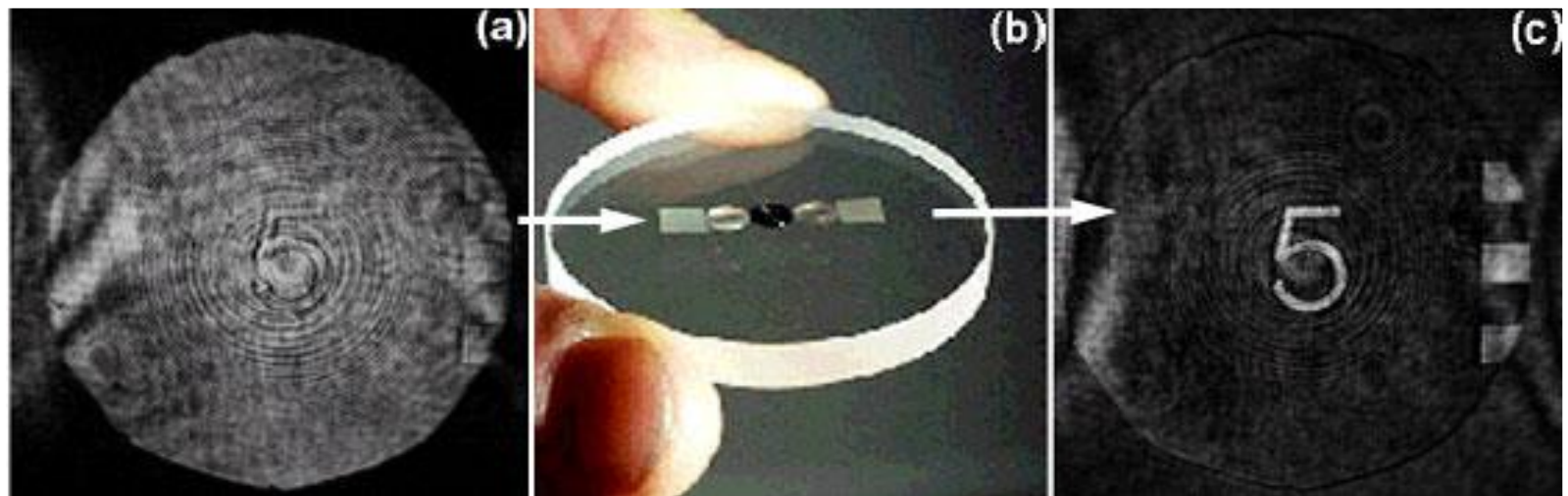
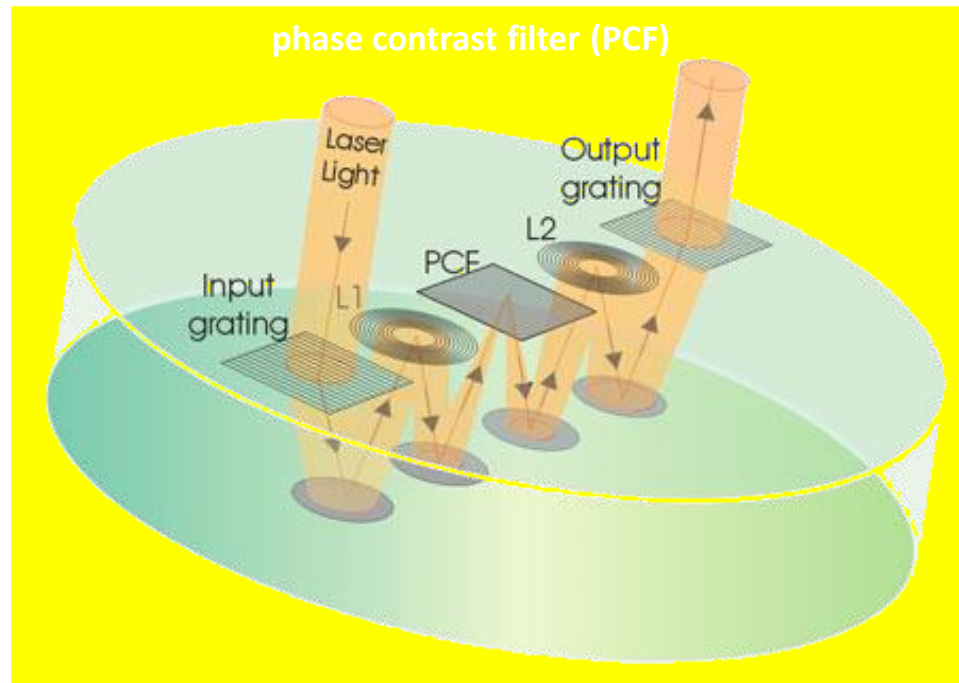


1100-4BW12, rok akademicki 2019/20

WSTĘP DO OPTYKI FOURIEROWSKIEJ

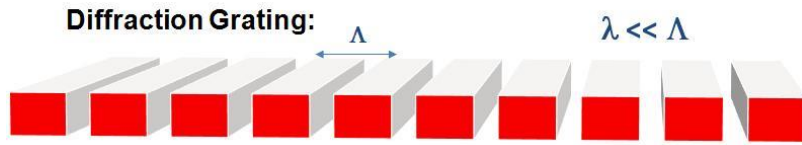
dr hab. Rafał Kasztelanic

Elementy dyfrakcyjne



Elementy dyfrakcyjne

Elementy podfalowe



- Klasyczna siatka dyfrakcyjna

Metastructure High Contrast Grating (HCG):

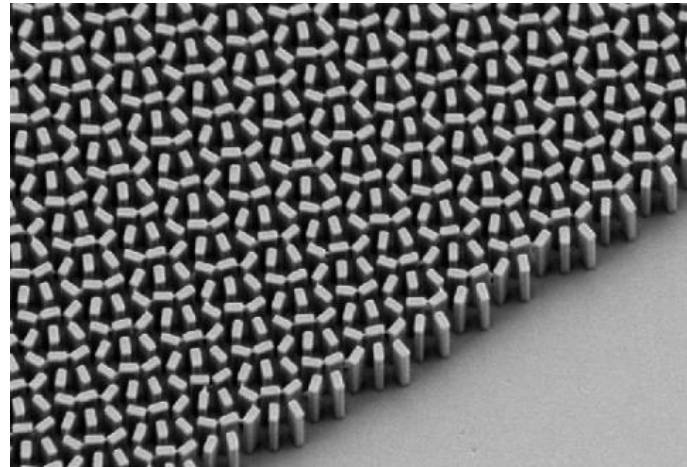
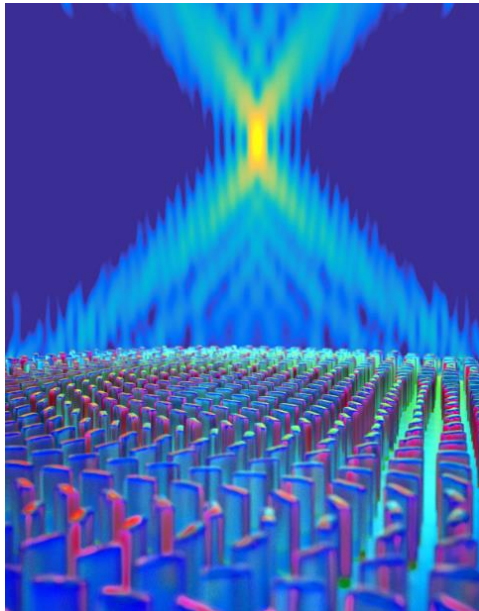


- Siatka podfalowa

Digital alloy:

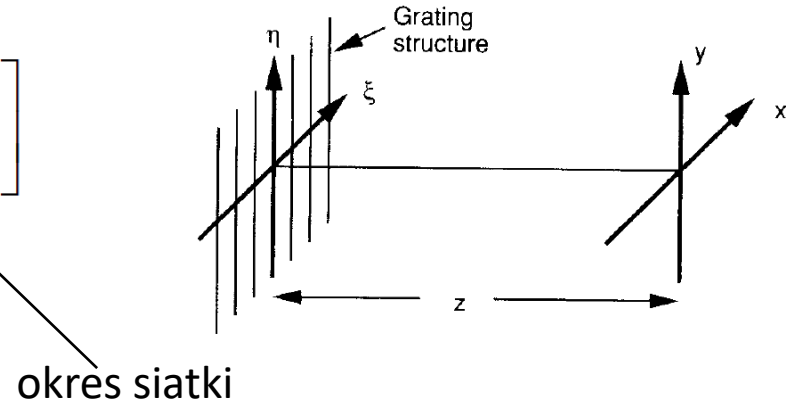


- Jednorodny wsp. załamania



Rozważmy dyfrakcję Fresnela na sinusoidalnej siatce dyfrakcyjnej:

