

A HOLOGRÁFIA

I. Gábor Dénes – életút

1900. június 5-én, Budapesten született Gábor Dénes (Dennis Gabor, született Günszberg) zsidó családban. Természet tudós, villamosmérnök, Nobel-díjas feltaláló volt. A Royal Society rendes (1956), a Magyar Tudományos Akadémia tiszteletbeli tagja (1964), a Brit Birodalmi Rend lovagja (1970), a National Academy of Sciences (USA) külső tagja (1970), a southamptoni (1970), a delfti (1971), a surrey-i (1972), a city-i (1972), a londoni (1973) és a columbiai (1975) egyetemek díszdoktora.

Gyermekként egy családi kirándulás során ellátogatott a müncheni Deutches Museumba, itt szeretett bele a fizikába. 10 éves korában jelentette be első szabadalmát, az aeroplán-körhintát. Gábor Dénes útja a budapesti Szemere utcai elemi iskolából az V. kerületi Markó utcában található magyar királyi Állami Főreál Gimnáziumba vezetett, ahol Frank János fizikatanár kísérletei az atomok világa és az elektronok viselkedése felé irányították érdeklődését. A Főreál Gimnázium abban az időben Budapest legjobb iskolái közé tartozott. Itt tanult egykor a feltaláló Bánki Donát, majd az író Karinthy Frigyes és a festő Szőnyi István is. Gábor Dénes az intézmény Matematikai és Természet tudományi Körének ifjúsági elnökeként is tevékenykedett, és osztálytársa volt a golyóstollat feltaláló Bíró László József.

1918-ban érettségizett, ezt követően pedig azonnal behívták katonának. Az észak-itáliai fegyverszünet után tért haza. 1918 őszétől a Királyi József Műegyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója lett, ahol tanára volt tanára volt Kürschák József matematikus, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja, Rejtő Sándor professzor, aki az első gépészmérnöki oklevelet kapta a Műegyetemen, K. Jónás Ödön, aki a Műegyetem első gépészmérnök rektora volt, és Pfeifer Ignác, aki 1922-től a Tungsram kutatólaboratóriumának vezetője lett.

Gábor Dénes 1920-tól tanulmányait a berlin-charlottenburgi Technische Hochschule-n folytatta, ahol 1924-ben elektromérnöki diplomát, majd doktori fokozatot szerzett, erősáramú szakirányon. Itt rendszeresen látogatta a tudományegyetem előadásait, többek között Albert Einstein szemináriumát, mely Szilárd Leó kezdeményezésére jött létre. Az előadásokra meghívást kapott Wigner Jenő és Neumann János is. Később a magyar baráti kör Polányi Mihályal és Köszler Artúrral bővült.

Az 1920-as években a nagyfeszültségű hálózatok üzemében fellépő tranziens jelenségek sok problémát okoztak, de a vizsgálatukhoz sem módszerek, sem eszközök nem álltak rendelkezésre. 1927-ben Gábor Dénes disszertációjában a tranziens jelenségek rögzítése érdekében az oszcillográf érzékenységének növelését dolgozta ki. Doktori értekezését a katódsugárcsőről írta. 1927 és 1932 között Siemensstadtban, a Siemens és Halske kutatólaboratóriumában mint kutatómérnök a nagyfeszültségű távvezetéseket tervezett, 1932–1933-ban pedig Erlangenben, a Siemens-Reiniger-Veifa nevű cégnél dolgozott. 1933-ban, a náci hatalomátvétel után elhagyta Németországot és hazatért Magyarországra. Budapesten az Egyesült Izzó (Tungsram) kutatója lett és a gázkisülés fizikájával, plazmajelenségekkel foglalkozott, és eredményes plazmalámpa kísérleteket végzett. Korábbi tudományos, de mondhatni emberi kapcsolata is elmélyült Polányi Mihályal, Selényi Pállal és Bródy Imrével.

1934-ben Angliába költözött. 1934-től 1948-ig a British Thomson-Houston Társaság kutatólaboratóriumában dolgozott Rugbyben. 1937-től érdeklődése fokozatosan az elektronoptika felé fordult, és információelmélettel is foglalkozott. Kutatási eredményeit a két kiadást megért *Az elektronmikroszkóp* című könyvében összegezte.

1936. augusztus 8-án feleségül vette Marjorie Louise Butlert, akivel haláláig harmonikus házasságban élt, gyermekük nem született. 1942. október 25-én Budapesten meghalt édesapja. 1946-ban édesanyja hozzá és testvéréhez költözött Angliába.

Gábor Dénes 1947-ben találta fel a holográfiát, amiért később, 1971-ben fizikai Nobel-díjat kapott. A holográfia azonban 1960-ig, a lézer feltalálásáig nem terjedt el.

1947 és 1958 között a londoni Imperial College (londoni Műszaki Egyetem) tanára volt, ahol elektronoptikát tanított. 1956-ban a Royal Society a tagjává választotta. 1958-tól 1967-ig az alkalmazott elektronfizika professzora volt az Imperial College-ban. Ezekben az években szerkesztett egy Wilson-féle ködkamrát, és abban a részecskék sebessége is mérhető volt. Alkotott holográfiai mikroszkópot, univerzális analóg számítógépet, lapos, színes tévéképcsövet és egy új típusú termionikus átalakítót. 1952-ben már kész elgondolása volt egy sima, lapos televíziós képcsőről – fekete és színes változatban. Mindemellett az emberi kommunikációt és a hallást is tanulmányozta.

1958-tól egyre jobban foglalkoztatta az ipari civilizációnk jövője. Meggyőződése volt, hogy a technológia és a társadalmi intézményeink között komoly ellentmondás alakult ki, és a tudósoknak a társadalmi találmányokat kell elsődlegesnek tekinteni. Vizsgálta az egyéni és a társadalmi fejlődésnek a fejlett technológia korszakában való lehetőségeit, és vallotta, hogy a jövő kulcskérdése a tudásalapú társadalom megalkotása, az információs társadalom kimunkálása. A témának több könyvet is szentelt, ezek közül a leghíresebb az 1963-ban megjelent *A jövőnk feltalálása* című kötet. Ennek alap gondolata szinte szállóigévé vált: „A jövőt nem lehet előre megjósolni, de a jövőnket fel lehet találni.”

1962-ben látogatott haza Magyarországra. 1964-ben lett a Magyar Tudományos Akadémia tiszteletbeli tagja. 1967-ben nyugalomba vonult, de nyugdíjasként is járta a világot, mint előadó és vendégprofesszor, nagy figyelmet fordítva a társadalmi és környezetvédelmi kérdésekre is. 1968-ban részt vett a Római Klub elnevezésű nemzetközi csoportosulás alapításában, melynek célja az emberiség jövőjéről és globális kérdésekről való közös gondolkodás, beleértve a világgazdasági rendszert, a környezet állapotát és például a klímaváltozást is.

