Az adatbiztonság és az adatsűrűség növelésének lehetőségei holografikus adattároló rendszerekben

MTA Doktori értekezés

Koppa Pál

BME Atomfizika Tsz. Budapest 2012

dc_311_11 Tartalomjegyzék

1	Beve	zetés	4
2	A ho	lografikus adattárolás bemutatása	7
	2.1	A holografikus adattárolás alapelve	7
	2.2	Előzmények a lapszervezésű holografikus adattároló rendszerek kutatásában	8
	2.3	Előzmények az optikai és holografikus titkosítás kutatásában	17
	2.4	Előzmények a bitszervezésű mikroholografikus adattároló rendszerek kutatásában	19
	2.5	A holografikus tárolóanyagok legfontosabb jellemzői	21
3	A ta típus	árgyhullám modulációjának vizsgálata Fourier sú lap-szervezésű holografikus adattárolásban	25
	3.1	Tisztán fázisban modulált adatlapok vizsgálata	26
	3.2	A tárgyhullám modulációs módszereinek összehasonlítása	32
	3.3	Összefoglalás	34
4	A ho	lografikus adattárolás biztonságának vizsgálata	36
	4.1	Az optikai titkosítás biztonságának kvantitatív vizsgálata	36
	4.2	Titkosítás fáziskódolt referenciahullám használatával	40
	4.3	Titkosítás fázis- és intenzitás-kódolt referenciahullám használatával	50
	4.4	A kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás vizsgálata	54
	4.5	Összefoglalás	61
5	Vast adat	ag lapszervezésű Fourier típusú holografikus tárolás adatsűrűségének vizsgálata	62
	5.1	Vastag hologram felvételének és rekonstrukciójának modellezése	62
	5.2	Eredmények az eltolás-multiplexelt holografikus adattárolás vizsgálatában	64
	5.3	Összefoglalás	68
6	Bitsz adat	zervezésű mikroholografikus adattároló rendszer sűrűségének vizsgálata	70
	6.1	Mikrohologramok közti áthallás vizsgálata	70
	6.2	Az adatsűrűség vizsgálata	75
	6.3	Mikrohologramok közti áthallás csökkentése konfokális szűréssel	78

		dc 311 11	
	6.4	A diffrakciós hatásfok vizsgálata	85
	6.5	Nemlineáris holografikus tárolóanyagok vizsgálata	88
	6.6	Összefoglalás	93
7	Meg bem	yvalósított holografikus adattároló rendszerek utatása	95
	7.1	Holografikus memóriakártya író-olvasó berendezések	95
	7.2	Nagy kapacitású, lapszervezésű holografikus adattároló	96
	7.3	Mikroholografikus adattároló	98
8	Össz	zefoglalás	100
9	Kös	zönetnyilvánítás	104
1	0 Irod	lalomjegyzék	105
	10.1	Saját publikációk	105
	10.2	Hivatkozások	109

1 Bevezetés

Az információ tárolásának igénye egyidős az emberi civilizációval. A kőbe vésett vagy kódexekben leírt információ célja ugyanaz, mint a mai digitális adattárolásé: az információ megőrzése a későbbi korok számára és annak biztonságos megosztása más felhasználókkal. A jelenlegi digitális korban azonban lényegesen megváltozott a tárolandó adatok mennyisége, amely ma és az előre jelezhető jövőben is exponenciálisan növekszik. Rövidtávú információtárolásra jó megoldást nyújtanak a gyors ütemben fejlődő elektronikus és mágneses adattárolók, hosszútávú 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 azonban a jelenlegi szinthez képest nem növelhető lényegesen, annak a diffrakció jelenségén keresztül határt szab a használt fényforrás hullámhossza. A következő generációs optikai adattárolóknak használatba kell venniük a harmadik dimenziót, azaz térfogati adattárolást kell megvalósítaniuk. Az adattárolással foglalkozó szakemberek egybehangzó véleménye szerint erre a legígéretesebb jelölt a holografikus adattárolás, amely a 3 dimenzióban elérhető nagy adatsűrűség mellett magában hordozza a nagy sebességű párhuzamos írás és olvasás, valamint a gyors, tartalom szerinti keresés lehetőségét is. Az adattárolás ezen 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 nyújthat hatékony megoldást a referencia hullámfrontjára való érzékenysége révén.

A jelen dolgozatban összefoglalt 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. Célom annak vizsgálata volt, hogy ez az 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

4

javaslatával és ezen megoldások megvalósíthatóságának kísérleti bizonyítása volt. E 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 kutatásban az a felismerés vezetett, hogy az irodalomban eddig közölt egyszerűsített rendszer- vagy anyag-központú leírások nem megfelelőek a komplex jelenségek vizsgálatához. 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 minden a kísérletekben fellépő jelenség vizsgálatára valamint az adattárolás fő paramétereinek optimalizálására alkalmas.

A kutatás módszertanában a "klasszikus" megközelítést követtem, nevezetesen az adattároló rendszer és a hozzá kapcsolódó fizikai jelenségek tanulmányozása alapján fizikai modelleket állítottam fel, amelyekből számítógépes szimulációs programok készültek a lapszervezésű és a bitszervezésű rendszer vizsgálatára. Ezen szimulációs programok több száz rendszerelemet és fizikai paramétert tartalmaznak az optikai rendszer, az optoelektronikai eszközök és a holografikus tárolóanyagok leírására. A programcsomagok helyes működését és paraméterezését kísérletekkel való összevetés igazolta. A programcsomag ezután felhasználásra került ismert fizikai effektusok részletes vizsgálatára, újszerű rendszermegoldások tesztelésére, új aktív és passzív eszközök tervezésére és optimalizálására valamint a teljes adattárolás folyamatát leíró paraméterek kiszámítására. Megjegyzendő, hogy az új megoldások vizsgálatához a programcsomag folyamatos fejlesztése volt szükséges, így az a projekt előrehaladásával együtt folyamatosan fejlődött. 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 rendszer esetében prototípusok készültek, amelyek fejlesztésénél szintén nagymértékben támaszkodtunk a szimulációs programokra.

A disszertáció második fejezetében áttekintem a holografikus adattároló rendszerekre irányuló kutatás főbb állomásait, amelyek a jelen kutatás közvetlen előzményeinek tekinthetők. A harmadik fejezettől a hatodik fejezetig a saját kutatásaim eredményeit mutatom be a tézispontoknak megfelelő bontásban. A

5

dc_311_11 harmadik fejezet tárgyalja a tárgyhullám modulációjának vizsgálatát, azaz a fázisban modulált tárgyhullám megvalósítására irányuló kutatásokat. A negyedik fejezetben foglalom össze a lapszervezésű holografikus adattároló rendszer biztonságának növelésére irányuló kutatásokat. Az ötödik fejezet a lapszervezésű holografikus adattároló rendszer adatsűrűségére vonatkozó, míg a hatodik fejezet a bitszervezésű mikroholografikus adattárolók modellezésében és optimalizálásában elért eredményeket foglalja össze. A hetedik fejezetben bemutatom a kutatás eredményeit hasznosító holografikus adattároló fejlesztési projekteket és az elkészített rendszer prototípusokat. A dolgozatban szereplő szakirodalmi hivatkozásokat a 10. fejezet tartalmazza, a saját és az idegen hivatkozásokat külön-külön irodalomjegyzékbe gyűjtve. A szövegben a hivatkozásokat szögletes zárójelbe tett sorszámmal jelölöm (pl. [1]), saját publikációkra vonatkozó hivatkozás esetén a sorszám előtt egy S betű áll (pl. [S1]).

dc_311_11 2 A holografikus adattárolás bemutatása

2.1 A holografikus adattárolás alapelve

A holográfia adattárolásra való alkalmazását elsőként van Heerden javasolta 15 évvel azután, hogy Gábor Dénes nyilvánosságra hozta a holográfia alapelvét [1, 2]. A holografikus adattárolás koncepciója igen egyszerű: a tárolandó adatokat egy klasszikus holografikus elrendezés tárgyhullámába kódoljuk, azt interferáltatjuk a referenciahullámmal és a keletkező interferencia-csíkrendszert egy megfelelő fényérzékeny anyag segítségével rögzítjük (ld. 1. ábra). Kiolvasáskor a hologramot a referenciahullámmal újra megvilágítva a előáll a rekonstruált tárgyhullám amely tartalmazza az általunk beírt információt. A látvány-hologramokhoz hasonlóan a tárgyhullám általában egy képet hordoz, amelyben az adatokat a fény intenzitásának helyfüggése reprezentálja. A modern holografikus adattárolásban ez a kép térben és intenzitásban is diszkrét, azaz térben pixelezett intenzitásban pedig legtöbbször bináris. A legújabb kutatási eredmények közé tartozik a fázisban modulált képek használata, amelyet a 3. fejezetben részletesen bemutatok. A kép beviteléhez térbeli fénymodulátorokat (Spatial Light Modulator, SLM) használunk, amelyek kis méretű folyadékkristályos (LCD) ill. mikro-elektro-mechanikai eszközök (pl. Digital Micromirror Device, DMD). Az intenzitás-kép optimális kódolására speciális algoritmusok léteznek, melyek az adatokat blokkokba szervezik, biztosítják a "fehér" (nagy intenzitású) és "fekete" (elvileg nulla intenzitású) pixelek állandó számarányát és az esetleges hibás pixelek kijavítását. Az egy képbe beírandó kódolt adatok két-dimenziós mátrix formájában állnak elő, amelyet a szakirodalom adatlapnak ("data page") nevez. Innen származik a holografikus rendszerek osztályozásakor használt lap-szervezésű ("page oriented") rendszer elnevezése, amelyben az adatok laponként kerülnek tárolásra. Ennek ellenpárja a bit-szervezésű ("bit oriented") rendszer, ahol a tárgyhullám csak 1 bit információt tartalmaz és ezen biteket a hagyományos optikai adattárolókhoz hasonlóan egyenként rögzítjük.



1. ábra: A holografikus adattárolás alapelve

A fényérzékeny tárolóanyag lehet fotorefraktív kristály (kb. cm nagyságú tömbi formában), fotóemulzió (10-100 mikrométeres réteg formájában), vagy ma már legtöbbször fotopolimer (10-300 mikrométeres réteg formájában) illetve fotoanizotróp polimer (1-10 mikrométeres réteg formájában). A különböző holografikus adattároló rendszereket az adatszervezés mellett a tárolóanyag vastagsága és tárgy-referencia elrendezés alapján tudjuk megkülönböztetni egymástól. A következő fejezetben ezek alapján bemutatom a szakirodalomban leggyakrabban leírt rendszereket.

2.2 Előzmények a lapszervezésű holografikus adattároló rendszerek kutatásában

2.2.1 Fourier hologramok

A lapszervezésű holografikus adattároló rendszerek túlnyomó többségében az adatlap Fourier transzformáltja kerül rögzítésre [3]. Ezen megoldás legfőbb előnye, hogy a Fourier sík eltolásra és lokális hibákra kevéssé érzékeny így az adattárolás robosztusabb lesz mint a képsík vagy a Fresnel diffrakciós kép rögzítése esetén. A másik igen lényeges előny, hogy az adatlap meghatározó térfrekvenciáit a Fourier sík egy igen kis tartománya tartalmazza, így az adatsűrűség lényegesen nagyobb lehet mint bármely más síkban. Megjegyzendő, hogy a nagy adatsűrűség és a jó "adatminőség" (alacsony bit-hiba arány) itt is - mint minden adattároló rendszerben egymásnak ellentmondó követelmények, mivel a magasabb térfrekvenciák kiszűrése

értelemszerűen csökkenti a rekonstruált adatlap élességét. Fourier hologram esetében a hibamentes rekonstrukciót biztosító optimális adatsűrűség a térszűrés (Fourier szűrés) megfelelő megválasztásával finoman hangolható. Az adatlap, pontosabban az adatokat hordozó tárgyhullám Fourier transzformáltja előállítható optikai Fourier transzformáció segítségével: ha a tárgyat moduláló térbeli fénymodulátort (SLM-et) egy vékony lencse (vagy egy ún. Fourier objektív) első fókuszsíkjába helvezzük, a hátsó fókuszsíkban megjelenik a Fourier transzformált [4]. A holografikus fókuszsíkba helyezve és tárolóanyagot tehát a hátsó egy tetszőleges referenciahullámot biztosítva a Fourier hologram rögzíthető (ld. 2. ábra). A rekonstrukció során egy újabb optikai Fourier transzformációt alkalmazunk, és ezzel előáll a tárgy fordított állású valós képe.



2. ábra: Fourier típusú holografikus adattároló vázlata, (L₁, L₂, L₃ : lencsék, f: fókusztávolság; forrás: [3])

2.2.2 <u>Vékony fázis- és polarizációs hologramok</u>

A hologramok adattárolás céljára történő alkalmazása során – csakúgy, mint a látvány-hologramok és a méréstechnikában használt hologramok esetén – szinte kizárólag ún. fázishologramokat használunk, ahol az interferenciacsíkok törésmutatómodulációként kerülnek rögzítésre. A fázis-hologram nyilvánvaló előnye az

abszorpciót moduláló ún. intenzitáshologrammal szemben a lényegesen kisebb veszteség, azaz nagyobb diffrakciós hatásfok [5]. A fázishologram mint periodikus törésmutató moduláció áll elő amely általában a holografikus anyag teljes vastagságára kiterjed.

Vékony hologramról beszélünk, ha a hologram különböző mélységi rétegeiből érkező hullámok minden diffrakciós rendre konstruktívan interferálnak egymással, azaz fáziskülönbségük lényegesen kisebb mint 1 radián. Ez az ún. Raman-Nath diffrakciós rezsim melyet kvantitatívan az alábbi egyenlettel definiált p paraméter jellemez:

$$p = \frac{\lambda_0^2}{\Lambda \cdot n_0 \cdot \Delta n}$$
(2.1)

ahol λ_0 a fény hullámhossza vákuumban, Λ a rács periódusa, n_0 az átlagos törésmutató, és Δn a törésmutató modulációjának amplitúdója. Vékony hologram anyag esetén a p paraméter értéke általában sokkal kisebb, mint 1 [6,7].

Polarizációs hologramok esetén a hologram nem izotróp törésmutatómoduláció, hanem térben változó anizotrópia révén tárolódik [8]. A polarizációs hologram felvételénél egymásra ortogonális polarizációjú (lineáris vagy cirkuláris) referencia illetve tárgyhullámot használunk, így klasszikus értelembe vett interferencia nem keletkezik, de a teljes elektromágneses tér polarizációja térbeli modulációt mutat. A polarizált tér egy fotoanizotróp tulajdonsággal rendelkező anyagban térben változó kettőstörést kelt, amelynek nagysága az adott ponton megfigyelt intenzitással arányos, optikai tengelyének iránya pedig az adott pontban mérhető polarizációs iránynak felel meg. A polarizációs holográfia holografikus adattárolás szempontjából előnyös tulajdonsága a vékony rétegben is elérhető magas diffrakciós hatásfok, és a konjugált kép (vagy -1. rend) hiánya a hologram rekonstruálásakor [9].

2.2.3 Vastag hologramok, multiplexelés

Ha a p paraméter értéke lényegesen nagyobb mint 1 (Bragg diffrakció), akkor a rekonstruált képet kialakító – a hologram különböző rétegeiből érkező - hullámok

konstruktív és destruktív interferenciára is képesek, így azokat fázishelyesen kell figyelembe venni. Vastag tárolóanyagok esetén (ha p paraméter értéke lényegesen nagyobb mint 1) térfogati hologramok keletkeznek, amelyek a Bragg szelektivitás miatt lehetőséget biztosítanak az adatok multiplexelésére, azaz több adatlap egyazon helyre való rögzítésére különböző referenciahullámok segítségével. Például síkhullám referencia esetén a referenciahullám beesési szögét vagy hullámhosszát változtatva "szög-multiplexelést" illetve "hullámhossz-multiplexelést" hajthatunk végre, több síkhullám kombinációjából álló referencia esetén ezek relatív fázisát multiplexelést", összetettebb változtatva "fázis-kódolt hullámfrontok (pl. gömbhullám) esetén pedig a tárgy és a referencia relatív pozícióját változtatva eltolási-multiplexelést (vagy "shift multiplexelést") kapunk. Természetesen a multiplexeléshez szükséges, hogy egy adott referenciahullám ne olvassa ki a többi referenciahullám által rögzített hologramot. Ez egyik multiplexelési technikánál sem valósítható meg tökéletesen, hiszen az adott típusú multiplexelésre jellemző paraméter (szög, hullámhossz, fázis vagy pozíció) változtatásával a hologram diffrakciós hatásfoka egy folytonos függvényt követve tart nullához. A diffrakciós hatásfok értékét a beíró és kiolvasó referencia szög- (hullámhossz-, pozíció- stb) különbségének függvényében ábrázolva kapjuk az ún. szelektivitás görbéket, és ezen görbék lecsengésére jellemző jellegzetes távolságként (pl. az első nullhely, vagy az 1/e²-es hatásfokcsökkenés távolsága) definiáljuk szög (hullámhossz, pozíció, stb) szerinti Bragg szelektivitás értékeket. A különböző multiplexelési technikák vázlata és az őket jellemző Bragg szelektivitás értékek közelítő formulái az 1. táblázatban láthatók (ahol L a tárolóanyag vastagsága, Θ_r illetve Θ_s a referencia és a tárgyhullám beesési szöge, zfa gömbhullám referencia középpontjának távolsága a tárolóanyag középpontjától és λ a fény hullámhossza vákuumban.) Az 1. táblázatban látható paraxiális közelítésen alapuló szelektivitás-értékek ugyan nem alkalmasak a rendszer pontos leírására vagy optimalizálására, de értékes támpontokat illetve ökölszabályokat nyújtanak a rendszer koncepció kidolgozásához.



1. Táblázat: A főbb multiplexelési technikák összefolalása: elnevezésük (a.), elrendezésük vázlata (b.), és az őket jellemző Bragg-szelektivitás értékek közelítő formulái (c. (ahol L az anyagvastagság, λ a vákumbeli hullámhossz, Θ_{s} és Θ_{R} a tárgy és a referenciahullám beesési szöge, z_{s} pedig a gömbhullám referencia fókuszpontjának távolsága az anyag szimmetriatengelyétől.) (forrás: [3])

Látható, hogy pl. a hullámhossz szelektivitás egymással szemben terjedő tárgyés referenciahullám esetén optimális, éppen ezért a hullámhossz multiplexelt találkozunk 180°os rendszerekben gyakran geometriával azaz reflexiós hologramokkal. A szögszelektivitáson alapuló multiplexelési technikák a tárgy- és a referenciahullám által bezárt 90°-os szög esetén adnak legjobb szelektivitást, ezért ezen rendszerekre az 1. ábrán sematikusan ábrázolt elrendezés az optimális, ahol a tárgy és a referencia a téglatest formájú tároló közeg két merőleges lapján lép be. Ezen "kockacukor" geometria helvett ma legtöbbször a hagyományos optikai adattárolókban megszokott forgó korong geometriát használjuk, ahol a referencia és a tárgy optikai tengelyei által bezárt szög nem éri el a 90°-ot. Az egyazon pozícióba írt multiplexelt hologramok száma akár több ezer is lehet [10], azonban a végső adatsűrűséget a multiplexelés mellett meghatározza az egy hologramra vonatkoztatott adatsűrűség (lap adattartalma / hologram terület), és az optikai rendszerre, a multiplexelési technikára és a tárolóanyagra jellemző jel-zaj viszony. A teljes rendszer optimalizálása ezen egymásnak ellentmondó követelmények és igen sokrétű paraméterek mellett komoly kihívást jelent.

A szög-multiplexelt rendszerek legtöbbet vizsgált példáját mutatja a 3. ábra, amely az InPhase Technologies cég fejlesztésének eredménye [11] (ezen rendszer közvetlen előzményeinek tekinthetők az IBM [12] és Bell labs. Rendszerei [13]). A rendszer előnye a síkhullám referencia egyszerűségében rejlik, hátránya a tárgymind a referenciahullám nem merőleges beesése, amely a kiolvasott kép erős torzítását okozza. Ezen torzítás kompenzálására a kiolvasáshoz fázis-konjugált referenciahullámot használnak, amely síkhullám referencia esetén egyszerűen egy a rögzítő referenciával ellentétes irányban haladó síkhullám. Ily módon a kiolvasott hullám a tárgyhullám fázis konjugáltja lesz, és megfelelő pontosság esetén egyazon optikai rendszeren visszafelé terjedve az optikai rendszer hullámfront-aberrációit is részben kompenzálja.



3. ábra: Szög-multiplexelt holografikus adattároló rendszer vázlata (Rm: pásztázó tükör)

А fázis-kódolt multiplexelés lényegében a szög-multiplexelés továbbfejlesztésének tekinthető, ahol a különböző szögben beérkező referencia síkhullámok egyszerre vannak jelen, és a hullámfront módosítását ezen síkhullámok egymáshoz viszonyított fázisának modulálásával oldják meg [14]. N síkhullámból álló referencia esetén mindig található pontosan N darab ortogonális kód, amely a multiplexelt hologramok között minimális áthallást biztosít [15]. Bináris fázismoduláció esetén ezek tipikus példája a Walsh-Hadamard kód, amely felírható a matematikában ismert Hadamard [16] mátrix soraiként. Mivel a multiplexelés kizárólag a síkhullámok közötti relatív fáziskülönbséget használja ki, az ortogonális kódrendszer egy véletlen kezdőkódból is felépíthető, így az adattárolás hatékonyan titkosítható [17].

Hullámhossz multiplexelt rendszerekben [18,19] a multiplexelés legnagyobb terhét a fényforrás viseli, amelynek teljesítményre, stabilitásra, koherenciára vonatkozó követelmények mellett még széles tartományban hangolhatónak is kell lennie. Hullámhossz multiplexelés esetén az optikai rendszer látszólag egyszerűsödik, mivel nincs szükség referenciahullámot moduláló illetve eltérítő külső eszközre, ugyanakkor a teljes optikai rendszernek tökéletesen színre korrigáltnak kell lennie a fényforrás teljes hullámhossztartományában. A hullámhossz multiplexelt adattárolás egy új és eredeti változata a Lippmann féle

interferometrikus fotográfián alapul [20]. Ebben az elrendezésben (ld. 4.b ábra) nincs hagyományos értelembe vett referenciahullám, hanem a beeső tárgyhullám és a minta hátoldalához rögzített tükröző felületről visszavert tárgyhullám interferenciáját rögzíti. Ez lényegesen leegyszerűsíti az adattároló optikai rendszerét, mivel nincs szükség interferometrikus pontossággal és rendkívüli stabilitással összehangolt külön tárgy és referenciaágra.



