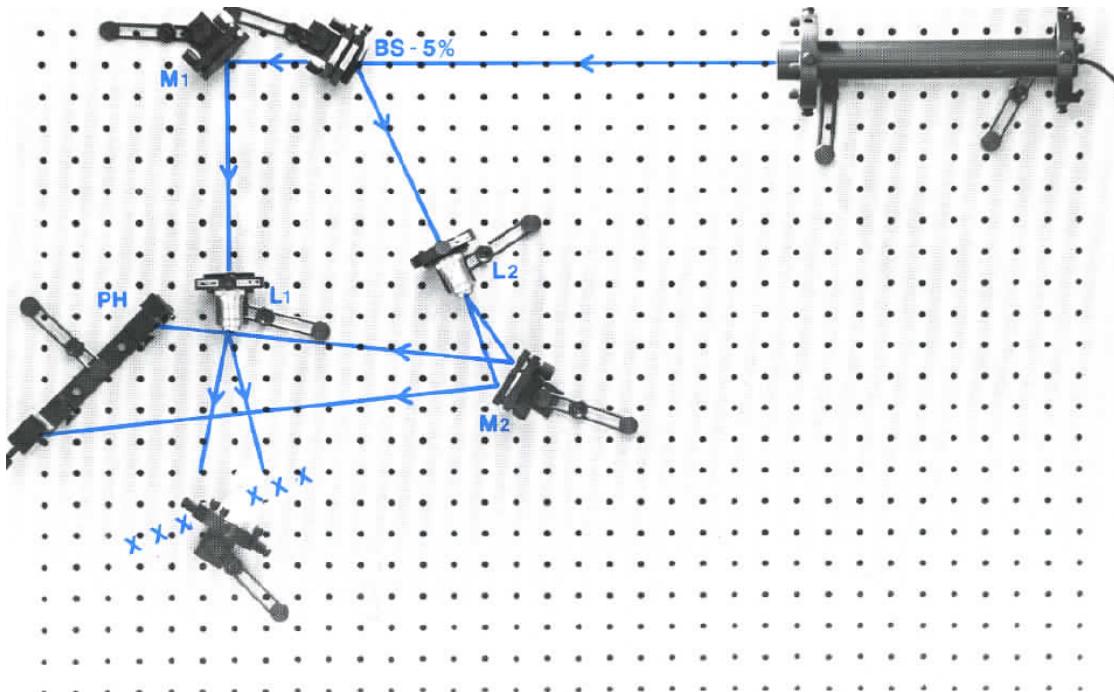


# 9. HOLOGRAFIJA

## 9.1 Uvod

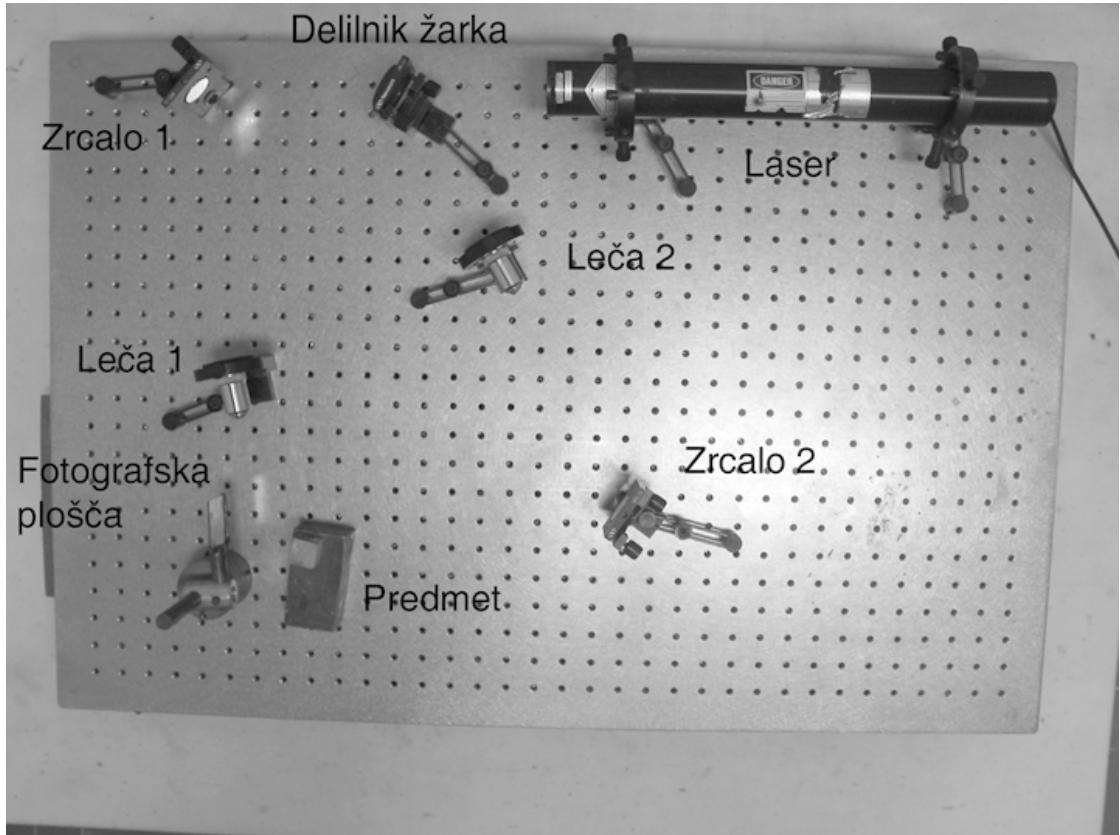
Holografija je posebna vrsta fotografije, ki omogoča tridimenzionalno ponazoritev predmeta. Pri navadni fotografiji zabeležimo na fotografiski film ali ploščo projekcijo porazdelitve gostote svetlobnega toka, ki ga seva predmet. Projekcijo dosežemo s pomočjo optične leče. Slika je dvodimenzionalna, ker ob gledanju slike manjšega predmeta pred večjim ne moremo videti zastrte dele, četudi bi usmerili pogled na fotografijo pod različnimi koti.

Svetlobno valovanje (električna poljska jakost) nosi podatek o globinski porazdelitvi posameznih točk na površini predmeta v fazi valovanja. Pri običajni fotografiji je ta podatek izgubljen, saj je počrnitev filma sorazmerna povprečni vrednosti kvadrata električne poljske jakosti, ki je neodvisna od fazne razlike. Pri holografskem zapisu ohranimo podatke o fazah tako, da s fotografsko ploščo registriramo interferenčno sliko, ki nastane pri interferenci med svetlobo, ki jo siplje predmet in svetlobo, ki na poti do fotografiske plošče predmet obide. Slika 2 kaže postavitev za snemanje holograma.



Slika 1: Shema postavitve za snemanje holograma.

Laserski snop s pomočjo delilnika žarka razcepimo na dva enako močna snopa. Prepuščeni snop, ki se odbije na ravnom zrcalu s pomočjo mikroskopskega objektiva razpršimo in z



**Slika 2:** Fotografija postaviteve za snemanje holograma.

njim osvetlimo predmet (predmetni žarek). Odbiti žarek prav tako razpršimo z mikrosopskim objektivom in ga nato s pomočjo drugega zrcala usmerimo direktno na fotografsko ploščo (referenčni žarek). Oba snopa interferirata in fotografksa plošča registrira njuno interferenčno sliko. Kot izvor svetlobe uporabimo laser, saj je za dosego interference potrebno, da je koherentna dolžina svetlobe dalša od razlike poti, ki jo opravita predmetni in referenčni snop.