1971-ben kapta meg a fizikai Nobel-díjat „a holográfiai módszer felfedezéséért és fejlesztéséhez való hozzájárulásáért”. A díj rangját még az is emelte, hogy akkoriban már ritkaságnak számított, hogy valaki egyedül, azaz nem másokkal megosztva kapja ezt a különleges kitüntetést. 1974-ben súlyos agyvérzést szenvedett. Betegágya sem zárta el kapcsolatát a külvilággal. 1977-ben meglátogatta a New Yorkban alapított Holográfia Múzeumot, ahol ő volt a 1. számú tag. 1979. február 9-én hunyt el Londonban.

I. Gábor Dénes – a holográfia története

A holográfia feltalálásához az elektronoptikai leképezés tudományos vizsgálata vezette. 25 évesen már 60 kV működő oszcilloszkópot épített, megalkotta az elektronmikroszkóphoz szükséges elektronlencsét, amelynek elvét azóta is használják. Szilárd Leóval vitatkoztak az elektronmikroszkóp megépítésének lehetőségéről és nem utolsósorban tévéképernyők javításával is foglalkozott. Gábor Dénes elektronhullámokkal dolgozott, és módszerét az elektronmikroszkópos képek felbontóképességének tökéletesítésére használta. Az *elektronmikroszkóp* című könyvében (1944) az optikai lencsék aberrációját elemezte, és felvillantotta a különféle atomok „látásának” lehetőségét.

A holográfia feltalálásához az elektronoptikai leképezés tudományos vizsgálata vezette, ugyanis felismerte, hogy ha egy tárgyról visszavert hullámok intenzitását, fázisát és amplitúdóját is felhasználhatja, akkor a tárgyról teljes (holo) és térbeli (graf) kép nyerhető.

Emmett N. Leith és Juris Upatnieks 1962-63-ban egy lépéssel tovább fejlesztette Gábor Dénes holográfia-eljárását. Míg ő elektronhullámokkal dolgozott, addig a michigani egyetem két professzora a lézert hívta segítségül a hologramok elkészítéséhez. Ilyen a csúcslézerekről Gábor Dénes még nem is álmodhatott 1947 és 1952. között. Munkája akkor talán leginkább bátor, ám zseniális jövőbe tekintés volt. Gyakorlatilag 10-15 évig majdnem csend volt a hologram körül.

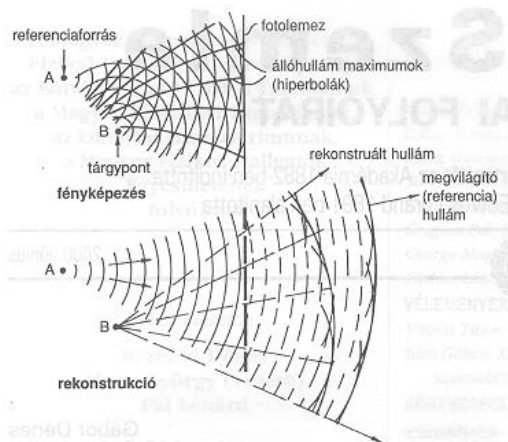
A holográfia a fény hullámtermészetén alapul, amit először Thomas Young demonstrált meggyőzően 1801-ben, egy csodálatosan egyszerű kísérlettel. Young már tudta, hogy egy monokromatikus fény szabályos szinuszos rezgést jelent egy közegben, amelyet az időtájt éternek hívtak. Ha ez így van, akkor lehetséges, hogy több fényt kapunk, ha hullámhegyhez hullámhegyet; és sötétséget, ha hullámhegyhez hullámvölgyet adunk.

Másfél évszázaddal később, Gábor Dénes már az elektronhullámok és az elektronmikroszkópia érdekelte, ugyanis a cél az atomok vizsgálata volt. E nagyszerű készülék abban az időben a legjobb fénymikroszkópénál százszor jobb felbontást adott, ami mégis kiábrándító volt, mert megállt kevéssel az atomrácsok felbontása előtt. Az elméleti határt akkoriban 0,4 nm.

Egy leképező rendszer felbontási határa az a legkisebb d távolság, amely távolságra elhelyezkedő tárgyponatok még különálló képpontokként képződnek le (az emberi szem feloldási határa 0,1 mm). Abbe-képlet: $d = 0,61 \cdot \frac{\lambda_v}{n \cdot \sin \theta}$ ($n \cdot \sin \theta$ numerikus apertúra, d felbontási határ).

Elvileg (az egyenletből következően) két lehetőség van: Egyik a megvilágító sugárzás hullámhosszának csökkentése, a másik a numerikus apertúra növelése. Az optikai mikroszkópok felbontása 200 nm-re vagy annál nagyobb értékre korlátozódik a fény diffrakciós határa miatt. Fény hullámhossza 400-750 nm. Az elektronhullám frekvenciája és hullámhossza a de Borglie-összefüggésből állapítható meg ($\lambda = h/p$, közeli a röntgenhez 10^{-9} m).

A problémán való hosszas tűnődés után 1947-ben egy szép húsvéti napon (egy teniszmeccs nézése közben) hirtelen rájött Gábor Dénes a megoldásra. Készíteni kell egy rossz elektronképet, ami viszont tartalmazza a teljes információt, és amit aztán optikai eszközökkel korrigálni lehet. Világos volt számára, hogy ha ez egyáltalán lehetséges, akkor csak koherens elektronnyalábokkal valósítható meg, olyan elektronhullámokkal, amelyek határozott fázissal rendelkeznek. A közönséges fénykép teljesen elveszíti a fázist, csak az intenzitásokat rögzíti. De ne csodálkozzunk azon, hogy elveszítjük a fázist, ha nincs mihez hasonlítanunk! Lássuk, mi történik, ha egy etalont, vagyis egy "koherens háttér" adunk hozzá! A tárgyhullám és a koherenshátér, vagy "referenciahullám" ekkor interferenciacsíkokat hoz létre. Maximumok jelentkeznek mindenhol, ahol a két hullám fázisa megegyezik. Ebből megszületett a rekonstruált-hullámfront elektronmikroszkópos terv (kétlépéses eljárás). Az elektronmikroszkóp arra kellett, hogy interferenciaképet hozzon létre a tárgyhullám és a koherenshátér (azaz a megvilágító hullám nem-diffraktált része) között. A hologramot ezután fényvel rekonstruálta, olyan optikai módszerrel, ami korrigálta az elektronoptika aberrációit.



2. ábra. A holográfia alapeelve, 1947.

