

「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」

平成13年度採択研究代表者

井上 光輝

(豊橋技術科学大学 教授)

「超高速ペタバイト情報ストレージ」

1. 研究実施の概要

本研究は、1 PB/10Gbpsの記録容量・データ転送レートを具備する新規の情報ストレージ装置の実現を目的として、ホログラム光体積記録による光ディスク記録装置の研究開発を行っているものである。過去3年間の研究で、主な成果は以下の通りである。

- (1) コリニア・ホログラム方式により、100rpm程度で回転する光ディスクへの100GB容量のホログラム記録再生に成功した（世界初）。（19インチラック・200GB容量の光ディスク記録装置の事業化が開始されている）。
- (2) 磁気光学効果を用いることで数十ns/秒のピクセル反転速度を有する世界最高速の固体空間光変調器の開発に成功した。（2005年春に市場投入開始）。また、小型光ピックアップへの組込を可能とする電圧駆動型の固体位相変調デバイスへの発展に成功した（世界初）。このデバイスに用いる新しい磁気光学体として磁性フォトリソニック結晶を創製し、新しい学術分野を確立した。
- (3) ミクロ層分離によるフッ素系ナノ・ゲルフォトポリマー（世界初）の開発を行い、1000多重以上のホログラム多重においても超低収縮特性を具備することを実証した。実験的には数千多重以上の記録能力を有することを示した。

2. 研究実施内容

(1) ハードウェア・グループ

コリニア・ホログラフィでは、ホログラムの記録・再生いずれにおいても空間光変調デバイス（SLM）を利用する。SLMは、高記録密度を実現するために位相変調機能が不可欠であると同時に、高速データ転送レートを確保するための超高速動作が要求される。さらに小型光ヘッドへの組込のために発熱のない超消費電力型が望まれる。これらの要求を同時に満たす新しい固体SLMとして、磁気光学効果を用いたSLM（MOSLM）を開発した。また、このMOSLMによるコリニア・ホログラム記録再生評価のために、スタティック状態での評価装置（多重化テスター）と、光ディスク系での評価装置（ダイナミック・テスター）の開発を行った。さらに、メディア・グループが開発する新規のフォトポリマー材料や、磁気光学効果を利用したリライタブル材料評価のための高機能高精度メディア・テスターの

開発を行った。

磁気光学効果を用いたSLM (MOSLM) は、電流駆動によるデジタルMOSLMと電圧駆動によるアナログMOSLMの2つのデバイスについて研究を実施した。これらのデバイスでは特定光波長において高い透過率と大きな磁気光学効果を同時に具備し、かつデバイス化のために表面平坦性に優れる構成材料開発が重要であった。これらの要求を満たす新しいナノ構造磁気光学体として、磁性フォトニック結晶 (MPC) を創製した。この媒体は単層膜に比べ100倍に達する磁気光学効果を示し、また光学・磁気光学特性を人為的に操作できる特長を有しており、MOSLMの構成材料として最適なものといえる。MPCに関する研究は国内外を通じて例がなかったが、本研究結果から世界規模で研究者が増え、新しい学術領域を形成しつつある (MPCに関するシンポジウムが2004 MRS (ボストン) で開催された)。

一方、表面平坦性に優れ、磁気光学ピクセルの駆動を容易にする構成材料形成法として、選択成長エピタキシャル法を開発した。この手法によれば、MOSLM構成材料形成と同時に磁気光学ピクセルが形成でき、かつ表面には凹凸のないフラットな媒体が得られる。電流駆動型MOSLMでは駆動電流路の厳密な3次元解析を行い、局所的に強い磁場を印加できる構造を見出した。これらの要素技術を組合わせて形成したデジタルMOSLMのピクセル反転時間は、数十ナノ秒である。この値は、固体SLMとしては世界最高速度である。

