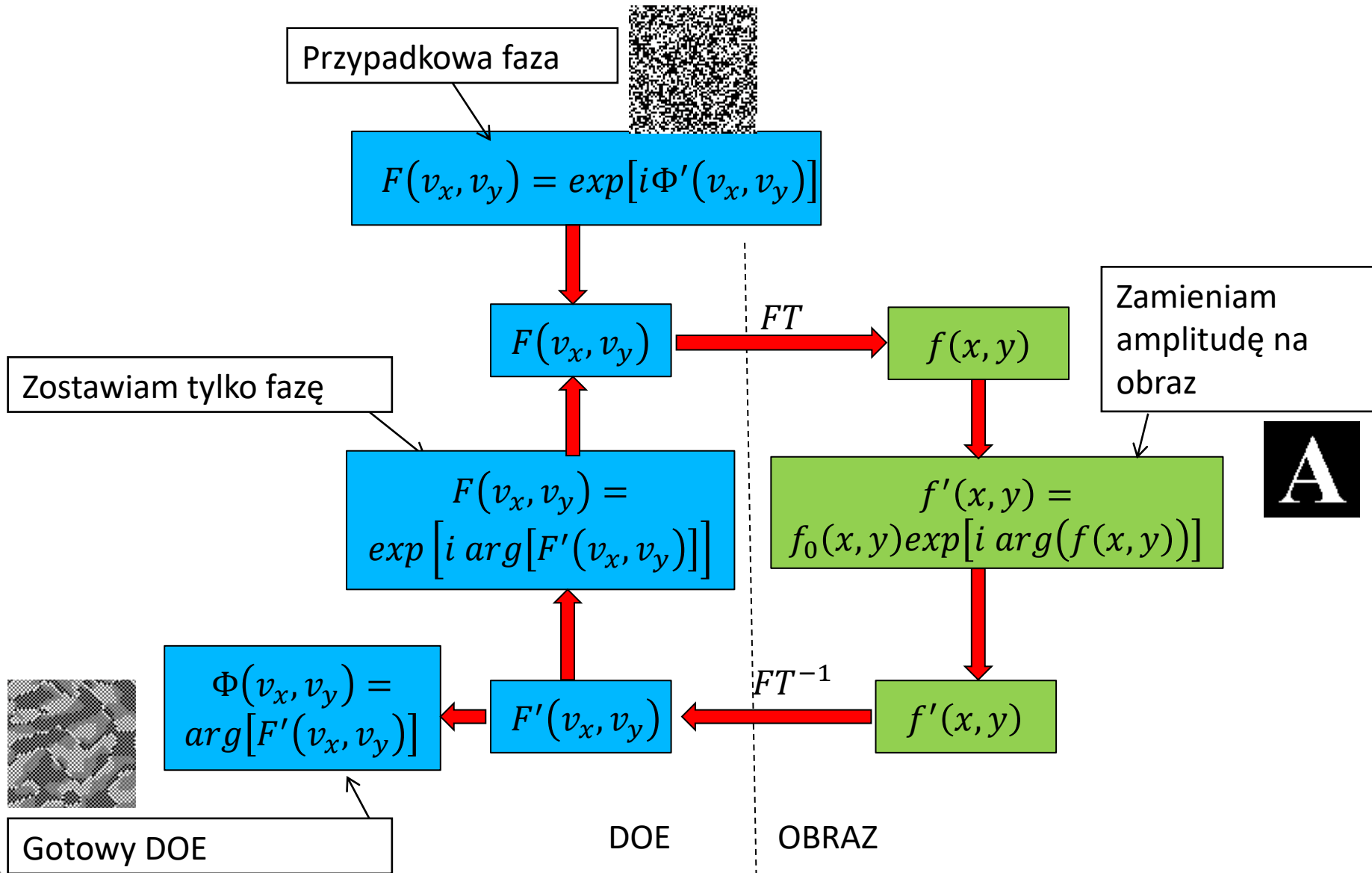
Propagacja w wolnej przestrzeni (Fresnela) z płaszczyzny hologramu do płaszczyzny rekonstrukcji (odległość z):

$$F(v_x, v_y) = \iint A(x, y) H(x - v_x, y - v_y) dx dy$$

Funkcja przenoszenia (na odległość z):

