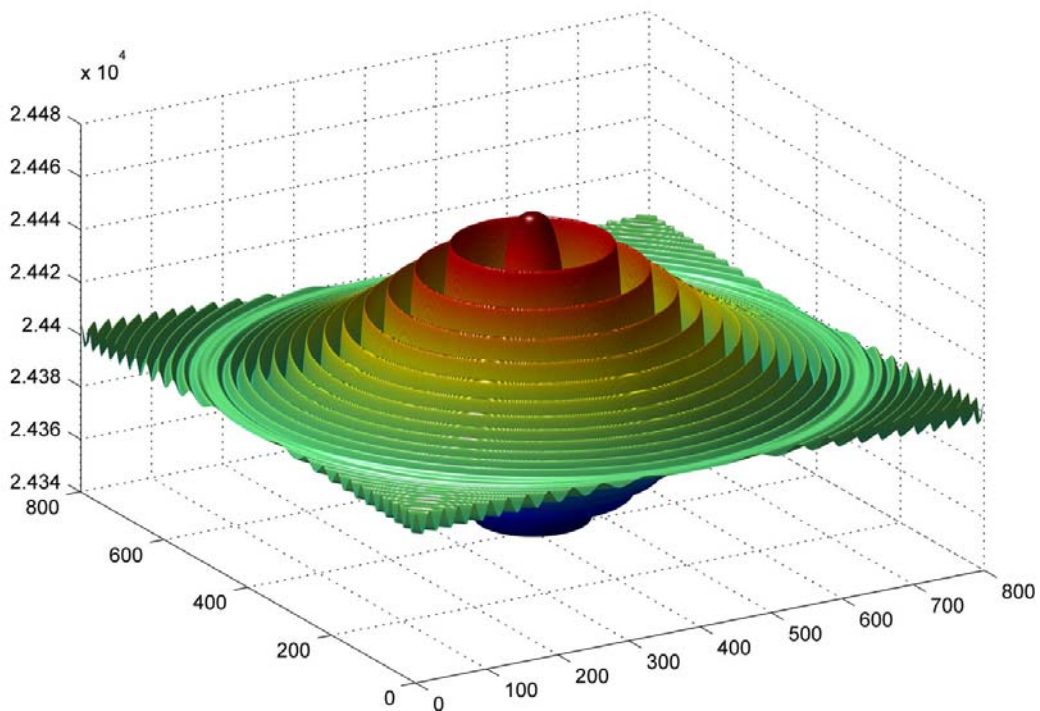


Skaitmeninēs holografijas principai



Tadas Balčiūnas

Turinys

- Įvadas
 - Apibrėžimai
- Furje optikos pagrindai
 - Tiesinių sistemų harmoninė analizė
 - Amplitudinė ir dažninė moduliacija
- Holografijos principai
 - Optinis hologramos užrašymas
 - Hologramos skaitmeninis modeliavimas
 - Hologramos optinis atstatymas
 - Hologramos skaitmeninis atstatymas
- Fazinio kontrasto vaizdai
 - Pritaikymas
 - Kiti metodai fazinio kontrasto vaizdų gavimui
 - Kiekybinis fazinio vaizdo vertinimas
- Skaitmeninis holografinis mikroskopas
- Mano rezultatai

Įvadas

- Holografijos idėja – Dennis Gabor, 1948m.
- Idėja, kad galima atstatyti hologramą su kompiuteriu, žinoma jau daugiau kaip 35 metus.
- Pirmieji taikymai – biologijoje ir medicinoje

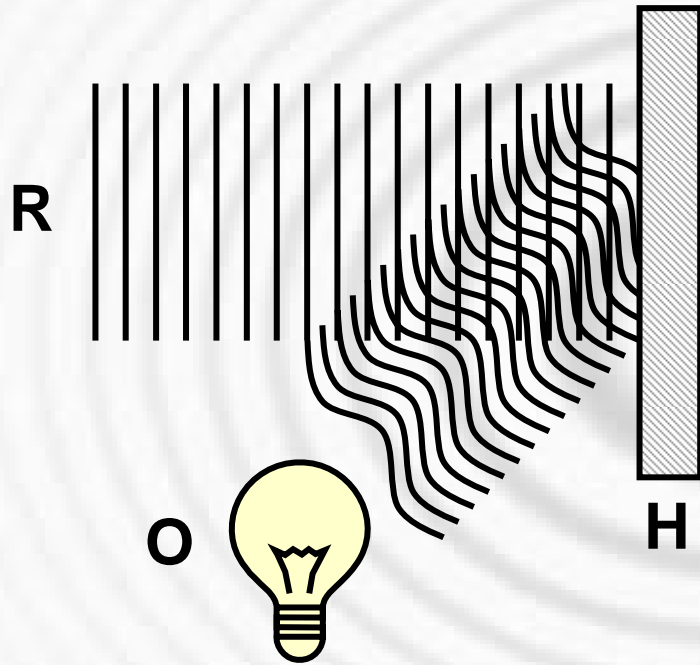
Skaitmeninė Holografija

Hologramos
skaitmeninis
užrašymas

Hologramos
skaitmeninis
atstatymas

Hologramos optinis užrašymas

Objekto banga **O** suklojama kampu su atramine banga **R**:



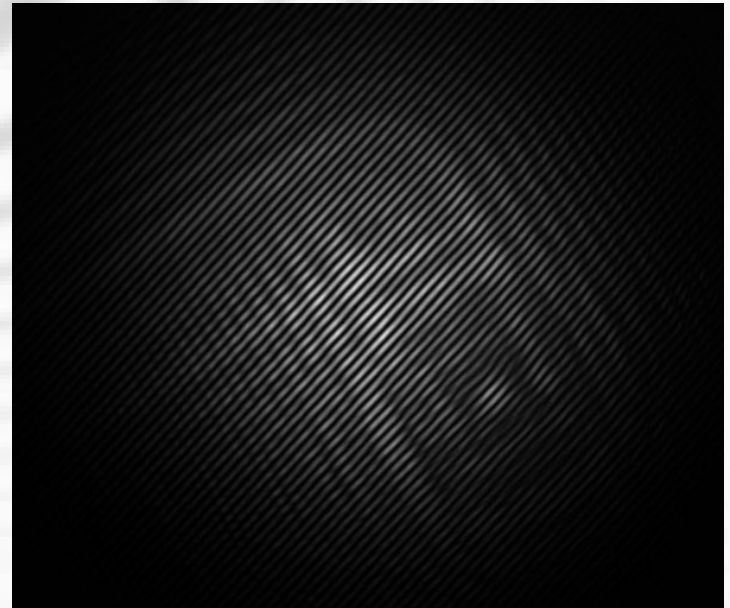
Laukas hologramos plokštumoje:

$$U(x, y) = R + O$$

Intensyvumas hologramos plokštumoje:

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^*$$

O - Koherentinę spinduliuotę skleidžiantis objektas, **R** – atraminis pluoštas, **H** - hologramos registravimo plokštuma



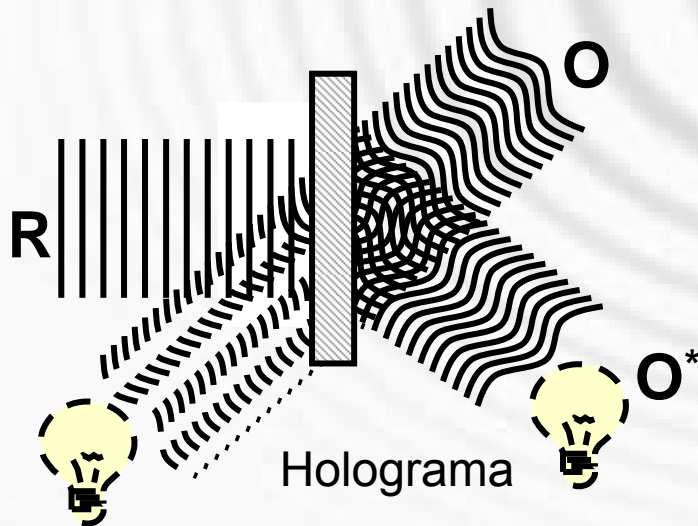
Hologramos atstatymas

Gardelės pralaidumo f-ja proporcinga intensyvumo pasiskirstymui užrašymo metu:

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^* O + R O^*$$

Atraminio pluošto difrakcija pro hologramos gardelę:

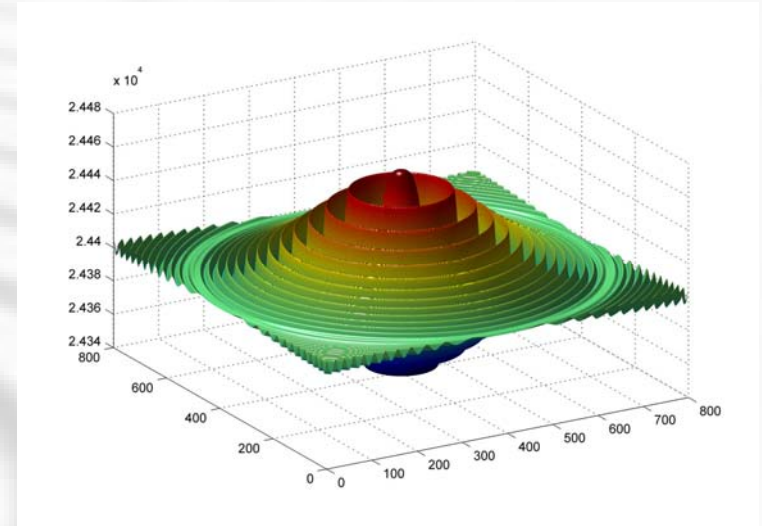
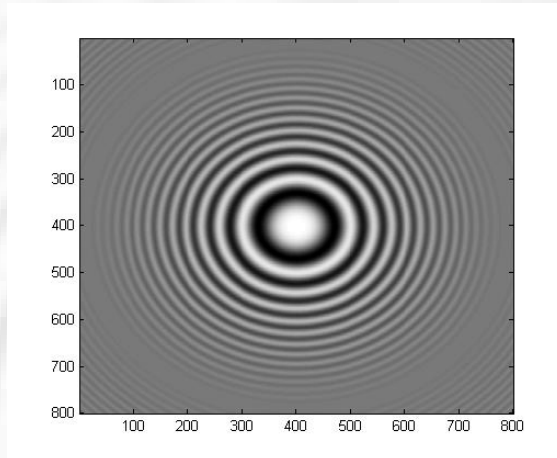
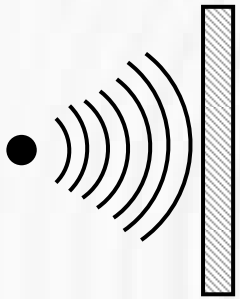
$$\Psi = R \cdot I_H = \underbrace{R \cdot |R|^2 + R \cdot |O|^2}_{\text{Nedifragavusi šviesa}} + \underbrace{O \cdot |R|^2}_{\text{Menamasis atvaizdas}} + \underbrace{O^* \cdot R^2}_{\text{Tikrasis atvaizdas}}$$



Hologramos atstatymo schema

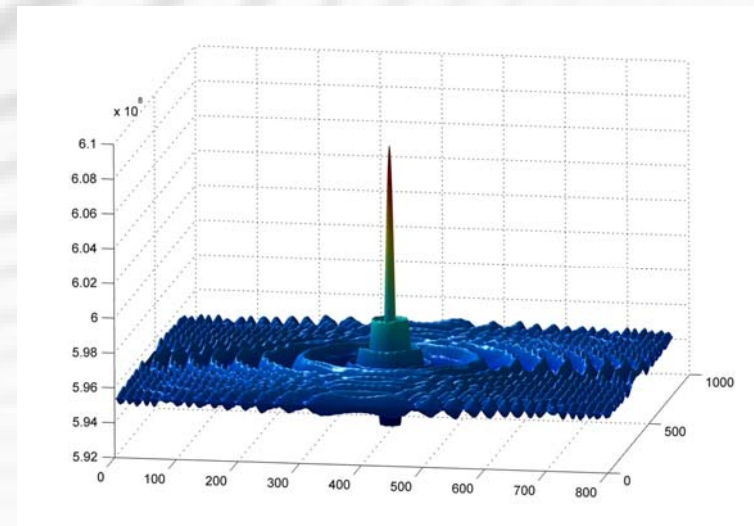
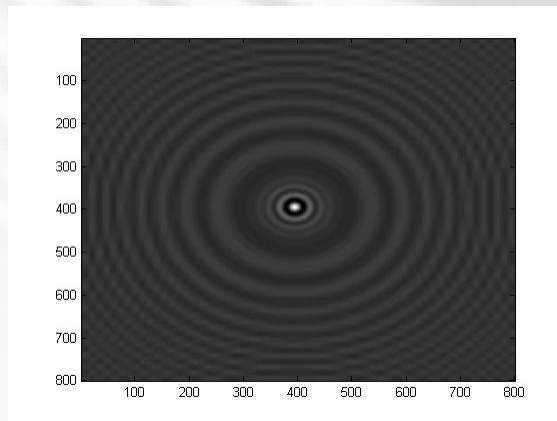
Taško holograma

$$\vec{E} = E_0 \frac{\exp\left(\frac{2\pi}{\lambda} |\vec{r}| \right)}{|\vec{r}|^2} \vec{r}_0$$



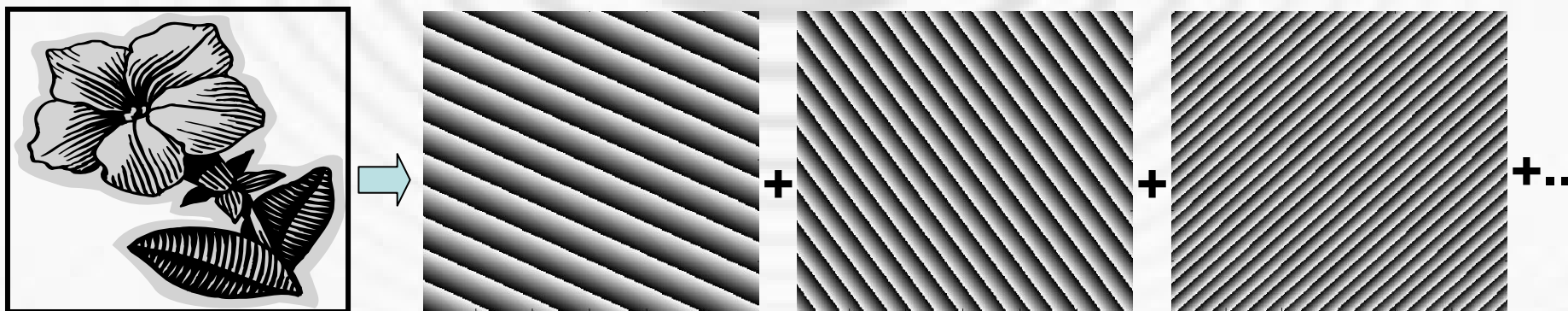
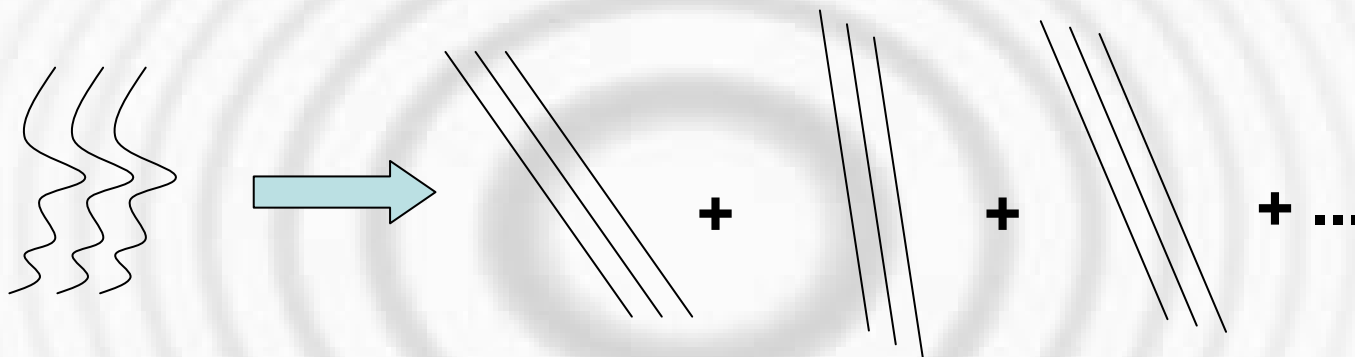
Taškinių šaltinio
skleidžiama
sferinė banga

