

# A MAGYAR KÉZMŰVES HOLOGRÁFIA HŐSKORA

## 1. rész: kezdetek és tudomány

Horváth Zoltán György

MTA Wigner Fizikai Kutatóintézet SzFI

1967 tekinthető a magyar holográfia születési évének. Az 50. évforduló alkalmából érdemes megemlékeznünk az úttörő kezdetekről. Ezt a korszakot a kézművesség, a klasszikus fotográfián alapuló – így visszatekintve, analógnak nevezhető – képrögzítési technika jellemezte.

Fényérzékeny fotolemezek, filmtekercsek, exponálás, előhívás, fixálás, szárítás... azután a képeket nézegetve néha csalódás, néha öröm és elégedettség. Ez volt a fényképészet anno, és pontosan ilyen volt a kezdeti holográfia is. Sőt! Először ködös, majd egyre szépülő „fekete-fehér” (a kezdeti He-Ne lézerek miatt inkább: semmi-piros foltos), később színes, sokszor térbeli, háromdimenziós látvánnyal (nem képekkel) és számtalan érdekes tudományos eredménnyel.

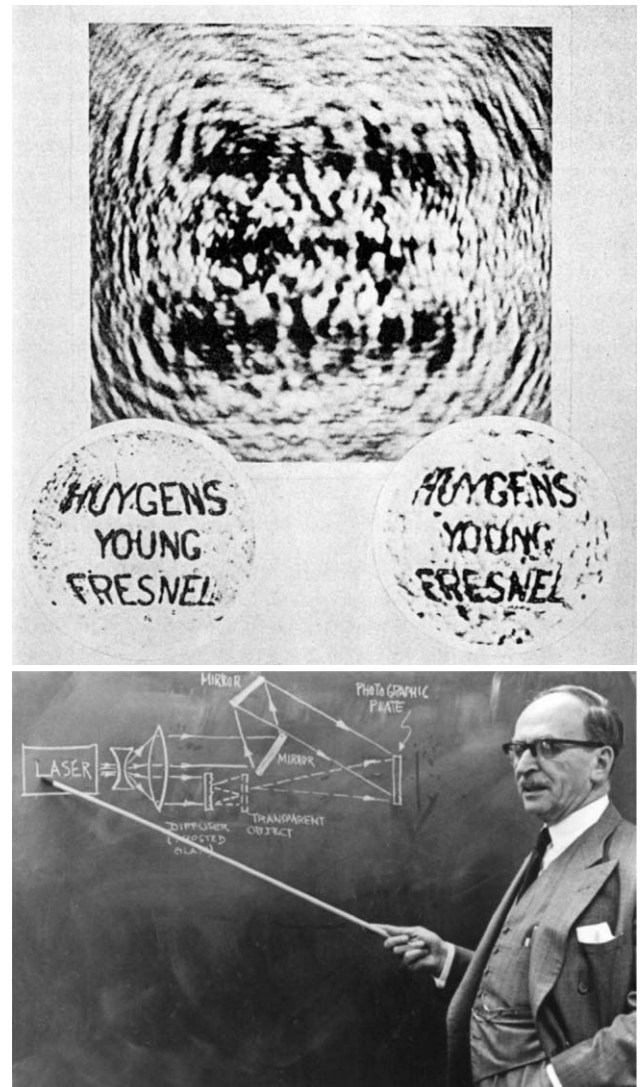
A cikk első részében főleg a tudományban, a másodikban pedig a látvány területén elért hazai eredmények rövid történetét szeretném felidézni. A „lötykölős” korszakot, aminek lezárultát a digitális képrögzítés, sokszorosítás és a digitális holográfia megjelenése jelentette.

Magyarországon szinte mindenki tudja, hogy a Nobel-díjas *Gábor Dénes* teremtette meg a holográfiát. Az elektronmikroszkópok képjavítási megoldásain elmélkedve arra a következtetésre jutott, hogy képalkotáshoz a tárgyról felénk érkező sugárzás intenzitáseloszlásának síkbeli rögzítése (fény esetén: fotográfia) helyett, a sugárzási tér fáziseloszlásának egy síkban rögzítésével is lehet rekonstruálni (újrakeltetni) a „látott” valóságot. Fény esetén az eredeti fényteret.

Az viszont már sokkal kevésbé köztudott, hogy az első optikai hologramot is maga Gábor Dénes készítette, még 1947-ben, jóval az egyszínű, koherens lézerek megszületése előtt. Hihetetlen szívóssággal oldott meg számtalan elméleti és technikai problémát, csak azért, hogy bizonyítani tudja, hogy a matematikailag ugyan korrekt, de akkoriban erősen futurisztikusnak, sőt inkább lehetetlennek tűnő elképzelése valóban megvalósítható. A fény fázisának rögzítéséhez nagy koherenciájú (hosszú ideig – kettéosztás, majd újraegyesítés során – nagy fényűtkülönbségeket is elvisel-

ő, kötött fázisú) monokromatikus fényforrás kell. Akkoriban viszont az erre képes, ma lézereknek nevezett eszközök ötlete is csak elvi lehetőségként merült fel. Gábor Dénes kísérleteinél higanygőzlámpák egyszínű spektrumvonala volt a fényforrás. A jól gerjesztett atomi spektrumvonalakban már valami minimális fáziskötöttség fellelhető, ami lehetővé tette egy síkbeli tárgy (üveglemez, aminél nagy úthosszkülönbségek nincsenek) hologramjának elkészítését és rekonstrukcióját (1. ábra). A lemezen az optika azon óriásainak nevei olvashatók, akik munkái megalapozták a holográfia lehetőségének felismerését.

1. ábra. A világ első hologramja, amelyet Gábor Dénes higanylámpa erős spektrumvonalának fényével már 1947-ben(!) elkészített és rekonstruált [1] fölül, és a Nobel-díjas fizikus előadást tart a holográfiáról (alul).



