

解説

磁気光学効果を用いた空間光変調器

Magneto-Optic Spatial Light Modulators

Jae-hyuk Park^{*1,*2}・西村一寛^{*1,*2}・Jae-kyong Cho^{*3}・井上光輝^{*1,*2}

*1豊橋技術科学大学電気・電子工学系・*2科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業・*3Gyeongsang National University

J. Park^{*1,*2}, K. Nishimura^{*1,*2}, J. Cho^{*3}, and M. Inoue^{*1,*2}, *1Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Toyohashi University of Technology, *2CREST, Japan Science and Technology Corporation, and *3Dept. of Electronic Material Eng., Gyeongsang National University

Spatial light modulators (SLMs) are centrally important devices in volumetric recording, data processing, pattern recognition, and other optical systems. Various types of reusable SLMs with two-dimensional pixel arrays have been intensively developed. Of these, magneto-optic spatial light modulators (MO-SLMs) have the advantages of high switching speed, robustness, nonvolatility, and radioactive resistance.

In this article, following a brief description of currently available SLMs, we review recent development work on MO-SLMs, mainly in relation to our own studies.

Key words: spatial light modulator, magneto-optical effect, magnetophotonic crystal, micro-magnetic device, volumetric optical recording

1. はじめに

空間光変調器 (Spatial Light Modulator: 以下 SLM と略記する) は、光の振幅、位相あるいは偏光の状態を空間的に変調する素子である。この種の素子は、1950 年代の写真フィルムを利用した研究に端を発するが、2 次元的なピクセル (pixel) の配列をもつ SLM は情報を高速に並列処理をできることから、光学的相間器、光コンピューティング、プロジェクター TV、あるいは光体積記録などを実現するキーデバイスとして、この 50 年間精力的に研究されている。

代表的な SLM には、液晶 SLM、磁気光学 SLM (MO-SLM)、多重量子井戸 SLM、メンブレンミラー SLM (DMD など) が開発されている。Table 1 は現在利用可能な代表的 SLM の性能の一例¹⁾を示したものであるが、高精細や

高速応答が必要な応用では、マイクロ加工された多数のミラーを駆動するメンブレンミラー型の SLM が実用的である。実際、民生用プロジェクター TV では TI 社の DLP™ 技術に基づく DMD や Silicon Light Machines 社のグレーティング・ライト・バルフ (GLV) 技術に基づく 1 次元 MEMS 型の SLM²⁾ が優れている。また強誘電体液晶 SLM (FLC) や DMD は、2 次元配列ピクセルを比較的高速に駆動可能であることから、光体積記録用の SLM としても利用が検討されている³⁾。

これらの機械的駆動型 SLM あるいは液晶型 SLM とは別に、光ピックアップなどの小型光学システムへの応用を目指し、より高速に駆動可能な固体 SLM 実現の要望も強い。本稿では、この要求を満たす候補デバイスの一つとして、磁気光学効果を利用する固体 SLM について、我々の研究成果も交えて解説する。

2. 磁気光学効果を利用した SLM

2.1 初期の MO-SLM

磁気光学効果を利用した SLM (MO-SLM) は、(1) 磁化反転によるピクセルのスイッチングスピードが速い、(2) 堅固、耐放射能性に優れる、(3) 不揮発性、という特長をもつことから、主に宇宙空間での MROC (Miniature Ruggedized Optical Correlator) として利用されている。

最初の MO-SLM は、ディスプレイ素子およびプリンタヘッドへの応用を目的として、1970 年代初頭にフィリップス社によって開発された MOPS (Magneto-Optic Photoconductive Sandwich)⁴⁾ である。MOPS は、光を変調するための磁気光学材料として希土類鉄ガーネットエビ

Table 1 Specification of currently available SLM

Device	Company	Array size	Frame rate	Data writing rate
Twisted-nematic liquid crystal SLM (LCSLM)	Kopin	640×480 (VGA)	33 ms	10 Mpix/s
Ferroelectric liquid crystal SLM (FLCSLM)	Displaytech	256×256	100 μs	650 Mpix/s
Deformable mirror device (DMD)	Texas Instruments	VGA or SVGA	20 μs	15–40 Gpix/s

