

**Az adatbiztonság és az adatsűrűség növelésének lehetőségei
holografikus adattároló rendszerekben**

című

MTA Doktori Értekezés Tézisei

Koppa Pál
BME Atomfizika Tsz.
Budapest 2012

Motiváció

Az információ tárolásának igénye egyidős az emberi civilizációval. A kőbe vésett vagy kódexekben leírt információ célja ugyanaz, mint a mai digitális adattárolásé: az információ biztonságos megosztása más felhasználókkal és annak megőrzése a későbbi korok számára. A mai digitális korban azonban lényegesen megváltozott a tárolandó adatok mennyisége, amely ma és az előre jelezhető jövőben is exponenciálisan növekszik. A rövidtávú információtárolásra jó megoldást nyújtanak a gyors ütemben fejlődő elektronikus és mágneses adattárolók, hosszú távú adattárolásra (archiválásra) és a széles körű adatmegosztásra pedig az optikai adattárolók terjedtek el az adathordozó alacsony ára és a környezeti behatásokra való viszonylagos érzéketlensége miatt.

Az alapvetően kétdimenziós hagyományos optikai adattárolók adatsűrűsége a jelenlegi szinthez (kb. $25 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$) képest nem növelhető lényegesen, annak a diffrakció jelenségén keresztül határt szab a használt fényforrás hullámhossza. A következő generációs optikai adattárolóknak az adatsűrűség további 1-1,5 nagyságrendnyi növeléséhez használatba kell venniük a harmadik dimenziót, azaz térfogati adattárolást kell megvalósítaniuk. Az adattárolással foglalkozó szakemberek és cégek (pl. Sony, IBM, Philips, Samsung Thomson) egybehangzó véleménye szerint erre a legígéretesebb jelölt a holografikus adattárolás, amely az elérhető akár több ezer $\text{bit}/\mu\text{m}^2$ felületi adatsűrűség mellett magában hordozza a nagy sebességű párhuzamos írás és olvasás, valamint a gyors, tartalom szerinti keresés lehetőségét is.

Az adattárolás elsődleges fizikai paraméterei mellett a jelen kor fontos követelménye az adatokhoz való hozzáférés biztonsága is, azaz az illetéktelen olvasás, másolás vagy módosítás megakadályozása. A holografikus megoldás ezen problémára is hatékony megoldást nyújthat a referencia hullámfrontjára való érzékenység kihasználása révén.

A kutatás célkitűzései

A kutatás alapvető célja olyan holografikus adattároló rendszerek koncepciójának kidolgozása és elméleti valamint kísérleti vizsgálata, amelyek az adatbiztonság és az adatsűrűség területén túlmutatnak a szakma jelenlegi színvonalán.

Adatbiztonság tekintetében az ún. kétkulcsos fázisban kódolt titkosítás különböző változatai jelentik a kiindulópontot. Céлом annak vizsgálata volt, hogy egy alapvetően az adattárolás analóg, fizikai szintjén működő titkosítási módszer hogyan írható le a digitális titkosításban ismert kvantitatív mennyiségekkel, mint pl. az egymástól független kulcsok száma vagy a nem megfelelő kulccsal kiolvasott adat bit-hiba aránya.

A második célkitűzés ezen kvantitatív jellemzők lényeges megjavítása új rendszer-szintű megoldások javaslatával és ezen megoldások megvalósíthatóságának kísérleti bizonyítása volt. Ezen célok eléréséhez a kutatás során olyan alapvető problémák megoldására volt szükség, mint a Fourier sík homogenizálása és a fázisban modulált adatlapok megbízható dekódolása.

Az adatsűrűség növelésére irányuló kutatás fő célja annak vizsgálata volt, hogy a különböző holografikus adattároló rendszerek és a tároló-anyagok tulajdonságai hogyan befolyásolják az elérhető jel-zaj viszonyt és adatsűrűséget. Céлом volt továbbá olyan rendszer szintű megoldásokat javasolni, amelyek hatékonyabban használják ki a rendelkezésre álló eszközökben és anyagokban rejlő lehetőségeket.