Atstatytas taškas



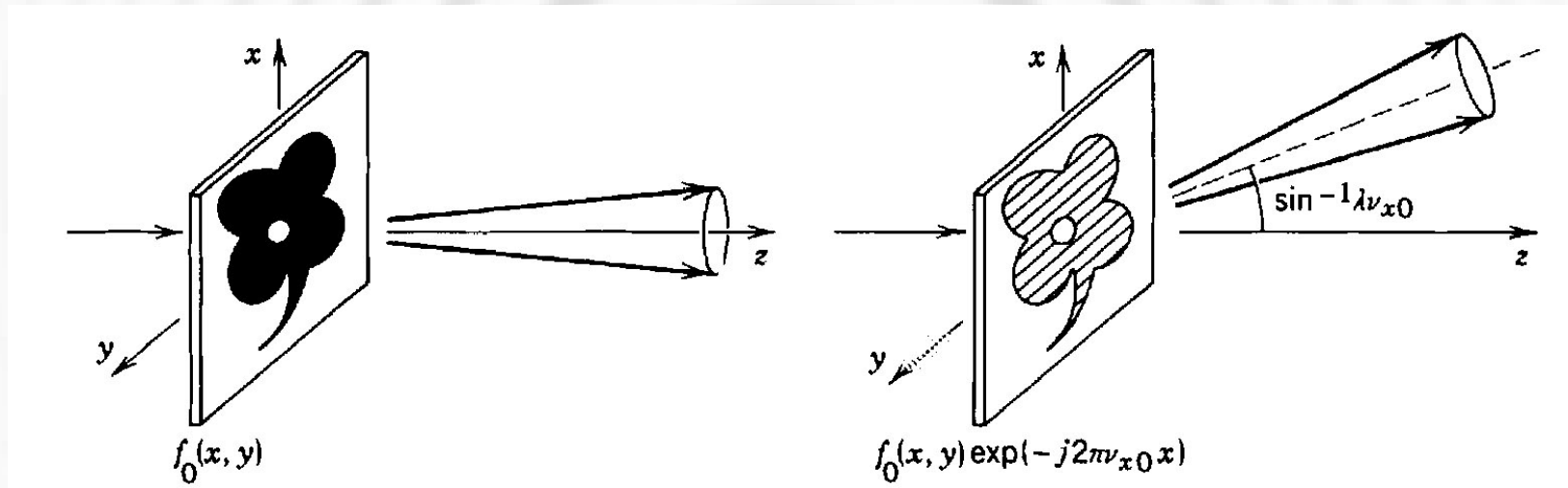
Furje optikos pagrindai

- Tinka tiesinėms sistemoms
- Sudėtingą bangą skleidžiame plokščiųjų bangų suma:



Amplitudinė moduliacija

Kelių vaizdų talpinimas vienoje hologramoje



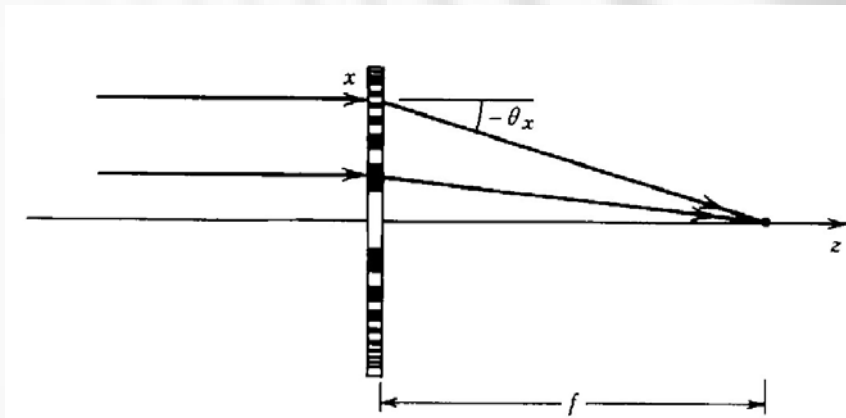
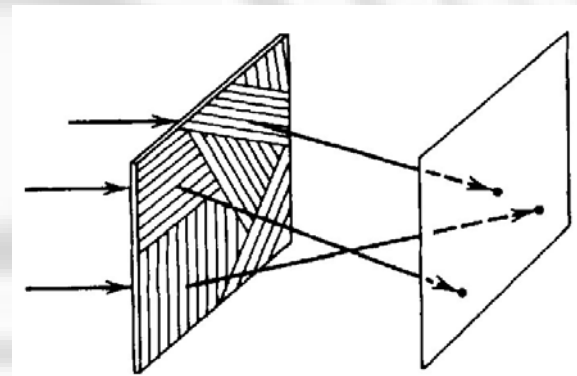
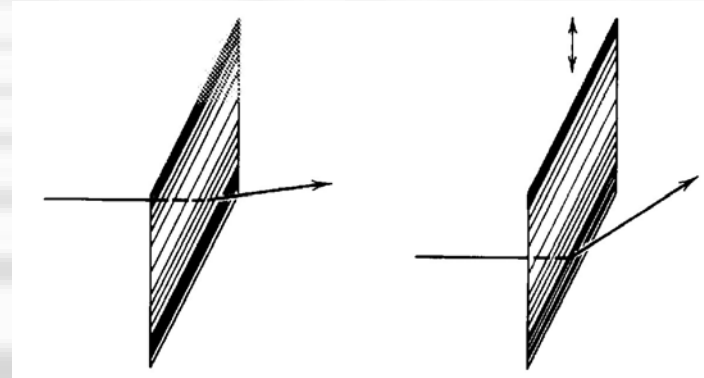
Vaizdo erdvinio spektro intervalas: $\Delta\nu_x$ ir $\Delta\nu_y$

Nešlio dažnis: ν_{x0} ir ν_{y0}

Tenkinama sąlyga: $\Delta\nu_x \ll \nu_{x0}$ ir $\Delta\nu_y \ll \nu_{y0}$

Dažninė moduliacija

Jei plėvelė sudaryta iš zonų, kurių pralaidumas yra tam tikro dažnio harmoninė f-ja, tai pluoštelis atlenkiamas kampu, proporcingu erdviniam dažniui.

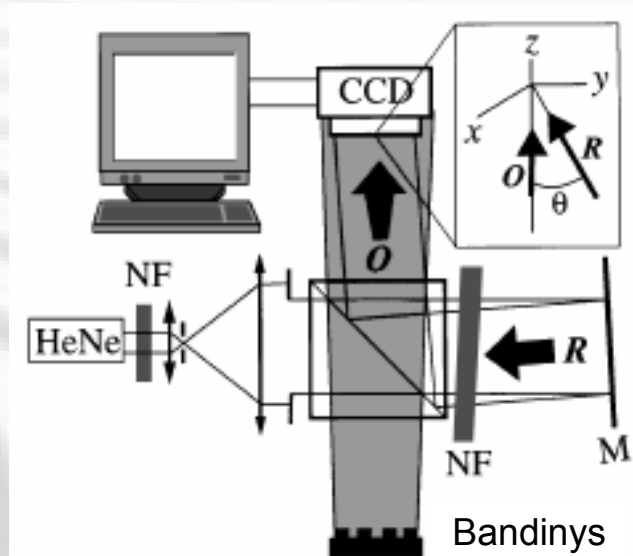


Plėvelė gali būti sudaryta iš daugelio zonų, kurių harmoninės f-jos dažniai skiriasi. Taip kiekviena zona atitiks erdvinį dažnį.

Frenelio lęšis – didėjančio dažnio pralaidumo

Skaitmeninė holograma

Interferuojančių objekto ir atraminės bangos intensyvumas registruojamas CCD matrica.



Optinė schema skaitmeninei hologramai registruoti

Registruojamas vaizdas diskretus:

$$y = m \cdot \Delta y \quad m = 0, 1, \dots, M-1$$

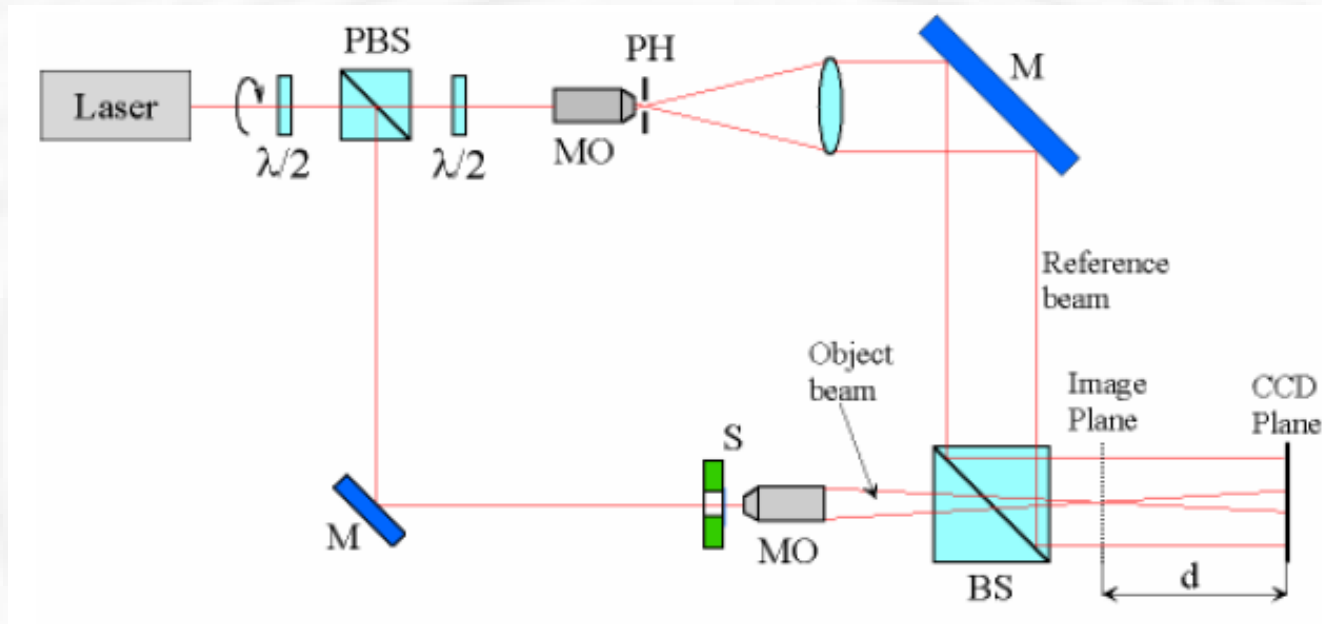
$$x = n \cdot \Delta x \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Δx , Δy – pikselio plotis ir ilgis