Horváth Zoltán György 1969-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n, s azóta a KFKI-ban (Wigner FK) dolgozik, jelenleg nyugdíjasként. 1992 óta kandidátus. Nagy intenzitású fény-anyag kölcsönhatással és lézerfizikával – sokfotonos folyamatok, pikoszekundum-mérő, síkban sugárzó (Halo) diszklézerek, biofotonika és új típusú, leképező ellipszometria – foglalkozott. Lézeres szakemberek oktatásán túl ismeretterjesztő cikkekkel, TIT-előadásokkal, rádió- és tv-műsorokkal népszerűsítette a fényfizikát.

Gábor Dénes számára az igazi szakmai sikert a holográfia szükséges feltételeinek majdnem tökéletesen megfelelő klasszikus lézerek megjelenése hozta meg, majd másfél évtizeddel később, a század hatvanas éveiben. Az elismerést pedig az 1971-es fizikai Nobel-díj. A díj rangját még az is emelte, hogy akkoriban már ritkaságnak számított, hogy valaki egyedül, azaz nem másokkal megosztva kapta ezt a különleges kitüntetést.

## Néhány gondolat a holográfiáról

Gábor Dénes szakított azzal a technikával, amit a szemünk, a barlangfalra rajzoló ősemberek, a festők és a fotografusok használnak: világunkat sötét-világos, esetleg színes pontok, pöttyök, foltok, vonalak – tipikusan síkban elhelyezett – sokaságával próbálják helyettesíteni. Agyunk csodálatos képessége, hogy szemünk ideghártyájára szemlencsénkkel leképezett valóság változó intenzitású és elrendezésű ponthalmazból hihetetlen „látványt” varázsol.

A felfedező klasszikus görögös műveltségét jól mutatja az eljárás elnevezése: „holos” = teljes, „grafos” = leírás (lerajzolás, rögzítés), azaz a rögzített interferenciakép a valóság teljes optikai információját tartalmazza. A csodás név csak arról nem ad semmi információt, hogy mit és hogyan kell tennünk, ha holografálni szeretnénk. Ennek részleteit természetesen cikkek, könyvek, tankönyvek, sőt ma már youtube-videók sokaságában is megtalálhatja az érdeklődő olvasó. Legautentikusabb forrásként én mégis Gábor Dénes Nobel-díj átvételekor tartott előadását javasolnám, amely a tudós születésének 100. évfordulója alkalmából, 2000-ben jelent meg magyarul a *Fizikai Szemlében* [1].

Az elnevezést többen igyekeztek érthetőbbé – kis képzavarral –, kézzelfoghatóbbá tenni. Ilyen például, hogy a holográfia térbeli fényképezés. Igaz, mert a holográfia klasszikusan tényleg a 3D-s világot adja vissza, de manapság az úgynevezett leképező (képalakító-, képsík-) hologramok a legelterjedtebbek – főleg a másolásvédelemben –, és ezek csak minimális térinformációt hordoznak. Egy másik elterjedt név a lencse nélküli fényképezés. Elvben ez is igaz, mert akár ezek nélkül is készíthetünk hologramokat, de szigorúan véve hamis, mert a nyalábalakításhoz pontos lencsék kellene, így ezek használata nélkül a gyakorlati holográfia nem nagyon működik.

Én ennyi év elteltével a „hullámfront-rekonstrukciót” tartom a leginkább jellemző elnevezésnek. Röviden megindokolnám, hogy miért. Ha megvilágítunk egy tárgyat, az arról visszaverődött fény elektromágneses hullámfrontként jut el a szemünkbe. A látható valóságot ez a hullámfront hordozza. Attól látunk valamit, hogy ez a hullámfront a szemünkbe jutott. Mit is tesz a holográfia? Éppen ezt a hullámfrontot hozza újra létre, azaz rekonstruálja anélkül, hogy a valóság, az eredeti tárgy jelen lenne. Szinte hihetetlen, hogy ezt meg lehet csinálni. Ma már tudjuk, hogy ez

egy Nobel-díjat érő ötlet (no meg rengeteg előtanulmány, matematika és keserves munka).

A fénytér igen bonyolult hullámfrontjainak újraalkothatósága ámulatba ejtő lehetőség. Néhány évtizeddel korábban máson csodálkozott az emberiség. *Edison* (elődei és utódai) munkája eredményeként régóta ismerünk a holográfiához kicsit hasonló akusztikus megoldásokat. A hang is hullámjelenség. Egy zenekarban például sok-sok hangszer rezgeti a levegőt, és az általuk keltett hanghullámfront jut a fülünkbe. A hullámfront közvetít a hangszerek és a fülünk között. A hanghullámfront rekonstrukcióját a hangszórók (fülhallgatók) membránjának segítségével mára szinte tökéletesen megoldották. Egy egész zenekart lehet egy – kis túlzással – egyszerű lemezdarabka, és ezzel a levegő sűrűségének ügyes rezgetésével helyettesíteni. Az akusztikus hullámfront-rekonstrukció tehát sok-sok évvel megelőzte az optikai változatot. Természetesen a fény- és hanghullámok jellegének lényegi eltérése miatt a technika is egészen más elveken alapul, de az analógia talán jelzi, hogy a hologram tekinthető annak a „membránnak”, ami úgy tudja „megrezgetni” vagy inkább összekuszálni egy ismert fényforrás fényét, hogy az az eredeti fénytér tökéletesen újrateremtett mása lehet.

A megfigyelő számára (elvben) teljesen mindegy, hogy az a fénytér jut-e a szemébe, amely a valós tárgyról verődött vissza, vagy az azzal tökéletesen azonos, de mesterségesen keltett elektromágneses tér, amit egy ismert stabil forrás fényének ügyes modulálásával, a hologramon történt átengedésével (néha reflektálásával) állítottunk elő. Ha a valódi fénytér háromdimenziós volt, akkor természetesen a mesterséges is az lesz. Ez az a tulajdonság, amit az emberek többsége a holográfiához, azaz a fényhullámfrontok rekonstrukciójához társít.