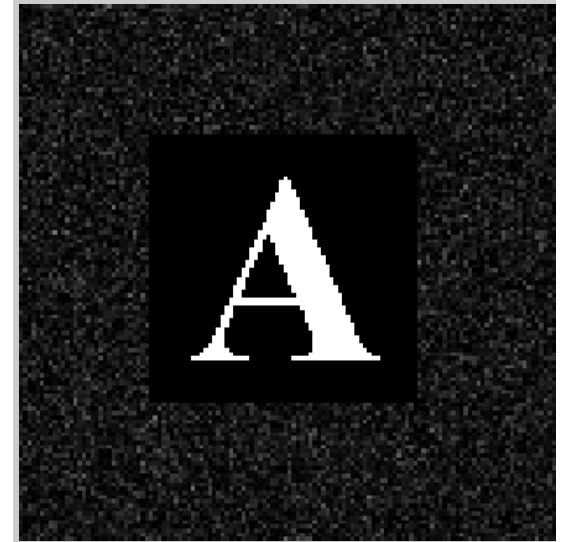
$$H(x, y) = \frac{ik \exp(ikz)}{2\pi z} \exp \left[\frac{ik(x^2 + y^2)}{2z} \right]$$

Kodowanie amplitudy i fazy – IFTA (Iterative Fourier transform algorithm)

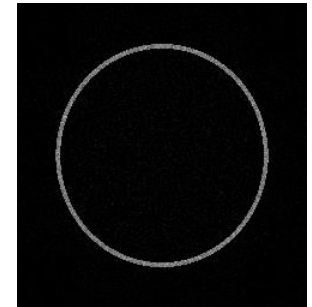
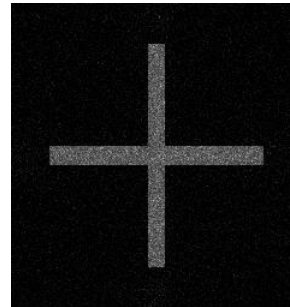
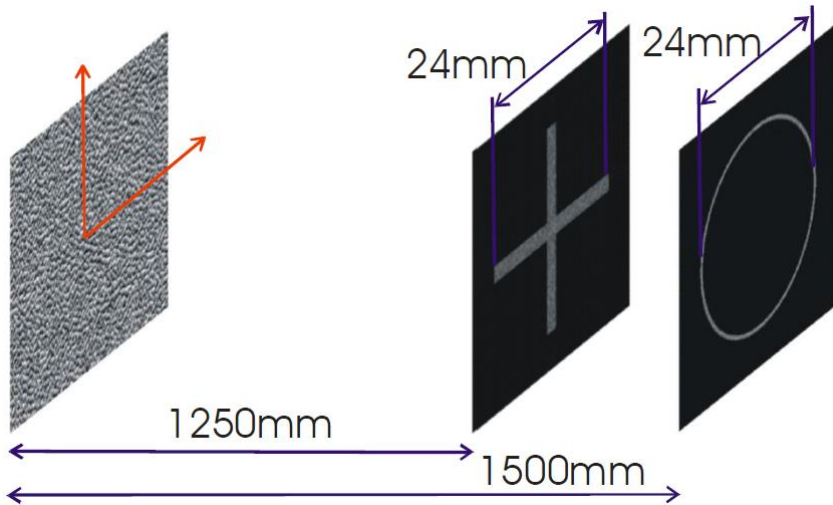


Holografia

Często optymalizacji (nadpisanie amplitudy) dokonuje się w obrębie ograniczonego obszaru.
Poza nim mogą kumulować się błędy.



Przykład możliwości – dwa obrazy w różnych planach:



Holografia

Liczba poziomów:

2 3 4 5

8 16 32 64

128 256 512 1024



Holografia

Łamanie hologramu:

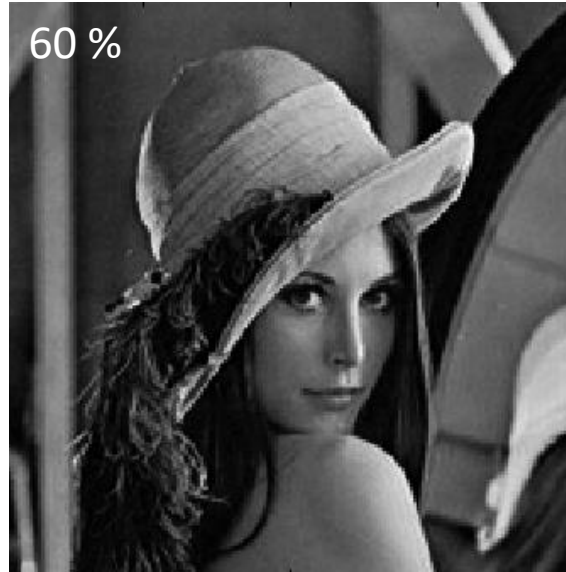
oryginał



pełny



60 %

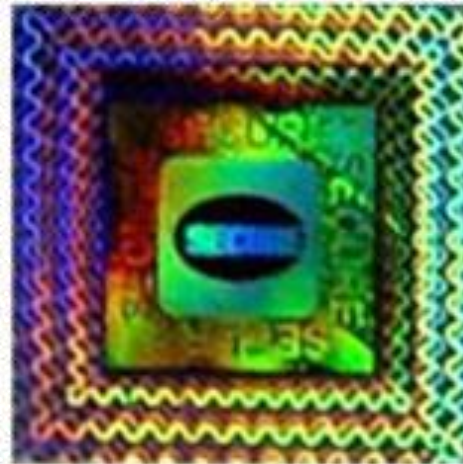


25 %

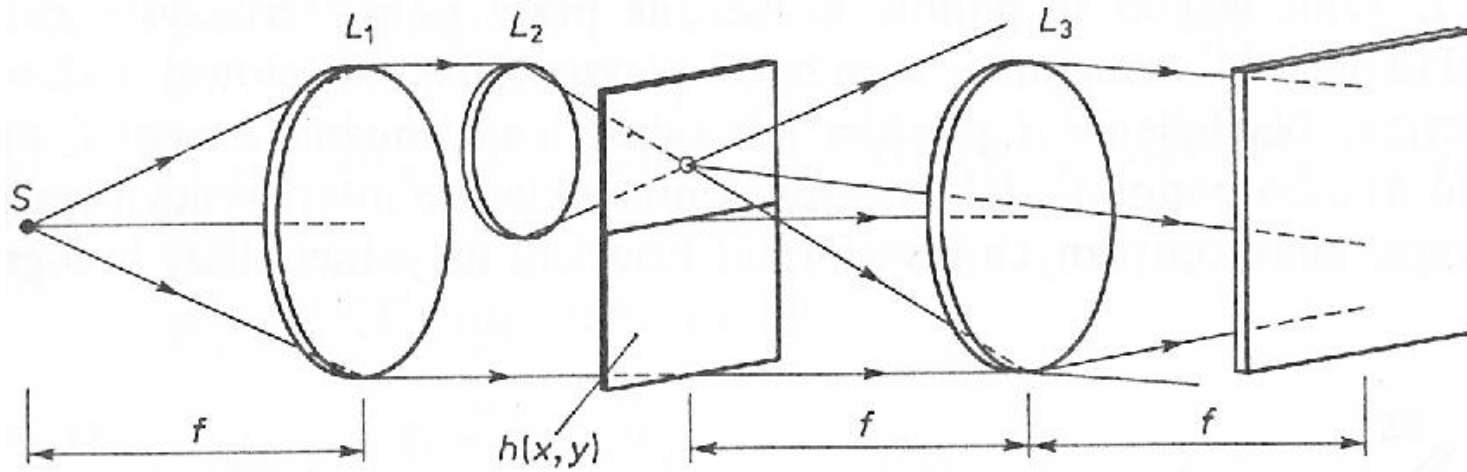


Zastosowania w życiu codziennym

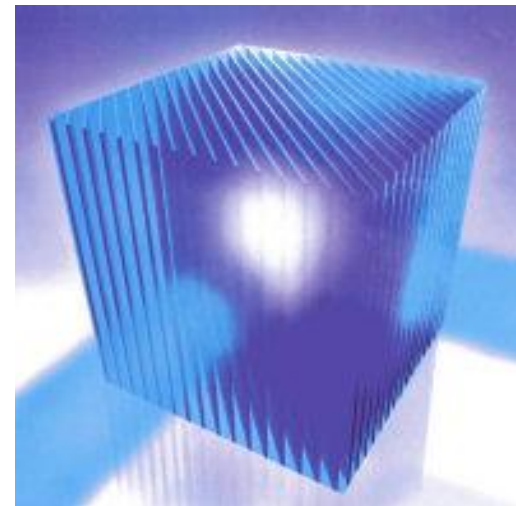
- środki zabezpieczające, bardzo trudne do podrobienia;
- gwarancja oryginalności produktu (np. płyty CD);
- materiały reklamowe – atrakcja i przyciągnięcie uwagi klienta;
- rejestracja kompozycji artystycznych i niedostępnych dla zwiedzających muzea dzieł sztuki
- szyfrowanie informacji



