

TÖKÉLETLEN HOLOGRÁFIA

A rögzítőanyag nemlinearitásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre

Bányász István
MTA Wigner FK,
Nukleáris Anyagtudományi Osztály

A digitális holográfia alapja a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlásának kiszámítása a CCD vagy CMOS eszközzel detektált interferenciaképből a diffrakciós integrálok segítségével, hiszen ebben az esetben lehetetlen a hologramok optikai rekonstruálása. Ez a manapság rendelkezésre álló programok és nagy teljesítményű számítógépek segítségével könnyen kivitelezhető. Azonban a korai lézeres holográfia idején az 1960–1980-as években a számítástechnikai lehetőségek sokkal szerényebbek voltak, és csak kevés publikáció született a holografikus leképezés numerikus modellezéséről.

A kutatók már a korai holografikus cikkekben is arra a következtetésre jutottak, hogy a rekonstruált holografikus kép a gyakorlatban egyáltalán nem ideális. Mint az a fizikai optikából jól ismert, a felvételhez használt lézerező hullámhossza és a hologram numerikus apertúrája meghatározzák a rekonstruáláskor elérhető maximális térbeli feloldóképességet. Ha a hologram rekonstruálására használt fényhullám nem azonos a felvételkor használt referenciahullámmal (virtuális kép) vagy annak konjugáltjával (valós kép), a rekonstruált holografikus képben aberrációk jelennek meg, amelyek tovább rontják minőségét. A rekonstruált holografikus képek első numerikus meghatározásai Carter és Dougal [1], Champagne és Massy [2, 3], valamint Nowak and Zajac [4] munkáiban találhatóak. Ezen szerzők jelentős közelítéseket használtak a diffrakciós integrálok kiszámításakor, így eredményeik a nagy numerikus apertúrájú hologramokra és az optikai tengelytől távoli tárgypontra nem voltak érvényesek.

Jelen cikk írója Varga Péter témavezetésével és Kiss Gábor közreműködésével egy módszert dolgozott ki a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlásának közelítés nélküli kiszámítására [5]. A módszer a fényhullám terjedését leíró kettős skaláris Fresnel–Kirchhoff-integrál közelítés nélküli formájának numerikus integrálásán alapult. E módszerrel már nagy numeri-

kus apertúrájú hologramok és az optikai tengelytől távoli tárgypontra esetében is pontosan ki lehet számítani a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlását.

