

Holográfia

2015. október 14.

Bevezetés

Mint az közismert, az ember térbeli látással rendelkezik. Ez részben abból adódik, hogy két szemmel sztereo látásra van módunk, azaz testünk vagy szemünk mozgatása nélkül is korábbi tapasztalataink alapján el tudjuk helyezni a térben az érzékelt tárgyakat, mivel két szemünk eltérő képet lát. Azonban még egy szemmel is lehetőségünk van bizonyos mértékben a térbeliség megítélésére, hiszen a különböző távolságban található tárgyakat csak akkor látjuk élesen, ha szemünk ún. akkomodációs, fókuszállítási képességét használjuk. Különböző távolságokra fókuszálva, és figyelve a tárgyak képének változását ezen a módon is térbeli képet alkothatunk környezetünkről. Tehetjük ezt annak ellenére, hogy érzékelőnk - a szem retinája - csak kétdimenziós.

Az általunk látottak rögzítésének egyik elterjedt módja a fényképezés. Ekkor a látáshoz hasonlóan a valóságos tárgyakat egy kétdimenziós felületre képezzük valamilyen optikai rendszer segítségével. Ha az elkészült fényképet nézzük, akkor a valóság szemléléséhez képest még két szemmel sem látunk ahhoz hasonló térbeli hatást. Ha különböző távolságokra fókuszálunk, legfeljebb a fényképet láthatjuk életlenül. A fénykép tehát kevesebb információt tartalmaz, mint amiről készítettük, a valóságban rendelkezésre álló információk egy része nem rögzült.

A hiányzó információ pedig nem más, mint a fény fázisa, ugyanis az érzékelők, detektorok csak a fény intenzitását érzlelik. A holográfia újítása - amelyet Gábor Dénesnek köszönhetünk (1947), és amelyért Nobel-díjat kapott (1971) - éppen az, hogy közvetett módon mégis lehetővé teszi egy hullám fázisának rögzítését annak ellenére, hogy a holográfia is a fotónegatívokéhoz hasonló elvű képrögzítést alkalmaz. A holográfia „trükkje”, hogy a fázisváltozást intenzitásváltozássá változtatja/kódolja, azaz a detektorok számára is érzékelhetővé teszi. A kódolás megvalósítására az interferencia jelensége alkalmas, amelynél az eredő kép intenzitásának ingadozásai az interferáló fényhullámok fáziskülönbségétől függenek. A megvalósításhoz tehát a rögzítendő tárgyról kiinduló hullámon kívül egy másik hullámra is szükség van. A siker további feltételei, hogy a két hullám interferenciaképes legyen, ehhez nagy koherenciájú fényforrásokra (lézerekre) van szükség, valamint hogy az érzékelő felbontása elegendően nagy legyen ahhoz, hogy az interferenciaképet rögzíteni tudja. De mire jó egy ilyen interferenciamező? Amint azt alább látni fogjuk, a kidolgozott hologramlemez megfelelően megvilágítva a diffrakció révén úgymond rekonstruálja a

kérdéses tárgyról szórt fény intenzitás és fáziseloszlását egyaránt, így a látvány teljesen háromdimenziós lesz. A hullámok fázisának rögzítése azonban nem csak érdekes látványt eredményezhet, hanem jónéhány optikai mérési eljárást is lehetővé tesz.

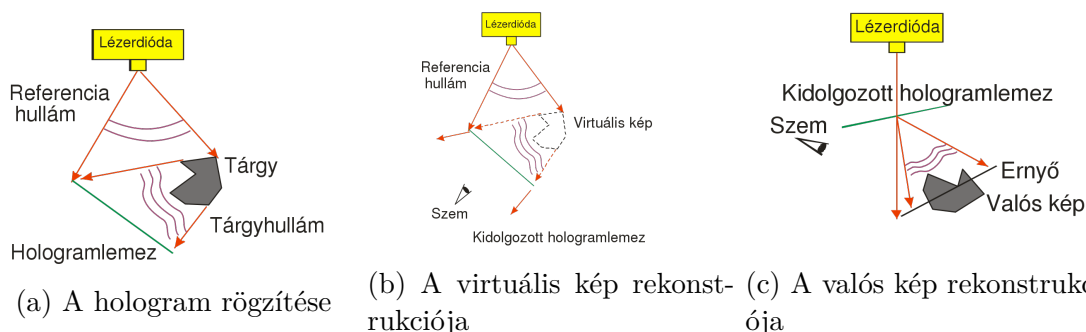
Jelen mérés célja: négy kisebb méretű és eltérő típusú hologram készítésén keresztül elsajátítani a hagyományos (analóg) holográfia gyakorlati alapjait, és megismerni két konkrét méréstechnikai alkalmazással: a holografikus interferometriával és a holografikus optikai elemek fogalmával.