Transmitancja siatki:
$$t_A(\xi, \eta) = \left[\frac{1}{2} + \frac{m}{2} \cos\left(\frac{2\pi\xi}{L}\right) \right]$$



Funkcja przenoszenia
Dla dyfrakcji Fresnela:

$$H(f_x, f_y) = e^{ikz} \exp[i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)]$$

Transformata Fouriera siatki:

$$\mathfrak{F}\left[\frac{1}{2} + \frac{m}{2} \cos(2\pi\xi/L)\right] = \frac{1}{2} \delta(f_x, f_y) + \frac{m}{4} \delta\left(f_x \pm \frac{1}{L}, f_y\right)$$

Liczmy obraz w odległości $1/L$:

$$H\left(\pm \frac{1}{L}, 0\right) = \exp\left(-\frac{i\pi\lambda z}{L^2}\right)$$

Obliczamy FT^{-1} :

$$U(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{m}{4} e^{\frac{-i\pi\lambda z}{L^2}} e^{\frac{+2\pi x}{L}} + \frac{m}{4} e^{\frac{-i\pi\lambda z}{L^2}} e^{\frac{-2\pi x}{L}} = \frac{1}{2} \left[1 + m e^{\frac{-i\pi\lambda z}{L^2}} \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]$$

Ostatecznie natężenie:

$$I(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 + 2m \cos\left(\frac{\pi\lambda z}{L^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) + m^2 \cos^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]$$

Obraz Talbota (dokładna kopia): $z=2nL^2/\lambda$

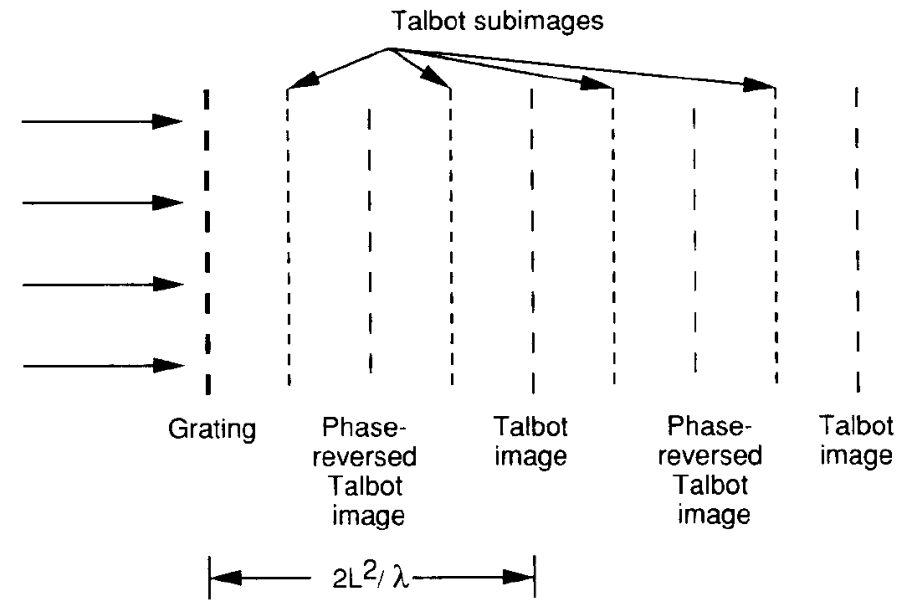
$$I(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 + m \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]^2$$

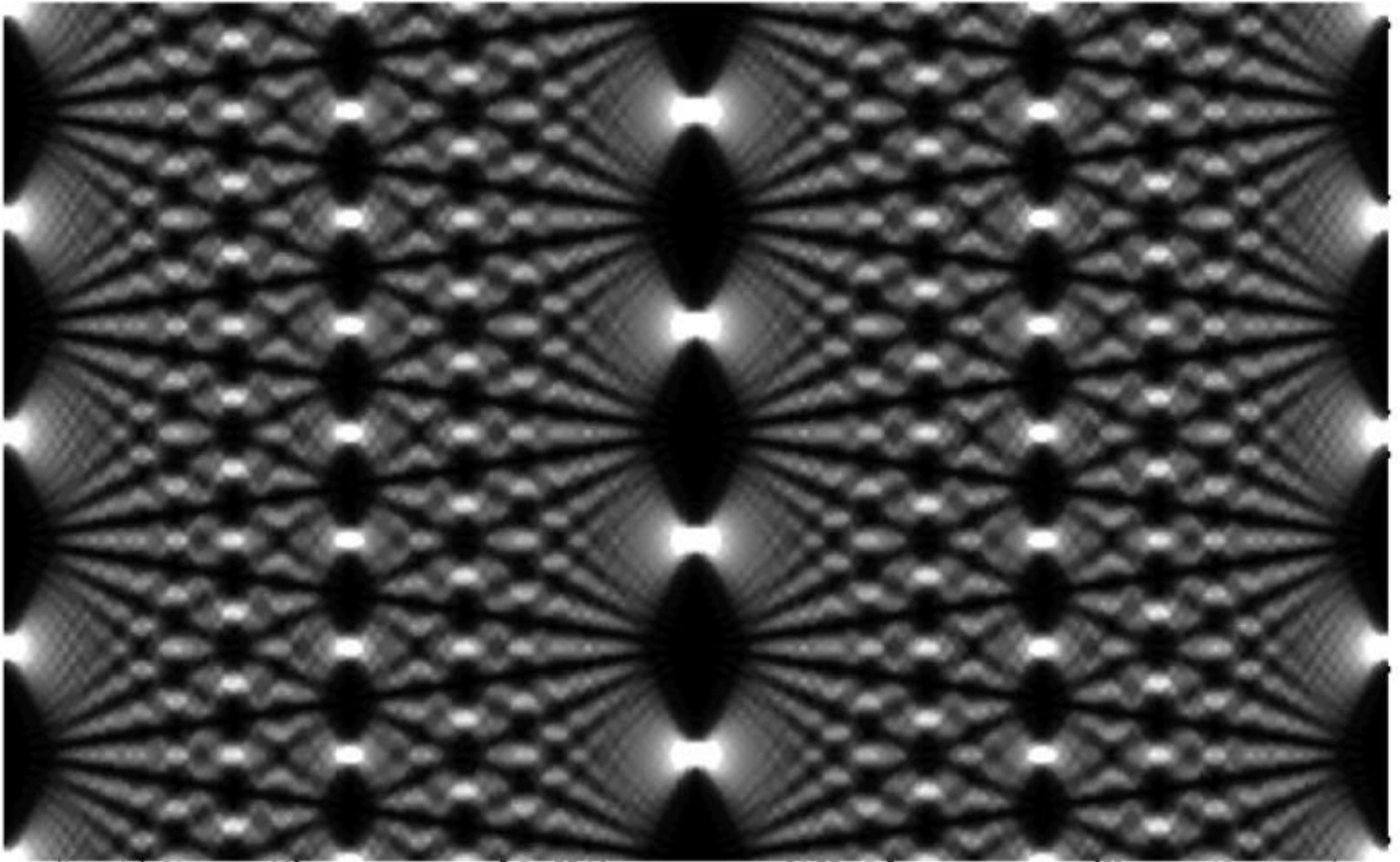
Obraz o odwróconym kontraście: $z=(2n+1)L^2/\lambda$

$$I(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 - m \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]^2$$

Podobraz Talbota: $z=(n - 0,5)L^2/\lambda$

$$I(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 + m^2 \cos^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] = \frac{1}{4} \left[\left(1 + \frac{m^2}{2} \right) + \frac{m^2}{2} \cos\left(\frac{4\pi x}{L}\right) \right]$$





- 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:

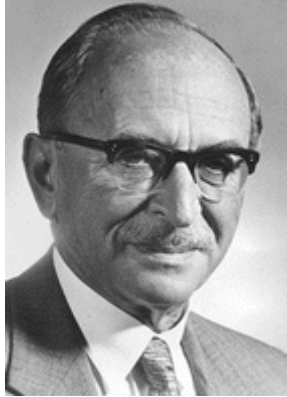


Rok	wydarzenie
1920	Mieczysław Wolfke przedstawia podstawową zasadę wykorzystywaną w holografii
1947	Dennis Gabor formułuje podstawy teoretyczne holografii
1960	Wynalezienie lasera umożliwia rozwój holografii jako nauki i techniki. Opracowanie przez Emmeta Leitha i Jurisa Upatnieksa obecnie stosowanego 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



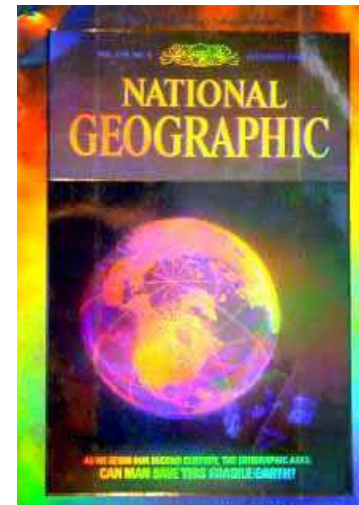
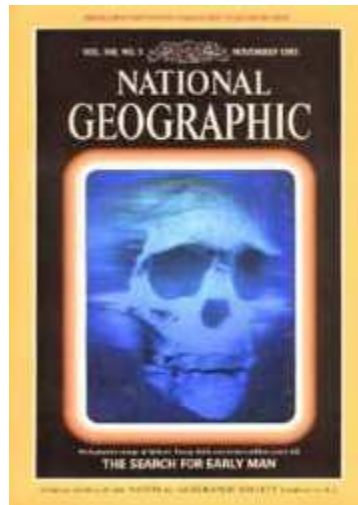
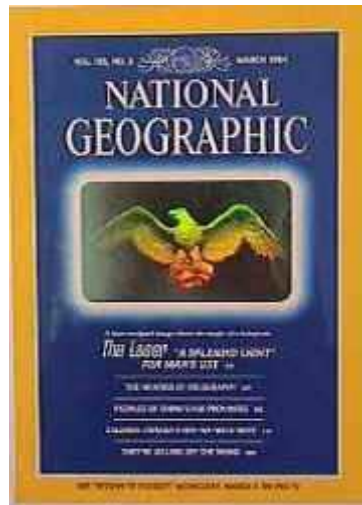
Juris Upatnieks



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.

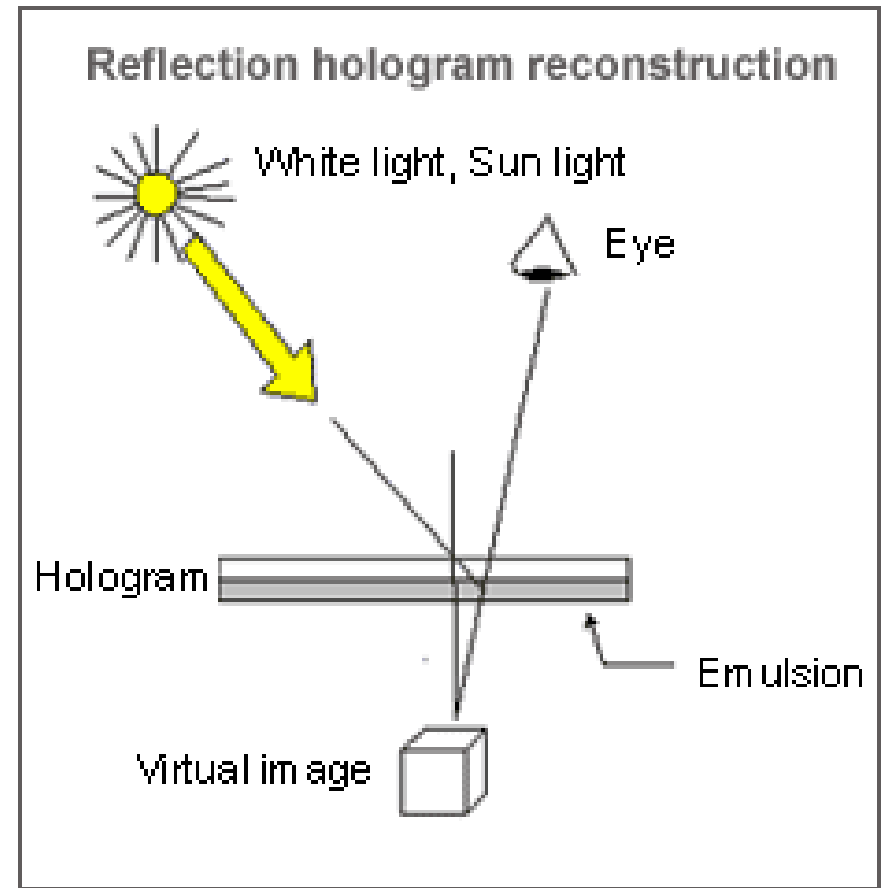
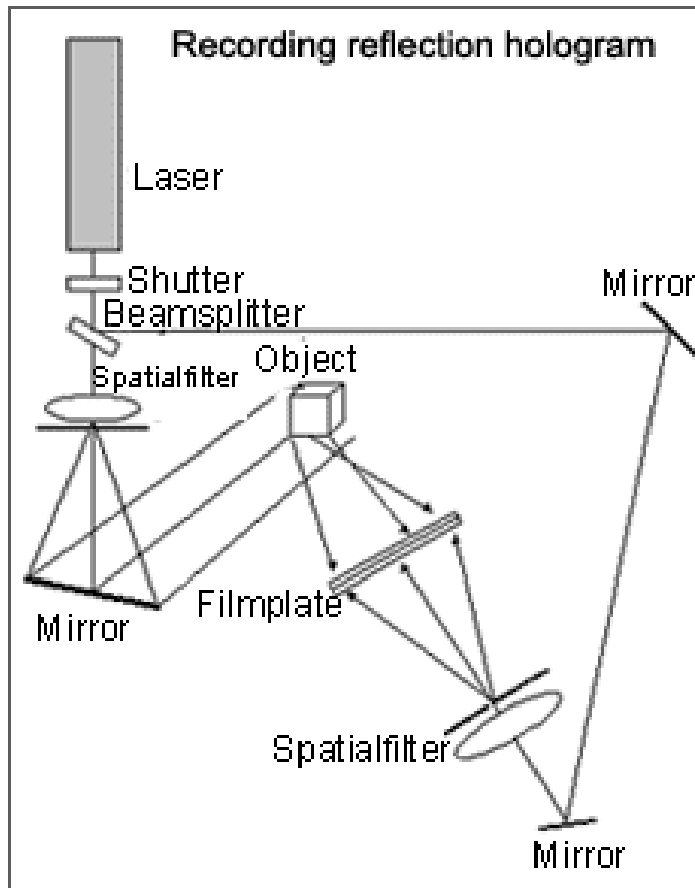
Hologram objętościowy