タキシャル薄膜を用い、フォトリソグラフィー法によってガーネット膜に四角形の2次元的なアレーを作製してディスプレイ素子としたものである。MOPSの情報の記録(ピクセル磁化反転)は、磁性ガーネット膜の熱磁気効果を利用しているため、スイッチング速度が遅いという致命的欠点をもつことと、レーザビームを各ピクセルに照射するために要求される大きな偏向角をもつ光偏向器がないということで実用化には至っていない。

その後1980年代末に、当時のソビエト連邦によりMOCT(Magneto-Optic Controlled Transparency)⁵⁾が開発されている。MOCTも磁性ガーネット膜を使用しているが、ピクセルの磁化反転スイッチングに際し、反対方向を向く磁化領域の核生成を必要としないため、駆動電流が小さく消費電力が小さいという特長をもつが、MOPS同様スイッチング速度が遅く、また記録された情報の分解能と安定性が悪いという致命的欠点があった。

2.2 実用化された MO-SLM

最初に実用化されたMO-SLMは、1980年代初頭から米国のリットン社によって開発されたLIGHT-MOD(Litton Iron Garnet H(magnetically) Triggered Magneto-Optical Device)⁶⁾である。Fig. 1にLIGHT-MODのピクセルスイッチング原理を示す。この素子は、MOPSと同じく四角形の磁性ガーネットのピクセルアレー構成を用いている。情報の記録は、各ピクセル上にX-Yの格子形状に

パターン化した金属薄膜(ドライライン)に電流を流し、この電流により発生した磁場により特定のピクセルに反転磁区を生成(核生成)させ、その後ピクセルアレー全体にバイアス磁場を印加してピクセル内部の磁壁をピクセル端部まで移動させてピクセルスイッチングを行う。情報の再生は、ファラデー効果を用いている。この素子は駆動電流により電気的に駆動するためピクセルスイッチング速度が速く、また記録された情報が不揮発性で安定という長所をもっている。しかし、核生成に大きな磁場(したがって大きな駆動電流)が必要で消費電力が大きく、また発熱の問題が回避できない欠点があった。

透過モードで動作するLIGHT-MODはLIGHT-MODTMと呼ばれるが、この素子はピクセルサイズおよびピクセル間ギャップが大きいため素子の全体サイズが大きく、オプティカルコレータを構成した際、光学系の焦点距離が長いためコレータ長が数mに達するという取り扱いにくいものであった。またその光学的性能にも限界があった。現在、ピクセル数128×128(64 kbit)、ピクセルサイズ57×57μmのLIGHT-MODTMが主に軍事目的に使用されている。

1990年代に入って、米国のカーネギーメロン大学とリットン社との共同研究で開発されたMO-SLM(R-MOSLM: Reflective Magneto-Optic Spatial Light Modulator)⁷⁾は、前述のLIGHT-MODとは異なり、磁気光学

