

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. 研究実施概要

インターネットやイントラネット等の本格的な普及に起因する情報通信データ量の急激かつ飛躍的な増大によって、光ファイバを高速で行き来する大規模大容量の情報をいかにして高速にアクセスしかつ蓄積するかという新しくかつ深刻な問題が提起されている。この問題の本質的な解決には、1ギガビット/秒 に達する高速データ転送を確保しながら、テラバイトからペタバイトに達する超高密度情報ストレージ技術の実現が不可欠であるが、現時点でこの要求を満たすストレージ装置は実現されていない。

この背景を踏まえ、本研究は従来のビット・バイ・ビット記録方式に換えて、ホログラム記録を基本技術とする新しい情報ストレージ装置を開発することで、21世紀の情報社会を支える新しい情報処理技術への利用を開拓しようとするものである。

平成13年度、14年度は、光ディスク技術とホログラム記録技術との融合を重要テーマとして掲げ、従来のCDやDVD技術の延長線上にホログラム記録というアナログ方式を位置づけさせる可能性について探求してきた。この結果、従来の光ディスク制御技術を導入することで、振動しながら回転する記録メディアという過酷な環境においてさえ、ホログラム（光の位相干渉パターン）を精度・再現性よく記録・再生できることを示した。このことは、将来的に小型光ディスクホログラム記録装置を開発する上で、重要な結論といえる。また、微小ホログラムを高速に書き込みするための要素技術として、高速高精細表示が可能な新しい空間光変調器（Spatial Light Modulator: SLM）の研究開発を実施し、磁気光学効果（MO）を利用した新しいSLM（MOSLM）の開発に成功した。この基礎研究成果は、後述する多くの学術論文や基本特許として具体化すると同時に、本研究がめざすストレージ装置への最終的な組込みを目的として、事業化ベースのMOSLM開発を開始した（JST委託開発事業）。

本研究が最終目標として掲げるペタバイト級の情報ストレージを実現するには、少なくとも1つの記録メディアあたりテラバイトに達する記録容量を実現することが不可欠であり、このための基礎研究開発が急務となっている。この観点から、本研究開始時点において、3年目終了時点（H16.12）で、1テラバイト（容量）と1ギガビット/秒（データ転送レート）を満たすホログラムストレージ技術の開発をターゲットとし、テスト・プ

ラットフォームの構築を行っている。これまでの研究成果から、この中間目標を達成するには、

- 1) 400ビット/ μm^2 以上の記録密度をビット・エラー・レート 10^{-4} レベルで実現する新しい記録材料（フォトポリマ）の実現、
- 2) ホログラム多重の最適化、
- 3) 高速データ転送を実現するためのパラレル処理技術の確立

が重要であるとの結論を得た。平成15年度は、上記の観点から研究を遂行し、所定の期間内で目標値の達成を目指す。

2. 研究実施内容

平成14年度に実施した研究項目は以下の通りである。

- ① ホログラム光ディスク記録再生装置ES-1の評価
- ② ホログラム光ディスク記録再生装置ES-2の開発
- ③ ホログラム記録理論解析
- ④ 空間光変調器の開発
- ⑤ フッ素系フォトポリマ材料の開発

以下、上記研究項目の内容と成果の概略を記す。

① ホログラム光ディスク記録再生装置ES-1の評価

平成14年2月に㈱オプトウエアより搬入されたホログラム記録再生装置ES-1について、以下の性能評価を目的として研究を実施した。

- 1) 記録波長532nmにおける単独ホログラム記録特性の評価（BER、および結像特性）
- 2) 多重記録特性の評価（BER 対記録密度）
- 3) ディスク傾き許容公差の検討（単独および多重ホログラム）

上記評価に先立ち、同装置の光学系、光ディスク制御系等の初期評価を実施した。その結果、以下の本質的な改修が必要であることを結論した。

- 1) TI社製DMDを照明する照明光学系の配置が、結像、および、ホログラフィー実験に対して許容不可能な、像の傾き、および、ピクセルの像のコントラスト低下を生じさせている。
- 2) 信号光と参照光の光路長が不均等なために、同装置で用いている中程度のコヒーレンス長を有するレーザ光源では、ホログラフィック記録が不可能である。
- 3) 記録メディア上の指定された場所（セクタアドレス）において、レーザの単パルス発振に同期して像を取り込む機能が動作しない（ホログラム試験に不可欠）。
- 4) フォーカスサーボの動作が不安定。
- 5) トラッキングサーボの動作が不安定で、ランド・グループ記録メディアにおいては、レーザが誤ってトリガーされる。

