

「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。これまでの研究で、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 容量相当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。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。平成 17 年度は、電流駆動型デバイスに加えて電圧駆動デバイスのプロトモデルを完成させた。またアナログ変調可能なデバイスの試作を行い、動作確認を行った。リライタブルなホログラム体積記録媒体として磁性ガーネット膜を用いた記録再生を行い、イレーザビリティを実証した。

(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。平成 17 年度は、感度 8 cm/mJ まで向上させ、ページデータ記録を可能にする計画で記録材料の改善を行った。その結果、感度数値は未達 (2 cm/mJ) であったものの、コリニアホログラフィによるページデータ記録は可能な段階に至り、従来比較対象とみなしてきた世界レベル品と同等の記録性能（クロストークのシフト依存性、記録再生像の解像度）を得た。

## 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低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、磁性フォトリソニック結晶 (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、本研究成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に関する最初の国際シンポジウムが2004 MRS (ボストン) で開催され、その後2005 年にはモスクワ国際磁気会議で独立セッションがもたれた。2006 年には国内で開催されるMORIS でも独立したセッションが設けられる)。

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、図8に示すように数十ナノ秒である。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  $\mu$ 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。これらの知見を踏まえ、2005年度には16×16 ピクセルを有するプロトタイプデバイスの形成に成功した。2006年度には既に完成しているドライバ装置によって世界初のダ

イナミック動作のデモンストレーションを予定している。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。さらに新たなデバイスとして、従来の垂直磁化をもつ磁性ガーネット膜を用いたデバイスから、面内磁化を持つ磁性ガーネット膜を用いたデバイスを試作し、連続的な光の強度変調を実証した。

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、まずDMD を用いてホログラムの記録再生を試みた。スポット径 $800\ \mu\text{m}$  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、 $120\text{mm}\phi$  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。この結果を踏まえ、MOSLMに置き換えた光学系でも同様の実験を行い、DMD と同等の記録特性を有していることを見出した。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。

リライタブルホログラム材料として、磁性ガーネット膜の利用を検討した。その結果、消去可能なホログラム体積記録の実証に成功した。この結果を踏まえ、コリニア・ホログラフィでの記録再生特性の評価を急いでいる。

## （２）メディアグループ

ページデータ記録を行うには、緻密な干渉縞を記録する必要であり、シャープな回折光ピークの記録材料開発が不可欠である。このため、回折光ピークの形状がページデータの再生像に及ぼす影響を検討した。ページデータ記録再生は、コリニアホログラム測定装置（多重化テスト）を用いた。その結果、シャープな回折光ピークの記録材料では、 $3\ \mu\text{m}$  シフトで書込み像が消えるのに対し、ブロードな回折光ピークの記録材料では、 $3\ \mu\text{m}$  シフトでも書込み像が確認でき多重性の観点から回折ピークのシャープ性との相関を確認した。現時点で、A 社記録材料と比較し、感度は低いが同等のホログラム再生像を得ることができている。

一方、多重性能を論じる際、シフトスキャンは記録密度の向上を目指すための重要な項目である。そこで、コリニアホログラム測定装置を用いた $10\ \mu\text{m}$  ピッチ3多重記録時における再生特性を調べた。その結果、シフト0, 10,  $20\ \mu\text{m}$  で像が明るくなり、その間では暗くなる（像が消える）ことを確認した。即ち $10\ \mu\text{m}$  ピッチ以下で多重記録が可能であることを結論した。本研究で試作したメディアは、コリニアホログラフィによるページデータ記録が可能な段階に至り、従来より比較対象とみなしてきたA 社メディアと同等の記録性能を示すことが確認できた。

感度向上において、開始反応と成長反応を促進させることが重要である。前者の場合、光開始剤の増加や、開始反応増感剤の使用が有効となる。また、後者の場合、成長反応促進剤（反

応促進するフォトモノマー)の導入により、2種類以上のフォトモノマーの共重合反応速度が促進されることがある。ここでは、開始反応増感剤、反応促進剤併用することで感度向上を検討した。

開始反応増感剤として、クマリン系、ピロメセン系色素を、従来使用している光開始剤に適用し、開始反応増感効果を、反応率-時間曲線から評価した。この結果、増感剤の適用により、光開始剤単独（ブランク）では、立ち上がり時間6秒に対し、ピロメセンでは≒0秒、クマリンでは2.5秒と、初期反応性が向上した。また、特定のアクリルアミド系化合物において、フォトモノマーの初期反応速度が促進剤無しと比較して、17.6倍に向上する結果が得られた。

上記の測定結果より、初期反応性に効果の認められた開始反応増感剤、および成長反応促進剤を、記録材料にそれぞれ0.01%、20%適用して作製した記録メディアのホログラム回折効率測定から得られた（初期）感度倍率を算定した。その結果、従来の記録材料を基準とし、約25倍の感度倍率の効果が得られた。