Koordinatni sistem za opis valovanja na fotografski plošči postavimo tako, da se njegova  $(x,y)$  ravnina ujema s fotografksko ploščo. Svetlobno polje opišemo s poljem električne poljske jakost  $\mathbf{E}$ . Zaradi enostavnejše obravnave računamo, kot da ima električna poljska jakost po odboju na predmetu isto smer kot pred odbojem. Vzeli bomo, kot da ima  $\mathbf{E}$  ves čas eno samo komponento  $E$ , ki jo bomo obravnavali kot skalar. Zapišimo v točki  $(x,y)$  na fotografski plošči električno poljsko jakost predmetnega snopa  $E_p(x, y)$  in referenčnega snopa  $E_r(x, y)$  kot

$$E_p(x, y) = E_{p0}(x, y) \exp(-i\Phi(x, y)) \exp(i\omega t) \quad (1)$$

$$E_r(x, y) = E_{r0}(x, y) \exp(-i\Psi(x, y)) \exp(i\omega t), \quad (2)$$

kjer sta  $\Phi(x, y)$  in  $\Psi(x, y)$  fazi valovanj. Ker sta valovanji koherentni, je rezultirajoča električna poljska jakost

$$E(x, y) = E_p(x, y) + E_r(x, y). \quad (3)$$

Ustrezna gostota svetlobnega toka je sorazmerna kvadratu električne poljske jakosti, ki ga označimo z  $I$ .

$$I = (E_p + E_r)(E_p + E_r)^* = |E_p|^2 + |E_r|^2 + E_p E_r^* + E_p^* E_r. \quad (4)$$

Iz enačbe 4 vidimo, da se na fotografjsko emulzijo poleg intenzitete predmetnega in referenčnega snopa (prvi in drugi člen) zapišeta tudi interferenčna člena (tretji in četrti člen), ki vsebujejo informacijo o relativnih fazah med predmetnim in referenčnim snopom. Počrnitev fotografskega filma na določenem mestu je odvisna od ploskovne gostote energije, ki pade na emulzijo. Ploskovna gostota energije je enaka produktu gostote svetlobnega toka in časa osvetljevanja in jo bomo označili z  $W_{ex}$  (ekspozicija).

Po osvetljevanju je transmitivnosti emulzije  $T$  v odvisnosti od ekspozicije  $W_{ex}$  podana z

$$T \propto W_{ex}^\gamma \propto I^\gamma. \quad (5)$$

Parameter  $\gamma$  je odvisen od lastnosti emulzije in načina razvijanja. Pri naši nadaljnji obravnavi bomo rabil amplitudno prepustnost, ki je definirana kot

$$T_{amp} = \sqrt{T}. \quad (6)$$

Če vstavimo enačbo (4) v izraz za amplitudno transmitivnost holograma (6) in upoštevamo, da je pri snemanju holograma običajno  $E_p \ll E_r$  dobimo

$$T_{amp} = C |E_r|^\gamma \left( 1 + \frac{\gamma}{2 |E_r|^2} (E_p E_r^* + E_p^* E_r) \right) = A + B E_p E_r^* + B E_p^* E_r, \quad (7)$$

kjer sta  $A$  in  $B$  konstanti.

Poglejmo kaj dobimo, če po razvijanju hologram postavimo na prejšnje mesto, ga osvetlimo z referenčnim žarkom, predmet pa odstranimo. V tem primeru je električna poljska jakost na izstopni strani fotografiske plošče  $E_{holo}$  enaka produktu

$$E_{holo} = T_{amp} E_r = A E_r + B |E_r|^2 E_p + B E_r^2 E_p^*. \quad (8)$$

Prvi člen v enačbi (8) predstavlja prepuščeni referenčni snop, ki je delno oslabljen. Drugi člen opisuje divergenten snop žarkov, ki je tak kot bi izhajal od predmeta. Pri prehodu skozi očesno lečo se zbere na mrežnici, kjer nam da realno sliko. Ker so valovne fronte, ki izhajajo iz holograma enake tistim, ki so izhajale od predmeta, zaznamo sliko, ki jo vidimo pri gledanju holograma, kot tridimensionalno.