4. ábra: Hullámhossz-multiplexelt holografikus adattároló rendszerek vázlata transzmissziós (a.) illetve Lippmann féle (b.) elrendezésben (forrás:[15], [16])

A eltolás-multiplexelt gömbhullám referenciát használó rendszereket mind transzmissziós [21] mind reflexiós [22, 23] elrendezésben vizsgálták. Ezen rendszer fő előnye, hogy a referenciahullám módosítása nem igényel semmilyen külső eszközt, azt az adathordozó mozgatásával érik el.



5. ábra: Eltolás-multiplexelt holografikus adattároló rendszerek vázlata transzmissziós (a.) illetve reflexiós (b.) elrendezésben (ND, neutrális szűrő; M1– M3,tükrök; BE, nyalábtágító; A1–A3, apertúrák; BS, nyalábosztó; PBS, polarizációs nyalábosztó; RPM, véletlen fázismaszk; HWP1, HWP2, fázistoló lemez; P, polarizátor; SH1, SH2 shutter; MS, lineáris mozgató; OL1–OL3, objektívek) (forrás:[21], [23])

A eltolás-multiplexelt holografikus adattárolók legújabb változata az ún. "kollineáris rendszer" [24] amelyben a tárgy- és a referenciahullám optikai tengelye azonos, általában merőleges a tárolóanyagra. A kollineáris rendszerben a referenciahullám az adatlap körül elhelyezkedő radiális pixelsorokból tevődik össze, amelyet a tárgyhullámhoz hasonlóan egy térbeli fénymodulátoron állítanak elő, és optikai Fourier transzformációjával vetítenek a tárolóanyagra. A "kollineáris rendszer" vázlata és az adatlap valamint a referencia bevitelére szolgáló SLM-kép a 6. ábra látható.



6. ábra: A "kollineáris rendszer" felépítése (a) és az adatlap valamint a referencia bevitelére szolgáló SLM-kép(b) (forrás [24])

2.3 Előzmények az optikai és holografikus titkosítás kutatásában

Digitális képek és adatok titkosítására számos javaslat született az 1980-as évektől kezdődően. Az optikai megoldás legfőbb előnye, hogy egy nagy pixelszámú képre (illetve adatlapra) egy lépésben végezhetők el olyan feldolgozási és kódolási műveletek (pl. képek komplex amplitúdójának pixelenkénti szorzása, Fourier transzformációja, konvolúciója stb.), amelyek algoritmikus elvégzése komoly számítógép-kapacitást igényel. A legtöbbet idézett megoldás az ún. "kettős véletlen fázisú titkosítás" (Double Random Phase Encryption, DRPE) amelyben egy-egy véletlen fázismaszkkal szorozzuk meg a titkosítandó képet és annak Fourier transzformáltját [25] (ld. 7. ábra). Az így titkosított kép dekódolásához ugyanazon fázismaszkokat használják a Fourier síkban. Ezen rendszer számos továbbfejlesztett változatát írták le szakirodalomban, melyek között a legfontosabbak a frakcionális Fourier transzformáción [26] alapuló megoldások illetve a fázis adatlapokon történő titkosítás [27, 28]. Heanue és szerzőtársai javasolták először az optikai titkosítás kombinációját a holografikus adattárolással, fázisban kódolt referenciahullám használatával [29].



7. ábra: Kettős véletlen fázisú titkosítás dekódolása (forrás [25])

Ezen optikai titkosító rendszerek előnye, hogy alapvetően a tárolás analóg, fizikai szintjén működnek, így egy nem megfelelő kulccsal kiolvasott képből az információ nem kinyerhető, sem optikai sem algoritmikus eszközökkel. Ugyanakkor a rendszer analóg tulajdonságai miatt az egymástól független titkosító kulcsok (maszkok, vagy maszk-pozíciók) száma nem nyilvánvaló. Emiatt a titkosítás erősségét nem könnyű kvantitatívan megbecsülni olyan egyszerű mérőszámokkal mint például az algoritmikus titkosítás kulcshossza. Ezért a kutatás során kidolgoztunk egy olyan eljárást amellyel az egymástól független kulcsok száma egyértelműen megbecsülhető, és ezen mérőszámot felhasználtuk a titkosítás optimalizálására (ld. 4. fejezet).

Az adatok biztonsága szempontjából a kulcshossz növelése mellett fontos megvizsgálni a titkosított adatokkal való visszaélés (titkosító kulcs megfejtése, illetéktelen olvasás, írás, módosítás stb.) lehetséges módszereit. A titkosítással foglalkozó kutatók és az önjelölt kódfejtők ("hackerek") nagy energiát fektetnek mind az algoritmikus mind az optikai titkosítási módszerek feltörésébe. A legkorszerűbb ún. aszimmetrikus kulcsú algoritmikus titkosítási eljárások megfejtésének kulcslépése általában egy igen nehezen invertálható matematikai függvény invertálása (pl. a széles körben elterjedt RSA algoritmus esetén két nagy prímszám szorzatának faktorizálása). A feltörés ebben az esetben tisztán algoritmikus, és annak sikere leginkább a rendelkezésre álló számítógépkapacitás függvénye. Az optikai titkosítási módszerek tisztán algoritmikus módon (optikai eszközök használata nélkül) nem támadhatók, mivel a helytelen kulccsal kiolvasott kép nem tartalmazza a titkosított információt. Mivel optikai titkosítás alapvetően lineáris művelet, az leírható a lineáris válasz elmélet segítségével, azaz a titkosított

kép a bemenet és a rendszer pont-válaszfüggvényének konvolúciójaként áll elő. A rendszer pont-válaszfüggvénye egy pontszerű bemenet vagy két egymástól csak egy pixelben különböző kép által adott kimenet vizsgálatával elvileg meghatározható [30,31], és a titkosítatlan adat dekonvolúciós eljárással visszanyerhető. Ezen problémára megoldást jelenthet nemlinearitás bevitele a rendszerbe pl. nemlineáris tárolóanyag használatával.

2.4 Előzmények a bitszervezésű mikroholografikus adattároló rendszerek kutatásában

A bitszervezésű ("bit-oriented") holografikus adattároló rendszerek egy hologramban egy bit információt tárolnak, így az adattárolás sűrűségét elsősorban a hologram mérete határozza meg. Emiatt szokás ezt az elrendezést mikroholografikus adattárolásnak is nevezni. A mikroholografikus adattárolást Eichler és kutatócsoportja tanulmányozta elsőként [32]. A mikrohologram két egymással szemben terjedő, és egyazon pontba fókuszált lézernyaláb interferenciájaként jön létre a fókuszpont kis környezetében. A gyakorlati megvalósításhoz a lézernyalábot a holografikus anyagba fókuszálják, és az anyagon áthaladó hullámot egy retroreflektor elrendezés visszaveri és nagy pontossággal ugyanarra a pontra fókuszálja (ld. 8. ábra). A létrejövő interferogram hengerszimmetrikus csíkrendszerét rögzítik a tárolóanyagban, és a rögzített hologramot egyetlen fókuszált nyalábbal reflexiós hologramként kiolvassák. Az információt egyszerűen a hologram jelenléte vagy hiánya hordozza, így egy forgó lemez kiolvasásakor az egymást követő mikrohologramokrol visszaverődő jel lényegében megegyezik a hagyományos optikai adattárolók jelével. A mikroholografikus adattároló rendszer egyik legfőbb előnye az egyszerű felépítés és a hagyományos optikai adattárolókkal való kompatibilitás a kiolvasás módszere, a szervo-rendszerek, az adatok kódolása szempontjából.



8. ábra: A "mikro-holografikus rendszer" felépítése (a) és egy mikrohologram interferencia-csík rendszere (b) (forrás [32])

Minthogy a mikrohologram transzverzális mérete megegyezik a diffrakciós folt méretével, így adott hullámhossz és numerikus apertúra esetén a hagyományos optikai adattárolókkal megegyező felületi adatsűrűség érhető el. Mivel a mikrohologram longitudinális mérete is korlátozott (fordítottan arányos a numerikus apertúra négyzetével), elvileg lehetőség van több rétegű adatelrendezésre, a rétegek közt akár 20 mikrométernél is kisebb távolsággal. A hagyományos optikai adattárolókkal ellentétben egy mikrohologram rétegen keresztülhaladó hullám igen csekély abszorpciós és reflexiós veszteségeket szenved, ezért a rétegek száma lényegesen nagyobb lehet, mint a hagyományos optikai adattárolók esetén. A mikroholografikus rendszerben a 2.2.3 fejezetben leírt multiplexelési technikák közül a hullámhossz-multiplexelés alkalmazható. A 9. ábrán látható hullámhosszban multiplexelt rendszer képezte a Microholas projekt kiindulópontját. Azt azonban észre kell vennünk, hogy a hullámhossz-multiplexelés szelektivitása fordítottan arányos a hologram longitudinális méretével (ld. 1 táblázat), és így erősen fókuszált mikrohologramokra igen kis számú hologram multiplexelhető, gyengén fókuszált hologramokra pedig - ahol a hologram longitudinális mérete és így a multiplexelés foka nagyobb – a hologram méretének növekedése szab határt az adatsűrűségnek.



9. ábra: Hullámhossz multiplexelt mikroholografikus adattároló rendszer vázlata (forrás [33])

A többrétegű mikroholografikus adattárolás jelenlegi két legfontosabb korlátja a rétegek közötti áthallásból származó zaj valamint a holografikus tárolóanyagok és a mikroholografikus rendszer közötti inkompatibilitás (korlátozott dinamikatartomány, térben nem-lokális viselkedés). Saját kutatásainkat ezen problémák megoldására fókuszáltuk. A mikroholografikus rendszer adatsűrűségének részletes vizsgálata a jelen dolgozat 6. fejezetében található.

2.5 A holografikus tárolóanyagok legfontosabb jellemzői

Egy holografikus adattároló rendszer alapvető tulajdonságait az előző fejezetben leírt rendszer-konfigurációk és a felhasznált eszközök paraméterei mellett elsősorban az adattárolóanyag határozza meg. Mivel a tárolóanyagok fejlesztése nem képezi a jelen kutatás tárgyát, azok kémiai összetételének és működési mechanizmusának részletes ismertetésére nem térek ki, hanem röviden ismertetem a felhasználói szempontból fontos tulajdonságaikat és az adattároló rendszer

dc_311_11 kulcsparamétereire kifejtett hatásukat.

A digitális adattárolás minőségét jellemző legfontosabb rendszer-paraméter a bithiba arány (BER). A tárolás bithiba aránya egy adott kódolás esetén a jel-zaj viszony egyértelmű függvénye, és azt a tárolóanyag a jel és a zaj oldaláról is befolyásolja. A jel nagyságát meghatározó fő anyagparaméter a diffrakciós hatásfok, amely elsősorban az elérhető törésmutató-moduláció és az anyag vastagságának függvénye, és sík tárgy és referenciahullám esetén a következőképpen írható fel [34]:

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot L \cdot \Delta n}{\lambda \cdot \cos \theta_i} \right]$$
(2.2)

Ahol L a tárolóanyag vastagsága, Δn a törésmutató modulációja, λ a hullámhossz és θ_i a beesési szöge. A fenti összefüggés alacsony hatásfokokra és kis beeséséi szögekre a következőképpen egyszerűsíthető:

$$\eta = \left[\frac{\pi \cdot \mathbf{L} \cdot \Delta \mathbf{n}}{\lambda}\right]^2 \tag{2.3}$$

Multiplexelt hologramok esetén az elérhető törésmutató-moduláció a hologramok között megoszlik, $\Delta n = \Delta n_{max} / M$, ahol Δn_{max} az anyagban elérhető maximális törésmutató-moduláció, M pedig a multiplexelt hologramok száma.

$$\eta = \left[\frac{\pi \cdot L \cdot \Delta n_{max}}{\lambda \cdot M}\right]^2$$
(2.4)

Az egy hologramra jutó hatásfok tehát a hologramok számának négyzetével fordítottan arányos. Az arányossági tényezőt szokás az anyagra jellemző konstansok kombinációjaként előálló anyagparaméterrel (M#) kifejezni [35]:

$$M\# = \frac{\pi \cdot \Delta n_{\max} \cdot L}{\lambda} \qquad \text{igy} \qquad \eta = \left[\frac{M\#}{M}\right]^2 \qquad (2.5)$$

Ahol M a multiplexelt hologramok száma, M# pedig az anyag dinamika tartományát jellemző anyagparaméter (M-number).

A jel-zaj viszony zaj oldalát a tárolóanyag három fő hatáson keresztül befolyásolja: Az első a fényszórás, amely az anyag lokalizált vagy nagy

térfrekvenciájú térfogati és felületi inhomogenitásaiból származik. (A hologram szempontjából lokalizált illetve nagy térfrekvenciás a zaj forrása, ha annak jellemző mérete a hologram méreténél lényegesen kisebb illetve térfrekvenciája hologramméret inverzénél lényegesen nagyobb.) Minthogy a szórt fény és a rekonstruált tárgyhullám az anyag ugyanazon tartományából ered, azt a rendszerben kiszűrni szinte lehetetlen, így az a detektoron egy lézer-szemcseképnek (speckle-nek) megfelelő zajt alkot. A szórt fényt annak a jelterületre jutó maximális hatásfokával vagy annak szög szerinti eloszlásával (BSDF) szokás megadni [36].

A második hatás a hullámfront-torzítás, amely elsősorban az adathordozó felületének illetve törésmutatójának lassan változó egyenetlenségéből származik, és a kiolvasott jel élességét befolyásolja. A holografikus anyag (és az optikai rendszer) által okozott hullámfront-torzítás kompenzálható ún. fáziskonjugált kiolvasással, amelyben a kiolvasó referenciahullám fázisa minden pontban éppen -1 szerese a beíró referenciahullám fázisának.

A harmadik hatás a "zsugorodás" (az angol szaknyelvben "shrinkage") amely az anyag expozíció után bekövetkező méret- illetve törésmutató-változása [37]. Ez a hatás elsősorban fotopolimereknél jelentős, ahol a polimerizáció során sűrűség illetve térfogat változás lép fel. Fontos megjegyezni, hogy a "zsugorodás" a szó köznapi értelmétől eltérően itt nem csak méretváltozást, hanem változatlan méret mellett történő átlagos törésmutató-változást is jelent. Mérőszáma az optikai úthossz relatív megváltozása az expozíció során a tárolóanyag teljes vastagságára vonatkoztatva:

$$SH = \frac{|OPL_2 - OPL_1|}{OPL_1} \tag{2.6}$$

Ahol OPL_1 illetve OPL_2 az optikai úthossz expozíció előtt illetve expozíció után. A zsugorodás hatására az interferogram csíkjainak periódusa illetve állásszöge kis mértékben megváltozik, ami Bragg illesztetlenséget okoz. Ez két hatáson keresztül is csökkenti a jel/zaj viszonyt: egyrészt a diffrakciós hatásfokot csökkenti, másrészt a a multiplexelt hologramok közötti áthallást növeli. Természetesen egy adott holografikus konfiguráció annál érzékenyebb a zsugorodásra, minél élesebb a Bragg szelektivitás görbéje, azaz minél nagyobb számú hologram multiplexelésére alkalmas. Nagy számú multiplexelésre alkalmas 0.2-1 mm vastag anyagok esetén a zsugorodásnál a hőtágulást is figyelembe kell venni. A holografikus tárolóanyag

dc_311_1 nagy mértékben meghatározza az adattároló rendszer adatsűrűségét is. Mint azt a 2.2.3 fejezetben megmutattam, a multiplexelhető hologramok száma és így az adatsűrűség is egyenesen arányos az anyag vastagságával

3 A tárgyhullám modulációjának vizsgálata Fourier típusú lap-szervezésű holografikus adattárolásban

A Fourier típusú holografikus adattároló rendszer leglényegesebb hátránya az, hogy az intenzitásban modulált adatlapok Fourier síkja rendkívül erős fluktuációkat mutat; így egyes helyeken (elsősorban a nulla térfrekvencián) a teljesítménysűrűség a teljes hologramra vonatkozó átlagos értéknél akár 5 nagyságrenddel is nagyobb lehet. Ez az érték meghaladja a holografikus tárolóanyagok dinamika tartományát, így a hologram felvételekor vagy a nulladrend viszi telítésbe az anyag válaszát, vagy az információt hordozó térfrekvenciák süllyednek bele a zajba [S1,S2]. A probléma megoldására célszerű bevezetni a képsíkban egy a hely függvényében változó fázistolást létrehozó eszközt amely az erős intenzitás csúcsokat "elkeni" és így a Fourier síkot homogenizálja. A szakirodalomból ismert ilyen passzív eszközök a fázismaszk [38, 39] és az axikon [40]. Ezen passzív eszközök kiválóan alkalmasak a Fourier sík simítására, ugyanakkor készítésük, rendszerbe illesztésük és beállításuk komoly nehézségekkel jár. A holografikus adattároló rendszer lényegesen egyszerűsíthető lenne, ha az adatok bevitelét szolgáló intenzitásmodulációt és a Fourier sík homogenizálását szolgáló fázismodulációt egyazon képsíkban egyetlen eszközzel végeznénk el. Ennek gyakorlati megvalósítására a szakirodalomban két módszert javasoltak: a térbeli fénymodulátor (SLM) és a fázismaszk integrálását [41], valamint a fázist és az amplitudót egyaránt moduláló SLM-et [42, S3-S5]. Az integrált megoldás az általában folyadékkristályos (LCD) SLM gyártástechnológiájának módosítását igényli, mivel a fázismaszk és az SLM pixelstruktúrája egymástól nem távolodhat el jobban transzverzális irányban az optikai rendszer transzverzális felbontásánál, longitudinális irányban pedig az optika mélységélességénél. A fázist és az amplitudót egyaránt moduláló háromállapotú üzemmód (ún. Hybrid Ternary Modulation rövidítve HTM) azonban az LCD speciális megvilágításával előállítható. A háromállapotú modulációval kapcsolatos saját eredményeket valamint a passzív eszközök kutatásában elért eredményeinket (nevezetesen egy új elveken alapuló fázismaszk tervező algoritmust, és a segítségével tervezett fázismaszk tulajdonságait) nem kívánom a jelen dolgozatban szerepeltetni, mivel azok korábbi doktori (PhD) eljárások téziseként szerepeltek.

A Fourier sík homogenizálása szempontjából szintén kiváló megoldás a tisztán

fázisban modulált adatlapok használata [43, 44]. A fázis adatlapok kiolvasására eddig javasolt interferometrikus módszerek igen érzékenyek a rendszer beállítására, rezgésére és hullámfront-aberrációira, így adattároló rendszerekben nem használhatók. A 3.1 fejezet tartalmazza a tisztán fázisban modulált adatlapok használatára és kiolvasására végzett kutatásaim eredményét, a 3.2 fejezetben pedig összehasonlítom a javasolt megoldás legfontosabb tulajdonságait a Fourier sík simítására eddig használt eszközökkel.

3.1 Tisztán fázisban modulált adatlapok vizsgálata

A tisztán fázisban modulált adatlapok használata a holografikus adattárolásban számos előnnyel kecsegtet: segítségével egyszerűen, külső homogenizáló eszközök és különleges térbeli fénymodulátorok nélkül megvalósítható a homogén Fourier sík. Fázis adatlapok használatával hatékonyabban kivitelezhető a holografikus memória tartalom szerinti keresése [45], és ugyanazon lézerteljesítmény mellett 3-5-ször nagyobb beíró teljesítmény érhető el a tárgyhullámban a tipikusan használt 20-30% fehér pixelt tartalmazó intenzitásban modulált képekhez képest. A fázis adatlapok használata komoly előnyökkel jár az optikai titkosító rendszerekben is: a tárgysík kódolása csak fázis adatlapokkal kivitelezhető [46], és a kettős kulcsú titkosítás is lényegesen hatékonyabban megvalósítható [47] mint intenzitásban modulált adatlapok esetén.

Ugyanakkor az adatok visszanyerése a kiolvasott fázisképből komoly nehézségeket vet fel. A szakirodalomban több interferometrikus [48,49] és fáziskontraszt [50, 51, 52] módszert is javasoltak a fázis adatlapok dekódolására, de ezek csak igen korlátozottan alkalmasak adattárolási célra, mivel interferometrikus pontosságot és rezgésmentes környezetet illetve inhomogén Fourier síkot igényelnek.

Ezen probléma megoldására egy újszerű közös utas interferométer használatát javasoltam [S9, S12], amelyben a fázis kép és annak egy (vagy több) pixellel eltolt "másolata" interferál egymással és így könnyen feldolgozható intenzitás képet eredményez a kamerán (ld 10. ábra)

Phase object electric field

1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	1	1	1	-1
-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
-1	1	1	-1	1	-1	1	-1

	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
	0	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
+	0	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
	0	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
	0	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
	0	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
	0	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
		-1	1	1	-1	1	-1	1	-1

11

311

Phase object shifted

dc

Superimposed phase objects

1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0
-1	2	-2	2	0	-2	2	-2	1
-1	0	2	0	0	0	-2	2	-1
1	-2	2	0	2	0	0	-2	1
-1	0	0	2	-2	0	-2	0	-1
1	-2	-2	2	2	0	2	-2	-1
-1	2	0	0	0	-2	0	2	-1
-1	0	2	0	2	-2	0	-2	1
0	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1

=

a.)

Phase object intensity

Shifted intensity

1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

1	1	1	1	1	1	1	1	0
1	4	4	4	0	4	4	4	1
1	0	4	0	0	0	4	4	1
1	4	4	0	4	0	0	4	1
1	0	0	4	4	0	4	0	1
1	4	4	4	4	0	4	4	1
1	4	0	0	0	4	0	4	1
1	0	4	0	4	4	0	4	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1

Intensity of superimposed phase objects

b.)

10. ábra: A fázis adatlap dekódolásának elve térerősség (a.) illetve intenzitás(b.) reprezentációban. Az első diagram mutatja a fázisban modulált tárgyhullámot, a második annak egy pixellel eltolt másolatát, a harmadik pedig e két hullám interferenciáját.