A kutatásban az a felismerés vezetett, hogy az irodalomban eddig közölt egyszerűsített rendszer- vagy anyag-központú leírások nem megfelelőek a komplex jelenségek vizsgálatához, és így nem használhatók az adatsűrűség optimalizálására. Ezért célul tűztem ki egy olyan új leírásmód és fizikai modell kidolgozását, amely mind az optikai, optoelektronikai rendszer mind a holografikus tárolóanyagok tulajdonságait megfelelő részletességgel leírja, és amely minden a kísérletekben fellépő számottevő fizikai jelenség vizsgálatára valamint az adattárolás fő paramétereinek optimalizálására alkalmas.

Módszerek

A kutatás módszertanában a „klasszikus” megközelítést követtem, nevezetesen az adattároló rendszer és a hozzá kapcsolódó fizikai jelenségek tanulmányozása alapján fizikai modelleket állítottam fel, és számítógépes szimulációs eljárásokat fejlesztettem a lapszervezésű és a bitszervezésű holografikus adattároló rendszerek vizsgálatára. Ezen szimulációs programok több száz rendszerelemet és fizikai paramétert tartalmaznak az optikai rendszer, az abba beépülő optoelektronikai eszközök és a holografikus tárolóanyagok leírására.

A szimulációk helyes működését, paraméterezését az alapkísérletekkel való összevetéssel igazoltam. A szimulációs programok ezután felhasználásra kerültek a rendszerben fellépő fizikai effektusok részletes vizsgálatára, újszerű rendszermegoldások tesztelésére, új aktív és passzív eszközök tervezésére és optimalizálására valamint a teljes adattárolás folyamatát leíró paraméterek kiszámítására. A szimulációk alapján levont legfőbb következtetések és az előremutató újítások ezután kísérleti vizsgálatok tárgyát képezték. Ezzel a megoldással a modellezés lényegesen lecsökkentette, de természetesen nem helyettesítette a kísérleti munkát. Az adattárolás teljes folyamatának vizsgálatára mind a lapszervezésű mind a bitszervezésű rendszerből prototípusok készültek, amelyek kifejlesztésénél szintén nagymértékben támaszkodtunk a szimulációs programokra.

Új tudományos eredmények

1. tézis: Fázisban modulált adatlapok kódolása és dekódolása a lapszervezésű holografikus adattárolásban

1.1 Megmutattam, hogy lapszervezésű holografikus adattárolók esetében a hagyományosan használt bináris, intenzitásban modulált adatlapok nem alkalmasak nagy sűrűségű adattárolásra a tároló anyagok korlátozott dinamika-tartománya miatt. [1-3, 6-8]

1.2 Megvizsgáltam a tisztán fázisban modulált adatlapok használatának lehetőségét, és megmutattam, hogy azok alkalmasak holografikus adattárolásra és az intenzitásban modulált adatlapokhoz képest jobb diffrakciós hatásfokot és bithiba-arányt eredményeznek. [3-5, 10, 11, 13]

1.3 A tisztán fázisban modulált adatlapok adattartalmának rekonstruálása nem lehetséges közvetlenül kamera segítségével, és az irodalomban leírt fázis-amplitúdó konverziós módszerek nehézkesek és rezgésekre valamint hullámfront-aberrációkra rendkívül érzékenyek. E probléma megoldására javasoltam egy új megoldást, amely egy kettőstörő lapka mint nyalábosztó segítségével közös utas interferométerként működik és így nem érzékeny az optikai elemek elmozdulására, rezgésére valamint hullámfront-aberrációira. Számítógépes modellezés valamint kísérleti vizsgálatok segítségével megmutattam, hogy a közös utas interferométer alkalmazása az eddigi módszerekhez képest lényegesen egyszerűbb elrendezést és nagyobb toleranciát eredményez. [9-12]

2. tézis: A lapszervezésű holografikus adattárolás biztonságának növelése

2.1 Megvizsgáltam a lapszervezésű holografikus adattárolás optikai titkosításának lehetőségét és javaslatot tettem az alapvetően analóg optikai titkosítási eljárások biztonságának kvantitatív jellemzésére. [14-16, 20]

2.2 Rámutattam, hogy a fázis-kódolt referenciahullám segítségével elérhető titkosítás biztonsági szintje korlátozott: az egymástól független kódszavak száma mindössze 2^{20} . Megvalósítottam egy számítógépes kódszó-optimalizáló algoritmust, melynek segítségével 2^{20} egymástól független, egyenszilárdságú kódszóból álló kulcskészlet készíthető. [16, 18-23]