Elméleti összefoglaló

Transzmissziós hologram készítése és rekonstrukciója

Az ún. fehérfényű látványhologramok szemlélésnek elrendezése nagyjából mindenki előtt ismert kiállítások révén: a kidolgozott hologramlemez erős pontszerű fényforrással világítják meg, pl. spotlámpával. Azonban történetileg nem ez a hologramtípus az első, és az alapjelenség illetve a készítés megértéséhez sem ez a legalkalmasabb típus. Hologram készítésének egyik lehetséges elrendezését mutatja az 1a ábra. Ezzel az elrendezéssel ún. transzmissziós off-axis hologram készíthető. Fényforrásnak lézerdíódat használunk, mely nagyfokú koherenciája révén biztosítja az interferenciaképességet. Ehhez továbbá ki kell zárni más természetes és hagyományos fényforrásokat, tehát a tárgyat külön meg kell világítani a lézerfényvel. A diódalézer fénye nyalábformáló előtétlencse nélkül kb.ellipszis keresztmetszetű nyalábként tágul (divergens), így a tárgy- és referenciahullám úgy hozható létre, hogy a nyaláb egy része közvetlenül, a másik fele pedig a tárgyról szóródva jut a hologramlemezre, és ott interferálnak.

Ez a negatív filmekről eltérően többnyire szilárd hordozóra (pl. üveglap) felvitt nagy felbontású fényérzékeny réteget jelent. A hologramlemezek térbeli felbontása egy-két nagyságrenddel nagyobb, mint a színes negatív filmeké! Az interferenciakép, az ún. holografikus rács akkor rögzíthető jó minőségben, ha a két találkozó hullám intenzitásának aránya, valamint együttes intenzitásuk, és az exponálás ideje is megfelelő. Mivel az expozíciós idők másodperc vagy perc nagyságrendűek is lehetnek, arról is gondoskodni kell, hogy az in-



1. ábra. Transzmissziós off-axis hologram

terferenciakép és a hologramlemez egymáshoz képest ne mozogjon/rezegjen, ezért az egész elrendezést speciális optikai asztalra szokás helyezni, amely rezgésmentes, és kellő merevségű, valamint más zavaró hatásokat is ki kell zárni (pl. légáramlatok, háttérfény). Érdeemes megjegyezni, hogy az 1a ábrán látható elrendezésben nem található a fényképezésnél vagy a látásnál meglévő leképező lencse. Ez azt is jelenti, hogy egy-egy tárgyponttól a hologramlemez egészére szóródik fény, nincs tehát 1-1 megfeleltetés („leképezés“) a tárgypontok és a fényérzékeny lemez pontjai között (mint a hagyományos fényképezésnél). Mivel ebben az elrendezésben a tárgy és a referencia hullám jelentős szöveget zár be egymással, ezért hívjuk off-axis hologramnak.

Az így exponált hologramlemezt típusától függően esetleg még elő is kell hívni, ami egy többlépéses vegyi kidolgozás, ezáltal rögzül rajta tartósan a kép. Ezen a képen azonban eltérően egy fényképtől önmagában nem látható semmi, ami az eredeti tárgyra hasonlítana, pl. egy negatív kicsinyített képmás, mint a fényképezésnél. Ez nem is csoda, hiszen a tárgy felől érkező hullámot a referenciával módosítottuk, és leképezést sem alkalmaztunk. A megfelelő kép előállításához egy másik lépésre, a hologram rekonstrukciójára van szükség, ami amolyan „dekódolás” is: ez látható az 1b ábrán. Az elrendezésből a tárgyat elhagyva csak a referencia hullám jut a lemezre, és ott diffraktálódik a létrejött rácsozaton, mivel azon a kidolgozás módjától és a lemez típusától függően vagy sötét és világos részek váltják egymást (amplitúdó hologram), vagy kisebb és nagyobb törésmutatójú részek (fázis hologram).

A tárgy virtuális térbeli képe (amely ernyőn nem fogható fel) annak eredeti helyén jelenik meg, ha a lemez másik oldaláról szemlélődünk, továbbá ideális esetben azonos méretben és irányításban látható. Különböző irányokból másként látszik, tehát két szemmel nézve sztereo képet ad. A különböző mélységben található részekre rá lehet fókuszálni szemmel, így a térbeli mélysége is megvan. Azonban van néhány korlátozó eltérés is: mivel mind a hologram rögzítéséhez, mind a rekonstrukcióhoz monokromatikus lézer fényforrást kell használni, a holografikus kép eredendően egyszínű, valamint a sík hologramlemez véges mérete miatt a virtuális tárgy többnyire nem járható körbe, a lemez mérete korlátozó ablakot jelent. Mivel a szemünkbe az ábra elrendezése szerint jutó fény áthaladt a lemezen (a referencia megvilágítás a lemez másik oldalán van, mint a szem), ezért ez a virtuális kép transzmissziós. A diffrakció révén azonban létrejön egy a rajzon fel nem tüntetett valós (ernyőn felfogható) kép is a lemez átellenes oldalán, amely így szintén transzmissziós. Mivel a hologram off-axis, a kétféle kép nyalábja különböző irányba terjed. Ha a valós képet jól kivehető módon szeretnénk megfigyelni, az 1c ábrán látható rekonstrukciós elrendezését használhatjuk. Ekkor egy keskeny lézersugárral világítjuk át a hologramlemez valamely kis darabját, és a geometriát úgy választjuk meg, hogy a megvilágító lézersugár a hologramlemezhez képest pont azzal az iránnyal ellentétes irányban haladjon, amelyben a felvételkor használt referencianyaláb érte a lemezt.