A példa kedvéért tekintsünk egy pixel-átlónak megfelelő eltolást a két kép között. Ebben az esetben az összeg térerőssége a következőképpen fejezhető ki a bejövő fáziskép Eⁱⁿ térerősségének függvényében:

$$E_{k,j}^{out} = E_{k,j}^{in} + E_{k+1,j+1}^{in}$$
(3.1)

ahol k és j az x illetve y irányú pixel indexek. Ha a bejövő fáziskép pixeleit 0 és π fázissal kódoljuk (azaz a beeső térerősség $E_{i,j}^{in} = E_0 \cdot e^{i \cdot 0} = E_0$ és $E_{i,j}^{in} = E_0 \cdot e^{i \cdot \pi} = -E_0$), akkor az összeg értéke 0 vagy $\pm 2 \cdot E_0$ és az intenzitás 0 vagy $4 \cdot E_0^{2}$:

$$I_{k,j}^{\text{out}} \propto \left| E_{k,j}^{\text{out}} \right|^{2} = \left| E_{k,j}^{\text{in}} \right|^{2} + \left| E_{k+1,j+1}^{\text{in}} \right|^{2} + E_{k,j}^{\text{in}*} \cdot E_{k+1,j+1}^{\text{in}} + E_{k,j}^{\text{in}} \cdot E_{k+1,j+1}^{\text{in}*} = E_{0}^{2} (2 \pm 2)$$
(3.2)

A dekódolás ezen elvét sematikusan a 10. ábra mutatja. Az adatlap véges mérete miatt a szélső pixelek 0-val interferálnak, így azok nem hordoznak információt, de az N-1 x N-1-es belső tartományban előáll a 3.2. egyenletnek megfelelő digitális intenzitáskép. A kapott kép információtartalmának dekódolásához egy egyszerű rekurzív összefüggés használható, amely az 1. egyenlet átrendezéséből adódik:

$$E_{k+1,j+1}^{in} = E_{k,j}^{out} - E_{k,j}^{in}$$
(3.3)

A fáziskép megkettőzésére és eltolására a képsíkban illetve a Fourier síkban is különböző nyalábosztó megoldások állnak rendelkezésre [53]. A Fourier síkban egy kis szögeltérésre van szükség a két képet hordozó hullámok között, amelyet számítógéppel generált hologrammal vagy Wollaston prizmával egyszerűen megvalósíthatunk. A képsík közelében részlegesen visszaverő vékony plán-parallel üveglemez vagy kettőstörő lemez használható. Ez utóbbit használtuk fel a rendszer kísérleti vizsgálatára a 11. ábraán vázolt elrendezés alapján.



 ábra. A fázis adatlap optikai dekódolásának kísérleti összeállítása (a.), a képet eltolva megkettőző kettőstörő lemez működése (b.) és geometriai adatai (c.) (BE: nyalábtágító, CP: cirkuláris polarizátor, BIS: kettőstörő lemez, P: polarizátor, O: ordinárius és E extraordinárius polarizáció

A kísérletben a frekvenciakétszerezett Nd:YAG lézer nyalábját kitágítva és cirkulárisan polarizálva egy fázis-moduláló térbeli fénymodulátorra vezettük [S13], ahol a hullámfront fázisát bináris (0 ill. π) modulációnak vetettük alá. A térbeli fénymodulátort egy 4f rendszerrel a CCD kamerára képeztük, és a képtérbe (a második lencse és a képsík között tetszőleges pozícióba) behelyezzük a kettőstörő lemezt, amelynek vastagságát és orientációját úgy határoztuk meg, hogy pontosan egy pixel-átlónyi eltolást valósítson meg az ordinárius és az extraordináius sugár között. Mivel a kettőstörő lemezt cirkuláris polarizációval világítottuk meg, az ordinárius és az extraordináius kép intenzitása megegyezik. Ahhoz, hogy a két kép között interferenciát figyelhessünk meg, egy polarizátort használunk melynek tengelye 45°-os szögben áll az optikai tengely és a kettőstörő lemez tengelye által meghatározott síkhoz képest. Az elrendezésben megfigyelhető képeket a 12. ábra mutatja. Várakozásainknak megfelelően a Fourier sík egyenletes szemcsekép-szerű eloszlást mutat, kiemelkedő nulladrend nélkül. A fázisképen látszanak a Fourier szűrés miatt megjelenő fázishatárok, és a rendszerben jelenlévő koherens zajok. Az eredményül kapott intenzitáskép kontrasztos és viszonylag zajszegény.

a.)



b.)



c.)

12. ábra: A fázis adatlap képe fázis-intenzitás átalakítás előtt (a.), után (b.) és a Fourier sík intenzitáseloszlása.

A javasolt elrendezés legfőbb előnye, hogy az interferenciában résztvevő két hullám közös optikai úton, egyazon optikai elemeken keresztül halad, így a hagyományos interferometrikus megoldásokkal ellentétben nem érzékeny az optikai elemek pozícionálására, hullámfront-aberrációira és rezgésére sem. Pontosabban: mivel a két interferáló hullám egymástól néhány mikrométer eltéréssel terjed, kizárólag azon lokális hibákra érzékeny, amelyek ezen a rövid távon jelentős fázisvagy amplitúdó-változást eredményeznek. Ezen lokális hibák (pl. porszem, karcolás a tárgy- és képsíkban) az érintett pixeleken intenzitás moduláció esetén is hibát okoznának. Ugyanezen hibák a Fourier síkban (a hologram síkjában) természetesen nem jelentenek problémát sem fázis sem intenzitás-moduláció esetén.

A módszer tűréseinek meghatározására számítógépes szimuláció [S6-S8] segítségével megvizsgáltuk a hologram rögzítés és kiolvasás pozícionálási tűréseit

oly módon, hogy felvétel és kiolvasás között megváltoztattuk a hologram és a referenciahullám relatív pozícióját. A javasolt módszerrel kiolvasott fáziskép a hologram mérethez viszonyított 9%-os pozícionálási hibára is hibamentesnek bizonyult, amíg pl. a síkhullámmal való kiolvasás már 1%-os pozícionálási hibára dekódolhatatlan képet ad [S9, S10]. A kapott képeket és a dekódolás minőségét jelző hisztogramköz pozíciófüggését a 13. ábra mutatja.







 13. ábra: A fázis adatlap képe a javasolt fázis-intenzitás átalakítás után hologram mérethez viszonyított 9%-os pozícionálási hiba esetén (a.), síkhullámmal való kiolvasás 1%-os pozícionálási hiba esetén, és a dekódolás minőségét jelző hisztogramköz pozíció hiba nagyságától való függése (c.)

3.2 A tárgyhullám modulációs módszereinek összehasonlítása

A tárgyhullám különböző modulációs módszereinek összehasonlítását a vékony polarizációs holografikus memóriakártya író-olvasó (HMC) rendszer paramétereivel végeztem, a Szimu programcsomag segítségével [S6-S8], amely Várhegyi Péter doktorandusz hallgatóval végzett közös munkánk eredménye. A különböző módszerek összehasonlításához három paramétert használunk. A *Q*-val jelölt paraméter a Fourier sík homogeneitását leíró mennyiség:

$$Q = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\acute{a}tlag}}$$
(3.4)

ahol $I_{\acute{a}tlag}$ a teljes hologram területén számított átlagos intenzitás, I_{max} pedig a legnagyobb csúcs maximális intenzitása. A második paraméter a bithiba-arány vagy angol rövidítése alapján BER. A bithiba-arány definíció szerint a kiolvasott a adatokban található hibás bitek száma osztva az összes kiolvasott bitek számával. Ezen definíció alapján a BER meghatározásának pontossága véges adatmennyiség esetén igen korlátozott: az összes kiolvasott bitek számának inverze. Számítógépes szimulációval vagy laboratóriumi körülmények között nagyobb pontosság érhető el a következő definícióval [54]:

$$BER \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\int_{K}^{\infty} w_0(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} w_0(x) dx} + \frac{\int_{-\infty}^{K} w_1(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} w_1(x) dx} \right)$$
(3.5)

ahol w_0 és w_1 a sötét pixelek eloszlásának felső illetve a világos pixelek eloszlásának alsó részére illesztett Gauss görbék (ld. 14. ábra) a kiolvasott kép pixeleinek intenzitás szerinti hisztogramján, *K* pedig a döntési küszöbérték, amely alatt egy pixel értékét 0-nak, felette 1-nek vesszük.



14. ábra: Az adatlap sötét és világos pixeleinek intenzitás eloszlása hisztogram formájában, és a BER definíciójának szemléletes értelmezése (világos illetve sötét pixelek eloszlása: folytonos fekete görbék, világos illetve sötét pixelek eloszlására illesztett haranggörbék piros illetve zöld szaggatott vonalak)

A fenti definíció pontos BER számítást tesz lehetővé: akár egyetlen adatlap (tipikusan néhány tízezer bit) kiértékelésével becsülhető a BER értéke akár 10⁻¹² nagyságrendben is. A hibás bitek leszámlálásával való BER számítás csak legalább 10¹² bit kiértékelésével lenne képes ilyen pontosságú becslést nyújtani.

A harmadik paraméter a hologram diffrakciós hatásfoka adott (esetünkben 200 μW) beíró fényteljesítmény mellett számolva. A különböző Fourier síkot simító eszközök közül a rendszer szempontjából az a legelőnyösebb, amelyiket a legkisebb BER és Q paraméterek illetve a legnagyobb diffrakciós hatásfok jellemeznek. A 2. táblázat mutatja a kapott eredményeket. A különböző modulációs módszerek összehasonlíthatósága érdekében minden rendszerre azonos szimulációs paramétereket használtam (adatlap fehér-aránya 50%, Fourier szűrés a Nyquist apertura 1.37 -szerese, adatlap mérete 128x128 pixel). Az összehasonlításból kitűnik, hogy az intenzitás-modulált adatlap a magas bithiba-arány miatt adattárolásra nem alkalmas, a "hagyományos" pixel illesztett fázismaszkot használó rendszer (pl. HMC rendszer, ld a függelékben) elfogadható bithiba-aránnyal, Fourier sík homogeneitással és diffrakciós hatásfokkal rendelkezik, ugyanakkor a kombinált amplitúdó- és fázis- moduláció, valamint a tisztán fázis-moduláció mindhárom célparaméterben lényeges javulást eredményez. Megjegyzendő, hogy e két utóbbi megoldás az optikai rendszert is lényegesen egyszerűbbé teszi, mivel nincs szükség

dc_311_11 pixel alatti pontosságú leképezésre az SLM és a fázismaszk között.

Moduláció	Intenzitás- moduláció	Intenzitás- moduláció és 2 szintes 6x8 pixel blokkméretű fázismaszk	Kombinált amplitúdó- és fázis- moduláció (HTM)	Fázis- moduláció
Intenzitás kép a hologram síkjában	•			
Bithiba-arány	0.43	0,059	0.0074	0.011
Fourier sík inhomogenitása	<i>Q</i> = 18063	<i>Q</i> = 225	25.7	21.2
Diffrakciós hatásfok	1.61%	3.5%	6.01%	10.53%
Adatsűrűség (bit /µm^2)	5.06	5.06	5.06	5.06
Megjegyzés	nem használható	Pixel alatti pontosságú illesztést igényel	3 állapotú SLM-et igényel	2 állapotú fázis-SLM-et igényel

2. Táblázat A Fourier síkot homogenizáló módszerek összehasonító táblázata.

3.3 Összefoglalás

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. [S1-S3, S6-S8]

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 bithibaarányt eredményeznek. [S3-S5, S10, S11, S13]

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. [S9-S12]

4 A holografikus adattárolás biztonságának vizsgálata

A holográfia biztonságtechnikai alkalmazása nem új találmány. Biztonsági hologramok milliói segítenek egy termék vagy okirat eredetiségének megállapításában. Ezen hologramok (és a hozzájuk hasonlítható egyéb optikai biztonsági elemek) legfontosabb tulajdonsága az, hogy készítésük, másolásuk vagy módosításuk igen költséges egyedi berendezéseket, rendkívül nehezen beszerezhető speciális anyagokat, jól őrzött mesterdarabokat és komoly szaktudást igényel. Összegezve, a biztonsági hologramok biztonsága a technológiai bonyolultságukon alapul. Másrészről a digitális információs technológiában széles körben elterjedtek az adatok digitális titkosításának különböző megoldásai. Ezek lényege, hogy egy titkosító kulcs és egy titkosító algoritmus segítségével a nyers digitális adatot kódolja, majd a kódolt adatot továbbítja annak felhasználójához, aki a megfelelő kiolvasó kulcs és dekódoló algoritmus segítségével azt értelmezni tudja. A digitális titkosítás biztonsága tehát az igen nehezen (rendkívül nagy számítógép-kapacitással) invertálható kódolási algoritmuson alapul. A holográfia lehetőséget biztosít e két látszólag egymástól távol eső biztonságtechnikai megoldás kombinációjára, amelyben a technológiai és az algoritmikus biztonság előnyei egymást erősítik, és így az eddigieknél lényegesen magasabb szintű védelmet nyújtanak adatainknak és dokumentumainknak. Heanue és szerzőtársai javasolták először az optikai titkosítás kombinációját a holografikus adattárolással, fázisban kódolt referenciahullám használatával [55]. A terület intenzív kutatása és kiterjedt szakirodalma ellenére az analóg és digitális technikát is felhasználó optikai titkosítási eljárások biztonságának kvantitatív jellemzésére nem született egységes leírásmód. Ezért a kutatás első célkitűzése a biztonság kvantitatív leírására alkalmas mérőszám bevezetése. Ezen mérőszám alapján lehetséges a javasolt optikai és holografikus titkosítási megoldások minősítése, és azok továbbfejlesztése. A fejezet második felében javaslatot teszek a kettős kulcsú titkosítás továbbfejlesztésére komplex referenciahullámmal, illetve fázisban modulált adatlapok használatával.

4.1 Az optikai titkosítás biztonságának kvantitatív vizsgálata

Az optikai titkosítás biztonságának legfontosabb kvantitatív mérőszáma az
egymástól független titkosító kulcsok száma. Két titkosító kulcsot egymástól függetlennek tekintünk, ha az egyikkel kódolt adat a másikkal dekódolva értelmezhetetlen kimenetet ad. Az adattárolásban és a távközlésben az adatot akkor tekintik 100% -ban értelmezhetetlennek, ha annak – a hibajavító kódolás után mért felhasználói szimbólumokra vonatkozó hiba-aránya 1. (Megjegyzendő, hogy bináris adatok esetén az értelmezhetetlen adat definíciójában nem célszerű a hibajavító kódolás nélkül mért úgynevezett nyers bithiba-arány használata, mivel annak 1-es értéke azt jelenti, hogy az adathalmaz minden bitjét ellenkezőjére változtattuk. Értelemszerűen az adathalmazban kódolt információ ez esetben a teljes üzenet negálásával triviálisan értelmezhető. Valóban hibás adathalmaz esetén a nyers bithiba-arány 0.5 közelében van, ami egyenlő egy teljesen véletlenszerűen választott, a bemenő adattal megegyező méretű digitális adathalmaz bithiba-arányával.) A független titkosító kulcsok számának kiszámításához meg kell vizsgálnunk, hogy a szimbólumhiba-arány hogyan függ a kódoló és dekódoló kulcsok eltérésétől. Ez az eltérés két digitális kulcs esetén egyszerűen úgy definiálható, mint a két kulcsban különböző bitek száma elosztva az összes bitek számával:

$$\kappa = \frac{N_{k\bar{u}l\bar{o}nb\bar{o}z\bar{o}_bitek}}{N_{\bar{o}sszes}}$$
(4.1)

A fenti definíció értelmében az egymástól független titkosító kulcsok számának kiszámításához fel kell használnunk a hibajavító kódolás alapvető tulajdonságait. A hibajavításhoz az adatot N bitből álló blokkokra osztjuk. Egy adott blokk hibás bitjeinek száma legyen E. Definiáljuk a szimbólumhiba-arányt a κ kulcseltérés függvényében a következőképpen:

$$e(\kappa) = E(\kappa)/N \tag{4.2}$$

e(κ) nyilvánvalóan nem egyértelmű függvény, (hiszen értéke függ a kódoló és dekódoló kulcs valamint adathalmaz a konkrét alakjától) hanem egy valószínűségi eloszlás, amelynek várható értéke κ egyértékű függvénye:

$$SER(\kappa) = \langle e(\kappa) \rangle \tag{4.3}$$

ahol SER az átlagos szimbólumhiba-arányt (Symbol Error Rate) (e(κ)) pedig az e(κ) valószínűségi eloszlás várható értékét jelöli. Az e(κ) valószínűségi eloszlást a 15. ábra szemlélteti, ahol a szimbólumhiba-arány konkrét értékeit szürke pontok, az

átlagértéket pedig folytonos vonal ábrázolja. Definiáljuk ezen valószínűségi eloszlás konfidencia intervallumát olyan módon, hogy az $e^+(\kappa)$ felső határt meghaladó szimbólumhiba-arány valószínűsége egy igen kis konstans érték ε , míg az $e^-(\kappa)$ alsó határnál kisebb szimbólumhiba-arány valószínűsége szintén ε :

$$\varepsilon = P(e^{+}(\kappa) \le e(\kappa))$$
(4.4)

$$\varepsilon = P(e^{-}(\kappa) > e(\kappa))$$
(4.5)

Ahol P(X) jelöli egy X esemény valószínűségét, ε pedig egy nullához közeli pozitív szám (pl. 10⁻¹²). Az e⁺(κ) és e⁻(κ) függvények értékét az ábrán vékony folytonos vonal jelöli. Ezen definíció alapján a szimbólumhiba-arány e(κ) értéke 1-2 ε valószínűséggel a két határérték közé esik.



15. ábra: A szimbólumhiba-arány mint valószínűségi eloszlás a κ kulcseltérés függvényében (szimbólumhiba-arány konkrét értékei: szürke pontok, a szimbólumhiba-arány várható értéke: folytonos vonal $e^+(\kappa)$ és $e^-(\kappa)$ függvények: vékony folytonos vonal, A és B pontok definícióját ld. a szövegben)

Vizsgáljuk meg először azt az esetet, amikor a kódoló és a dekódoló kulcs megegyezik (κ =0). A helyes kulccsal való kiolvasás ellenére a rendszer zajai bithibákat okozhatnak, azaz a szimbólumhiba-arány eloszlása tartalmaz nullától különböző értékeket. Ezen hibák kijavítására használjuk a hibajavító kódolást, pl a széles körben elterjedt Reed Solomon kódot [56]. A hibajavító kód javítja az adott blokk-hibát, ha a blokk hiba arány az adott hibajavító algoritmusra jellemző T

küszöbérték alatt van (e(κ)<T), viszont a hibajavítás nem lehetséges, ha e(κ)>T [57]. Ha a hibajavító kódolást úgy választjuk meg, hogy annak T küszöbértéke éppen e⁺(κ =0)-val egyezzen meg (A pont az ábrán), a hibajavítás kudarcának valószínűsége éppen ε lesz, azaz a javított adat átlagos blokk-hiba aránya pontosan ε lesz (ezt szokás felhasználói hibaaránynak is nevezni). A hibajavító kód optimális kiválasztásához tehát meg kell határozzuk a felhasználó számára elfogadható hibaarányt (melynek értéke tipikus digitális alkalmazásoknál pl. 10⁻¹²), és az adattároló rendszer jellegzetességének megfelelő e⁺(κ =0) függvény nulla helyen felvett értéke megadja a szükséges hibajavítási küszöbértéket:

$$T=e^{+}(\kappa=0)$$
 (4.6)

Ha a küszöbértéket ennél alacsonyabbra választjuk, akkor a hibák száma hibajavítás után magasabb lesz az elvártnál, ha pedig magasabbra, akkor a hibajavító kód felesleges redundanciát ad a tárolt adathoz. (A holografikus adattárolásban használt lapszervezésű adatokra szokásos T érték kb. 0.1, ami azt jelenti, hogy a hibajavító kód maximum 10 % szimbólumhiba-arányt képes javítani.)

Abban az esetben, ha a kódoló és a dekódoló kulcsok nem egyeznek meg (κ >0), κ növekvő értékeire nő a szimbólumhibák várható száma. Ahhoz, hogy a kiolvasott adat értelmezhetetlen legyen κ értékét addig kell növeljük, amíg gyakorlatilag minden szimbólum hibás nem lesz, azaz a helyes kiolvasás valószínűsége kisebb mint ε . Ennek megvalósításához szükséges és elégséges feltétel, hogy az e⁻(κ) függvény haladja meg a T hibajavítási küszöbértéket. Azaz κ legkisebb értékére, amelyre a helyes kiolvasás valószínűsége kisebb vagy egyenlő, mint ε :

$$T = e^{-}(\kappa_B) \tag{4.7}$$

A κ_B értékhez tartozó e⁻(κ_B) pontot a 15. ábrán B-vel jelöltük. Ezen konstrukció alapján két kulcsot függetlennek nevezhetünk, ha a köztük lévő különbség nagyobb, mint κ_B . Ahhoz, hogy egy új független kulcsot generáljunk a kulcs κ_B részét kell átkapcsolnunk az ellentétes bináris állásba. Ezt L=1/ κ_B –szer tehetjük meg amíg a teljes kódot az inverzére állítjuk, így a független kulcsok száma 2^L lesz. Ezt átszámíthatjuk az algoritmikus titkosításban megszokott digitális kulcshosszra, ami a kulcsok számának kettes alapú logaritmusa, jelen esetben

egyszerűen L=1/ κ_B .

4.2 Titkosítás fáziskódolt referenciahullám használatával

A fáziskódolt referenciahullám használatával történő titkosítás alapja az a felismerés, hogy egy fázismodulált referenciahullámmal felvett hologram egy attól különböző fázismodulációval rendelkező referenciahullámmal kiolvasva a rekonstruált tárgy helyett lézerszemcsekép-szerű zajt eredményez. Kutatásunk célja ezen titkosítási eljárás kvantitatív vizsgálata és megvalósíthatóságának kísérleti igazolása. A vizsgált elrendezést a 16. ábra mutatja.