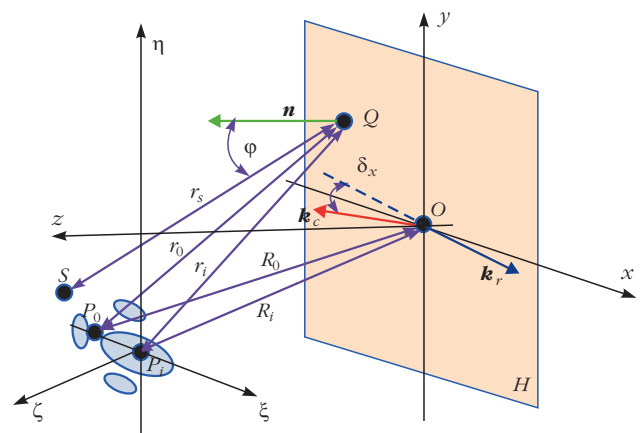
A modell

A diffrakciólimitált holografikus leképezés és az aberrációk

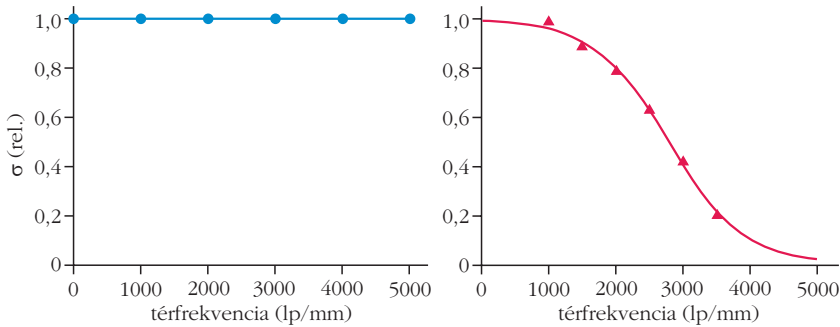
Egy pontforrás hologramjának felvétele és rekonstruálása látható az 1. ábrán. A P_0 pontforrás hologramját a téglalap alakú H holografikus lemezen rögzítjük. x, y a hologramhoz rögzített koordináta-rendszer tengelyei. \mathbf{k}_r a sík (kollimált) referencianyaláb hullámvektora. A hologramot egy olyan síkhullámmal rekonstruáljuk, amelynek \mathbf{k}_c hullámvektora egy kis δ_x szöget zár be a referencianyaláb konjugáltjával. A véges hullámhossz és numerikus apertúra, valamint a kis rekonstrukciós szöghiba miatt a pontforrás rekonstruált valódi képe aszimmetrikus, komplex eloszlás lesz a P_i ideális képpont körül, amely egy torzított $\sin(x)/x \cdot \sin(y)/y$ (sinc \times sinc) eloszlásra emlékeztet (lásd a halványkék foltokat az 1. ábrán).

A rekonstruált holografikus kép komplexamplitúdó-eloszlása a kettős Fresnel–Kirchhoff-integrállal számítható ki. Az első integrál megadja a tárgynyaláb komplexamplitúdó-eloszlását a hologram síkjában. A második integrál pedig a tárgy rekonstruált, valódi holografikus képének komplexamplitúdó-eloszlását adja meg a kép síkjában. Az egyszerűség kedvéért lineáris polarizációt (skaláris integrál) és egy dimenziós hologramot tételezünk fel:

1. ábra. Pontforrás hologramjának felvétele és rekonstruálása.



Bányász István 1983-ban végezte el az ELTE fizikus szakát. Ugyanott 1987-ben szerezte meg egyetemi doktori címét. 1994-ben a fizikai tudomány kandidátusa lett. 35 éve dolgozik az optika különböző területein. Jelenlegi kutatási területei: ionnyalábos technológiákkal készített integrált optikai elemek tervezése, készítése, minősítése és ionolumineszcencia. Az ELFT régi tagja, az SPIE nemzetközi optikai mérnöki társaság első magyar szenior tagja. Több mint húsz éve számos rangos nemzetközi folyóirat bírálója.



2. ábra. Balra az ideális, jobbra a valódi ezüst-halogenid rögzítőanyag modulációátviteli függvényének négyzetgyöke a térfrekvencia függvényében.

$$I(u, z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} W(x) R(x) O(\xi) \cdot \frac{\cos \vartheta(\xi, x) \cos \rho(x, u, z)}{r_1(\xi, x) r_2(x, u, z)} \cdot \exp(i k [r_1 - r_2]) d\xi dx. \quad (1)$$

ahol $I(u, z)$, $W(x)$, $R(x)$ és $O(\xi)$ a rekonstruált kép, valamint a rekonstruáló és referenciányaláb, valamint a tárgnyaláb komplex amplitúdói, x és ξ a tárgy- és képkoordináták, r_1 és r_2 , valamint ϑ és ρ pedig felvételnél, illetve rekonstrukciónál határozzák meg a tárgy- és képvonal futópontjait összekötő vonalak hosszát és szögét, $i = (-1)^{1/2}$ és $k = 2\pi/\lambda$ a hullám-szám. Ha a W rekonstruáló nyaláb az R referenciányaláb konjugáltja, akkor nem torzítja a rekonstruált kép komplex amplitúdójának *fázisát*. Ettől függetlenül W torzítja a rekonstruált kép komplex amplitúdójának *nagyságát*, ha intenzitása nem egyenletes a hologram síkjában, ami a gyakorlatban mindig így van, mert a rekonstruáló és referenciányaláb általában úgynevezett „vágott Gauss” típusú.