2.3 Megvizsgáltam a komplex (fázis és amplitúdó) modulált referenciahullám használatát, és megmutattam, hogy annak biztonsága elsősorban a rendszer jel-zaj viszonyának függvénye, és az elérhető független kódszavak száma a kísérletekben tapasztalt jel-zaj viszony mellett 2^{73} -ra bővíthető. [20]

2.4 A biztonsági szint további növelésére javasoltam az első tézispontban leírt tisztán fázisban modulált adatlapok alkalmazását. Megmutattam, hogy a fázisban modulált adatlapokra az ún. „kettős kulcsú” titkosítás, ahol mind a referencia- mind a tárgy hullám egy-egy fázisban modulált kóddal szorzódik, igen hatékonyan alkalmazható és az egymástól független kódszavak száma az adatlap méretétől és a rendszer egyéb paramétereitől függően akár $2^{100\,000}$ is lehet. [17]

3. tézis: A lapszervezésű holografikus adattárolás adatsűrűségének növelése

3.1 A lapszervezésű Fourier típusú holografikus adattárolás adatsűrűségének vizsgálatára javasoltam és megvalósítottam egy Born közelítésen alapuló számítógépes modellt, amely alkalmas multiplexelt vastag hologramok felvételének és kiolvasásának skalár- és vektor-diffrakciós leírására. [25, 27]

3.2 A modell használatával megvizsgáltam az ún. shift multiplexelt holografikus adattárolás pozíció szerinti szelektivitását és megmutattam, hogy az eddig használt paraxiális közelítésen alapuló modellhez képest az lényeges eltéréseket mutat. Gömbhullám referencia esetén a szelektivitásgörbe nem rendelkezik nullhelyekkel, hanem monoton csökkenő jellegű, nem csak a szakirodalomban „érzékeny”-nek nevezett irányban, hanem az arra merőleges transzverzális és longitudinális irányban is, amely lehetővé teszi a multiplexelés 3 dimenziósra való kiterjesztését. Az új modell segítségével meghatározott szelektivitásgörbék az eredmények publikálása után kísérleti megerősítést is nyertek. [24-27]

3.3 Ezen eredmények birtokában sikerült az eddigieknél jobb shift-szelektivitással rendelkező rendszer elrendezéseket javasolni mind gömbhullám-szerű referenciát alkalmazó klasszikus shift multiplexelés, mind az összetett referenciahullámot alkalmazó kollineáris elrendezés esetére. [28-30]

4. tézis: Bit-szervezésű mikroholografikus adattárolás adatsűrűségének növelése

4.1 Rámutattam, hogy a többrétegű, bit-szervezésű mikroholografikus adattároló rendszerek adatsűrűségének legfőbb korlátjai a rétegek közötti áthallás és az intenzitásban lineáris holografikus tárolóanyag korlátozott dinamika-tartománya. [32, 36]

4.2 A rétegek közötti áthallás csökkentésére javasoltam a mikroszkópiában már bizonyított konfokális szűrés használatát. Számítógépes modellezés és kísérleti vizsgálatok alapján megmutattam, hogy a konfokális szűrés használatával az adatsűrűség jelentősen (több mint 40%-kal) növelhető. [31, 33-34, 39-40]

4.3 Megvizsgáltam a hullámhossz multiplexelés hatékonyságát, és megállapítottam, hogy az kizárólag nagyobb hologram-méreteken használható az adatsűrűség növelésére, a teljes rendszer legnagyobb adatsűrűsége hullámhossz-multiplexelés nélkül érhető el. [34, 38]

4.4 A holografikus anyagok vizsgálata kapcsán felismertem, hogy a mikroholografikus adattárolás adatsűrűsége és jel-zaj viszonya tovább javítható nem-lineáris holografikus anyagok használatával. Ennek alapján javaslatot tettem két-fotonos és expozíciós küszöbvel rendelkező holografikus anyagok használatára, és megmutattam, hogy azok adatsűrűség szempontjából további 55%-kal, diffrakciós határfok szempontjából pedig több nagyságrenddel felülmúlják a lineáris anyagokat. [37]

Az eredmények hasznosítása

A kutatás eredményei közvetlenül felhasználásra kerültek három különböző adattároló rendszer fejlesztésénél, amelyek:

Lapszervezésű, holografikus kártya író-olvasó berendezés biztonsági alkalmazásra (hasznosító: Optilink AB, RISØ és Bayer Innovations GmbH)

