

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

Seminar
Uporaba holografije

Blaž Kavčič

Ljubljana, maj 2007

Povzetek

Seminar na kratko povzame princip holografije in opiše vrste hologramov ter njihovo možno uporabo. Nato se osredotoči na sklope aplikacij in bolj podrobno na nekaj posameznih primerov uporabe holografije v praktične namene ter skuša čimbolj zaobjeti širok spekter le-teh.

1 Uvod

Pri fotografiji lahko na fotografski film ali CCD čip zabeležimo le gostoto svetlobnega toka I , ki ga preko sistema leč projiciramo na naš detektor. Ta količina je sorazmerna kvadratu amplitude U vpadnega svetlobnega valovanja, oziroma $I(\mathbf{r}) \propto |U(\mathbf{r})|^2$. Tako dobljena slika je dvodimenzionalna, ker se zaradi kvadratne odvisnosti pri zapisu izgubi podatek o fazi valovanja, ostane pa le informacija o intenziteti v posamezni točki zapisa. Ko na razvito fotografijo posvetimo, se v odvisnosti od potemljenosti od vsake točke odbije ustrezna količina svetlobe oziroma ustrezna barva pri barvnih slikah. Podobno je pri diapozitivu, le da tam svetlobo pošljemo skozi sliko in na drugi strani opazujemo projekcijo.

Faza valovanja je tista, ki pove smer svetlobnih valov in nosi tudi informacijo o globinski porazdelitvi točk oziroma predmetov v prostoru. Če želimo izdelati tridimenzionalno sliko, torej načeloma potrebujemo metodo, s katero bi na nek medij zapisali tudi podatke o fazi svetlobnih valov. Diapozitiv bi v tem primeru moral imeti kompleksno prepustnost, da bi ob osvetlitvi popolnoma rekonstruiral prvotni snop svetlobe - ne le intenzitete, temveč tudi smeri in fazne zamike.

Metoda za doseg tega cilja je holografija, rezultat pa dosežemo tako, da svetlobo s predmeta primerjamo z nekim referenčnim žarkom, saj tako s pomočjo interference dobimo informacijo o fazah.

Idejni oče holografije je madžarski fizik Gabor, ki je leta 1947 predlagal holografijo za izboljšanje rezultatov pri elektronski mikroskopiji [1]. Tiste čase ni bilo primernih koherentnih svetil razen morda srebrove lučke, zato za optično holografijo še ni bilo pravih pogojev [1]. Za izdelavo holograma je namreč nujna koherentna svetloba. Laser so izumili šele v šestdesetih letih, tako da se je ta panoga zares začela 15 let po prvi ideji, Gabor pa je zanj prejel Nobelovo nagrado leta 1971 [1].

2 Teorija holografije

2.1 Holografski zapis in rekonstrukcija

Imejmo v smeri osi z referenčen žarek s kompleksno amplitudo $E_r(\mathbf{r})$ ter predmetni žarek $E_p(\mathbf{r})$. Predmetni žarek naj bo tisti, ki nas zanima, z interferenco pa ga bomo primerjali z referenčnim žarkom. To referenčno sliko bomo zapisali v hologram. Oba žarka naj se prekrivata in naj bo sta prostorsko in časovno koherentna. Če osvetljujeva ploščo, na kateri želimo izdelati hologram, lahko skupno amplitudo valovanja na tistem mestu zaradi koherentnosti dobimo kar kot vsoto obeh amplitud:

$$E_0 = E_p + E_r. \quad (1)$$

Ustrezna gostota svetlobnega toka pa je:

$$I_0(\vec{r}) = (E_p + E_r)(E_p + E_r)^* = I_p + I_r + E_p^* E_r + E_p E_r^*. \quad (2)$$

Interferenčna slika I_0 , podana v zgornji enačbi, se bo torej zapisala na holografsko ploščo. Plošča bo počrnjena tako, da je amplitudna prepustnost enaka $t = I_0$. Ko razvit hologram ponovno osvetlimo z referenčnim žarkom E_r , bo po prehodu na drugi strani amplituda valovanja E_H :

$$E_H(\vec{r}) = tE_r = E_r (E_p^2 + E_r^2 + E_p^* E_r + E_p E_r^*). \quad (3)$$

Kaj pomenijo vsi členi v tem izrazu? Z upoštevanjem definicij svetlobnih tokov I ter v krajšem zapisu je to:

$$E_H = E_r (I_r + I_o) + E_r^2 E_p^* + I_r E_p. \quad (4)$$

Prvi člen je kar osvetlitveni žarek E_r , pomnožen z vsoto svetlobnih tokov obeh začetnih valov. Gre v bistvu za del osvetlitvenega žarka, ki na drugi strani holograma pot nemoteno nadaljuje, ta del nas ne zanima.

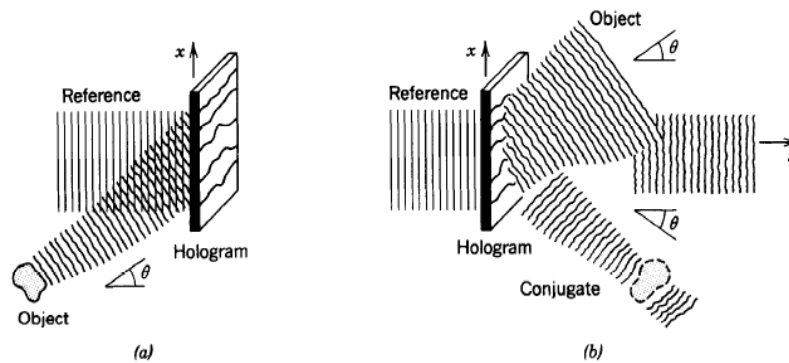
Tretji člen je iskani originalni predmetni val, pomnožen z intenziteto referenčnega. Razen spremenjene amplitude je torej popolna rekonstrukcija prvotnega vala E_p , ki se za hologramom širi enako,

kot se je prej predmetni val. Če je hologram posnet v dovolj dobri ločljivosti in idealnih pogojih, sploh ne moremo ločiti med gledanjem pravega predmeta in njegove slike, predmet vidimo tam, kjer je bil ob času snemanja. Predmetni žarek je virtualen in divergira v smeri stran od holograma, ki se obnaša kot realno ploskovno sveto.

Drugi člen predstavlja žarek, konjugiran predmetnemu. Je enako močan, a ima nasprotno smer in je realen. Ta žarek konvergira v realno sliko, ki jo lahko zares vidimo, če v fokus postavimo zaslon.

Zgoraj naveden primer je kolinearen hologram. Njegova težava je, da se predmetni, konjugirani in referenčni val prekrivajo, česar ne želimo. V večini primerov referenčni in predmetni žarek, zato prostorsko ne sovpadata, temveč pri izdelavi hologram zadaneta pod nekim kotom, s čimer se po prehodu holograma lažje loči vse tri žarke. To imenujemo izvenosna holografija.

Navadno za predmetni žarek tudi nimamo ravnih valov kot zgoraj, temveč poljubno ukrivljene valove, ki prihajajo z nekega predmeta. Taki valovi niso prostorsko omejeni, temveč imajo neko rahlo divergenco in podobno. Skica te situacije je na sliki 1. Vse to vpliva na izraz (4), a za velike razdalje, dobro prostorsko ločenost in za razumevanje koncepta ta obravnava zadošča [2]. Zapomniti si moramo torej, da ob osvetlitvi holograma poleg bolj ali manj nespremenjenega referenčnega žarka dobimo še dva, prvotnega predmetnega in njemu konjugiranega žarka.



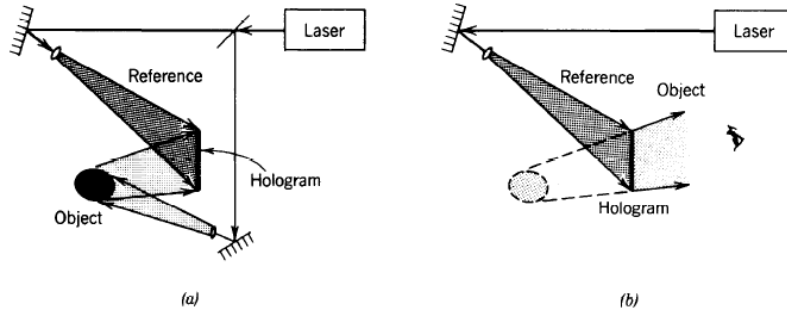
Slika 1: a) Referenčni in predmetni žarek z interferenco ustvarita hologram. b) Ob ponovni osvetlitvi se popolnoma rekonstruira predmetni žarek, dobimo še konjugirani realni žarek, referenčni žarek pa ostane približno enak kot prej. Kot θ se ohranja. Slika je povzeta iz [2].