A holográfia elvi háttere

Az eredeti tárgyhullám másának visszanyerése matematikailag az alábbi egyszerű módon látható be amplitúdó hologram esetére. Tekintsük a fényhullám amplitúdóját a holo-

ramlemez közvetlen környezetében. Felvételnél a lemezhez érkező két hullám komplex amplitúdója legyen az $\mathbf{r}(x,y) = \mathbf{R}(x,y)e^{i\varphi_r(x,y)}$ referencia, és a $\mathbf{t}(x,y) = \mathbf{T}(x,y)e^{i\varphi_t(x,y)}$ tárgy hullám, ahol \mathbf{R} és \mathbf{T} valós értékű amplitúdók. A referenciahullám $\mathbf{R}(x,y)$ erőssége a lemeznél már csak lassan változik, gyakorlatilag \mathbf{R} állandónak tekinthető. A lemezt exponáló intenzitáseloszlás, azaz interferenciakép

$$I_{\text{exp}} = |\mathbf{r} + \mathbf{t}| = R^2 + T^2 + \mathbf{r}\mathbf{t}^* + \mathbf{r}^*\mathbf{t} \quad (1)$$

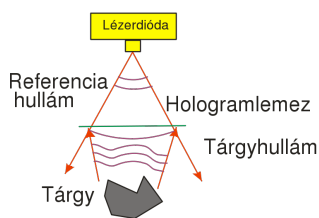
formában írható le, ahol a $*$ a komplex konjugálást jelöli. Ideálisnak tekintett, lineáris átvitelű hologramlemez esetén a kidolgozott lemez feketedése ennek állandószorosa lesz, így a lemez τ fényáteresztő képessége

$$\tau = 1 - \alpha I_{\text{exp}} \quad (2)$$

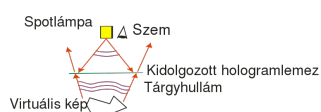
alakú, ahol α egy anyagállandó és az expozíciós idő szorzata. Rekonstrukciókor a hologramlemez az eredeti referenciahullámmal átvilágítva közvetlenül a lemez mögött a komplex amplitúdó

$$\mathbf{a} = \mathbf{r}\tau = \mathbf{r}(1 - \alpha R^2 - \alpha T^2) - \alpha \mathbf{r}^*\mathbf{t}^* - \alpha R^2\mathbf{t} \quad (3)$$

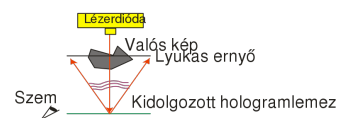
alakot ölt. Ennek első tagja a referenciahullám áthaladó hányada, második \mathbf{t}^* -gal arányos tagja egy fókuszálódó (ez \mathbf{r}^2 miatt lehet) konjugált kép, harmadik \mathbf{t} -vel arányos tagja pedig az eredeti tárgy hullám mása (vegyük észre, hogy az arányossági tényezők mind valós állandók!). Ez virtuális képet ad, mivel közvetlenül a hologramlemez mögötti síkdarabon így ugyanolyan hullámtér áll elő (fázisát is tekintve, hisz \mathbf{t} komplex), mint az eredeti tárgyról érkező fény esetén. A 3. összefüggést épp ezért a holográfia alapegyenletének is nevezik. Off-axis hologram esetén ez a három elhajlási rend (0 és ± 1) irányban szétválk, ellenkező esetben viszont nem. (Megjegyzés: ha a lemez viselkedése nem teljesen lineáris, megjelenhetnek magasabb diffrakciós rendek is)



(a) A hologram rögzítése



(b) A virtuális kép rekonstrukciója



(c) A valós kép rekonstrukciója

2. ábra. Reflexiós hologram

Reflexiós hologram készítése és rekonstrukciója

A fejezet elején említett fehérfényű látványhologramok az eddig tárgyalt típustól abban térnek el, hogy in-line elrendezésűek, azaz a nyalábok a lemez normálisával nulla vagy kis szöveget zárnak be, valamint reflexiós elrendezésűek: a referencia és a tárgynyaláb a lemez átellenes oldaláról érkezik, rekonstrukciókor pedig a megvilágítás és a megfigyelés van azonos oldalon. A reflexiós hologramok rögzítésének elrendezését a 2a ábra mutatja. Ilyen hologramok esetén is megfigyelhető valós és virtuális rekonstruált kép, az ezekhez tartozó elrendezés a 2b és 2c ábrán látható.