Pamięci holograficzne

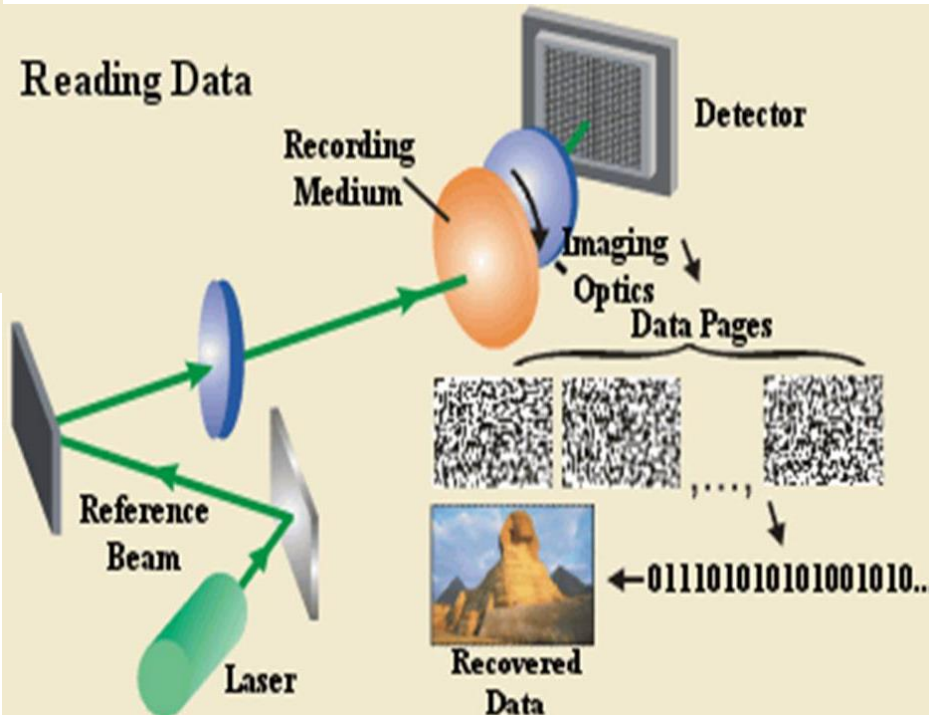
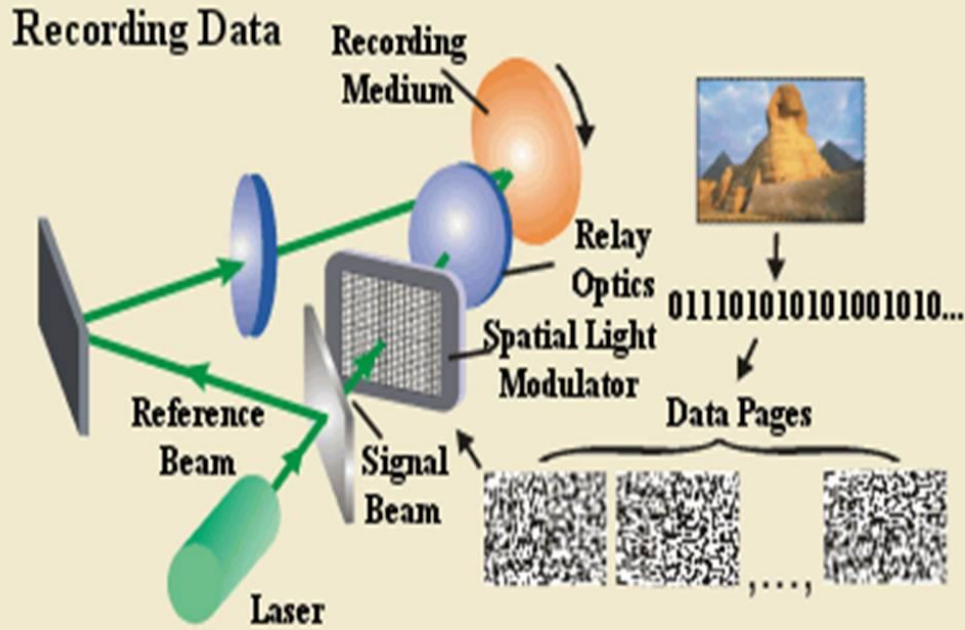


Pamięć skojarzeniowa – wystarczy niepełna informacja do odtworzenia zapisanych danych