M, N – CCD matricos eilučių ir stulpelių skaičius

$$\begin{pmatrix} I_{0,0} & I_{0,1} & \dots & I_{0,N-1} \\ I_{1,0} & I_{1,1} & \dots & I_{1,N-1} \\ \dots & \dots & I_{m,n} & \dots \\ I_{M-1,0} & I_{M-1,1} & \dots & I_{M-1,N-1} \end{pmatrix}$$

Skaitmeninis holografinis mikroskopas



PBS – poliarizuojantis pluošto daliklis; MO – mikroskopo objektyvas; PH – diafragma; BS – pluošto daliklis

Savybės

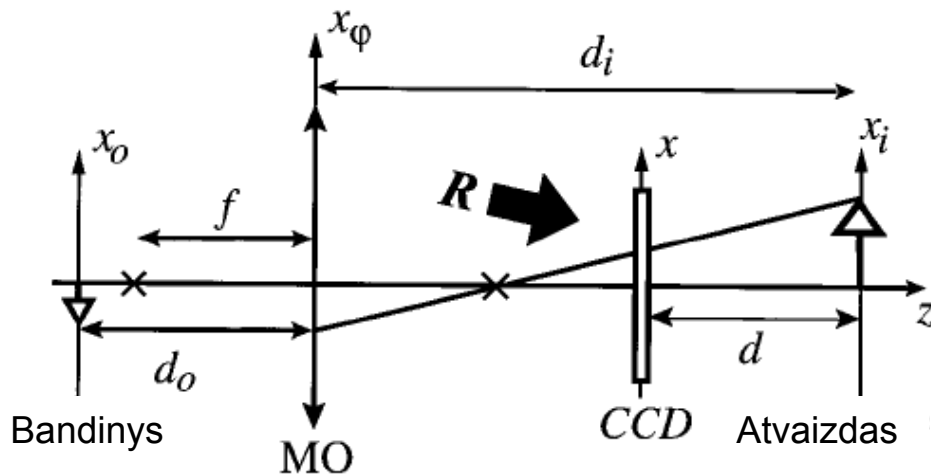
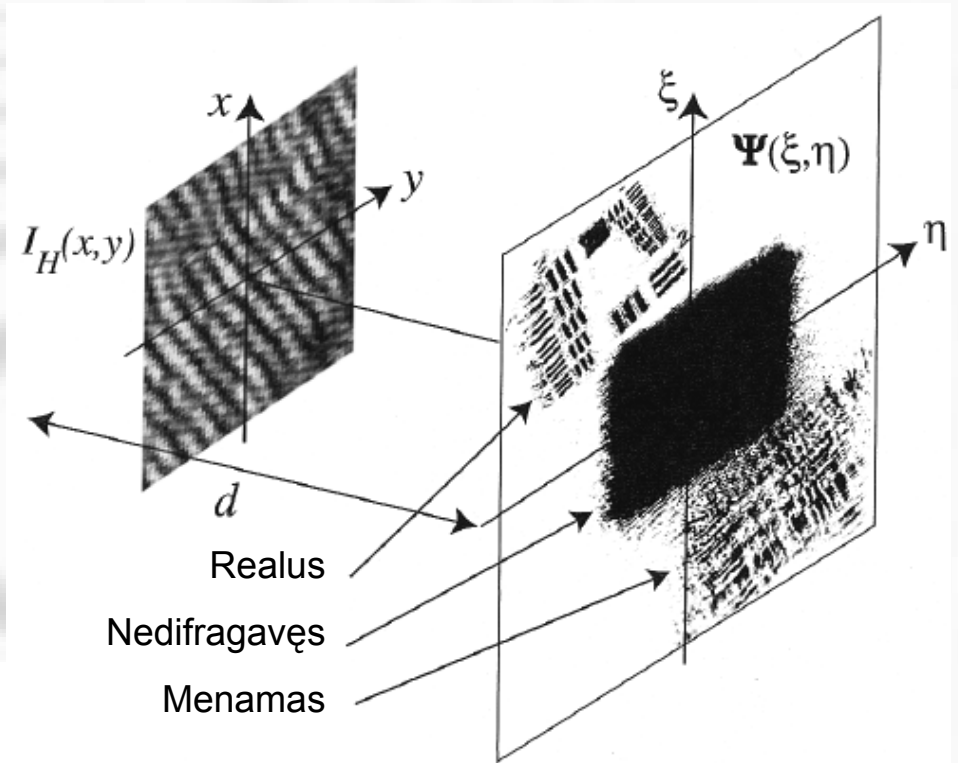
- Tai fazinio ir amplitudinio kontrasto mikroskopas įgalinantis kiekybiškai įvertinti fazės skirtumus
- Galimybė skaitmeniškai kompensuoti objektyvo aberacijas
- Pasiekama skersinė skyra ne mažesnė kaip ir klasikinio optinio mikroskopo