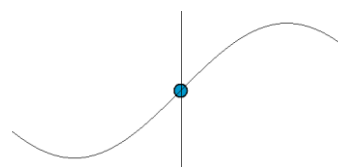
1947-ben Rugbyben, Angliában dolgozott a British Thomson-Houston Company kísérleti laboratóriumában. Szerencse, hogy a holográfia ötlete az elektronmikroszkópián keresztül jött, mert ha csak optikai holográfiára gondolt volna, a kutatási igazgató, L.J. Davies, kifogásolhatta volna, hogy a BTH társaság elektronikai cég, és nem foglalkozik optikai kérdésekkel. De mivel testvércég, a Metropolitan Vickers készített elektronmikroszkópokat, engedélyt kapott néhány optikai kísérlet végrehajtására. A koherencia és intenzitás közti legjobb kompromisszumot nagynyomású higanylámpa nyújtotta, amelynek koherenciahossza csak 0,1 mm volt, körülbelül 200 interferenciacsíkra elegendő. Térbeli koherencia eléréséhez viszont egyetlen higanyvonallal kellett megvilágítani egy 3 μm -es tűszúrást. Ez körülbelül 1 cm átmérőjű tárgyak hologramjainak elkészítéséhez elegendő fényt adott. Az 1 mm átmérőjű mikrofotók néhány perces expozíciókkal készültek az akkoriban elérhető legérzékenyebb emulzióra. A kis koherenciahossz arra kényszerítette, hogy mindent egy tengelyen helyezzen el. Ez a vonalmenti holográfia volt abban az időben az egyetlen lehetséges eljárás. Távolról sem volt még tökéletes. A véletlen zavarokat okozó zajtól eltekintve a képeken szisztematikus hiba volt, amint az *a* betűk torzulásából látható. A zavar abból a tényből ered, hogy nem egy kép van, hanem kettő. A tárgy minden pontja szekundér gömbhullámot bocsát ki, amely interferál a háttérrel, így Fresnel-zónák cirkuláris rendszerét hozza létre (in-line holográfia). A modern lézerholográfia könnyedén siklott át e nehézségen, felhasználva a lézerfény nagyobb koherenciáját, ami viszont 1948-ban még nem állt rendelkezésre.

Mikor a lézer 1962-ben elérhetővé vált, Leith és Upatnieks rögtön sokkal jobb eredményeket produkálhattak. Kitaláltak egy új, egyszerű és nagyon hatékony módszert a második kép kiküszöbölésére. Ez a "ferde referenciahullám" módszere. Ezt a hélium-neon lézer nagy koherenciahossza tette lehetővé, ami már 1962-ben körülbelül 3000-szeresen felülmúlta a higanylámpáét. Ez lehetővé tette a referenciahullám elkülönítését a

megvilágító hullámtól: ahelyett, hogy keresztülmenne a tárgyon, most megkerülheti. Az eredmény az lett, hogy a két rekonstruált kép nemcsak mélységben, hanem szögben is elkülönült egymástól, a referencianyaláb beesési szögének kétszeresével. A koherens lézerefény intenzitása ráadásul milliószorosan felülmúlta a higanyét. Ez tette lehetővé nagyon finom szemcséjű, alacsony sebességű fotóemulzió használatát és nagy hologramok készítését, ésszerű expozíciós időkkal. Sőt ugyanabban a hologramban több kép is tárolható, ha azok a referencianyaláb különböző helyzetében vannak felvéve. Ez volt az első bizonyítéka a hologramok magasabbrendű tárolóképességének. Leith és Upatnieks hamarosan 12 különböző képet tudott tárolni egyetlen emulzióban. Manapság 100, sőt 300 oldalnyi nyomtatott anyag tárolható. A holográfia természetesen kezdetől fogva háromdimenziós volt, de a korai, kicsi hologramokban ez csak a téren keresztüli fókuszálás segítségével, mikroszkóppal vagy rövid gyújtótávolságú szemlencsével volt látható. Ez azonban nem volt elég a hologram megnagyobbításához. Az is szükséges volt, hogy a fotólemez minden pontja lássa a tárgy minden pontját. A korai, szabályos megvilágítással készült hologramokban az információ kis területen tárolódott, a diffrakciós mintázatban.

II. Középiskola – mechanikai rezgések és hullámok

A mechanikai hullámban a részecskék egy fix pont körül rezegnek, az elektromágneses hullámban az elektromos térerősség- illetve a mágneses térerősségvektor változik periodikusan. A polarizált fény egy egyszerű szinuszos transzverzális haladó hullám. A kék pötty harmonikus rezgőmozgást végez, de nem halad.



Ez a hullám tekinthető különböző fázisban (pillanatnyi állapot, y kitérés) harmonikus rezgőmozgást végző pontok sorának, ahol csak a hullámfront halad, de az egyes részecskék nem. Több hullám esetén (vonalmenti és felületi), ha a hullámtér átfedi egymást a rezgések összegződnek (szuperponálódnak). Ha ez időben tartós mintázatot ad, akkor interferenciáról beszélünk. Két hullám a hullámtérnek azokban a pontjaiban hoz létre maximális erősítést, ahol hullámhegy hullámheggyel és hullámvölgy hullámvölgyvel (sűrűsödés sűrűsödéssel, ritkulás ritkulással) találkozik. Ez azt jelenti, hogy a két hullám azonos fázisban találkozik. Ellentétes fázisú találkozás esetében a hullámok gyengítik, esetleg ki is oltják egymást. De nemcsak a két véglet alakíthat ki interferenciát. A lényeg, hogy a hullámok fáziskülönbsége állandó legyen! Ez a koherencia, ami a fizikában a hullámok olyan tulajdonsága, ami két egymással találkozó hullám közötti viszonyt jellemez. Két azonos frekvenciájú (szigorú feltétel) hullám akkor mondható koherensnek (összetartozónak), ha a találkozásukkor interferenciára képesek, azaz a fáziskülönbségük egy adott helyen időben állandó, vagy nagyon lassan változik.

A diffrakció vagy elhajlás a fizikában egy olyan hullámtani jelenség, mely a hullám terjedése közben következik be, ha a hullámhosszával összemérhető méretű akadállyal találkozik, ilyenkor a hullámok behatolnak az akadály által árnyékolt térbe is.

A Huygens-Fresnel-elv szerinti értelmezés: A hullámtér minden pontja elemi hullámok kiindulópontja. A hullámtérben megfigyelhető későbbi jelenségek ezeknek az elemi hullámoknak az interferenciája miatt jönnek létre. A diffrakció lényegében a sok interferencia eredménye.

Fény is elektromágneses hullám ($c = \lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8$ m/s). Thomas Young fényhullámok tulajdonságát vizsgálta. Ő fedezte fel az interferencia jelenségét, ezzel a fény hullámtermészetének legfőbb bizonyítékát szolgáltatva. Koherens fényhullámok esetén egy fényforrásból induló hullámot féligáteresztő tükörrel kettéosztva, majd a nyalábot egy ernyőn újra egyesítve világos és sötét területeket figyelhetünk meg. A két nyalábkomponens által megtett utak különbségét növelve az interferenciamintázat egyre inkább elmosódik. Amint az útkülönbség egy az adott fényhullámra jellemző értéket meghalad, az ernyőn homogén megvilágítást észlelhetünk. Ez a kritikus útkülönbség az adott fényre jellemző koherenciahossz. Ez a koherenciahossz a holográfia elméletében és gyakorlatában egyaránt fontos mennyiség.