Holografia

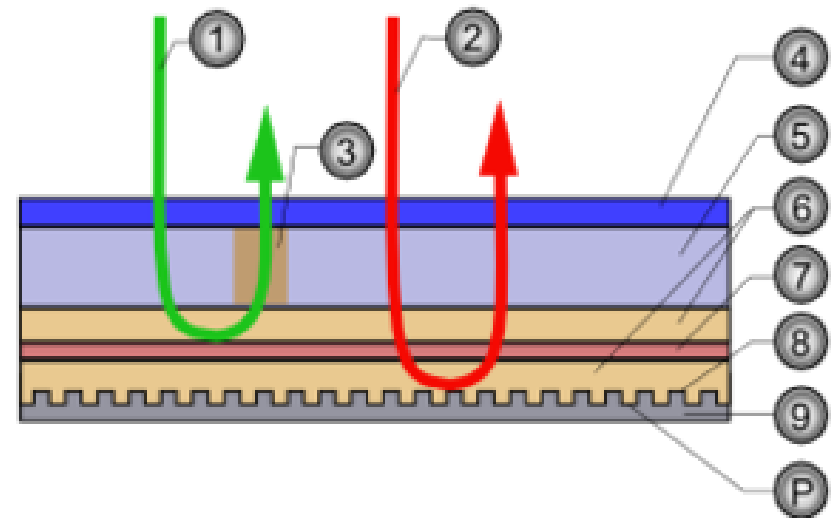
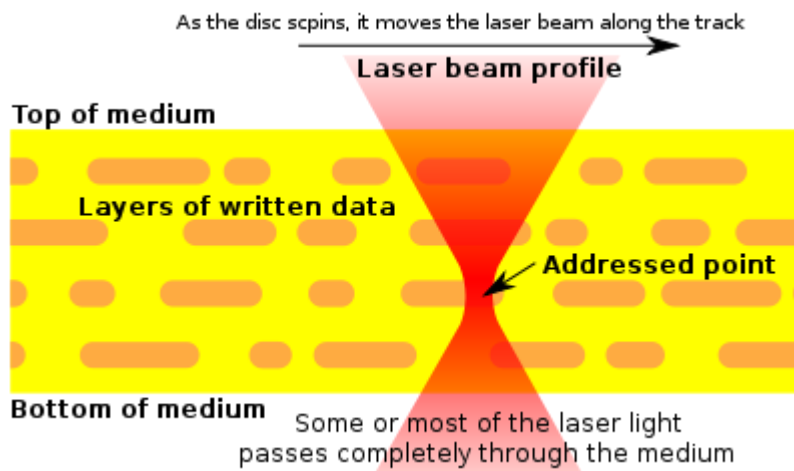
Pamięci holograficzne



Uniwersalny dysk holograficzny - Holographic Versatile Disc (6 TB)

Struktura płyty HVD

1. Zielony laser zapisu/odczytu (532nm)
2. Czerwony laser pozycjonujący/adresujący (650nm)
3. Hologram niosący informację
4. Warstwa poliwęglanowa
5. Warstwa fotopolimerowa (z danymi)
6. Warstwy dystansujące
7. Warstwa dichroiczna
8. Aluminiowa warstwa odbijająca
9. Podłoże przezroczyste
- P. PIT - wgłębienia

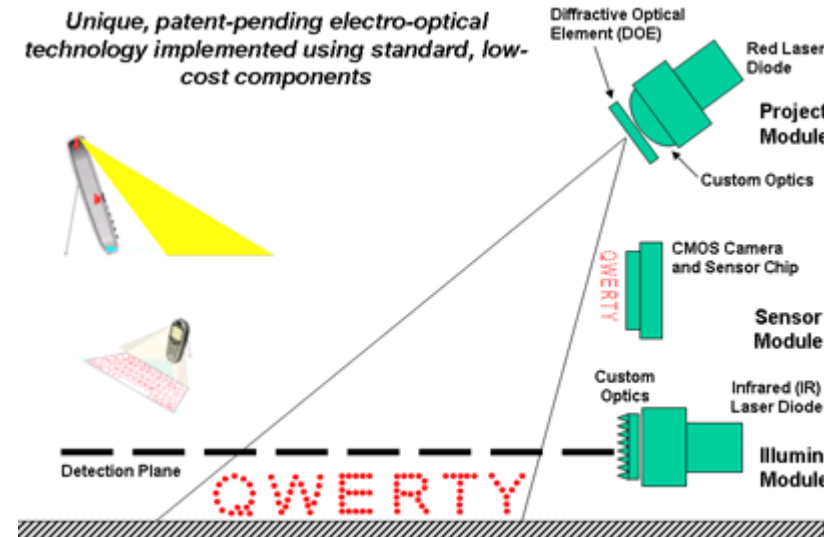


optyczne elementy holograficzne (HOE)

Elementy optyczne typu:

- Soczewka
- Pryzmat
- Zwierciadło
- Dzielnik wiązki
- Siatka

Wykonane metodami holograficznymi.



Holografia

Hologramy obrazowe



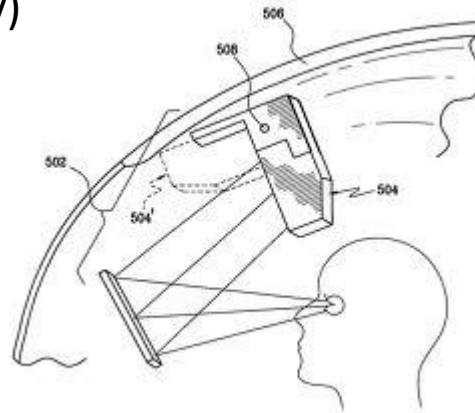
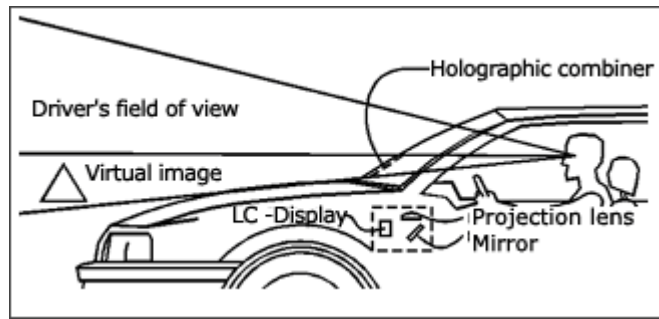
Holografia

