

XIII. Erdélyi Tudományos Diákköri Konferencia – Kolozsvár,
2010. május 14–16

Szerzők: Asztalos Örs és Felházi Zoltán
“Babes – Bolyai” Tudományegyetem,
Fizika kar, mérnöki fizika illetve fizika szakos II éves hallgatók

Témavezető: Dr. Karácsony János, nyugdíjas egyetemi adjunktus,
Fizika kar, molekuláris spektroszkópia tanszék,
“Babes – Bolyai” Tudományegyetem.

Reflexiós és transzmissziós hologramok készítése

A holográfia elve

A holográfia olyan képrögzítő, rekonstruáló eljárás ahol a tárgy háromdimenziós képét állíthatjuk elő a hagyományos leképező rendszer használata nélkül. Ahhoz, hogy megértsük a holográfia által nyújtott előnyöket, szükséges megemlíteni a hagyományos optikai adattörögztés egynéhány jellegzetességét. A hagyományos optikai információátrolás (fényképezés) az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

1. A tárgy egy pontjából származó információt a kép egy pontjában tárolja
2. A fényképezőanyag elsötétedése egy pontban az illető pontba érkező fénysugár (hullám) amplitúdójától függ, tehát az amplitúdóban tárolt információt rögzíti

Ezekből a jellegzetességekből a következő hátrányok származnak:

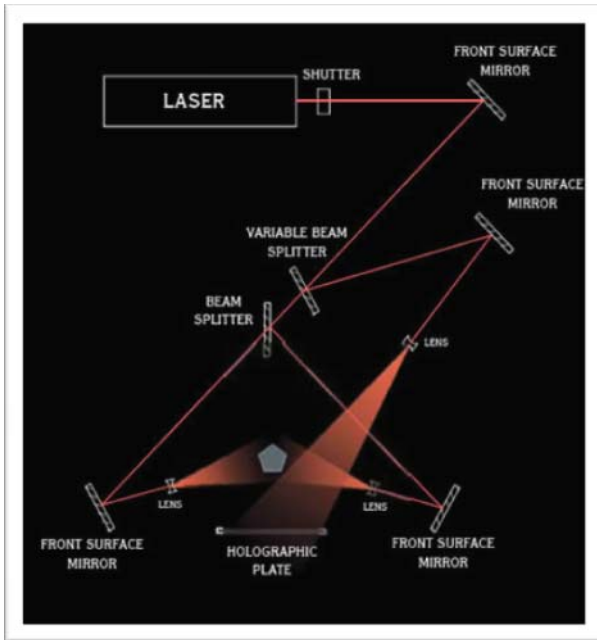
- a) A fénykép egy részének tönkremenetele maga után vonja az ezen a részen található pontokra vonatkozó információ elvesztését
- b) A fénykép elkészítése szükségessé teszi egy leképező rendszer felhasználását (fényképezőgép), majd a kép visszaadásához új optikai eszköz felhasználását (nagyító, vetítő stb)
- c) Egy háromdimenziós tárgy képét a leképező rendszer a film síkjába vetíti le. Így a háromdimenziós tárgynak egy kétdimenziós kép felel meg, amely nem képes visszaadni a teljes térbeli látást (parallixis hatás).

A holográfia épp ezen hagyományos eljárás hátrányait képes kiküszöbölni, nagy előnye az, hogy nemcsak az amplitúdóban szállított információt képes tárolni (akárcsak a

fényképezőgép) hanem a fázisban szállított információt is. $A = A_0 e^{-i\varphi}$