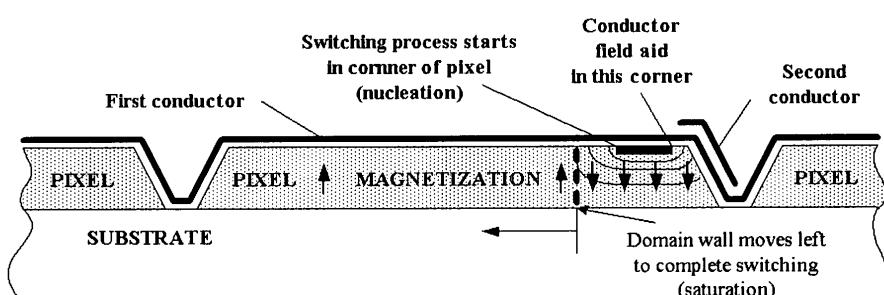


Fig. 1 Pixel switching process in LIGHT-MOD.⁶⁾

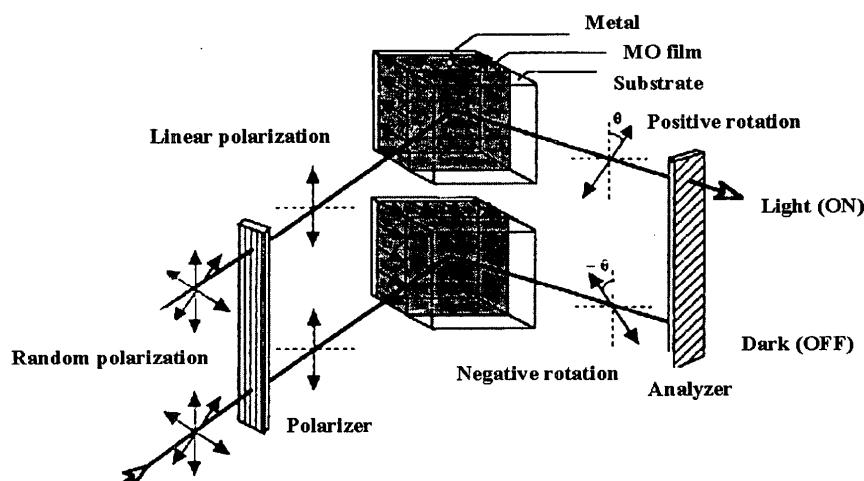


Fig. 2 Operation of R-MOSLM.

効果の非可逆性に着目した反射型の SLM である。Fig. 2 に R-MOSLM の原理図を示す。磁化方位に対応して入射光の偏光面回転角が正負となり、かつ反射構造によって 2 倍のファラデー回転角が得られるのでコントラストの向上が得られるものである。

この素子は相対的に薄い磁性ガーネット膜を用い、半導体デバイスと同様のドライプロセスを利用することで、ピクセルサイズ $22 \mu\text{m}$ 、ピクセル間ギャップを $2 \mu\text{m}$ と小型化したものである。Fig. 3 は、1 ピクセルあたりの X および Y ドライブラインを描いたものである。このドライブラインはピクセル中央の幅が狭くなった蝶ネクタイに類似した構造をもつ。この形状は、Fig. 4 に示す断面図からよくわかる。R-MOSLM での反転磁区形成はドライブライン側面に発生する磁場を利用するため、ピクセルの中央に $9.6 \times 1.6 \times 0.3 \mu\text{m}$ 尺寸の溝を掘り、X ドライブラインをピクセル内に埋め込んだ構造をもつ。また Y ドライブラインは、ピクセルの中央部分で X ドライブラインと交差させるために、X ドライブライン上に四角形の絶縁体膜 ($6 \times 6 \mu\text{m}$) を介して形成されている。これら X, Y ドライブラ

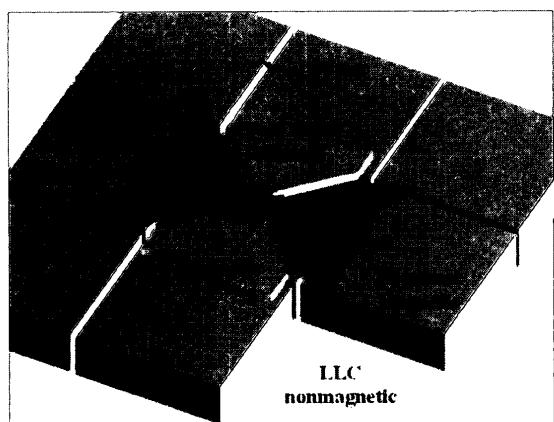


Fig. 3 Drive line structure of R-MOSLM.