以上の初期不良について、㈱オプトウエアとスタンフォード大学側とが協力して1) 及

び2)について改修を行った。しかし、3)から5)の項目については、(株)オプトウエアからの全面的な協力が得られなかったために、改修を施すには至っていない。このため、当初予定したES-1についてのホログラム記録再生試験を行うことができなかった。

ES-1の評価とは別に、①薄い体積記録媒体（例；ホログラフィック・ディスク）を用いたシフト多重に関する完全な3次元モデルの構築を行った。この理論は、偏光コリニア記録再生におけるシフト多重の特性をモデル化する際に利用した。また、Advanced turbo-product codes に特化し、種々のホログラフィック・チャンネルコードの性能の初期評価を開始した。この成果は、H15年度から開始されるホログラム記録テスト・プラットフォームに利用する予定である。

② ホログラム光ディスク記録再生装置ES-2の開発

スタンフォード大学で実施したES-1の特性を踏まえ、上記難点のない新しいホログラム光ディスク記録再生装置ES-2の開発を実施した。当該装置は、

- 1) フォトポリマ材料を用いた記録メディアへの偏光コリニアホログラム記録及び再生実験の実施できること
- 2) ディスク基板に刻まれたプリフォーマットにより、ホログラムの記録材料としては従来不可能とされたディスク上の任意の場所で記録再生を再現性良く行うことができ、エラーレート測定など基本的な特性評価が可能であること
- 3) 空間光変調素子及びCMOSカメラシステムの高速化により、2次元のページデータ記録を高速に記録再生することで高速な転送レートを達成すること

の3点を目標として研究を実施した。Fig. 1に、作製したES-2のブロック図を示す。同装置の主な仕様は以下の通りである。

- ① 記録再生レーザ波長：532 nm
(Pules Laser)
- ② サーボ用レーザ波長：780 nm
- ③ ディスクサイズ：120 mm
- ④ ページサイズ：32500pixels/page
- ⑤ 記録密度：メディアに依存（システム上は任意）
- ⑥ 記録再生レート：メディアに依存するが、システム自体は100 Mbpsで記録再生可能
- ⑦ 記録容量：メディアに依存（システム上は任意）
- ⑧ ディスク回転数：100rpm

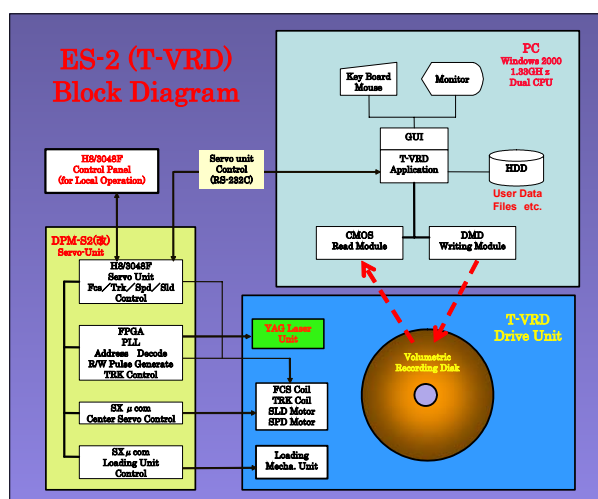


Fig. 1 ES-2 装置のブロック図

ES-2の詳細は添付資料に記載するが、ES-1で問題となっていたサーボ機構の改良、記録メディアであるホログラム光ディスクの物理・論理フォーマットの工夫などを実施し、

光ディスク上の所定の位置に単独ホログラムを再現性よく記録・再生可能であることを実証した。Fig. 2にホログラム光ディスク上の同じ位置にホログラムを記録した際の記録状態を示す（スポット計は200ミクロン、重なりは約100ミクロン）。