Lapszervezésű, vastag holografikus adattároló rendszer (hasznosító: Deutsche Thomson-Brandt GmbH)

Bitszervezésű mikroholografikus adattároló archiválási alkalmazásokra (hasznosító: Technische Universität Berlin és Deutsche Thomson-Brandt GmbH)

A kutatás főbb eredményei és a fejlesztés új műszaki megoldásai a partner intézményekkel közösen jegyzett 16 nemzetközi szabadalom bejegyzésével ipari jogvédelem alatt állnak. Ezen szabadalmak nemzetközi vizsgálat (PCT) után a világ több országában nemzeti szakaszban is bejegyzésre kerültek. [12-13, 21-23, 28-30, 39-46]

A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk:

1. Koppa P, Erdei G, Ujhelyi F, Várhegyi P, Ujvári T, Lőrincz E, Szarvas G, Hvilsted S, Ramanujam PS, Richter P, Data storage on holographic memory card, Proceedings of SPIE 4149: pp. 309-314. (2000)
2. P.S. Ramanujam, S. Hvilsted, F. Ujhelyi, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas, Physics and technology of optical storage in polymer thin films, Synthetic Metals Vol. 124, pp. 145-150 (2001)
3. László Domján, Pál Koppa, Gábor Szarvas, Judit Reményi, Ternary phase-amplitude modulation with twisted nematic liquid crystal displays for Fourier-plane light homogenization in holographic data storage, Optik Vol. 113, pp. 382-390 (2002)
4. J. Reményi, P. Koppa, L. Domján, E. Lőrincz, Phase modulation configuration of liquid crystal display, 19th Congress of the International Commission for Optics, Florence, Italy, 25-30 August 2002
5. Judit Reményi, Péter Várhegyi, László Domján, Pál Koppa, and Emőke Lőrincz, Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at 400 nm, Applied Optics Vol. 42, p. 3428 (2003)
6. Péter Várhegyi, Árpád Kerekes, Szilárd Sajti, Ferenc Ujhelyi, P. Koppa, E. Lőrincz, G. Szarvas, P.S. Ramanujam, Saturation effect in azobenzene polymers used for polarization holography, J. Appl. Phys. B 76, 397-402 (2003)
7. P. Koppa, P. Várhegyi, T. Ujvári, M. Lovász, G. Szarvas, F. Ujhelyi, G. Erdei, J. Reményi, Domján, A. Sütő, E. Lőrincz, Holographic data storage in thin polymer films, in Organic Holographic Materials and Applications, Klaus Meerholz, Editor, pp.165-177, Proc. of SPIE, Vol. 5216 (2003)
8. Péter Várhegyi, Pál Koppa, Ferenc Ujhelyi, E. Lőrincz, System modeling and optimization of Fourier holographic memory, Applied Optics, Vol. 44, Issue 15 Page 3024 (May 2005)