A holografikus rögzítőanyag véges térbeli feloldóképességének és nemlinearitásának befoglalása a diffrakciós modellbe

Az ezüst-halogenid (többnyire ezüst-bromid) holografikus emulziókban nagyon kis ezüst-halogenid szemcsék vannak, méretük általában néhány nanométer (ultra nagy feloldóképességű emulziók) és 50 nm között van. A rögzítőanyag szemcsézettsége nyilvánvalóan korlátozza a benne rögzíthető interferenciacsíkok szélességét. Egy holografikus rögzítőanyag modulációátviteli függvénye (MTF) definíció szerint a benne rögzített síkhullám-hologramok diffrakciós hatásfoka a holografikus rácsok térfrekvenciájának függvényében. A térfrekvencia a milliméterenkénti interferenciacsík-párok száma, mértékegysége a vonalpár/mm (lp/mm). Már a korai holografikus cikkekben közöltek mért MTF-görbéket [6, 7]. *Biedermann* [6] és *Falconer* [8] elméleti modelleket javasoltak a rögzítőanyag MTF-ének leírására. Jelen cikk szerzője egy egyszerű analitikus függvényt javasolt az ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyagok MTF-ének le-

írására, és sikeresen illesztette ezt a függvényt a mért MTF-ekre, valamint befoglalta a holográfia diffrakciós modelljébe [9].

E modell szerint az ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyag MTF-ének négyzetgyöke (σ) a következő függvénnyel írható le (2. ábra):

$$\sigma(v) = \frac{1}{\exp\left(\frac{v - v_0}{c}\right) + 1}, \quad (2)$$

ahol v a síkhullámhologram térfrekvenciája, v_0 a rögzítőanyag térbeli feloldóképességének határa, c pedig $\sigma(v)$ gradiense a feloldási határ körül.

Lin javasolta a róla elnevezett görbesereg használatát a holografikus rögzítőanyagok, köztük az ezüst-halogenid emulziók, nemlinearitásának leírására [10]. A *Lin*-görbék definíció szerint az adott rögzítőanyagban felvett síkhullámhologramok diffrakciós hatásfokának négyzetgyöke, σ az E_0 átlagos expozíció és a V interferenciacsík-láthatóság (moduláció) függvényében. A moduláció definíciója a következő:

$$V = \frac{2\sqrt{R}}{R + 1},$$

ahol R a referencia- és tárgnyaláb intenzitásának aránya, $R = I_r/I_o$.

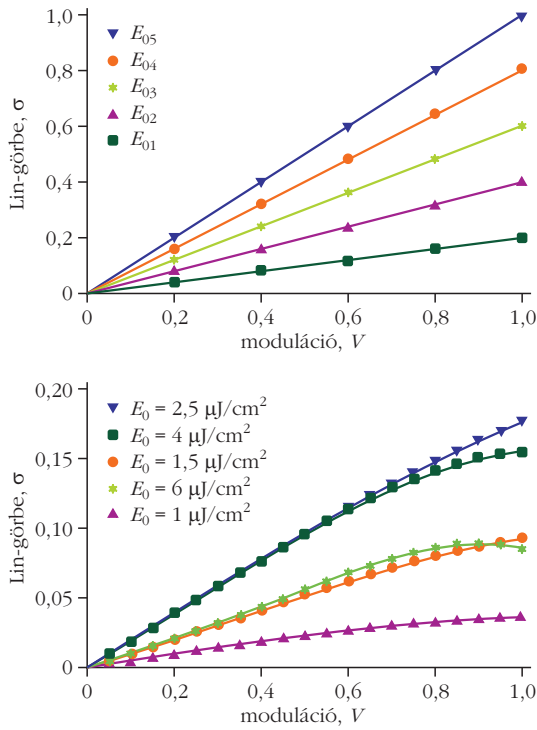
E cikk szerzője a mért $\sigma(E_0, V)$ *Lin*-görbesereget ezüst-halogenid és egyéb holografikus rögzítőanyagok esetében a következő analitikus függvénnyel modellezte [11]:

$$\sigma(E_0, V) = f(E_0) (1 - e^{-V}) \exp\left(-\frac{[V - V_0(E_0)]}{w^2(E_0)}\right), \quad (3)$$

a következő paraméterekkel:

$$Par(E_0) = c_{i01} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{c_{i11} - E_0}{c_{i12}}\right) + 1} + c_{i13} \right) \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{E_0 - c_{i21}}{c_{i22}}\right) + 1} + c_{i23} \right) \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{c_{i31} - E_0}{c_{i32}}\right) + 1} + c_{i33} \right), \quad (4)$$

ahol *Par* a V_0 és w értéket vesz fel. A függvénynek összesen 27 paramétere van. Egy ideális és egy valódi holografikus rögzítőanyag *Lin*-görbéi láthatók a 3. ábrán.

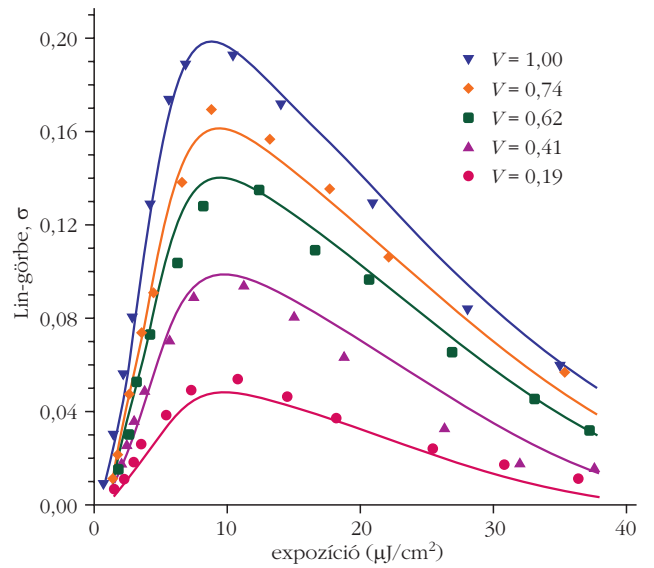
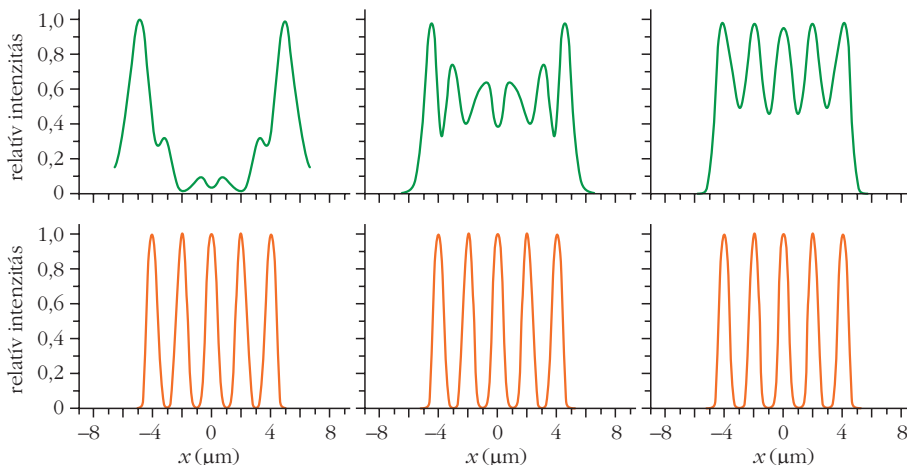


3. ábra. Fölül az ideális, alul a valódi ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyag $\sigma(E_0, V)$ Lin-görbéi.