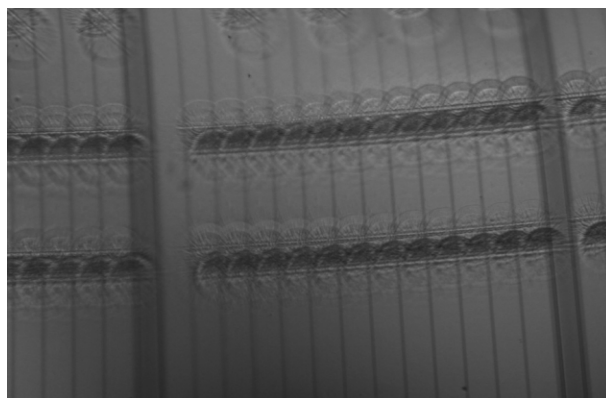


Fig. 2 ホログラム記録状態

作成したES-2の平均BERを評価したところ、概ね 10^{-2} オーダーにあることが判明した。この原因を調べたところ、偏光コリニア光学系の本質的な問題であることを見出した。即ち、同手法では、せん光板によって対物レンズに入射する光を空間的に左右に分けている為、ホログラム記録材料中で一方方向の空間分解能が低下する結果、分割された方向に垂直に伸びたような像が再生されることが根本の原因であると結論した。この難点を克服するには、偏光コリニア法で用いてきたせん光板による偏光操作を断念する必要がある。実際、添付資料に記すように、コリニアという特長は残しながら記録再生実験を行ったところ、再生像の質の向上が見られた。H15年度は、同手法に立脚した形でホログラム記録再生装置の再検討を実施する予定である。

③ ホログラム記録理論解析

従来、情報記録ホログラフィの考察においては、ほとんどの場合、参照光角度に等しい再生照明光角度の近傍における再生光（回折光）に関する議論がなされてきた。しかし、多重記録性や再生像の解像度などへ考察を進めるときには、回折光だけでなく、再生照明光を入射したときに射出されるすべての射出光を考慮しなければならない。

物体光（信号光）と参照光により形成されたホログラムに再生照明光を入射すれば、ブラッグ式に従う再生光だけでなく、反射光、透過光も出射される。いわゆる回折光だけでなく、反射光、透過光もすべて光の干渉や回折によって生成する射出光である。これらすべての射出光の方向（強度分布）を総合的に把握することは情報記録ホログラフィの基礎考察のために興味あることである。また、情報記録ホログラフィにおいては、記録層厚や露光スポットサイズがどのように射出光分布に影響するか総合的に考察することも興味あることである。

ここでは最も単純な系として、先ず散乱光などの擾乱要素のない非対向光学ホログラフィの平行ビーム系（平面波系）において射出光強度（回折効率）の角度分布を、記録層厚および露光スポットサイズを考慮して求める理論式を導き、Fig. 3に一例を示すような再生光分布の全体像を得た。次いで、これを対向光学ホログラフィ（信号光と参照光を正反対側から対向させて入射する場合）の出射光分布を明らかにすることに適用し、対向光学系を平行ビーム系と比較考察した。また、平行ビーム系を単純なレンズ収束系に写像変

換することにより、対向光学系と平行ビーム系を比較した。

理論解析の詳細は別途報告することとして、ここでは解析の結果得られた結論を記す。

(1) 記録層厚さの影響：記録層厚さを薄くすることで、主回折光の半値幅は変化しないが、再生光全体の角度分布は広がる。角度多重によって記録密度を向上させるには、厚い記録媒体が有利である。

(2) 露光スポットサイズの影響：露光スポットサイズの減少によって、主回折光の半値幅が広がると同時に再生光全体の角度分布も広がる。角度多重によって記録密度を向上させるには、大きな露光スポットサイズが有利である。

(3) 波長の影響：記録再生ビームの波長が長くなるにしたがって、再生光の幅・分布とも広がる。記録密度を向上させるには、より短い波長光が有利である。

(4) 対向光学系：信号光と参照光が対向する系（したがって位相干渉による干渉縞は記録層面に平行）と非対向系とを同じ記録層厚、露光スポット系で比較すると、対向系における再生光の角度分布は桁違いに広がる（再生光がブロード）ので、角度多重による記録密度向上は困難である。記録層厚、露光スポットサイズ、波長の影響については、非対向系との差異は認められない。