Hologramos ir vaizdo plokštumos

$I_H(x,y)$ – hologramos plokštuma

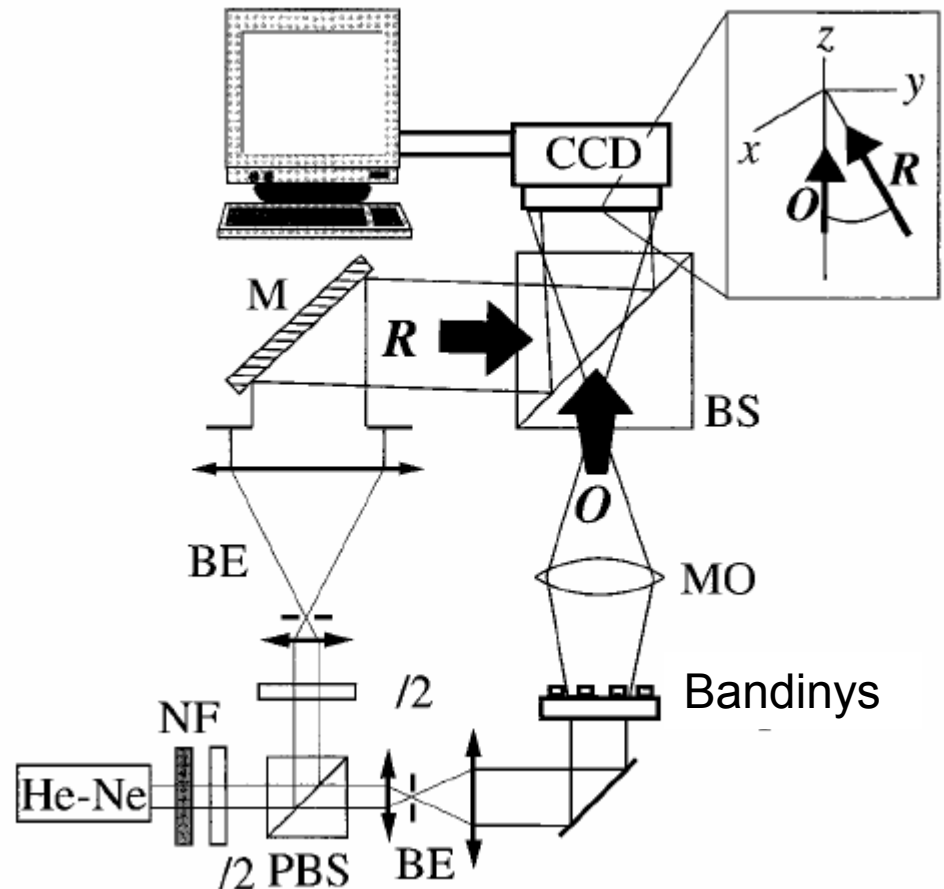
$\Psi(\xi,\eta)$ – vaizdo plokštuma

d – atstatymo atstumas



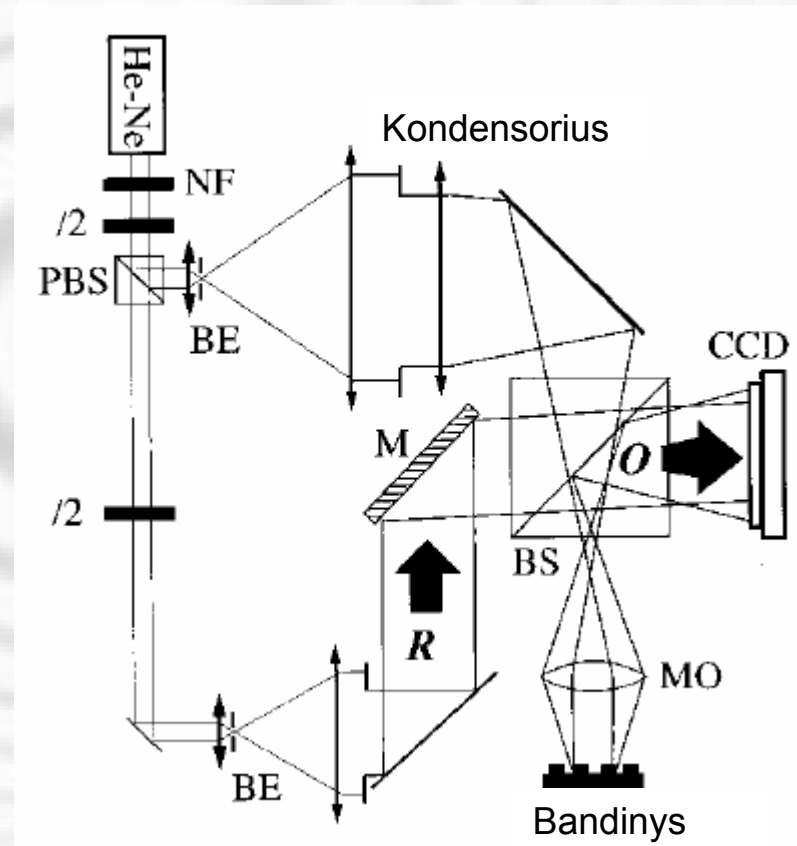
Optinė schema pralaidumo matavimams

- NF – neutralus filtras
- PBS – poliarizuojantis pluošto filtras
- BE – teleskopas su erdviniu filtru
- M – veidrodis
- BS – pluošto daliklis
- O – objekto banga
- R – atraminė banga
- MO – mikroskopo objektyvas



Optinė schema atspindžio matavimams

- NF – neutralus filtras
- PBS – poliarizuojantis pluošto filtras
- BE – teleskopas su erdviniu filtru
- M – veidrodis
- BS – pluošto daliklis
- O – objekto banga
- R – atraminė banga
- MO – mikroskopo objektyvas



Difrakcinio vaizdo skaičiavimas

Taško pasiskirstymo funkcija:

$$h(x, y) = \frac{z}{j\lambda(x^2 + y^2 + z^2)} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}\right)$$

Mažiems atsilenkimo kampams tinka aproksimacija:

$$h(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp\left(j \frac{\pi}{z\lambda} (x^2 + y^2)\right)$$

Difragavusį vaizdą galime išreikšti pradinio vaizdo ir taško pasiskirstymo f-jos sąsūka:

$$\psi(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \iint I_H(\xi, \eta) \exp\left[j \frac{\pi}{z\lambda} (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right] d\xi d\eta$$

λ – bangos ilgis, d – atstatymo atstumas, j – menamasis vienetas,

I_H – skaitmeninė holograma

Vaizdo atstatymas iš hologramos

Atstatymo rezultatas – kompleksinių skaičių matrica apibūdinanti bangos frontą

$$\psi(x, y) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \iint I_H(\xi, \eta) \exp\left[j \frac{\pi}{z\lambda} (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2\right] d\xi d\eta$$

Difragavusios bangos išraišką galime užrašyti kaip funkcijos Furjė transformaciją kintamaisiais:

$$\frac{\xi}{\lambda d}, \frac{\eta}{\lambda d}$$

Transformuojamos funkcijos išraiška:

$$I_H(x, y) \cdot \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

Atsižvelgę į vaizdo diskretizaciją, užrašome (1) Furjė transformaciją:

$$\psi(m\Delta\xi, n\Delta\eta) = \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta\xi^2 + n^2 \Delta\eta^2)\right] \cdot FFT \left\{ I_H(k, l) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \right\}$$

$$k, l, m, n - \text{sveiki skaičiai: } \frac{-M}{2} \leq k, m \leq \frac{M}{2} \quad \frac{-N}{2} \leq l, n \leq \frac{N}{2}$$

$I_H(k, l)$ - diskretizuota holograma $\Delta\xi, \Delta\eta$ - semplavimo intervalai atstatyto vaizdo plokštumoje

Vaizdo atstatymas iš hologramos (2)

Sąryšis tarp atvaizdo (Ox) ir Furjė (Ov) erdvės diskrečios Furjė transformacijos atveju:

$$\Delta v_x = \frac{1}{M \Delta x} \quad \Delta v_y = \frac{1}{N \Delta y}$$

Taip pat atsižvelgiame į kintamojo pakeitimą transformuojant, išreiškiame atvaizdo erdvinius dažnius:

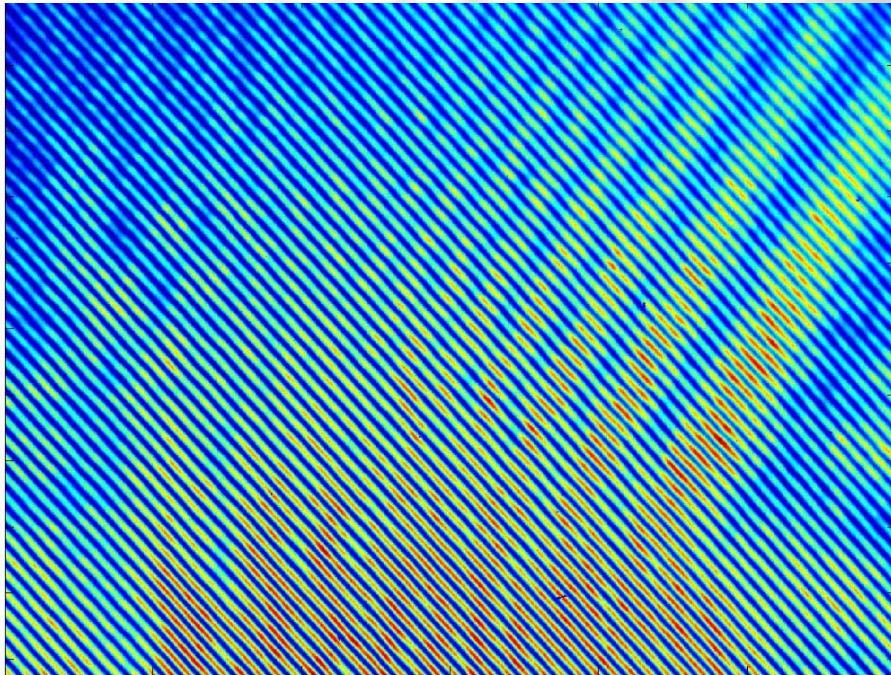
$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N \Delta x} = \frac{\lambda d}{L_x} \quad L_x, L_y - \text{CCD matricos matmenys x ir y kryptimis}$$
$$\Delta \eta = \frac{\lambda d}{N \Delta y} = \frac{\lambda d}{L_y}$$

Fazės iškraipymai dėl kampu interferuojančių atraminio ir objekto pluoštų kompensuojami dauginant atraminį vaizdą iš atitinkamo daugiklio:

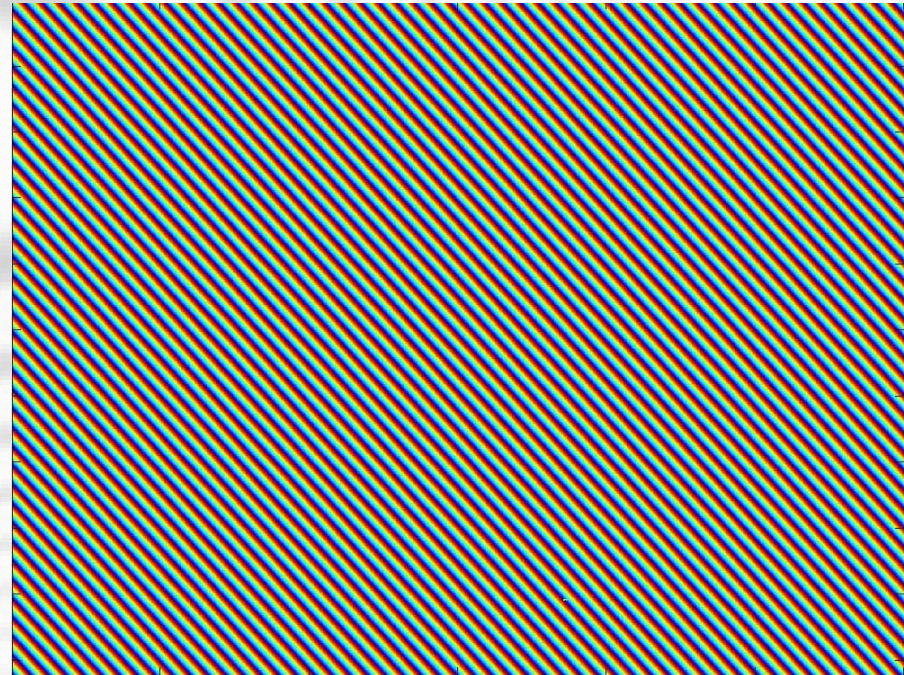
$$R_D(m, n) = A_R \exp \left[j(k_x m \Delta x + k_y n \Delta y) \right] \quad I_H \rightarrow I_H \cdot R_D$$