## Az „őskori” technika

Elborzasztó, egyúttal gyönyörű és tanulságos a fényírás, a fotográfia „felfedezésének”, kialakulásának, kezdeti lépéseinek dokumentumait olvasgatni. Ezekhez hasonlóan a kezdetben igencsak macerás volt a hologramok készítése is.

Fényforrásként leginkább – természetesen – a közkedvelt, jó koherenciatulajdonságokkal rendelkező, és akkoriban már 5-10-20 mW-os teljesítményt is stabilan produkálni képes piros hélium-neon lézereket használtak. Ezen készülékek életre lehelése, a stabil állapot elérése szinte minden nap több óra előkészületet igényelt. A holográfia minőségileg sokkal jobb és stabilabb lézereparamétereket kívánt, mint a szokásos „bekapcsoljuk és világít” állapot. Ezekben az akkori csúcsberendezésekben – 20-30 mW esetén – ugyanis akár 1-2 méter(!) hosszú, pár mm átmérőjű, sok ponton állíthatóan alátámasztott üvegkapillárisokban működött a gázkisülés. A kisülési csövek a hőmérséklet-változások (főleg ki-bekapcsolások) miatt sorra meggörbültek (az a fránya gravitáció) akár annyira is, hogy reggel már át

sem talált a fény a kapillárison, pedig előző nap még csodásan üzemelt. Ha már átjutott a beállításra használt próbafény a csövön, további hosszadalmas jusztlási feladat várt a méteres távolságra lévő különleges tükrökre is. Ilyen feltételek mellett kellett az egyetlen transzverzális (TEM<sub>00</sub>) módusú, ideális esetben körülbelül körkeresztmetszetű „szép” eloszlású, időben is nagyon stabil, monokromatikus fényt kelteni.

Azon laboratóriumokban, ahol a hatvanas években lézerek készültek (léteztek), szinte mindenütt volt optikai spektrométer is. A halovány fényforrások nagy felbontású spektrumát különlegesen nagy vonalfelbontású fotolemezekre (1000-4000 vonal/mm) exponálták a spektroszkópok. Ezek a speciális spektrálemek voltak alkalmasak arra, hogy rögzíteni tudják a holografikus felvételi elrendezés során létrejött, a fényhullámhossz nagyságrendjébe eső – mikrométer alatti felbontású – interferenciacsík-rendszert.

A fotográfia egyik alaptörvénye szerint a fotaanyagok fényérzékenysége és felbontása egyszerre nem növelhető. Az egyik csak a másik kárára javítható. Emiatt jó felbontás esetén az akkoriban rendelkezésre álló (folytonos) lézerekkel dolgozva is, nagyon hosszú (több másodperc, sőt inkább több perc) expozíciós időkre lehetett számítani. Ezalatt kellett a teljes rendszert (lézer, nyalábalakító optikák, terelő tükrök, a tárgy és a fotolemez) mikrométernél nagyobb pontossággal stabilan tartani. Levegőt venni is alig mertünk, pedig annak hatását nagyjából kiátlagolta a hosszú felvételi idő. Jénában például az éjjel szerencsére ritkán közlekedő villamos dübörgése miatt, annak menetrendjéhez kellett igazítanunk a felvételek idejét. Néhány év kellett, mire kialakultak a holográfia klasszikus rezgésmentes platformjai: a rengeteg homokba ágyazott vagy autógumibelsőkön, illetve teniszlabdákon nyugvó hatalmas és nehéz márvány- vagy vastag fémlapok.

Lézerekre és holográfiára kalibrált fénymérők nem voltak, így az expozíciós idő meghatározása kizárólag kísérleti úton történhetett.

A fényképezésnek „csak” a se túl világos, se túl sötét ne legyen a kép, optimális expozíció feltételeit kellett meghatározniuk. Az interferenciaképek esetén az interferenciacsíkok „szinuszosága” is fontos volt, hiszen például egy lépcsőfüggvény szerint változó csíkok rendszere sok zavaró mellékdiffrakciót tud generálni. Nagyon el kellett találni a fotolemezek feketedési görbéjének középső szakaszát. Azt a lineáris tartományt, ahol a kétszer erősebb fény kétszer akkora feketedést eredményezett. Ezt a kritikus szakaszt nem csak az emulzió minősége, az expozíció, hanem még az előhívási és fixálási folyamat kémiai és időbeli lépései is nagyon erősen befolyásolták. A fizika csak egy szempontból segített a holográfusoknak: az interferenciacsík-rendszerrel (ha az tökéletes) teljesen mindegy, hogy mely csíkok sötétek, és melyek világosak. Emiatt a szimmetria miatt nem kellett a negatív hologramokról pozitív másolatot készíteni.

Egy elviselhető minőségű hologram létrehozása előtt tehát számtalan próbát kellett elvégezni. A ket-