(5) シフト多重：非対向光学系においては、信号光と参照光との角度差を選べば干渉縞の角度を変更できるので、平行ビーム系においてもシフト多重可能。対向光学系では干渉縞が記録層面に平行に作られるので、シフト多重は原理的に困難である。レンズ収束系では、記録された干渉縞が平面にならず曲面になるので、シフト多重をしても異なる信号記録の干渉縞が互いに重ならず多重記録されることが期待される。

(6) レンズ集光系：非対向系での議論は別として、対向光学系では上述したように角度多重は原理的に不可能で、かつ平行ビーム対向系におけるシフト多重も原理的に困難であるので、レンズ集光対向系におけるシフト多重の可能性を議論する必要がある。対向系では、記録層を厚くして干渉縞曲率半径が大きい部分を増加させると平行ビーム系に近づくためにシフト多重は不利である。対向系においては、干渉縞間隔は記録層の厚さ方向に無関係に一定であるので、記録層の厚を小さくし、露光スポットサイズを小さくし、干渉縞の曲率半径をできる限り小さくするように開口度を大きくすることが有利といえる。例えば、露光スポットサイズの数分の1程度のシフトピッチにおけるシフト多重は可能であるように考えられるので、仮に露光スポットサイズ $100\ \mu\text{m}$ において、1 ホログラム・フレームが 32400 ピクセルであるとき、 120

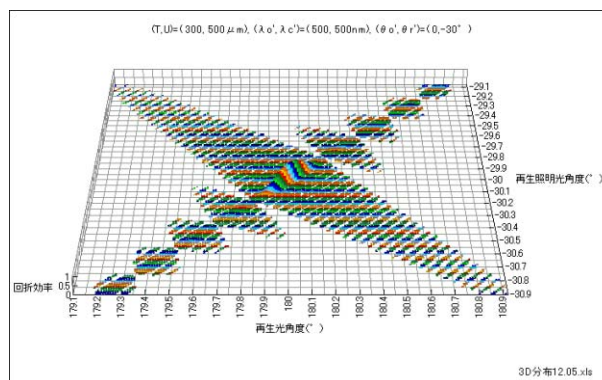


Fig. 3 信号光角度 0° 、参照光角度 -30° でスポットサイズ $500\ \mu\text{m}$ の平行ビームを厚さ $100\ \mu\text{m}$ のメディアに記録したときの再生光分布状態

mm直径のディスクに1テラバイトを記録するためには、400多重を達成しなければならない。これをシフト多重記録で実現するためには、シフトピッチは円周方向も半径方向も5 μ mでなければならないことになる。

④ 空間光変調器の開発

ホログラムの情報書込みに利用する空間光変調器 (SLM) について、高速高精細な新規デバイスの実現を目的として、磁気光学式の素子 (MOSLM) の開発を行った。最終的にホログラムストレージへの応用をめざし、以下の要求を満たす素子をターゲットとした。

- 1) 電流駆動型のMOSLMは、ピクセルを指定するX-Y電流路への駆動電流値を10mA以下とすること
- 2) ピクセルサイズ、ピクセルギャップとも自由な設計を可能とすること
- 3) ピクセル駆動のための外部バイアス磁界を不要とすること
- 4) 空間変調された光の後処理をデバイス内で実現するため、かつ作製プロセス上、表面平坦化処理を行うことなく平坦な表面構造をもつこと
- 5) 最終的に電圧で駆動するデバイスへの発展を期すること

以上のターゲットを踏まえ研究を遂行し、以下の結果を得た。

1) 低電流駆動型MOSLM：電流駆動ドライブラインの形状を厳密な3次元解析により行い、より強い局所的な磁場を発生するドライブラインを確立した。この解析結果を踏まえ、実際に作製したMOSLMで、約40mA程度の電流でピクセル駆動できる素子の作製に成功した。この値は目標値の4倍程度であるが、後述するフラット・サーフェース技術と組み合わせることで10mA程度の駆動電流でピクセル制御できることを見出した。