Skaitmeninė atraminio pluošto replika

$$R_D(m, n) = A_R \exp \left[j(k_x m \Delta x + k_y n \Delta y) \right]$$



Holograma



Fazinis daugiklis

Fazinis ir amplitudinis vaizdai

Amplitudinis vaizdas:

$$\phi(m, n) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[\Psi(m, n)]^2}{\text{Re}[\Psi(m, n)]^2} \right\}$$

Fazinis vaizdas:

$$I(m, n) = \text{Re}[\Psi(m, n)]^2 + \text{Im}[\Psi(m, n)]^2$$

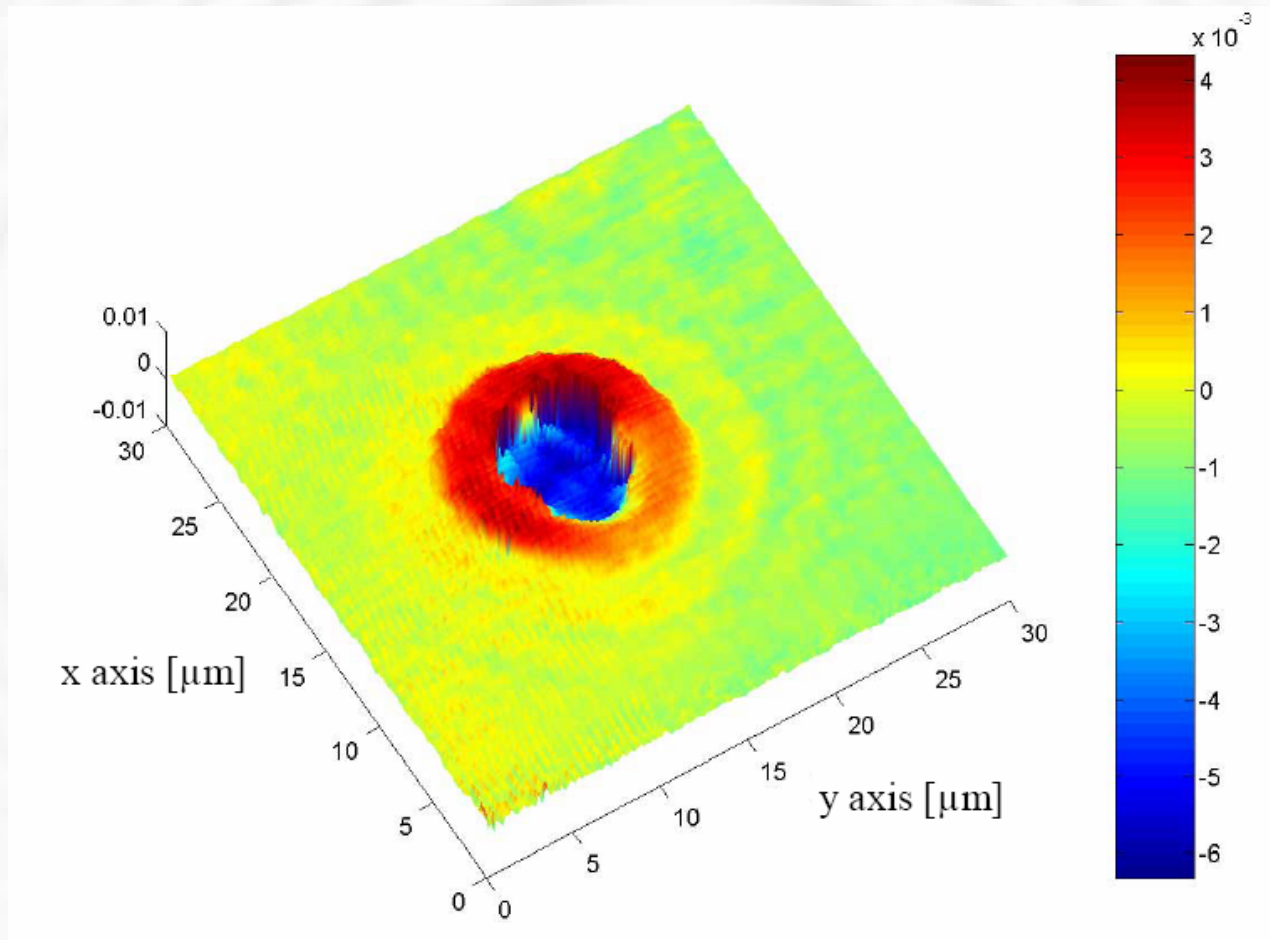
Galime suskaičiuoti lūžio rodiklio pokytį arba bandinio storį:

$$\Delta\phi = d \cdot \Delta n$$

Skaitmeninės holografijos taikymai

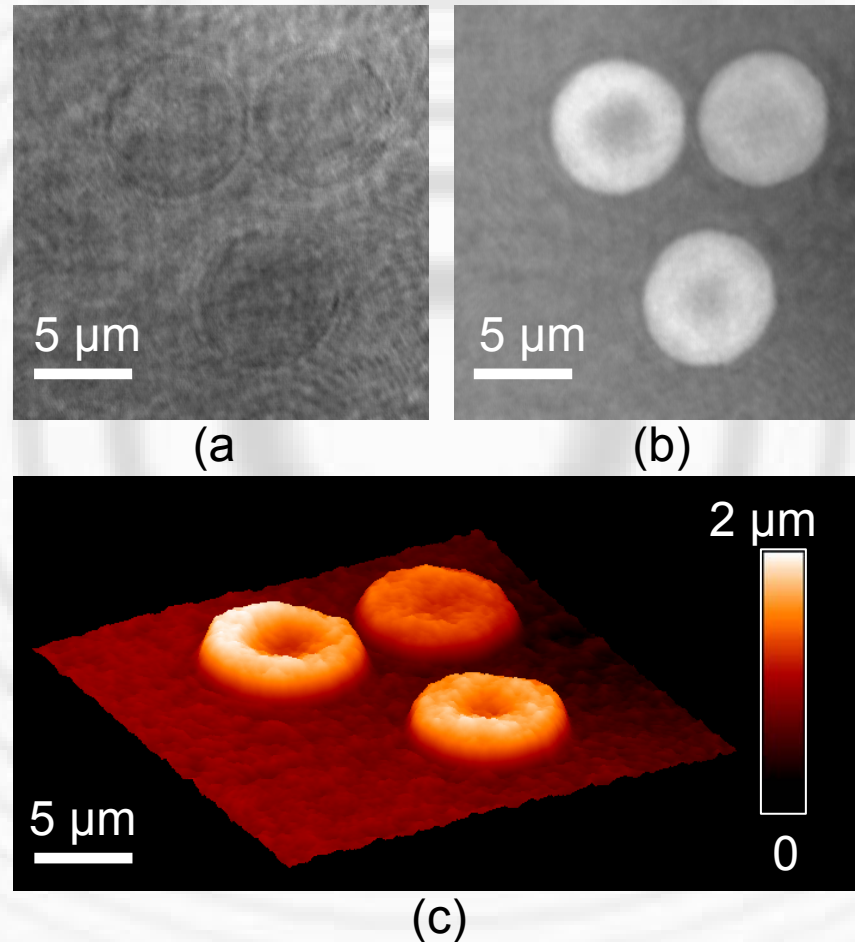
- Amplitudinio kontrasto matavimai:
 - Pozicijos matavimas
 - Endoskopija
 - Optinė koherentinė tomografija
- Fazinio kontrasto matavimai:
 - Fazinio kontrasto mikroskopija
 - Paviršiaus profilometrija
 - Lūžio rodiklio matavimas