A képalkotásban résztvevő hullám intenzitása arányos a tárgy pont intenzitásával és kedvező esetben ez az arány az egész tárgyra vonatkozólag állandó. Így a képsíkban a tárgysík intenzitáseloszlásával arányos intenzitáseloszlást kapunk. Ezt nevezzük képnek. A fény a tárgyra vonatkozó összes információt az amplitúdóban és a fázisában hordozza. Bármely tárgyról visszavert fénynyaláb eredő hullámfelülete tökéletesen lemintázza a tárgy felületét. Ezt az információt megőrzi (ezért látunk távoli tárgyakat), a hullámfelület alakjából következtethetünk a tárgy alakjára, ha ismerjük a megvilágító fény hullámfelületét. Ha ezt tudnánk rögzíteni és rekonstruálni akkor a tárgy hû mását kapnánk. Ezt valósítja meg a holográfia. Azaz képes a fázisban szállított információt is tárolni. Így egy hologram a tárgyról érkező összes adatot tudja raktározni. (holo = teljes, gram = kép) Fázisinformáció tárolására nincs megfelelő fényérzékeny detektor, így az információ egy része elvesztődik, ezért lesznek a fényképek egysíkúak, a térbeli hatás elvész. Ahhoz, hogy a fázisában tárolt információt rögzíteni lehessen a fázisviszonyokat le kell fordítani a detektor "nyelvére", intenzitásvaltozássá alakítjuk át, amit a fényinterferencia jelenségével el lehet érni. Ez játsza a tolmács szerepét. A nehézséget az okozza, hogy az interferenciakép kialakításához koherens hullámok szuperpozíciója szükséges. A tárgyat egész terjedelmében koherens hullámokkal kell megvilágítanunk. A visszavert hullámot – tárgy hullámot – vele teljes terjedelmében koherens referenciahullámmal interferáltatjuk. Koherens fényhullámok használata azért fontos, mert a hullámfelület rekonstrukciójával kell a tárgy képét előállítani, akkor a hullámfelület nem változhat véletlenszerűen, ez történik az inkoherens hullámok esetén. A hologram előállításához nem használhatunk fehér fényt, mert az azt alkotó sok különböző hullámhosszú fénysugarak nem koherensek, sőt ha egy hullámhossz esetén is megvalósulna a koherencia, az interferencia képben sok inkoherens hullám interferenciája is belekeveredik, amit nehéz kiszűrni. Tehát hologramok készítésére minnél monokromatikusabb fény használata ajánlott, mert így a koherencia is kialakítható. A tárgy hullám és a referenciahullám interferenciájának eredményét fényérzékeny lemezen rögzítjük. Az így kapott interferenciakép intenzitáseloszlása tartalmazza a tárgy hullámban foglalt teljes információt a tárgyról (nyilvánvaló, hogy egyidejűleg rögzíti a referenciahullám által szállított információt is). Ez a tárgy hologramja. Gyakorlati szempontból előnyös minnél egyszerűbb hullámfelületű és fényeloszlású hullámot választani, ilyen a véges távolságú pontszerű fényforrásból kiinduló gömbhullám vagy a végtelen távolságban elhelyezkedő pontszerű fényforrás által kibocsátott síkhullám.(1)

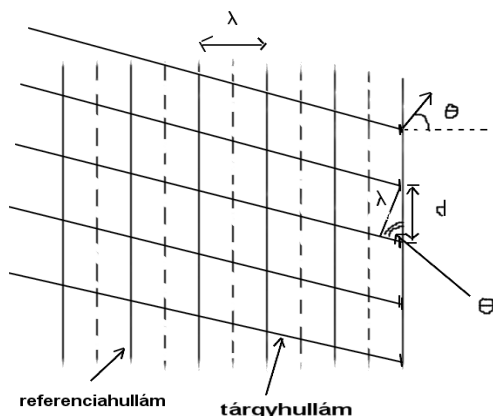
A hologram felvétele úgy történik, hogy a koherens fényforrásból kiinduló sugárnyalábot a fényosztó, ami lehet féligáteresztő tükör, prizma, két nyalábra osztja. Az egyik nyaláb a tárgy hullámot szolgáltatja, míg a másik nyaláb a referencia nyaláb szerepét fogja betölteni. A tárgy hullám a tárgyról szóródva jut a holografikus lemezre, míg a referencia nyaláb nem érinti a tárgyat.



Ha előhívjuk és rögzítjük a hologramot a fényérzékeny lemezen, az interferenciamaximumok helyén a lemez erősen megfeketedik, míg a minimumok helyén átlátszó marad, tehát megjelenik az interferenciakép negatívja. Ez a negatív hologram. Erről pozitív másolatot készítve megkapjuk az eredeti interferenciaképet, azaz a pozitív hologramot. Ha a tárgy eltávolítása után a hologramot a referenciahullámmal átvilágítjuk, a diffrakciós rácsként viselkedő átvilágított hologram által diffraktált sugarak között jelen lesznek olyan sugarak is, amelyek az eredeti tárgy hullámnak felelnek meg. Így egyszerű átvilágítással megkapjuk a tárgy térbeli képét.(1)