2) 局所熱処理法によるフラット・サーフェース化：赤外線による局所的な光吸収を利用して、ピクセル部分のみ磁化の値を下げた構造の素子を作製した。この磁気的なパターン化により、空間的にグループ構造を導入することなくピクセルを構成できることを見出し、従来は不可欠であった表面平坦化処理を必要としないMOSLMを得た。このデバイスの特性は、磁気的に分断されたピクセルを利用し、かつピクセル部の磁化の大きさを制御することによって、駆動電流値を下げることにある。この素子を実際に作製し評価したところ、Fig.4に示すように、10mA程度の電流値でピクセルが制御できることを実験的に確認した。

3) PZT圧電薄膜を用いた電圧駆動型素子：PZT圧電膜による局所的な応力印加によってピクセル内の磁化を反転させる素子を考案した。ゾルゲ

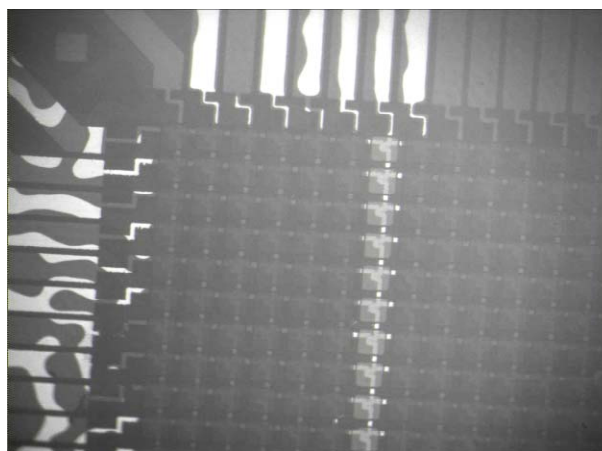


Fig. 4 フラットサーフェース MOSLM をライン駆動した状態

ル法によって得たPZT圧電薄膜を用いて実験的にMOSLM駆動を試みた結果、ピーク値8V、周波数10MHzのパルス状電圧の印加でピクセルが反転駆動することを実証した。

なお、電流駆動型MOSLMについては、ホログラム装置への組込に多くのピクセルをもつ素子が必要であることから、FDK社に開発を依頼しJST委託開発事業としてH15年度末には512×512ピクセル規模の素子が得られる予定である。

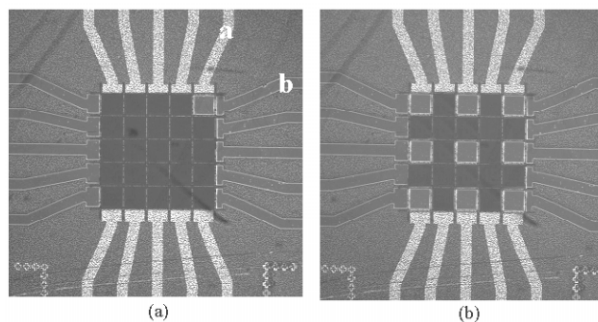


Fig. 5 電圧駆動型 MOSLM の駆動状態

⑤ フッ素系フォトポリマ材料の開発

ホログラム記録材料としてのフォトポリマ材料は、ライトワンスという特性をもつものの、現時点で最も現実的な記録媒体といえる。Aprilis社のCROP材料やInphase社の複合フォトポリマは、従来のフォトポリマに比べ多重性（記録密度）や感度が高く、かつ体積収縮が小さいと共に光散乱によるノイズが少ないために有望な記録材料といえるが、将来的な発展を考え合わせると回折効率や感度の点で更なるブレイクスルーが望まれる。本研究では、広い範囲で屈折率の調整が可能と期待されるフッ素系ポリマをホログラム記録材料として利用しようとするものである。

フッ素系モノマー、ポリマーの欠点は透明性が低いことで、この点の克服が重要といえる。ここでは、記録材料用素材選定のための第1次スクリーニングとして、支持層と感光層を兼備するフッ素系材料の化学構造を屈折率が1.4以下である下記A, BおよびCのフッ素系（メタ）アクリレート3種類のフッ素含有量、光重合触媒の溶解性、感光性を比較することによって如何なる形態にすればフッ素系材料が透明性を示すかを検討した。