A holografikus rögzítőanyag MTF-e és nemlinearitása könnyűszerrel beilleszthető az (1) diffrakciós modellbe. A módosított kettős Fresnel–Kirchhoff-integrál a következő:

$$I(u, z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \sigma[E_0(x), V(x), v(x)] \cdot W(x) R(x) O(\xi) \cdot \frac{\cos \vartheta(\xi, x) \cos \rho(x, u, z)}{r_1(\xi, x) r_2(x, u, z)} \cdot \exp(i k(r_1 - r_2)) d\xi dx. \quad (5)$$

4. ábra. Ötelemű Ronchi-rács számított, rekonstruált holografikus képei. A rögzítőanyagnak csak az MTF-e lett figyelembe véve. A v_0 feloldási határok a következők voltak (balról jobbra és fentről lefelé): 500, 750, 1000, 1500, 2780 és 4000 lp/mm. A megfelelő c paraméterek: $c = 560 v_0 / 2780$.



5. ábra. Az Agfa 8E75HD holografikus emulzió mért és illesztett Lin-görbéi.

ahol σ tartalmazza a rögzítőanyag teljes hatását, O , R és W a tárgy, a referencia- és a rekonstruáló nyalábok komplex amplitúdói.

A következőkben nem tételezzük fel rekonstrukciós hibákat. Továbbá feltételezzük, hogy $\sigma(E_0, V, v) = \sigma_1(E_0, V) \cdot \sigma_2(v)$ (vagyis σ szeparálható).

Eredmények

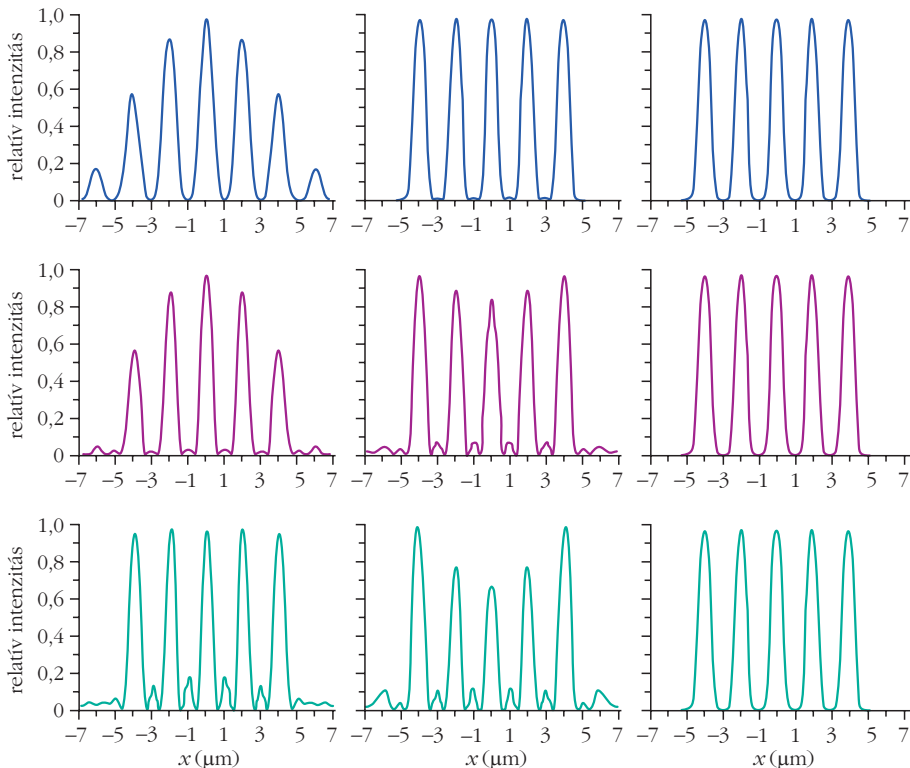
Egy 5 elemű Ronchi-rács rekonstruált holografikus képei

A rögzítőanyag MTF-e rekonstruált képre gyakorolt hatását mutatja be a 4. ábra. Látható, hogy a rács vonalainak nincsenek feloldva, ha a feloldási limit 1000 lp/mm alatt van, $v_0 = 1500$ lp/mm esetében viszont a rácsvonalak már teljesen fel vannak oldva.