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

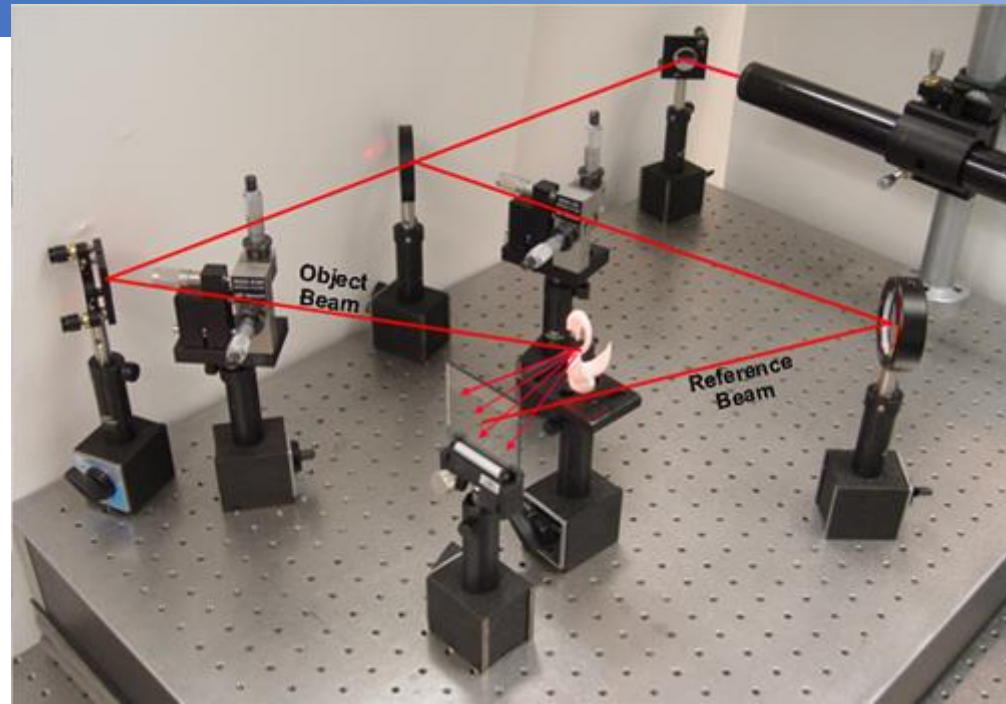
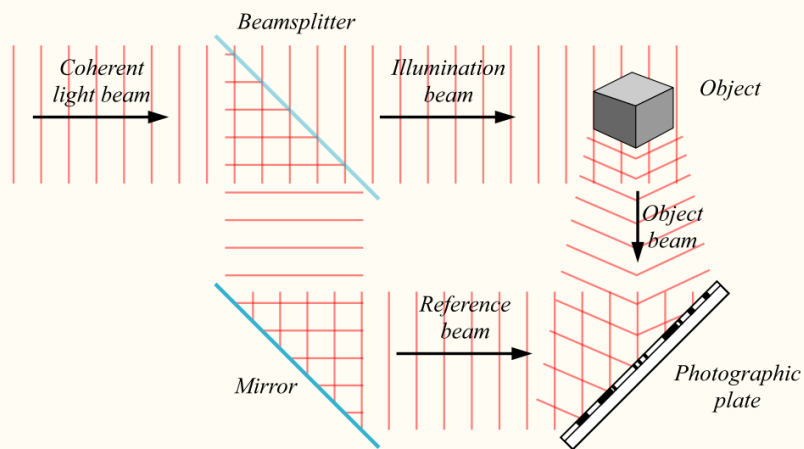