Do pomena tretjega člena v enačbi (8) pridemo s sledečim razmislekom. Če enačbo za amplitudno prepustnost holograma (7) pomnožimo s kompleksno konjugiranim referenčnim valom (kar v realnost pomeni snop, ki se širi v obratni smeri), dobimo

$$E_{holo} = T_{amp} E_r^* = A E_r^* + B E_r^2 E_p + B |E_r|^2 E_p^*. \quad (9)$$

Tretji člen v enačbi (9) je enak kompleksno konjugiranemu drugemu členu v enačbi (8) in torej predstavlja predmetni snop, ki se širi v obratni smeri tako, kot da bi izhajal iz predmeta, ki bi bil postavljen zrcalno glede na ravnino holograma. Ker so žarki v snopu, ki ga predstavlja tretji člen v enačbi (9) konvergentni nam dajo realno sliko, ki bi jo lahko videli, če bi bilo v zraku veliko drobnih delcev (npr. od cigaretnegra dima).

Ko torej z referenčnim žarkom osvetljujem hologram, dobimo na izhodni strani tri snope: oslabljeni referenčni snop, divergentni snop, ki je tak, kot bi izhajal od predmeta (torej v podaljšku nazaj daje virtualno sliko predmeta), ter konvergentni žarek, ki daje realno sliko predmeta (opazimo ga lahko na drobnih delcih cigaretnegra dima). Pri dovolj veliki razdalji so vsi trije snopi med seboj prostorsko ločeni.

## 9.2 Hologram ravnih valov

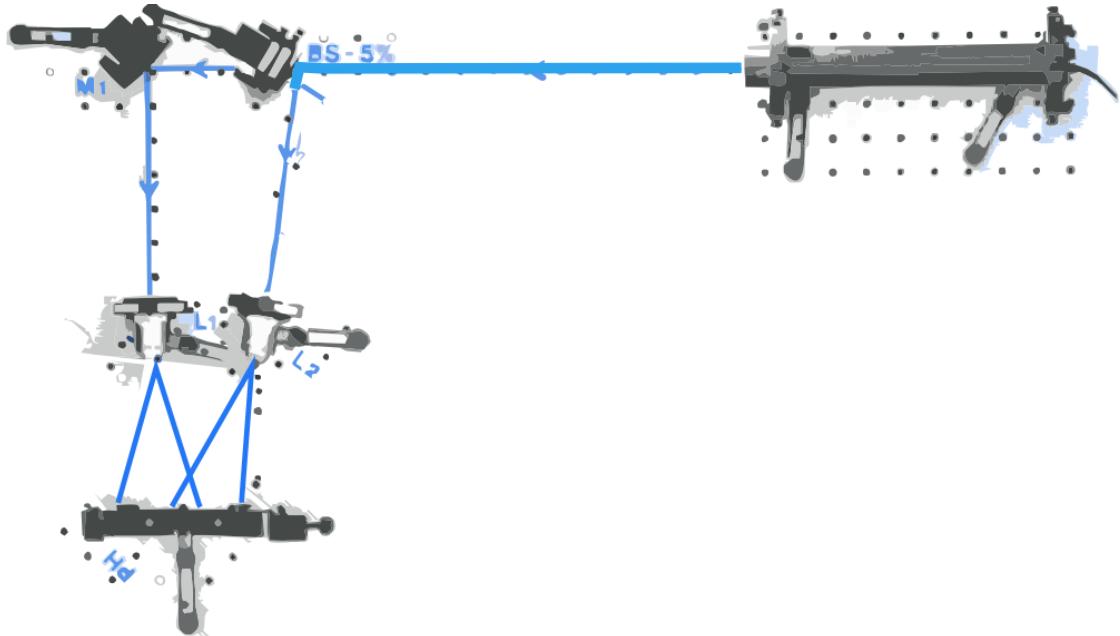
Poglejmo si hologram, ko sta predmetni in referenčni žarek ravna valova oblike  $e^{i(kr-\omega t)}$ , od katerih prvi pada na fotografsko ploščo pod kotom  $\alpha$  glede na normalo, drugi pa v smeri normale. Izberimo koordinatni sistem, v katerem se valovna vektorja prvega in drugega žarka zapišeta kot  $\vec{k}_p = (k \sin \alpha, 0, k \cos \alpha)$  in  $\vec{k}_r = (0, 0, k)$ . Vzemimo, da se fotografkska plošča nahaja v ravnini  $z = 0$ . Potem je intenziteta interferenčnega vzorca na njej enaka