E képnek a rekonstrukciója a következő elven alapszik. Tételezzük fel, hogy a tárgyunk egy nagyon távoli pontszerű fényforrás, melyből a megfigyelő szemébe síkhullám jut a fényforrás helyzetének megfelelő irányból. Ha a fényforrást eltávolítjuk, de valamilyen optikai rendszerrel gondoskodunk arról, hogy a megfigyelő szemébe az előbbivel azonos tulajdonságú síkhullám jusson, az időközben eltávolított tárgy irányából, a megfigyelő továbbra is úgy látja,

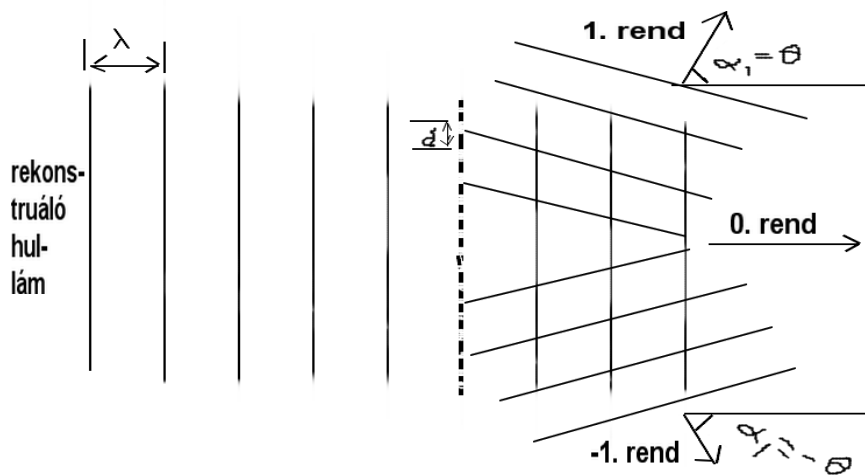
mintha a fényforrás az eredeti helyén lenne.



Most vizsgáljuk meg egy végtelenben található tárgy hologramját és képének rekonstrukcióját.(2) A

hologram rögzítéséhez szükséges fényérzékeny lemezt helyezük úgy, hogy a referenciahullám (mely síkhullám) érkezen merőlegesen rá. A végtelenben levő tárgypontról, a lemezre érkező síkhullám θ szöget zár be a normálissal, ahogy azt a mellékelt ábra mutatja. A fotolemezen a megvilágítás erőssége a kétréses interferenciaképhez hasonló és periódushossza az ábra szerint $d = \frac{\lambda}{\sin\theta}$, ahol θ a két hullám terjedési iránya közötti szög. Ezzel az eljárással tehát egy rácsot (hologram) kapunk, mely átvilágítva elhajlási képet eredményez. A rekonstruáláshoz használjunk szintén λ hullámhosszú hullámot, melyet merőlegesen engedünk a fényérzékeny lemezre. A rácson történő elhajlás következményeként $\alpha_0 = 0$ irányban, vagyis a felvételkor használt referenciahullám irányában, kapjuk a 0. rendű elhajlási képet, mely a referenciahullámmal megegyező síkhullám. Ez azt jelenti, hogy visszakaptuk a referenciahullám által hordozott információt.

Az első rendű elhajlási maximum irányát a $\lambda = d \sin\alpha_1$ feltételből határozhatjuk meg és erre $\sin\alpha_1 = \lambda/d = \lambda \sin\theta / \lambda = \sin\theta$ adódik. Következik, hogy első rendű maximumnak megfelelő síkhullámok ugyanazt a θ szöget zárják be a referenciahullámmal, mint az eredeti tárgy hullám. Tehát az interferenciaképen keletkező elhajlás így rekonstruálja az eredeti hullámot, ami úgy látszik egy megfigyelő számára, mintha a hullám az eredeti fényforrásból származna.



A fenti ábrán észrevehető, hogy a rekonstruált hullám párja is megjelenik a $k = -1$ rendű elhajlási maximum formájában. Megfigyelhető, hogy az 1. rend az eredeti hullámot rekonstruálja, azaz virtuális képet ad, míg a párja valódi, tehát ernyőn felfogható képet alkot. (2)

Abban az esetben, ha bonyolultabb tárgyakat szeretnénk holografikus lemezre leképezni, szintén használhatjuk ezt az eljárást. Ebben az esetben a szórt hullám, a tárgy különböző részeiről érkező hullámok eredője. Amplitúdója és fázisa a tárgytól függően a hely függvénye.