Mimogrede, svetlobo iz vsake točke nekega predmeta si lahko v praznem prostoru predstavljamo kot krogelni val, ki se širi v cel prostor in torej zadene celotno holografsko ploščo in z valovi iz ostalih točk v prostoru tvori interferenčno sliko v vsaki točki holograma. Ko je hologram razvit, se torej v vsaki točki nahaja zapis o celotni sliki, kar je čisto drugače kot na fotografiji, kjer vsaki točki slikane scene ustreza točka na fotografiji. Hologram si najlažje predstavljamo kot okno, skozi katerega gledamo nek predmet. Če se po sobi premikamo levo in desno ali gor in dol, lahko vidimo tudi okolico predmeta oziroma za predmet, če je le okno dovolj veliko. Če okno zelo zmanjšamo ali ga razdelimo na več delov, bomo predmet zunaj še vedno videli, a na voljo bo manj maneverskega prostora oziroma bolj omejena perspektiva. Analogno s tem lahko hologram razrežemo na manjše kose, pa se v njih še vedno vidi celoten predmet.

2.2 Izdelava holograma

Kot holografski material se lahko uporabi srebrov halogenid oziroma podobne snovi kot v fotografiji, le zrna morajo biti dovolj fina, ker je za holografijo potrebna velika ločljivost. Interferenčne proge so med seboj namreč razmaknjene v redu valovnih dolžin svetlobe, taka slika pa se mora ostro zapisati v hologram. Uporabi se lahko tudi fotoobčutljive materiale, kot so fotorefraktivne želatine in fotopolimeri, ki se jim ob osvetlitvi spremeni lomni količnik v odvisnosti od moči svetlobnega toka na tistem mestu [3]. Namesto filmov ali kristalov lahko uporabimo digitalni detektor, recimo CCD.

V tem primeru govorimo o digitalni holografiji. Navadno pri snemanju en žarek razdelimo na dva dela in ju uporabimo kot referenčnega in predmetnega, kot na sliki 2.



Slika 2: Tipičen aparat za snemanje holograma: a) laserski žarek razdelimo na dva dela na predmetni in referenčni žarek ter z njima naredimo hologram. b) Ko razvit hologram spet osvetlimo, se predmet navidezno pojavi točno tam kjer je bil pri snemanju [2].

Pomembno je, da je izvor svetlobe pri izdelavi hologramov koherenten, saj v nekoherentni svetlobi faza neprestano fluktuiraa. Tudi interferenčna slika se zato neprestano spreminja in razmaže, to pa pokvari hologram. Dovolj veliko stopnjo koherence nam da šele laser.

Izdelane holograme je možno opazovati tudi pri beli svetlobi, o tem več v poglavju 3.3. Možno je narediti tudi holograme živih bitij oziroma predmetov v gibanju, a uporabiti moramo pulzne laserje, da je ekspozicija kratka in ni razmazanosti. Druga možnost je stereogram, opisan v poglavju 3.5.

3 Vrste hologramov

Hologrami so klasificirani na veliko različnih načinov, ki se med seboj prekrivajo. Ločimo jih glede na način izdelave, vir svetlobe pri opazovanju, debeline in podobno. V tem delu so predstavljene glavne vrste hologramov, ki jih srečamo v praksi, za nekatere izmed njih pa je opisanih tudi nekaj aplikacij.

3.1 Tanki in debeli hologrami

Med tanke holograme štejemo tanko površino ali film, v katerem je interferenčna slika zapisana predvsem v ravnini. V tem primeru je hologram tanek v primerjavi z razmiki med interferenčnimi progami. Takšni so recimo hologrami na ploščah s srebrevim halogenidom.

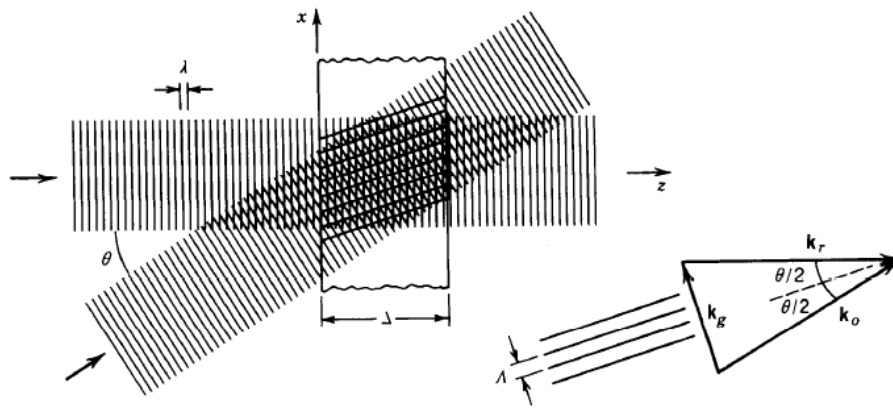
Hologram lahko naredimo tudi v debelejšem materialu, tako da je v njem interferenčna slika posneta v treh dimenzijah. To tehniko imenujemo tudi volumska holografija. Kot primer pogledimo izpeljavo [2] za dva ravna vala z valovno dolžino λ , enega v smeri osi z z valovnim vektorjem k_r , drugega pa pod kotom θ z valovnim vektorjem k_o . Njuna razlika naj bo k_g . Na sliki 3 je skicirana interferenčna slika takih valov, kjer se lepo vidi, da nastanejo interferenčne proge pod kotom $\theta/2$ glede na os z .

To je pravzaprav volumska uklonska mrežica, kjer smer interferenčnih prog označuje vektor mrežice k_g , s pomočjo dodatne skice na isti sliki pa se izrazi tudi razmak med progami Λ :

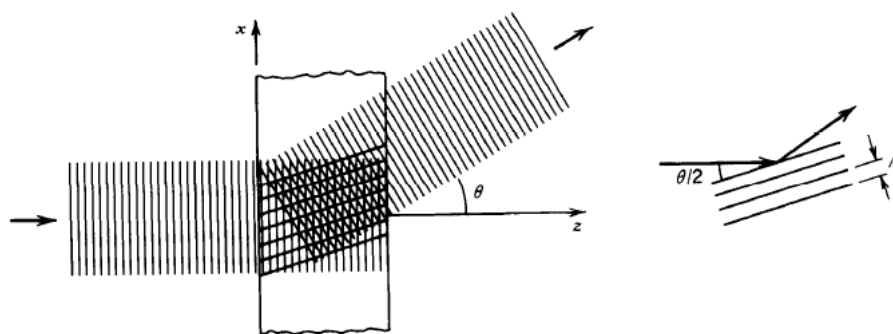
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}. \quad (5)$$

Ko tak hologram osvetlimo z nekim žarkom, se bo ta uklonil, če je zanj v hologramu na teh interferenčnih progah izpolnjen Braggov pogoj (slika 4):

$$\sin(\theta/2) = \lambda/2\Lambda. \quad (6)$$



Slika 3: Dva ravna vala v volumnu holograma ustvarita poševne interferenčne proge. Desno je povečana shema, ki prikazuje geometrijo obeh žarkov in nastale proge, katerih razmak je enak Λ [2].



Slika 4: Ko na debel hologram spet posvetimo z referenčnim žarkom, pride do uklona in popolne rekonstrukcije prvotnega predmetnega žarka, če je izpolnjen Braggov pogoj (6) za uklon na interferenčnih progah. [2]

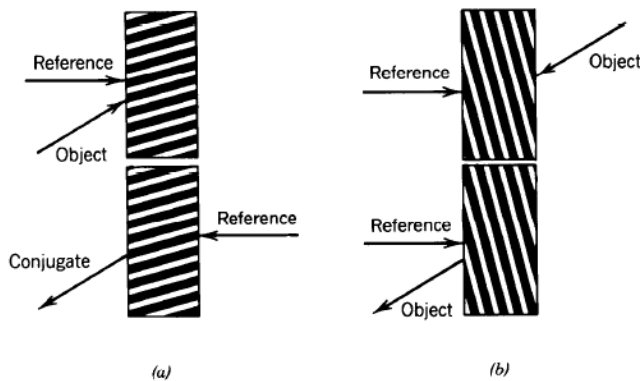
Za prvotni referenčni žarek bo pogoj kota in valovne dolžine seveda izpolnjen, za vse ostale valovne dolžine λ' pri istem kotu ali isto valovno dolžino pri drugih kotih pa ne. Tak hologram je torej zelo selektiven pri prepuščanju svetlobe z dobro definirano smerjo in valovno dolžino. Vsakemu žarku s spremenjeno valovno dolžino ustreza pravi vpadni kot glede na prvotno smer, pri katerem je Braggov pogoj spet izpolnjen in pride do uklona.