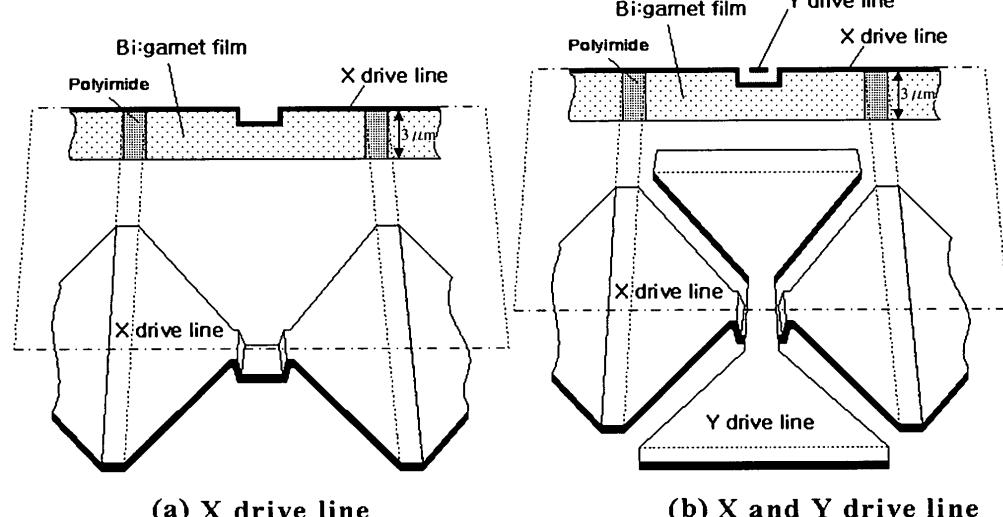


Fig. 4 Cross-sectional views of the drive lines in R-MOSLM.

インは、絶縁層を形成したピクセル中央部分を除いて、ピクセル表面に密着し反射膜の役割も果たしている。

R-MOSLM は、透過型の LIGHT-MOD に比べて分解能と光効率が向上しており、主に反射型のオプティカルコレータに使用されている。しかし、ピクセルスイッチングに要する電流値は 100 mA から 200 mA と大きく、前述の LIGHT-MOD 同様に消費電力と発熱の問題がまだ回避されていない。

これらの MO-SLM は磁性体の磁化反転を利用してピクセル表示を行うため、動作速度が極めて速い特長をもつ。すなわち、一般的に磁化の反転スピードは数 ns のオーダに達するので、デバイス全体の設計をうまく行うことで不揮発性の超高速 SLM が得られるものと期待される。実際、Table 2 に示すように、リットン社の反射型 MO-SLM (R-MOSLM) は FLC 以上のスピードと解像度を併せもつ。この MO-SLM の欠点は、同表からも明らかなように、駆動電流値が数百 mA オーダと大きく発熱の問題があることに加えて、電極構造が複雑で作製工程が煩雑であること、また LPE 法で育成した希土類鉄ガーネット膜を用いているためにピクセルサイズおよびギャップ間隔の低減が困難であることなどが挙げられる。これら欠点のない MO-SLM が得られれば、DMD のような機械的駆動部のない完全ソリッドステート形状の超高速不揮発 SLM が実現でき、光体積記録や光コンピューティングなどの応用上魅力あるものといえる。

3. 低電流駆動型 MO-SLM の設計と作製

我々は、上述の欠点のない新しい MO-SLM 実現を目指し、以下の二つの観点から基礎的性質を調べてきた。

- (1) 駆動電流値を X, Y ドライブラインともに 30 mA 程度に低減した LPE ガーネットベースの R-MOSLM
- (2) ピクセルサイズ、ピクセルギャップ間隔の低減を目

Table 2 Characteristics of R-MOSLM, T-MOSLM, and FLC

	R-MOSLM ⁷⁾	T-MOSLM ⁸⁾	FLCSLM ⁹⁾
Material	Fe-Garnet	Fe-Garnet	Ferroelectric LC
Number of pixels	128×128	128×128	128×128
Pixel size (μm^2)	22×22	57×57	22×22
Resolution (lines/mm)	42	13	33
Drive voltage (V)	10	25	5–10
Frame rate (kHz)	>1	1	1
Contrast ratio	30:1	15:1	10:1
Optical efficiency (%)	1	0.5	—
Power consumption (mW/frame)	0.1	1	10
X drive current (mA)	50	350	—
Y drive current (mA)	230	450	—

的とした薄膜ベース（磁性フォトニック結晶ベース）の MO-SLM

またこれらの知見を踏まえて、最終的に TTL レベル程度の電圧でピクセル制御可能な電圧駆動型 MO-SLM の開発を目指している。ここでは上記(1), (2)について得られた結果の一部を紹介する。