(Két fényforrással azért nem valósíthatunk meg észlelhető tartós interferenciát, mert a fénykibocsátás valójában atomi folyamat, az elemi fényhullámok forrásai az izzószál egyes atomjai. Ezek pedig véletlenszerűen bocsátanak ki egy-egy (néhány centiméter hosszúságú) hullámvonulatot, melyek találkozásakor csak pillanatnyi (kb. 10^{-9} s-ig tartó) interferenciakép alakul ki. Ezért a szemünk csak átlagos megvilágítást érzékel.)

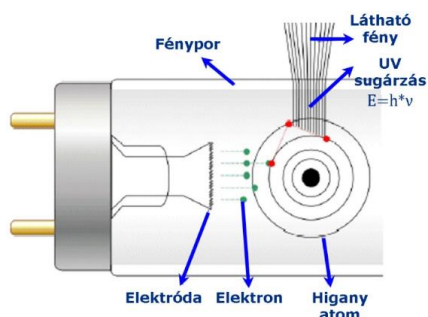
Egyszerű kísérlettel fényinterferencia jelenséget hozhatunk létre. Vegyünk egy fekete kartonlapot, és azon túvel szúrjunk egy nagyon kicsi lyukat! Tartsuk a szemünk elé a lapot, és nézzünk a lyukon át egy izzólámpát! A lyuk körül színes koncentrikus gyűrűket látunk. A jelenséget fényhullámok elhajlásával értelmezhetjük a Huygens-Fresnel-elv alapján. A kartonlapon lévő lyuk minden egyes pontja elemi hullámok forrásának tekinthető. Az ezekből kiinduló elemi gömbhullámok a szemünkben különböző útkülönbséggel találkoznak, így azok erősítik vagy gyengítik egymást. Mivel a fehér fény összetett fény (különböző hullámhosszúságú fényhullámokból áll), ezért az interferencia során különböző irányokban más és más hullámhosszak oltódnak ki, így a maradék fényhullámok összességét színesnek látjuk. A színes olajfoltok jelenségét is a felszínről visszaverődő fény interferenciájával értelmezhetjük. Az olaj felszínére eső fényhullám egy része a felszínről tükrösen visszaverődik. A hullám másik része az olajrétegbe hatolva megtörik, majd a víz (vagy az üveglap) felületéről visszaverődve és az olajból újabb töréssel kilépve párhuzamosan halad az első rész-hullámmal. A két hullámrész között útkülönbség keletkezik, amely adott irányt tekintve állandó, így a nyalábok interferenciára képesek, vagyis koherensek lesznek. Ha az olajréteg elég vékony, akkor a két nyaláb olyan közel halad egymás mellett, hogy a pupillán keresztül mindkettő a szemünkbe jut, és a retinán interferenciát hoz létre. Attól függően, hogy milyen irányba haladnak a fénynyalábok, más és más hullámhosszra teljesül a kioltás vagy gyengítés feltétele, ezért fehér fényből megmaradt komponensek keveréke színes fényt eredményez. Ezért látjuk az olajfoltokat különböző színűeknek, ha más és más irányból nézzük azokat.



Nyilvánvaló, hogy sok interferenciavonal megjelenéséhez a fénynek nagyon monokromatikusnak kell lennie. A fényt vagy más elektromágneses sugárzást akkor nevezünk monokromatikusnak (egyszínű, meghatározott frekvenciájú), ha minden

kvantuma ugyanakkora frekvenciával rezeg. Minél monokromatikusabb a fény, annál nagyobb a koherenciahossza. A közönséges fényforrások koherenciahossza a μm - mm közötti. A lézerek esetén a több km -t is elérheti. A lézerek olyan fényforrások, amelyek igen vékony, nagyon kis széttartású fénynyalábot sugároznak ki, melyben a teljesítménysűrűség igen nagy lehet.

A lézer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) olyan fényforrás, amely indukált emissziót használ egybefüggő fénysugár létrehozására. Legegyszerűbben kifejezve a lézer koherens (állandó frekvenciájú) fénysugár. A lézer működési elve a fény gerjesztésén alapul. Az aktív környezetből energiát pumpálnak a rezonátorba, amiben gerjesztik a rezonátorban jelenlevő elektronokat. Az alapállapotba visszaeső elektronok fotonokat bocsátanak ki, amelyek a rezonátorban további elektronokat gerjesztenek, stimulálnak. A nagy energiájú fotonok a rezonátor egy félfáteresztő tükrén át lépnek ki. A kilépő fénynyaláb koncentrált és egységes hullámhosszú. De mi a különbség a fénycső és a lézer működése között? A fénycsőben lévő gázatomok az elektromos térben felgyorsuló elektronok által gerjesztett állapotba kerülnek, majd abból spontán módon és véletlenszerű időpontban visszatérnek az alapállapotba. Ekkor a magasabb energiánívójú pályára gerjesztéskor került elektronok alapállapotba való visszatérésükkor leadják a két pályához tartozó, gerjesztéskor kapott energiájukat úgy, hogy ez az energiakülönbség egy foton keletkezését okozza, amely $\Delta E = h \cdot \nu$ energiával rendelkezik, ahol h a Planck állandó és ν a foton frekvenciája. A fény színe a frekvenciától függ, hullámhosszal is jellemezhető a $c = \lambda \cdot f$ összefüggés segítségével, ahol a c a vákuumbeli fénysebesség és λ a fény hullámhossza. Lézer esetében a gerjesztés során az atomok a fénycsőhöz hasonlóan gerjesztett állapotba kerülnek, elektronjaik egy magasabb nívójú pályára ugranak fel, majd onnét az alapállapotba visszatérve szintén egy fotont bocsátanak ki. Csak hogy az alapállapotba történő visszatérés nem véletlenszerűen zajlik le, hanem az ún. indukált emisszió által, ami a rezonátor két tükré között mozgó fotonoknak a gerjesztett atomnál való elhaladásakor jön létre. Az ekkor keletkező foton fázisa azonos lesz az éppen elhaladó foton fázisával, ezért lesz a lézerfény koherens. A fotonok korábbi gerjesztett atomok mellett elhaladva újabb fotonokat „visznek magukkal”, tehát a folyamat lavinaszerűen erősödik. Ehhez járul hozzá a rezonátor, amelyben a keletkezett fotonok oda-visszaverődés közben sokasodnak – ezt hívjuk fényerősítésnek. A külső energia ahhoz kell, hogy az alapállapotban lévő atomokat állandóan pumpálva gerjesztett állapotba juttassa, vagyis elektronhéjaikat fordított betöltöttségűre változtassa (inverz populáció). A lézer szó jól jellemzi az elmondottakat.