Lūžio rodiklio matavimai



FS impulsais įrašyto stiklo bangolaidžio lūžio rodiklio profilis

Profilometrija

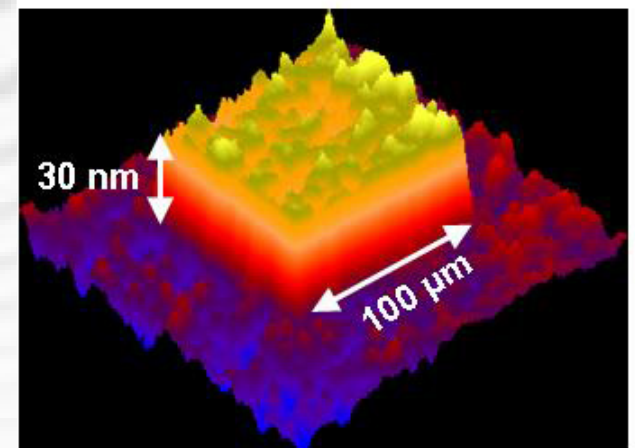
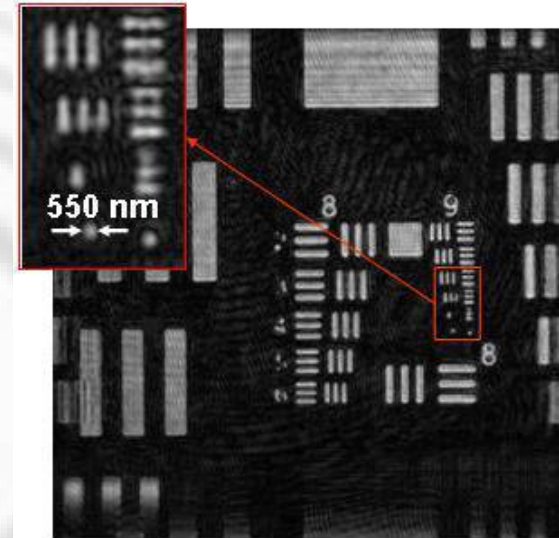


SH būdu gauti raudonųjų kraujo kūnelių vaizdai: a) atstatytas amplitudinis vaizdas; b) atstatytas fazinis vaizdas; c) 3D vaizdas gautas iš fazinio vaizdo

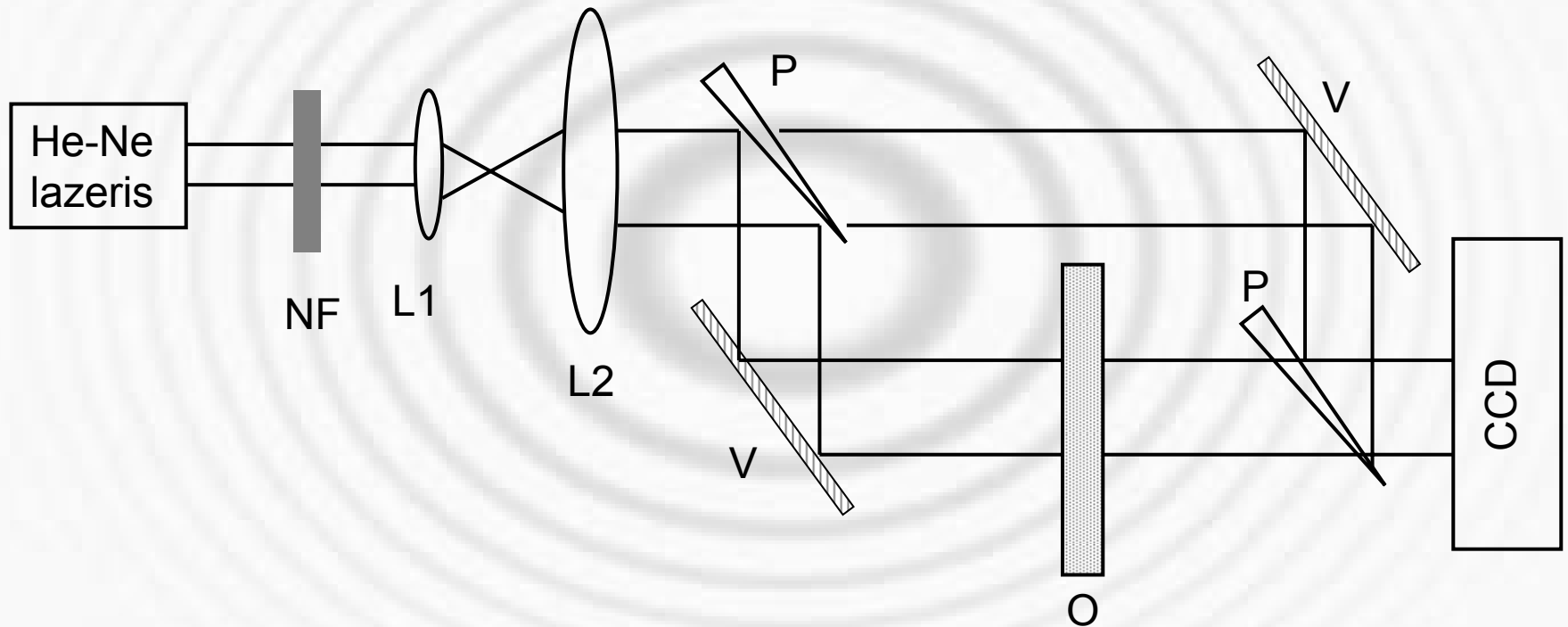
Komercinēs sistēmas



Komercinīs fluorescencinīs mikroskops (Zeiss Axioplan 2) su skaitmeninēs holografijas priedu.

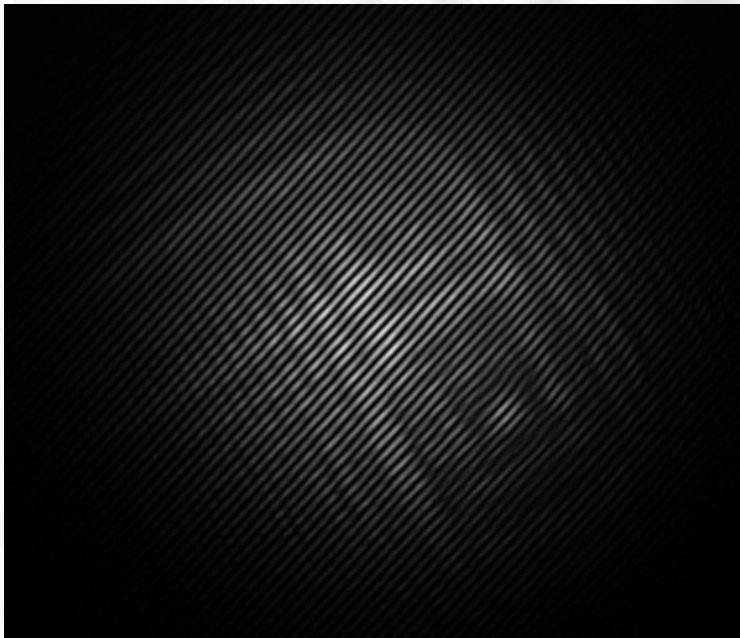


Mūsu SH registravimo optinė schema

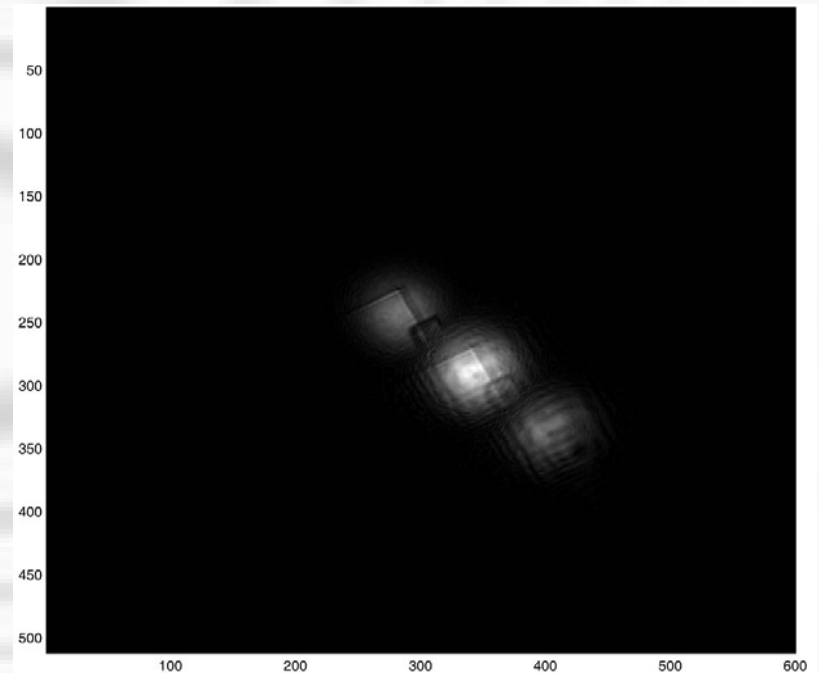


NF – neutralus filtras, **L1** ir **L2** – teleskopo lęšiai, **CCD** – skaitmeninė kamera, **P** – pleištinė plokštelė, **V** – aliuminis veidrodis, **O** - bandinys