A. トリフロロエチルメタクリレート

B. 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9-ヘキサデカフロロデカン-1,10-ジアクリレート

C. 3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10-ヘプタデカフオロロデシルアクリレート

その結果、フッ素含有量が53%程度であれば硬化物が透明性を維持出来、また、架橋点間距離は感光基1個当たり300程度のネットワーク構造をとれば、同用途への応用は可能であることが示唆された。これらの実験では、感光性付与のため光重合開始剤の検討も併せて行った。その結果、2-ヒドロキシ-2-メチル-1-フェニルプロパン-1-オンとビス(η⁵-2,4-シクロペンタジエン-1-イル)-ビス(2,6-ジフルオロ-3-(1H-ピロール-1-イル)-フェニル)チタニウムの併用により、光反応性を確認した。

この結果を踏まえて、B. 2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9-ヘキサデカフロロデカン-1,10-ジアクリレートのフッ素系アクリレートと光重合開始剤の組み合わせにより、回折効率の評価を行ったところ、干渉縞と回折光を観測した。この回折効率は、

記録材料厚180 μm 、露光時間300秒において、最大11%が得られた。この180 μm 厚試料の透過率88%、3603 μm 厚のものでは52%の値を得た。回折効率の角度選択性は、前述した理論解析結果とほぼ一致し、干渉縞が記録材料の厚み方向と幅方向に形成されていることを確認した。フッ素系記録材料において、高い透過性と本報告のシミュレーション結果とほぼ一致した干渉縞の形成が確認できたことは大きな成果である。今後、露光条件の最適化が必要である。これらの結果を踏まえて、H15年度は感光性フッ素材料の架橋密度、透明性を維持出来るフッ素含有量など、これまでに本用途への展開可能性が示唆された知見を基に、硬化収縮率を低下させることを加味した感光相「高屈折率+高極性」および支持相「低屈折率+低極性」の2相構造を有する記録材料用素材を選定し感度の向上を目指す予定である。

3. 研究実施体制

① SLM・MEDIAグループ

研究分担グループ長：井上 光輝（豊橋技術科学大学工学部、教授）

研究項目：(1) LPEガーネットベースSLMの構築

(2) フォトポリマ材料の開発

(3) 体積ホログラム理論解析

② DRIVEグループ

研究分担グループ長：堀米 秀嘉（株式会社オプトウエア、社長）

研究項目：光ディスク体積記録再生装置（ES2号機）の構築

③ EVALUATIONグループ

研究分担グループ長：ランバertas・ヘッセリンク（スタンフォード大学、教授）

研究項目：光ディスク体積記録再生装置（ES1号機）の記録再生特性評価

4. 研究成果の発表

(1) 原著論文

- Jaehyuk. Park, Jeakyeong Cho, Kazuhiro Nishimura, and Mitsuteru Inoue, *Magneto-optic spatial light modulator for volumetric digital recording system*, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 1813-1816 (2002).
- Jaehyuk. Park, Jeakyeong Cho, Kazuhiro Nishimura, and Mitsuteru Inoue, *New drive line shape for reflective magneto-optic spatial light modulator*, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 2548-2251 (2002).
- J. H. Park, D. H. Lee, J. K. Cho K. Nishimura, and M. Inoue, *Effects of groove depth and patterned permalloy film on magnetization switching of LPE-garnet pixels for use in magneto-optic spatial light modulators*, J. Appl. Phys. **91**, 7014-7016 (2002).
- Jae-hyuk Park, 西村一寛, Jae-kyeong Cho, 井上光輝, *磁気光学効果を用いた空間光*