16. ábra: Fourier típusú holografikus adattároló rendszer vázlata fázis-kódolt referenciahullámmal

A tárgyágban az adatok kódolását végző intenzitást moduláló térbeli fénymodulátort (SLM) egy 4f rendszer segítségével leképezzük a Fourier sík homogenitását biztosító fázismaszkra. Ezen intenzitás- és fázis-modulált kép optikai Fourier transzformáltját vetítjük a hologram síkjára egy Fourier objektív segítségével. A hologram síkján a tárgyhullám tehát kifejezhető az alábbi egyenlettel:

$$O(p,q) = FT\left\{A(x,y) \cdot e^{i\phi_A(x,y)}\right\}$$
(4.8)

Ahol O(p,q) a hologram síkján, A(x,y) pedig a térbeli fénymodulátor kimenetén mérhető térerősség amplitúdó, $\phi_A(x, y)$ a fázismaszk által végzett helyfüggő fázismoduláció, FT{} pedig a Fourier transzformációt jelöli. A referencia ágban lévő fázis modulátort az ábra szerint egy afokális rendszer segítségével

leképezzük a hologram síkjára. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a leképezésünk tökéletes, azaz a referenciahullám térerőssége a hologram síkján megegyezik a referencia ágban lévő fázis SLM kimenetével:

$$\mathbf{R}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_{\mathbf{R}}(\mathbf{p},\mathbf{q})}$$
(4.9)

Ahol R_0 a referenciahullám állandó amplitúdója, $\phi_R(p,q)$ a referencia helyfüggő fázismodulációja. A hologram kiolvasásakor használt referenciahullám (vagy próbahullám) hasonlóképpen írható:

$$\mathbf{P}(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_{\mathbf{p}}(\mathbf{p},\mathbf{q})} \tag{4.10}$$

A hologram rögzítése során a tárgy és a referencia interferenciáját rögzítjük. A fent definiált komplex amplitúdókkal ez a következőképpen írható fel:

$$I(p,q) = |R(p,q) + O(p,q)|^{2} = OO^{*} + RR^{*} + OR^{*} + RO^{*}$$
(4.11)

Ahol I az interferogram intenzitása, és az egyszerűség kedvéért a helyfüggést jelző (p,q) tagokat elhagytam. A holografikus tárolóanyagot lineárisnak feltételezve és az α arányossági tényezőt bevezetve felírhatjuk a holográfia alapegyenletét, amely megadja az R referenciával rögzített és P-vel kiolvasott kép komplex amplitudóját:

$$K(p,q) = \alpha \cdot P \cdot I = \alpha \cdot P(OO^* + RR^*) + \alpha \cdot P \cdot O \cdot R^* + \alpha \cdot P \cdot R \cdot O^*$$
(4.12)

Az eredményben szereplő tagok rendre a hologram nulladrendje, a rekonstruált tárgyhullám, illetve az ún. konjugált hullám. Mivel a hologram kiolvasása során a nulladrendet és a konjugált hullámot térben vagy polarizációban elkülönítjük, a továbbiakban elegendő a számunkra legfontosabb rekonstruált tárgyhullámmal foglalkoznunk. (Megjegyzendő, hogy vastag illetve polarizációs hologramok esetén a konjugált hullám meg sem jelenik.) A CCD kamerán a rekonstruált tárgyhullám optikai Fourier transzformáltja jelenik meg. Mivel a térfrekvencia síkjából (p,q) a valós képsíkba (x,y) transzformálunk, itt formálisan inverz Fourier transzformációt alkalmazunk (Megjegyzendő, hogy a Fourier transzformáció és az inverz Fourier transzformáció közti eltérés mindössze egy előjel, így a kétszeres optikai Fourier transzformáció megfelel egy oda-vissza transzformációnak és egy előjelváltásnak a koordináták síkjában.):

$$dc_{-x,-y)} = FT^{-1} \left[\alpha \cdot P \cdot O \cdot R^* \right] = \alpha \cdot FT^{-1} \left[P \cdot R^* \right] \otimes FT^{-1} \left[FT \left\{ A(x,y) \cdot e^{i\phi_A(x,y)} \right\} \right] =$$

$$= \alpha \cdot FT^{-1} \left[P \cdot R^* \right] \otimes A(x,y) \cdot e^{i\phi_A(x,y)}$$
(4.13)

A végeredményt kifejtve:

$$C(-x,-y) = \alpha \cdot FT^{-1} \Big[P_0 \cdot R_0^* e^{i(\phi_P - \phi_R)} \Big] \otimes A(x,y) \cdot e^{i\phi_A(x,y)}$$
(4.14)

Azaz a kamera síkjában megjelenik a bemenő adatlap komplex amplitúdója konvolválva a $P \cdot R^*$ (konjugált felvevő hullám és a rekonstruáló hullám komplex amplitúdóinak szorzata) inverz Fourier transzformáltjával. Abban az esetben, ha a felvevő és a rekonstruáló referenciahullámok fázisai megegyeznek, a $P \cdot R^*$ szorzat konstans (P_0R_0) értéket vesz fel, amelynek inverz Fourier transzformáltja egy Dirac delta, és a konvolúció eredménye megegyezik a bemenő adatlap komplex amplitúdójával. A CCD kamera által érzékelt intenzitás ebben az esetben egyszerűen:

$$|C(-x,-y)|^{2} = \alpha^{2} \cdot P_{0}^{2} \cdot R_{0}^{2} \cdot A(x,y)^{2}$$
(4.15)

A kamerán tehát megjelenik a bemenő adatlap fordított állású képe, amelyből a tárolt információ kiolvasható. Ha a felvevő és a rekonstruáló referenciahullámok fázisai nem egyeznek meg akkor a $P \cdot R^*$ szorzat térben változó $(P_0 \cdot R_0^* e^{i(\phi_P - \phi_R)})$ értéket vesz fel, amelynek inverz Fourier transzformáltja egy összetett komplex függvény. A bemenő adatlap komplex amplitúdója és ezen komplex függvény konvolúciója egy erősen zajos képet eredményez, amelyből a tárolt információ általában nem olvasható ki. Megjegyzendő, hogy a $FT^{-1}[P_0 \cdot R_0^* e^{i(\phi_P - \phi_R)}]$ konvolúciós kernel, amellyel a bemenő képet konvolváljuk nem függ a beíró és kiolvasó referenciahullámok abszolút fázismodulációjától, csak azok fázisának különbségétől.

A titkosítás kvantitatív jellemzéséhez felvettük a szimbólumhiba-arányt a beíró és kiolvasó kód különbségének függvényében 52 különböző adatlap használatával (ld. 17. ábra). Ezen konstrukció alapján két kódot egymástól függetlennek nevezzük, ha az egyik kóddal beírt hologramot a másik kóddal kiolvasva a szimbólumhiba-arány nagyobb lesz az 4.1 fejezetben meghatározott T küszöbértéknél, ami jelen esetben 10%. Ezután az 4.1 fejezetben leírt számítással meghatároztuk a fáziskódolt referenciahullámmal való titkosítás kulcshosszát, ami 20 bitnek adódott.

dc_311_11



17. ábra: A bithiba-arány a beíró és kiolvasó kód különbségének függvényében fáziskódolt referenciahullámmal való titkosítás esetén

A 20 bites titkosítás egy lehetséges kódkészletének meghatározásához a következőképpen jártunk el: véletlenszerű sorsolással 20 csoportba osztottuk a referencia térbeli fénymodulátor pixeleit, olyan módon, hogy minden csoportba egyenlő számú pixel essen. Egy tetszőleges induló fáziskód egyetlen pixelcsoporthoz tartozó pixeleit átváltva 0-ról π -re (vagy viszont), egy új kódot kapunk. Ezután további pixelcsoportokat átváltva további kódok generálhatók. (ld.18. ábra)



18. ábra: A kódkészletet generáló véletlenszerű algoritmus működési elve

dc_311_11 Könnyen látható, hogy az így generált kódkészlet pontosan 2²⁰ különböző kódot tartalmaz. Ezen 2²⁰ különböző kód egymástól független a fent definíció szerint, ha bármelyik kettőt használva a bithiba arány meghaladja a kritikus 10 %-ot. A kapott kódkészletnek 2⁴⁰ (kb. 10¹²) különböző párosítása lehetséges, így a kódok függetlenségének szisztematikus vizsgálata mind kísérletileg mind számítógépes szimulációval reménytelen vállalkozás. Az 4.14 egyenlet szerint azonban a kiolvasott kép nem függ a beíró és kiolvasó referenciahullámok abszolút fázismodulációjától, csak azok fázisának különbségétől. Mivel a bithiba-arány a kódok közti különbséggel monoton nő és a kódkészlet elemei közötti legkisebb különbség éppen egy pixelcsoport, a teljes kódkészlet akkor és csak akkor lesz egymástól független, ha az egymástól egy pixelcsoporttal különböző kódok egymástól függetlenek. Így 2^{20} különböző kód függetlenségének vizsgálata helyett elegendő 20, egymástól pontosan egy pixelcsoportban különböző kód vizsgálata. Az előzőekben leírt véletlenszerűen kialakított kódkészlet függetlenségének vizsgálatára a véletlen induló-kóddal beírt és a 20 különböző pixelcsoporttal módosított kóddal kiolvasott adatlapok bithibaarányát számítottuk ki a 3.1 fejezetben bemutatott számítógépes szimuláció segítségével. Az 52 adatlap feldolgozásából származó eloszlást a 19. ábra mutatja.



19. ábra: A véletlenszerűen kialakított 20 pixelcsoport függetlenségének vizsgálata (Az 52 adatlap feldolgozásából származó eloszlást ún. módosított box-plot-tal ábrázoltuk, amelyben a medián vízszintes piros vonal, az első és harmadik kvartilis a téglalap alsó illetve felső éle, a terjedelem a függőleges szaggatott vonal és az *outlier-ek* + *jelek*)

Az ábrán jól látható, hogy bizonyos pixelcsoportok (pl. a 2, 7, és 18 számmal jelöltek) valóban magas bithiba-arányt eredményeznek azaz kiválóan titkosítanak, viszont más pixelcsoportok (pl. a 4, 12, és 15 számmal jelöltek) nagyon alacsony bithiba-arányt eredményeznek, azaz titkosítás szempontjából használhatatlanok. A hiba oka az, hogy egyetlen pixel fázisának átváltása 0-ról π -re (vagy viszont) a pixel elhelyezkedésétől függően más-más hatással van a bithiba-arányra. Az optikai tengely közelében elhelyezkedő pixelek hatása erősebb, mint a hologram perifériájának megfelelő pixeleké, mivel ott a –a tárgyhullám inhomogenitása miattnagyobb a diffrakciós hatásfok.

A pixelek véletlenszerű csoportosítása helyett tehát egy olyan kódgeneráló algoritmust kell használnunk, amely figyelembe veszi a referencia pixelek különböző súlyát, és egyenszilárdságú kódokat eredményez. A továbbfejlesztett kód-generáló algoritmus a 20. ábraának megfelelően a következőképpen működik [S16, S21, S22, S23]. Kiválasztjuk a használni kívánt referenciapixelek számát (N). (A referenciapixelek és a referencia apertúra általában négyzetesek vagy téglalap alakúak, így a legtöbbször N=N_x*N_y, de az algoritmus tetszőleges geometriára alkalmazható). Véletlen szám generátor használatával generálunk egy kiinduló kódot amelynek minden R_{0,i} pixele fázismodulációval rendelkezik. Az első pixelcsoport kialakításához véletlenszerűen választunk egy pixelt a referencia SLM-en, majd annak fázisát π -vel módosítjuk. Ezután több különböző adatlapra megvizsgáljuk a kiinduló kóddal beírt és a módosított kóddal kiolvasott hologram bithiba-arányát. Ha a bithiba-arány 10% alatt van, egy további (eddig nem módosított) referenciapixelt adunk az első pixelcsoporthoz és módosítjuk fázisát π -vel. Amennyiben a bithibaarány 45% fölött van, elvetjük az adott pixel hozzáadását. Amennyiben a bithibaarány 10% és 45% közé esik, elfogadjuk a kész pixelcsoportot és egy új pixelcsoport kialakítását kezdjük meg a korábbi pixelcsoportokhoz nem tartozó pixelek módosításával. Ezen módszert ismételve egészen addig amíg minden pixelt be nem osztottunk, garantáltan olyan kódokat kapunk, amelyek beíró és kiolvasó referenciaként együtt használva legalább 10% bithiba-arányt eredményeznek, ami közel 100% felhasználói blokk-hiba-aránynak felel meg a hibajavító kódolás után. A fenti algoritmust lefuttattuk különböző referencia méretekre 6x6-tól 24x24 pixelig, és azt tapasztaltuk, hogy a pixelcsoportok száma 12x12 pixeles referenciaméretig

dc_311_11 növekszik afelett stagnál. A pixelcsoportok legnagyobb száma 21-nek adódott. A 21. ábra egy ilyen 21 elemű pixelcsoport függetlenségének vizsgálatát mutatja. Ezen pixelcsoportok használatával 2²¹ különböző referenciakód állítható elő. Könnyen belátható, hogy ezen 2²¹ kód közül pontosan 2²⁰ független egymástól, mivel a fáziskódolt referenciahullámmal való titkosítás sajátja, hogy a minden pixelében módosított kód (konstans π fázissal eltolt referenciahullám) nem független az eredeti referenciától.



20. ábra A kód-generáló algoritmus folyamatábrája, ahol N a referencia pixelek száma $R_{0,j}$ a kiinduló kód j pixele, mely véletlenszerű fázismodulációval rendelkezik $R_{n,j}$ az n. kód j. pixele F_j pedig a foglalt pixelt jelző flag (értéke 1, ha a pixel foglalt)



21. ábra: A továbbfejlesztett algoritmussal kialakított 21 pixelcsoport függetlenségének vizsgálata.

A fent leírt elméleti és számítógépes modellezési munka alátámasztására és a rendszer gyakorlati megvalósíthatóságának vizsgálatára felépítettük a 22. ábra látható kísérleti elrendezést. A kísérletben felhasználtuk a BME és az Optilink KFT közös fejlesztésben épült holografikus adattároló fej-egységet amely a 22. b és c ábrákon látható. A kísérletben 532 nm hullámhosszú frekvenciakétszerezett dióda-pumpált Nd:YAG lézert használtunk a polarizációs vékony hologramok rögzítéséhez azobenzén oldalláncú poliészter [58] tárolóanyagban. A tárgyhullám intenzitásmodulációjára króm maszkot, a referenciahullám fázis-modulációjára egy csavart nematikus (TN) fázisú LCD fénymodulátort használtunk, amely cirkulárisan polarizált megvilágítással bináris fázismodulátorként működik [S4, S5]. A kísérleti elrendezésben megvizsgáltuk a fenti algoritmussal generált 2²⁰ elemű kódkészlet véletlenszerűen választott elemeivel való hologram felvétel és rekonstrukció folyamatát [S14, S15, S18]. A rekonstruált képek a szimuláció eredményeivel jó egyezést mutattak, az azonos kóddal felvett és rekonstruált adatlapok jól kiolvashatóak, míg a különböző kódokkal felvett és rekonstruált képek lézer-

dc_311_11 szemcsekép-szerű véletlen intenzitáseloszlást mutattak (ld.23. ábra).







22. ábra Fáziskódolt referenciahullámmal titkosított holografikus adattároló laboratóriumi kísérleti összeállítása (a.) és a használt holografikus holografikus adattároló fej-egység felépítése



23. ábra Fáziskódolt referenciahullámmal titkosított adatlap részlete azonos (a.) illetve különböző (b.) kóddal felvéve és rekonstruálva

4.3 Titkosítás fázis- és intenzitás-kódolt referenciahullám használatával

A fázisban modulált referenciahullámmal elérhető 2²⁰ (azaz kb. egymillió) elemű kódkészlet még nem jelent igazán biztonságos rendszert, ugyanis 10 ms képkiolvasási és feldolgozási időt feltételezve a teljes kulcskészlet 10⁴ s azaz kb. 3 óra alatt végigfuttatható. A kulcshossz növelésére az alábbiakban megvizsgáljuk a komplex referencia-modulációval való titkosítás lehetőségét, amelyet Cheng javasolt [59], de előnyös tulajdonságait nem bizonyította.

A vizsgált elrendezés egy Fourier típusú holografikus adattároló rendszer, amely annyiban tér el a 16. ábrán szereplő elrendezéstől, hogy a referencia ágban fázis modulátor helyett fázis és amplitúdó modulátort használunk. A Fourier sík homogenizálása érdekében a 3. fejezetben leírt fázis adatlapokat használtuk 0 és π fázisokkal. A referenciahullám fázis-modulációjára szintén 0 és π értékeket, amplitúdó-modulációjára pedig 1 és c (c>1) értékeket használunk. A c amplitudó modulációs állapotban lévő pixelek arányát a teljes referencia pixelszámhoz képest jelöljük q –val. A rendszer pontos modellezésére figyelembe vettük az azobenzol tárolóanyag telítődési tulajdonságait és fényszórását [60,61].

A modellezés legfontosabb eredményeit a 24. ábra mutatja be. Látható, hogy az amplitúdó-moduláció bevezetése megszüntette a SER(κ) függvény tisztán fázisban modulált referenciahullám esetében megfigyelt szimmetriáját, és megnövelte a függvény meredekségét a kis κ értékekhez tartozó szakaszon. E két változás előnyös hatását kvantitatívan is megvizsgáltuk a 4.1 fejezetben leírt módszer segítségével.



24. ábra A hologram-kiolvasás szimbólumhiba-aránya a beíró és kiolvasó kód különbségének függvényében az amplitúdómoduláció különböző paraméterei mellett



25. ábra A titkosítás kulcshossza az amplitúdó-moduláció paramétereinek (a) és a rendszer jel-zaj viszonyának függvényében (b.)

A modell segítségével kiszámoltuk a titkosítás kulcshosszát az amplitudómoduláció különböző értékeire. Az eredmények alacsony amplitúdó-modulációs kontraszt (c ~1) esetén visszaadják a tisztán fázismodulált referenciánál tapasztalt 20 bites kulcshosszt, viszont az amplitúdómoduláció paramétereinek optimális beállításai mellett (c=8.4, q=0.95) egészen 73 bitig növelhető. Megfigyelhető, hogy

kontrasztarány további növelésével a kulcshossz csökkenő tendenciát mutat. E jelenség oka, hogy a nagy amplitúdó-kontraszt érzékenyebbé teszi a rendszert a fényszórásból származó zajokra, és így az azonos kulccsal beírt és kiolvasott hologramok blokkhiba-aránya elromlik. Következésképpen megállapítható, hogy az elérhető kulcshossz nem csak a modulációs paraméterektől, hanem a rendszer jel-zaj viszonyától is függ. Ennek vizsgálatára kiszámítottuk a maximális elérhető kulcshosszt a jel-zaj viszony függvényében, és megállapítottuk, hogy az monoton növekedést mutat, azaz a holografikus rendszer biztonsága lényegesen megjavítható a zajok (elsősorban a holografikus anyag szórásának) csökkentésével [S20].

Az eredmények alátámasztására megvalósítottuk a komplex referenciahullám modulációval rendelkező holografikus adattároló kísérleti elrendezését. A kísérletileg megvalósított legnagyobb amplitúdó-modulációs intenzitás-arány 1:38 volt, így a maximális kontraszt c=6.16. A 26. ábra a rögzített és kiolvasott adatlapok 20x20 bit méretű blokkjaiból mutat be néhány példát, a kódoló és dekódoló referencia modulácóval együtt.



26. ábra A kísérletben a rögzített és kiolvasott adatlapok részletei: a beíró referencia(a.), a beírt adatlap egy blokkja (b.), a helyes kiolvasó referencia (c.), a vele kiolvasott adatlap részlete (d.), véletlenszerű kiolvasó referencia (e.) és a vele kiolvasott adatlap részlete (f.)

A kísérleteket több adatoldalra különböző a beíró és kiolvasó kód különbségek mellett elvégezve felvettük a blokkhiba-arányt a beíró és kiolvasó kód különbségének függvényében (ld. 27. ábra). A grafikon tanúsága szerint a modellezés és a kísérlet eredményei jó egyezést mutatnak.



27. ábra A hologram-kiolvasás blokk-hiba-aránya a beíró és kiolvasó kód különbségének függvényében a kísérleti rendszerben (pontok) és a modellben (folytonos vonal) c=6, q=0.4 értéke mellett

4.4 A kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás vizsgálata

A "kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás" (Double Random Phase Encryption, DRPE) lényege, hogy egy-egy térben véletlenszerűen változó fázist adunk a titkosítandó képhez és annak Fourier transzformáltjához [62]. Fourier típusú holografikus adattároló rendszerben a kép kódolását a tárgyhullámon, a Fourier sík kódolását általában a referenciahullámon végezzük, a 28. ábraának megfelelő összeállításban.



28. ábra: Kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás megvalósításának vázlata Fourier típusú holografikus adattároló rendszerben.

A tárgyágban az adatok ködolását végző intenzitást moduláló térbeli fénymodulátor (Amplitude SLM) és a véletlenszerű fázist hozzáadó fázis SLM (phase SLM 2) egyaránt a képsíkban helyezkedik el. Ezt általában az intenzitás SLM fázis SLM-re való leképezésével oldják meg, de léteznek a komplex modulációt egy integrált eszközzel megvalósító megoldások is [S3, S5]. Hasonlóképpen a rekonstruált ágban elhelyezkedő és a tárgy fázismodulációját dekódoló modulátor (Phase SLM 3) és a kiolvasó CCD kamera illesztése is leképezéssel vagy egy eszközbe integrálással oldható meg. Megjegyzendő, hogy ez az összeállítás lényegében megegyezik az 4.2 fejezetben tárgyalt rendszerrel, azzal a kiegészítéssel, hogy az ott szereplő statikus fázismaszkot itt egy dinamikusan változtatható fázis SLM váltja fel, és a kiolvasott képet egy szintén dinamikusan változtatható fázis SLM modulálja. Ennek megfelelően a kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás vizsgálatához lineáris anyag esetén az 4.2 fejezetben kapott konvolúciós formula (4.14 egyenlet) a következő formában írható fel:

$$C(-x,-y) = \left(\alpha \cdot FT^{-1} \left[\mathbf{P}_0 \cdot \mathbf{R}_0^* \mathbf{e}^{\mathbf{i}(\phi_P(x,y) - \phi_R(x,y))} \right] \otimes \mathbf{A}(x,y) \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_A(x,y)} \right) \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_B(x,y)}$$
(4.4)

ahol ϕ_A a beírt ϕ_B pedig a kiolvasott tárgyhullám a fázismodulációja.

Vizsgáljuk meg először a képsíkban való kódolás hatékonyságát, azaz azt az esetet, amikor a beíró és kiolvasó referenciahullámok modulációja megegyezik! A fenti egyenlet ekkor a következőképpen egyszerűsödik:

$$C(-x,-y) = \alpha \cdot A(x, y) \cdot e^{i\phi_A(x, y)} \cdot e^{i\phi_B(x, y)}$$
(4.5)

Azaz a kiolvasott kép komplex amplitúdója csak egy $e^{i\phi_A(x,y)} \cdot e^{i\phi_B(x,y)}$ fázisfaktorban tér el a beírt adatlap amplitúdójától, és a kamera által érzékelt intenzitás nem változik. Megállapíthatjuk tehát, hogy a tárgysíkban alkalmazott fázismoduláció intenzitásban kódolt adatlap esetén önmagában nem alkalmas az információ titkosítására. Megjegyezzük, hogy a tárgysíkban használt fázismoduláció a Fourier sík homogenizálása miatt és elsősorban nem lineáris anyagtulajdonságok esetén javítja az 4.2 fejezetben tárgyalt fáziskódolt referenciával való titkosítást, de e tekintetben a statikus és dinamikus fázismaszk használata között nincs lényeges különbség.