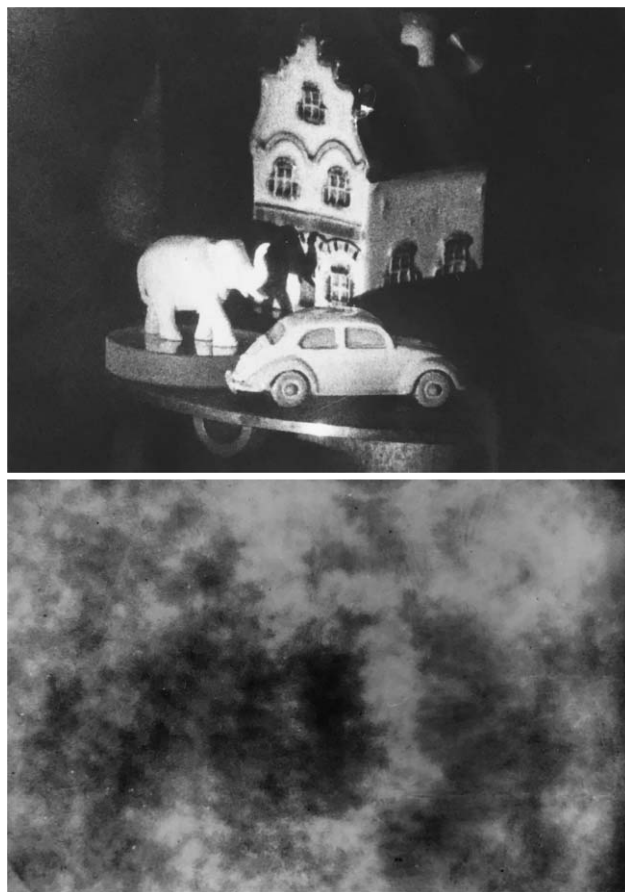
téoszott és önmagával a fotolemezen interferáló lézerfény volt a tipikus kalibrációs felvételek tárgya, ahol a fénysugarak találkozási szögével lehetett a vonalsűrűséget változtatni, azaz a fotolemez tényleges felbontását ellenőrizni, no és az expozíciós időt is széles skálán kellett változtatni. Csak az előhívott lemezek diffrakciós képeinek alapos vizsgálatával tudtuk megtalálni az optimumot. Tipikus esetekben a mérések végére (sokszor már előbb is) elfogytak a rendelkezésre álló fotolemezek, s a következő rendelésre – főleg itthon, távol a devizás gyártóktól, sok-sok hónap múlva – már egyáltalán nem biztos, hogy a korábbival azonos tulajdonságú fotoanyagot kaptunk. Amikor a holografálás világszerte kezdett elterjedni, a nagy gyártók már kifejezetten e célra kifejlesztett lemezek gyártásába kezdtek, ez nagyon leegyszerűsítette a munkát.

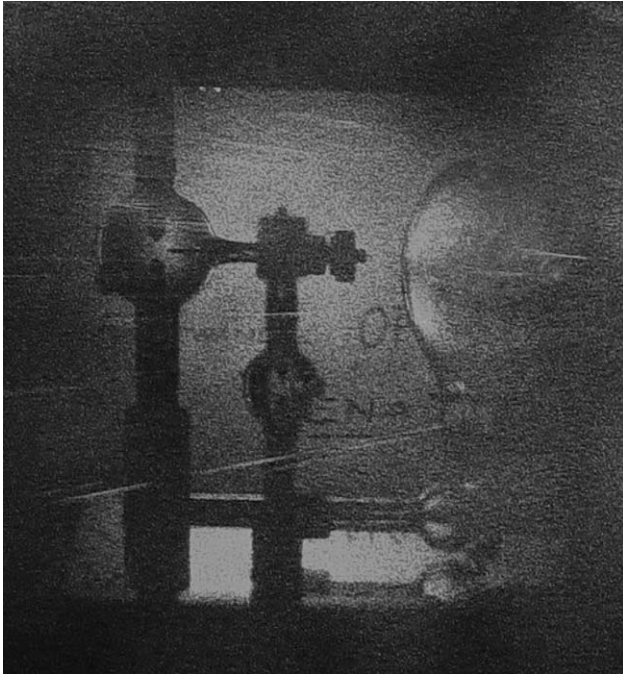
Körülbelül így nézett ki a hologramkészítés az 1960-as években.

## Az első magyar lézeres hologramok

A lézerek megalkotása után néhány évvel, 1967-ben, egymástól teljesen függetlenül Jánossy Mihály, kollégái – köztük Tóth József – közreműködésével a KFKI-ban (2. ábra), valamint Sörlei Zsuzsa és a szerző –

2. ábra. Jánossy Mihály (KFKI) klasszikus hologramja 1967-ből fölül, alatta e hologram diffrakciós rácsa.





3. ábra. Sörlei Zsuzsa, Peter Zollner és Horváth Zoltán (Abbeanum, Jena) hologramja ugyancsak 1967-ből.

még egyetemistaként, egy úgynevezett: nyári gyakorlaton – a jénai Abbeanumban (Institute für Angewandte Optik) Peter Zollner vezetésével készítették az első magyar hologramokat (3. ábra).

A makettházikót, kisautót, elefántot, valamint a kis lámpácskák közvetlen és tükörképeit is egyszerre térben, három dimenzióban láttatni képes lemezek az akkori, igen népszerű hazai lézeres tudományos ismeretterjesztő (TIT) előadások bemutató részének slágerlemei voltak.

Egy „koszosnak” látszó üvegdarabkát lézerral megvilágítva, a bemutatókon résztvevők sejteni vélték, hogy valami fura, korábban elképzelhetetlen látvány tárul a szemük elé. Fontos megjegyezni, hogy a klasszikus hologramok élvezetéhez – a technika mellett – nagy szükség volt a megfigyelő emberek nagy vizuális fantáziájára is. Majdnem akkorára, mint ami egy síkbeli fénykép és a háromdimenziós valóság hasonlóságának elfogadásakor szükségeltetik. Gondoljuk csak meg, hogy tényleg köze van-e egy papíron vagy képernyőn lévő fekete-fehér vagy színes pontok, foltok halmazának az eredetileg látott teljes valósághoz? A rajzot, fényképet, televíziót már megszoktuk.

A hologramnál lebegett valami a semmiben, és egy kis mozgatásra más és más, korábban esetleg takarásban lévő részletek is láthatóvá váltak. Az addig ismert háromdimenziós, két képet kissé más irányból (a két szem távolságából) láttató eszközökhöz és „kacsintós” 3D-s képsíkokhoz szokott szemeknek a „mögé látás” lehetősége nem kis megdöbbenést okozott. Néhány hologram olyan látványt nyújtott, amely már nem csak a lemezen túl – mint egy ablakon átnézve –, de előtte is megjelenhetett a „kézzel fogható semmiben”.