- 変調器, 日本応用磁気学会誌, **26**, 729-737 (2002).
- 加藤英樹、松下毅、井上光輝, 反射型磁性フォトニック結晶の特性, 日本応用磁気学会誌, **26**, 340-344 (2002).
 - Hideki Kato, Mitsuteru Inoue, *Reflection-mode operation of one-dimensional magnetophotonic crystals for use in film-based magneto-optical isolator devices*, Journal of Applied Physics, **91**, No.10, 7017-7019 (2002).
 - J. C. Niepce, D. Stuerger, T. Caillot, J. P. Clerk, A. Granovsky, M. Inoue, N. Perov, G. Pourroy, and A. Radkovskaya, *The Magnetic Properties of Magnetic Nanoparticles Produced by Microwave Flash Synthesis of Ferrous Alcoholic Solutions*, IEEE Trans. Magn., **38**, No.5 2622-2624 (2002).
 - Kazuhiro Nishimura, Mitsuteru Inoue, Masanori Abe, *Wide Variety of Ferrite Fine Particles Synthesized Form Aqueous Solution at Room Temperature*, IEEE Trans. Magn., **38**, No.5 , 3222-3224 (2002).
 - H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, and M. Inoue, *Properties of One-Dimensional Magnetophotonic Crystals for Use in Optical Isolator Devices*, IEEE Trans. Magn., **38**, No.5 (2002) 3246-3248.
 - A. A. Fedyanin, T. Yoshida, K. Nishimura, G. Marowsky, M. Inoue, and O.A. Aktsipetrov, *Magnetization-induced second-harmonic generation in magnetophotonic microcavities based on ferrite garnets*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, **76**, 527-531 (2002).
 - Alexander B. Granovsky and Mitsuteru Inoue, *Magnetorefractive Effect and Cubic Nonlinear Magneto-optics in Magnetic Granular Alloys*, J. Magn., Korea., **8**, No.1 45-49 (2003).
 - Jaehyuk Park ,Mitsuteru INOUE, Jaekyeong Cho, H. Uchida and K.Nishimura, *An optical micro-magnetic device: magnetic-spatial light modulator*, J. Magn., Korea, **8**, No.1, 50-59 (2003).
 - Andrey A. Fedyanin, Takashi Yoshida, Kazuhiro Nishimura, Gerd Marowsky, Mitsuteru Inoue and Oleg A. Aktsipetrov, *Nonlinear magneto-optical Kerr effect in gyrotropic photonic band gap structures: magneto-photonic microcavities*, J. Magn. Magn. Mater., **258-259**, 96-98 (2003).
 - Alexander B. Granovsky, Michail V.Kuzmichov, Jean-Pierre Clerc, Mitsuteru Inoue, *Effective-medium theory for nonlinear magneto-optics in magnetic granular alloys: cubic nonlinearity*, J. Magn. Magn. Mater., **258-259**, 103-105 (2003).
 - Hideki Kato, Takeshi Matsushita, Akio Takayama, and Motoji Egawa, Kazuhiro Nishimura, Mitsuteru Inoue, *Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals*, J. Appl.

Phys., 93, No.7, 3906-3911 (2003).

- Jae-Hyuk Park, H. Takagi, Dong-Hoon Lee and Jae-Kyeong Cho, K. Nishimura, H. Uchida and M. Inoue, *Magnetic softening of switching field of magnetic garnet films by controlling groove depth*, Journal of Applied Physics (2003), in press.
- Jae-Hyuk Park, H. Takagi, Jae-Hak Park and Jae-Kyeong Cho, K. Nishimura, H. Uchida and M. Inoue, *Novel magneto-optic spatial light modulators driven by an electric field*, Journal of Applied Physics (2003), in press.
- Jaehyuk Park , H. Takagi, Jaehak Park, Jaekyeong Cho, K. Nishimura and M. Inoue, *Magneto-optic spatial light modulator array fabricated by IR annealing*, Jpn. J. Appl. Phys. (2003), in press.
- J. H. Park, H. Takagi, J.K. Cho, K. Nishimura, H. Uchida, and M. Inoue, *Flat-Surface Pixel for Magneto-Optic Spatial Light Modulator*, IEEE trans. Magnetics. (2003), in press.
- Jaehyuk Park , Jae-Kyeong Cho, Kazuhiro Nishimura, Hironaga Uchida and Mitsuteru Inoue, *Numerical Analysis of One-Dimensional Magnetophotonic Crystals with an Active Layer of a Highly Bi-Substituted Iron Garnet*, Jpn. J. Appl. Phys. (2003) in press.

(2) 特許出願

2件