Iz tega lahko sklepamo, da lahko tak hologram osvetlimo s katerokoli svetlobo, le primerno ga moramo zasukati, da bo izpolnjen pogoj uklona. Če ga osvetlimo z belo svetlobo, se bo slika rekonstruirala le v barvi, za katero je izpolnjen Braggov pogoj. Če tak hologram vrtimo v roki, bi moral spreminjati barvo od modre proti rdeči, kar se tudi res zgodi.

3.2 Presevni in odbojni hologrami

V izpeljavah in slikah v poglavju 2.1 so prikazani presevni hologrami. Izdelani so tako, da referenčni in predmetni žarek na hologram vpadata iz iste strani. Ko razvit hologram ponovno osvetlimo z referenčnim žarkom, lahko rekonstruiran predmetni žarek ter konjugiran žarek opazujemo na drugi strani holograma. Če pri izdelavi na hologram pošljemo referenčni in predmetni žarek iz dveh različnih strani, pa se bosta ob ponovni osvetlitvi z referenčnim žarkom predmetni in konjugirani žarek rekonstruirala na isti strani kot je vir svetlobe za osvetljevanje. Tak tip holograma lahko gledamo podobno kot fotografijo: vir svetlobe mora biti za nami, odbita svetloba pa rekonstruira tridimenzionalno podobo. Iz očitnih razlogov se ta tip holograma imenuje odbojni.

Razlog za rekonstrukcijo žarkov na eni ali drugi strani je v različnih interferenčnih vzorcih, ki nastanejo pri izdelavi holograma. Interferenčne proge so približno pravokotne na hologram, če jih naredita dva žarka s praktično isto smerjo, ter skoraj vzporedne, če interferirata žarka iz dveh skoraj nasprotnih smeri. Braggov pogoj je za referenčni žarek po razvitju obeh vrst holograma zato izpolnjen pri zelo različnih kotih v obeh primerih. Skica obeh situacij je na sliki 5.



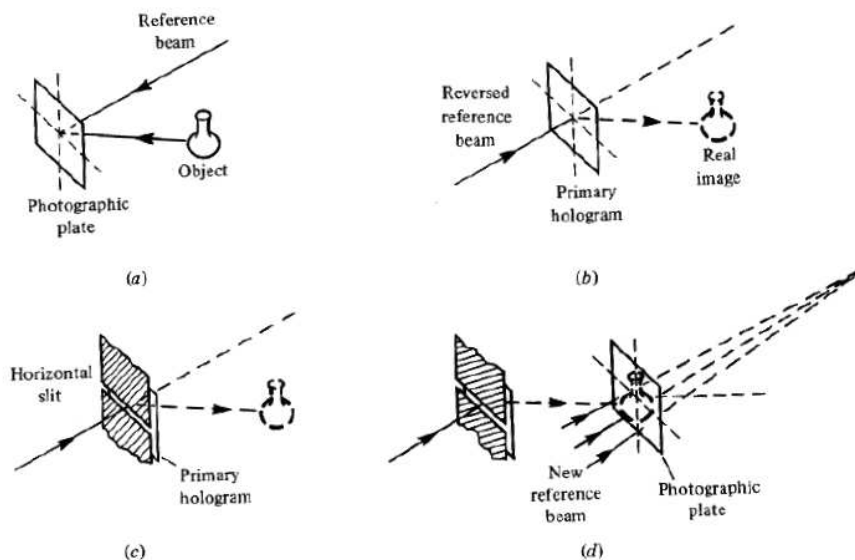
Slika 5: a) Če hologram izdelamo z žarkoma, ki vpadata iz iste strani, bomo dobili presevni hologram s konjugiranim (ali predmetnim) žarkom na drugi strani kot svetimo, b) če iz različnih, pa odbojnega, torej predmetni in konjugirani žarek na isti strani [2].

3.3 Mavrični hologrami

Mavrični hologrami so zagotovo tisti, od katerih si vsaj enega ali več lasti skoraj vsakdo. So zelo pogosti kot zaščitni elementi proti ponarejanju, recimo na denarju, kreditnih karticah in avtentičnih izdelkih, kot je programska oprema, elektronika in podobno. Zaradi svoje tankosti in poceni izdelave so lahko nalepljeni tudi na dokumente, so priloženi revijam, služijo kot igrače ali kot popestritev določenega izdelka.

Najprej se izdelata hologram predmeta, ki ga želimo uporabiti za mavrični hologram. Toda to še ni vse. Takšne holograme v praksi gledamo pri beli svetlobi z bogatim spektrom, ki povzroča

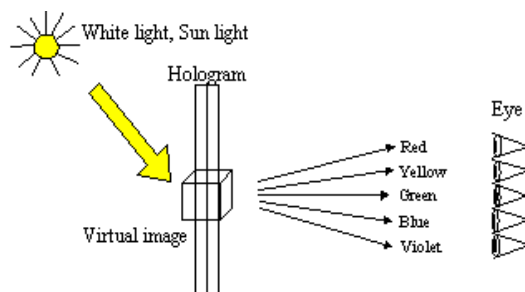
ni lokaliziran raven val, zato pri debelem hologramu dobimo cel kup rekonstruiranih slik, ki so fokusirane na različnih razdaljah, na različnih mestih in v različnih barvah [4]. Braggov pogoj v hologramu je za položaj naših oči izpolnjen za različne žarke svetlobe, ki prihajajo iz naše okolice, zato bomo tak hologram videli v mavričnih barvah in zaradi delnega prekrivanja mnogih slik nejasno. Želimo se torej znebiti dela informacij v hologramu. Potek izdelave je na sliki 6.



Slika 6: Za mavrični hologram a) naredimo hologram predmeta, b) ga osvetlimo, c) uporabimo le sliko, dobljeno skozi režo, in d) naredimo hologram realne slike [5].

Pred izdelan hologram se zato postavi ozka vodoravna reža, tako omejen hologram pa ponovno osvetlimo z referenčnim žarkom [5]. Zanima nas konjugirani žarek, ki ustvari realno sliko prvotno slikanega predmeta. V točko, kjer se ta slika ustvari, postavimo drug holografski material in posnamemo hologram [5]. Z vodoravno režo pred prvim hologramom se je tako izgubila informacija o t.i. navpični paralaksi, še vedno pa je nov hologram globinski oziroma tridimenzionalen v vodoravni smeri. S tem smo se znebili velikega dela slik predmeta in pri določenem kotu z vodoravno osjo bomo videli hologram le v eni barvi, ker bo v navpični smeri le za eno valovno dolžino izpolnjen Braggov pogoj.

Pri sukanju okrog vodoravne osi bo Braggov pogoj zvezno izpolnjen za različne valovne dolžine, zato bo hologram spreminjal barvo kot pri mavrici, kar je skicirano na sliki 7. Če ga nagibamo še okrog navpične osi, pa ga bomo videli globinsko.



Slika 7: Barve se na uklonskih mrežicah (kar v bistvu hologram je) uklanjajo različno močno, zato bomo pri določenem kotu med očmi in hologramom videli sliko le v eni barvi [6].

Postavitev drugega holograma v točko realne slike prvega holograma očitno poleg barvitosti da tudi zelo jasen hologram, a z majhno globino [7]. Druga možnost je posneti hologram z direktno projekcijo slike na hologram z lečo in zaslonko. Hologram je v bistvu počrnjena plast, zato lahko s kombinacijo nanašanja plasti in jedkanja iz njega naredimo vzdržljivo kovinsko matrico. Z njo lahko delamo odtise v polimernih ali plastičnih materialih in tako v velikih količinah hitro in poceni repliciramo hologram. Odtisnjeni hologram še pokrijemo s plastjo kovine, da dobro odbija svetlobo. Naprava za takšno tiskanje se imenuje Holocopier [4].