zscape



Holografia

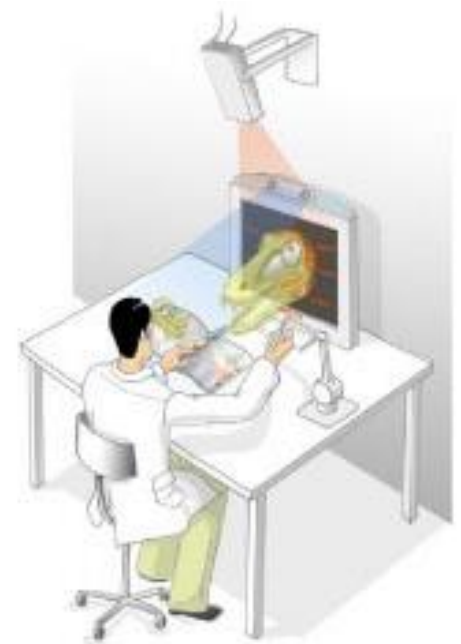
Wyświetlacze HUD (Head-Up Display)



Ta sama zasada

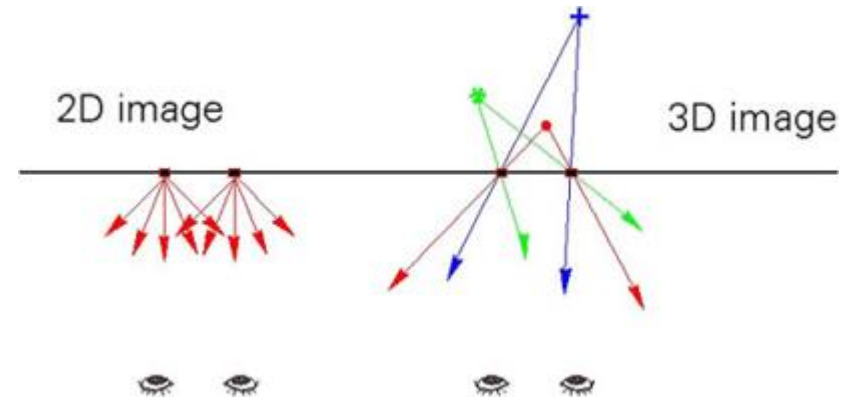
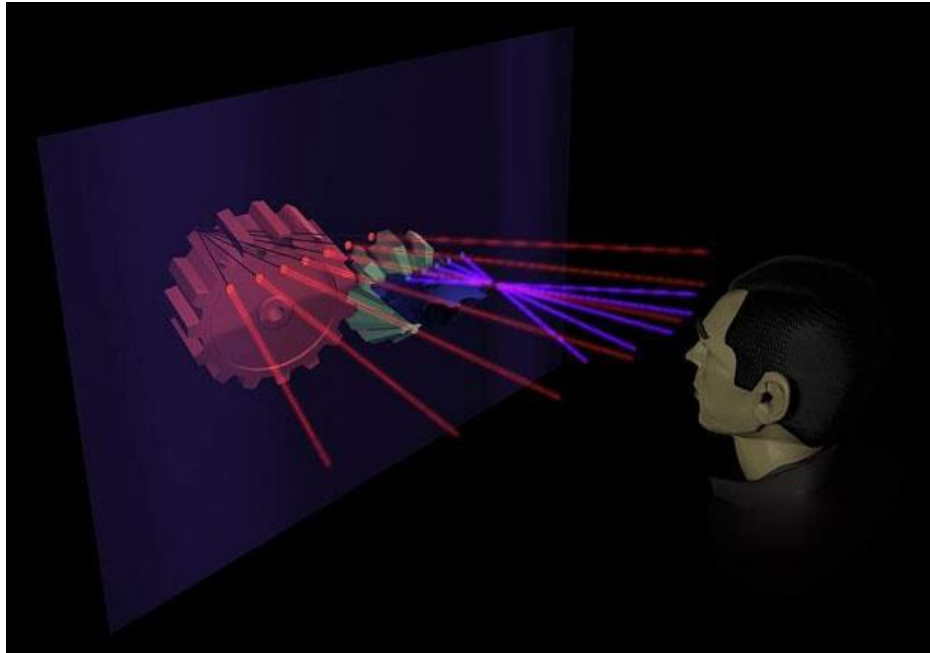


