

# Osnove mikrovalovne tehnike

Samo Krejan

november 2025

## 1 Uvod

Holografija je vrsta fotografije, pri kateri ponazorimo predmet v treh dimenzijah.

Pri navadni fotografiji na fotografiski film (oz. detektor) zabeležimo projekcijo porazdelitve gostote svetlobnega toka, ki ga seva predmet. Projekcija je dosežena s pomočjo optične leče in slika je dvodimenzionalna.

Svetlobno valovanje (električna poljska jakost) nosi podatek o globinski porazdelitvi posameznih točk na površini predmeta v fazi valovanja. Pri normalni fotografiji izgubimo podatek v fazi, ker je počrnitev film sorazmerna povprečni vrednosti kvadrata električne poljske jakosti. Pri hologramu podatke o fazah ohranimo tako, da na fotografsko ploščo posnamemo interferenčno sliko med svetlobo, ki jo siplje predmet in svetlobo, ki na poti do fotografiski plošči predmet obide.

Kot izvor svetlobe uporabimo laser, saj je za doseg interference potrebno, da je koherentna dolžina svetlobe daljša od razlike poti, ki jo opravita predmeti in referenčni snop.

Električno poljsko jakost prepuščenega  $E_p$  in referenčnega žarka  $E_r$  zapišemo kot

$$E_p = E_{p0}(x, y)e^{-i\phi(x, y)}e^{i\omega t}$$
$$E_r = E_{r0}(x, y)e^{-i\psi(x, y)}e^{i\omega t}$$

kjer sta  $\phi, \psi$  fazi valovanja in je izhodišče koordinatnega sistema postavljeno tako, da se ravnina  $(x, y)$  ujema s fotografsko ploščo.

Ker sta valovanji koherentni (torej lahko interferirata) velja:

$$E(x, y) = E_p(x, y) + E_r(x, y)$$

Ustrezna gostota svetlobnega toka  $I$  je sorazmerna kvadratu električne poljske jakosti

$$I = (E_p + E_r)(E_p + E_r)^* = |E_p|^2 + |E_r|^2 + E_p E_r^* + E_p^* E_r \quad (1)$$

Iz zadnjih dveh členov vidimo, da se na fotografsko emulzijo zapišeta tudi interferenčna člena, ki nosita informacijo o relativni fazi med snopoma.

Ploskovna gostota energije (eksponca)  $W_{ex}$  je enaka produktu gostoti svetlobnega toka  $I$  in času osvetljevanja  $t$ .

Transmitivnost emulzije  $T$  je odvisna od eksponcaje  $W_{ex}$  podana z

$$T \propto W_{ex}^\gamma$$

kjer je parameter  $\gamma$  odvisen od lastnosti emulzije in načina razvijanja.

Definiramo amplitudno prepustnost definirano kot

$$T_{ampl} = \sqrt{T} \quad (2)$$

Pri upoštevanju  $E_p \ll E_r$  vstavimo 1 v 2 dobimo

$$T_{ampl} = C |E_r|^\gamma \left( 1 + \frac{\gamma}{2 |E_r|} (E_p E_r^* + E_p^* E_r) \right) = A + B E_p E_r^* + B E_p^* E_r \quad (3)$$

kjer sta  $A, B$  konstanti.

Če hologram postavimo na prejšnje mesto, in ga osvetlimo z referenčnim žarkom, predmet pa odstranimo.

Na izstopni strani strani fotografiske plošče je električna poljska jakost  $E_{holo}$  enaka produktu

$$E_{holo} = T_{ampl} \cdot E_r = A E_r + B E_p |E_r| + B E_p^* E_r^2 \quad (4)$$

Prvi člen predstavlja delno prepuščeni referenčni žarek. Drugi člen opisuje divergenten žarek, ki je tako kot da bi izviral iz predmeta in v očesu ustvari virtualno sliko predmeta na originalnem mestu, kjer smo ga slikali. Tretji člen opisuje konvergentni žarek, ki daje realno sliko predmeta in je opazen npr. na drobnih delcih cigaretnega dima. Do tega pridemo, če 4 pomnožimo z  $E_r^*$ .