3.1 低電流駆動型 MO-SLM の設計

(1) の MO-SLM の開発は、いかにして 30 mA 程度の低電流値でピクセル内の反転磁区核を形成するかという問題に帰着し、これは効率のよい X, Y ドライブラインの設計問題となる。X, Y ドライブライン構造を用いた R-MOSLM 場合、反転磁区核形成には Table 2 に記したように最大で 250 mA 程度のパルス電流が必要となる。この電流値の低減を目指し、有限要素法による 3 次元電磁界解析により、さまざまな形状のドライブラインから発生する磁場解析を行い、より効率のよいドライブライン形状を探査した。解析にはドライブラインの材質に Al を仮定し、バルーン境界条件を用いた。解析におけるエネルギー誤差は 1.96% であった。この解析結果から決定した最終のドライブライン構造を Fig. 5 に示す。このドライブラインは、ピクセル面上部にウェッジをもち、X, Y ドライブラインが交差する点(a)で強い垂直方向磁場が発生するよう設計されている。また反射光の利用効率を高めるため、ピクセル全体を反射膜として覆う形状となっている。

R-MOSLM に用いられている LPE 磁性ガーネット薄膜では、反転磁区核形成に必要な局所的膜厚方向 (z 方向) 磁場の大きさ (H_z) は約 300 Oe である。そこでこの H_z 強度を一つの目安として、Fig. 4 に示した R-MOSLM のドライブラインと、Fig. 5 に示したドライブラインの性能を比較してみると次のようになる。Fig. 6 は R-MOSLM のドライブライン (0.2 μm 厚) に 100 mA の電流を流した場合に、ドライブラインの幅が狭くなった部分 (1.6 μm 幅) における H_z の変化を、ドライブライン側面からの距離 X に対して求めたものである。同図では、ドライブライン下面 ((b) $z=0$) と、ドライブライン中央部の (a) $z=0.1 \mu\text{m}$ お

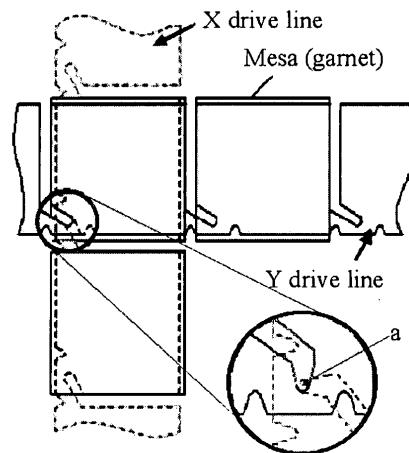


Fig. 5 Schematic drawing of the X and Y drive lines determined by 3-dimensional electromagnetic analysis.

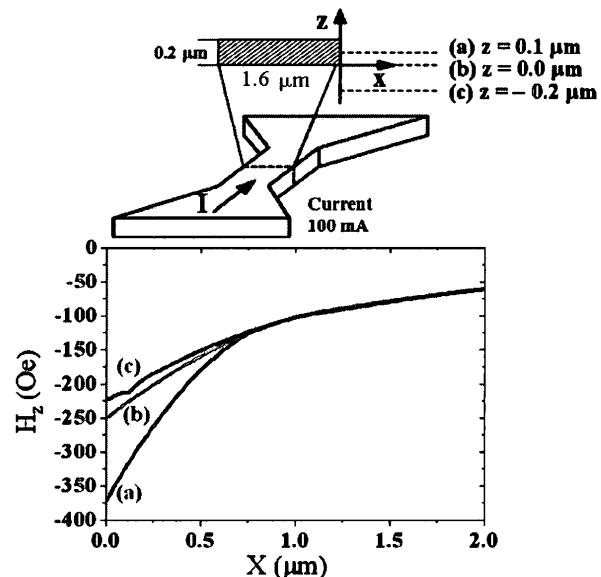


Fig. 6 Change in the perpendicular magnetic field intensity H_z as a function of the distance X from the R-MOSLM drive line (shown in Fig. 4) with a 100 mA current.

