

Holografija

Fizikalni Praktikum V

Matevž Demšar

3. 1. 2026

1 Uvod

Holografija je vrsta fotografije, pri kateri ustvarimo tridimenzionalno ponazoritev predmeta. Pri navadni fotografiji na fotografski film zabeležimo dvodimenzionalno projekcijo gostote svetlobnega toka, pri holografiji pa shranimo tudi podatek o globinski porazdelitvi točk na površini predmeta. To storimo tako, da na fotografsko ploščo shranimo interferenčno sliko med svetlobo, ki se sipa s predmeta, in svetlobo, ki na poti do fotografke plošče predmet obide.

2 Postavitev eksperimenta

Laserski žarek razcepimo na dva enako močna snopa. En snop, ki mu pravimo predmetni, z zrcalom usmerimo proti predmetu in razpršimo z mikroskopskim objektivom. Drugi snop, ki mu pravimo referenčni, ravno tako razpršimo in usmerimo mimo predmeta na fotografsko ploščo. Ko se predmetni žarek sipi na predmetu, interferira z referenčnim in na fotografski plošči dobimo interferenčno sliko.

3 Računska izpeljava

V ravnini, na kateri leži fotografksa plošča, označimo koordinati x, y . Predmetni in referenčni žarek opisemo z električnima poljema E_p in E_r :

$$E_p = E_p^{(0)}(x, y) e^{i(\omega t - \phi(x, t))}$$

$$E_r = E_r^{(0)}(x, y) e^{i(\omega t - \psi(x, t))}$$

Tu sta $\phi(x, t)$ in $\psi(x, t)$ fazi valovanj. Ko žarka interferirata, dobimo poljsko jakost

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

Gostota svetlobnega toka je sorazmerna kvadratu jakosti električnega polja. Označimo $I = |E|^2 = EE^* \propto j$.

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

Vidimo, da se na fotografksa ploščo zapiše tako vsota jakosti obeh žarkov ($|E_p|^2 + |E_r|^2$) kot tudi njuna interferenčna slika ($E_p E_r^* + E_p^* E_r$). Ravno v tem se holografija razlikuje od navadne fotografije. Označimo še eksponicijo W_{ex} , ki je definirana kot gostota energije, ki jo zaradi svetlobnega sevanja prejme fotografksa emulzija. Velja

$$W_{ex} = It$$

Transmisivnost emulzije T (ki je tisto, kar potem vidimo kot hologram) opisemo z eksponicijo in nekim parametrom γ kot

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

Mi bomo pri nadaljnji obravnavi uporabljali amplitudno prepustnost, ki je definirana kot

$$T_{amp} = \sqrt{T} \propto I^{\gamma/2}$$

Vstavimo prej dobljeno gostoto svetlobnega toka $I = |E_p|^2 + |E_r|^2 + E_p E_r^* + E_p^* E_r$ in izpostavimo $|E_r|^2$:

$$T_{amp} = C (|E_r|^2)^{\gamma/2} \left(1 + \frac{|E_p|^2}{|E_r|^2} + \frac{1}{|E_r|^2} (E_p E_r^* + E_p^* E_r) \right)^{\gamma/2}$$

Uporabimo približek $|E_p| \ll |E_r|$. To nam omogoči, da člen $|E_p|^2/|E_r|^2$ zanemarimo, preostanek izraza v oklepaju pa razvijemo po Taylorju do drugega člena.

$$\begin{aligned} T_{amp} &= C|E_r|^\gamma \left(1 + \frac{1}{|E_r|^2} \frac{\gamma}{2} (E_p E_r^* + E_p^* E_r) \right) \\ T_{amp} &= C|E_r|^\gamma + \frac{C\gamma}{2} (E_p E_r^* + E_p^* E_r) \end{aligned}$$

Označimo $A = C|E_r|^\gamma$ in $B = C\gamma/2$ - oboje sta konstanti. Tako se formula poenostavi na

$$T_{amp} = A + B (E_p E_r^* + E_p^* E_r)$$

Če hologram osvetlimo v referenčnim žarkom, je električna poljska jakost na drugi strani fotografiske plošče enaka

$$E_{holo} = T_{amp} E_r = AE_r + B|E_r|^2 E_p + BE_r^2 E_p^*$$

To pomeni, da imamo na izhodni strani tri snope: oslabljen referenčni snop AE_r , divergentni snop $B|E_r|^2 E_p$, ki navidez izhaja iz predmeta in konvergentni žarek $BE_r^2 E_p^*$, ki daje realno sliko predmeta.

4 Hologram ravnih valov

Ravne valove opisuje enačba

$$E(\vec{r}, t) = e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Predmetni in referenčni žarek nastavimo tako, da referenčni žarek pade na fotografsko ploščo v smeri normale, predmetni pa pod kotom α glede na normalo. Tedaj je

$$\begin{aligned} \vec{k}_p &= (k \sin \alpha, 0, k \cos \alpha) \\ \vec{k}_r &= (0, 0, k) \end{aligned}$$

Kot prej označimo, da se holografnska plošča nahaja v ravnini $z = 0$. Gostota interferenčnega toka je enaka

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

Sledi, da je hologram kosinusna uklonska mrežiča s periodo

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

5 Rezultati

Na žalost ni uspela noben poskus holograma. Posledično nimamo rezultatov, ki bi jih lahko analizirali. Za primer lahko uporabimo meritev bivšega študenta, ki je pri analizi holograma ravnih valov dobil $\alpha = 14,4^\circ \pm 0,1^\circ$. Iz znane valovne dolžine laserja $\lambda = 632 \text{ nm}$ je študent dobil

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