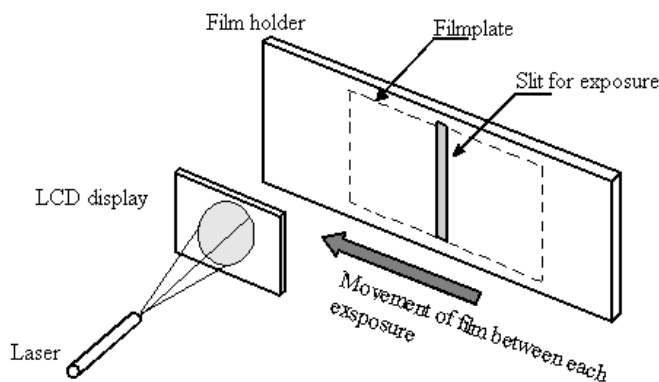
3.4 Mnogokratni hologrami

Uporabnost holograma le pri strogo izpolnjenem Braggovem pogoju za sipanje pomeni, da lahko v en sam hologram pod različnimi koti shranimo več slik [8]. Pri izdelavi moramo le poskrbeti, da pri eni valovni dolžini in eni smeri referenčnega (bralnega) žarka pride do izpolnitve pogoja le za enega od hologramov. Pri tem se posamezni hologrami preveč ne motijo med sabo, vseeno pa je nekaj šuma, ker je občasno Braggov pogoj le izpolnjen še na sosednjih hologramih oziroma na vsaj nekaj izmed njihovih ravnin.

Glede na širino Braggovih uklonskih vrhov se teoretično v en hologram da zapisati reda 10 tisoč uklonskih slik [9]. Ta lastnost namiguje na potencialno uporabo za shranjevanje podatkov ali pa za poenostavljene zgradbe raznih optičnih naprav, če izdelamo holograme, katerim lahko z majhnimi zasuki spreminjamo namembnost in se tako znebimo odvečne optike.

3.5 Stereogrami

Hologram lahko izdelamo tudi iz serije fotografij nekega predmeta. Tu pri izdelavi sami ne gre za pravo holografijo, so pa rezultati predstavljeni holografsko oziroma tridimenzionalno. Predmet lahko poslikamo iz vseh strani, recimo z nekaj slikami na kotno stopinjo, in tako dobimo približno tisoč slik. Nato holografski film osvetljujemo s pomočjo navpične ozke reže in na vsakem položaju reže na tisti del filma posnamemo hologram ene od slik, ali pa namesto hologramov samih fotografij primerne vzorce ustvarimo in projiciramo na hologram kar z LCD zaslonom, kot na sliki 8 [10].



Slika 8: Na monokromatskem LCD zaslonu se za vsako rezino stereograma izdelava primeren holografski vzorec in se rezino osvetli [10].

Namesto veliko predhodnih fotografij lahko predmet tudi direktno snemamo v načinu stereografije, a v tem primeru moramo uporabiti laser že pri snemanju predmeta. Proces zapisovanja stereograma z veliko hitrostjo počne avtomatiziran sistem.

Ko je tak stereogram gotov, je to v resnici slika iz tisoč navpičnih trakov, vsak od njih pa nosi hologram s posnetkom iz svojega zornega kota. Ko na tak hologram posvetimo z enobarvno svetlobo, vidimo tridimenzionalno sliko, ki ima seveda zaradi načina izdelave take lastnosti le v vodoravni dimenziji, v navpični pa ne [10].

Metoda je uporabna za enostavno predstavljanje predmetov v treh dimenzijah v komercialne namene in tudi v medicini. Takšne holograme lahko izdelamo iz posnetkov računalniške tomografije [11], lahko pa bi posneli fotografije različnih organov in delov telesa ter jih spremenili v hologram. To bi bilo uporabno za študente medicine, ki bi si tako zapletene strukture lažje predstavljali; v enem od člankov je predstavljeno, kako bi se lahko v učne namene izdelalo kvaliteten hologram možganov [12]. Nasploh so stereogrami zanimivi za učne namene tudi na drugih področjih.

4 Holografski optični elementi

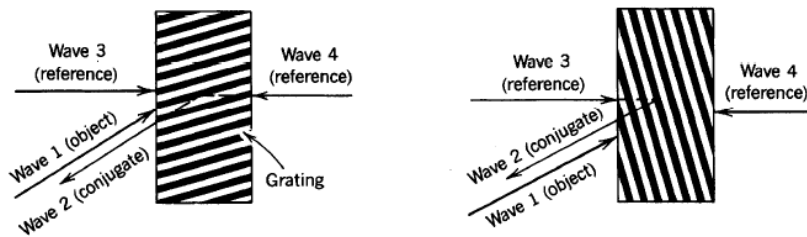
Holografski optični elementi imajo zelo široko uporabnost, saj jih je možno uporabiti kot leče, ogledala, filtre in uklonske mrežice [8]. Dva zelo enostavna elementa bi bila recimo holografska leča ali pa korekcijska plošča, ki popravi valovne fronte pri prehodu skozi neki nepopoln deformiran kos stekla. Hologram, ustvarjen z ekspozicijo točkastega svetila, se recimo obnaša kot leča, uporaba konjugiranega žarka pri presvetljenju holograma deformiranega stekla pa da ravno konjugirano sliko tisti, ki jo dobimo po prehodu svetlobe skozi to steklo [2]. S tem bi lahko popravili deformacije valovnih front. Interferenčna slika dveh ravnih valov je recimo kosinusna modulacija prepustnosti, če iz nje ustvarimo hologram tako dobimo uklonsko mrežico, ki nam referenčni žarek razkloni na še dva dodatna žarka. Holografski optični elementi verjetno ne bodo izpodrinili klasičnih, so pa v različnih primerih od njih bolj učinkoviti oziroma primerni. Poglejmo si nekaj primerov elementov in nekaj konkretnih aplikacij.

4.1 Fazna konjugacija

Fazna konjugacija je zanimiv nelinearen optični pojav tretjega reda, pri katerem se v posebni snovi, kot je recimo fotorefrakcijski material, obrne faza svetlobe. To pomeni, da se svetloba v snovi odbije nazaj točno v tisto smer, iz katere je prišla, kar ustreza obratu v času [2]. Fotorefraktivnost pomeni, da svetloba vpliva na porazdelitev naboja v snovi in s tem spremeni lomni količnik snovi. Elektroni lahko vpijejo svetlobo, preskočijo v prevodni pas in se prerazporedijo pod vplivom polja svetlobe, prav tako vrzeli, ki ostanejo za njimi [13]. Ko zunanjskega polja ni več, nova razporeditev ostane, ker se nosilci naboja ne morejo več gibati. Učinek se sčasoma izniči zaradi termičnega gibanja, lahko pa ga pospešimo sami [9].

Fazna konjugacija je neke vrste realnočasovna holografija: dva žarka svetlobe v fotorefraktorju interferirata in s tem ustvarita hologram. Tretji žarek, ki istočasno sveti v snov, služi kot referenčni ali bralni žarek in na znan način v hologramu reproducira predmetni žarek in ustvari konjugiran žarek. Če ta tretji žarek posveti iz prave smeri, bo četrti oziroma konjugirani žarek točno poravnan z originalnim predmetnim, le da bo imel nasprotno smer. Slika 9 to lepo prikaže. Zanimivo je, da je konjugirani oziroma odbiti žarek lahko močnejši od originalnega, če je bralni tretji žarek dovolj močan.

Realnočasovna holografija je trenutno zanimiva tema pri holografskem shranjevanju podatkov, ki je podrobneje opisano v poglavju 6. Zanimiva je tudi uporaba fotorefraktivnih materialov v resonatorjih, če imamo v njih kakšne elemente, ki pokvarijo valovne fronte. Po vsakem preletu resonatorja se valovna fronta pokvari, konjugacijsko zrcalo jo ravno obrne, po drugem preletu pa imajo spet idealno ravno obliko [2]. Na podoben način bi lahko korigirali nekatere atmosfere efekte pri optični komunikaciji v odprtem prostoru [3].