Az Agfa-Gevaert 8E75HD holografikus emulzió Lin-görbéit e cikk szerzője és társai mérték meg és illesztették [12]. Az eredmények az 5. ábrán láthatók, a (3)

függvénnyel a mért adatok jól közelíthetők.

Egy 5 elemű Ronchi-rács számított rekonstruált képei láthatók a 6. ábrán, a számítások az 5. ábra Lin-görbéinek felhasználásával készültek. Az ábrából több tanulság vonható le. Ha az első oszlopot nézzük, ahol a tárgynyaláb intenzitása a hologram felvételekor magasabb, mint a referencnyalábé, láthatjuk, hogy a két alacsonyabb expozíció esetében a rekonstruált vonalak intenzitása nem azonos. A legnagyobb expozíció esetében ez az intenzitás majdnem azonos, viszont a mellékmaximumok a



6. ábra. Ötelemű Ronchi-rácsnak a Lin-görbék alapján számított, rekonstruált holografikus képei. Az oszlopok R intenzitásarányai balról jobbra: 0,1, 1, 10, az egyes sorokban szereplő E_0 átlagos expozíciók főnről lefelé: 12,5, 22,5 és 40 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

vonalak között a 15%-ot is elérik. A második oszlopban, ahol a tárgynyaláb hologramon mért intenzitásának maximumában mért R érték 1 (maximális moduláció), az expozíció növelésével romlik a rekonstruált kép minősége. Végül a harmadik oszlopban, ahol az intenzitásarány a hologram közepén 10 (máshol még magasabb), mind a három expozícióval jó minőségű rekonstruált képet kapunk. Az eredményeket számszerűbb formában mutatja be a 7. ábra, ahol a 6. ábra rekonstruált képeinek paraméterei láthatók az átlagos expozíció függvényében.

A 7. ábrán világosan látszik, hogy 10 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ körül a maximális átlagos expozíciónak optimális értéke van, itt a rekonstruált kép kontrasztja maximális, fluktuációja minimális, míg fényessége (a diffrakciós határfok) még viszonylag magas.

Egy báromelemű Ronchi-rács mért rekonstruált holografikus képe

Végül bemutatom a nagy feloldóképességű holográfia gyakorlati megvalósításának egy példáját, ezüst-halogenid emulzióban $\lambda = 632,8$ nm hullámhosszon (He-Ne lézer). A tárgy egy báromelemű Ronchi-rács, amelynek hossza 300 μm , vonalszélessége 1 μm és kitöltési tényezője 1 volt (króm maszk üveghordozón). Agfa-Gevaert 8E75HD-t használtunk

rögzítőanyagként. A testtárgyról (függőlegesen álló vonalak és vízszintes referencia-tárgynyaláb szög) több átlagos expozíció értékkel és intenzitásarányal úgynevezett off-axis hologramok készültek. A tárgynyaláb fő beesési szöge $37,5^\circ$, a kollimált referencianyalábé pedig $-37,5^\circ$ a hologram normálisához képest. A hologram numerikus apertúrája 0,764 [13]. Az egyik rekonstruált valódi kép mikrofényképe és két rekonstruált kép mikrofotometriával felvett profilja a 8. ábrán látható.