6.1. ábra - A fénycső működési elve



6.2. ábra - A lézer működés vázlatja

III. Holográfia – alapelv

Gábor Dénes 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 lehet rekonstruálni (újrakeltetni) a „látott” valóságot. Fény esetén az eredeti fényteret.

„Hullámfront-rekonstrukció”: 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.

(Olyasmi, mint a hanghullámfront rekonstrukciója hangszórókkal.)

Kezeljük a fényhullámot skalármennyiségként, jellemzőit írjuk le az alábbi komplex hullámfüggvénnyel

$$U(r, t) = A(r) \exp[i(\varphi(r) + 2\pi vt)]$$

ahol r helyvektor, t idő, $A(r)$ a hullám amplitúdója, $\varphi(r)$ a fázisa, v pedig a rezgésszáma (térbeli és időbeli periodicitás)! Interferencia érdekében az átlapoló fényhullámok egyébként is azonos rezgésszámúak, ráadásul hologramfelvételkor a tárgy- és referencianyalábot az adott lézerefény kettéosztása révén alakítjuk ki, így a viszonyokat maradéktalanul leírhatjuk a hullámfüggvény helytől függő elemeinek szerepeltetésével. Ezekkel összefüggésben feltesszük, hogy a két átlapoló fényhullám teljes mértékben koherens, azaz interferenciaképes, azaz a hologram-készítés teljes időtartama alatt fázisuk között teljes mértékű kapcsolat, korreláció van. A tárgy- és referenciahullám átlapolásának eredménye tehát tárgyalható az

$$U(r) = A(r) \exp[i(\varphi(r))] \rightarrow u(r) = A(r)[\cos \varphi(r) + i \sin \varphi(r)]$$

komplex hullámfüggvény segítségével, amely láthatóan tartalmazza a két lényegi mennyiséget: a hullám amplitúdóját és fázisát. Az interferencia-kép az intenzitás sajátos eloszlása (sötét és világos csíkok váltakozása). Az intenzitás esetünkben a komplex amplitúdó abszolút értékének a négyzeteként írható fel: $I(r) = U(r) \cdot U(r)^*$, ahol $*$ komplex konjugáltat jelöl. A két tárgyhullám interferenciájának eredményeképpen előálló interferencia-kép intenzitáseloszlása pl. az x - y síkban elhelyezkedő lemez mentén $I(x, y) = (U_1 + U_2)(U_1^* + U_2^*)$ alakba írható; ez rögzítődik a fényérzékeny rétegben. Az exponált film előhívása után sajátos diffrakciós rács, a tulajdonképpeni hologram áll elő: a sötét és világos helyek váltakozása révén a réteg amplitúdóáteresztése helyről-helyre változik. Az elemekből tudjuk, hogy fényelhajlást nemcsak átment, hanem visszavert fényben is megfigyelhetünk; így a hologramok másik csoportját az ún. reflexiós hologramok képezik.

A gyakorlatban a holográfia az eredeti tárgyról kiinduló fényhullámok teljes rekonstruálását igényli. Az eljárás során a tárgyról reflektálódott fényhullám és egy segédhullám interferenciáját rögzítik egy fényérzékeny lemezen. A segédhullám felvételével a tárgyról visszavert fény eloszlása is rögzíthető, ellentétben a hagyományos fényképezéssel. A kidolgozott hologramlemez megfelelően megvilágítva a diffrakció révén rekonstruálja a kérdéses tárgyról szórt fény intenzitás- és fáziseloszlását egyaránt,

így a látvány teljesen háromdimenziós lesz. Ennek köszönhetően a tárgy a felvételen mélységében, méretében, alakjában és textúrájában is helyesen jelenik meg. A fényképezés tehát egylépcsős, a holografálás pedig kétlépcsős művelet. A fényképezéskor a tárgyról szórt fénynek a fényérzékeny film az intenzitását rögzíti, és ez a fényerősségeloszlás másolódik át a későbbiekben a fotópapírra. Ismeretes azonban, hogy az információt hordozó fényhullámnak az "erősségét" is jellemző amplitúdója mellett további lényegi jellemzője a fázisa.

III. Holográfia – készítésének folyamata

A hologram felvételének alapgondolata jól követhető az ábrán. A lézerfény megvilágítja az 1. (referencia) és 2. tárgyat. A róluk visszavert fényhullám átlapolási tartományában helyezük el a fényérzékeny anyagot, amely rögzíti a két hullám interferenciáját. A sötét és világos helyek (csíkok) távolsága fél mikrométer körüli, így az előhívott – az egyszerűség kedvéért – lemez, a hologram, szemre nem különbözik egy nem egészen tiszta üveglaptól. A rekonstrukciós folyamatban a rögzített interferencia-kép diffrakciós rácsként szerepel: megvilágítva azt a felvételkor használt referencianyalábbal, a rács elhajlási képének tanulmányozásánál megszokott módon megfigyelhetjük a nulladrendet, továbbá a plusz és mínusz első rendet (kézben tartott felvételi körülmények esetén a magasabb rendek nem figyelhetők meg). E két utóbbi irányban terjedő fényhullám személyesíti meg a tárgy képzetes és valódi képét. Tömören szólva és a részletek, illetve finomságok után nem kutatva, ez a holográfia.

Érdeemes megjegyezni, hogy az 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 hologramok nagyon érdekes és fontos tulajdonsága, hogy bármely kis része, amely elég nagy ahhoz, hogy tartalmazza a diffrakciós mintázatot, a teljes tárgyról tartalmaz információt, ami tehát a töredékből is rekonstruálható, csak nagyobb zajjal. A diffúz hologram ezért egy szétesztott memória. Sok spekulációt váltott ki az a kérdés, hogy az emberi emlékezet is holografikus-e, mivel jól ismert, hogy az agy jó része elpusztítható anélkül, hogy a memória minden nyomát kitörölnénk.

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, akár vízszintesen, akár függőlegesen mozog a megfigyelő. Mivel a hologram off-axis, a kétféle kép nyalábja különböző irányba terjed. Ha a valós képet jól kivehető módon szeretnénk megfigyelni, akkor 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 fehérfényű látványhologramok az eddig tárgyalt típustól abban térnek el, hogy in-line elrendezésűek, azaz a nyalábok a lemez normálisával nulla vagy kis szöget 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.

Fehér fényben ezek a hologramok azért tekinthetők meg, mert kb. 8-10 μm 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 felvételtől referenciányaláb 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 térfogatóba. Ez az alapja a holografikus adattárolásnak.