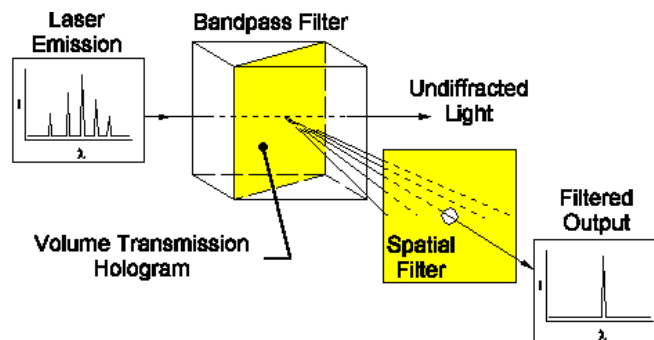


Slika 9: Fazno konjugacijo lahko dosežemo tako na presečen (levo) kot odbojen način (desno). Na levi sliki žarka 1 in 3 ustvarjata hologram, na katerega sveti žarek 4, in povzroči žarek 2, na desni sliki pa na podoben način hologram tvorijo 1 in 4, osvetljuje pa ga žarek 3 [2].

4.2 Holografski filtri

Z zapisom interferenčne slike dveh enakih medsebojno koherentnih laserskih žarkov v hologram je možno ustvariti zelo zmogljive atenuacijske filtre, ki se uporabljajo pri laserskih sistemih [14]. Atenuacija je možna tja preko t.i. optične gostote 6 oziroma 6 dB/cm. Poleg velike optične gostote so lahko takšni filtri tudi zelo selektivni in absorbirajo le zelo ozke frekvenčne pasove.

S pasovnimi filtri pa se lahko prostorsko loči svetlobo iz laserja od neželene svetlobe, recimo fluorescence ali prehodov med stanji v plazmi [15]. Po prehodu skozi tak filter se ozek izbran pas valovnih dolžin močno ukloni na principu Braggovega uklona, neželen spekter pa skozenj potuje neovirano, kakor je opisano pri debelih hologramih. Laser navadno deluje v več načinih (pri več frekvencah) zelo blizu skupaj, zaradi močnega uklona se te valovne dolžine dovolj razklonijo, da lahko primerno izberemo s prostorskim filtrom oziroma zaslonko, kot je demonstrirano na sliki 10 [15].



Slika 10: Najprej s pasovnim filtrom ločimo lasersko svetlobo od vsega ostalega, nato pa s prostorskim filtrom izberemo iskani način laserja (pravo valovno dolžino) [15].

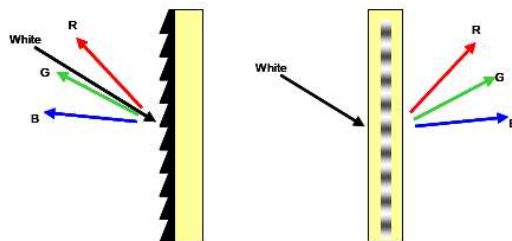
Obe vrsti filtrov je možno izdelati v večjih velikostih (50 cm in več), kar je dodatna prednost pred običajnimi filtri izdelanimi z napanjevanjem tankih plasti [15]. Eden izmed proizvajalcev takih filtrov je recimo Kaiser.

4.3 Uklonske mrežice

Navadno gre v tem primeru za debele (volumske) holograme. Tako kot holografski filtri izkoriščajo Braggov uklon v notranjosti holograma. Navadno kot medij za zapis holograma služi dikromatična želatina, v kateri se kot posledica interference svetlobe pri izdelavi modulira uklonski količnik (slika 11) [16].

Snov, v kateri je zapisan hologram, lahko iz obeh strani obdamo s prevleko in jo s tem zaščitimo pred zunanji vplivi. Klasične nazobčane mrežice je zaradi oblike težko čistiti, mrežice niso preveč robustne zaradi fine površine, poleg tega pa imajo relativno visoko stopnjo šuma zaradi dodatnih uklonov na robovih zob. Pri holografskih gre le za primerno interferenčno sliko, kjer so te težave

odpravljene. Uklonska ploščica je gladka in jo je lahko čistiti, njena površina je lahko zaščitena, nepravilnosti zaradi zobcev ni, izkaže se, da so temperaturno zelo neobčutljive, pa še njihov učinek je enakomeren preko celotnega uporabnega spektra [15, 17, 14]. Dobre strani so torej očitne.



Slika 11: Primer klasične uklonske mrežice (levo) in holografske mrežice (desno). Holografska enakomerno opravlja bolj učinkovito in je povrhu vsega še bolj robustna [15].

Holografska uklonska mrežica je zaradi teh lastnosti zelo uporabna v astronomiji in nasploh v spektrometriji zaradi visoke disperzije in velike transmisivnosti ali odbojnosti v delovnem območju. V izdelavi so mrežice, ki uklanjajo svetlobo pri $1,5 \mu\text{m}$ (teoretična transmisivnost želatine je sicer znatna do valovne dolžine $2,8 \mu\text{m}$) [16]. Frekvenčni razpon, pri katerem delujejo holografske mrežice, je manjši kot pri klasičnih mrežicah, a ima za valovno dolžino v vrhu velik izkoristek, tudi blizu 100% [16]. Valovno dolžino največjega odziva je zelo lahko spreminjati, ker se uklonsko mrežico le nagne oziroma zavrti za neki kot. Braggov pogoj bo tako izpolnjen pri drugih valovnih dolžinah in problem je rešen.

Poleg tega sta lahko na eni mrežici zapisana dva holograma. Eden je lahko korekcijski in s tem odpravi potrebo po sistemu leč za kompenzacijo aberacij svetlobe — na ta način je mogoče uporabiti tudi zbiralne leče z majhnimi goriščnimi razdaljami oziroma z majhnim številom f , tudi do 1,8 [18]. Dve plasti sta lahko izdelani tudi tako, da recimo v isto smer pri največjem izkoristku uklanjata dve različni valovni dolžini, naprimer črti vodika $H\alpha$ in $H\beta$ ali kaj podobnega [16].

Zelo pomembna je enostavna in poceni izdelava mrežic po meri posameznega uporabnika. Klasične mrežice se izdelujejo s pomočjo dragih kalupov oziroma matrik, tako da je uporabnik navadno prisiljen v naročanje čim bolj ustreznih mrežic preko katalogov. Za izdelavo holografske mrežice pa se bodoči hologram vstavi v napravo, ki na njem ustvari izračunano zeleno interferenčno sliko in izdelava hologram. Na ta način uporabnik dobi unikat, ki po lastnostih točno ustreza željam.

Uklonske mrežice lahko tudi uspešno nadomestijo prizme za stiskanje laserskih pulzov pri ultrahitrih laserskih sistemih [14]. V telekomunikacijah so holografski uklonski elementi pomembni pri ločevanju svetlobe, ki pride po optičnih vlaknih, zaradi svoje velike disperzije valovnih dolžin — do okrog $0,7^\circ$ na nanometer razlike dveh valovnih dolžin [14].

4.4 Čitalec črtnih kod

Vsakdanji primer uporabe holografskih optičnih elementov so čitalci črtnih kod. Vir svetlobe je navadno rdeč laser, katerega izhodni snop gibljiv sistem ogledal ali vrteča prizma hitro premikajo levo in desno, s čimer se prečita celotno črtno kodo. Fotodetektor zazna odbit svetlobni tok in ga pretvori v digitalno obliko [19].

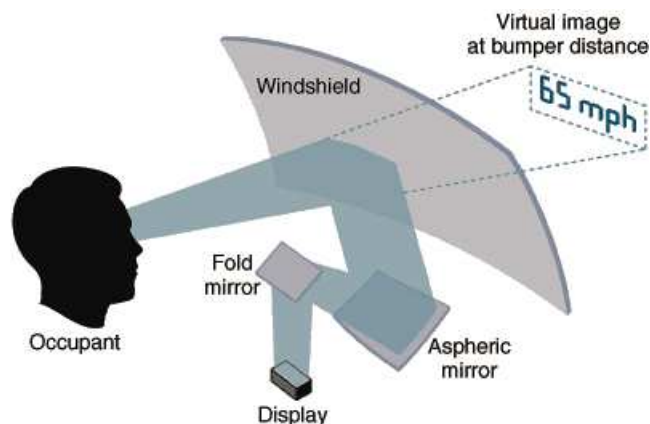
Namesto prizem in ogledal se velikokrat uporablja hologram v obliki majhnega tankega diska. Disk je podobno kot torta razdeljen na veliko rezin, vsaka s svojim hologramom, ki služi kot uklonska mrežica. Če delček diska svetlobo ukloni pod nekim kotom, vsak nadaljnji delček pa pod rahlo drugačnim kotom, lahko izdelamo sekvenco, v kateri se žarek uklanja periodično levo in desno. Ko torej na disk posvetimo z laserjem in disk zavrtimo, se bo na izhodni strani žarek uklanjal (premikal) levo in desno in s tem opravil nalogo čitanja kode. To premikanje bo navidezno zvezno, če je gostota različnih hologramov na disku dovolj velika. Holografski disk je manjši, lažji in bolj robusten od premičnih ogledal in prizem.