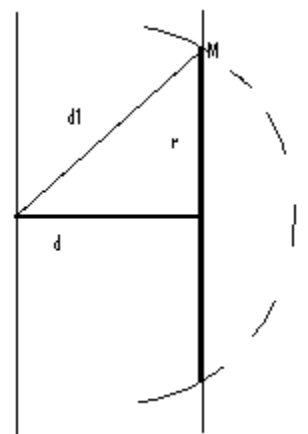
E hullám és a vele koherens referenciahullám interferenciája szintén rácsszerű intenzitáseloszlást eredményez, ám a csíkok élessége a vizsgált hullámfront amplitúdójától függően, helyzete viszont fázisától függően helyről-helyre változik. A hologram tehát interferencia csíkok – azok távolsága, amplitúdója, helyzete – formájában tárolja a tárgyra vonatkozó összes információt. Előállításához természetesen az kell, hogy a megvilágítás monokromatikus és koherens legyen, különben a csíkok összemosódnak és a rekonstrukció lehetetlenné válik.

A hologramokat célszerű sík vagy gömbfelületű hullámokkal felvenni, amit az előbb is megemlítettük. Ha a tárgyhullámnak gömbhullámot használunk abban az esetben Fresnel féle hologramokat készítünk, viszont a tárgyról visszavert gömbhullámok síkhullámmá való átalakítása után már Fraunhofer féle hologramok keletkeznek. A Fraunhofer módszer megfelelője, a tárgyat a végtelenbe helyezzük és azt képezzük le. Az általunk elkészített hologramok Fresnel típusú hologramok.

Ahhoz hogy a hologramok hullámoptikai tárgyalását leegyszerűsítsük tekintsünk tárgynak egy pontszerű fényforrást.(1)

A tárgyat síkhullámmal világítjuk meg, így a tárgyról másodlagos gömbhullámok szóródnak, illetve a referencia nyaláb egy perturbálatlan síkhullám. Ezt a nyalábszétválasztás nélküli módszert In-line módszernek nevezzük. A tárgyalás szempontjából egyszerűbb ha nyalábszétválasztás nélküli módszert illetve a merőleges beesést vesszük figyelembe viszont ezek nem jelentenek lényeges restrikiót. A transzmissziós hologramok amiket készítettünk ugyanezen az elven alapozunk. Amint az ábrán látható az M pontban a tárgyhullám d_1 távolságot tesznek meg, míg a referenciahullám d távolságot.(1)

$$d_1 = \sqrt{d^2 + r^2} \cong d \left(1 + \frac{r^2}{2d^2} \right)$$



Tehát a tárgyhullám és a referenciahullám az M pontban útkülönbséggel találkozók

$$\delta = d_1 - d = \frac{r^2}{2d}$$

A maximumok helye: $\delta = k\lambda_1$, $k = 0, 1, 2, \dots$ $r_k = \sqrt{2dk\lambda_1}$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Az így keletkezett hologram világos és sötét koncentrikus körökből áll, a gyűrűk sugara pontosan úgy növekedik mint a Fresnel zónáké.

Általánosan felírva az amplitudó eloszlást $a_o(x,y)$ felel meg a tárgyhullám amplitudóeloszlásának, $a_r(x,y)$ pedig a referencia hullámé, a két hullám szuperpozíciója végett a megvilágítás az $M(x,y)$ pontban a következő:

$$E(x,y) \sim |a_o(x,y) + a_r(x,y)|^2 = |a_o(x,y)|^2 + |a_r(x,y)|^2 + a_r^*(x,y)a_o(x,y) + a_r(x,y)a_o^*(x,y)$$

Megfelelő fényképezési eljárás során elérhetjük azt hogy a lemez áteresztőképessége

$T(x,y) \sim E(x,y)$. Ez által ha a rekonstrukciós nyalábbal világítjuk meg a hologramot ami azonos a referencia nyalábbal, akkor a komplex amplitudóeloszlás a következő:

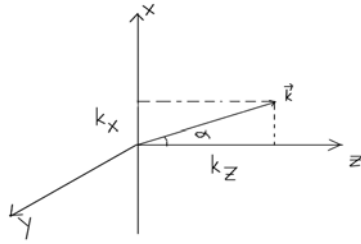
$$a(x,y) = T(x,y) a_{rek}(x,y) = [|a_o(x,y)|^2 + |a_r(x,y)|^2] a_r(x,y) + |a_r(x,y)|^2 a_o(x,y) + a_r^2(x,y) a_o^*(x,y)$$