Postavitev za predmet je taka kot na sliki 1

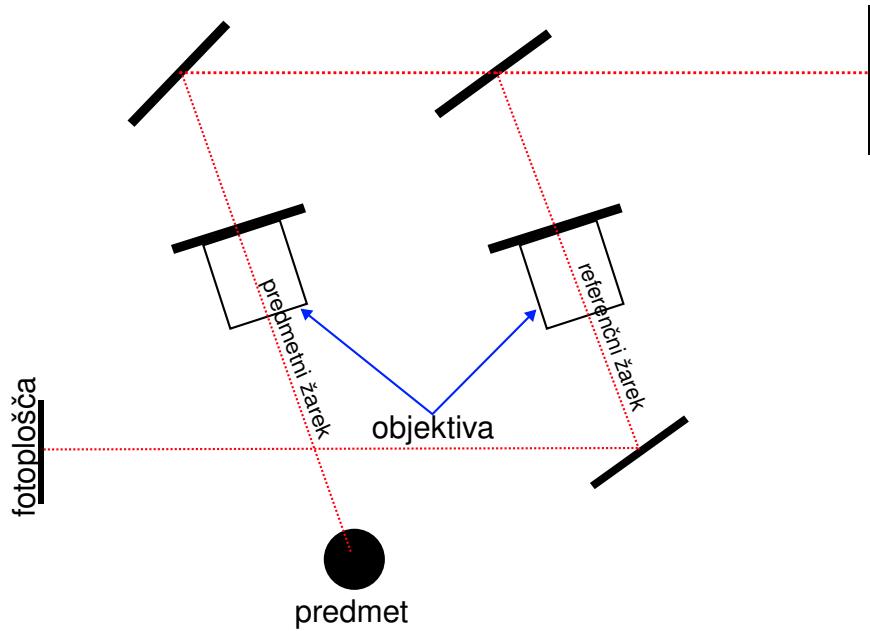
## 1.1 Hologram ravnih valov

Sedaj imejmo predmetni in referenčni žarek kot ravna valova oblike  $e^{i(kr - \omega t)}$ , prvi pod kotom  $\alpha$  na fotografisko ploščo in drugi v smeri normale. Izberimo si koordinatni sistem tako, da lahko žarka zapišemo kot  $\vec{k}_p = (k \sin \alpha, 0, k \cos \alpha)$  in  $\vec{k}_r = (0, 0, k)$ . Fotografska plošča se nahaja v ravni  $z = 0$ . Potem je intenziteta interferenčnega vzorca na njej enaka

$$I_{int} = C \left| 1 + e^{ik \sin \alpha x} \right|^2 = C' (1 + \cos(k \sin \alpha x)) \quad (5)$$

Hologram je kosinusna uklonska mrežica s periodo

$$d = \frac{2\pi}{k \sin \alpha} \quad (6)$$



Slika 1: Shema potovanja žarkov pri zajemanju holograma predmeta.

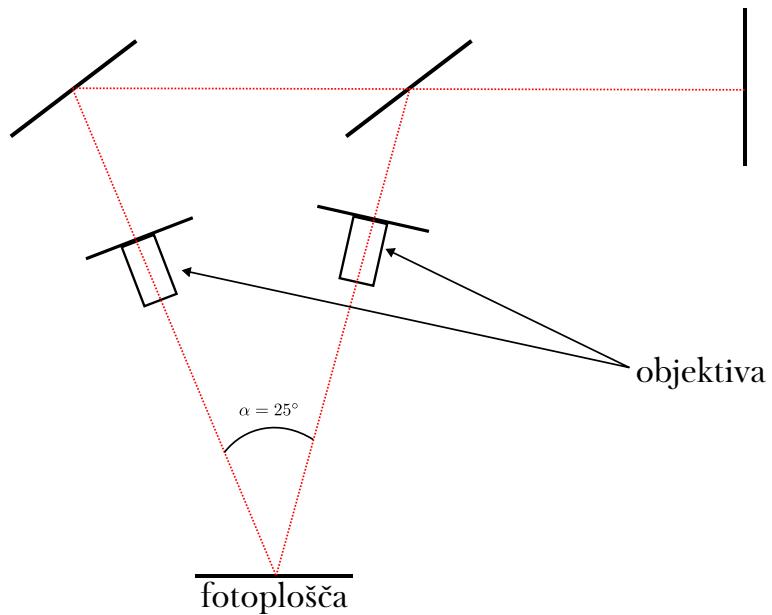
Natačnejši račun s Fraunhoferjevim uklonskim integralom bi nam pokazal, da dobimo pri osvetltvi kosinusne uklonske mrežice z ravnim valom poleg prepuščenega vala še dva uklonjena žarka prvega reda, ki sta razporejena simetrično levo in desno glede na prepuščeni val.

Splošen tankoplastni hologram lahko torej razumemo kot superpozicijo kosinusnih uklonskih mrežic, ki nastanejo pri interferenci referenčnega žarka in žarkov, ki izvirajo iz posameznih točk objekta.