4.5 HUD - Head-Up Display

Zasloni HUD so se najprej pojavili v vojaški industriji oziroma vojaškem letalstvu, kasneje pa so se razširili tudi v komercialno letalstvo in avtomobilsko industrijo. Tak zaslon prikazuje različne informacije pomembne za pilota letala, recimo podatke o hitrosti, višini leta, nagnjenosti, položaju zakrilc ipd. Ključna razlika od t.i. HDD (Head-Down Display) zaslonov je v tem, da pilotu informacije prikazujejo v njegovem vidnem polju, torej kar nekje na vetrobranskem steklu ali pa na dodatnem zaslonu pred njim. Pilot tako pogleda nikoli ne odvrtača od okolice letala z gledanjem na števec na armaturi oziroma tudi iskanjem najpomembnejših števcov med vsemi stikali in gumbi v pilotskih kabinah. Za nevarne in hitre manevre, recimo pristajanje v slabem vremenu ali na letalonosilkah, je to ključnega pomena.

Pogled na armaturo in spet nazaj pomeni tudi prilagajanje očesnih leč oziroma refokusiranje pogleda, kar vzame nekaj dodatnih trenutkov. Pri navadni projekciji informacij na zaslon HUD je ta težava prav tako prisotna, zato mora biti v napravi za projekcijo na zaslon še sistem leč, ki svetlobo fokusira na neskončnost. To ustvari občutek, da projicirane informacije lebdijo nekje daleč pred letalom, s čimer je rešen problem prilagajanja očesnih leč [20].

Vir svetlobe za HUD je nekoč bila katodna cev, v zadnjem času pa so to predvsem majhni tekočokristalni zasloni [20]. Svetloba iz vira se preko sistema kolimacijskih in korekcijskih leč usmeri proti zaslonu ali pa kar vetrobranskemu steklu (slika 12), tam pa jo element, imenovan *combiner*, usmeri proti pilotu (vozniku). Ta element je pravzaprav od celotnega sistema HUD edino, kar pilot vidi.



Slika 12: Shema sistema HUD v avtomobilu, *combiner* se nahaja na mestu, kjer se svetloba odbije od vetrobranskega stekla proti vozniku [21].

Element bi lahko bilo navadno ogledalo ali polprepustno ogledalo, nagnjeno pod kotom 45° , a s tem bi pilotu zakrili del vidnega polja. Pomembno je torej, da je *combiner* tak, da odbija le določene valovne dolžine, rezervirane za prikaz informacij, za vso ostalo svetlobo pa je čim bolj prepusten. Dosti boljša izbira je dikroično ogledalo, ki je prekrito s številnimi tankimi plastmi, kar omogoči zelo selektiven odboj, medtem ko se ostala svetloba skoraj v celoti prepusti. Pri obeh metodah pa v notranjih plasteh pride do notranjih odbojev in zaradi tega do motečih dvojnih ali celo večkratnih slik [22].

Ravno tukaj ključno vlogo igra holografija, saj lahko na preprost način izdelamo holografske optične elemente (HOE), ki so zelo učinkoviti pri odboju valovnih dolžin, ki jih sami izberemo, in prepuščanju vseh ostalih. Izkoristek tako izdelanih selektivnih ogledal za odboj in prepuščanje svetlobe je v primerjavi s konvencionalnimi elementi boljši. Dvojnih odbojev ni, ker se svetloba odbija le od sprednje plasti. Dodatno prednost predstavlja dejstvo, da lahko naredimo hologram, ki obenem svetlobo še kolimira in preoblikuje na željen način, recimo popravi aberacijo in fokusira v neskončnost [22]. Na ta način postane sistem HUD veliko lažji in enostavnejši, saj ne potrebujemo

več sistema kolimacijskih leč - vse delo opravi kar *combiner*.

Zaradi uporabnosti se je tehnologija razširila tudi na komercialno letalstvo, kjer zasloni HUD izboljšajo varnost. Zadnje čase lahko prav omenjene holografske zaslone HUD pogosteje vidimo v avtomobilih višjega razreda, npr. pri Pontiacu, Citroënu in BMW serije 5 in 6. Osnovna ideja je enaka kot pri letalih, le da so podatki na zaslonu navadno fokusirani bližje, tako da se navadno zdi, da lebdi nekje pri prednjem odbijaču [20]. Poleg prikaza osnovnih informacij se razvijajo tudi sistemi povezani z detektorjem IR, kar naj bi pomagalo pri varnosti v prometu zaradi boljše vidljivosti ceste in pešcev ponoči.

HUD se uporablja tudi v posebnih očalih ali čeladah, kjer lahko upravnik pred očmi vidi dodatne informacije o okolici ali pa IR oziroma radarsko sliko. Primer delujoče aplikacije je sistem v helikopterju AH-64 Longbow, teoretično pa bi lahko HUD očala uporabljali za vodiče po muzejih in mestih, kjer bi ob pogledu na določene predmete in stavbe videli dodatne informacije o njih. Za lahke naglavne sisteme je holografski *combiner* spet v prednosti pred drugimi izvedbami.

HUD je lep primer uporabe tehnologije s futurističnim prizvokom v pravzaprav dokaj trivialni, a ključni nalogi.

5 Holografska interferometrija

Na tej metodi so se raziskave začele v šestdesetih letih, pripravna pa je za odkrivanje defektov v snovi oziroma sprememb v njej pred in po uporabi [8]. Najprej posnamemo hologram predmeta, ki nas zanima, in sicer v najbolj običajni izvenosni tehniki. Hologram se razvije in postavi nazaj na isto mesto, predmet pa se preizkuša, obremeni, spremeni se okoliška temperatura, zunanji tlak itd., odvisno od namena poskusa.

Če sedaj hologram ponovno osvetlimo z referenčnim žarkom, bo konjugirani žarek padal točno na predmet oziroma bo nanj projicirana realna slika predmeta pred poskusom. Nastala bo interferenčna slika dveh valovanj. Spremembe oblike predmeta so lahko zelo majhne, a fazne razlike občutne, kar se pokaže v interferenčnih progah in kolobarjih [8]. Podobno lahko namesto projekcije holograma na predmet po poskusu še enkrat posnamemo hologram in primerjamo oziroma interferiramo svetlobo z obeh hologramov [8].

Metoda je zelo uporabna za nedestruktivno testiranje industrijskih izdelkov oziroma v vseh primerih, kjer nas zanima, ali je do neke deformacije ali nepravilnosti prišlo ali ne. V industriji gum se recimo naredi hologram nenapihnjene gume, nato pa še napihnjene. Rezultat je interferenčni vzorec z velikimi progami, kar ustreza spremembam velikosti zaradi napihovanja, možne pa so tudi bolj lokalne fine proge, ki so posledica napak pri spojih med različnimi plastmi gume [8]. Na podobne načine se da testirati trup in komponente zračnih in vesoljskih plovil, nove oblike avtomobilov, razna orodja, zobe, žive organizme itd.

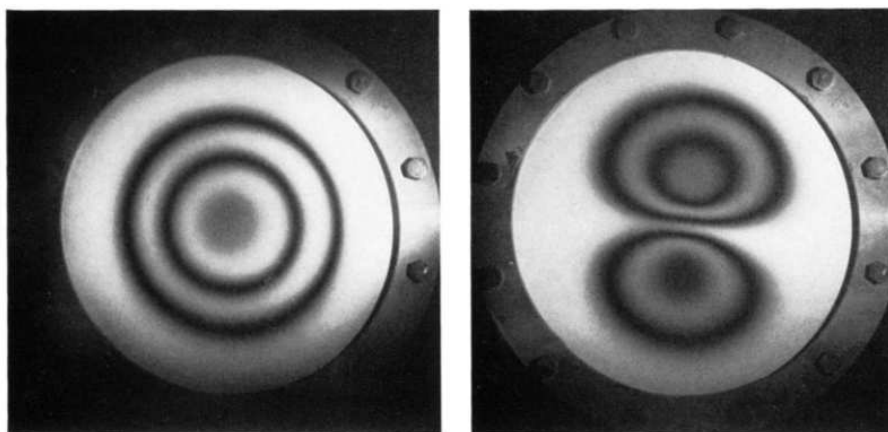
Primer interferenčne slike dveh hologramov plošče aluminija prilepljenega na gumijasto ploščo je na sliki 13. Aluminijasta plast je bila za kratek čas postavljena v vakuum, pri čemer se je na nekaterih mestih odlepila od gumijaste podlage [8]. Interferenčni krogi lepo orisujejo vse takšne nepravilnosti.