フッ素系化合物は、低屈折率、低表面自由エネルギー、CF結合の安定性など興味深い特長を数多く有しており、屈折率や相溶性の差を利用することにより干渉縞を容易に形成させ得るなど、記録メディア材料として用いた場合そのポテンシャルは高い。我々は平成16年度、低表面自由エネルギー（撥水撥油性、低溶解性パラメータ（SPV）に着目し、他成分との反発力を利用した収縮率0%の超低収縮フッ素系ナノゲル構造を有する記録メディアを世界で初めて提案した。基礎実験結果（光重合前後の比重、密度測定により膨張率を測定）から、フッ素系ナノゲルが膨張するためには、構成成分であるフッ素系モノマー、マトリックス、および膨張トリガーの3成分が必須である事が確認できている。一般に、液体と固体の親和性の良さを測る簡便な方法として接触角の測定が挙げられる。そこで、上記フォトモノマー、マトリックス各々の単独硬化物表面における膨張トリガーとの接触角の経時変化を測定した。この結果、非フッ素モノマー硬化物、マトリックス硬化物ともに親和性は良好であるのに対し、フッ素系モノマー硬化物の場合、他成分に比べ親和性が劣っていることを確認した。このことは記録層形成時に、膨張トリガーは非フッ素ポリマーおよびマトリックス近傍に取り込まれやすいが、逆にフッ素ユニット近傍には存在しにくいことを示唆していると考えられる。

上記の結果からも膨張機構にはフッ素化合物と他成分の間の相互作用が必要であることが示唆されており、その機構発現については更なる詳細な解明検討を進めているが、現時点においては以下の様に考えている。即ち、本材料系ではフォトモノマー、膨張トリガーを閉じ込めたマトリックスゲル中で、フォトモノマーを感光、つまり重合させることでマトリックスにより閉じられた微小空間にてフォトポリマーが生成し、反応の進行とともに膨張トリガーが移動する。その結果、屈折率の差が生じ、干渉縞が形成されていく。非フッ素系フォトモノマーは

分子の中心に嵩高いユニットを有することから、マトリックスゲル中では硬化収縮率を大きくするミクロゲル化を引き起こす分子内環化反応や分子内架橋反応は抑制され、低硬化収縮性フォトポリマーが形成されると考えられる。

フッ素系フォトモノマーのSP 値は8.31 と、非フッ素系フォトモノマー10.62 との相溶性は悪いものの、感光基自体のSP 値は10.29 と高いため、光重合反応の進行とともにフッ素系フォトモノマーはフォトポリマーに取り込まれるが、フッ素ユニット自体のSP 値は7.81 と低いためフォトポリマー表面にて局在化するものと考えられる。モノマー状態では感光基により均一に相溶していたフッ素系フォトモノマーではあるが一旦フォトポリマーに取り込まれてしまうと、フッ素ユニットは非フッ素系フォトモノマーの嵩高いユニットとの間で反発しあい、フォトポリマー表面で局在化するものと考えられる。それとともに、この微小空間においてそれまで相溶化していた他の構成成分との間でも反発を生じる結果、構成成分の中で運動性のいい膨張トリガーがその影響を受け、微小空間において膨張ナノゲルのネットワーク構造を押し広げることが膨張要因に繋がるものと考えている。

本年度は感度向上が主課題であり、目標を感度8 cm/mJ、ページデータ記録を可能にする計画で研究を進めてきた。その結果、感度数値は未達（2 cm/mJ）であったものの、コリニアホログラフィによるページデータ記録は可能な段階に至り、従来比較対象とみなしてきた世界レベル品（A 社）と同等の記録性能（クロストークのシフト依存性、記録再生像の解像度）を得た。平成18 年度は、ページデータの記録再生性能をさらに向上させ、容量1TB/disc を達成するために、6 月末に記録材料の基本設計を、9 月末にディスク化を進めるとともに、コリニア光学系ドライブに用いられる連続光、パルスレーザ光に対する最適化を行っていく予定である。

### （3）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がキーポイントである。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  $\mu\text{m}$  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密度換算値で概ね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  $\mu\text{m}$ 、1TB 以上にするには3  $\mu\text{m}$  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。

上記作製したプロトタイプ装置で、ホログラムのシフト多重を深めていったところ、BER値が多重度に応じて変動する現象が見受けられた。これはもっぱら記録材料の性質と関係していることが判明し、記録材料としての性能の向上が重要と考えられる。一方、装置小型化の条件として、レーザ光源の問題がある。ジュークボックスなどへの展開では比較的大型のレーザシステムの利用は可能であるが、装置単体の大きさの観点からは半導体レーザなどの利用が好ましい。この観点からマルチモード半導体レーザでシングルモードのものとの記録再生比較を行った結果、両者ともBER 値で $10^{-3}$  オーダにあることが分かった。このことは、コリニア方式によればコヒーレンシーがあまり高くない半導体レーザを使用した場合であっても良好な記録再生が実現できることを意味しており、都合がよい。

これらの知見を踏まえ、H18年度は新たに開発した高速のCMOS センサを利用し、かつ1 ページあたりのピクセル数の増加、オーバーヘッドの低減によって、当初目標の容量1 TB/disc,

転送レート1Gbps を有するコリニアホログラフィ光ディスク記録装置の実現を目指す予定である。

### 3. 研究実施体制

#### ハードウェアグループ

- ①研究分担グループ長：井上 光輝（豊橋技科大電気・電子工学系、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