Holografia

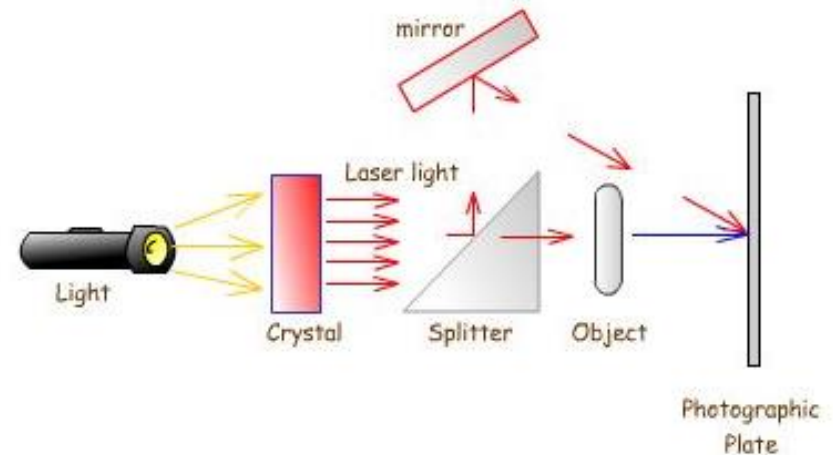
Hologramy transparentne - zapis

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

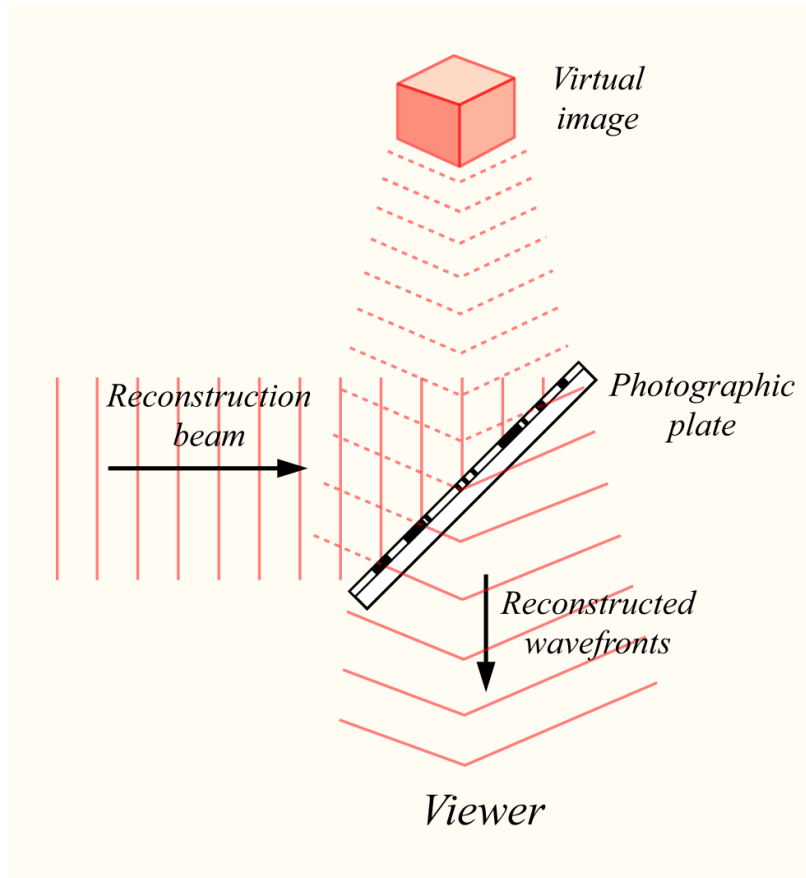
Obiekt odbiciowy



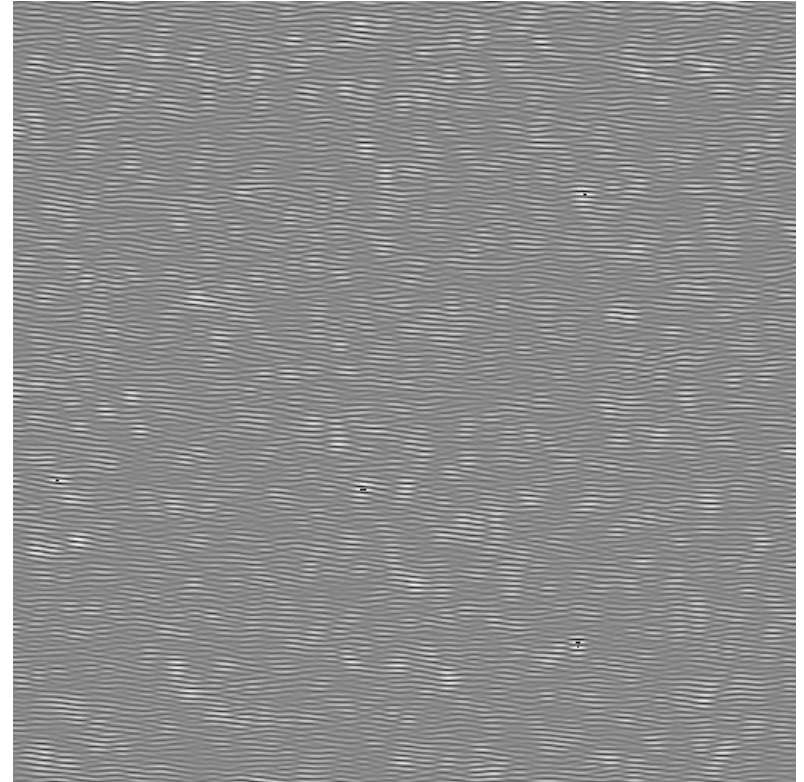
Obiekt transparentny



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

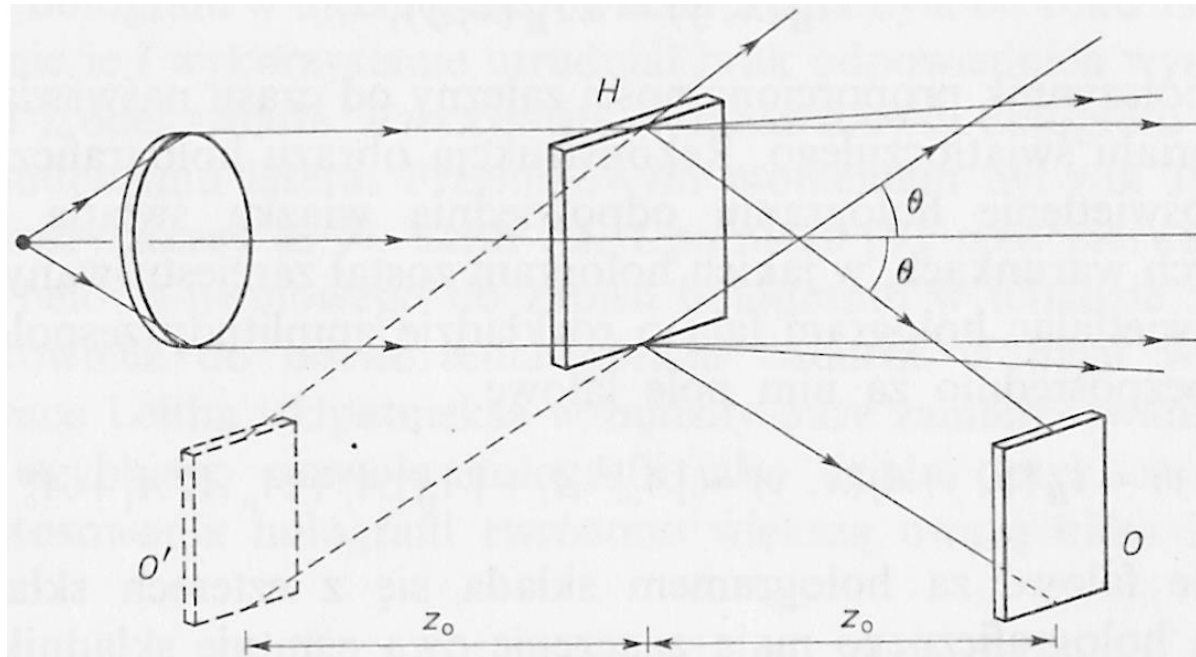
Quasi-płaska fala o amplitudzie zmodyfikowanej
rozkładem intensywności w wiązce przedmiotowej

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

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

Równomiernie osłabiona
Fala płaska prostopadła do hologramu

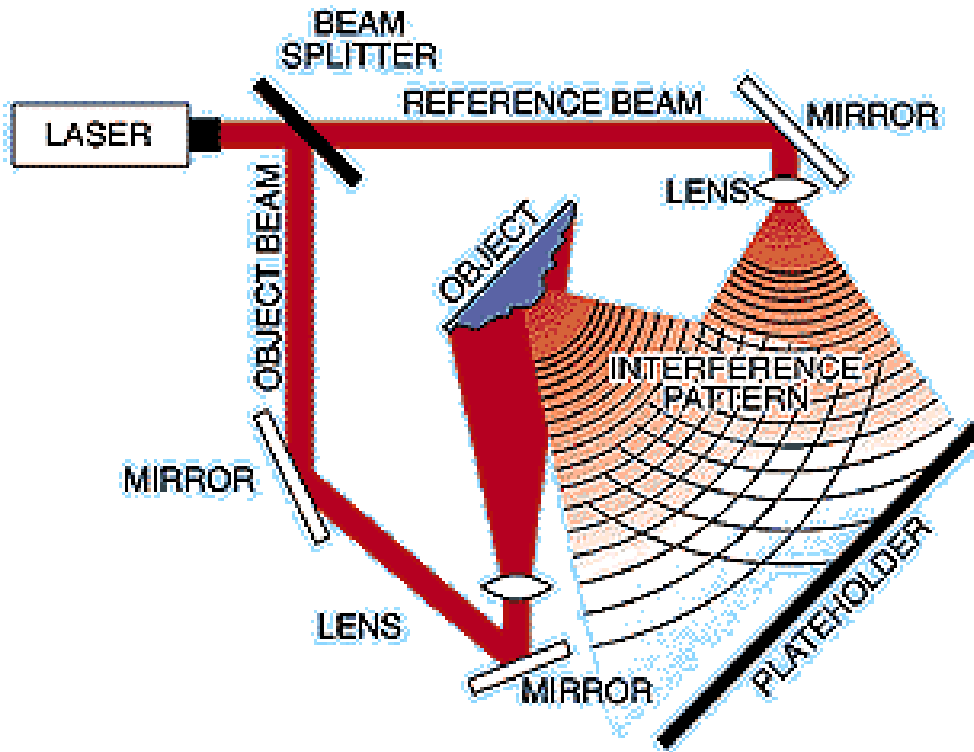
Wiązka rozbieżna rozchodząca się w kierunku θ
Proporcjonalna do amp. zesp. fali przedmiotowej.
Obraz pozorny w takiej samej odległości jak przy rejestracji



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.

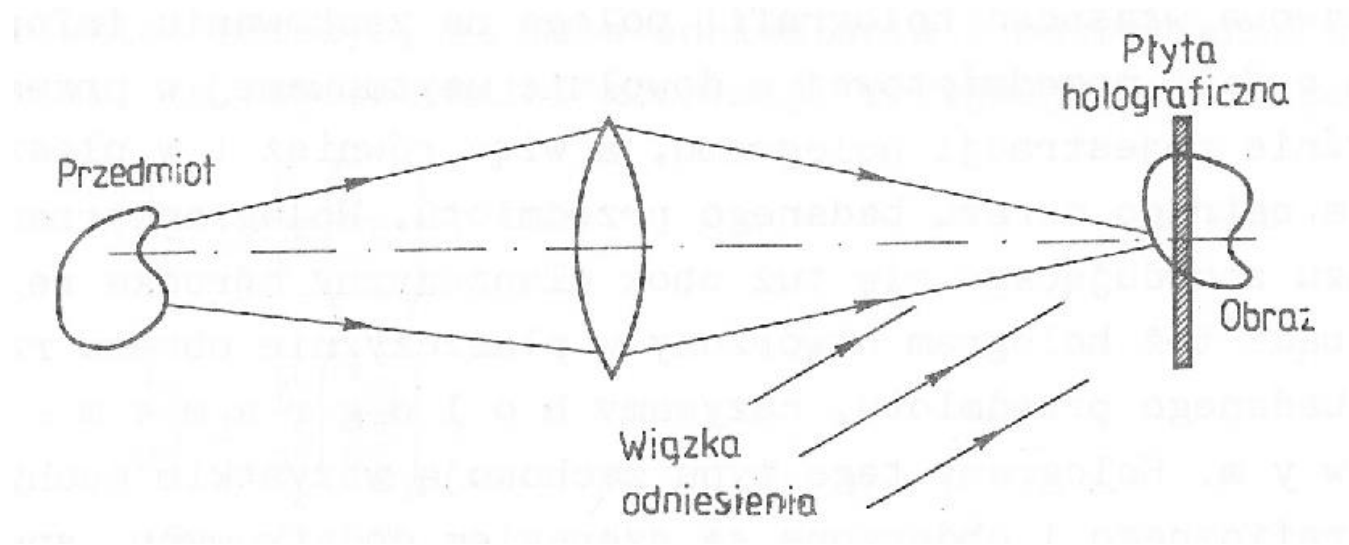


Zmieniając położenie źródła fali sferycznej odczytującej względem położenia fali referencyjnej zmienia się skala rekonstruowanego przedmiotu.