Zanimivo je, da lahko posnamemo tudi hologram teles, ki vibrirajo, recimo plošč, glasbil, vibracijskih načinov turbin, motorjev in zvočnikov. Tej metodi se reče tudi časovno povprečena holografska interferometrija, saj v času ekspozicije holograma posnamemo več period vibracij in tako dobimo nekakšno časovno povprečje oblike telesa [8]. Ko razvit hologram ponovno osvetlimo, dobimo interferenčno sliko, na kateri interferenčne proge predstavljajo krivulje z enako amplitudo nihanja, število prog pa je odvisno od same amplitude [8]. Primer je opna v osnovnem in prvem harmoničnem načinu nihanja na sliki 14.

Interferenčna holografija je primerna tudi za testiranje kompliciranih zrcal in leč pri njihovi izdelavi, saj lahko izračunamo in ustvarimo hologram, ki daje točno tako valovno fronto, kot bi jo morali izdelani elementi. S pomočjo Twyman-Greenovega interferometra se svetlobo iz elementa in holograma primerja in ugotavlja primernost izdelka [23].



Slika 13: Krožne proge na tej sliki aluminijaste plošče nakazujejo, kje je ta po eksperimentu z vakuumom odstopila od gumijaste, s katero sta bili zlepljeni [8].



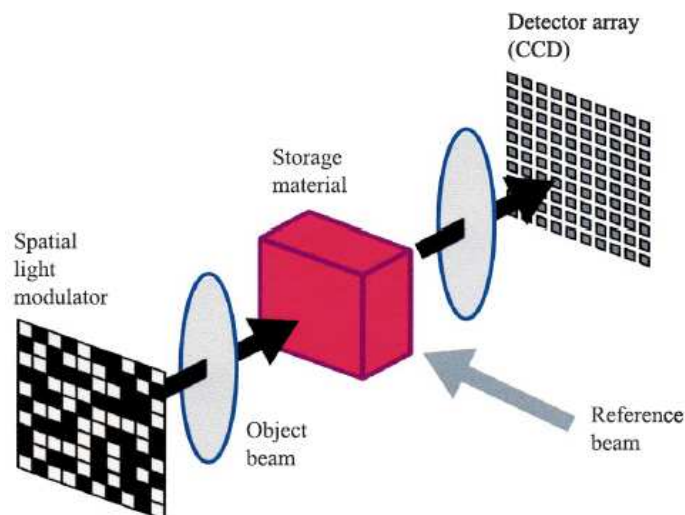
Slika 14: Časovno povprečen hologram opne, ki vibrira v osnovnem načinu (levo) in v prvem harmoničnem načinu (desno) [8].

6 Holografsko shranjevanje podatkov

Možnost shranjevanja velikega števila hologramov na enem mestu v debelih hologramih je zanimiva za shranjevanje podatkov. Zaenkrat magnetno in optično shranjevanje izkorišča le dve dimenziji, gostota zapisanih podatkov pa je od 5 do 20 bitov na mikrometer za diske in DVD plošče [9].

V debeli snovi (milimetri do centimetri) se da doseči gostoto preko 350 bitov na mikrometer, teoretično pa naj bi bilo možno doseči hitrost branja podatkov reda 1 Tb/s [9]. Velika hitrost branja podatkov je posledica dejstva, da se pri branju posameznega holograma prebere celotno sliko, ne le posameznih bitov. V debel kos snovi lahko pod različnimi koti shranimo več hologramov, teoretično do okrog 10 tisoč, ko so kotni razmiki med njimi okrog $0,0015^\circ$ [9]. Bralna glava tako spreminja kot glede na snov in odbira posamezne holograme.

Ena izmed prvotnih idej za izvedbo je bila, da se izbere primerno snov, to je recimo fotorefraktor [9]. Nanj se pri pisanju in branju sveti z referenčnim oziroma bralnim žarkom, medtem ko predmetni in rekonstruirani žarek služita za pisanje (ustvarjenje interferenčne slike v fotorefraktorju) in branje. Za pisanje bi uporabil SLM (spatial light modulator oziroma prostorski modulator svetlobe), za branje pa CCD ali CMOS čip [9]. SLM je neke vrste dvodimenzionalna mreža točk, ki so lahko temne ali svetle. Z dovolj veliko ločljivostjo tega elementa lahko računalniško ustvarimo ustrezen vzorec skozi katerega sveti predmetni žarek in tako ustvari hologram. Branje se izvaja podobno, le da rekonstruiran žarek sveti na detektor svetlobe. Osnovna shema takega sistema je na sliki 15.

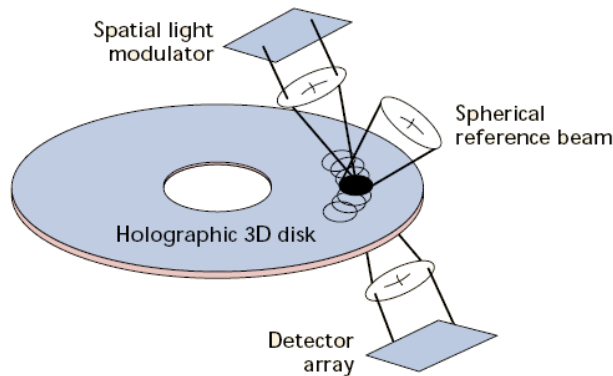


Slika 15: Osnovna shema holografskega shranjevalnika podatkov: prostorski modulator svetlobe formira vzorce, ki se s pomočjo referenčnega žarka v holografski kristal zapišejo kot hologrami, shranjene podatke pa po osvetlitvi kristala bere CCD čip. [9]

Hologram se v holografski kristal zapiše na standarden način z modulacijo lomnega količnika zaradi prisotne interference dveh žarkov. Težava je, da ta sprememba ni večna, temveč reda nekaj mesecev za fotorefraktorje [9]. Trajnost zapisa lahko podaljšamo s toplotno ali elektronsko obdelavo, možno pa je tudi uporabiti fotokromične materiale ali pa se uporabi več različnih žarkov za pisanje. V tem primeru se podatke zapisuje pri valovnih dolžinah, ki jih holografski kristali ne vpijejo, razen če je prisoten še dodaten žarek druge valovne dolžine. Pri branju se nato tega žarka ne uporablja. Za trajne zapise tipa CD-ROM bi se lahko obnesli fotopolimeri ali fotokromične snovi, ki pod vplivom svetlobe polimerizirajo oziroma spremenijo lastnosti absorpcije [9]. Oba procesa sta lahko nereverzibilna pri normalnih pogojih.

Načinov dostopa do podatkov je več oziroma so med seboj lahko kombinirani. Eden je podoben kot pri klasičnem optičnem disku (slika 16), pri drugem se podatke shranjuje na kocke podobno kot

na zgornji sliki, pri tretjem pa bi s pomočjo fazne konjugacije en sam SLM služil kot modulator in detektor obenem [9].



Slika 16: Ena od izvedb holografskega shranjevanja podatkov spominja na današnje CD in DVD plošče, le da se podatkov ne bere z isto enoto, kot se jih piše [9].

Osnovna ideja je torej jasna, načinov izvedbe pa je več. Kot pri vsaki tehnologiji je potrebno najti optimalno rešitev kar se tiče cene, velikosti, robustnosti, kompetitivnosti, bralnih шумov oziroma učinkovitosti sistema in podobno. S tem se ukvarja na desetine bolj ali manj znanih podjetij in organizacij, med njimi JPL, Bell Labs, Maxell, InPhase Tech, Optware in drugi. Nekateri so očitno v koaliciji in vsak po svoje poskušajo doseči določen skupni cilj [24], spet drugi pa so se tega lotili posamezno.