Még azt is meg lehetett csinálni, hogy a lemez egy részét letakarva, továbbra is észlehető volt a teljes látvány. Mindent „tudott”, amit akkoriban a holográfiáról tanítottak: térbeli jelenség. A „kép” – a megszo- kott fényképekkel ellentétben – nincs lokalizálva a lemezen, azaz a hologram töredéke is tartalmazza a teljes információt. A páros esküvői fényképeket szokás a váláskor félbevágni. Az esküvői hologramok elvesztették ezt a néha hasznos funkciót. Azokat már nem lehet kettétörni, illetve lehet, de mindkettőn továbbra is rajta maradnak a szereplők.

Az akkoriban még nagyon híres csillebérci Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) volt a hazai lézer- kutatás és fejlesztés központja. Természetes, hogy itt készültek az első magyar hélium-neon lézerek is. Sorra jelentkeztek az egyetemek, főiskolák, hogy léze- rekhez szeretnének jutni. Számos, a koherens fény- forrásokkal egyszerűen elvégezhető precíz mérés mellett, lassan-lassan a hologramkészítés is részévé vált a fizikai oktatás optikai gyakorlatainak. Ennek köszönhetően, a ma aktív fizikusok és fizikatanár- generációk számára kedves vagy épp kínos, nosztal- gikus emlékeket ébreszthet a „lötykölős” (előhívás, mosás fixálás) holográfia őskora.

## Holografikus adatrögzítés

A holográfiával foglalkozó kutatókat a 3D-s rögzítés és megjelenítés mellett, a fénytérrogzítés új techniká- jában rejlő különleges lehetőségek tudományos alap- jai és azok alkalmazásai is érdekelték. A holográfia elvében rejlő különleges, speciális lehetőségek zömé- ről vajmi keveset tudnak az emberek. Azt még sokan tanulták, hogy a hologramok egyik változatánál az információ az egész lemezen „szét van kenve”. Nem lokalizált egy-egy képpontra, mint az a fényképeknél természetes.

Valóban, a részben letakart hologramon is a teljes valóságot láthatjuk. Talán csak annyi az eltérés, hogy egy teljes hologram olyan, mintha egy hologram mé- retű ablaküvegen néznénk keresztül, a részben leta- kart hologram pedig közel ugyanazt a látványt produ- kálja, egy kulcslyukon kukucskálishoz hasonló mó- don. Kicsit közelebb kell hozzá mennünk, és mindent láthatunk, csak természetesen csökkentett felbontás- sal. Mindez persze nem minden hologramra igaz. (Ké- sőbb megszülettek az optikai eszközök – tükör, len- cse – által leképezett tárgyról készített „image”, azaz képsík-hologramok is, amelyeknél ez a jelenség ter- mészetesen nem léphet fel.) Az információ szétkenhe- tőségének – akkori elképzeléseink szerint – alapve- tően módosítania kellett volna az adatrögzítés korábbi technikáját. A biteket, a különféle adattárolók egy-egy pontján szokás rögzíteni, de ezek sérülhetnek, hisz még a legszebben írt kódexre vagy házi feladatra is rácsöppenhetett egy tintapaca. Bármilyen lokális hiba az adott információ sérülésével, általában elvesztésé- vel jár. Ha holografikusan rögzítjük az adatokat, loká- lis hibák esetén nem kell adatvesztéstől tartanunk,

hiszen az szét van kenve a teljes adatlemezen. Az akár  $100 \times 100$ -as mátrixokba (lapokra) is elrendezhető információk gyors holografikus rögzítése és kiolvasása csodás távlatokat sejtetett.

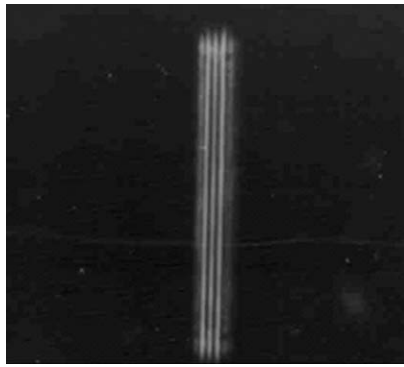
Az 1960-as évek vége, 70-esek eleje az egyre újabb, gyorsabb, nagyobb sűrűséget megengedő adatrögzítési eljárások kutatásának korszaka volt. Akik még emlékeznek a szocialista országok KGST-s munkamegosztására, talán azt is tudhatják, hogy a szocialista országokban hazánk – azon belül is főleg a Központi Fizikai Kutató Intézet – reszortja volt a számítógépek távlati memórialehetőségeinek kutatása. A mágneses, huzal, buborék, optikai, magnetooptikai kombinált folyamatok adatrögzítési lehetőségei közül az akkori Fizikai Optika Laboratórium munkatársai a bitenkénti és az esetleges holográfián alapuló optikai memóriákkal is foglalkoztak.

Hologramkészítéshez lézerekre volt szükség, de a kiolvasáshoz – elvben – már az egyszínű, inkoherens források is megfeleltek. Ez szinte azonnal a csak olvasható (read only) memóriák kategóriájára redukálta a lehetőségeket. A gyártóknál még feltételezhetők a lézerek meglétét, de a felhasználóknál akkoriban ez elképzelhetetlennek tűnt. (Az élet ezt egy-két évtized múlva alaposan megcáfolta, de a CD/DVD-kbe épített lézerek még ma is alkalmatlanok holografálásra.)