Hologramy obrazowe

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

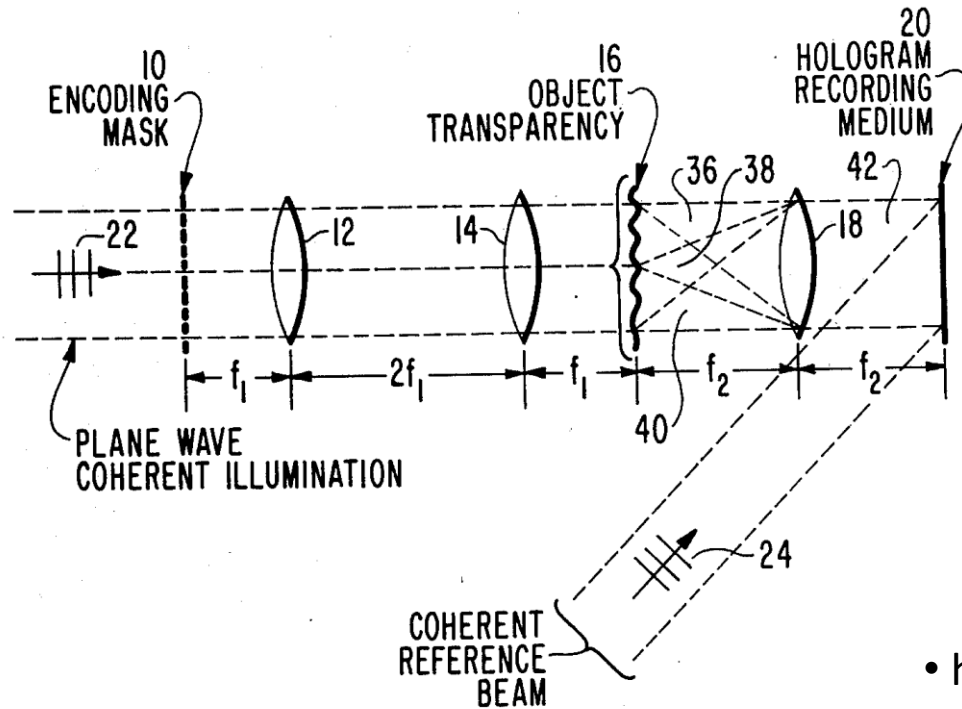


Dzięki temu przy rekonstrukcji obraz pojawia się blisko płaszczyzny hologramu z pełnym wrażeniem 3D i paralaksą.

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

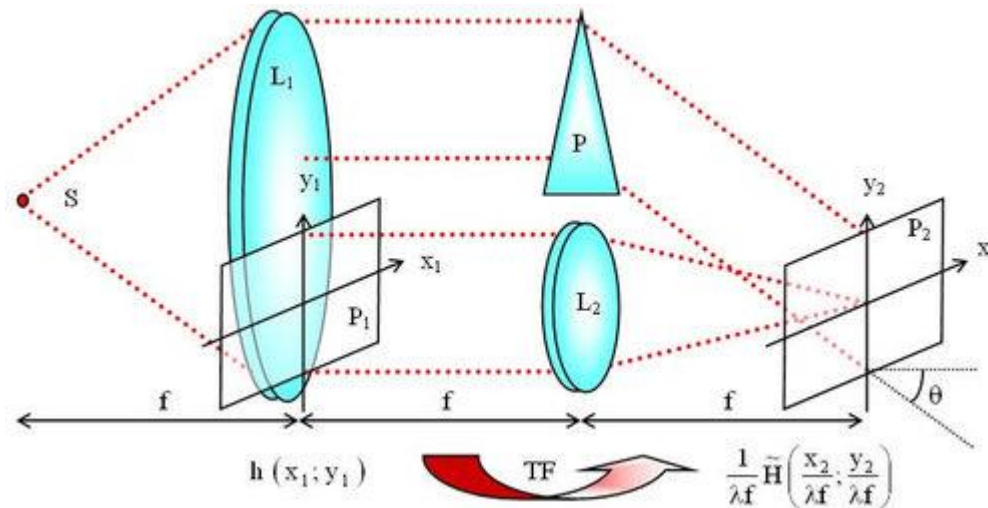
Hologramy gdzie zapisywany jest wynik interferencji fali referencyjnej z widmem obiektu:



- 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:

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

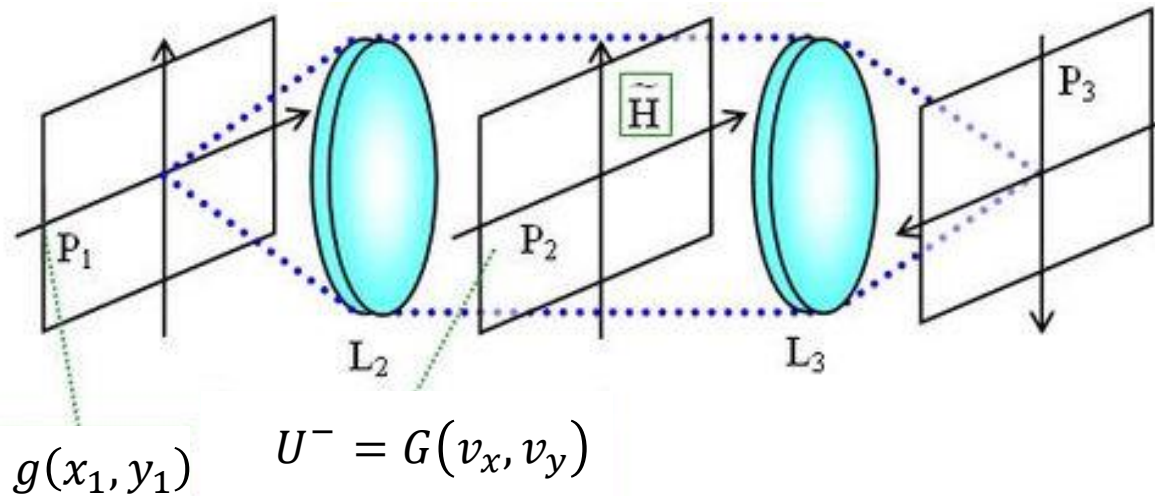
Hologram Fourierowski

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

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

Hologram Fourierowski

Filtracja:



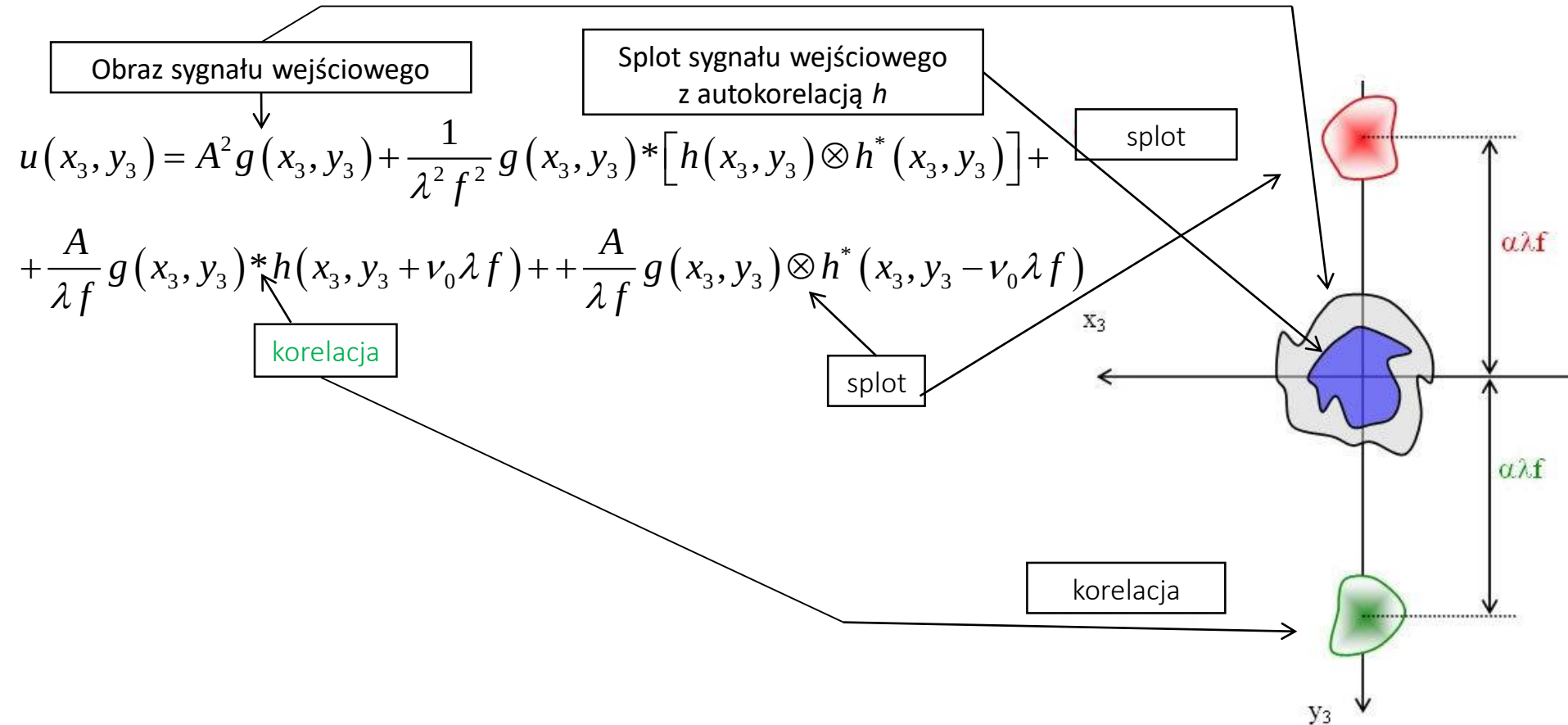
Transformata Fouriera przezroczą P_1 (z zapisanym sygnałem g) oświetla filtr H :