および(c) $z = -0.2 \mu\text{m}$ の場合について示してある。最大の H_z は、 $x=0$ (ドライブライン側面) の $z=0.1 \mu\text{m}$ の個所で $H_z=375 \text{ Oe}$ が発生し、ドライブラインから離れるに従って急激に減少している。つまり、この構造のドライブラインで最大の H_z を有効に利用するには、ドライブラインを磁性ガーネット中に埋め込む必要があることを示している。実際、リットン社の R-MOSLM のドライブラインは、X ドライブラインの埋め込み構造を採用し、構造が複雑になることを犠牲にして駆動磁場強度 H_z を高めている。

Fig. 7 は設計したドライブラインのウェッジ部における垂直磁場強度 H_z の変化を示す。R-MOSLM の場合 (Fig. 6) と同様に、100 mA の駆動電流を流した場合について、ドライブライン側面中央部 ((a) $z=0.1 \mu\text{m}$)、ドライブライン下面 ((b) $z=0$)、およびドライブライン下面から下に $0.2 \mu\text{m}$ の場所 ((c) $z=-0.2 \mu\text{m}$) における H_z の変化をドライブライン側面からの距離 x の関数として計算した。ドライブライン側面である $x=0$ で H_z を評価してみると、(a) $z=0.1 \mu\text{m}$ では Fig. 6 の R-MOSLM の約 2 倍に達する 860 Oe の H_z が発生し、また (b) $z=0$ 、(c) $z=-0.2 \mu\text{m}$ においても 300~400 Oe の強い垂直方向磁場 H_z が発生することがわかる。この結果は、Fig. 5 に示したドライブラインを用いることで、R-MOSLM の場合に比べより小さい電流で反転磁化核形成ができること、ならびに R-MOSLM のようなライン埋め込み構造を用いる必要がないことを意味している。埋め込み構造を用いなくてもよいので、MO-SLM 作製工程が大幅に少なくなり、またこのドライブライン形状はピクセル全面を覆う構造なのでより作製が簡便となる特長をもつ。

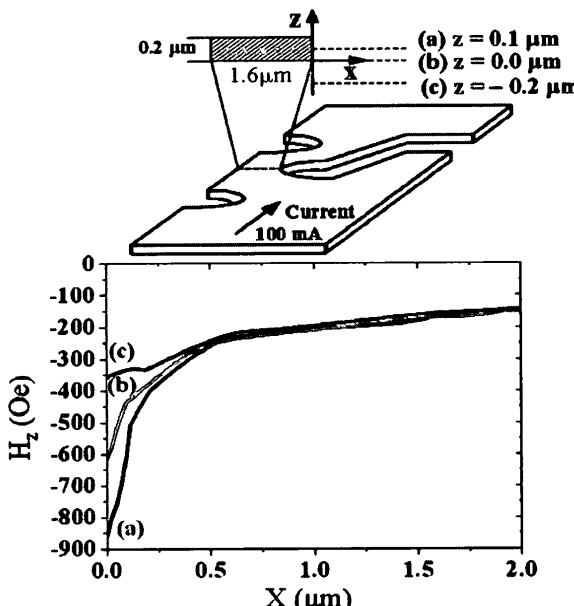


Fig. 7 Change in the perpendicular magnetic field intensity H_z as a function of the distance X from the newly designed drive line (shown in Fig. 5) with a 100 mA current.

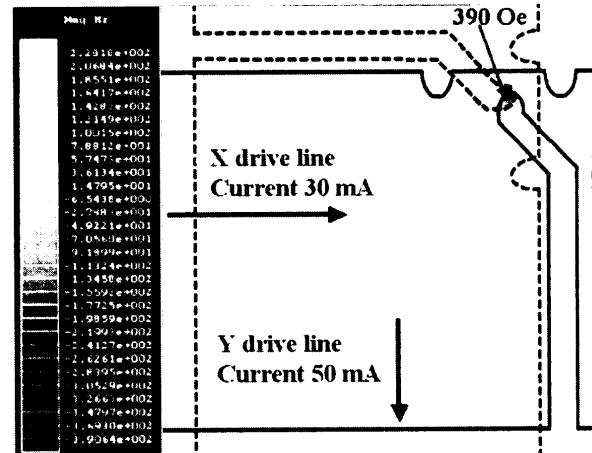


Fig. 8 Distribution of the perpendicular magnetic field H_z due to the X drive current 30 mA and Y drive current 50 mA, which are simultaneously introduced in the newly designed drive lines.