Az 4.5 egyenlet mutatja, hogy a tárgysíkban alkalmazott fázismoduláció abban

az esetben alkalmas az információ titkosítására, ha az információ nem intenzitás, hanem fázis-modulációként van jelen [S17]. Ekkor az 4.5 egyenlet a következőképpen írható fel:

$$C(-x,-y) = \alpha \cdot \mathbf{A}_{o} \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_{O}(x,y)} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_{A}(x,y)} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{i}\phi_{B}(x,y)}$$
(4.6)

ahol $\phi_0(x, y)$ a beírt adatot hordozó térbeli fázismoduláció. Az információ a rekonstruált tárgyhullámban szintén térbeli fázismodulációként jelenik meg, melynek kiolvasására használhatjuk a 3.1 fejezetben javasolt közös utas interferométert. A titkosított (és a rekonstruált tárgyhullám információt hordozó fázisa a következőképpen írható fel:

$$\phi_{titk}(x, y) = (\phi_O(x, y) + \phi_A(x, y)) \mod 2\pi$$
(4.7)

$$\phi_C(x, y) = \left(\phi_O(x, y) + \phi_A(x, y) + \phi_B(x, y)\right) \mod 2\pi \tag{4.8}$$

Ez a művelet bináris fázismoduláció esetén ekvivalens az algoritmikus titkosításban használt one-time-pad eljárással [63], melynek definíciója:

$$Y = (X + K) \operatorname{mod} 2 \tag{4.9}$$

ahol X a titkosítandó információ, K a kulcs Y pedig a titkosított információ. A "one-time-pad" eljárás matematikailag bizonyíthatóan tökéletes titkosítás, azonban a használatához szükséges kulcshossz megegyezik az üzenet hosszával, ami mind a kódolást, mind a kulcsok kezelését és tárolását rendkívüli módon megnehezíti, ezért a gyakorlatban ritkán használatos. Megjegyzem, hogy e tekintetben az algoritmikus eljárásnál kedvezőbb lehet az optikai megvalósítás, mivel a fent vázolt optikai módszerrel egyetlen órajel alatt lehetséges nagy – akár több millió bites – adatsorok összeadása és moduló képzése, illetve a rendkívül hosszú kulcsok tárolása fázismaszkok vagy hologramok formájában. Az optikai megoldás további előnye, hogy a "one-time-pad" eljárás egyszerűen általánosítható többszintű illetve folytonos fázismodulációra is. A fázis adatlapon elvégzett kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás során nem szükséges az adatlap intenzitásmodulációja ezért a 28. ábraán bemutatott optikai rendszer tárgyága leegyszerűsíthető a 29. ábraának megfelelően.



29. ábra: Egyszerűsített optikai elrendezés fázis adatlapon elvégzett kettős véletlen fázis-kulcsos titkosításra

A titkosítás részletes vizsgálatára a 3.1 fejezetben leírt számítógépes modellt használtam, amely az 4.4 egyenlet lineáris modelljén túl a tárolóanyag nemlinearitását, a rendszer zajait, és a fázis-amplitudó konverzió tulajdonságait is figyelembe vette, valamint kiszámította a rekonstruált adatlap bithiba arányát. A számítást 128 x 128 pixeles adatlapokon végeztem el bináris (0, π) fázismodulációt használva a tárgysíkon és a referenciahullám kódolása nélkül. A kiolvasott adatlapok részleteit és a kapott hisztogramokat a 30. ábra mutatja. Az ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy mind a kiolvasott adatlap, mind a kiolvasott adatlap pixeleinek intenzitáseloszlását ábrázoló hisztogram jellegében hasonló korrekt illetve inkorrekt kulcs használatával, ugyanakkor a logikai 1 bitek és 0 bitek hisztogramja korrekt kulcs esetén szétválik, inkorrekt kulcs esetén összekeveredik. A bithibaarány értéke rendre 0, illetve 0.477.

311 11 dc a.) *b.*) 500 500 400 400 Total histogram Logical 1-s No. Of occurances No. Of occurance Logical 1-s Logical 0-s 300 Logical 0-s 200 100 100 0 0 0 50 100 150 200 250 300



150

CCD grey level (0..255)

d.)

CCD grey level (0..255)

30. ábra: Tárgysíkban való kódolás bináris (0, π) fázismoduláció használatával. Az ábrán a számítógépes modellezés eredményei láthatók: a kiolvasott 128 x 128 pixeles adatlap részletek korrekt (a.) illetve inkorrekt kulcs (b.) használatával, valamint a kiolvasott adatlap pixeleinek intenzitáseloszlását ábrázoló hisztogram ugyancsak korrekt (c.) illetve inkorrekt kulcs (c.) használatával,

300

250

200

A következő lépésben megvizsgáltam a tárgysík és a referenciahullám együttes kódolásával felvett hologramokat. A 31. ábrán látható eredmények mutatják, hogy a referenciahullám kódolása megváltoztatta mind a kiolvasott kép mind a hisztogram jellegét. A kép lézerszemcseképszerű, és ennek megfelelően a hisztogram lokális maximumok felvétele nélkül exponenciális lecsengéssel tart a nullához.

0

50

100



31. ábra: Kettős véletlen fázis-kulcsos titkosítás során kiolvasott kép inkorrekt kulcs használatával(a.), és a kiolvasott kép pixeleinek intenzitáseloszlását ábrázoló hisztogram (b.) A BER értéke 0.48613.

A következőkben megbecsüljük a tárgysíkban elvégzett titkosítás független kulcsainak számát. Ehhez felhasználjuk a 4.1 fejezetben leírt módszert, amelynek értelmében két kulcs egymástól független lesz, ha az egyikkel kódolt adat a másikkal dekódolva hibajavító kódolás után mért blokkokra vonatkozó hiba-aránya 1. A hibajavítás során az adatot q bitből álló szimbólumokba szervezik, és N_b szimbólum alkot egy adat-blokkot. A hibajavító algoritmusra jellemző T küszöbérték azt jelzi, hogy az adott algoritmus maximálisan T N_b hibát képes egy blokkban kijavítani, ezen érték felett a blokk hibás lesz. Azaz két kód függetlenségének szükséges és elégséges követelménye, ha azok legalább T N_b szimbólumban különböznek, azaz az ún. Hamming távolságuk nagyobb, mint T N_b. A független kódok számának megbecsléséhez az összes lehetséges kód számát el kell osztani azon kódok számával, amelyek Hamming távolsága egy tetszőleges kódhoz képest kisebb, mint T N_b [64]:

$$N_{k} = \frac{N_{total}}{N_{Ham}} = \frac{q^{N_{b}}}{\sum_{j=0}^{T \cdot N_{b}} \left(\frac{N_{b}!}{j! \cdot (N_{b} - j)!}\right) \cdot (q - 1)^{j}}$$
(4.10)

Ahol N_k a független kódok száma, N_{total} az összes lehetséges kód száma, N_{Ham} az egymástól T. N_b Hamming távolságnál közelebb lévő kódok száma. A számítás eredményeit a 32. ábra mutatja, amelyen a független kódok számának kettes alapú

logaritmusa (azaz a bináris kulcshossz) látható az adatblokk bitekben kifejezett mérete (n=q. N_b) és a szimbólumméret (q) függvényében.



32. ábra: A tárgysíkban elvégzett titkosítás bináris kulcshossza az adatblokk bitekben kifejezett mérete (n=q N_b) és a szimbólumméret (q) függvényében (q=8 piros görbe, q=16 kék görbe, q=20 fekete görbe)

Látható, hogy az elérhető kulcshossz a blokkméret monoton növekvő függvénye, a gyakorlatban használt Reed Solomon kódokra (pl. n=2048) néhány százas értéket ad. Nagy blokkméretek esetén, amikor az egész adatlap egyetlen hibajavító blokk (pl. n=10⁶) a kulcshossz akár 10⁵ értéket is felvehet. Ez a kulcsszám lényegesen meghaladja az algoritmikus titkosításban használatos kulcsok számát. Az elektronikus titkosítással ellentétben ezen nagy kulcshosszak az optikai titkosításban nem okozzák a feldolgozás (kódolás, dekódolás) idejének megnövekedését, hiszen az optikai megoldás egyetlen órajel (pontosabban SLM illetve CCD frame-idő) alatt párhuzamosan végzi el a műveleteket. Megjegyzendő, hogy az extrém nagy blokkméretek (n=10⁴- 10⁶) esetén a hibajavítás minősége is javul, ugyanakkor a számítási igénye jelentősen megnő, ezért nagy blokkméretekre a Reed Solomon kódolás helyett ún. "turbo" kódokat használnak [65].

4.5 Összefoglalás

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. [S14-S16, S20]

2.2 Rámutattam, hogy a fázis-kódolt referenciahullám segítségével elérhető titkosítás biztonsági szintje korlátozott: az egymástól független kódszavak száma mindössze 2²⁰. Megvalósítottam egy számítógépes kódszó-optimalizáló algoritmust, melynek segítségével 2²⁰ egymástól független, egyenszilárdságú kódszóból álló kulcskészlet készíthető. [S16, S18-S23]

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 2⁷³-ra bővíthető. [S20]

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 tárgyhullám 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. [S17]

5 Vastag lapszervezésű Fourier típusú holografikus adattárolás adatsűrűségének vizsgálata

5.1 Vastag hologram felvételének és rekonstrukciójának modellezése

Vastag hologramon bekövetkező ún. Bragg diffrakció modellezésére számos módszert javasoltak az irodalomban, ezek közöl a legjelentősebb a klasszikus csatolt hullám elmélet és annak továbbfejlesztett változatai (Coupled Wave Analysis: CWA és Rigorous Coupled Wave Analysis RCWA) [66,67], melyek a bejövő és a diffraktált hullámokat síkhullámok lineáris kombinációjaként kezelik és így kiválóan használhatók periódikus törésmutató-moduláció kezelésére. Sajnos a holografikus adattárolásban a beíró és kiolvasó hullámok igen összetettek és gyakran nem írhatók le véges számú síkhullám kombinációjaként. Tetszőleges hullámfront kezelésére képesek a végeselem és véges differencia módszerek (pl. Finite Difference Time Domain, FDTD) [68,69], ezek számítási igénye azonban igen nagy, a mai számítástechnikai eszközökkel csak igen kis (néhány ezer µm³-es) tartományok modellezhetők. Ez a számítási térfogat elegendő lézer diódák, hullámvezetők vagy fotonikai kristályok modellezésére, hologramokéra viszont jelenleg még nem, mivel a lapszervezésű adattárolásban használt hologramok tipikus térfogata néhányszor 10^7 μm³. Az adattárolásban használt hologramok modellezésére célszerű olyan közelítő számítást alkalmazni, amely figyelembe veszi ezen fázishologramok legfőbb sajátosságát, nevezetesen azt, hogy a hologramban a törésmutató változása lényegesen kisebb mint az átlagos törésmutató. Ezért választásunk a Born közelítésre esett [70], amely a gyenge indexmodulációt mint perturbációt veszi figyelembe a hullám terjedése során. A Born közelítés előnye ezenkívül, hogy megoldása egy konvolúciós integrálra vezet, amelynek kiszámítására hatékony numerikus módszerek állnak rendelkezésre. A számításhoz az elektromágneses hullámok nem mágneses közegben való terjedését és szóródását leíró hullámegyenletből indulunk ki, amely a Maxwell egyenletekből néhány lépésben levezethető:

$$\Delta \underline{\underline{E}} - \mu_0 \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \underline{\underline{E}}}{\partial t^2} = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \underline{\underline{E}}) + \mu_0 \cdot \frac{\partial \underline{j}}{\partial t}$$
(5.1)

Szabad áramoktól és szabad töltésektől mentes, lineáris és izotróp anyagokban

dc_311_11 az egyenlet tovább egyszerűsödik:

$$\Delta \underline{\underline{E}} - \mu_0 \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \underline{\underline{E}}}{\partial t^2} = -\operatorname{grad}\left(\frac{\underline{\underline{E}} \cdot \operatorname{grad}(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)$$
(5.2)

A fenti 5.2 egyenlet jobb oldala, amely kizárólag inhomogén anyag (azaz térben változó permittivitás) esetén van jelen, formálisan forrásként kezelhető. Green függvények segítségével a hullámegyenlet megoldása a következő integrál alakban írható fel:

$$\underline{\underline{E}}(\mathbf{r}) = \underline{\underline{E}}_{0}(\mathbf{r}) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{V} \underline{\underline{G}}(|\underline{\mathbf{r}} - \underline{\mathbf{r}'}|) \cdot \underline{\underline{S}}(\mathbf{r})) dV$$
(5.3)

ahol <u>E</u>₀ a homogén egyenlet megoldása (holografikus rács esetén a kiolvasó hullám) <u>G</u> a hullámegyenlet Green tenzora, <u>S</u> pedig a forrás, jelen esetben a 5.3 egyenlet jobb oldala. A forrástag további egyszerűsítéséhez monokromatikus tereket feltételezünk ω frekvenciával és a dielektromos permittivitást felbontjuk egy átlagos dielektromos állandó és egy térfüggő moduláció összegére: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot [\varepsilon_r + \delta \varepsilon(\underline{r})]$. Ezzel a forrástag és az integrálegyenlet a következő alakra egyszerűsödik:

$$\underline{\underline{E}}(\underline{\mathbf{r}}) = \underline{\underline{E}}_{0}(\underline{\mathbf{r}}) + \frac{1}{4\pi} \iiint_{V} \underline{\underline{G}}(|\underline{\mathbf{r}} - \underline{\mathbf{r}}'|) \cdot \omega^{2} \mu_{0} \delta \varepsilon(\underline{\mathbf{r}'}) \cdot \underline{\underline{E}}(\underline{\mathbf{r}'}) dV$$
(5.4)

A Born közelítés abban áll, hogy a forrás tagban szereplő teljes térerősséget a kiolvasó hullám \underline{E}_0 térerősségével helyettesítjük, és így az eddig implicit egyenlet egy egyszerű konvolúció kiszámításával megoldható lesz. Ez a közelítés gyenge perturbáció (azaz kis szórt térerősség ill. gyenge permittivitás-moduláció) esetén jó eredményt ad, és iteratív módon kiterjeszthető a perturbációszámítás további rendjeire oly módon, hogy a kapott megoldást újra és újra behelyettesítjük az egyenlet jobb oldalába.

A kapott konvolúciós egyenlet megoldására egy numerikus algoritmust fejlesztettünk ki, amely 3 dimenziós gyors Fourier transzformáció (FFT) alkalmazásával számítja a konvolúciót [S24-S26]. Az elvégzett számítások alapján az tapasztaltuk, hogy a 3D FFT algoritmus akkor hatékony, ha az elektromos tér, permittivitás függvény és a Green függvény megfelelően mintavételezett értékei a teljes számítási térfogatra egyszerre betölthetők a számítógép operatív memóriájába. Ez 2GB operatív memóriát tekintve kb. 10µm x 10µm x10µm számítási térfogatot

jelent. A gyakorlatban fontos adattárolási problémák mérete ennek néhány ezerszerese, mivel az anyag vastagsága és a hologram mérete is a 100µm-es tartományban van. Erre a mérettartományra a 3D FFT nem használható, ezért a számítást továbbfejlesztettük úgy, hogy a hologram felületére merőleges (a fő terjedési iránynak megfelelő) z tengely mentén direkt integrálást az x-z sík mentén pedig 2D FFT-t használunk a következőképpen [S25, S27]:

$$\underline{E}(\mathbf{r}) = \underline{E}_{0}(\mathbf{r}) + \frac{\omega^{2} \mu_{0}}{4\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}} IFT_{xy} \Big[FT_{xy} \Big\{ \underline{G}(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \Big\} \cdot FT_{xy} \Big\{ \delta \varepsilon(\underline{r'}) \cdot \underline{E}(\mathbf{r'}) \Big\} dz^{`}$$
(5.5)

Ahol FT_{xy} és IFT_{xy} az x-y síkban elvégzett Fourier illetve inverz Fourier transzformációkat jelöli. Ez az algoritmus már nagy méretű hologramok modellezésére is használható, de természetesen a probléma méretével gyorsan növő számítási időt igényel. Példaképpen egy 512µm x 512µm területű és 150µm vastagságú, 400nm-es hullámhosszon felvett reflexiós hologram rekonstrukciója 0.2µm laterális és 0.05 µm mélységi mintavételezési periódussal kb. 50 óra futási időt jelentett egy 2006-ban korszerűnek nevezhető személyi számítógépen (Pentium 4 processzor 3 GHz órajellel, 2 GB RAM).

5.2 Eredmények az eltolás-multiplexelt holografikus adattárolás vizsgálatában



33. ábra: Eltolás-multiplexelt adattárolás vázlata: rögzítés (a.) és rekonstrukció (b.)

A fenti számítási megoldások használatával megvizsgáltuk az eltolásmultiplexelt holografikus adatrögzítés illetve visszaolvasás folyamatát. A

szakirodalomban leírt gömbhullám referenciával rendelkező eltolás-multiplexelt holografikus adattároló rendszer vázlata a 33. ábra látható. A beírás során a gömbhullám referencia és a síkhullámok lineáris kombinációjaként előálló tárgyhullám létrehozza a hologramot. A következő hologramot a holografikus anyagba kis Δx_t ávolsággal eltolt pozícióba írjuk be. A Δx eltolás lényegesen kisebb, mint a hologram mérete, így a hologramok átlapolódnak a holografikus anyagban. Ezen procedúrát egy sorban folytatva és az y irányban Δy eltolásokkal újabb sorokat beírva ún. eltolás-multiplexelt hologramokat kapunk, ahol a multiplexelés M szorzószáma (az egy hologram-méretnyi területre átlagosan beírt hologramok száma) a következő:

$$M = \frac{d_{holo}^{2}}{\Delta x \cdot \Delta y}$$
(5.6)

Ahol d_{holo} a hologram mérete.

Az eltolási multiplexelés fő kérdése, hogy az ilyen módon szuperponált hologramok mely feltételek mellett olvashatók ki egymástól függetlenül. A rekonstrukció során a kiolvasó gömbhullám maximális hatásfokkal azt a hologramot olvassa ki, amelyik a pontosan a kiolvasó hullámnak megfelelő pozícióban került rögzítésre, mivel ebben az esetben a kiolvasó hullámfront és a kiolvasandó fázisrács között a hologram minden pontjában teljesül a Bragg feltétel - ún. tökéletes Bragg illesztettség lép fel. A beíró és a kiolvasó gömbhullám pozíciója közötti eltolás esetén azonban -a hologram különböző pontjaiban eltérő mértékben - Bragg illesztetlenség lép fel, mivel a beíró és a kiolvasó hullámfrontok egymástól szögben elválnak. Az eltolás növelésével a Bragg illesztetlenség nő, és ezzel a kiolvasott hologram intenzitása csökken. Az eltolási multiplexelés kulcs paramétere az ún. eltolási-szelektivitás görbe, amely megmutatja, hogy a hologram anyag egy adott pozíciójában beírt hologram milyen diffrakciós hatásfokkal olvasható ki a referenciahullám eltolásának függvényében. A szakirodalomban leírt paraxiális közelítésen alapuló analitikus modell [71] csak abban az esetben ad hatásfok csökkenést, ha a tárgyhullám beesése és a referenciahullám optikai tengelye nem esik egybe. Merőlegesen beeső referenciahullámot és attól az y-z síkban Θ szögben eltérő tárgyhullámot feltételezve a paraxiális modell csak y irányú eltolásra ad hatásfokcsökkenést (ezt szokás szelektív iránynak nevezni), x ill. z irányú eltolás

esetén ezen modell szerint a hatásfok nem változik a hologram méreténél lényegesen kisebb eltolásra. Az y irányú szelektivitásgörbe a fenti referencia szerint oszcillálva csökken és periódikusan nullhelyeket ad. Ennek megfelelően a eltolás-multiplexelt rendszereket úgy tervezték, hogy az egymást követő hologramok egymástól éppen akkora távolságra legyenek, mint a szelektivitásgörbe maximuma és első vagy második nullhelye [72].



34. ábra: Az új numerikus modell illetve a szakirodalomban használt analitikus közelítés segítségével számolt eltolási szelektivitás görbék (paraxiális közelítés: folytonos vonal, numerikus eredmények: pontozott vonalak)

A 34. ábra a fenti numerikus modell illetve a szakirodalomban használt analitikus közelítés segítségével számolt eltolási szelektivitás görbék összehasonlítása látható 25.6 µm anyagvastagság, 0.6 numerikus apertúra, 10° beesési szögű tárgynyaláb és 400 nm-es hullámhossz esetén. Mint az ábrán látható, az új numerikus modell segítségével kapott eredményeink gyökeresen eltérnek a korábbi eredményektől [S25]: a szelektivitásgörbe az y irányban monoton csökkenő tendenciát mutat, nullhelyek és oszcilláció nélkül, hasonló félértékszélességgel. A hagyományosan nem-szelektívnek nevezett x irányban hasonló szelektivitás görbéket figyelhettünk meg, kissé nagyobb félértékszélességgel. Ezen tapasztalatokból kiindulva kezdeményeztük a z irányú szelektivitás vizsgálatát is, és hasonló lefutású, de az előzőeknél szélesebb és aszimmetrikus görbéket kaptunk. Ezen új eredmények később kísérletileg is megerősítést nyertek [73], és alkalmazásra kerültek az Athos

holografikus adattároló rendszer koncepciójának kidolgozásában [S28 - S30].

A eltolás-multiplexelt holografikus adattárolók legújabb változata az ún. "kollineáris rendszer" [74] amelyben a tárgy- és a referenciahullám optikai tengelye általában merőleges a tárolóanyagra. A kollineáris rendszerben azonos. gömbhullámok helyett összetettebb hullámfrontot használnak referenciaként, amelyet a tárgyhullámhoz hasonlóan egy térbeli fénymodulátoron átvitt síkhullám optikai Fourier transzformációjával állítanak elő. A kollineáris rendszer referenciahulláma az adatlap körül elhelyezkedő radiális pixelsorokból tevődik össze, amelynek Fourier transzformáltja esik a hologramra. Ez a hullám a gömbhullámnál gyorsabb véletlenszerű amplitúdó és fázisváltozásokat tartalmaz, ezért várakozásunk szerint shift szelektivitása kedvezőbb, azaz a diffrakciós hatásfoka az elmozdulás függvényében gyorsabban tart nullához, mint a gömbhullám referencia esetén. A számítógépes modell segítségével megvizsgáltuk a kollineáris rendszer eltolási szelektivitását, és azt tapasztaltuk, hogy az valóban gyorsan tart nullához, de lecsengése a gömbhullám referenciával ellentétben nem monoton csökkenő, hanem véletlenszerű mellékmaximumokat mutat, és az elmozdulás növekedésével nem nullához, hanem egy a referencia ábra pixelszámától függő állandó értékhez tart (ld. 35. ábra). A szakirodalomban javasolt sugaras elrendezés mellett javasoltuk egy fázisban véletlenszerűen modulált gyűrű alakú referencia ábra használatát, amely lényegesen kedvezőbb eltolási szelektivitási tulajdonságokkal rendelkezik [S29]. Ezen szelektivitási görbe ismeretében a fázisban véletlenszerűen modulált referencia esetén a hologramok közti x és y irányú eltolást kb. 4 µm-re lehet csökkenteni. Ezzel az adattároló rendszer adatsűrűsége (30 kbit-es adatlapokat feltételezve) eléri az 4,7 bit/µm³ értéket, ami 1 Tbyte/lemez feletti felhasználói kapacitást eredményez.