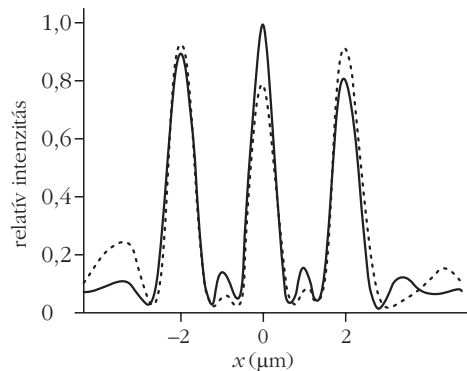
Kiss Gábor, Varga Péter, szovjet kutatók és Ákos György közös munkái világossá tették, hogy a sík lemezekon holografikusan tárolt adatsűrűség megegyezhet ugyan a pontonkénti optikai rögzítés sűrűségével, de a különféle lencsehibák, és a hologramok, források és detektorok fényhullámhossz-precizitású kölcsönös pozicionálása komoly műszaki problémát okoz, illetve jelentős adatvesztést jelenthet [3].

Az közismert, hogy a hologramlemez rögzítési felbontása mikrométer alatti, de az akkor még csak elvben volt triviális, hogy ez a felbontás a rögzített képeken is elérhető. Bányász István – részben Varga Péter irányítása mellett – mikronnál jobb felbontást ért el He-Ne lézerrel, mikroszkopikus tárgyak rekonstruált képein [6] (4. ábra).

A sok szép eredmény ellenére az eltelt idő bebizonyította, hogy ezidáig nem a holografikus adatrögzítés lett a nyerő. Pedig az optikai adatrögzítés és a szintén optikai holográfia szerencsés párosításnak tűnt. Az 1950-es, 60-as években szokásos néhány bit/cm<sup>2</sup>-es adatsűrűséghez képest a fényel elérhető 1-2 mikrométeres, sőt kisebb pontok sok nagyságrendes adatsűrűség-növekedést ígértek, és bizonyítottak is később a CD-k, majd DVD-k esetén. Az extrém precizitást igénylő holografikus adatrögzítést és kiolvasást nem sikerült üzletileg sikeressé tenni.



4. ábra. Egy háromelemű 1:1 kitöltésű Ronchi-rács egy mikron szélességű rekonstruált holografikus képének mikrofotója (balra) és mozgó részen kiemezett denzitása (jobbra).



## Tudományos holografikus „photoshopok”

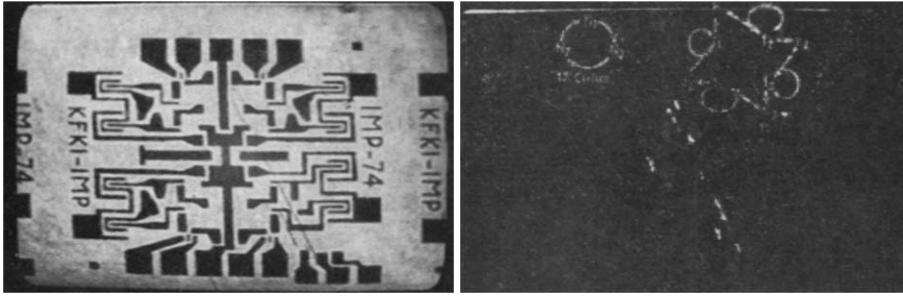
A fényképezésnél szinte a kezdetek óta megszokott volt a képek manipulálása, összeadása, kivonása, torzítása vagy éppen szépitgetése. Ez egyaránt történt és történik ma is művészi, szépészeti vagy éppen tudományos, esetleg mérés-technikai célokból. A photoshoppal és társaikkal manipulált képeknek lassan semmi közük a valósághoz. A valóságot rögzítő hologramok tudományos manipulálása – a „holoshop” – viszont sok műszaki és technikai érdekességet tartogat.

Itt nem csak a képekkel, hanem magukkal a fényterekkel is elvégezhetőek – erős egyszerűsítéssel – matematikai műveletek, például „összeadhatók” és „kivonhatók” egymásból. Számptalan kombinációban egy vagy több „valóság” és azok hologramjai között végezhetünk alap, de akár a szelektív asszociációit is súroló műveleteket.

Az „optikai számítások” eredménye tipikusan egy kép, ami kivonáskor például csak az eltéréseket mutatja. Azok és csak azok észlelhetők. Az eredmény első pillantásra „üvölt”, ha valahol valami eltérés van. A hologramokon a fényhullámhossz nagyságrendje, azaz mikrométer körüli is lehet a felbontás a teljes képen, amit korábban csak a mikroszkopikus felvételeknél remélhettünk. Az ultragyors, igen intenzív megvilágító lézerimpulzusok használhatósága pedig olyan további lehetőségeket teremtett, amelyek más formában ugyan, de messze túlszárnyalták a klasszikus fényképezés lehetőségeit.

Az integrált áramkörök gyártásánál használt levilágító és párologtató maszkok nagy precizitású bonyolult ábrákat tartalmaznak. A folyamatos gyártósori használat során ezek sérülhetnek, eltömődhetnek, ami miatt selejtes termékek sokasága keletkezhet. Hihetetlenül hosszú időt vesz igénybe ezek folyamatos, alapos, egyedi, pontonkénti ellenőrzése. Ekkor merült fel a maszkok ábráinak gyors, holografikus vizsgálati lehetősége. A KFKI-ban Bencze György és Hámori András foglalkozott a megközelítőleg két-dimenziós, lényegében sík tárgyak holografikus kivonással történő ellenőrzési problémájával [4].

Folytonos lézerekkel végezték a mesterhologram és az aktuális maszkok összehasonlítását. Megoldásuk azonnal jelezni tudta, ha a maszk megsérült, eltö-



5. ábra. Karchibás fotomaszk, és annak a mesterből holografikus kivonással készült hibaképe.

mődött, azaz bármiben is eltért az eredeti, standard állapottól (5. ábra).

Az interferencia a klasszikus optika egyik legfontosabb jelensége. Az interferométerekkel végzett alpmérések – főleg a lézerek megjelenése után – szerves részét képezték az optikai mérés technika oktatásának. Ennek a holográfiára kiterjesztett változataként született a holografikus interferometria.