IV. Hologramok – osztályozás

Annak érdekében, hogy az anyag holografikus rögzítés céljaira alkalmas legyen, szükséges, hogy a megvilágítás hatására az alábbi jellemzők közül legalább egy változzon: abszorpció, állandó, törésmutató, rétegvastagság.

Amplitúdó: A holografikus csíkok a fényérzékeny réteg által elnyelt energia térbeli változásainak eredményei. Sötét, világos részek (pl.: ezüsthalogénid), 6-7%-os hatásfok.

Fázishologram: A holografikus csíkok a fényérzékeny réteg törésmutatójának vagy vastagságának változásai révén jönnek létre. A fázishologramok diffrakciós hatásfoka a néhány tíz százaléktól egészen száz százalékgig terjedhet.

Tengely menti hologram (in-line): A referencia- és a tárgyforrás egy egyenes mentén helyezkedik el (Gábor-hologram), a referencia- és a tárgynyaláb átlagos iránya közötti szög zérus. Ekkor a rögzített csíkrendszer térfrekvenciája minimális, azaz a csíkok közötti távolság az elérhető legnagyobb.

Tengelyen kívüli hologram (off-axis): A referencia- és a tárgynyaláb átlagos iránya közötti szög jellemzően néhány foktól 120-150 fokig változik (Leith-Upatnieks-hologram). A csíkok térfrekvenciája a tengely mentiekéhez képest nagyobb, a csíkok sűrűbbek.

Hologram ellentétes nyalábokkal: A referencia- és tárgynyaláb átlagos iránya közötti szög 180 fok, a csíkok távolsága a hullámhossz fele (Denisyuk-hologram). Ez az elrendezés igényli a legnagyobb felbontású rögzítőanyagot. A tárgy a megvilágított holografikus lemez mögött helyezkedik el, a referenciahullám a megvilágító fényhullám.

Térfogati vagy 3D-s: A fényérzékeny réteg vastagsága egy, másfél nagyságrenddel nagyobb az alkalmazott fény hullámhosszánál. Az interferencia-kép azonos fázisú helyei síkok a kristálytanból ismert hálózati síkok rendszeréhez hasonló módon (Bragg-eljárás).

Sík vagy 2D-s: A rétegvastagság néhány hullámhossznyi. Az interferencia-kép elhanyagolható vastagságú csíkok rendszere.

Stacionárius: A felvételtől rögzített interferencia-csíkrendszer gyakorlatilag korlátlan ideig fennmarad; a felvétel és a rekonstrukció különböző idejű.

Dinamikus: A holografikus rács a rögzítőanyagban csak a megvilágítás ideje alatt létezik. A felvétel és a rekonstrukció egyidejű (→ mozihoz lehet alkalmas).

IV. Hologramok – gyakorlati holográfia

A holográfia fényképezési eljárás, amelyben lézersugarakat tükrökkel és lencsékkel irányítanak. 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 interferenciakép 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). Minden elemnek teljes nyugalomban kell lennie, minden rezgés (még a hang is) elkeni a hologramot.

Hologramok ezért csak rezgésmentes környezetben készíthetők. A holografikus elrendezés elemei nem mozdulhatnak el egymáshoz képest a hullámhossz törtrészénél (jellemzően egy-két tized mikrométer) nagyobb mértékben. A rezgésmentes viszonyokat a környezeti hatásoktól elszigetelt mechanikai rendszerrel, rendszerint légrugós fém- vagy gránitlappal valósítják meg (régen homok, gumibelső), amelyet holografikus asztalnak nevezünk. Ezen alakítjuk ki a holografikus elrendezést, amelynek főbb részei a lézer; nyalábosztó a tárgy- és referenciahullám előállítására; tükrök a fényhullám kívánatos irányainak beállítására; nyalábtágítók a nyalábok átmérőjének a növelésére; lencsék a megfelelő görbületi sugarú hullámfrontok előállítására; lemez-, illetve filmbefogó. A holografikus elrendezés összeállításakor tekintettel kell lenni a lézer koherencia hosszára: a referencia- és a tárgyút közötti különbségnek mindig kisebbnek kell lennie a lézer koherencia hosszánál.

V. Alkalmazások

Reflexiós hologram: Tetszetős kivitelű térbeli tárgyról készített hologram. Szemlélésük kifejezett esztétikai élményt nyújt. Maga a hologram hasonló a szokásoshoz, de rendelkezik azzal a sajátos tulajdonsággal, hogy fehér fény segítségével is rekonstruálható (Denisyuk-hologram). A kellően vastag (néhány tíz hullámhossznyi) fényérzékeny rétegben az egymással szembe haladó tárgy- és referenciahullám interferenciájának eredményeként a rétegben számos egyenlő lépésközű interferenciasík keletkezik (térfogati hologram). Az előhívott hologram, mint keskenysávú tükör a beeső fehér fénynek egyetlen összetevőjét veri vissza a Bragg-összefüggéssel összhangban. Ezért fehér fényű hologramnak is nevezik. A kép minősége függ a fotóemulzió sajátosságaitól (nagy felbontás, viszonylag vastag réteg) és a fotokémiai feldolgozás módjától.

Szivárványhologram: A szivárvány jelző arra utal, hogy a rekonstruált kép a megfigyelési szög változtatásával a szivárvány színeinek megfelelően változtatja színét. A hologramok fehér fényben szintén rekonstruálhatók. A hologramon a fény elhajlik és ezt a szivárványszínű diffrakciónak nevezett jelenséget hozza létre. Ezek a hajszál vastagságánál mintegy százszor vékonyabb felbontású struktúrát jelentenek, amit nagyon nehéz egyszerű nyomdászati technológiákkal reprodukálni.

Préselt hologram: Előállításának alábbi fázisai különíthetők el: hagyományos hologram, majd ezt követően szivárványhologram készítése fotorezisztben, galvánmásolás

(nyomóforma-készítés), préselés (a domborzat átvitele plasztikus anyagba) és végül tükröző réteg felvitele.

A préselt hologramokat két nagy területen alkalmazzák: háromdimenziós megjelenítés (látvány, illusztráció, díszítés) és biztonságtechnika (okiratok hamisítás elleni védelme). A háromdimenziós megjelenítés lehetővé teszi, hogy az ábrázolt tárgyat több nézőpontból, életszerűen figyelhessük meg. Két dimenzióból, síkból kiemelkedő kép újdonsága rendkívül figyelemfelkeltő és megragadó. Ehhez járul még a préselt hologramok eredendő színjátéka. Mindez együttesen ideális illusztrációs/dekorációs eszközzé teszi a préselt hologramokat. Jelenleg egyre növekvő mértékben alkalmazzák őket folyóiratok, könyvek illusztrálására, alkalmi nyomtatványok, minőségi csomagolások díszítésére, sőt kapható már tapétaként és megtalálható divatáruházakban is. A préselt hologramok biztonságtechnikai alkalmazása azért ígéretes, mert előállításuk igen bonyolult, többlépcsős művelet, csúcstechnológia. A préselt hologramok másolásához, hamisításához végig kell vinni az egész technológiai folyamatot, ami nagy eszköz- és munkaigénye miatt általában nem kifizetődő. Ráadásul a magas szintű technika minőséget eredményező működtetéséhez legalább középfokon jól képzett szakemberre van szükség. Viszonzásul a préselt hologram látványos, többnyire ránézéssel is ellenőrizhető védőpecsétet nyújt. Nagyobb biztonsági igény esetén a hologramokon speciális kódolt adat is elhelyezhető, amelynek megléte külön berendezéssel ellenőrizhető.