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

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

Hologram Fourierowski

Po kolejnej TF w płaszczyźnie P_3 otrzymujemy:



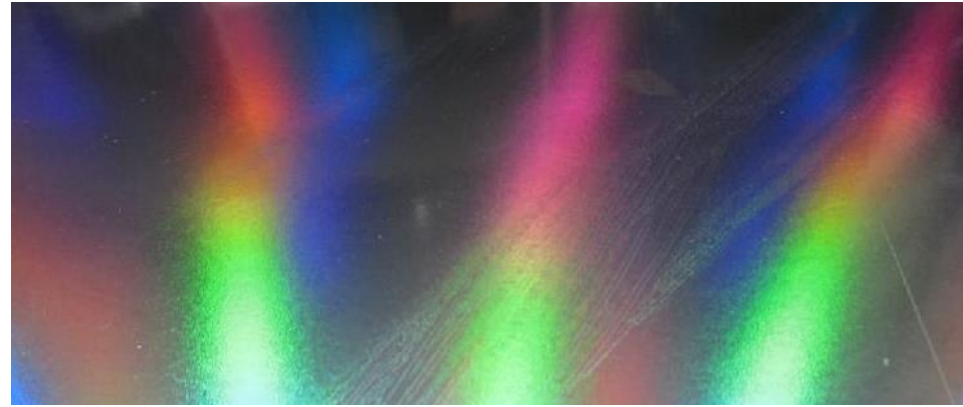
Holografia

Hologramy tęczowe

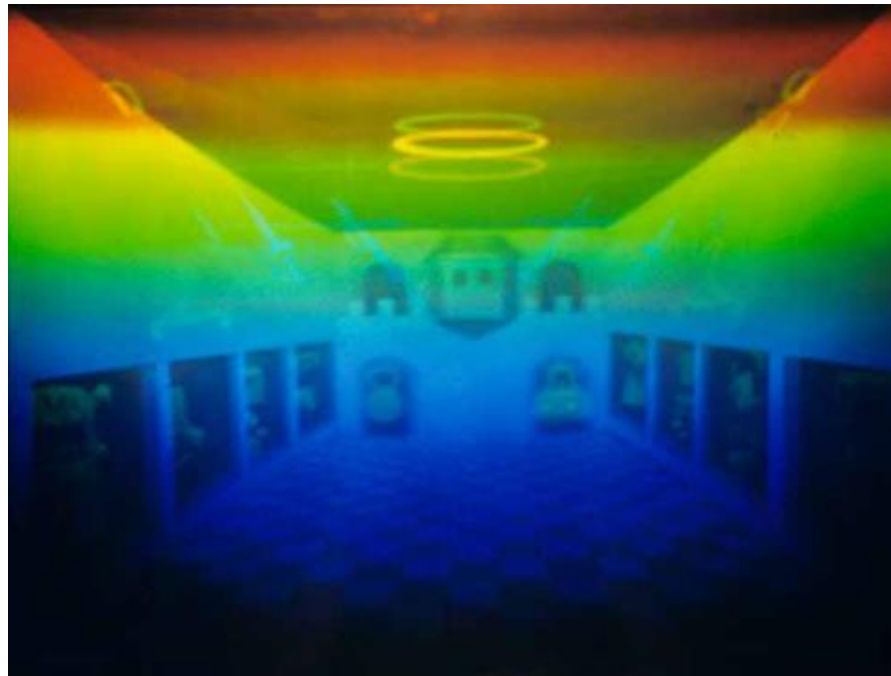
Problem przy oświetleniu niekoherentnym:

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

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



Jak uzyskać ostre obrazy przy oświetleniu rozciągotym światłem białym?

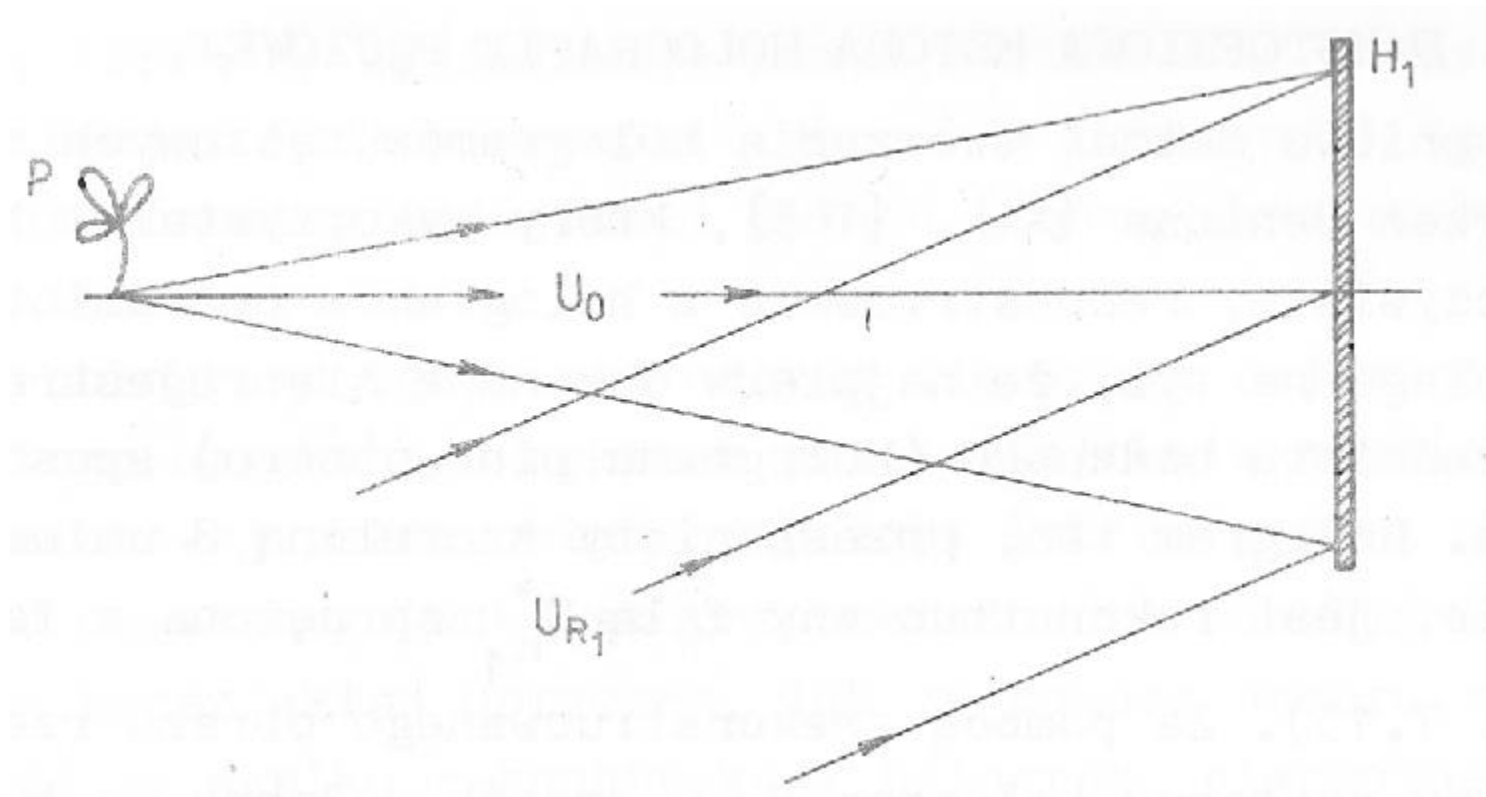


Hologramy tęczowe

Metoda dwustopniowa:

1. Zapis zwykłego hologramu obrazowego (H_1),

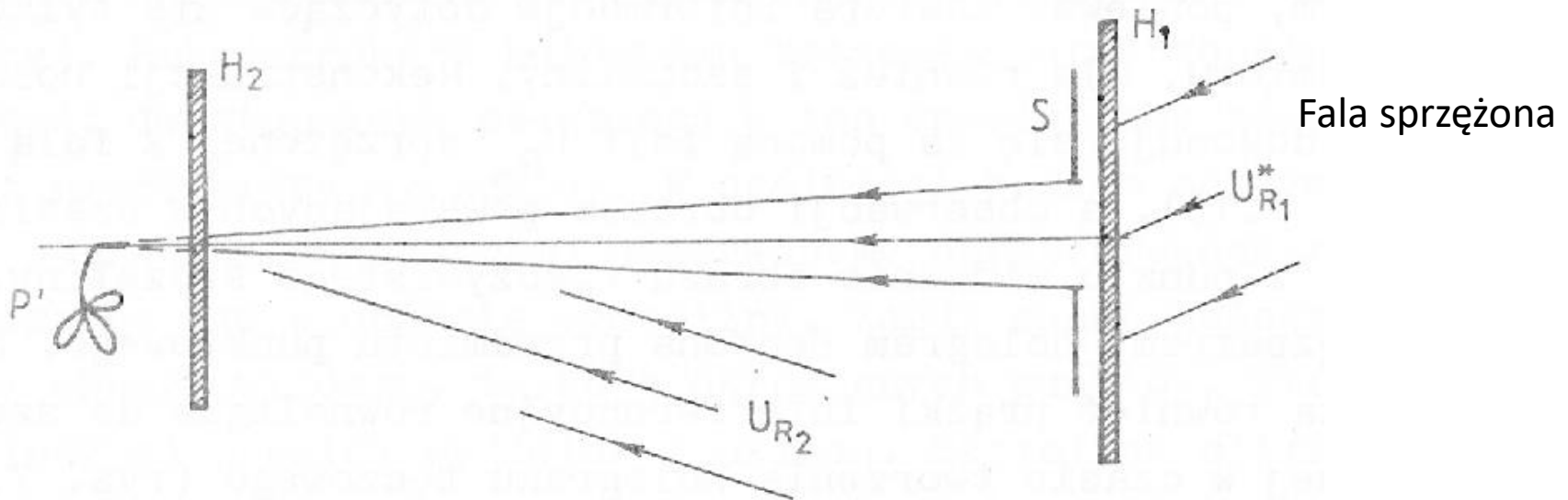
Zapis H_1 :



Hologramy tęczowe

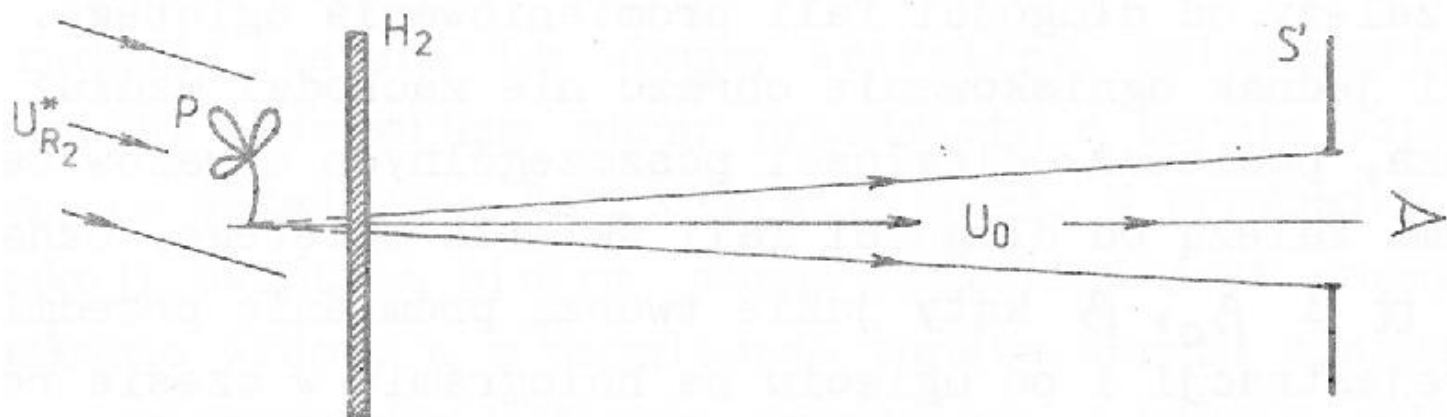
Zapis hologramu H_2 :

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.

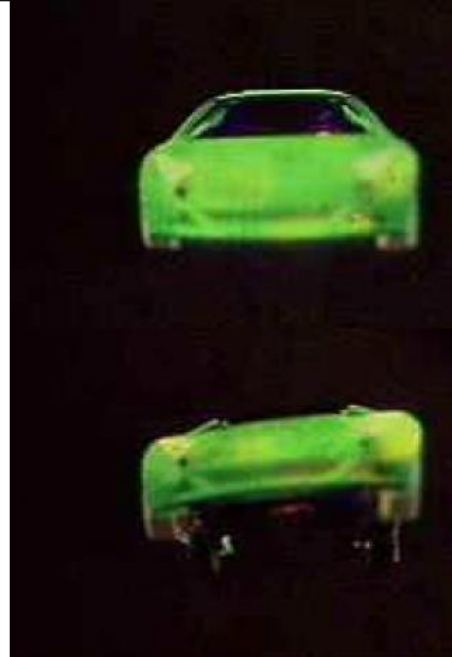
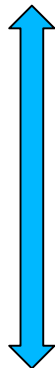
Holografia

Hologramy tęczowe

Paralaksa:



Tak albo tak, nie jednocześnie
(hologramy tęczowe)



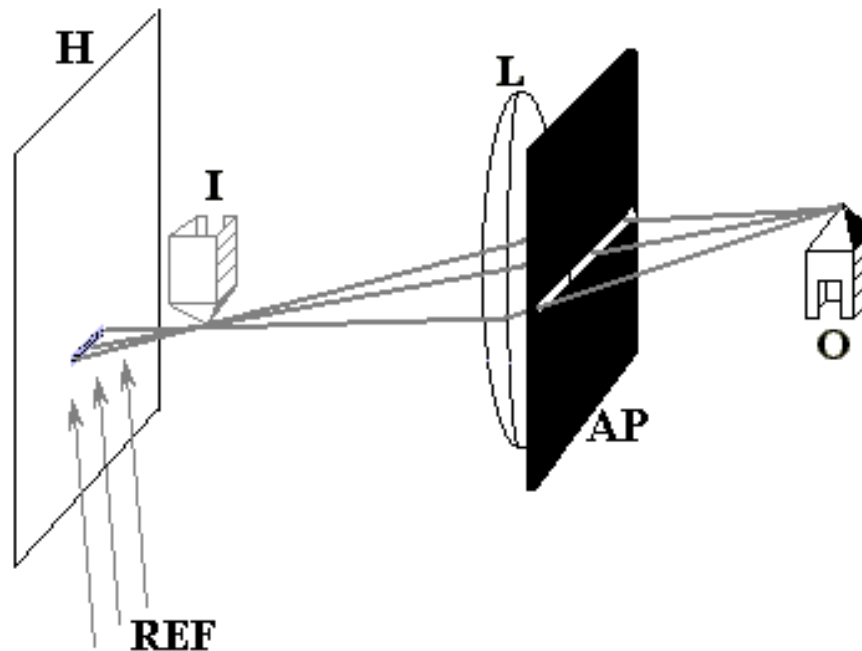
Hologramy tęczowe

Metoda jednostopniowa:

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

Na hologramie ostra 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.