A hologram – korrekt felvétel esetén –, mint említettük, hullámhossz pontossággal rögzíti a felvétel tárgyait. Ha – például – ugyanarról a tárgyról két hologramot készítünk egyetlen fotolemezre, és időközben semmi nem változik, „normális” (kétszeres, esetleg túlexponált) fényteret rekonstruálhatunk. Viszont akkor, amikor a fényforrás koherenciahossza által megengedett tartományon belül bármi, minimális változás is bekövetkezik időközben, az eltérés interferenciacsíkok formájában észlelhető a rekonstrukció során. Lényegében ez a holografikus interferometria alapötlete. Az éppen aktuális feladatok célszerű megoldása a mester és a vele névlegesen azonos tárgyak, azok hologramjai összehasonlításának számtalan kombinációját hívták életre. Ennek részletei például [5]-ben magyarul is megtalálhatók.

A Budapesti Műszaki Egyetem Fizika Tanszékén már a kezdetektől fogva az analóg holográfia lehetséges műszaki, mérés technikai alkalmazásainak kutatására koncentráltak. A digitális holográfia színrelépését (1995) követően a korábbi módszerek, eljárások alkalmazása új lehetőségeket és kihívásokat teremtett számukra, ennek bemutatása azonban már túlmutat a jelen cikkben tárgyalt korszakon.

Füzessy Zoltán és munkatársai a holografikus interferometria szinte teljes spektrumát művelték, oktatták és kutatták.

Hordozható rubinlézeres holografikus interferometriai mérőrendszert fejlesztettek ki, amellyel már nem csak laboratóriumban, de a megrendelő cégek, elsősorban szerszámgyárak telephelyein is képesek voltak felvételeket készíteni. A mérőrendszerrel háromdimenziós elmozdulások (deformáció, rezgés) vizsgálhatók; az interferogramok számszerű kiértékelését számítógép segítette. A 30–1500 mJ között változtatható energiájú megvilágító piros lézeryfény széles tartományban biztosította az optimális expozíciós értékek beállítását. A kereken 1 m-es koherenciahossz nagyobb méretű tárgyak (néhány m<sup>2</sup>) vizsgálatára is lehetőséget nyújtott. A körülbelül 20 ns-os impulzushossz pedig lehetővé tette

egyrészt a minták nagyon gyors változásainak detektálását, másrészt hologramok készítését zajos környezetben (gyári helyszínek) is. A készülék robusztus tömege ugyan nehezítette a szállítást, de kiválóan biztosította az interferometriai mérésekhez szükséges mechanikai stabilitást. A rendszer létrehozása mások mellett Ádám Antal, Bogár

István, Füzessy Zoltán és Szarvas Gábor kiemelkedő munkájának gyümölcse.

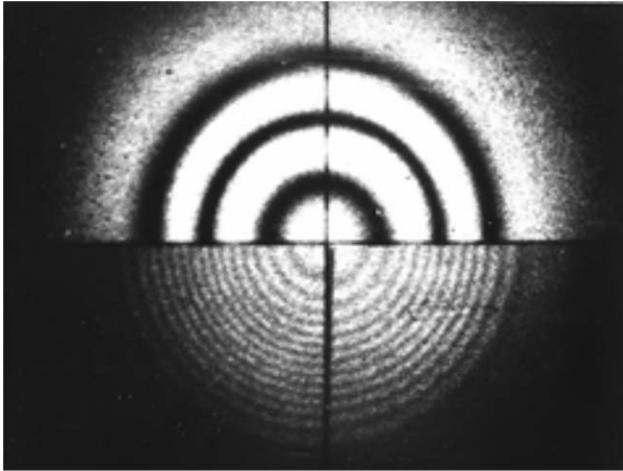
A mérések mérnöki szempontból legfontosabb célja és eredménye a különféle gépek, gépalkatrészek mechanikus terhelés vagy hő hatására bekövetkező deformációjának, rezgésének tanulmányozása volt. Ezt korábban kizárólag csak a polarizációt a mechanikus feszültségtől függően fordító, átlátszó mesterséges kis-minta-modelleken lehetett elvégezni (polarimetria). A holografikus interferometriai felvételek már az eredeti, valós szerkezeti anyagokból készültek, nagyobb méretű, háromdimenziós minták felületi változásait is láthatóvá tették. Ezzel a berendezéssel akár az üzemelő szerszámgépek, autómotorok és -karosszériák rezgéseit, deformációját is vizsgálni tudták. A 6. ábrán autókarosszéria rezgését tükröző csíkrendszer látható. Az interferenciacsíkok az azonos értékű rezgési amplitúdó mértani helyei. A felvétel adott motorfordulatszámú és szimulált útviszonyok mellett készült görgős vizsgálópadra helyezett gépkocsi jobb oldaláról.

A holografikus interferometria technikájának fejlesztésével, több hullámhosszon végzett mérésekkel sikeresen megoldották a képeken megjelenő csíkrendszer kalibrálását, ami a mechanikus változások mértékét, sebességét és irányát nem csak látványosan demonstrálta, de mérnöki pontossággal dokumentálta is.

A fenti holografikus interferometriai alkalmazásokban adott tárgy két állapot közötti különbséget határozták meg. Füzessy Zoltán és Gyimesi Ferenc megmutatták, hogy két különböző tárgy viselkedése opti-

6. ábra. A gépkocsiszekrény két ajtaján kialakuló rezgéseket tükröző interferenciakép.