Wyświetlacze holograficzne

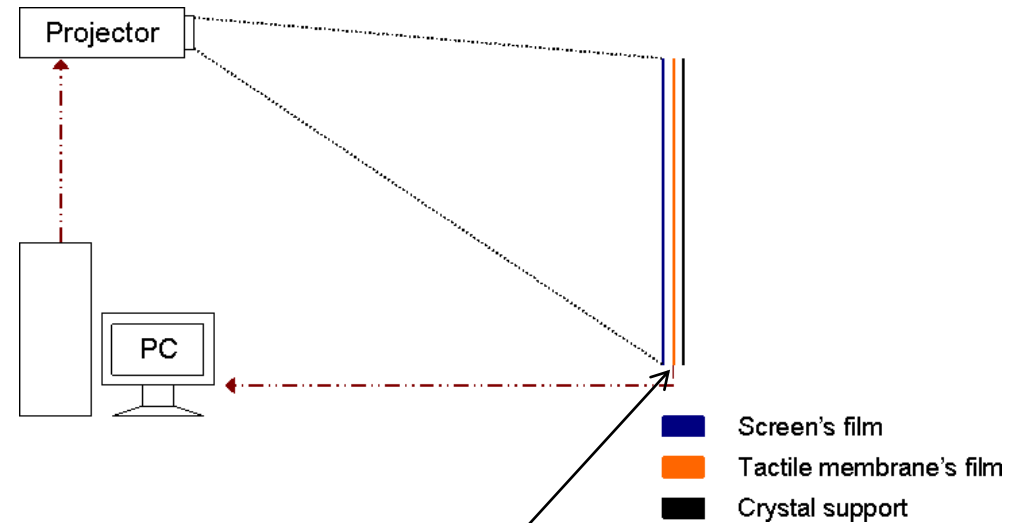


Holografia

holovizio



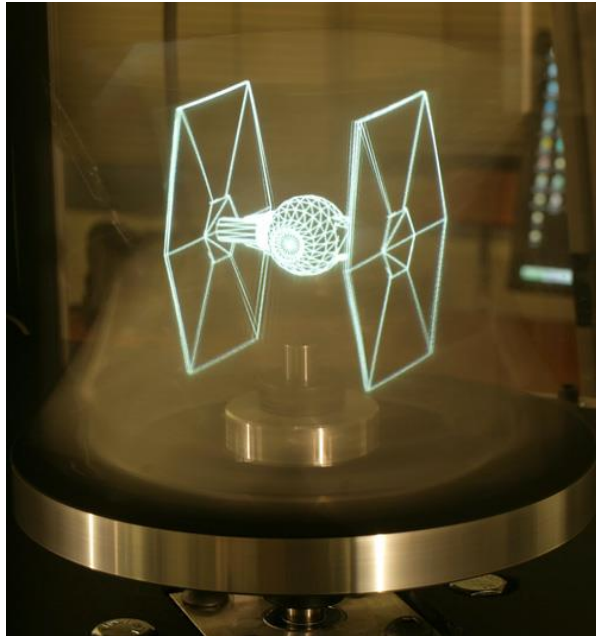
Holografia



Mikrosoczewki

Zapewniają ograniczone wrażenie głębi

Obracający się rozpraszacz

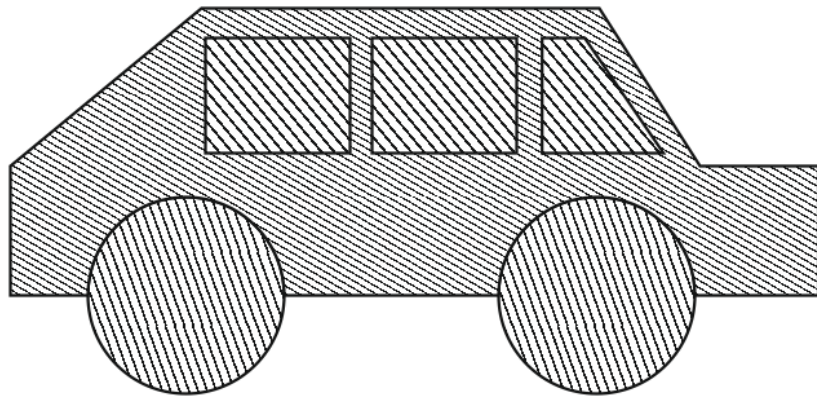


spinning mirror - "holographic diffuser"