アナログMOSLMについては、エアロゾル・デポジション法による低温セミラック形成技術を用いて、8V以下の駆動電圧で動作するデバイスの試作に成功した。このデバイスの駆動電流値は、1MHz駆動時において620 μ A程度と、従来デバイスの1/100以下の電流値で駆動できることを示した。現在、ホログラム記録における超高速固体位相変調SLMとして、多ピクセルタイプのデバイス形成を推進している。このような電圧で制御する磁気光学デバイスは世界的にも例がなく、極めて新規性の高いものといえる。このMOSLMをコリニア・ホログラフィでシフト・位相多重による超高密度化を狙う多重化テストを開発した。コリニア・ホログラフィはSLMによる回折光を利用することでシフト多重性に優れる。このテストを利用し、スポット径800 μ mで256 \times 256ピクセル程度の小さなページデータを利用した結果から、120mm ϕ 換算の容量は約500GBに達することが示され、本研究の1つの目標値である1TB/discの容量 (密度) が射程距離内であることが示された。現在、この多重化テストによるMOSLM位相変調機能の最適化を推進している。また、ダイナミックに回転する光ディスクメディアでの実験も併せて進めている。

(2) ソフトウェアグループ

ソフトウェア・グループは、研究開始時点で得られていたコリニア・ホログラフィによる原理実証モデルに関する性能評価と高密度化に対する検討、並びに高速に信号を処理するターボコーディングに関する試作とハードウェア化のための検討をターゲットとして研究を推進した。

ES-1の評価は、研究実施場所であるスタンフォード大学にES-1を搬入設置し、当該装置を中心として検討を行った。また信号処理に関するソフトウェア開発は、スタンフォード大学側でコアソフトウェアを開発し、このソフトウェアを前述した多重化テストに組み込

むことで性能を評価した。信号処理のハードウェア化はターボコーディング部分についてはTUT側で担当し（現在構築中）、多重化テストやダイナミック・テストへの導入、並びに後述する小型装置への導入を推進している。

ES-1の評価については、光学系及び光ディスク制御系に関する問題点が指摘され、この結果が現時点での回転系ホログラム記録再生を実現する重要な知見となった。ES-1はコリニア・ホログラフィ実証のための初期装置であるが、当該装置に関する重要な改良事項は現時点で全て満足されている。この観点からは本ターゲットの達成度は100%と評価できる。

一方、記録再生における高速信号処理に関するターボコーディングの開発は、コアソフトウェアの開発は終了しており、多重化テストでの評価とハードウェア化が推進されている。TUT側で行った評価では低BERに対する再生能力が優れている結果が得られているが、6:8変換による一般的な信号処理方法に比べ顕著な優位性は認められない。既にターボコーディングに関するハードウェア化も進められており（H16年度末に完成評価）、この結果を踏まえて最終的な信号処理手法の結論を導く予定である。コアプログラムに関しては100%の達成、ハードウェア化を含め最終的な評価に関しては85%の達成度であると評価できる。

（3）メディアグループ

ホログラム記録露光において、光開始重合ではポリマーの収縮が発生し、記録材料全体が収縮する。この収縮は記録された干渉縞を歪め、正しい再生像が得られないことを引き起こす。そこで、先ず最も基本的なアイテムとして、低い収縮率を実現し正しい再生像を得る記録材料を得ることをねらいとした。引き続き、感度を向上し、記録された干渉像の寿命を長くするなど、実用に耐えうる記録材料を完成する予定である。

理論シミュレーションにより、一般的な場合についてのホログラム干渉像の姿を描き、記録材料厚400 μm に対して目標収縮率は0.1%であることが明らかになった。膨張性ナノゲルを有するフォトポリマを用いるという新しいコンセプトにより記録材料系を設計し、収縮率0.05%の記録材料を得て、メディア・テスター基礎測定において、1000多重記録が可能であることを実験により示した。さらに現在の記録材料の基本性能として、理論多重度4500~8000多重が得られた。これは記録材料として、直径120 mmのディスクにおいて、1TBの情報記録ができる基本性能を見込めることを示す。

以上のように多重性能は、目標をほぼ達成できたが、上記多重性能は、記録材料のホログラム基礎測定（平面波ホログラム測定）により得られたものであり、コリニア光学系などレンズ系ホログラム測定における多重記録を実現することは残された課題である。現在、コリニア光学系ドライブに用いられるパルスレーザに対する感度が低いことも明らかになってきている。感度向上については、今後の検討課題といえる。進捗マイルストーンとの関係は、多重性能については、平成15年度40多重⇒平成16年度7月600多重⇒12月1000多重と進捗しておりほぼ70%の状況といえる。また収縮率については、平成15年度0.083%⇒平成16年度0.05%の数値データが得られており、80%以上の達成度といえる。上述した感度