Fehér fényben ezek a hologramok azért tekinthetők meg, mert kb. $8 - 10\mu m$ vagy még vastagabb fényérzékeny réteget tartalmazó lemezre készülnek, így már ún. vastag hologramnak tekinthetők a hullámhosszhoz képest. A vastag diffrakciós rácsok ún. Bragg-effektust mutatnak: a fehér fényt alkotó hullámokból csak a rögzítésnél használthoz közeli hullámhosszakon diffraktálnak jelentősen, így „szelektálnak” a színek között, továbbá érzékenyek a rekonstrukciónál alkalmazott megvilágítás irányára is, amelynek nagyjából azonosnak kell lennie a felvételkori referencia nyaláb irányával, ez pedig egy irány szelektivitást jelent. Ez utóbbi tulajdonságnak köszönhetően vastag hologramlemezbe többet is lehet exponálni úgy, hogy a rögzített képek közül lényegében mindig csak egy rekonstruálódik a megvilágítás irányától függően. (Minél vastagabb, „térfogatibb” egy hologram, annál szelektívebb, így szélsőséges esetben rengeteg hologram - vagyis kép, azaz akár bináris adat - rögzíthető a fényérzékeny anyag egyazon térfogatába. Ez az alapja a holografikus adattárolásnak.)

Holografikus interferometria

Mivel a rekonstruált tárgy hullám komplex amplitúdóját maga az eredeti tárgy határozza meg, pl. annak alakja, felületi minősége, így a hologram ezekről is tárol valamennyi információt. Ha egyetlen tárgyról annak két különböző állapotában készítünk egy-egy hologramot ugyanarra a lemezre *egymás után* azonos referenciával, az így kapott lemezt kétexpozíciós hologramnak hívjuk:

$$I_{1,2} = |\mathbf{r} + \mathbf{t}_1|^2 + |\mathbf{r} + \mathbf{t}_2|^2 = R^2 + T^2 + \mathbf{r}\mathbf{t}_1^* + \mathbf{r}^*\mathbf{t}_1 + R^2 + T^2 + \mathbf{r}\mathbf{t}_2^* + \mathbf{r}^*\mathbf{t}_2 \quad (4)$$

$$I_{1,2} = 2R^2 + 2T^2 + (\mathbf{r}\mathbf{t}_1^* + \mathbf{r}\mathbf{t}_2^*) + (\mathbf{r}^*\mathbf{t}_1 + \mathbf{r}^*\mathbf{t}_2) \quad (5)$$

(Itt feltételeztük, hogy a tárgynyalábnak csak a fázisa változott meg érdemben, T valós amplitúdója nem, továbbá az indexek az állapotokat jelölik.) Rekonstrukciókor a két állapot *egyidejűleg* jelenik meg:

$$\mathbf{a}_{1,2} = \mathbf{r}\tau = \mathbf{r}(1 - \alpha I_{1,2}) = \mathbf{r}(1 - 2\alpha R^2 - 2\alpha T^2) - \alpha \mathbf{r}^2(\mathbf{t}_1^* + \mathbf{t}_2^*) + \alpha R^2(\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2) \quad (6)$$

azaz az $\mathbf{a}_{1,2}$ hullámtérben egy \mathbf{t}_1 -gyel és egy \mathbf{t}_2 -vel arányos tag is szerepel mindkét első elhajlási rendben, amelyek a képeket adják. Ha a virtuális képet szemléljük, ott csak az

utolsó $\alpha R^2(\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2)$ tagoknak van járuléka, hisz a többi rend „máshová” terjed, így az αR^2 arányossági tényezőktől eltekintve a megfigyelhető intenzitás ebben a diffrakciós rendben az alábbi:

$$I_{1,2,\text{virt}} = |\mathbf{a}_{1,2,\text{virt}}|^2 = |\mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2|^2 = 2T^2 + (\mathbf{t}_1^* \mathbf{t}_2 + \mathbf{t}_1 \mathbf{t}_2^*) \quad (7)$$

ahol a zárójelben álló interferenciatagok egymás konjugáltjai. Eszerint tehát a két állapothoz tartozó tárgy hullám interferál egymással. Mivel $\mathbf{t}_1 = \mathbf{T}e^{i\varphi_1(x,y)}$ és $\mathbf{t}_2 = \mathbf{T}e^{i\varphi_2(x,y)}$, így

$$\mathbf{t}_1^* \mathbf{t}_2 = T^2 e^{i[\varphi_2(x,y) - \varphi_1(x,y)]}, \quad (8)$$

a zárójel pedig ennek valós részének a duplája, azaz

$$I_{1,2,\text{virt}} = 2T^2 + 2T^2 \cos(\varphi_2(x,y) - \varphi_1(x,y)) \quad (9)$$

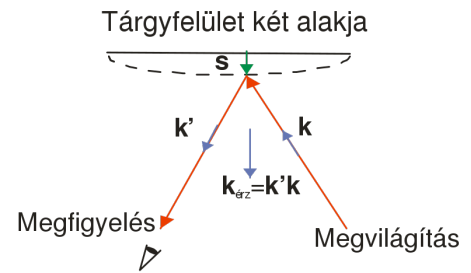
Így a tárgy kétexpozíciós holografikus képén a két állapot közti *fázisváltozás* jellegétől függően jellemzően görbevonalú interferencia-csíkrendszert (ún. kontúrvonalakat) látunk, amely a tárgy megváltozását (vagy alakját) jellemzi.