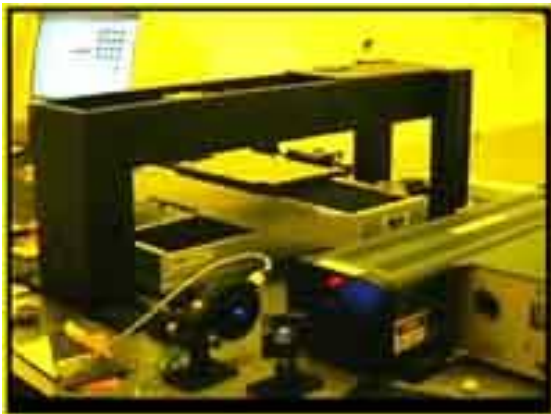
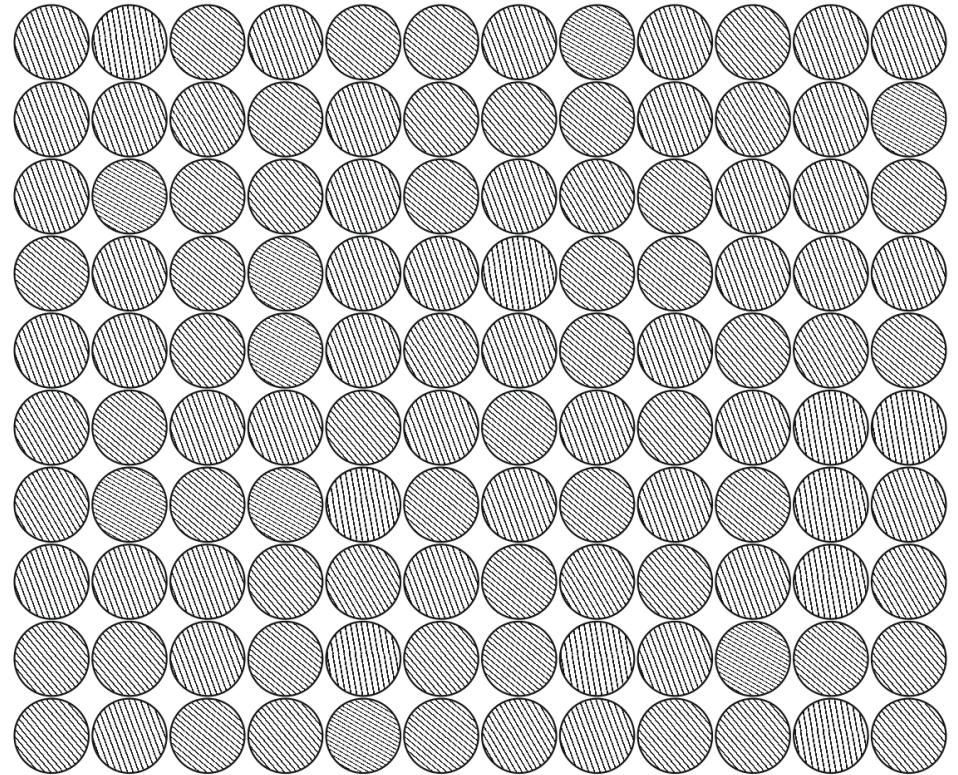


Drukarki holograficzne

Siatki dyfrakcyjne

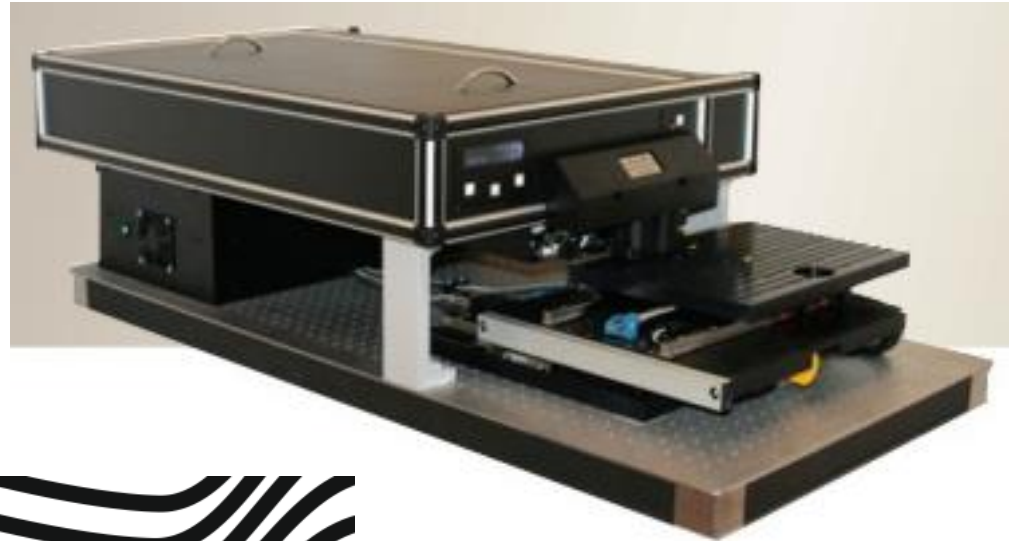


Dot-matrix hologram



Holografia

Kinemax (Polskie Systemy Holograficzne)



Kinegrams