9. Pál Koppa, Phase to amplitude data page conversion for holographic storage and optical encryption, *Applied Optics* Vol. 46, No. 17 (2007)
10. T. Sarkadi, P. Koppa, F. Ujhelyi, J. Reményi, G. Erdei, E. Lőrincz, Holographic data storage using phase-only data pages, *Proceedings of SPIE Volume: 7000*, Article number 700004, 2008.
11. Sarkadi Tamás, Koppa Pál, Fázismodulált adatlapok a holografikus adattárolásban, *Kvantumelektronika*, ISBN 978-963-06-5922-2, (2008)
12. Pál Koppa, Judit Reményi, Ferenc Ujhelyi, Gábor Erdei, Method and system for parallel optical decoding of digital phase image to intensity image, PCT/EP2007/005328, WO/2008/000366
13. A. Barócsi, G. Erdei, P. Koppa, E. Lőrincz, J. Remenyi, F. Ujhelyi, Phase modulator system comprising a beam splitter and a linear polarisation mode phase modulator, *Lajstromszám: US7054051, HU20070000132*, (2010)
14. T. Ujvári, P. Koppa , E. Lőrincz, G. Szarvas and P. I. Richter, Phase Coded Recording in Polarization Holograms for Data Multiplexing and Encryption *Holography 2000*, 10-15 July 2000, St. Pölten, Austria SPIE Vol. 4149, 2000
15. P. Koppa, T. Ujvári, M. Lovász, G. Szarvas, A. Sütő, E. Lőrincz, Polarization holographic data storage, *SPIE's International Newsletter on Holography*, Vol. 14 p. 1 (2003)
16. T. Ujvári, P. Koppa, M. Lovász, P. Várhegyi, Sz. Sajti, E. Lőrincz, P. Richter, Secure data storage system based on phase-encoded thin polarization holograms, *J. Opt. A: Pure and Appl. Optics*, 6 pp. 401–411 (2004)
17. Pál Koppa, Tamás Sarkadi, Ferenc Ujhelyi, Judit Reményi, Gábor Erdei, Emőke Lőrincz, Optical encryption and encrypted holographic storage using phase-only data pages, *Optics & Photonics in Security 2007*
18. F. Ujhelyi, M. Lovász, Z. Göröcs, A. Sütő, P. Koppa, G. Erdei, E. Lőrincz, Phase coded polarization holographic system demonstration, *Proc. of SPIE 6252, Holography 2005*, Editors: Yury Denisyuk, Ventseslav Sainov, Elena Stoykova, pp. 209-213, 2006.
19. Lovász Mónika, Ujvári Tamás, Koppa Pál, A polarizációs holográfia biztonsági alkalmazásainak vizsgálata, *Kvantumelektronika Szimpózium, Budapest 2003*
20. Tamás Sarkadi and Pál Koppa, Quantitative security evaluation of optical encryption using hybrid phase- and amplitude-modulated keys, *Appl. Opt.* 51, 745-750 (2012)
21. Koppa Pál, Lőrincz Emőke, Szarvas Gábor, Richter Péter, Toth Peter, P.S. Ramanujam, Søren Hvilsted, Ujvári Tamás, Method for generating a phase code for holographic data storage, *Lajstromszám: US5940514, WO/2002/005270*, Közzététel éve: 2002

22. Domján László, Erdei Gábor, Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujvári Tamás, Method and apparatus for encrypting and authenticating of data using phase-coded holographic storage, P0104147, PCT/HU2001/000016, WO/2001/057602
23. Domján László, Erdei Gábor, Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujvári Tamás, Method and apparatus for the encryption of data P0104183, PCT/HU2002/000104, WO/2003/032300
24. Zoltan Karpati, Gabor Szarvas, Laszlo Domjan, Przygodda Frank , Hartmut Richter, Trautner Heiko, Pal Koppa, Shift selectivity calculation for finite volume holograms with half-cone reference beams, ISOM-ODS 2005, Honolulu, US, (2005)
25. B. Gombkötő, P. Koppa, P. Maák, E. Lőrincz, Application of the fast-Fourier-transform-based volume integral equation method to model volume diffraction in shift-multiplexed holographic data storage, Vol. 23, No. 11, pp. 2954-2960, J. Opt. Soc. Am. A. (2006)
26. Zoltán Kárpáti, Gábor Szarvas, László Domján, Frank Przygodda, Hartmut Richter, Heiko Trautner and Pál Koppa, Shift Selectivity Calculation for Finite-Volume Holograms with Half-Cone Reference Beams, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 45, No. 2B, pp. 1288-1289 , 2006"
27. Balázs Gombkötő, Pál Koppa, Attila Sütő, Emőke Lőrincz, Computer simulation of reflective volume grating holographic data storage, Vol. 24, No. 7., J. Opt. Soc. Am. A p. 2075 (2007)
28. G Szarvas, P Koppa, G Erdei, L Domján, P Kalló, Multilayer, multiplexed holographic data carrier with reflective arrangement and reader/writer head, Lajstromszám: HU20040000413, (2005)
29. Szarvas Gábor, Koppa Pál, Erdei Gábor, Domján L., Kalló P. , Sütő A., High data density volumetric holographic data storage method and system P0301354, HU0400052, WO/2004/102541, PCT/HU2004/000052 (2006)
30. Szarvas Gábor, Koppa Pál, Erdei Gábor, Domján L., Optical head and multiplexing methods for reflection type holographic storage using spatial filtering, EP1769495 , PCT/EP2005/052710, WO/2006/003077 (2006)
31. P. Koppa , G. Szarvas, G. Erdei, L. Domjan, E. Lőrincz, Multilayer holographic storage with confocal gaussian apodized filtering, Innovative Mass Storage Technologies, Aachen, Germany (2004)
32. Zs. Nagy, E. Dietz, S. Frohmann, S. Orlic, P. Koppa, Theoretical modeling of multilayer microholographic recording and readout, Conference on Laser and Electro Optics, München, (2005)
33. P. Koppa, F. Ujhelyi, P. Varhegyi, T. Ujvari, Z. Göröcs, Zs. Nagy, B. Gombkötő, E. Dietz, S. Frohmann, S. Orlic, E. Lőrincz, New results in the modeling and experimental investigation of holographic storage systems, COST P8 Meeting, Loutraki, Greece (2006)