Például ha a tárgy egy deformálható befogott fémlap volt, és a két expozíció között mikrométeres nagyságrendben deformáltuk, akkor az elrendezés geometriájától függően pl. a síkra merőleges elmozdulás-komponens kontúrvonalai lesznek láthatók. Az interferencia-csíkrendszert meghatározó φ_1 ill. φ_2 fázisokat a 3. ábra alapján felírva belátható, hogy a különbségüket a

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \mathbf{s} \cdot (\mathbf{k}' - \mathbf{k}) = \mathbf{s} \cdot \mathbf{k}_{\text{érz}} \quad (10)$$

alakban adhatjuk meg, ahol \mathbf{k} a tárgyat megvilágító síkhullám hullámvektora, \mathbf{k}' pedig a tárgyról a megfigyelés irányába kiinduló nyaláb hullámvektora ($|\mathbf{k}| = |\mathbf{k}'| = \frac{2\pi}{\lambda}$), valamint \mathbf{s} az elmozdulásvektor és $\mathbf{k}_{\text{érz}}$ az úgynevezett *érzékenységi vektor*. Az ábrán a piros nyilak önkényesen kiragadott sugarak a kiterjedt nyalábból. Mivel általános esetben az elmozdulásvektor a felület különböző részein nem állandó, a fáziskülönbség is helyfüggő lesz. A skaláris szorzásból látható, hogy az \mathbf{s} vektornak csak az érzékenységi vektor irányú komponense számít, azaz csak az mérhető. Az érzékenységi vektor iránya és hossza is változtatható, ha a megvilágítás illetve a megfigyelés (szemlélés) irányát változtatjuk, így pl. ha mozgunk egy kétexpozíciós hologram előtt, a csíkrendszer is mozog, változik, mivel a fáziskülönbség is változni fog.

A fentiekhez hasonló, a tárgy megváltozását kontúrozó interferenciacsíkokat lehet látni akkor is, ha csak egyet exponálunk a tárgyról, a kidolgozott hologramlemezt tized-mikrométeres pontossággal (!) visszahelyezzük az erre alkalmas tartóba, majd a tárgyat továbbra is az



3. ábra. Az érzékenységi vektor

eredeti nyalábokkal megvilágítva deformáljuk. Ekkor az eredeti állapot képe interferál a megváltozott állapot *élő* képével, így ahogy változik a deformáció, úgy változnak az interferenciacsíkok is. Ennek az igen látványos módszernek a neve real-time holografikus interferometria, és mutatja, hogy megfelelő technológia mellett a fázishelyes fényhullám rekonstrukciót mennyire komolyan lehet venni.

Holografikus optikai elemek

Ha a tárgyhullám és a referenciahullám egyaránt síkhullám, amelyek valamilyen szöget zárnak be, a hologramon rögzülő interferenciakép egyszerű, ekvidisztáns egyenes csíkokból álló rács lesz. Az ilyen diffrakciós rácsot tekinthetjük a legegyszerűbb példának a *holografikus optikai elemekre* (HOE-kre). A holografikus úton létrehozott rács előnye, hogy egyszerűen előállítható, nagyon jó hatásfokú diszperzív elemet szolgáltat spektroszkópiai alkalmazásokhoz. Természetesen a rácsállandó a két síkhullám hullámhosszának és bezárt szögének függvényében pontosan beállítható. Komplexebb feladatokat ellátó (pl. helyfüggő rácsállandójú vagy fókuszáló) diffrakciós rácsokat is egyszerűen előállíthatunk holografikus úton: mindössze a két interferáló síkhullám egyikét kell kicserélnünk alkalmasan megtervezett hullámfrontú nyalábra.

Mivel a hologram által rekonstruált kép olyan, mintha a tárgy teljes valójában „ott lenne“, várható, hogy ha a tárgy szerepét valamilyen optikai eszköz, pl. egy lencse vagy egy tükör tölti be, akkor a hologram bizonyos korlátok között valóban úgy fog működni, mint az adott optikai eszköz, amelyről készült (tehát pl. az adott módon fókuszálni vagy reflektálni fogja a fényt). Az ilyen egyszerű holografikus lencsék vagy tükrök is a HOE-k csoportjába tartoznak.

Az alábbiakban egy konkrét példaként megnézzük, hogyan lehet két egyszerű gömbhullám interferenciájának rögzítésével holografikus lencsét előállítani. Feltételezzük, hogy mindkét gömbhullám a hologram síkjára merőleges optikai tengelyről indul ki (ezt ún. on-axis elrendezésnek nevezzük). Az egyik (nevezzük ezt a referenciahullámnak) f_1 , a másik (nevezzük ezt a tárgyhullámnak) f_2 távolságra a hologramtól. Ekkor – a gömbhullámok jólismert parabolikus/paraxiális közelítését alkalmazva, és mindkét hullámnál konstans egységnyi amplitudót feltételezve – a referenciahullám és a tárgyhullám 1. egyenletben szereplő \mathbf{r} ill. \mathbf{t} komplex amplitudója az alábbi alakban írható a hologram síkjának (x,y) pontjában:

$$\mathbf{r} = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{x^2+y^2}{2f_1}\right)}, \mathbf{t} = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{x^2+y^2}{2f_2}\right)} \quad (11)$$