Szintetizált hologramok: Fényképfelvétel-sorozat alapján készülnek és ezáltal kibővül a holografálható tárgyak köre. A sorozat tagjai más-más irányból készült felvételek. A tárgyat rendszerint forgó asztalra helyezik. A végeredmény nagyszámú, az egyes nézeteknek megfelelő elemi hologramok összessége. A hologramcsíkok szélessége jellemzően 1 mm. A szintetizált hologramok rendszerint vízszintes távlati hatásúak.

A szintetizált hologramok az orvosbiológiai felvételek háromdimenziós megjelenítésének legígéretesebb eszközei. Elősegítik a betegség jobb és gyorsabb felismerését és így a pontos diagnózis kialakítását.

HOE (holografikus optikai elemek): Különleges célú hologramok, két vagy több hullámfront interferencia-képének rögzítésével létrehozott optikai rácsok. Általában könnyebbek és kisebb térfogatúak a hagyományos optikai elemeknél. Előállításuk és sokszorosításuk is egyszerűbb és gazdaságosabb. Működésük tehát a hagyományos optikai elemek többségével ellentétben a fény elhajlásán alapul. Ebből a szempontból transzmissziós és reflexiós HOE-kre oszthatók. Szinte kizárólag fázishologramként fordulnak elő, hiszen így érhető el nagy (40 - 95 %) diffrakciós hatások.

A holografikus interferometria (BME-Füzessy Zoltán): A holográfiának azt a sajátosságát használja ki, hogy a tárgyról szórt vagy azon átment hullámfront fényérzékeny rétegben rögzíthető, tárolható és a későbbiekben bármikor visszaállítható. Holografikus lemezen két vagy több, eltérő időben létező hullámfront is rögzíthető, viszont a tárgyak különböző állapotait jellemző hullámfrontok egy időben rekonstruálhatók. Az eljárások legfontosabb előnyei a nagy felbontás és az elérhető nagy pontosság (néhány tized mikrométer), az érintésmentes mérési lehetőség; továbbá az a körülmény, hogy a módszer a megvilágított felület egészéről (akár néhány négyzetméter is) egy műveletben szolgáltat mérési adatokat. Kellően kialakított mérési geometriában háromdimenziós állapotot, illetve változást mér. Ez nem más, mint a szilárd testek kis deformációinak megfigyelése kettős

expozíciójú hologramok segítségével. A holografikus interferometriával történő roncsolásmentes vizsgálat jelenleg a holográfia messze legfontosabb ipari alkalmazása (G.C. Oprtonics). A holografikus interferometria a maga 1/4000 mm csíkegységével tökéletesen alkalmas nagyon kis deformációk észlelésére, ugyanakkor túlérzékeny munkadarabok pontosságának ellenőrzésére. Itt egy másik holografikustechnika, a "szintvonalazás" a megfelelő. Ugyanazon tárgyról két hologramot készítünk, de két hullámhosszal, amelyek például egy százaléknnyira különböznek egymástól. Ez lebegést eredményez a két csíkrendszer között, körülbelül 1/40 mm csíktávolsággal, ami pontosan az, amire a műhelynek szüksége van.

A valóságot rögzítő hologramok tudományos manipulálása – a „holoshop” – viszont sok műszaki és technikai érdekességet tartogat még. 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 remélhattunk.

A holográfia egyik alkalmazása, ami bizonyára nagy fontosságra tesz szert a következő években, az információátvitel. A holográfia 100-300-szor annyi nyomtatott oldal tárolását teszi lehetővé egy adott emulzió, mint közönséges mikrofényképen. A holografikus tárolás fontos előnyöket kínál. A bináris tárolás ostáblamintázat formájában mikrofilmen egyetlen porszemmel, egy hajszállal vagy egy karcolással tönkretelhető, míg egy diffúzhologram ilyen hibákra szinte érzéketlen. Hasonlóképpen működik a titkosítás is. Lényege, hogy a holografikus adatokat rejtő zárat csak a titkosító kulccsal tudjuk kinyitni. Egy kis holografikus kártya, lemez helyezhető egy készülékbe, mint egy bankkártyaolvasó automatába, ahol a készülék belsejében található optikai rendszer ezt képes írni, tehát létrehozza a tárgyhullámot és a referenciahullámot, a megfelelően modulált fényvel megvilágítja a lemezt, amely fény a lemezre fókuszálódik, és ott létrejön ez a hologram, kiolvasáskor pedig csak az úgynevezett referenciahullámmal, a titkosító kulcsként használt referenciahullámmal világítja meg a készülék a kiszemelt hologramot.

A holográfia egy másik alkalmazása, ami valószínűleg csak korai stádiumban van, az ábra-és karakterfelismerés. Kicsit általánosítva a holográfia alapelveit, minden korábbi példánál egy összetett tárgyhullám interferált egy egyszerű vagy szférikus referencianyalábbal, és a tárgyhullámot úgy rekonstruáltuk, hogy megvilágítsa a hologramot a referencianyalábbal. De egy kis matematika megmutatja, hogy ez bármely referenciahullámra kiterjeszthető, amely élesen korrelál saját magával. Ezért teljességgel lehetséges például, hogy egy hologram segítségével egy kínai írásjelet a megfelelő angol mondatra fordítsunk és vice versa. Egy portréból létrehozzák a tulajdonos aláírását, és fordítva. Más szavakkal, egy hologram univerzális fordító lehet.

Panorámikus holográfia, amit másképpen holografikus művészetnek is hívhatunk. Minden eddig készített háromdimenziós hologram csupán néhány méter mélységre terjed ki. Nem lehetne a végtelenbe tágítani? Nem tehetnénk egy olyan hologramot a falra, ami ablak benyomását kelti, amelyen keresztül egy valódi vagy elképzelt tájképet láthatunk.

Az egyik német cirkusz hologramokat szerepeltet valódi állatok helyett, így azok csak illúziókként vannak jelen a porondon. Sőt a szakemberek már azzal is kísérleteznek, hogy elhunyt színészek és énekesek hologramként térhessenek vissza a színpadra.