35. ábra: A kollineáris holografikus adattároló eltolási szelektivitás görbéi különböző referenciahullámok alkalmazásával, L=400 μm anyagvastagság és NA=0.35 adatlapra vonatkozó numerikus apertúra esetén. (radiális referenciaábrák: kék, világoskék és rózsaszín görbék; referencia gyűrű véletlen fázismodulációval: zöld görbe, gömbhullám referencia narancssárga görbe.)

5.3 Összefoglalás

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. [S25, S27]

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

dc_311_11 modell segítségével meghatározott szelektivitásgörbék az eredmények publikálása után kísérleti megerősítést is nyertek. [S24-S27]

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. [S28-S30]

6 Bitszervezésű mikroholografikus adattároló rendszer adatsűrűségének vizsgálata

A mikroholografikus adattárolás adatsűrűsége szempontjából kulcsfontosságú annak megállapítása, hogy az adattárolás legfőbb paraméterei - az adatsűrűség és a jel/zaj viszony - hogyan skálázódnak a hologrammérettel. Ezen a számolásokat egy egyszerű analitikus közelítés segítségével végeztem el, nevezetesen a rendszerben terjedő hullámokat Gauss-nyaláboknak tekintve, és az irodalomban használt véges dinamikatartománnyal rendelkező lineáris és térben lokális holografikus tárolóanyag-modellt használva. A skálatörvények ismeretében megvizsgáltam a rendszer főbb paramétereit: a diffrakciós hatásfokot, a szomszédos mikrohologramok közötti áthallás mértékét, a jel-zaj viszonyt és az elérhető adatsűrűséget. Az eredmények alapján javaslatot tettem a mikroholografikus rendszer továbbfejlesztésére konfokális szűrés és kétfotonos vagy expozíciós küszöbbel rendelkező nemlineáris tárolóanyagok használatával.

A számításokat később kibővítettük a hullámok terjedésének skalár- illetve vektordiffrakción alapuló leírásával, illetve a tárolóanyag megfigyelt nem-lokális tulajdonságait jól leíró monomer-diffúziót figyelembe vevő anyagmodellel [75, 76] Ez utóbbi eredményeket nem kívánom a jelen dolgozatban szerepeltetni, mivel azok korábbi doktori (PhD) eljárások téziseként szerepeltek.

6.1 Mikrohologramok közti áthallás vizsgálata

A tárgy és referenciahullámot tekintsük a +z illetve a –z tengely irányában terjedő Gauss nyaláboknak:

$$E_{s}(x,y,z) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}w(z)} \exp\left(-\frac{x^{2}+y^{2}}{w(z)^{2}}\right) \exp\left(-ik\frac{x^{2}+y^{2}}{2R(z)}-ikz+i\Phi(z)\right) \cdot \exp(i\omega t)$$
(6.1)

$$E_{R}(x, y, z) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}w(z)} \exp\left(-\frac{x^{2} + y^{2}}{w(z)^{2}}\right) \exp\left(ik\frac{x^{2} + y^{2}}{2R(z)} + ikz - i\Phi(z)\right) \cdot \exp(i\omega t)$$
(6.2)

ahol w(z) =
$$\sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$
 R a nyaláb sugara z függvényében, R(z)=z+z_0^2/z a

nyaláb hullámfrontjának görbületi sugara, $\Phi(z)=\arctan(z/z_0)$ fáziskorrekciós tényező, $z_0=n\pi w_0^2/\lambda$ a Rayleigh hossz, w_0 a nyalábnyak sugara, k a hullámszám a közegben és n a közeg törésmutatója. A holografikus anyagban létrejövő index-moduláció a tárgy és referenciahullámok interferenciájának intenzitásával arányos, melynek térbeli eloszlását a 36. ábra mutatja.



36. ábra: Egy mikrohologram intenzitáseloszlása az optikai tengely (z) mentén(a.), az yz síkban (b.) és az x tengely mentén (c.) ($w_0=250 \text{ nm}, \lambda=405 \text{ nm}, n_0=1.5$ esetén)

A mikrohologramok közti áthallás onnan származik, hogy egy adott mikrohologram kiolvasása közben a kiolvasó hullám a szomszédos hologramokról is diffrakciót szenved. Az áthallás értelemszerűen csökken a két hologram távolságával, mértéke megbecsülhető az előző fejezetben bemutatott Born közelítést használva, az

eltolási szelektivitás számításának megfelelően. Ehhez az 5.4 egyenletbe behelyettesítjük a Gauss nyalábokkal kapott index-modulációt, valamint egy $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ vektorral eltolt kiolvasó hullámot, amelyet szintén Gauss nyalábbal modellezünk. Az eltolt kiolvasó hullámmal rekonstruált hologram diffrakciós hatásfoka megadja az egymáshoz képest $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ vektorral eltolt két mikrohologram közötti áthallás értékét [S32, S33].

A fenti módszerrel megvizsgáltam a hologramok közötti áthallást a longitudinális (z irányú), illetve transzverzális (x irányú) elmozdulás függvényében. A modell ellenőrzésére először elvégeztük a Berlini Műszaki Egyetem kísérleteivel való összehasonlítást. A kísérlet során egy λ =532 nm hullámhosszú lézer kb. w₀=680 nm nyalábnyakkal rendelkező fókuszált nyalábjával mikrohologramokat rögzítettünk n₀=1.5 átlagos törésmutatójú fotopolimer rétegbe. A hologramot ezután ugyanezen lézer lényegesen kisebb teljesítményű, de az előzővel azonos módon fókuszált nyalábjával kiolvastuk, úgy, hogy a mintát közben a z irányban folyamatosan mozgattuk. Az eredményeket a 37. ábra mutatja. Látható, hogy a két görbe jó egyezést mutat. A kísérleti görbe enyhe aszimmetriája illetve hullámos lefutása annak köszönhető, hogy a kiolvasó hullám a pásztázás során kis mértékben exponálja a fotopolimert, és a kísérletek nem tökéletes Gauss nyalábokkal történtek, hanem véges apertúrájú objektívekkel fókuszált nyalábokkal.



37. ábra: A hologramok közötti áthallás számított illetve mért görbéje a "z" irányú elmozdulás függvényében ($w_0=680 \text{ nm}, \lambda=532 \text{ nm}, n_0=1.5$)
Az következőkben a modellt a mikroholografikus prototípus specifikációinak megfelelő $w_0=200 - 500$ nm, $\lambda=405$ nm, $n_0=1.5$ paraméterekkel használtuk. A hologrammérettel való skálázás vizsgálatához az eredményeket több különböző nyalábnyak-szélességre is ábrázoltam (38. ábra). Látható, hogy z irányban az áthallás a távolsággal lassan csökken, a legkisebb vizsgált hologramméret esetén ($w_0=200$ nm) a diffrakciós hatásfok kb. 6 µm eltolás esetén éri el az eredeti hatásfok 1%-át. Ez azt jelenti, hogy a többrétegű mikroholografikus tárolás esetén legalább 6 µm rétegtávolságot kell felvennünk a rétegek közti áthallás megszüntetésére. Az x irányú áthallás (ld. 39. ábra) lényegesen gyorsabban csökken, a diffrakciós hatásfok már 0.36 µm eltolás esetén két nagyságrenddel alacsonyabb az eredeti értéknél. A rétegen belüli áthallás csökkentésére tehát a mikrohologramok közti távolság nagysága kb. 0.4 µm kell legyen, ami megfelel a Blu-ray lemez track távolságának.



38. ábra: A hologramok közötti áthallás a z irányú elmozdulás függvényében logaritmikus skálán különböző nyalábnyak-sugarakra ($w_0=0.2, 0.25, 0.35, 0.5 \mu m$)



39. ábra: A hologramok közötti áthallás a x irányú elmozdulás függvényében logaritmikus skálán különböző nyalábnyak-sugarakra (($w_0=0.2, 0.25, 0.35, 0.5 \mu m$)

A különböző hologramméretekhez tartozó görbéket megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy a mikroholografikus rendszer szempontjából fontos tartományon az 1%-os áthalláshoz tartozó eltolás jó közelítéssel arányos a hologram kiterjedésével, azaz hosszirányban a Rayleigh-hosszal, keresztirányban a nyalábnyak sugarával. Az arányossági tényezők becslését a 3. Táblázat tartalmazza. Ezzel megállapíthatjuk, hogy az áthallás 1%-os értékét korlátnak tekintve a mikrohologram rétegek legkisebb távolsága a Rayleigh-hosszal (azaz mikrohologram transzverzális méretének négyzetével), keresztirányban pedig a mikrohologram transzverzális méretével skálázódik.

w₀ (µm)	z₀ (µm)	∆z _{1%} (µm)	∆x _{1%} (µm)	C _z =∆z _{1%} /z₀	C _x =∆x _{1%} /w₀
0.2	0.465	6	0.36	12.892	1.8
0.25	0.727	9	0.45	12.376	1.8
0.35	1.425	18	0.63	12.628	1.8
0.5	2.909	35	0.88	12.032	1.76
			Átlag:	12.482	1.790
			Szórás:	0.317	0.017
			Rel. Hiba:	0.025	0.010

3. Táblázat: Az 1%-os áthalláshoz tartozó eltolás és a hologramméret arányossági tényezőinek számítása

Megjegyzendő, hogy a két szomszédos mikrohologram áthallásának 1%-os küszöbértéke egy tapasztalati szám, és azt a tapasztalatot tükrözi, hogy e küszöbérték alatt több közeli hologram áthallásának hatására sem romlik lényegesen a kiolvasott adat bithiba-aránya. Valójában – különös tekintettel a z irányban tapasztalt lassú lecsengésre- egy adott hologram kiolvasásakor az összes többi beírt hologram által okozott zajt figyelembe kell venni azok koherens összegzésével. Ezt a számítást numerikus szimulációval elvégeztük (az adott számítógép-kapacitás határain belül) maximum 23 hologram-rétegre és több ezer hologram-konfigurációra. Az eredményeket a 6.4 és 6.5 fejezetben mutatom be.

6.2 Az adatsűrűség vizsgálata

Az adatsűrűség meghatározásához először számoljuk ki egy bit adat (egy mikrohologram) által elfoglalt térfogatot! A mikrohologramok egymástól való távolságát az előző fejezetben vizsgált 1%-os áthalláshoz tartozó eltolással közelítve egy mikrohologram térfogata:

$$V_{\text{mikrohol}} = \Delta x_{1\%}^{2} \Delta z_{1\%} = C_{x}^{2} \cdot C_{z} \cdot w_{0}^{2} \cdot z_{0} = \frac{C_{x}^{2} C_{z} \pi \cdot n_{0}}{\lambda} \cdot w_{0}^{4}$$
(6.3)

Az adatsűrűség értelemszerűen az 1 bit adat által elfoglalt térfogat inverze, azaz:

$$\rho_{data} = \frac{1}{V_{mikrohol}} = \frac{\lambda}{C_x^2 C_z \pi \cdot n_0} \cdot \frac{1}{w_0^4}$$
(6.4)

A mikroholografikus adattárolásra a 2.2.4 fejezetben leírt multiplexelési technikák közül a hullámhossz multiplexelés alkalmazható. A hullámhossz multiplexelés szelektivitás görbéje kiszámítható az előző fejezetben bemutatott Born közelítés használatával olyan módon, hogy a konstans λ_0 hullámhosszon rögzített hologramot különböző hullámhosszakon kiolvasva ábrázoljuk a diffrakciós hatásfokot a kiolvasó hullámhossz függvényében [S34, S38]. A kapott eredményeket különböző nyalábnyak-szélesség értékekre a 40. ábra mutatja.



40. ábra: A hullámhossz multiplexelés szelektivitás görbéje a λ_1 kiolvasó hullámhossz függvényében különböző nyalábnyak-sugarakra (w_0 =0.2, 0.25, 0.35, 0.5, 0.7 µm, a beíró hullámhossz λ_0 = 0.405µm)

A szelektivitás görbékről leolvasható az 1% áthalláshoz tartozó hullámhosszváltozás ($\Delta\lambda_{1\%}$) értéke, amelyet az előző szakasz gondolatmenete szerint tekinthetünk az áthallás szempontjából elérhető legsűrűbb multiplexelés hullámhossz-lépcsőjének. Ezen hullámhossz-változás értékeket a hologram kiterjedésének függvényében vizsgálva megállapíthatjuk, hogy az 1% áthalláshoz tartozó hullámhossz-változás fordítottan arányos a hologram hosszirányú kiterjedésével, azaz a Rayleigh-hosszal. Az arányossági tényező becslését a 4. táblázat tartalmazza.

w₀ (µm)	z₀ (µm)	Δλ _{1%} (μm)	$C_{\lambda}=\Delta\lambda_{1\%}/z_0$
0.2	0.465	0.091	0.0423
0.25	0.727	0.058	0.0422
0.35	1.425	0.029	0.0413
0.5	2.909	0.014	0.0407
0.7	5.701	0.007	0.0399
	Átlag:		0.0416
	Szórás:		0.00083
		0.0200	

4. Táblázat: Az 1%-os áthalláshoz tartozó hullámhossz-változás és a hologram-méret arányossági tényezőinek számítása

A hullámhossz-multiplexelésre rendelkezésre álló hullámhossztartományt elsősorban a tárolóanyag spektrális érzékenysége és a fényforrás hullámhosszmodulációjának szélessége határozza meg. A 400 nm-es tartományban működő anyagok és lézerdiódák ismeretében optimista becslés a 40 nm széles hullámhossztartomány, azaz $\Delta\lambda_{mux} = \lambda_0/10$. Ezzel az egy helyre beírható hullámhossz-multiplexelt hologramok száma:

$$M_{\lambda_{MUX}} = \frac{\Delta \lambda_{mux}}{\Delta \lambda_{1\%}} = \frac{\lambda_0 / 10}{C_{\lambda}} \cdot z_0$$
(6.5)

Látható, hogy a multiplexelésre használható hullámhosszak száma arányos a mikrohologram hosszával. Ezért a hullámhossz multiplexelés hosszabb, azaz kevésbé fókuszált mikrohologramokra lehet hatékony megoldás az adatsűrűség növelésére, ez viszont ellentétes a hologramméret csökkentésével elérhető adatsűrűség-növekedéssel. Hullámhossz multiplexelt hologramok esetén a teljes adatsűrűséget kifejezhetjük az egy hullámhosszal elérhető adatsűrűség és a hullámhosszak számának szorzataként:

$$\rho_{\text{data}_\text{MUX}} = \rho_{\text{data}} \cdot M_{\lambda_\text{MUX}} = \frac{\lambda/10}{C_x^2 C_z C_\lambda} \cdot \frac{1}{w_0^2}$$
(6.6)

Látható, hogy a multiplexelt adatsűrűség a mikrohologram transzverzális méretének négyzetével fordítottan arányos, ellentétben a nem multiplexelt esettel, amelyben az adatsűrűség mikrohologram transzverzális méretének mínusz negyedik hatványával skálázódik. Ezért kis hologramméretekre várhatóan a nem multiplexelt megoldás nagyobb adatsűrűséget eredményez. A kapott adatsűrűséget a hologramméret függvényében ábrázolva megállapíthatjuk, hogy a hullámhossz multiplexelés csak 300 nm nyalábnyak-sugár felett használható, az alatt a multiplexelés értelmét veszti (ld. 41. ábra). Megjegyzendő, hogy 300 nm alatt maga a multiplexelt adatsűrűség is értelmét veszti, hiszen a multiplexelésre használt hullámhosszak száma nem lehet tört szám (ezért a görbe ezen szakaszát az ábrán szaggatott vonallal jelöltem). A multiplexelés nélküli adatsűrűség skálatörvényének ismeretében kézenfekvő megoldásnak tűnne a hologramméret további csökkentése. Ennek azonban természetesen határt szab a diffrakció jelensége, amely a jelenlegi ipari szabványnak tekinthető Blu-ray[™] optikai adattároló specifikációival (λ=405

nm, NA=0.85) a nyalábnyak sugár minimális méretére 190 nm-es értéket ad. Ezt a határt az ábrán szaggatott vonallal bejelöltem. Mindezek alapján a maximális adatsűrűség 1.65 bit/µm³.

Megjegyzendő az is, hogy a paraxiális közelítést tartalmazó Gauss-nyaláb nem tekinthető jó modellnek nagy numerikus apertúrájú fókuszált nyalábok leírására. Ezért a fenti eredményeket skaláris és vektor-diffrakciós számításokkal is megerősítettük [S33, S34].



41. ábra: Az adatsűrűség hullámhossz multiplexeléssel illetve multiplexelés nélkül a hologramméret függvényében

6.3 Mikrohologramok közti áthallás csökkentése konfokális szűréssel

A mikroholografikus adattárolás alapelve és a kiolvasás módja hasonlóságokat mutat a pásztázó lézeres mikroszkópia megoldásaival. A pásztázó mikroszkópiában rutinszerűen használnak konfokális szűrést a jel zaj viszony és a mélységi felbontás javítására [77, 78]. Ennek tudatában javasoltam a konfokális szűrés használatát a mikroholografikus adattároló rendszerben [S31, S39, S40]. A javasolt mikroholografikus elrendezést a 42. ábra mutatja, ahol a szűrő a kiolvasó ágban helyezkedik el, a kiolvasott hologram képsíkjában egy afokális lencsepár közös

fókuszpontjában. A konfokális szűrő lehet egy egyszerű tűlyuk (kis méretű kör alakú apertúra) vagy egy Gauss függvény szerint az optikai tengelytől sugárirányban csökkenő transzmissziójú lemez (apodizációs szűrő) melyek átmérője megegyezik a hologram képének átmérőjével.



42. ábra: A javasolt mikroholografikus elrendezés hullámhossz multiplexelés nélkül és konfokális szűréssel

A konfokális szűrés vizsgálatára az előző fejezetben leírt modellt módosítottam úgy, hogy a kiolvasott hullám egy a hologram transzverzális méretével megegyező Gauss-apodizációval ellátott szűrőn halad át, és megismételtem a hologramok áthallására vonatkozó számításokat. Az eredményeket a szűrés nélküli esethez hasonlítva a 43. illetve a 44. ábra mutatja a longitudinális illetve transzverzális elmozdulás esetére.



43. ábra: A hologramok közötti áthallás a z irányú elmozdulás függvényében konfokális szűréssel és szűrés nélkül különböző nyalábnyak-sugarakra($w_0=0,2$, ill. $0,35 \ \mu m$)



44. ábra: A hologramok közötti áthallás az x irányú elmozdulás függvényében konfokális szűréssel és szűrés nélkül különböző nyalábnyak-sugarakra ($w_0=0,2$, ill. $0,35 \ \mu m$)

A görbéket megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy a konfokális szűrés jelentősen csökkenti a hologramok közötti áthallás mértékét, és így segítségével mikroholografikus adattárolás adatsűrűsége megnövelhető. Az adatsűrűség becsléséhez meghatároztam az 1%-os áthalláshoz tartozó eltolás értékeket, és a 6.4 egyenlet segítségével ábrázoltam az elérhető adatsűrűséget a hologramméret függvényében (45. ábra). Mindezek alapján a maximális adatsűrűség 2.36 bit/µm³

értékre nőtt a konfokális szűrés nélkül elérhető 1.65 bit/µm³ értékhez képest.



45. ábra: Az adatsűrűség konfokális szűréssel illetve szűrés nélkül a hologramméret függvényében

A konfokális szűrésre vonatkozó javaslat kísérleti megerősítést is nyert a Microholas EU FP6 projekt keretében a Berlini Műszaki Egyetemen. Ebben a kísérletben 3x3 bites mikrohologram elrendezések beírását és kiolvasását vizsgáltuk először egy síkban, majd 3 rétegben. A beíró lézer hullámhossza 532 nm, a fókuszáló objektív numerikus apertúrája 0.6, a beírt hologramok mérete w₀=350 nm és a hologramok közti távolság 1 µm volt. A hologramok kiolvasását ugyanezen lézerfolt 3 dimenziós pásztázásával és a visszaszórt jel detektálásával valósítottuk meg. A 46. ábra a beírt hologram síkjában való pásztázás eredményét mutatja konfokális szűrés nélkül és konfokális szűréssel. Az ábrán jól látható, hogy a hologramok közti áthallás mértéke lényegesen csökkent a konfokális szűrő használatával. A 3 dimenziós kiolvasás használatával a rétegek közötti áthallás is vizsgálható, amint azt a 47. ábra mutatja. A kísérletsorozat eredményeképpen a rétegek közötti távolságot konfokális szűréssel rendelkező rendszer esetén a tervezett 15-20 µm-ről 5-8 µm-re lehetett csökkenteni.