#### メディアグループ

- ①研究分担グループ長：田中 善嘉（メモリーテック㈱開発部、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

#### ドライブグループ

- ①研究分担グループ長：堀米 秀嘉（㈱オプトウエア、チーフエヴァンジェリスト）
- ②研究項目：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（論文発表および特許出願）

#### （1）論文（原著論文）発表

- A. M. Merzlikin, A. P. Vinogradov, M. Inoue, and A. B. Granovsky, “Giant photonic Hall effect in magnetophotonic crystals”, Phys. Rev. E, 72, p.046603 (2005).
- A. A. Fedyanin, D. Kobayashi, K. Nishimura, H. Uchida, M. Inoue, and O. A. Aktsipetrov, “Observation of Enhanced Faraday effect in Garnet-Based Magnetophotonic Crystals”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.834, pp.53-56 (2005).
- O. A. Aktsipetrov, T. V. Dolgova, A. A. Fedyanin, R. V. Kapra, T. V. Murzina, M. Inoue, T. Yoshida, D. Kobayashi, K. Nishimura, and H. Uchida, “Nonlinear Magneto-Optics in Garnet Magnetophotonic Crystals”, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.834, pp.57-64 (2005).

- A. V. Baryshev, T. Kodama, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue, "Three-Dimensional Magnetophotonic Crystals Based on Artificial Opals - Fabrication and Properties", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.834, pp.109-114 (2005).
- E. A. Gan'shina, M. Yu. Kochneva, P. N. Scherbak, K. Aimuta, M. Inoue, "Magneto-optical properties of Co-based nanocomposites", Proc. Moscow International Symposium on Magnetism, pp.140-144 (2005).
- Fedyanin A. A., Aktsipetrov O. A., Kurdyukov D. A., Gulubev V.G., INOUE M., "Nonlinear diffraction and second-harmonic generation enhancement in silicon-opal photonic crystals", Appl. Phys. Lett., vol.87(15), pp.151111-151111-3 (2005).
- Tsuyoshi Kodama, Alexander Baryshev, Kazuhiro Nishimura, Hironaga Uchida, Mitsuteru Inoue," Fabrication and Properties of Self-organized Three-dimensional Magnetophotonic Crystals", IEEEJ Trans. EIS, Vol.125, No.12, pp.1906-1911(2005).
- Kazuto Kashiwagi, Kenji Okamoto, Pang Boey Lim, Tomokazu Imura, Mitsuteru Inoue," Evaluation of Hologram Multiplexing Method for High-Density Recording", IEEEJ Trans. EIS, Vol.125, No.12, pp.1790-1797 (2005).
- S. G. Erokhin, Y. V. Boriskina, A. B. Granovsky, A. P. Vinogradov, (George) X. S. Zhao, and M. Inoue," Magnetorefractive effect in magnetophotonic crystals", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.834, pp.115-120 (2005).
- A. P. Vinogradov, A. M. Merzlikin, A. B. Granovsky, M. Inoue, and A. B. Khanikaev," Superprism effect in magneto-photonic crystals", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 834, pp.103-108 (2005).
- A. B. Khanikaev, M. Inoue, A. B. Granovsky, and A. P. Vinogradov," Solvable Model of Two-Dimensional Magnetophotonic Crystal", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.834, pp.97-102 (2005).
- Khanikaev A.B., Baryshev A. V., Inoue M. , Granovsky A. B., Vinogradov A.P.," Two-dimensional magnetophotonic crystal: Exactly solvable model", Phys Rev B, Vol.72, No.3, pp.035123.1-035123.9 (2005).
- Fedyanin A. A., Aktsipetrov O.A. (M.V. Lomonosov Moscow State Univ., Moscow, RUS), Kurdyukov D.A., Golubev V.G.," Nonlinear diffraction in enhanced second-harmonic generation from 3D opal-Si and opal-GaN photonic crystals", Proc SPIE Int Soc Opt Eng, Vol.5840, No.Pt.1, pp.185-191 (2005).
- H. Uchida, R.Fujikawa, T. Kodama, A. V. Baryshev, K. Nishimura, M. Inoue," Fabrication of 3D-Magnetophotonic Crystal With Artificial Opal Template Prepared by Gravitational Sedimentation", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 41(10), pp. 3526-3528 (2005).



- Aktsipetrov O.A, MurzinaT. V, Kim E. M, Kapra R. V, and Inoue M, ” Magnetization-induced second- and third-harmonic generation in magnetic thin films and nanoparticles,” Journal of the Optical Society of Am B, Vol.22, No.1, pp.138-147 (2005).
- Aktsipetrov O A, Dolgova T. V, Fedyanin A. A, Murzina T. V., Inoue M, Nishimura K, and Uchida H,” Magnetization-induced second- and third-harmonic generation in magnetophotonic crystals”, Journal of the Optical Society of Am B, Vol.22, No.1, pp.176-186 (2005).
- Hideyoshi Horimai and Xiaodi Tan, “Collinear Technology for Holographic Versatile Disc,” Applied Optics, Vol. 45, No. 5, pp.910-914 (2006).

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)