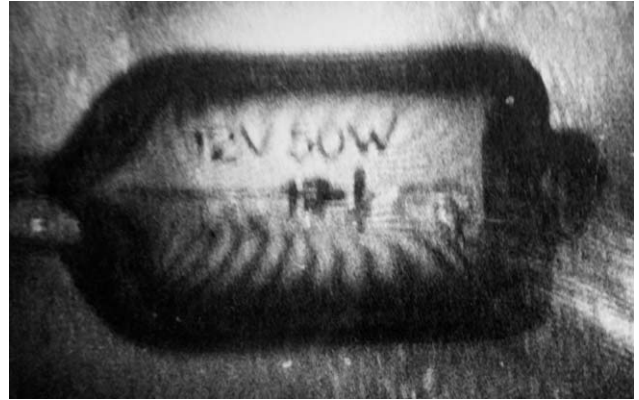
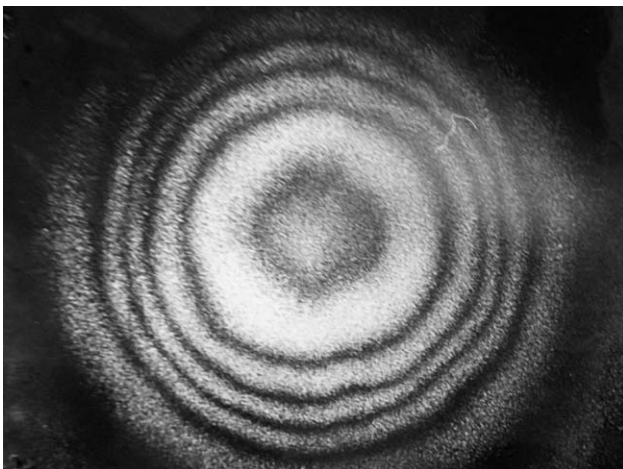
7. ábra. Két nyomásedényfenék különböző nyomásokhoz tartozó deformációjának összehasonlító mérése. A képen egyszerre figyelhető meg a mester- (bal alsó negyed), a teszt- (felső fél) és a különbségi interferogram (jobb alsó negyed) egy-egy része.

kai úton közvetlenül is összehasonlítható. Ezt szemlélteti a 7. ábra, ahol a csíkok két nyomásedényfenék (mester és teszt) deformációját és a deformációk különbségét tükröző csíkrendszerek részei láthatók: mester- (bal alsó negyed, 15 csík), teszt- (felső fél, 3 csík), a két fenékdeformáció különbségét kijelző különbségi interferogram (jobb alsó negyed, 12 csík) [5].

A KFKI-ban kifejlesztett, hatalmas pillanatnyi fényintenzitás-sűrűséget biztosító, kellő koherenciahosszal rendelkező, egymódusú impulzus rubinlézer már az erős fényt kibocsátó, azaz önmagukban fénylő „minták” holografikus vizsgálatára is lehetőséget teremtett. Ennek tipikus példái azok a *Bakos József*, *Szigeti János* és *Sörlei Zsuzsa* által készített holografikus interferometrikus felvételek, amelyek például egy világító autóizzóbúra alakjának, és a benne lévő gáz törésmutatójának a hőmérséklet növekedése miatt bekövetkezett változását is képesek voltak kimutatni (8. ábra).

Akkoriban csúcsteljesítménynek számított, hogy ugyanők az impulzuslézerrel levegőben keltett forró

9. ábra. Impulzuslézerrel levegőben keltett forró, fényes plazma szétrepülésének néhány nanoszekundumos felbontással készült interferometrikus hologramja.



8. ábra. Egy világító autóizzó két lézerimpulzussal exponált hologramja.

és fényes lézerplazmák nanoszekundumos időskálán lezajló szétrobbanásának folyamatát is láthatóvá tették úgy, hogy a plazmát keltő lézerimpulzus egy kis részét késleltetve használták a plazma interferometrikus hologramjának elkészítésére (9. ábra).

A számítástechnika fejlődésével és a digitális kép- rögzítés megjelenésével új korszak kezdődött nem csak a fényképezésben, de a holográfiában is. Ez a korszak is sok érdekes és fontos tudományos eredménnyel gazdagította a hazai holografikus kutatások történetét, ami – remélem – még a 100 éves évforduló előtt olvasható lesz a *Fizikai Szemlében*. Az ősholográfia látványos részével viszont talán már a következő számban találkozhat az érdeklődő olvasó.

Munkám során, sokszor terjedelmi okokból, de néha esetleg trehányáságból, az általános történelemírás szokásos receptjeit követtem. A történészek is csak emlékeztetik, és az általuk önkényesen választott források alapján dolgoznak. Jobbára csak az uralkodókat, no meg a győztes vagy vesztes csaták vezetőit szokták megemlíteni. A terhek zömét viselő emberek, harcosok milliói névtelenek. A holográfia (főleg) kutatási részében, szinte mindenütt nagy szaktudású munkatársakból álló teamek végeztek a munkát. Sok, itt nem említett kolléga vett részt a fenti eredmények elérésében, akiknek ezúton is köszönetet mondok, hisz nélkülük nem nagyon lett volna miről írnom. Köszönetet szeretnék mondani továbbá sokak mellett, az úttörők közül Füzesy Zoltánnak, Hámori Andrásnak és Sörlei Zsuzsának, akik kiemelkedő segítséget nyújtottak a cikk elkészítéséhez.

#### Irodalom

1. Gábor Dénes: Holográfia, 1948–1971. *Fizikai Szemle* 50 (2000) 181., <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0006/gdenes.html>
2. Jánossy Mihály: Holográfia. *Fizikai Szemle* 18 (1968) 268–271.
3. Gy. Ákos, G. Kiss, P. Varga: Effect of lens aberrations on the storage capacity of holographic memories. *Optics Communications* 20 (1977) 63–67.
4. Bencze György, Hámori András: Holografikus kivonás alkalmazása integrált áramkörök fotomaszkjainak ellenőrzésére. *Fizikai Szemle* 29/7 (1979) 248.
5. Füzesy Zoltán: *Optikai holográfia és holografikus interferometria*. Nemzedékek Tudása Tankönyvkiadó Zrt., Budapest, 2014.
6. Bányász István: Tökéletlen holográfia – a rögzítőanyag nemlineáritásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre. *Fizikai Szemle* 67 (2017) 255–259.