46. ábra: Mikrohologramok kiolvasása konfokális szűrés nélkül (a.) és konfokális szűréssel (b.), valamint a relatív diffrakciós hatásfok az a.) és b.) ábrák piros vonala mentén pásztázva (folytonos vonal a konfokális szűrő nélkül, pontozott vonal a konfokális szűrővel)

dc_311_11





47. ábra: Mikrohologramok kiolvasása konfokális szűrés nélkül (a.) és konfokális szűréssel (b.) különböző mélységben pásztázó lézernyalábbal

dc_311_11 6.4 A diffrakciós hatásfok vizsgálata

A fotopolimer tárolóanyagok tulajdonságai közül meghatározó jelentőségű az anyag korlátozott dinamika tartománya. Multiplexelt hologramok esetén az anyag korlátozott dinamika tartománya határozza meg az egy hologramra jutó hatásfok értékét a következő összefüggésnek megfelelően:

$$\eta = \left[\frac{M\#}{M}\right]^2 \tag{6.7}$$

Ahol η az egy hologramra jutó hatásfok, M a multiplexelt hologramok száma, M# pedig az anyag dinamika tartományát jellemző paraméter (M-number). Ezen empirikus jellegű makroszkópikus összefüggés annak a következménye, hogy a fotopolimerizáció során kialakuló törésmutató moduláció korlátozott. A 2.5 fejezetben megmutattam, hogy ezen empirikus formula alacsony diffrakciós hatásfok és kis beesési szögek esetén síkhullámokra ekvivalens az $\eta = \left[\frac{\pi \cdot L \cdot \Delta n}{\lambda}\right]^2$ összefüggéssel. Mikrohologram esetén az alacsony hatásfok és a kis beesési szög megvalósul, de a síkhullám közelítés nem teljesül. A mikrohologram felvételekor használt hullámokat Gauss-nyalábokkal leírva az egy hologramra vonatkozó index-moduláció longitudinális irányban Lorentz-görbe alakú burkolóval rendelkezik. Ezért logikusnak tűnik Bragg illesztett kiolvasás esetén az anyag teljes vastagsága helyett ezen burkoló hosszát mint effektív anyagvastagságot figyelembe venni, ami nem más mint a Gauss nyaláb Rayleigh hosszának kétszerese: $L_{eff} = 2z_0 = 2\pi \cdot n_0 \cdot w_0^2 / \lambda$, ahol n_0 a közeg törésmutatójának átlagértéke, w_0 pedig a nyalábnyak sugara, azaz lényegében a mikrohologram transzverzális mérete. Ezzel:

$$\eta = \left[\frac{\pi \cdot L_{\text{eff}} \cdot \Delta n_{\text{max}} / M}{\lambda}\right]^2 = \left[\frac{2\pi^2 \cdot n_0 \cdot w_0^2 \cdot \Delta n_{\text{max}} / M}{\lambda^2}\right]^2 = \left[\frac{M\#}{M} \cdot \frac{L_{\text{eff}}}{L}\right]^2$$
(6.8)

Ezen intuitív közelítést megerősítendő, az előző fejezetben bemutatott Born közelítést és Gauss nyalábokat használva kiszámítottam egyetlen mikrohologram diffrakciós hatásfokát, és e numerikus számítás valamint az effektív vastagság közelítés eredményeként kapott diffrakciós hatásfokot ábrázoltam (ld. 48. ábra) a hologram méret (ω) függvényében. A számítás során azt feltételeztem, hogy a mikrohologram kihasználja a tárolóanyag teljes dinamika tartományát, azaz a dc_311_11 legnagyobb intenzitású ponton a törésmutató-moduláció értéke éppen megegyezik egy tipikus fotopolimer anyag maximális törésmutatóváltozásával: $\Delta n_{max} = 2.5 \cdot 10^{-3}$. (A teljes modulációs mélység elérése természetesen nagyobb hologramméretek esetén nagyobb nyaláb-teljesítményeket igényel.)



48. ábra: Egyetlen mikrohologram diffrakciós hatásfoka a hologram méret függvényében a Born közelítésen alapuló numerikus számítás(piros folytonos vonal) valamint az effektív vastagság közelítés(kék szaggatott vonal) használatával

Látható, hogy a két görbe a mikroholografikus adattárolás szempontjából fontos mérettartományon nagy pontossággal megegyezik. Ez alapján megállapíthatjuk, hogy a maximális törésmutató-moduláció értékét állandóan tartva a diffrakciós hatásfok a mikrohologram hosszának (Rayleigh hossz) négyzetével illetve a transzverzális méretének negyedik hatványával skálázódik.

Többrétegű adattárolás esetén a tárolóanyag teljes dinamika tartománya megoszlik a rétegek között, és az egy réteg számára elérhető törésmutató-moduláció a 6.8 összefüggés szerint éppen a maximális törésmutató-moduláció és a rétegek számának hányadosa. A minimális rétegtávolságot, és ezzel -állandó anyagvastagságot feltételezve- a rétegek maximális számát a rétegek közötti áthallás határozza meg, amint azt a 6.1 illetve a 6.3 fejezetekben részletesen megvizsgáltam. Ez alapján, a rétegek maximális száma a hologramméret függvényében a következőképpen írható fel:

$$M = \frac{dc_{311_{11}}}{C_{z} \cdot z_{0}(w_{0})}$$
(6.9)

Ezen rétegszámot a 6.2 egyenletbe helyettesítve megkapjuk a diffrakciós hatásfok értékét többrétegű, a rétegek közötti áthallás szempontjából maximális adatsűrűségű rendszerre:

$$\eta_{\text{Multilayer}} = \left[\frac{\pi \cdot L_{\text{eff}} \cdot \Delta n_{\text{max}} / M}{\lambda}\right]^2 = \left[\frac{\pi \cdot 2z_0(w_0) \cdot \Delta n_{\text{max}}}{\lambda} \cdot \frac{C_z \cdot z_0(w_0)}{L}\right]^2 = \left[\frac{2\pi^3 \cdot n_0^2 \cdot w_0^4 \cdot \Delta n_{\text{max}} \cdot C_z}{\lambda^3 \cdot L}\right]^2 (6.10)$$

Megállapíthatjuk, hogy a rétegek közti áthallás szempontjából a lehető legkisebb rétegtávolságot használva a többrétegű adattárolás diffrakciós hatásfoka a mikrohologram hosszának (Rayleigh hossz) negyedik hatványával illetve a transzverzális méretének nyolcadik hatványával skálázódik. Ennek megfelelően a diffrakciós hatásfok nagyságrendekkel alacsonyabb lesz és csökkenő hologramméret mellett és lényegesen gyorsabban tart nullához mint egyetlen réteg esetén. A kapott eredményeket a 49. ábra mutatja. Az eredmények tanúsága szerint nagy adatsűrűség (azaz kis hologramméret) esetén rendkívül alacsony diffrakciós hatásfok értékek várhatók. Például ipari szabványnak tekinthető Blu-rayTM optikai adattároló specifikációival (λ =405 nm, NA=0.85) kapott 190 nm-es nyalábnyak sugár esetén a diffrakciós hatásfok egy rétegre 2.8·10⁻⁴, maximális adatsűrűségű többrétegű tárolás esetén konfokális szűrés nélkül 7.8·10⁻⁹ illetve konfokális szűréssel 5.9·10⁻⁹. Ez utóbbi két hatásfok érték olyan alacsony, hogy a kiolvasott hullám detektálása mind az alacsony fotonszám mind a szórt fény és a detektor sötétzaja miatt komoly kihívást jelent [79].



49. ábra: Egyetlen mikrohologram és többrétegű adattárolás diffrakciós hatásfoka a hologram méret függvényében szűrés nélkül és konfokális szűréssel.

6.5 Nemlineáris holografikus tárolóanyagok vizsgálata

Az előzőekben bemutatott számítások alapján a mikroholografikus elrendezés esetén a mélység szerinti multiplexelés (azaz többrétegű tárolás) használható leghatékonyabban a tárolókapacitás növelésére. Erős fókuszálás -azaz kis hologramméret- esetén a beíró hullámok energiája egy kis térfogatra (a fókuszpont környezetére) koncentrálódik, ezért szokás úgy tekinteni, kis hogy а mikrohologramok lényegében nem fednek át. Mivel azonban a beíró hullámok a tárolóanyag teljes vastagságán keresztülhaladnak, azok a teljes vastagságban fotopolimerizációt okoznak és így fogyasztják a rendelkezésre álló monomermennyiséget. Ha a fotopolimer réteg általában csekély abszorpcióját nem vesszük figyelembe, kijelenthetjük, hogy a fókuszált nyaláb teljes keresztmetszetére integrált teljesítmény a tárolóanyag mélysége mentén konstans értékű, azaz a nyaláb integrális expozíciós dózisa minden rétegben megegyezik. Egy lineáris holografikus tárolóanyag esetén -amelyben a létrehozott hatás (pl. törésmutató változás) a beíró intenzitással arányos- a beíró nyalábok által okozott monomerkoncentráció csökkenés illetve átlagos törésmutató változás is azonos értékű lesz minden rétegre. Ebből adódik a lineáris anyag azon tulajdonsága, hogy több rétegű tárolás esetén az elérhető törésmutató-moduláció a rétegek közt megoszlik (ld. 6.8 összefüggés). Nemlineáris anyagok esetén merőben különböző viselkedést tapasztalunk, azaz a

dc_311_11 lineárisnál gyorsabban növekvő (pl. kvadratikus) anyag esetén a beíró nyaláb által létrehozott hatás várhatóan a nagyobb intenzitású helyeken, azaz a fókuszsík közelében lesz nagyobb, míg a lineárisnál lassabban növekvő (pl. négyzetgyökös) anyag esetén az átlagos hatás a kisebb intenzitású helyeken lesz erősebb. A mikroholografikus rendszer szempontjából nyilvánvalóan a lineárisnál gyorsabb növekedés az előnyös, mivel ez esetben az elérhető törésmutató moduláció a fókuszsíkra –azaz a mikrohologramokra- koncentrálódik, és a távolabbi síkokon lénvegesen kisebb értékű lesz Így a lineárisnál gyorsabban növekedő nemlineáris

növekedés az előnyös, mivel ez esetben az elérhető törésmutató moduláció a fókuszsíkra –azaz a mikrohologramokra- koncentrálódik, és a távolabbi síkokon lényegesen kisebb értékű lesz. Így a lineárisnál gyorsabban növekedő nemlineáris dinamika-tartománya várhatóan hatékonyabban hasznosítható. Ezen anyag meggondolások alapján javasoltam a lineárisnál gyorsabban növekvő válasszal rendelkező anyagok használatát a mikroholografikus rendszerben. A javasolt kvadratikus törésmutatóváltozás-intenzitás függvény megvalósítható ún. kétfotonos anyagok használatával, amelyben a beíró hullámhosszra az egyfotonos abszorpció nulla, és a törésmutató-változást létrehozó hatás (pl. polimerizáció) kétfotonos abszorpcióval váltható ki [80, 81, 82]. A másik gyakorlatban használható nemlineáris anvag csoport az expozíciós küszöbbel rendelkező anyagok, amelyekben a fotopolimerizáció nem váltható ki egy küszöbintenzitás alatt [83,84]. Az alábbi fejezetben röviden összefoglalom a kvadratikus válaszú tárolóanyagokra vonatkozó kutatásaim eredményét [S36, S37]. A kvadratikus anyag hatását az előző fejezetekben bemutatott modellben úgy veszem figyelembe, hogy a holografikus rácsot alkotó törésmutató-modulációt a beíró interferenciakép intenzitásának négyzetével arányosan veszem fel:

$$\Delta n_{\text{QUAD}}(x, y, z) = \Delta n_{\text{max}} \cdot \left(\frac{I_{\text{holo}}(x, y, z)}{I_{\text{max}}}\right)^2$$
(6.11)

Ahol $I_{holo}(x, y, z)$ a referencia és a tárgyhullám interferenciájaként előálló intenzitáseloszlás, I_{max} pedig ezen eloszlás maximális értéke.





50. ábra: Egy mikrohologram indexmodulációja a z tengely (a.) illetve az x tengely (b.) mentén lineáris (piros görbe) illetve kvadratikus anyagra (kék görbe) $w_0 = 0.25 \mu m$ hologramméret esetén

A mikrohologram indexmodulációjának térbeli eloszlását összehasonlítva lineáris illetve kvadratikus anyagra azt tapasztaljuk, hogy mikrohologram kiterjedése jelentősen csökken mind longitudinális mind transzverzális irányban (50. ábra). Ez a foltméret-csökkenés megfelel a kétfotonos mikroszkópiában megfigyelt felbontásjavulásnak. A méretcsökkenés miatt –azonos maximális indexmodulációt feltételezve- várhatóan csökken a diffrakciós hatásfok és a szomszédos hologramok közti áthallás mértéke is. A hologramok közti áthallás és az elérhető adatsűrűség kiszámítására megismételtem a 6.1-6.3 fejezetekben leírt számításokat kvadratikus anyagra, konfokális szűrés jelenlétében. Az eredmények azt mutatják, hogy az áthallás és az elérhető adatsűrűség a lineáris anyaghoz hasonlóképpen skálázódnak, de az áthallás 1%-os küszöbéhez tartozó hologramok közötti és rétegek között távolságok tovább dc_311_11 távolságok tovább csökkentek, értékük a diffrakció által korlátozott $w_0 = 0.19 \,\mu\text{m}$ hologramméretre $\Delta x_{1\%} = 4 \,\mu\text{m}$ illetve $\Delta z_{1\%} = 0.26 \,\mu\text{m}$. Ezzel az elérhető adatsűrűség 3.7 bit/ μm^3 -re nőtt (ld. 51. ábra).



51. ábra: Az adatsűrűség konfokális szűréssel és lineáris illetve kvadratikus tárolóanyaggal a hologram méret függvényében

A kvadratikus anyag legfontosabb előnyét, az anyag dinamika-tartományának hatékonyabb hasznosítását úgy vizsgálhatjuk meg kvantitatív módon, hogy a beíró nyalábok által létrehozott monomerkoncentráció változást vagy az ezzel arányos törésmutató változást a nyalábok teljes keresztmetszetére (az x,y síkban) integráljuk:

$$\Delta n_{\text{Int}_{QUAD}}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n_{\text{max}} \cdot \left(\frac{I_{\text{holo}}(x, y, z)}{I_{\text{max}}}\right)^2 dx \, dy$$
(6.12)

$$\Delta n_{\text{Int}_\text{LIN}}(z) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \Delta n_{\text{max}} \cdot \frac{I_{\text{holo}}(x, y, z)}{I_{\text{max}}} dx \, dy$$
(6.13)

Az így kiszámított integrális indexmoduláció megmutatja, hogy a z=0 síkra fókuszált beíró nyalábok átlagosan milyen mértékben okoznak fotopolimerizációt az anyag mélységében. A 52. ábra az integrális indexmoduláció értékét mutatja a z tengely mentén lineáris illetve kvadratikus anyagra. Jól látható, hogy lineáris anyagra az integrális indexmoduláció egy állandó érték körül oszcillál, azaz az átlagos

moduláció értéke az anyag teljes vastagságán állandó. (Lényegében ez az oka annak a tapasztalati ténynek, hogy lineáris anyag esetén a teljes elérhető indexmoduláció a rétegek között megoszlik). Ezzel szemben a kvadratikus anyag esetén az integrális indexmoduláció a z=0 síkra koncentrálódik, és igen gyors lecsengést mutat. E számítás szerint kvadratikus anyag esetén az integrális indexmoduláció a beírt réteggel szomszédos rétegben már kb. 3 nagyságrenddel kisebb értékű, és az összes nem beírt adattároló rétegre felösszegezve is csak a beírt réteg integrális indexmodulációjának 1.8%-a.



52. ábra: Egy mikrohologram integrális indexmodulációja a z tengely mentén lineáris (piros görbe) illetve kvadratikus anyagra (kék görbe) $w_0 = 0.25 \mu m$ hologramméret esetén

Mindezek ismeretében a 6.4 fejezetben ismertetett módon kiszámíthatjuk a kvadratikus anyag diffrakciós hatásfokát. A kapott eredményt a 53. ábra mutatja a hologramméret függvényében. Egyetlen mikrohologram réteg esetén a kisebb longitudinális méret miatt a kvadratikus tárolóanyag hatásfoka kb. fele a lineáris anyagénak, ellenben többrétegű adattárolás esetén a kvadratikus anyag diffrakciós hatásfoka gyakorlatilag nem csökken, míg lineáris anyag esetén a hatásfok értéke több nagyságrendet esik. Megjegyzendő, hogy a szakirodalomban közölt friss eredmények alapján valós a fenti számítások azon hipotézise, hogy a lineáris és a kvadratikus anyagok maximális indexmodulációja lényegében megegyezik [81, 85].



53. ábra: Egyetlen mikrohologram réteg és többrétegű adattárolás diffrakciós hatásfoka a hologram méret függvényében konfokális szűréssel, lineáris és kvadratikus anyagra (lineáris anyag, egy réteg: piros görbe; kvadratikus anyag, egy réteg: kék görbe; lineáris anyag, több réteg: lila görbe; kvadratikus anyag, több réteg: zöld görbe).

6.6 Összefoglalás

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. [S32, S36]

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. [S31, S33-34, S39-40]

4.3 Megvizsgáltam a hullámhossz multiplexelés hatékonyságát, és megállapítottam, hogy az kizárólag nagyobb hologram-méretek esetén használható az adatsűrűség növelésére, a teljes rendszer legnagyobb adatsűrűsége hullámhosszmultiplexelés nélkül érhető el. [S34, S38]

4.4 A holografikus anyagok vizsgálata kapcsán felismertem, hogy a mikroholografikus adattárolás adatsűrűsége és jel-zaj viszonya tovább javítható nem-

dc_311_11 lineáris holografikus anyagok használatával. Ennek alapján javaslatot tettem kétfotonos és expozíciós küszöbbel rendelkező holografikus anyagok használatára, és megmutattam, hogy azok adatsűrűség szempontjából további 55%-kal, diffrakciós hatásfok szempontjából pedig több nagyságrenddel felülmúlják a lineáris anyagokat. [S37]

7 Megvalósított holografikus adattároló rendszerek bemutatása

7.1 Holografikus memóriakártya író-olvasó berendezések

A holografikus memóriakártya író-olvasó berendezések fejlesztése 1998-ban kezdődött a svéd Optilink Ab., a dán Risø kutatóintézet és a Műegyetem Atomfizika Tanszéke részvételével. A projekt célkitűzése egy nagy biztonságú holografikus adattároló-rendszer fejlesztése, hitelkártya méretű hordozóra. A projektben a svéd cég és magyar leányvállalata az író-olvasó berendezések fejlesztésével, a dán kutatóintézet a polimer tárolóanyag fejlesztésével a Műegyetem pedig a teljes rendszer koncepcionális tervezésével, modellezésével és kísérleti vizsgálatával foglalkozott.









c.)

d.)

54. ábra: Memóriakártya író-olvasó demonstrátor (a.), a berendezés kártyamozgató mechanikája (b.), optikai író-olvasó feje (c.) és egy kiolvasott adatlapja (d.)

A fejlesztés első fázisa során 2002-ben elkészült memóriakártya író-olvasó demonstrátort a világ több országában (pl. Japán, Dél-Korea, USA, több európai ország) sikeresen bemutatták és tesztelték (ld 54. ábra). 2004-ben csatlakozott a projekthez a Bayer vegyipari cég fejlesztésekért felelős részlege, a Bayer Innovation GmbH, aki megvásárolta az Optilink szabadalmait, és átvette a műanyag kártya és a polimer tárolóanyag fejlesztését és gyártását. 2007-ben készültek el egy új, továbbfejlesztett, a biztonsági kódolást is lehetővé tevő prototípus-család tagjai, melynek keretében több író-olvasó és csak-olvasó berendezés született (ld. 55. ábra). A berendezéseket sikeresen alkalmazták különböző német partnercégek biztonsági rendszerében, de sajnos a tömegtermelése nem indult meg a befektetői környezet kedvezőtlen változása miatt.



55. ábra: Második generációs prototípus-család két tagja (a.) illetve a teljes optikai rendszere működés közben (b.)

A projekt hasznosította a jelen értekezés 3. és 4. fejezetében leírt tudományos eredményeket, a rendszer szimulációjára használt Szimu programcsomagot és a rendszer fejlesztése során született koncepcionális illetve megvalósításhoz köthető szabadalmakat. A hasznosított szabadalmak a következők: [S12-S13, S21-S23, S41-S46]

7.2 Nagy kapacitású, lapszervezésű holografikus adattároló

A holografikus adattárolásban elért korábbi eredmények alapján kutatócsoportunk meghívást kapott két FP6-os Európai Uniós projekt konzorciumába

amelyek az ATHOS (Advanced Technology for Holographic Storage) és a MICROHOLAS (Microholographic data disk for archival storage). A Thomson multinacionális cégcsoport németországi optikai adattárolásra szakosodott részlege által vezetett ATHOS projekt keretében a célkitűzés lapszervezésű, nagy kapacitású adattároló kutatás-fejlesztés volt, amelyben a csoportunk feladata a hologram írás és olvasás modellezése, valamint a multiplexelés és az adatsűrűség vizsgálata volt. Ezen feladatokon kívül, külön szerződések keretében, a tanszékünk volt dolgozói által alapított Optimal Optik Kft-vel együttműködésben részt vettünk a rendszer koncepciójának kidolgozásában és az elkészült rendszer beállításában is. Az elkészült demonstrátor rendszer az 56. ábraán látható.





56. ábra: Athos holografikus adattároló demonstrátor (a.), az optikai rendszer vázlata (b.) és egy kiolvasott adatlapja (c.)

A projekt hasznosította a jelen értekezés 5. fejezetében leírt tudományos eredményeket, a rendszer szimulációjára használt algoritmusokat és több szabadalmaztatott megoldásunkat az eltolási multiplexelésre, a tárgy és referenciahullám csatolására és a reflexiós elrendezés megvalósítására. A hasznosított szabadalmak a következők: [S28-S30]

7.3 Mikroholografikus adattároló

A MICROHOLAS (Microholographic data disk for archival storage) projekt célja a mikroholografikus adattároló rendszer prototípus szintre való fejlesztése, melynek keretében csoportunk feladata a teljes rendszer modellezése, valamint a konfokális szűrés vizsgálata volt. Az elkészült prototípusban megvalósult az általunk javasolt konfokális szűrés, számításaink alapján módosult a multiplexelésre vonatkozó koncepció, és részt vettünk a rendszer egyes kulcselemeinek fejlesztésében és beállításában. Az elkészült demonstrátor rendszer az 57. ábrán látható. A projekt hasznosította a jelen értekezés 6. fejezetében leírt tudományos eredményeket, a rendszer szimulációjára használt algoritmusokat, a fotopolimer anyag nem-lokális viselkedésére vonatkozó kutatási eredményeinket valamint szabadalmaztatott megoldásainkat a többrétegű adattárolásra illetve a konfokális szűrésre. Megjegyzendő, hogy a MICROHOLAS projekttől függetlenül, de annak publikus kutatási eredményeit felhasználva a General Electric Global Research kutatóintézete is foglalkozik a mikroholografikus technológia fejlesztésével [86], így közvetett módon hasznosítva kutatási eredményeinket. A hasznosított szabadalmak a következők: [S39-S40]







57. ábra: A mikroholografikus adattároló rendszer működés közben (a.), 1D és 2D pásztázással kiolvasott jelek 1 μm,bit-távolság és 6 μm rétegtávolság esetén (b., c.)