Skaidrių darinių ant SiO_2 paviršiaus matavimas

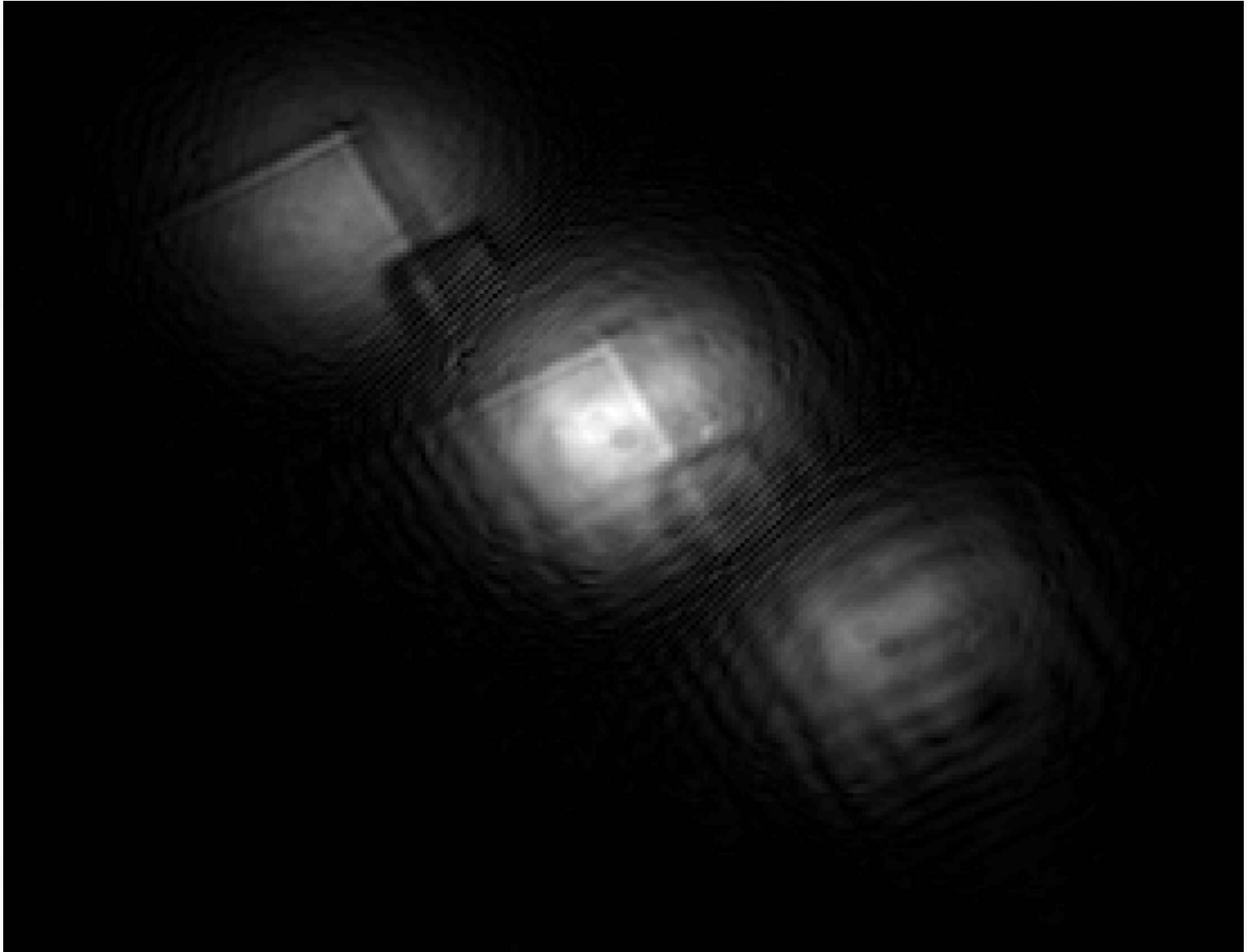


Ant stiklo paviršiaus išgraviruoto stačiakampio formos režio holograma



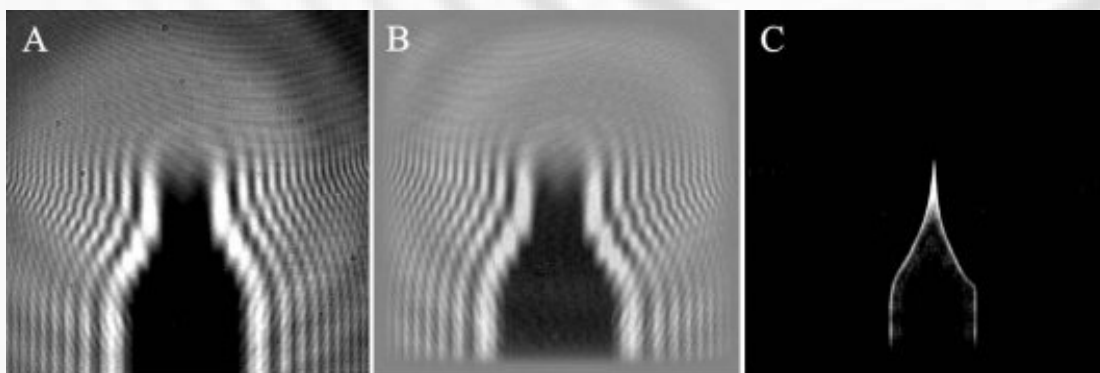
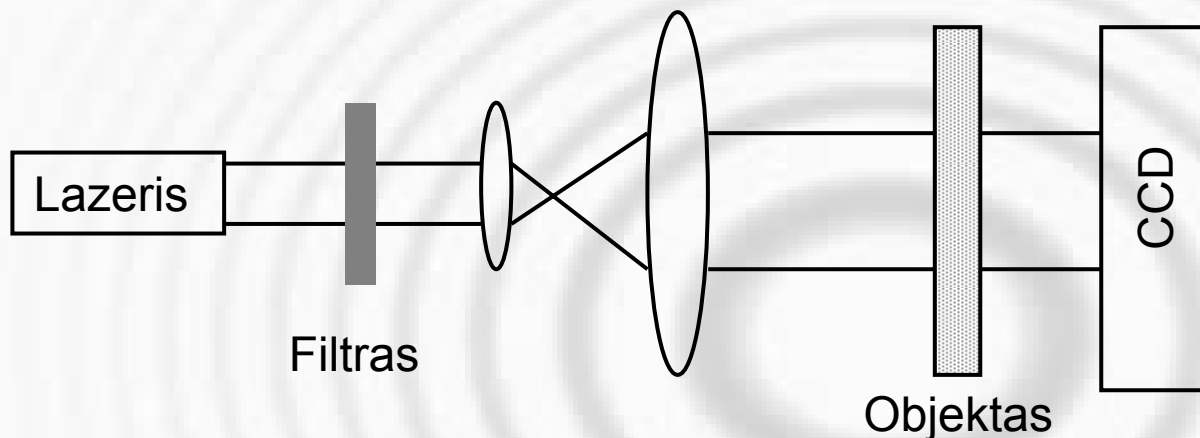
Atstatytas vaizdas

Skaidrių darinių ant SiO₂ paviršiaus matavimas

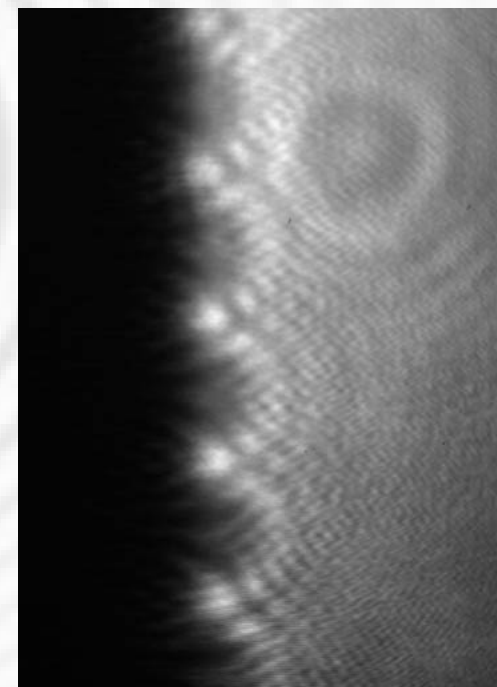


Ašinė (in-line) holografija

Stebima koherentinio pluoštelio difrakcija sklindant pro objektą



STM adatos a) holograma b) vaizdas pro optinį mikroskopą c) atstatytas amplitudinis vaizdas



Stebimas bandinys (varžtas) 16cm atstumu