

OTKA nyilvántartási szám: T 046667

## Zárójelentés

### Anyagok és rendszerek nagysűrűségű adattároláshoz

2004. április 1. - 2006. december 31.

Az adattárolás egyre nagyobb kapacitásigénye csak új megoldások segítségével érhető el, s ezekhez új típusú tároló anyagok fejlesztésére is szükség van. A kutatócsoport célul tűzte ki a nagysűrűségű optikai adattárolás anyagainak és rendszereinek vizsgálatát elsősorban a holografikus tárolók kutatása keretében. A közreműködő SZFKI feladata a szerves kristálytechnológia új lehetőségeinek kiaknázásával új anyagok és módszerek alkalmazása a holografikus adattárolásra.

#### 1. Eredményeink a holografikus adattárolás anyagai témájában

A holografikus adattároló potenciális felhasználóját a berendezés kapacitása, írási és olvasási sebessége, megbízhatósága és az eszköz kompaktsága érdekli, és mindenekelőtt az, hogy ezek a tulajdonságok a specifikált igen alacsony bithiba mellett teljesüljenek. A rendszerjellemzőket a gyakorlatban elsősorban az elérhető adattárolóanyagok tulajdonságai korlátozzák. A tárolóanyagok jellemzői és a rendszerparaméterek bonyolult kapcsolatban állnak, egy adott anyag típus optimális rendszerbeállítása során sokfajta kompromisszum lehetséges. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy mind a mai napig nem áll rendelkezésre az elméleti megfontolások alapján meghatározott tulajdonságokkal rendelkező tárolóanyag a holografikus rendszerek számára.

A holografikus tárolóanyagok legfontosabb tulajdonságai: az optikai minőség, az írási tulajdonságok és a stabilitás. Ezek közvetlenül szabják meg az elérhető adatsűrűséget és kapacitást, a be- és kimenő adatok sebességét és az elérhető bithiba-rátát.

A témavezető és az SZFKI témavezetője aktív volt a COST P8 Anyagok (WG1) és Rendszerek (WG2) munkacsoportjainak részvételével elkészített összefoglaló összeállításában, mely része lett az akció zárójelentésének [2<sup>1</sup>, 5]<sup>2</sup>. A hozzáférhető holografikus anyagok (szerves és szervesetlen) jellemzőiről részletes táblázatokat készítettünk referencialistával. Rajtuk kívül még másik három rendszerfejlesztő csoporttal elkészítettünk egy táblázat, amiben azokat a fontos anyagkövetelményeket gyűjtöttük össze, amelyekre egy adott specifikációjú rendszer működéséhez lenne szükség pl. terabyte (TB) kapacitású rendszerhez, memóriakártya alkalmazáshoz, vagy akár mikroszálas tároló fejlesztéséhez, nagymennyiségű adat archiválásához vagy mikroholografikus diszkhez.

Nemzetközi (dán, bolgár, magyar) szerzők együttműködésében elkészült egy könyvfejezet az azobenzol polimerekről polarizációs holografikus tárolásra, melyben az anyagok és kísérleti vizsgálatuk eredményei kerültek bemutatásra [32]. Spanyol partneremmel együttműködve vizsgáltuk az azobenzol polimerek egy fajtájában létrehozható holografikus rács diffrakciós hatásfokát piros lézerefény és egyidejű UV fény, illetve piros és kék lézerefény egyidejű vagy egymásutáni alkalmazásával [21].

A közreműködőnél a szervesetlen fotorefraktív kristályok közül az "önfixáló" tulajdonsága miatt különlegesnek számító bizmuttellúrit ( $\text{Bi}_2\text{TeO}_5$ , BTO) alkalmazásával érték el eredményeket. Ezt a kristályt ők növesztették elsőként, és különleges fotorefraktív

<sup>1</sup> A számok a Zárójelentés közleményeinek számára utalnak.

<sup>2</sup> [http://moebius.physik.tu-berlin.de/cost\\_p8/index\\_ie.html](http://moebius.physik.tu-berlin.de/cost_p8/index_ie.html)

tulajdonságait is ők fedezték fel. Az "önfixálás" a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a beírt hologram kevésbé érzékeny a beíró lézerhullámhosszon történő újabb bevilágításra, ezért a kiolvasás nem okoz jelentős sérülést, és multiplexelésnél (azonos helyre több hologram rögzítésénél) nem kell bonyolult és a végső modulációs mélységet rontó expozíciós protokolt alkalmazni. A pályázat során új kályhakonstrukcióval optimalizálták a BTO kristályok Czohralski növesztésének körülményeit, és jó optikai minőségű, homogén törésmutatójú, alacsony fényszórású, tiszta és adalékolt BTO kristályokat növesztettek.