$$I_{\text{int}} = C \left| 1 + e^{ik \sin \alpha x} \right|^2 = C' (1 + \cos(k \sin \alpha x)). \quad (10)$$

Hologram je kosinusna uklonska mrežica s periodo

$$d = \frac{2\pi}{k \sin \alpha}. \quad (11)$$

Natančnejši račun s Fraunhoferjevim uklonskim integralom pokaže, da dobimo pri osvetlitvi kosinusne uklonske mrežice z ravnim valom poleg prepuščenega vala še dva uklonjeni žarki prvega reda, ki sta razporejena simetrično levo in desno glede na prepuščeni val. Ustrezata drugemu in tretjemu členu v enačbi (8). 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.



**Slika 3:** Postavitev za snemanje interferograma dveh ravnih valov.

## 9.3 Naloga

1. Sestavi postavitev za snemanje holograma in ga posnemi!
2. Posnemi interferogram dveh ravnih valov!

## 9.4 Potek dela

Sistem za snemanje hologramov sestavi po vzoru, kot kaže slika 2. Poskrbi, da bo razlika v dolžini optičnih poti referenčnega in predmetnega snopa manj kot 10 cm in da bo povprečni kot med predmetnim in referenčnim snopom čim manjši. S tem dosežeš, da razdalje med maksimumi osvetlitve na fotografski plošči niso premajhne in se ni treba bati, da zaradi tresenja holografske mize in zaradi končne ločilne sposobnosti fotografiske emulzije (okrog tisoč črt na mm) hologram ne bi uspel. Oceni velikost te razdalje!

V tri banjice si pripravi kemikalije za razvijanje: v prvo nalij razvijalec, v drugo vodo in v tretjo fiksir. V temi namesti fotografsko ploščo v nosilec z emulzijo obrnjeno proti predmetu. Fotografko ploščo osvetli za 10 sekund!

Ploščo razvijaj približno dve minuti v razvijalcu (pri čemer nagibaj banjico ali pa ploščo z roko vodi po tekočini), nato jo spiraj v banjici z vodo in daj še za dve minuti v fiksir. Meritve časa lahko izvajaš s štoparico na mobilnem telefonu, ki ga z zaslonom, nastavljenim na najmanjšo jakost, postaviš na tla pod mizo.

Ko se plošča posuši, jo namesti nazaj v nosilec, odstrani predmet, zablokiraj predmetni snop in poišči sliko predmeta!

Interferogram dveh ravnih valovanj posnemi tako, da usmeriš razpršeni predmetni in referenčni žarek naravnost na fotografsko ploščo kot je prikazano na sliki 3. Tudi v tem primeru ne pozabi na opozorilo o kotu med žarkoma (ne pozabi ga zabeležiti)! Ker valovanji nista popolnoma ravni, bo mrežica nekoliko popačena. Ko hologram razviješ, ga daj v kolimiran laserski snop in izmeri kot prve ojačitve.

Ker nimaš merilca, pri snemanju holograma ne moreš določiti ekspozicije. Dobljeni hologram ne bo idealen. Ob rekonstrukciji poskusi za oba holograma ugotoviti prisotnost uklonov višjih redov. Ali je slika odvisna od velikosti holograma?

## 9.5 Literatura

E. Hecht, A. Zajac, *Optics*, ISBN 0201304252.