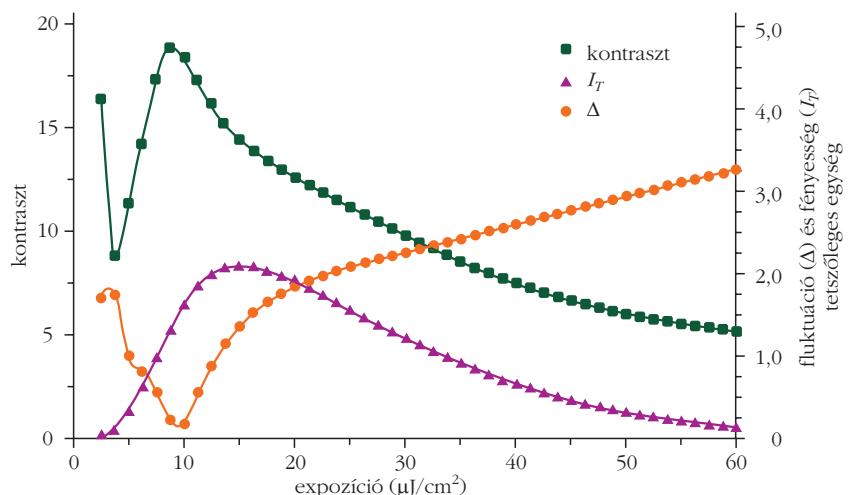
Diskusszió és konklúzió

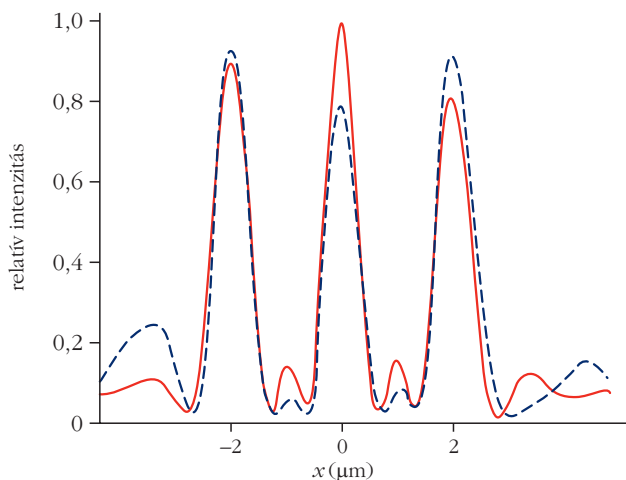
Ha „precíziós” holográfiát szeretnénk megvalósítani, figyelembe kell vennünk a rögzítőanyag véges feloldóképességét és nemlinearitását. Ez érvényes minden holografikus rögzítőanyagra, beleértve a bikromátos zselatint, a termoplasztikus

anyagokat és a CCD, illetve CMOS detektorokat. (Az utóbbiakat a digitális holográfiában használják.)

Megmutattam, hogy a holografikus rögzítőanyag karakterisztikái modellezhetők és beilleszthetők a rekonstruált holografikus kép komplexamplitúdó-eloszlását leíró kettős Fresnel–Kirchhoff-integrálba (vagy más diffrakcióelméleti formalizmusba). A bemutatott modell lehetővé teszi a hologram felvételi paramétereinek (geometria, intenzitásarány, átlagos expozíció) optimalizálását. Egy másik projekt keretében azt is bebizonyítottuk, hogy a holografikus rögzítőanyagok karakterisz-

7. ábra. Ötelemű Ronchi-rács számított rekonstruált holografikus képének kontrasztja, fényessége (I_T) és fluktuációja (Δ) a maximális átlagos expozíció függvényében. A minimális intenzitásarány $R = 1$.





8. ábra. Háromelemű Ronchi-rács rekonstruált, valós holografikus képének mikrofényképe és két rekonstruált képének profilja.

tikai nemcsak makroszkopikus mérésekkel (diffrakcióhatásfok) határozhatók meg, hanem a felvett hologra-

mok kvantitatív mikroszkopikus (fáziskontraszt, interferencia) vizsgálatával is [14–16]. A módszert a digitális holográfiában is alkalmaztuk [17].