Ha feltételezzük, hogy a referenciahullám a hologramot egyenletesen világítja (síkhullám), azaz $|a_r(x,y)|^2 = \text{áll}$, akkor jól látható, hogy a fenti kifejezés második tagja arányos a tárgyhullám komplex amplitúdójával. Így rekonstruáltuk a hologram síkjában a tárgynak megfelelő hullámfrontot. Ez a szemünkbe jutva a tárgyról egy virtuális képet alkot. Azonban a hologram megfigyelő felé eső oldalán még más nyalábok is jelen vannak. Az első tag a referenciahullámmal arányos. Ez képen egy elkent megvilágítást okoz, megfelel a némileg gyengült megvilágító hullámnak. A harmadik tagnak megfelelő nyaláb pedig a valódi kép (konjugált kép) ami a direct kép faziséval ellentétes előjelű. (2)

$$a_o(x,y) = |a_o(x,y)| e^{-i\Phi(x,y)}$$

$$a_o^*(x,y) = |a_o(x,y)| e^{+i\Phi(x,y)}$$

Nyilvánvaló hogy ebben az esetben a kép fedi egymást mert a valódi kép a tárgy tükörképeként értelmezhető. Ezt hamis térbeliségnek nevezzük. Ez az In-line módszer, amivel Gábor Dénes a holográfia feltalálója, az első hologramot előállította. Ennek nagy hátránya hogy az egyszerre



megjelenő három sugárnyaláb megzavarja a direkt kép megfigyelését. Ezért fontos a Leith és Upatnieks által kidolgozott nyalábelválasztásos módszer alkalmazása. Így a referencia nyaláb a holografikus lemezzel α szöget zár be. Tételezzük fel, hogy α elég kicsi ahhoz, hogy $\sin\alpha \approx \alpha$ és $\cos\alpha \approx$

1. Ekkor

$$k_x = k \sin\alpha \approx k\alpha$$

$$k_z = k \cos\alpha \approx k$$

$$\mathbf{k}r = k_x + k_z \approx k\alpha x + kz$$

A referenciahullám komplex amplitúdója így: $a_r(x,y) = a_r(x,y)e^{-ik\alpha x}$

Ha a rekonstruáló hullám azonos a referencia hullámmal, akkor a megfigyelő felé eső oldalon a komplex amplitúdóeloszlás az :

$$a(x,y) = [|a_o(x,y)|^2 + a_r^2] a_r(x,y)e^{-ik\alpha x} + a_r^2 a_o(x,y) + a_r^2 a_o^*(x,y) e^{-2ik\alpha x}$$

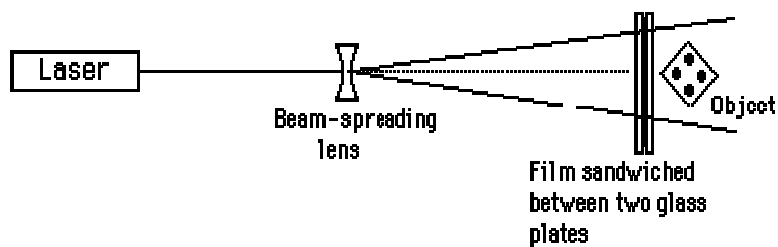
alakot ölti. Ebből a kifejezésből következik hogy a konjugált kép 2α szöget zár be a hologram normális irányával.(2)

Ha a hologramot zóna lemezeknek tekintjük, akkor szembetűnik, hogy a zónalemezek nagy színihibával rendelkeznek. Mivel monokromatikus fényt használunk ez nem folyásolja be a leképezést viszont ha mas hullámhosszú fényt használunk rekonstrukcióra akkor

gyűjtőtávolsága: $f = 2d \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

Tehát a direkt kép szögnagyítása: $G = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ (1)

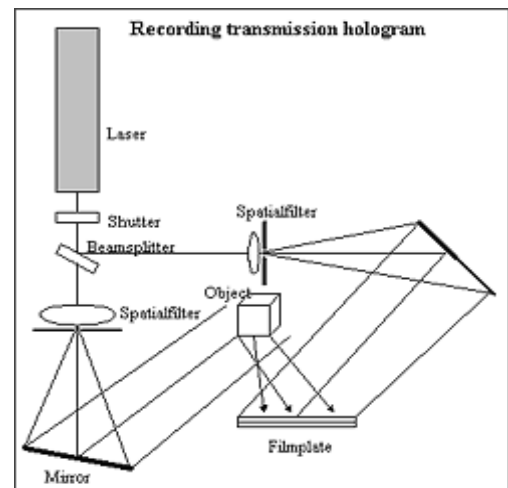
Reflexiós hologramok készítése (3)