8 Összefoglalás

A holografikus adattárolás biztonságának és adatsűrűségének kutatása során a következő eredményeket értem el:

<u>1. tézis:</u> 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. [S1-S3, S6-S8]

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 bithibaarányt eredményeznek. [S3-S5, S10, S11, S13]

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. [S9-S12]

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. [S14-S16, S20]

2.2 Rámutattam, hogy a fázis-kódolt referenciahullám segítségével elérhető titkosítás biztonsági szintje korlátozott: az egymástól független kódszavak száma

dc_311_11 mindössze 2²⁰. Megvalósítottam egy számítógépes kódszó-optimalizáló algoritmust, melynek segítségével 2²⁰ egymástól független, egyenszilárdságú kódszóból álló kulcskészlet készíthető. [S16, S18-S23]

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 2⁷³-ra bővíthető. [S20]

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 tárgyhullám 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. [S17]

<u>3. tézis:</u> 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. [S25, S27]

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. [S24-S27]

3.3 Ezen eredmények birtokában sikerült az eddigieknél jobb shift-

szelektivitással rendelkező rendszer elrendezéseket javasolni mind gömbhullámszerű referenciát alkalmazó klasszikus shift multiplexelés, mind az összetett referenciahullámot alkalmazó kollineáris elrendezés esetére. [S28-S30]

<u>4. tézis:</u> 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. [S32, S36]

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. [S31, S33-S34, S39-S40]

4.3 Megvizsgáltam a hullámhossz multiplexelés hatékonyságát, és megállapítottam, hogy az kizárólag nagyobb hologram-méretek esetén használható az adatsűrűség növelésére, a teljes rendszer legnagyobb adatsűrűsége hullámhosszmultiplexelés nélkül érhető el. [S34, S38]

4.4 A holografikus anyagok vizsgálata kapcsán felismertem, hogy a mikroholografikus adattárolás adatsűrűsége és jel-zaj viszonya tovább javítható nemlineáris holografikus anyagok használatával. Ennek alapján javaslatot tettem kétfotonos és expozíciós küszöbbel rendelkező holografikus anyagok használatára, és megmutattam, hogy azok adatsűrűség szempontjából további 55%-kal, diffrakciós hatásfok szempontjából pedig több nagyságrenddel felülmúlják a lineáris anyagokat. [S37]

A kutatás eredményei közvetlenül hasznosításra kerültek három különböző adattároló rendszer fejlesztésénél:

- Lapszervezésű, holografikus kártya író-olvasó berendezés biztonsági alkalmazásra (hasznosító: Optilink AB és Bayer Innovations GmbH)
- Lapszervezésű, vastag holografikus adattároló rendszer (hasznosító: Deutsche Thomson-Brandt GmbH)

102

dc_311_11 Bitszervezésű mikroholografikus adattároló archiválási alkalmazásokra (hasznosító: Technische Universität Berlin és Jenoptik LOS 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. [S12-S13, S21-S23, S28-S30, S39-S46]

9 Köszönetnyilvánítás

A holografikus adattároló rendszerek kutatása egy nemzetközi csapat együttműködésének eredménye. Köszönettel tartozom ezen csapat minden tagjának, nevezetesen közvetlen kollégáimnak az Atomfizika Tanszéken (Gíber János, Richter Péter, Lőrincz Emőke, Erdei Gábor, Barócsi Attila, Ujhelyi Ferenc, Pekári Miklós, Deákné Tóth Mária), lelkes doktorandusz és diplomamunkás hallgatóinknak (Sajti Szilárd, Kerekes Árpád, Várhegyi Péter, Reményi Judit, Ujvári Tamás, Lovász Mónika, Sarkadi Tamás, Kettinger Ádám), az Optilink AB és az Optimal Optik Kft munkatársainak (Peter Toth, Fredrik Herslow, Avtar Matharu, Szarvas Gábor, Gazdag László, Sütő Attila, Gigler József, Kalló Péter, Domján László, Fodor Józsua, Mike Szabolcs), a dániai Risø kutatóintézetnek (P. S. Ramanujam) a berlini Műszaki Egyetemen dolgozó kollégáknak (Hans Eichler, Susanna Orlic, Erik Dietz, Swen Frohman), a Deutche Thomson Brandt kutatócsoportjának (Hartmut Richter, Heiko Trautner, Frank Przygodda), a Bayer Innovations AG kutatócsoportjának, és az Európai Uniónak a pénzügyi támogatásáért. Köszönetet mondok ezenkívül családomnak, akik elviseltek, sőt támogattak a munka dandárjának elvégzése közben is.

10 Irodalomjegyzék

10.1 Saját publikációk

- S1. 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)
- S2. 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)
- S3. László Domján, Pál Koppa, Gábor Szarvas, Judit Reményi, Ternary phaseamplitude modulation with twisted nematic liquid crystal displays for Fourier-plane light homogenization in holographic data storage, Optik Vol. 113, pp. 382-390 (2002)
- S4. J. Reményi, P. Koppa, L. Domján, E. Lőrincz, Phase modulation configuration of liquid crystal display, 19th Congress of the International Commission for Optics, Florance, Italy, 25-30 August 2002
- S5. 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)
- S6. 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)
- S7. 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)
- S8. 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)
- S9. Pál Koppa, Phase to amplitude data page conversion for holographic storage and optical encryption, Applied Optics Vol. 46, No. 17 (2007)
- S10. 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.
- S11. Sarkadi Tamás, Koppa Pál, Fázismodulált adatlapok a holografikus adattárolásban, Kvantumelektronika, ISBN 978-963-06-5922-2, (2008)
- S12. 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
- S13. 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)

- S14. 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
- S15. 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)
- S16. 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)
- S17. 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
- S18. 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.
- S19. Lovász Mónika, Ujvári Tamás, Koppa Pál, A polarizációs holográfia biztonsági alkalmazásainak vizsgálata, Kvantumelektronika Szimpózium, Budapest 2003
- S20. Tamás Sarkadi and Pál Koppa, Quantitative security evaluation of optical encryption using hybrid phase- and amplitude-modulated keys, Appl. Opt. 51, 745-750 (2012)
- S21. 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
- S22. Domján László, Erdei Gábor, Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujvári Tamás, Method and apparatus for encrypting and authenticating of data using phasecoded holographic storage, P0104147, PCT/HU2001/000016, WO/2001/057602
- S23. 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
- S24. 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)
- S25. 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)
- S26. 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 PhysicsVol. 45, No. 2B, pp. 1288-1289, 2006"

- dc_311_11
- S27. 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)
- S28. 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)
- S29. 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)
- S30. 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)
- S31. 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)
- S32. 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)
- S33. 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)
- S34. 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)
- S35. 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)
- S36. 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)
- S37. 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).
- S38. 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)
- S39. G Szarvas, P Koppa, G Erdei, L Domján, A Sütő, Multilayer high datadensity data storage method and system with micro-holography, Lajstromszám: HU0301354 (2004)

- dc_311_11
- S40. Koppa Pál, Szarvas Gábor, Ujhelyi Ferenc, Erdei Gábor, Lőrincz Emőke, Method and system for thin film multi-layer holographic data storage, P0201186 (2002)
- S41. 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
- S42. 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
- S43. 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
- S44. 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
- S45. Szarvas Gábor, Lőrincz Emőke, Richter Peter, Koppa Pál, Erdei Gábor, Fodor Jozsua, Kallo Peter, Süto Attila, Domjan Laszlo, 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
- S46. Szarvas Gábor, Lőrincz Emőke, Richter Péter, Koppa Pál, Erdei Gábor, Fodor Józsua, Kalló Péter, Sütő Attila, Domján Laszlo, Ujhelyi Ferenc, Method and apparatus for the holographic recording and readout of data, Lajstromszám: EP1492095, Közzététel éve: 2004
10.2 Hivatkozások

- 1 D. Gabor, A New Microscopic Principle, Nature 161, 777-778 (1948)
- 2 P. J. van Heerden, Theory of Optical Information Storage in Solids, Applied Optics, Vol. 2, Issue 4, pp. 393-400 (1963)
- 3 H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, "Holographic Data Storage", Springer-Verlang, Berlin 2000
- 4 Joseph W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York, (1968)
- 5 R. J. Collier, C. B. Burckhardt, and L. H. Lin, Optical Holography (Academic, New York, 1971), pp. 573–578.
- 6 C. V. Raman and N. S. N. Nath, The diffraction of light by high frequency sound waves, Proc. Indian Acad. Sci. 2A, 406–412 (1935)
- 7 M. G. Moharam and L. Young, "Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes," Appl. Opt. 17, 1757-1759 (1978)
- 8 Sh. D. Kakichashvili, "Method of Recording Phase Polarization Holograms," Kvantovaya Elektron. Moscow 1, 1435 (1974).
- 9 L. Nikolova and T. Todorov, "Diffraction Efficiency and Selectivity of Polarization Holographic Recording," Opt. Acta 31, 529 (1984)
- 10 Fai H. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," Opt. Lett. **18**, 915-917 (1993)
- 11 William L. Wilson ; Kevin R. Curtis ; Ken E. Anderson ; Michael C. Tackitt ; Adrian J. Hill ; M. Pane ; C. Stanhope ; T. Earhart ; W. Loechel ; C. Bergman ; K. Wolfgang ; C. Shuman ; G. Hertrich ; K. Pharris ; K. Malang ; B. Riley ; M. Ayres, Realization of high-performance holographic data storage: the InPhase Technologies demonstration platform, Proc. SPIE 5216, Organic Holographic Materials and Applications, 178 (December 10, 2003)
- 12 Geoffrey W. Burr, C. Michael Jefferson, Hans Coufal, Mark Jurich, John A. Hoffnagle, Roger M. Macfarlane, and Robert M. Shelby, Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in.², Opt. Lett. **26**, 444-446 (2001)
- 13 Lisa Dhar, Kevin Curtis, Michael Tackitt, Marcia Schilling, Scott Campbell, William Wilson, Adrian Hill, Carol Boyd, Nicholas Levinos, and Alex Harris, Holographic storage of multiple high-capacity digital data pages in thick photopolymer systems, Opt. Lett. 23, 1710-1712 (1998)
- 14 C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, and T. Tschudi, "Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique," Appl. Opt. 31, 5700-5705 (1992)
- 15 Xiangyang Yang, Yu Xu, and Zhiqing Wen, "Generation of Hadamard matrices

for phase-code-multiplexed holographic memories," Opt. Lett. 21, 1067-1069 (1996)

- 16 J. Hadamard. Résolution d'une question relative aux déterminants. Bulletin des Sciences Mathématiques, 17:240–246, 1893
- 17 J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Encrypted holographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing," Appl. Opt. 34, 6012-6015 (1995)
- 18 George A. Rakuljic, Victor Leyva, and Amnon Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," Opt. Lett. 17, 1471-1473 (1992)
- 19 X.A Shen, R Kachru, High-speed holographic recording of 500 images in a rare earth doped solid, Journal of Alloys and Compounds, Volume 250, Issues 1–2, Pages 435–438, (1997)
- 20 K. Contreras, Z. Izri, C. Arnaud, G. Pauliat, and G. Roosen, "Wavelengthmultiplexed memory based on a Lippmann architecture," in CLEO/Europe and EQEC 2009 Conference Digest, (Optical Society of America, 2009), paper CC2_3.
- 21 G. Barbastathis, M. Levene and D. Psaltis, Shift multiplexing with spherical reference waves, Appl. Opt. 35, 2403-2417, 1996.
- 22 J. Knittel, F. Przygodda, O. Malki, H. Trautner and H. Richter. « Investigation of a reflective counter-propagating holographic setup ». Japanese Journal of Applied Physics 48, 2009
- 23 Osamu Matoba, Yuji Yokohama, Masato Miura, Kouichi Nitta, and Takeaki Yoshimura, Reflection-type holographic disk memory with random phase shift multiplexing, Appl. Opt. Vol. 45, No. 14 _ 10 May 2006
- 24 H. Horimai, X. Tan, and J. Li, "Collinear holography," Appl. Opt. 44, 2575–2579 (2005).
- 25 Philippe Refregier and Bahram Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," Opt. Lett. 20, 767-769 (1995)
- 26 N. K. Nishchal, J. Joseph, and K. Singh, "Fully phase encryption using fractional Fourier transform," Opt. Eng. 42, 1583–1588 (2003).
- 27 X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda, and B. Javidi, "Secure optical storage that uses fully phase encryption," Appl. Opt. 39, 6689–6694 (2000)
- 28 Towghi N, Javidi B and Luo Z., J. Opt. Soc. Am. A 16, 1915 (1999)
- 29 Heanue J. F., Bashaw M. C. and Hesselink L., Encryptedholographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing, Appl. Opt. 34 p.6012, (1995)
- 30 X.Peng, P.Zhang, H.Wei, and B.Yu, "Known-plaintext attack on optical encryption based on double random phase keys," Opt. Lett. 31, 1044-1046, (2006).

- 31 Y. Frauel, A. Castro, T. J. Naughton, and B. Javidi, "Resistance of the double random phase encryption against various attacks," Opt. Express 15, 10253-10265 (2007)
- 32 H. J. Eichler, P. Kuemmel, S. Orlic, and A. Wappelt, High-Density Disk Storage by Multiplexed Microholograms, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, VOL. 4, NO. 5, pp. 840-848 (1998)
- 33 Microholographic Data Disk for Archival Storage (MICROHOLAS), SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME, IST-511437, Description of Work (2004)
- 34 D. Psaltis, M. A. Neinfeld, A. Yamura, and S. Kobayashi, Optical memory disks in optical information processing, Appl. Optics 29, 2038 (1990)
- 35 Fai H. Mok, Geoffrey W. Burr, and Demetri Psaltis, "System metric for holographic memory systems," Opt. Lett. 21, 896-898 (1996)
- 36 A. Kerekes, E. Lorincz, P. S. Ramanujam, and S. Hvilsted, "Light scattering of thin azobenzene side-chain polyester layers," Opt. Commun. 206, 57–65 (2002).
- 37 Mohesh Moothanchery, Izabela Naydenova, and Vincent Toal, "Study of the shrinkage caused by holographic grating formation in acrylamide based photopolymer film," Opt. Express 19, 13395-13404 (2011)
- 38 W. C. Stewart, A. H. Firester, E. C. Fox "Random phase data masks: Fabrication tolerances and advantages of four phase level masks" Applied Optics, Vol. 11. No. 3. 1972
- 39 Qiang Gao, Raymond Kostuk "Improvement to holographic digital data-storage systems with random and pseudorandom phase masks" Applied Optics, Vol. 36.No. 20. 1997
- 40 John H. McLeod "The Axicon: A new type of optical element" Journal of the Optical Society of America, Vol. 44. No. 8. 1954.
- 41 O'Callaghan, M.J., McNeil, J.R.; Walker, C.; Handschy, M., Spatial Light Modulators with Integrated Phase Masks for Holographic Data Storage, Proceedings of Optical Data Storage Topical Meeting, ISBN: 0-7803-9494-1, Page(s): 23 – 25, (2006)
- 42 J.-S. Jang and D.-H. Shin, "Optical representation of binary data based on both intensity and phase modulation with a twisted-nematic liquid-crystal display for holographic digital data storage," Opt. Lett. 26, 1797–1799, 2001
- 43 Renu John, Joby Joseph, Kehar Singh, Holographic digital data storage using phasemodulated pixels, Optics and Lasers in Engineering 43 (2005) 183–194
- 44 J. Joseph and D. A. Waldman, "Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image," Appl. Opt. 45, 6374–6380 (2006).
- 45 Renu John, Joby Joseph, Kehar Singh, "Phase-image-based content-addressable holographic data storage", Optics Communications 232 pp. 99–106, (2004)

- 46 P. C. Mogensen and J. Glückstad, "Phase-only optical encryption," Opt. Lett. 25, 566–568 (2000)
- 47 X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda, and B. Javidi, "Secure optical storage that uses fully phase encryption," Appl.Opt. 39, 6689–6694 _2000
- 48 Dong-Hoan Seo and Soo-Joong Kim, Interferometric phase-only optical encryption a reference wave, OPTICS LETTERS / Vol. 28, No. 5, p. 304/ March 1, 2003
- 49 Joby Joseph, David A. Waldman, Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image, Applied Optics, Vol. 45, Issue 25, pp. 6374-6380 (September 2006)
- 50 F. Zernike, "How I discovered phase contrast," Science 121, 345–349 (1955)
- 51 L. G. Neto, "Implementation of image encryption using phase contrast techniques," in Optical Pattern Recognition IX, D. P. Casasent and T. Chao, eds., Proc. SPIE 3386, 284–289 (1998)
- 52 J. Glückstad and P. C. Mogensen, "Optimal phase contrast in common-path interferometry," Appl. Opt. 40, 268–282 (2001)
- 53 Pál Koppa, Judit Reményi, Ferenc Ujhelyi, Gábor Erdei, Method and system for parallel optical decoding of digital phase image to intensity image, European Patent application No. 06013569.6-2210 (2006)
- 54 H. J. Coufal, D. Psaltis, G. T. Sincerbox, "Holographic Data Storage", Springer-Verlang, Berlin 2000.
- 55 Heanue J. F., Bashaw M. C. and Hesselink L., Encryptedholographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing, Appl. Opt. 34 p.6012, (1995)
- 56 I. S. Reed, G. Solomon, Polynomial Codes Over Certain Finite Fields, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 8, No. 2 (1960)
- 57 S. B. Wicker and V. K. Bhargava, Reed Solomon Codes and Their Applications (IEEE, 1999)
- 58 L. Nikolova, T. Todorov, M. Ivanov, F. Andruzzi, S. Hvilsted, and P. S. Ramanujam, Polarization holographic gratings in side-chain azobenzene polyesters with linear and circular photoanisotropy, Appl. Opt. 35, 3835-3840 (1996)
- 59 X. C. Cheng, L. Z. Cai, Y. R. Wang, X. F. Meng, H. Zhang, X. F.Xu, X. X. Shen, and G. Y. Dong, "Security enhancement of double-random phase encryption by amplitude modulation," Opt. Lett. 33, 1575–1577 (2008).
- 60 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)
- 61 A. Kerekes, E. Lorincz, P. S. Ramanujam, and S. Hvilsted, "Light scattering of

thin azobenzene side-chain polyester layers," Opt. Commun. 206, 57-65 (2002).

- 62 Philippe Refregier and Bahram Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," Opt. Lett. 20, 767-769 (1995)
- 63 Buttyán Levente, Vajda István, Kriptográfia és alkalmazásai, Typotex Kiadó, 2005
- 64 Todd K. Moon, Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms, Wiley-Interscience, ISBN:0471648000 (2005)
- 65 S. Dolinar, D. Divsalar, and F. Pollara, Code Performance as a Function of Block Size, TMO Progress Report 42-133 May 15, (1998)
- 66 H. Kogelnik, "Coupled-wave theory for thick hologram gratings," Bell Syst. Tech. J. 48, 2909–2947 (1969).
- 67 M. G. Moharam and T. K. Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planargrating diffraction," J. Opt. Soc. Am. **71**, 811–818 (1981)
- 68 K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE Trans. Antennas Propag. 14, 302–307 (1966).
- 69 T. Namiki, "A new FDTD algorithm based on alternating direction implicit method," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 47, 2003–2007 (1999).
- 70 J. D. Jackson, "Scattering and diffraction" in Classical Electrodynamics, 3rd. ed. (Wiley, 1998) pp. 456–513.
- 71 G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," Appl. Opt. **35**, 2403–2417 (1996).
- 72 G. Barbastathis, M. Levene, and D. Psaltis, "Shift multiplexing with spherical reference waves," Appl. Opt. **35**, 2403–2417 (1996).
- 73 Wolfgang Hossfeld, Joachim Knittel, Oliver Malki, Frank Przygodda, Hartmut Richter, and Heiko Trautner, Shift Selectivity in Common-Aperture HolographyJpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) pp. 3793-3796
- 74 H. Horimai, X. Tan, and J. Li, "Collinear holography," Appl. Opt. 44, 2575–2579 (2005)
- 75 Nagy Z, Koppa P, Dietz E, Frohmann S, Orlic S, Lorincz E Modeling of multilayer microholographic data storage APPL OPTICS 46: (5)753-761 (2007)
- Nagy Z, Koppa P, Ujhelyi F, Dietz E, Frohmann S, Orlic S, Modeling material saturation effects in microholographic recording, OPT EXPRESS 15: (4)1732-1737 (2007)
- 77 M. David Egger and Mojmir Petran, "New Reflected-Light Microscope for Viewing Unstained Brain and Ganglion Cells", Science, 21, Vol. 157. no. 3786, pp. 305 – 307, (July 1967)
- 78 P. Davidovits and M. David Egger, "Scanning Laser Microscope", Nature 223,

831, (1969)

- 79 Frédéric Guattari, Guillaume Maire, Kevin Contreras, Carole Arnaud, Gilles Pauliat, Gérald Roosen, Safi Jradi, and Christiane Carré, "Balanced homodyne detection of Bragg microholograms in photopolymer for data storage," Opt. Express 15, 2234-2243 (2007)
- 80 E. Walker, A. Dvornikov, K. Coblentz, S. Esener, P. Rentzepis, "Toward terabyte two-photon 3D disk", Opt. Express **15** (19) (2007)
- 81 Hengchang Guo, H.Jiang, Le Luo, C.Wu, Hongcang Guo, X.Wang, H.Yang, Q.Gong, F.Wu, T.Wang, M.Shi, "Two-photon polymerization of gratings by interference of a femtosecond laser pulse", Chemical Physics Letters, 374, 381 (2003)
- 82 Y. S. Bai, R. R. Neurgaonkar, and R. Kachru, "Resonant two-photon photorefractive grating in praeseodymium-doped strontium barium niobate with cw lasers," Opt. Lett. 21, 567-569 (1996)
- 83 B. L. Booth, "Photopolymer Material for Holography," Appl. Opt. 14, 593-601 (1975)
- 84 Mohammad Sultan Mahmud, Izabela Naydenova, Tzwetanka Babeva, Raghavendra Jallapuram, Suzanne Martin, and Vincent Toal, "Determination of threshold exposure and intensity for recording holograms in thick green-sensitive acrylamide-based photopolymer," Appl. Opt. **49**, 5276-5283 (2010)
- 85 Dong, Y., Yu, X., Sun, Y., Hou, X., Li, Y. and Zhang, X., Refractive indexmodulated grating in two-mode planar polymeric waveguide produced by twophoton polymerization. Polym. Adv. Technol., 18: pp. 519–521. (2007)
- 86 Marc Dubois, Xiaolei Shi, Christoph Erben, Kathryn L. Longley, Eugene P. Boden, and Brian L. Lawrence, "Characterization of microholograms recorded in a thermoplastic medium for three-dimensional optical data storage," Opt. Lett. 30, 1947-1949 (2005)