の問題や、光ディスクメディアへの加工の問題、更にはメディア安定性の問題など、実用化に向けたメディア開発には未だ課題が残されており、全体的な進捗度は概ね60%程度と判断される。

(4) ドライブグループ

本研究の最終ターゲットである1PBの記憶容量をもつ情報ストレージを実現するには、ホログラム記録に原理を置きながら小型ドライブとして構築できるかどうかキポイントである。またジュークボックスとしてのストレージサーバ形態で可換メディア記録装置を具現化するには、いかにして回転する光ディスクにホログラムを記録再生するかという重要な問題がある。平成16年度までの範囲で、①最終的には現存するDVD装置程度の大きさまで小型化できる光学系の実現、②回転記録メディアでの記録再生、に焦点を絞って研究開発を行った。これらの知見を踏まえ、平成17～18年度の期間に、ハードウェア・グループが構築する超高速固体位相変調デバイス、メディア・グループが構築する超多重性ホログラムメディアを連携させて、1TB/discの容量と1Gbpsの転送レートを具備する小型装置を開発する。

研究開始当初に問題となっていたノイズやクロストークの低減に関して、①円偏波光の利用、②SLMからの回折光の利用、さらにメディア構造に工夫を施すことで、実質的なBERは 10^{-3} 以下の良好なホログラム記録再生を実現した。コリニア・ホログラフィではホログラムの記録と再生どちらにおいてもSLMで変調された光を利用し、単一レンズ系で構成した。またメディアには反射膜を導入することで、CDやDVDライクな片面からの記録再生を実現すると共に、従来の光ディスク技術であるトラッキングやフォーカシングといったディスク制御技術との組合せを可能とした。

コリニア・ホログラフィ法では、ページデータの記録再生には緑レーザー光 (532 nm) を、ディスクのトラッキングやフォーカシング制御には赤レーザー光 (720 nm) を用いた。この光ディスク制御技術とホログラフィ技術とを組み合わせることで、ダイナミックに回転する光ディスクであってさえ、数 μm というシフト多重性を確保しながら記録再生ができることを実証した。

以上の知見を踏まえ、コリニア・ホログラフィドライブを作製した。このドライブ装置を用いて、動画 (ムービー) の記録再生特性を調べた。現時点でエンコード・デコードなどの信号処理系のハードウェア化は終了していないので、これらの部分についてはPC上での処理として、回転ディスク上へのホログラムシフト多重による記録再生を行った。回転数100rpmで光ディスクを回転させ、ホログラムをシフト多重により記録再生した際のデータページを再生した。再生されたページデータは、記録メディアが回転しているにもかかわらず極めてSNRのよい良好なデータが得られている。現時点で、オーバーヘッドを入れた記憶容量は概ね100GBである。ページデータ容量を同一とした場合、この容量をディスク換算で500GBにするにはシフト多重でのシフト量を8 μm 、1TB以上にするには3 μm のシフト多重が要求される。原理的にはこれらのシフト多重で目標とするディスク容量が射程距離に入るが、ノイズも同様に増加することから、シフト多重と位相多重とを組み合わせ

た複合多重方式でのテラディスク開発が現実的であると思われる。これについては、次年度以降の研究計画で詳細な検討を実施する予定である。

3. 研究実施体制

(1) ハードウェアグループ

①グループ長：井上光輝（豊橋技術科学大学工学部，教授）

②研究項目：

A) 磁気光学効果を用いたデジタル空間光変調デバイス (*d*-MOSLM) の開発

B) 磁気光学効果を用いたアナログ空間光変調デバイス (*a*-MOSLM) の開発

C) MOSLM評価用コリニア・ホログラム多重化テスターの開発

D) 同上ダイナミック・テスターの開発

E) ホログラム記録材料評価装置 (スタティック・テスター) の開発

(2) ソフトウェアグループ

①グループ長：ランバertas・ヘッセリンク（スタンフォード大学工学部，教授）

②研究項目：

A) プロトタイプ・ドライブ (ES-1) の光学系評価

B) Enc/Dec高速信号処理系の開発

(3) メディアグループ

①グループ長：田中 善喜（メモリーテック株式会社，開発部長）

②研究項目：

A) フォトポリマ記録材料，同光ディスクメディア

B) リライタブル/イレーザブル記録材料

(4) ドライブグループ

①グループ長：掘米 秀嘉（株式会社オプトウエア，取締役）

②研究項目：

A) コリニア・ホログラフィ法による光ディスクドライブの開発

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

論文発表

○ A.V. Baryshev, T. Kodama, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue, “Optical Properties of Three-Dimensional Magnetophotonic Crystals Based on Artificial Opals,” Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 4, No. 4-2, pp. 290-292 (2004).