A reflexiós hologram előállítására nagyon egyszerű módszerrel kivitelezhető. Ahhoz, hogy a tárgyunk (ami lehetőleg legyen merev, például fém, fa, kő) teljes felületét érje a lézervény szükséges egy rövid gyújtótávolságú gyűjtőlencsét használni, (nyalábtágító lencse), amit a lézer és a tárgy közé helyezünk. Amint az ábra mutatja, a lézertől kilépő sugár áthaladva a lencsén széttartó nyalábbá alakul, ami a referenciahullám szerepét tölti be. Ezen nyaláb keresztül megy a tárgy elé helyezett fényérzékeny lemezen és szóródik a tárgyon. A visszavert hullámok (tárgyhullám) szintén áthaladva a lemezen interferálnak a referenciahullámmal és a fényérzékeny emulzióban interferenciafelületek keletkeznek rajta. Annyit kell még tennünk, hogy előhívjuk és rögzítjük a filmen levő információt és megkaptuk a hologramot.

Transzmissziós hologramok készítése (3)

A transzmissziós hologramok készítése kissé más eljárással történik. A lézertől kiérkező sugár elébe egy nyalábosztót helyezünk, ami a nyalábot két részre választja. Egyik része, áthaladva egy nyalábtágító lencsén és tükörrel megfelelően irányítva egyenesen a



fényérzékeny lemezre érkezik, tehát ez képezi a referencihullámot. A másik részt szintén kitágítva a tárgyra irányítjuk, hogy létrehozhassuk a tárgyhullámot. Az interferencia minimumok és maximumok így kialakíthatnak és létrehozzák a diffrakcios rácsot.

Mindkét eljárással eléggé jó minőségű hologram hozható létre, persze ez még sok külső tényezőtől is függ. Ha ezeket a hologramokat megvilágítjuk ugyan azzal lézerrel, olyan irányból mint amilyen irányból érkezett a referencia hullám a lemezre, a lemez mögött meglátjuk a tárgy három dimenziós látszólagos képét.

Külső tényezők és a kísérlet menete

Fontos egy jó minőségű lézer használata. Mi a kísérletünkben 1mW-os lézert használtunk és olyan tárgyaknak készítettük el holografikus képeit, amelyek jól verik vissza a fényt. Az állvány, melyen az egész rendszerünk helyet kap lehetőleg olyan kell legyen, hogy a rezgéseket maximálisan csillapítsa. Nagyon jó a levegővel teli tömlőre helyezett gránitlap. Ezen beállítjuk pontosan a berendezésünket és rácsukjuk a védőtetőt a lapra, így a lézerfény csak egy kis résen tud bejutni. A fényérzékeny lemez érzékenysége miatt a kísérletet csak sötétben vagy zöld fény mellett lehet elvégezni, mert erre a hullámhosszra nem mutat érzékenységet. Miután elvégeztük a beállításokat és minimálisra csökkentettük a befolyásoló tényezőket, elkezdhetjük a hologramkészítést. Elhelyezzük a fényérzékeny lemezt a lemez tartón és egy kicsit várunk (10-15 perc), hogy a levegőáramlás és a belső feszültségek csökkenjenek. Ezután bekapcsolhatjuk a lézert. Az exponálási idő a lézertől függ. A mi esetünkben 1 vagy 3 másodperc. Annak függvényében, hogy mennyi volt az exponálási idő fázis vagy amplitúdó hologramot képezhetünk. Az előbbi esetében a hologramon sötét szürke lesz a lemezünk, míg az utóbbinál világos szürke. Az amplitúdó hologram készítésekor elegendő a fényérzékeny lemez előhívása, mosása, rögzítése majd újboli mosása, a fázishologram esetében az előhívás és mosás után be kell iktatni egy fehérítő kezelést.

Könyvészet:

Kovács Kálmán: A holográfia (1)

Karácsony János: Kiegészítések a modern optikához (2)

P5361 és P5371 laborjegyzetek (3)