A BTO kristályokban a hologramok beírás sebességének növelésére két módszert vizsgáltak: a rövid lézerimpulzusok hatását a beírás folyamatára [15, 16], illetve adalékok hatását a BTO kristályok fotorefraktív hatásfokának lehetséges növelésére. Tanulmányozták a hologram beírás jellegzetességeit és a hologramok tulajdonságait ismételt, rövid (3,5 ns) lézerimpulzusokat használva. Beírásra 100 Hz ismétlődési frekvenciájú frekvenciakétszerezett Nd:YAG lézer (532 nm) tipikusan 1000 impulzusát használták (15 mJ/cm<sup>2</sup> energiasűrűség). Kéthullámkeveréssel diffrakciós rácsot írtak be, amit egy Bragg szög alatt beeső folytonos üzemű (cw) He-Ne lézernyalábbal (633 nm) detektáltak. A biaxiális kristályban a minimális nyalábtorzulás elérésére két orientált kristályfelületre merőlegesen beeső egy-egy lézernyalábot használtak (90°-os konfiguráció). Ilyen kísérleti feltételek mellett 5%-os diffrakciós hatásfokot sikerült elérni, ami a Kogelnik model szerint a BTO kristályban 10<sup>-5</sup> törésmutató modulációnak felelt meg. Ez kisebb, mint a cw Nd:YAG lézerrel korábban elért 40%-os telítési hatásfok, de nagyságrenddel rövidebb idő alatt jött létre. Szakaszos kiolvasás során 80 óra elteltével 1,8 % hatásfokot lehetett mérni, míg folytonos kiolvasással ez az "önfixált" érték 1 % körül volt. A nanoszekundumos lézerimpulzusokat használó kéthullámkeveréses rendszerrel kétdimenziós hologramok beírására is sor került valós tesztminta (USAF 1951) alkalmazásával. A cw lézerrel rekonstruált kép megfelelő minőségű volt és időben állandó. A tesztmintát egyetlen ns-os impulzussal is sikerült kiolvasni, bár itt a jel/zaj arány kedvezőtlenebb volt. A holografikus tesztberendezésben oldalszervezésű digitális hologramokat is rögzítettek ns-os impulzusokkal. A vizsgált 200 x 200 bites oldal esetében a kontúrok élesek és egyenesek maradtak, és a bit-hiba arány (BER) 10<sup>-3</sup>-nál jobb volt.

A fotorefraktív kristályok érzékenységét az adalékokkal, egyrészt a töltéshordozó források, másrészt a csapdák mennyiségének növelésével, lehet javítani [9, 22, 29-31]. Mindkét célra csak olyan adalékok használhatók, amelyek beépülése homogén, és nem rontják a kristályok optikai minőségét. Korábbi tapasztalatok szerint BTO esetében ilyenek a ritkaföldfém ionok. A BTO kristályok fotogerjesztési hatásfokának (forrás) növelésére olyan ritkaföldfém adalékokat próbáltak ki, amelyekre a holografikus tárolásnál szóhajó látható tartományú gerjesztő lézerek hullámhosszának valamelyike illeszkedik az abszorpciós színekkel (Er<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup> és Tb<sup>3+</sup>). A kontrollként használt Yb-adalék esetében az Yb<sup>3+</sup> ionok csak töltéshordozó csapdaként szerepelhettek.

Meghatározták Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Er, Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Ho, Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Tb, és Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Yb kristályok abszorpciós színeit és megszerkeztették az elektronállapotok energiaszintjeit. Lumineszcencia mérésekkel vizsgálták az optikai gerjesztést követő folyamatokat. A Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Ho és Bi<sub>2</sub>TeO<sub>5</sub>:Tb kristályokba fotorefraktív rácsokat írtak be hullámkeverés módszerével cw Nd:YAG lézer 532 nm-es harmonikusát használva, mérték a fotorefraktív érzékenységet és a telítési diffrakciós hatásfokot a fotorefraktív konfiguráció (kristályorientáció, fénypolarizáció és sugármenet relatív irányai) függvényében. Megállapították, hogy a konfigurációfüggés az adalékotlan kristályoknak megfelelő, a G<sub>||</sub>[010] rácsvektor és E<sub>||</sub>[001] polarizációs irányokban maximális az érzékenység és a telítési diffrakciós hatásfok, ami nem tiszta elektro-optikai irány. Egyik adalék sem eredményezett lényeges érzékenység vagy telítési hatásfok növekedést. Ugyanakkor a Ho és Tb adalékok is

javították a kristályok optikai minőségét, és így csökkentették a fényszórás okozta háttérrel és diffrakciós hatások időbeli instabilitását.