Háromdimenziós mozgókép-fényképezés, speciális segédeszköz vagy polaroid szemüveg nélkül. Olyasmit látunk a képernyőn, ami a valóságban nincs is ott! Olyasmi, mint az AR (augmented reality, VR szemüveg) technológia. Egyszerre látjuk a valóságot és a virtuálist is. Például a *Csillagok háborújában* Leia hercegnő holografikus másának segélykiáltása vagy épp nyomozó holo-interface a *Vasemberben*. 3D televízió, szemüveg nélkül magyar cég fejlesztésével (Balogh Tibor). Az objektumokat jobbról, balról is szemügre vehetjük. Sőt, az ún. gesztusvezérelt változatoknál el is forgathatjuk a tárgyakat. Egy hagyományos 2D készüléknek a képernyő egy pixele az piros, sárga vagy zöld, és az minden irányból piros, sárga, zöld. A holovízió képernyője az lehet, hogy egyik irányból zöld, a másiktól pedig piros, ugyanaz a pont. Vagyis egy 3D képben annyszor több információ van, ahány fénysugarat egyetlen pontból kibocsátok.

A holográfia fejlődését ma leginkább az orvosi, sebészeti és az autóiipari felhasználások hajtják. De a magyar fejlesztőcégek elkészített egy telepresence, vagyis távjelenlét rendszert is, ami egy új korszakot nyithat a videokonferenciák történetében.

VI. Teszt-minta

1. Mi köze van Gábor Dénesnek a golyóstollhoz?

Gábor Dénes osztálytársa volt a golyóstollat feltaláló Bíró László József.

2. Hány évesen tette meg első szabadalmi bejelentését?

Alig tíz éves tanuló volt, amikor első találmányi bejelentését, az aeroplán-körhintára megtette, és amelyre az akkor jogszabályok szerint szabadalmi védelmet is kapott.

3. Hány képet lehet egyszerre egy hologramban tárolni?

Leith ábrájában pl. 12-t, de akár 300-at is (többlettárolás).

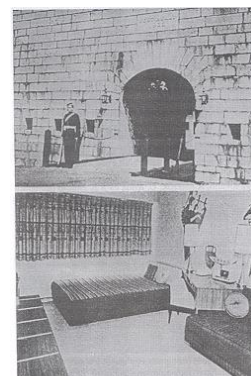
4. Kinek a szemináriumait látogatta Gábor Dénes Berlinben?

Albert Einstein

5. Melyik szervünkről gondolják, hogy holografikus?

Sok spekulációt váltott ki az a kérdés, hogy az emberi emlékezet is holografikus-e, mivel jól ismert, hogy az agy jó része elpusztítható anélkül, hogy a memória minden nyomát kitörölnénk.

6. Miért nem ajánlott esküvői hologramot készíteni?



8. ábra: Az egy hologramban tárolt többesetű képelméleti példás: a) E.K. Leith és J. Upatniek, Journal of Optical Society of America, 1964 november.

A hologram „kép” – a megszokott fényképekkel ellentétben – nincs lokalizálva a lemezen, azaz a hologram töredéke is tartalmazza a teljes információt. A páros esküvői fényképeket szokás félbevágni, ha esetleg válásra kerül sor. Az esküvői hologramok elvesztették ezt a néha hasznos funkciót. Azokat már nem lehet kettétörni, illetve lehet, de mindkettőn továbbra is rajta maradnak a szereplők.

7. Melyik filmben látható az alábbi kép?

Csillagok háborúja

8. Mikor készült az első hologram és kik készítették?

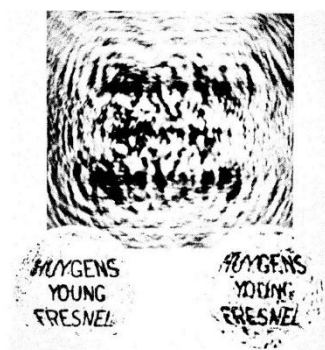
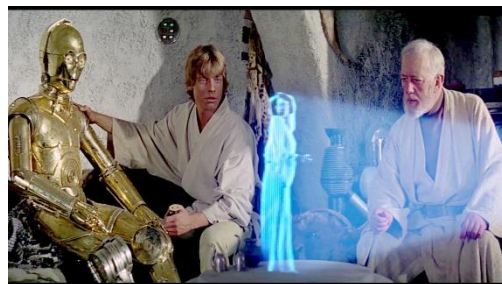
1962-63 (Leith-Upatnieks)

9. Hány szabadalom fűződik Gábor Dénes nevéhez?

Több, mint 60.

10. Ki volt Greguss Pál biofizikus és hogy kapcsolódott Gábor Déneshez?

Londonban barátkoztak össze és tartós tudományos együttműködést alakítottak ki. Greguss Pál 1990-ben a Szent Koronáról készített körüljárható multiplex hologramot, amelyet először a Magyar Nemzeti Múzeumban mutattak be. Bejczy Antallal és Pavlics Ferencsel, az Egyesült Államokban élő magyar származású tudósokkal együttműködve Greguss Pál is részt vett a legmodernebb űrtechnikák kidolgozásában. Az ő nevéhez fűződik a humanoid látómodul, amelynek lelke az általa kifejlesztett úgynevezett PAL-optika: ez egy 360 fokos látószögű lencse, amely az emberi szemhez hasonlóan a perifériás látványból ki tudja emelni azt a részletet, amelyiket éppen akarja. NASA díjat kapott.



Forrásjegyzék:

<https://www.gabordenes.hu/>

[https://hu.wikipedia.org/wiki/G%C3%A1bor_D%C3%A9nes_\(fizikus\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/G%C3%A1bor_D%C3%A9nes_(fizikus))

<https://www.szisi.hu/iskolank/nevadonk>

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1971/gabor/biographical/>

<https://www.sztnh.gov.hu/hu/kiadv/ipsz/200006/gabord.htm>

<https://www.youtube.com/watch?v=rbwZQeEV-JM>

<https://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0006/gdenes.html>

https://fizikaiszemle.elft.hu/uploads/2017/09/fizszem-201709-horvathzoltangyorgy_11_03_17_1505466197.8698.pdf

https://epa.oszk.hu/00300/00342/00321/pdf/EPA00342_fizikai_szemle_2017_10_355-360.pdf

https://hu.wikipedia.org/wiki/Felold%C3%A1si_hat%C3%A1r

Mozaik – Fizika 11.

<https://www.youtube.com/watch?v=EmKQsSDlaa4&t=2158s>

<https://mogi.bme.hu/TAMOP/lezertechnika/ch06.html>

https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/L%C3%A9zerek%20az%20orvostudom%C3%A1nyban/24_a_lzerek_felptse_s_mkdse.html

Füzessy Zoltán: Holográfia és alkalmazásai, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék

<https://www.holoshop.hu/hologram1.pdf>

<https://fizipedia.bme.hu/index.php/Hologr%C3%A1fia>

<https://videotorium.hu/hu/recordings/11809/hologramok-demo>