○ H. Kato, T. Matsushita, M. Egawa, H. Uchida, K. Nishimura, M. Inoue, “Behavior of Large Faraday Rotation in Magnetophotonic Crystal with Single-Cavity Structures, ” Trans. Magn. Soc. Japan, Vol. 4, No. 4-2, pp. 286-289 (2004).

- H. Takagi, J. H. Park, M. Mizoguchi, K. Nishimura, H. Uchida, M. Lebedev, J. Akedo and M. Inoue, "PZT - Driven Micromagnetic Optical Devices," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 785, pp.D6.10.1-DD6.10.6 (2004).
- 加島篤, 大橋敏弘, 井上光輝, 藤井壽崇, "強磁性酸化物薄膜における磁界誘導電気分極の直流バイアス電圧依存性," *日本応用磁気学会誌*, vol.28, No.9, pp. 981-986 (2004).
- Jae-Hyuk Park, H. Takagi, Jae-Kyeong Cho, H. Uchida, and M. Inoue, "Magneto-optic Spatial Light Modulator With One - Step Pattern Growth on Ion- Milled Substrates by Liquid - Phase Epitaxy," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.40, No.4, pp. 3045-3047 (2004).
- Jae-Hyuk PARK, Jae-Kyoung CHO, Kazuhiro NISHIMURA, Hironaga UCHIDA and Mitsuteru INOUE, "Selective-Area Micropatterning of Liquid-Phase Epitaxy-Grown Iron Garnet Films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 7B, pp.4777-4780 (2004).
- Alexander B. Granovsky, Mitsuteru Inoue, "Spin-dependent tunnelling at infrared frequencies: magnetorefractive effect in magnetic nanocomposites," *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol. 272-276 pp. e1601-e1605 (2004).
- Kazuhiro Nishimura, Tsuyoshi Kodama, Kazuo Anno, Alexander Baryshev, Hironaga Uchida, Mitsuteru Inoue, "Synthesis of ferrite coating LATEX spheres for three-dimensional magneto-photonic crystal," *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol. 272-276, pp. e1353 - e1354 (2004).
- H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, M. Inoue "Coexistence of large Faraday rotation and high transmittance in magnetophotonic crystals with multi - cavity structures," *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol. 272-276, pp. e1327 - e1329 (2004).
- H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, M. Inoue, "Preparation of magnetophotonic crystals with ND - controlled EB - evaporation method and their large enhancement of Faraday effect, " *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol.272-276, pp. e1305 - e1307 (2004).
- Jae - Hyuk Park, J. H. Kim, J. H. Cho, K. Nishimura, H. Uchida, M. Inoue, "An optical micro- magnetic display, " *J. Magn. Magn. Mat. Vol. 272-276*, pp.2260 - 2262 (2004).
- Yoshifumi Ikezawa, kazuhiko Nishimura, Hironaga Uchida, Mitsuteru Inoue, "Preparation of two - dimensional magneto - photonic crystals of bismuth substitute yttrium iron garnet materials," *J. Magn. Magn. Mat.*, Vol. 272-276, pp.1690 - 1691 (2004).

口頭発表（国際会議招待講演のみ記載）

- M. Inoue, “Magnetophotonic Crystals. (J1.1),” 2004 MRS Fall Meeting.
- M. Inoue, “Magneto-Optic Spatial Light Modulators for Use in Holographic Data Storage and Three- Dimensional Display(Tu-D-3) ,” Magneto Optical Recording International Symposium 2004(MORIS).
- H. Horimai, “Commercialization of Holographic Data Storage,” Cost Action P8 on Materials and Systems for Optical Data Storage and Processing European COST programme .