A tanszéki kutatócsoport még jelentős eredménnyel büszkélkedhet a tároló anyagok modellezése területén is [36]. Az FP6 MICROHOLAS<sup>3</sup> projekt részeként is vizsgáltuk a fotopolimer tárolóanyag telítődésének hatását a mikrohologramok egymásutáni beírására (lásd később a mikrohologramok értelmezését). Az anyag viselkedésének leírására egy diffúzió alapú nemlokális modellt alkottunk, aminek alapján meghatároztuk a dielektromos állandó modulációját. A TU Berlinben felépített kísérleti rendszerrel ellenőriztük a szimulációs eredményeket és azokkal jó egyezést kaptunk.

## 2. Eredményeink a holografikus adattárolás rendszerei témájában

A térfogati holografikus rendszerek kutatása napjainkban újból nagy intenzitással folyik<sup>4</sup>. Két alapvetően különböző megközelítés ismeretes, s ennek alapján beszélhetünk lapszervezésű rendszerekről és bittárolású, ún. mikroholografikus technológiáról. A lapszervezésű rendszerek a digitális információt kétdimenziós adatlapok formájában tárolják. A mikroholografikus rendszerekben a bit, mint elemi információ, van eltárolva egy kisméretű (ezért mikroholografikus) hologramban. Mindkét megközelítésnek megvannak az előnyei és a hátrányai.

A lapszervezésű rendszerek vezető fejlesztői az Optware<sup>5</sup> (Japán), az InPhase<sup>6</sup> (USA) és a Deutsche Thomson-Brandt (Németország). Ez utóbbi cég vezeti azt az európai konzorciumot, amely a 6. Keretprogram Információs Társadalom Technológiai témakörben célzott kutatási támogatással lapszervezésű holografikus rendszer megvalósítására szerveződött (FP6 IST STREP – 511626, Advanced Technology for Holographic Storage – ATHOS).<sup>7</sup> A mikroholografikus technológiát a Siros<sup>8</sup> és a Berlini Műszaki Egyetem egy csoportja kutatja intenzíven.<sup>3</sup> Ez utóbbi vezetésével egy másik európai konzorcium dolgozik a demonstrátor elkészítésén (FP6 STREP project IST – 511437, Microholographic Data Disk for Archival Storage – MICROHOLAS). Az általam vezetett kutatócsoport mindkét európai projekt résztvevője. Fontos megemlíteni még a tárolóanyag-fejlesztők közül az egyik legeredményesebbet, az Aprilis<sup>9</sup> céget az USA-ból.

Kutatócsoportunk feladata a két európai projektben elsősorban a térfogati adattárolás modellezése, ami megegyezik az OTKA pályázat egyik célkitűzésével. A MICROHOLAS projektben a tárolóanyag viselkedésén kívül a teljes rendszer működését is modelleztük [23, 35]. A rendszermodell úgy írja le a beírás és kiolvasás folyamatait, hogy az egyes mikrohologramokon mint vastag hologramokon meghatározza az elektromágneses hullámok szóródását a Bragg effektus figyelembevételével elsőrendű Born közelítés és térfogati integrálás alkalmazásával. A modell alkalmas arra, hogy akár ezer mikrohologram hatását is figyelembe vegye. Eredményül meghatározható a bithiba aránya, s ezáltal a rendszer kulcselemeinek toleranciája. Az ATHOS projektben a lapszervezésű térfogati holografikus tárolás modellezésére kerestünk a mai asztali számítógépekkel kezelhető megoldást [11], ami szintén Born közelítésben oldja meg a térfogati integrált. Háromdimenziós Fourier transzformációs technika (3D FFT) alkalmazásával a számolás hatékonyságát 500 szorosára

<sup>3</sup> <http://www.physik.tu-berlin.de/microholas/>

<sup>4</sup> H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox (Eds.), Holographic Data Storage, Springer, 2000.

<sup>5</sup> <http://www.optware.co.jp/>

<sup>6</sup> <http://www.inphase-technologies.com/>

<sup>7</sup> <http://www.athos-holography.net/>

<sup>8</sup> R. R. McLeod, A. J. Daiber, M. E. McDonald, T. L. Robertson, T. Slagle, S. L. Sochava, and L. Hesselink, "Microholographic multilayer optical disk data storage", Appl. Opt. 44 (16), 3197-3207, 2005.