A hologramon rögzülő interferenciakép ekkor így alakul:

$$I = 2 + e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{x^2+y^2}{2}\left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1}\right)\right)} \quad (12)$$

a hologram τ átteresztőképessége pedig ismét a 2. egyenlettel írható fel, tehát lineáris függvénye I -nek. Rekonstruáljuk most a hologramot az \mathbf{r} referenciahullám helyett egy merőleges beesésű síkhullámmal (amelynek tehát a komplex amplitudója a hologram síkjában

$C \in \mathbb{R}$ állandó). Ekkor a 3. egyenlet $\mathbf{r}^* \tau$ kifejezése helyett $C^* \tau$ szerepel, azaz egy konstans faktortól eltekintve maga a τ áteresztőképesség-függvény adja meg az átvilágított lemez mögött előálló fényhullám komplex amplitudóját. Ebből és a 2. és a 12. egyenletekből látható, hogy a hologramból rekonstruálódó három elhajlási rend a következő lesz:

- egy konstans komplex amplitudójú merőleges síkhullám (nulladrend, a megvilágító nyaláb elhajlás nélkül továbbhaladó része),
- egy $\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2+y^2}{2} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right) \right)$ fázissal leírható hullám (+1-rend),
- egy $-\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2+y^2}{2} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right) \right)$ fázissal leírható hullám (-1-rend).

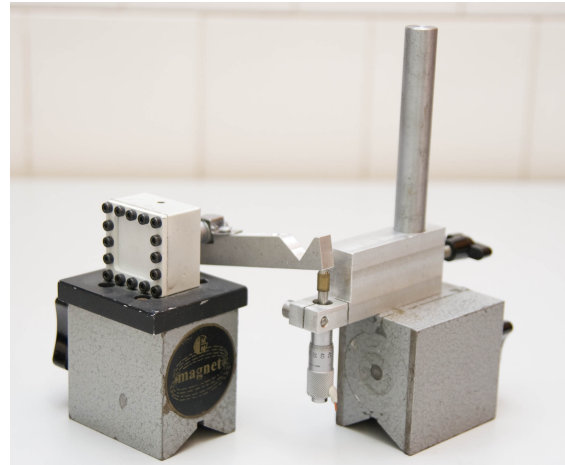
A ± 1 -rendű tagok fázisának matematikai alakjából látható (emlékeztetők: a 11. képletek), hogy ezek voltaképpen olyan (paraxiális) gömbhullámok, amelyek $f = \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right)^{-1}$, ill. $f' = \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right)^{-1}$ távolságra fókuszálódnak a hologram síkjától. Természetesen f és f' közül az egyik pozitív, a másik negatív, tehát a ± 1 -rendek közül az egyik konvergens, a másik divergens gömbhullám, mindkettő $\left| \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right|$ fókusztávolsággal. Összefoglalva: a két on-axis gömbhullám interferenciáját rögzítő hologrammal olyan HOE-t kaptunk, amely gyűjtő- és szórólencseként is funkcionálhat, attól függően hogy egy adott alkalmazáskor melyik rekonstruált elhajlási rendet használjuk fel.

A HOE-k legfontosabb alkalmazási területeit azok az esetek jelentik, amikor bonyolult, összetett optikai manipulációkat végrehajtó elrendezések (pl. az optikai távközlésben demultiplexelésre használt sokfókuszú lencsék) helyettesítését szeretnénk megoldani egyetlen egyszerű és kompakt hologrammal. Ilyenkor a legfőbb előny a holográfia alkalmazásával elérhető méret- és költségcsökkenés.

Mérési feladatok

Reflexió (látvány-) hologram készítése

A mérési gyakorlat első részében egy kb. 5 cm \times 7 cm-es hologramlemezre egy hasonló méretű erősen reflektáló, lehetőleg csillogó tárgyról készítünk fehérfényű hologramot. A fényforrás egy 5 mW névleges teljesítményű, $\lambda = 635$ nm hullámhosszúságú vörös fényű diódalézer, mely 3 V táplálás mellett kb. 55 mA áramot vesz fel, és fix befogóval rendelkezik. Ez a lézerdíóda „csupasz”, így nyalábjá eleve tágul. A hologramlemezek LITHOLO RRT20 típusú, 600-660 nm hullámhossztartományra érzékeny, ún. instant filmmel (amely fotopolimer emulziót tartalmaz) bevont üveglemezek. Az RRT20 film megfelelő expozíciójához 635nm-en minimálisan $\approx 20 \frac{mJ}{cm^2}$ (átlagos) energiasűrűség szükséges, felső korlátja ennek a mennyiségnek nincs, de az emulzió rendelkezik egy alsó (és a véges sebességű monomerdiffúzió miatt felső) átlagintezitás-küszöbvel is, így a laborban gyenge szórt fény is jelen lehet. A fényérzékeny réteg 50 μm -es vastagsága jóval nagyobb a megvilágító hullámhossznál, ami a 2. pontban leírtak szerint azt jelenti, hogy a használt hologramlemezek