34. Zsolt Nagy, Pál Koppa, Enrico Dietz, Sven Frohmann, Susanna Orlic, Emőke Lőrincz, Modeling of multilayer microholographic data storage, *Applied Optics* Vol. 46, Issue 5, pp. 753-761 (2007)
35. Zsolt Nagy, Pál Koppa, Enrico Dietz, Sven Frohmann, Susanna Orlic, Modeling material saturation effects on microholographic recording, *Optics Express*, Vol. 15, Issue 4, pp. 1732-1737 (2007)
36. P. Koppa, Zs. Nagy, B. Gombkötő, F. Ujhelyi, E. Lőrincz, E. Dietz, S. Frohmann, S. Orlic, Modeling Multilayer Microholographic Storage with Nonlocal and Nonlinear Storage Material Behavior, *Optical Data Storage 2007*, Portland (US) OSA Technical digest ISBN1-55752-840-3, (2007)
37. B. Gombkötő, Zs. Nagy, P. Koppa, E. Lőrincz, Modelling high density microholographic data storage: using linear, quadratic, tresholding and hard clipping material characteristics, *Optics Communications* 281(17), 4261–4267, (2008).
38. Örs Sepsi, Timo Feid, Sven Frohmann, Susanna Orlic, Balázs Gombkötő, Zsolt Nagy, Pál Koppa, Investigation of the spectral behavior of microholographic gratings in photopolymers *SPIE Optics + Photonics 2008*, Conference 7053: Organic 3D Photonics Materials and Devices II, paper No. 7053-21, San Diego , USA (2008)
39. G Szarvas, P Koppa, G Erdei, L Domján, A Sütő, Multilayer high datadensity data storage method and system with micro-holography, *Lajstromszám: HU0301354* (2004)
40. Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujhelyi Ferenc, Erdei Gábor, Lőrincz Emőke, Method and system for thin film multi-layer holographic data storage, *P0201186* (2002)
41. Ramanujam P S, Hvilsted Soeren [dk], Koppa Pal [hu], Lőrincz Emőke [hu], Richter Peter [hu], Szarvas Gabor, System and method for recording of information on a holographic recording medium, preferably an optical card, *Lajstromszám: US 7,315,501 Közzététel éve: 1999*
42. Toth Peter, Richter Péter, Lőrincz Emőke, Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujhelyi Ferenc, Holographic chip and optical system for the holographic chip, *Lajstromszám: EP1133717, Közzététel éve: 1999*
43. Szarvas G, Lőrincz E, Richter P, Koppa P, Erdei G, Fodor J, Kalló P, Sütő A, Domján L, Ujhelyi F, Eljárás adatjelek hordozón történő elhelyezésére, valamint eljárás és berendezés adatok holografikus rögzítésére és kiolvasására, *Lajstromszám: P0000518 , Közzététel éve: 2001*
44. Ramanujam P S, Hvilsted Soren, Koppa Pál, Lőrincz Emőke, Szarvas Gábor, Richter Peter, Toth Peter, Method and system for recording of information on a holographic medium, *Lajstromszám: US2003137706, WO/2001/057602, Közzététel éve: 2001*

45. Szarvas Gábor, Lőrincz Emőke, Richter Peter, Koppa Pál, Erdei Gábor, Fodor Józsa, Kalló Péter, Sütő Attila, Domján László, Ujhelyi Ferenc, Method for the distribution of data marks on a medium, and method and apparatus for the holographic recording and readout of data, Lajstromszám: WO0157859, Közzététel éve: 2001
46. Szarvas Gábor, Lőrincz Emőke, Richter Péter, Koppa Pál, Erdei Gábor, Fodor Józsa, Kalló Péter, Sütő Attila, Domján László, Ujhelyi Ferenc, Method and apparatus for the holographic recording and readout of data, Lajstromszám: EP1492095, Közzététel éve: 2004