Postavitev za ravne valove pa je na sliki 2

## 2 Potrebščine

- He-Ne laser ( $\lambda = 623.8\text{nm}$ )
- dve zrcali
- dve leči
- delilnik žarka
- fotografiska plošča
- predmet



Slika 2: Shema potovanje žarkov pri zajemu holograma ravnih valov.

### 3 Naloge

- sestavi postavitev za snemanje holograma in ga posnemi
- posnemi interferogram dveh ravnih valov

### 4 Navodila

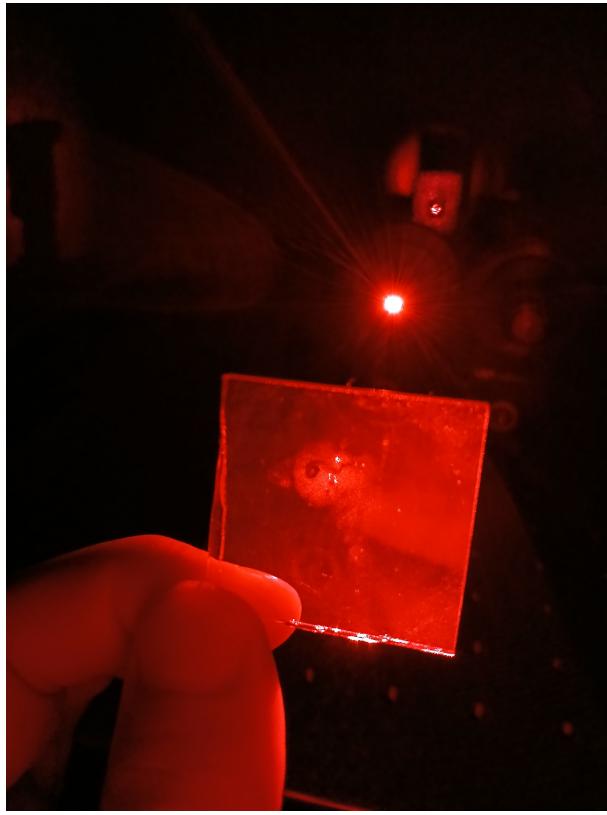
Laserski snop s pomočjo delilca razdelimo na dva žarka, ki ju razpršimo z mikroskopskima objektivoma. Naredimo predmetni žarek, ki osvetli predm in referenčni žarek, ki predmet obide. Pravilno ju usmerimo z zrcali.

V drugem delu vaje je postavitev nekoliko drugačna. Postavimo oba snopa enega vzporedno na normalo fotografiske plošče in drugega pod nekim kotom  $\alpha$ . Tako lahko postavimo interferogram.

V tri banjice pripravimo razvijalec, vodo in fiksir za razvijanje slike, s katerimi potem razvijemo hologram.

## 5 Meritve in rezultati

Pri prvem delu naloge, smo naredili sliko figurice, po opisanem postopku. Rezultati so vidni na sliki 3



Slika 3: Hologramska fotografija figurice

Kot med refernečnim in predmetnim žarkom sem ocenil na 20 stopinj.

Pri drugem delu naloge, smo naredili sliko ravnih valov in efektivno pravzaprav dobili uklonsko mrežico. Nanjo smo nato lahko posvetili z laserjem in za njo, na steni opazovali ojačitve. Izmeril sem razdaljo med pikama prve ojačitve ( $a$ ) in pa razdaljo od mrežice do stene ( $x$ )

$$a = (10, 3 \pm 0, 1) \text{ cm}$$

$$x = (20, 0 \pm 0, 1) \text{ cm}$$

kot  $\alpha$  zadošča pogoju

$$\tan \alpha = \frac{a}{2x}$$

iz česar dobim vrednost  $\alpha = (14, 4 \pm 0, 1)^\circ$

Pri računanju napak sem si pomagal s Pythonovim orodjem *uncertainties*

Z določenim kotom  $\alpha$  lahko po formuli 6 izračunam periodo kosinusne mrežice, ki pride:

$$d = (2,54 \pm 0,03)\mu m$$

## 6 Zaključek

S tem je naša vaja zaključena. Čeprav se mi je med samim izvajanjem vaje zdelo da se ukvarjam bolj s kemijo kot z fiziko, so bili so bili rezultati zelo zadovoljivi in moram priznati, da sem bil izjemno navdušen, ko sem v stekelčku, ki sem ga le malo prej obseval z lasersko svetlobo zdaj lahko opazil ujeto podobo prisrčne mačke. Tako hitri in prisrčni rezultati so na praktikumskih vajah prava redkost, zato sem jih bil tokrat res vesel.