<sup>9</sup> <http://www.aprilisinc.com/>

megnöveltük és ezáltal lehetővé vált nagyméretű és akár reflexiós hologramok modellezése is [17, 23, 25]. A modellezések során új érdekes jelenségeket is sikerült feltárni. Úgy látjuk, hogy a 3D FFT alkalmazható a mikroholografikus rendszer modelljének kiegészítésére is. Segítségével a rendszermodellbe beépíthető lesz az anyag telítődésének hatása is. Ugyanez a feladat szintén megoldásra vár még az ATHOS lapszervezésű rendszerben is. Itt is szükség van a modell bővítésére az anyag szórási tulajdonságának figyelembevételével.

Lényeges részét képezte még a rendszerek kutatásának a korábban megkezdett, optikai kártyára alapozott, hordozható, kompakt, polarizációs holografikus rendszerek kutatása [1, 4, 12-14, 18]. A tároló anyag a reflexiós optikai kártyán csak néhány  $\mu\text{m}$  vastagságú. A rendszer kapacitása vékony anyag esetén csak nagyobb adatsűrűség elérésével növelhető, nincs lehetőség multiplexelésre. Elkészült egy könyvfejezet [27], mely átfogja a korábbi kutatások eredményeit is és tartalmazza a továbbfejlesztett rendszerekkel elért néhány eredményt. A rendszerek hasznosítására a biztonsági kártyapiacra látunk lehetőséget a referencianyalábra bevitt fázismoduláció alkalmazásával [3, 6, 8, 10, 13, 18, 19, 20, 23]. Ilyen irányú fejlesztést finanszírozott a Bayer Innovations az elmúlt években. Ebben a fejlesztésben a Tanszék kutató csoportja fontos szerepet töltött be.

A Bayer projekt eredményeképpen négy új szabadalom került bejelentésre. Ezek egyrészt védik az elkészített berendezések új megoldásait [26, 28, 34], másrészt egy új ötlet is szabadalmaztatásra került [24], aminek a felhasználásával, a korábbiaktól eltérő módon, lehetőség nyílik a tárolóanyagban rögzített fázisban modulált adatlapok egyszerű és olcsó módszerrel való helyreállítására. E témakörben a szabadalom benyújtását követően beküldött cikk az Applied Optics folyóiratban elbírálás alatt van [33]. A fázistárgy rögzítésének számos előnye látszik. Egyrészt fázistárgy alkalmazásával elkerülhetők a nagy intenzitású csúcsok a tárolóanyagban, s így az nem telítődik, nincs szükség simító optikai elem, pl. pixelezett fázismaszk vagy speciális modulációra képes térbeli fénymodulátor alkalmazására. Másrészt fázistárgy rögzítése is lehetséges fázisban modulált referencianyaláb alkalmazásával, ami új lehetőségeket nyitna a biztonságos adattárolás számára.

Az elvégzett kutatások eredményességét mutatja az is, hogy a támogatás alatt három PhD ösztöndíjasunk megszerezte a fokozatot és idén februárban beadásra került egy MTA doktori értekezés a témában.

### 3. Összefoglalás

A pályázat eredeti célkitűzésének megfelelően a nagysűrűségű optikai adattárolásra alkalmas anyagok és rendszerek kutatása terén értünk el fontos eredményeket. Az anyagok kutatásának területén az Atomfizika Tanszék kutató csoportja elsősorban a nemzetközi partnerek által kifejlesztett polimer minták optikai tárolásra való alkalmazhatóságát vizsgálta. Modelleztük és mértük az anyagok paramétereit és vizsgáltuk az anyagtulajdonságok hatását az optikai tároló rendszerek működésére. A közreműködő SZFKI optikai kristálymintákat készített és tesztelt, majd alkalmazta a mintákat optikai adattárolásra, vizsgálta a hologramok stabilitását és a kiolvasás hibáját. A rendszerek témájában a tanszéki csoport bekapcsolódott két európai konzorcium munkájába főleg a térfogati adattárolók modellezésének területén. A vastag anyagon való diffrakció számítására a térfogati integrál megoldásának új módszerét javasoltuk, melynek alkalmazásával lehetővé válik a térfogati holografikus rendszerek működésének komplett modellezése, beleértve a tárolóanyag viselkedését is. Új eredményeket értünk el az optikai kártyára alapozott, hordozható, kompakt, polarizációs holografikus rendszerek kutatásában is. Az összesen 36 publikációból 11 referált folyóiratcikk, 3 könyvfejezet és négy szabadalom. Az eredményekről összesen 16 rendezvényen, illetve konferencián számoltunk be.