4. ábra. (a) A mérés eszközkészlete, (b) a deformálható membrán és a mozgatókar.

alkalmasak vastag hologramok rögzítésére. Exponálásakor az instant filmben a megvilágítás intenzitásától függő törésmutató-változás rögzül. Az interferenciakép tehát törésmutató-moduláció formájában valós időben kódolódik a film anyagában. Ennek az anyagnak az egyik fő előnye, hogy exponálás után semmilyen, a hagyományos holografikus emulziók esetén használatos kémiai eljárást (előhívás, halványítás, rögzítés), vagy más fotopolimereknél szükséges UV illetve hőkezelést nem igényel, mivel a holografikus rács a beírás folyamán végleges formájában rögzül az anyagban. *A hologramlemezek fényzáró dobozban található, melyet csak gyenge háttérfény esetén, közvetlenül az exponálás előtt szabad kinyitni, majd egy lemezt kiemelve rögtön visszazárni.*

Állítsa össze a 2a. ábra elrendezését, és dokumentálja a ténylegesen használt elrendezést lehetőleg digitális fénykép készítésével, vagy megfelelő eszköz hiányában méretarányos rajzzal, mely nagyságrendileg szöghelyes és rajta a jellemző távolságok is fel vannak tüntetve. Az elemek egy része mágneses talpakon található, melyeket forgatógombbal lehet lazítani illetve rögzíteni. A többi állítási lehetőséget a szárnyas anyát használó befogások jelentik. Használja a mérőhelyen található próbalemezt és azonos méretű papírt a beállításhoz, a nyaláb követéséhez. Helyezze a tárgyat egy hasábra a megfelelő magasság eléréséhez. A lemezt speciális tartóba lehet helyezni, mely csavarokkal szorítja a lemezt a helyére. Ellenőrizze, hogy a lemez teljes felülete és a tárgy megfelelő oldala is elegendően nagy felületen árnyékmentesen meg van világítva. Helyezze a tárgyat és a lemezt a lehető legközelebb egymáshoz. Segíti a későbbi rekonstrukciót, ha a megvilágítás valamennyire ferdén felülről érkezik a függőleges helyzetű lemezre. A lemez egyik oldalán található a fényérzékeny fólia, ennek célszerű a tárgy felőli oldalra kerülnie. Ellenőrizze, hogy a rögzítések megfelelőek, nincs-e „nyitva” hagyott mágneses talp, vagy laza szárnyas anya.

Exponálás előtt mutassa meg az elrendezést a mérésvezetőnek. Jóváhagyás után megkezdődhet az exponálás. Ehhez sötétítse el a szobát, kapcsolja le a lézert (tápegység output off), majd a mérőhelyen található kék led fényében tájékozódva vegyen ki egy lemezt a tartódobozból, és azt zárja vissza. Helyezze a lemezt a tartóba, majd fél perces

várakozást követően kapcsolja vissza a lézert. Az exponálás időtartamára az anyag viselkedése miatt szintén minimumfeltétel vonatkozik, ez kb. 5 perc. Exponálás közben a lemez átlátszósága megnövekszik, mivel a kiépülő hologram rekonstruált képe egyre több fényt juttat a tárgyra, így az exponálás folyamata élőben is "követhető", illetve megállapítható a vége. Ha bizonytalan az időt illetően, inkább exponáljon tovább 2 perccel. A hologram készítése közben kerülni kell a zavaró fényeket, mozgást és rezgést, így a többi mérőcsoport figyelmét is fel kell hívni a megfelelő viselkedésre.

Exponálás után vegye ki a helyéről a tárgyat, és – a diódalézer fényét használva – figyelje meg a rekonstruált virtuális képet. Ezután vegye ki a tartóból a hologramot, és a folyosón található fehér fényű spotlámpával is rekonstruálja a virtuális képet. Milyen színben látható ekkor a tárgy virtuális képe? És ha nagyon ferdén nézzük és világítjuk meg? Mi látható, ha a lemezt az oldalán átfordítva nézzük? Jegyezze fel tapasztalatait, és lehetőleg dokumentálja a látottakat (akár utólag otthon) digitális fényképpel is!

Megjegyzés: Az előbbi feladathoz saját tárgyakat is lehet hozni, de rendelkezünk jól bevált tárgykészlettel. Alkalmas tárgyak: érmék, kulcsok, fém dísz tárgyak (méretkorláttal), és arany vagy ezüst festékekkel csillogóra festett egyéb tárgyak, macskaszem prizma. Korlátozottan alkalmasak fehér, sima felületű tárgyak, kis plüssfigurák (rövid szőrrel), fehér LEGO elemek.