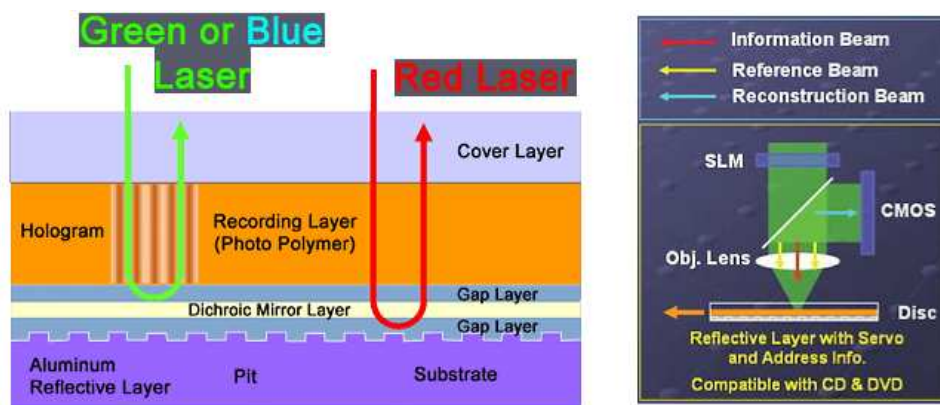
Izgleda, da smo v zadnjem letu ves čas tik pred vstopom komercialnih izdelkov na trg, saj so tako Maxell, InPhase, Optware in še kdo svoj izdelek oglaševali za konec leta 2006. Februarja 2007 je InPhase najavil, da bo svoj izdelek julija začel pošiljati kupcem [25]. Izgleda, kot da je izdelek res popolnoma nared, le še faza serijske izdelave manjka. Za konec si čisto na kratko pogledjmo še lastnosti in tehnologijo nekaj izmed teh konkretnih izdelkov za shranjevanje podatkov na principu holografije.

InPhase ([25]) uporablja en 405 nm laserski žarek, razdeljen na referenčni in predmetni žarek, snemanje in branje pa je s pomočjo fazne konjugacije. Disk meri 13 cm v premeru, zapiše pa se ga lahko le enkrat. V fotopolimer shranjuje 1 Mb velike strani podatkov v skupni kapaciteti 300 GB, v prihodnjih letih pa naj bi se doseglo mejo tehnologije 1600 GB. Povprečen dostopni čas je četrta milisekunde, branje strani pa traja milisekundo, kar naj bi skupaj omogočalo prenose do okrog 100 MB/s, nekajkrat hitreje kot pri medijih DVD. Priporočena cena pogonske enote je 18.000 \$, za plošče 180 \$, enota pa je povezljiva z računalniki na več klasičnih načinov oziroma s standardnimi vmesniki. Izgled enote in plošče je prikazan na sliki 17.



Slika 17: Bralno-pisalna holografska enota podjetja InPhase skupaj z medijem [25].

Največ raziskav je trenutno na tehnologiji HVD (Holographic Versatile Disc), ki ga razvija več deset podjetij [24]. Za branje in pisanje fotopolimernega diska bo uporabljena kolinearna tehnologija, pri kateri sta uporabljena dva laserska žarka, rdeč in zelen ali moder. Kot pri vsaki tehnologiji je potrebno najti optimalno rešitev kar se tiče cene, velikosti, robustnosti. Žarka sta kolinearna, eden od njiju služi za pisanje in branje (zelen), drugi pa za nadzor položaja bralne glave na disku. Rdeč žarek namreč sveti skozi hologram in se odbije od kovinske nazobčane površine na dnu, kar služi kot referenca, zelen žarek pa tako globoko ne seže, ker ga odbije dikroično zrcalo. Reproduciran predmetni žarek prebere CMOS čip. Shema sistema je na sliki 18. Taka plošča naj bi zmogla shraniti do skoraj 4 TB podatkov, a zaenkrat je tehnologija še v razvoju, v naslednjih letih pa ta meja še ne bo dosežena [24]. Predlagan standard naj bi bil po 100 GB za ROM ploščo, 30 GB za spominske kartice in 200 GB HVD module [26].



Slika 18: Na levi prerez diska HVD, jasno se vidi vse sloje v njem, nakazana pa sta tudi laserska žarka, ki se uporabljata za branje/pisanje (zelen) in referenco oziroma krmiljenje. Na desni je shema bralno-pisalnega sistema, ki je kolinearen - vpadni in odbiti žarek sta poravnana, loči pa ju delilnik žarka. Za branje odbitega žarka se uporablja čip CMOS [24].

Maxell pripravlja podobno ploščo, obljubljena pa je bila za leto 2006 [27]. Optware je že za leto 2006 najavil spominsko kartico s 30 GB prostora ter skorajšnji prihod HVD. Od takrat ni z njihove strani nobenih novic, spletna stran je v času pisanja v prenovi.

7 Zaključek

Aplikacij, pri katerih lahko uporabimo spoznanja holografije, je tako veliko, da mnogih v tem seminarju sploh nismo omenili. Že do sedaj se je holografija izkazala marsikje, prihodnost pa obljublja še več. Izpopolnjujejo se obstoječe metode, odkrivajo in uvajajo se sorodne, vsaka pa da kakšno idejo za nove raziskave.

Zanimivo je, da so bile skoraj v seminarju omenjene aplikacije omenjane že kmalu po začetkih holografije. Veliko idej se je tudi kmalu udejanilo in se v teh desetletjih samo izpopolnjevalo, nekaterih pa še vedno ne znamo izdelati v praksi. Izgleda, da smo okrog 40 let od prvih idej ravno sedaj na pragu uvedbe holografskega shranjevanja podatkov, čez leta pa bomo najbrž v svojem vozilu vsi imeli zaslon HUD.

Če upoštevamo še vsakdanje aplikacije, kot je čitalec črtnih kod, zaščita denarja in podobno, nam je lahko jasno, da je holografija zelo uporabna panoga, prisotna že marsikje, četudi se tega morda sploh ne zavedamo.

Literatura

- [1] S. F. Johnston, *History and Technology* **21**, 367 (2005).
- [2] B. E. A. Saleh in B. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, New York, 1991).
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>, citirano 18. 4. 2007
- [4] S. J. S. Brown, *Review of Physics in Technology* **17**, 205 (1986).
- [5] P. Hariharan, *Optical Holography: Principles, Techniques and Applications* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
- [6] <http://www.fou.uib.no/fd/1996/h/404001/kap02.htm>, citirano 30. 4. 2007
- [7] C. Outwater in V. Hamersveld, *Guide to Practical Holography* (Dimensional Arts Inc., online textbook).
- [8] B. J. Thompson, *IBM J. Res. Develop.* **44**, 341 (2000).
- [9] D. Psaltis, G. W. Burr, *Computer* **31**, 52 (1998).
- [10] <http://www.fou.uib.no/fd/1996/h/404001/kap10.htm>, citirano 30. 4. 2007
- [11] S. Wang in X-C. Zhang, *J. Phys. D* **37**, R1 (2004).
- [12] K. Ko in J. Webster, *Surg. Neurol.* **44**, 428 (1995).
- [13] S. I. Stepanov, *Rep. Prog. Phys.* **44**, 39 (1994).
- [14] S. P. Barden, J. A. Arns in W. S. Colburn, *Proc. SPIE* **3779**, 313 (1998).
- [15] <http://www.kosi.com/index.html>, citirano 25. 4. 2007
- [16] S. P. Barden, J. A. Arns in W. S. Colburn, *Proc. SPIE* **3355**, 866 (1998).
- [17] S. P. Barden, J. A. Arns in W. S. Colburn, SPIE simpozij, predstavljeno 2. 8. 2001
- [18] <http://www.kosi.com/spectrographs/holospeci.html>, citirano 30. 4. 2007
- [19] <http://www.madehow.com/Volume-1/Bar-Code-Scanner.html>, citirano 1. 5. 2007
- [20] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Head-Up_Display, citirano 1. 5. 2007
- [21] http://www.laserfocusworld.com/display_article/224003/12/ARCHI/none/Feat/, citirano 30. 4. 2007
- [22] http://www.mikesflightdeck.com/head_up_displays.htm, citirano 24. 4. 2007
- [23] J. C. Wyant in V. P. Bennett, *Appl. Opt.* **11**, 2833 (1972).
- [24] HVD Alliance <http://www.hvd-alliance.org>, citirano 30. 4. 2007
- [25] InPhase domača stran, <http://www.inphase-technologies.com/>, citirano 30. 4. 2007
- [26] Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_Versatile_Disc, citirano 30. 4. 2007
- [27] Maxell ZDA domača stran, <http://www.maxell-usa.com/>, citirano 30. 4. 2007