Irodalom

1. W. H. Carter, A. A. Dougal: Field Range and Resolution in Holography *J. Opt. Soc. Am* 56(1966) 1754.
2. E. B. Champagne: Nonparaxial Imaging, Magnification and Aberration Properties in Holography. *J. Opt. Soc. Am.* 57(1967) 51.
3. E. B. Champagne, N. G. Massey: Resolution in Holography. *Appl. Opt.* 8(1969) 1879.
4. J. Nowak, M. Zajac: Numerical Investigations of Holographic Imaging Quality. *Opt. Appl.* 15(1985) 239.
5. I. Banyasz, G. Kiss, P. Varga: Holographic image of a point source in the presence of misalignment. *Appl. Opt.* 27(1988) 1293.
6. K. Biedermann: A function characterizing photographic film that directly relates to brightness of holographic image. *Optik* 28(1968/69) 160–176
7. A. A. Friesem, A. Kozma, F. G. Adams: Recording parameters of spatially modulated coherent wavefronts. *Appl. Opt.* 6(1967) 851–856.
8. D. G. Falconer: Noise and distortion in photographic data storage. *IBM J. Res. Dev.* 14(1970) 521–526.
9. I. Banyasz: Evaluation of the imaging properties of holograms recorded in materials of limited spatial resolution. *Opt. Engineering* 32(1993) 2539–2547.
10. R. Collier, K. Burckhardt, L. Lin: *Optical Holography*. Academic Press, New York, 1971, Chapter 10.
11. I. Banyasz: Method for the evaluation of the effects of film nonlinearities on the holographic image. *Opt. Lett.* 18(1993) 658–660.
12. I. Banyasz, A. Fimia, A. Belendez, L. Carretero: Nonlinear recording of amplitude holograms in Agfa 8E75HD: comparison of two developers. *Optics Communications* 111(1994) 225–232.
13. I. Banyasz: Resolution problems in holography. *Proc. SPIE*, 1574(1991) 282–293.
14. I. Banyasz: Direct measurement of the refractive index profile of phase gratings, recorded in silver halide holographic materials by phase-contrast microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 83(2003) 4282–4284.
15. I. Banyasz: Fourier analysis of high spatial frequency holographic phase gratings. *J. Mod. Opt.* 52(2005) 2443–2451.
16. I. Banyasz, Higher-order harmonics in bleached silver halide holograms. *Optics and Lasers in Engineering* 44(2006) 926–942.
17. I. Banyasz, J. Kornis: High-resolution lensless Fourier-transform digital holography. *Proc. SPIE* 5856(2005) 71–79.

EINSTEIN, A »HADITENGERÉSZ«

Illy József
Einstein Papers Project
California Institute of Technology

1943 tavaszán, az Egyesült Államok hadseregének, haditengerészetének és Nemzeti Védelmi Kutatótanácsának együttes ülésén *Stephen Brunauer*, a Haditen-

Köszönöm *Futó László* ny. főiskolai docens szakmai segítségét.



Illy József 1956-ban szerzett fizika-matematika tanári oklevelet a József Attila Tudományegyetemen (JATE), Szegeden. 1982-től a fizikai (tudománytörténet) tudományok kandidátusa, 1983-ban egyetemi doktor, JATE. 1991 óta az Einstein Papers Project szerkesztője a Boston Universityn, majd a California Institute of Technology.

gerészet Fegyverkezési Hivatala Nagyerejű Robbanószert Kutató és Fejlesztő Csoportjának vezetője kíváncsian megkérdezte, vajon dolgozik-e *Albert Einstein* valamelyik hivatalnak. Ó, ő pacifista! Őt nem érdekli semmi, aminek gyakorlati jelentősége lenne, csak az, hogy egyesített mezőelméletén dolgozzék! – kapta a tagadó válaszokat. Brunauer azonban nem tudta elképzelni, hogy Einsteint ne érdekelné, ki győz ebben a Hitlerrel vívott háborúban, ezért, saját szakállára, találkozót kért Einsteintől [1].

Mielőtt folytatnám, ismerkedjünk meg ezzel a fiatal tengerészttel.

Stephen Brunauer 1903-ban Budapesten született *Brunauer István*ként. Mivel az első világháború után, zsidó származása (az 1920. évi XXV. törvénycikk, az úgynevezett numerus clausus-törvény) miatt nem vet-