Elmozdulásmező vizsgálata real-time holografikus interferometriával reflexiós elrendezésben

Az előző mérési feladattal lényegében megegyező elrendezést kell itt is használni, mindössze a tárgyat kell kicserélni a laborban található középen megnyomható membránra, és annak felületére merőleges megvilágításra van szükség. A merőlegességet a 10. képlet alkalmazásánál fogjuk felhasználni. A membrán közepét egy mikrométerorsó nyomja, mely 10 mikronos osztású, és 0,5 mm egy fordulata. Ezt az orsót egy hozzá rögzített karon keresztül forgatjuk, melynek végét egy ugyanilyen orsó mozgatja. Mérje meg, hogy milyen hosszú a „külső“ orsó karja, azaz hol érinti azt a „belső“ orsó tengelyétől számítva, és határozza meg, hogy a külső orsó egy fordulata mennyivel nyomja meg a membrán közepét. A kar általában úgy van ráerősítve a "belső" mikrométer orsóra, hogy a kar mozgatásakor az már felütöközik a membrán belső felületén. Hogy ez tényleg így van, vagy valamilyen hallgatói beavatkozás miatt mégsem, arról úgy lehet meggyőződni, hogy a membrán felületén lézeres megvilágítás esetén látható úgynevezett lézerszemcsék a kar mozgatásakor radiális mozgást végeznek-e vagy sem.

A real-time interferogram készítéséhez a membránról reflexiós hologramot kell készíteni az előző mérési feladattal megegyező módon. Ezután nem szabad semmit elmozdítani! Mivel a holografikus rács már ilyenkor is diffraktál, a membránt részben a referencia és részben a tárgy hullám világítja meg (azaz a saját virtuális képe). Továbbra is sötétben lassan tekerjen a külső orsón néhány egész fordulatot, és közben figyelje a membrán felületét a hologramlemezen keresztül. A növekvő deformációval egyre sűrűbb csíkrendszer áll elő, amely a membrán alap és deformált állapota közötti interferencia eredményeképp jön

létre. Ez a real-time interferogram. Két-három különböző mértékben benyomott állapotban rögzítse az orsó tekeréseinek számát, és számlálja le a hozzá tartozó csíkszámot a membrán felületén $\frac{1}{4}$ csík pontossággal, majd a mérés kontúrtávolságával (lásd korábbi interferométeres mérések) szorozva állapítsa meg a membrán közepén fellépő legnagyobb elmozdulás névleges (mikrométerről leolvastható) és mért (interferogramról leolvasható) értékeit. Ha a leolvasások végeztével kicsit elmozdítja akár a tárgyat, akár a hologramlemezt, mit tapasztal? Mit árul el a csíkrendszer alakja az elmozdulásmezőről? Értelmezze a látottakat. (Megj.: Ha a feladat végeztével az eredeti tárgy nélküli rekonstrukciókor látható valamilyen kétexpozíciós csíkrendszer a virtuális tárgyfelületen, arról a látványról is érdemes fényképet készíteni a jegyzőkönyv számára.)

Holografikus optikai elem készítése

Ismételje meg az első feladatot tárgyként a mérőhelyen található domború tükört használva. Vizsgálja meg a kész holografikus tükör működését, és jegyezze fel tapasztalatait. Hogyan jelenik meg a domború tükörnek megfelelő tükörkép? Hogyan viselkedik az optikai elemünk, ha a másik oldalát használjuk? Mi változik, ha a beeső fénysugarak és a megfigyelés is ferdek? Lehetséges valós, vetített képet készíteni az elemmel? Használja a folyosói szpotlámpákat. Lehetőség szerint dokumentálja is a látottakat digitális fényképekkel.

Transzmissziós hologram készítése

Állítson össze transzmissziós hologram elrendezést az 1a. ábra szerint, és dokumentálja azt az első feladathoz hasonlóan. Ellenőrizze, hogy a lemez helyéről mi látszik a tárgyból, illetve hogy szóródik-e róla fény a lemez felé. Törekedjen arra, hogy a referencia és a tárgynyaláb egymással bezárt szöge 30-45 fok körül legyen, valamint az úthosszak különbsége se legyen 10 centinél sokkal nagyobb. A lemezt úgy kell a tartóba helyezni, hogy a fóliázott rész a beérkező nyalábok felé nézzen. Az exponálást az első feladatban leírtaknak megfelelően kell végezni. A kész hologram csak lézerefényben tekinthető meg. Nézze meg az eredményt az 1b. és az 1c. ábrák elrendezésében is, utóbbihoz egy másik, nem táguló nyalábú lézer szükséges. Hogyan jelenik meg a holografikus kép térbelisége? Működhet-e a rekonstrukció más színű lézerral? Lehetőség szerint készítsen digitális fényképet a rekonstrukciókor látottakról.

Egyéb információk

A jegyzőkönyvben: elméleti bevezető nem szükséges, de saját igény esetén se legyen több 3/4 oldalnál. Foglalja össze a mérés során tapasztaltakat! Mellékelje a ténylegesen használt elrendezések rajzát vagy fényképét, és ha készültek digitális fényképek a rekonstrukciókról, azokat is. Térjen ki a mérési feladatokban megfogalmazott kérdésekre is!

Biztonsági tudnivalók: A lézerefénybe ne nézzünk bele, a szórt fénybe pedig legfeljebb rövid ideig.

Linkek:

Házilag karcolt egyszerű hologramok:

<http://www.eskimo.com/~billb/amateur/holo1.html>

Szertár videó karcolt hologramokról:

http://www.szertar.com/webizodok/2d_hologram_hazilag/