Fig. 8 は Fig. 5 の X, Y ドライブラインを流れる電流によってピクセル面に発生する垂直磁場強度 H_z の空間分布を求めたものである。この場合、X ドライブラインに 30 mA, Y ドライブラインに 50 mA の駆動電流を流すことによってウェッジ部分に 390 Oe の一方向の局所的な磁場が得られており、設計したドライブラインは当初目的をほぼ満たす性能を有しているといえる。

3.2 LPE ガーネットベース MO-SLM の形成と特性

前節で述べたドライブラインの性能を実験的に確認するため、500 mm 厚の SGGG (Ca, Mg, Zr: $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) 基板上に LPE 法で形成した厚さ 5 μm の希土類鉄ガーネット膜 ($(\text{BiGdY})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$) を用いた MO-SLM を作製し、その基礎特性を調べた。なおこのガーネット膜の光波長 633 nm におけるファラデー回転角は 5 度である。

素子は 1 インチ基板を基準として設計し、1 基板内に 9 個のテストデバイスを同時に形成した。ピクセルのサイズは $100 \times 100 \mu\text{m}$ とし、ピクセルの数は 5×5 と 16×16 の 2 種類 (ピクセルギャップ間隔 5 μm) のものを作製した。素子の形成は、磁性ガーネット膜をウエットエッチングによりピクセル化した。ピクセル間ギャップにはフォトレジスト (PR) を充填し、平坦化処理 (表面研磨) 後、PR 保護膜として SiO_2 層を形成した。この保護層上に Fig. 5 に示した X および Y ドライブラインを SiO_2 絶縁層を挟んで形成した。X ドライブラインは、ピクセル反転用駆動電流ラインであるが、同時にピクセルの光学ミラーとして動作する役割も併せもつ。ここでは 400 nm 厚の Al 膜を用いてリフトオフプロセスにより形成した。

上述の手順で作製した MO-SLM 素子は、保護層として 5 μm 厚のフォトレジスト (PR) 層形成後、基板から切り出し、セラミック PGA キャリア (64 ピン) 内に装着した。Fig. 9 はワイヤボンディング直前の素子外観写真 (素子裏

面)である。PGA キャリヤーの反対面には光導入用の 4 mm 径のスルーホールを形成した。

素子の特性は、設計したドライブラインの計算結果の検証を目的として、ピクセル化した LPE ガーネット膜のスイッチング特性を偏光分光顕微鏡 (NEOARK 社製 MD-800TG 型) を用いて調べた。ここでは、ピクセル化した LPE ガーネット膜に X ドライブラインのみを形成した試料について、電流駆動によるピクセル反転状況を調べた結果を示す。Fig. 10 は、 16×16 のピクセルをもつ LPE ガーネット膜上に、Fig. 5 に示した X ドライブラインを形成して、直流電流によるピクセル反転状態を偏光分光顕微鏡 (反射モード) によって SGGG 基板側から観察した結果である。同図(a)は膜面に垂直に $H_z = 500$ Oe の磁場を印加し、ガーネット膜全体を飽和させた状態である。この状態で印加磁場を切り ($H_z = 0$)、X ドライブライン 8 本同時に 1 本当たり約 65 mA の直流電流を通電した状態が Fig. 10(b) である。同図で、磁化反転領域が発生し、メイズ状の磁区が発生しているのが電流を流したピクセルである。白く残っているピクセルは磁化反転しておらず、MO-

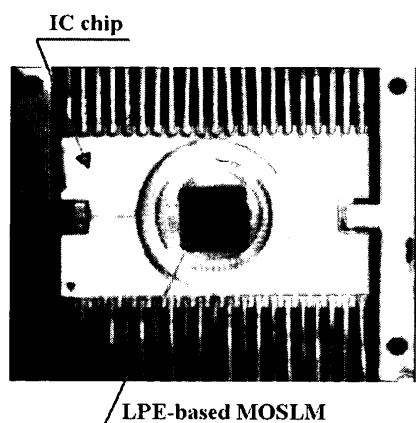


Fig. 9 LPE-garnet based MO-SLM element in a ceramic PGA carrier.

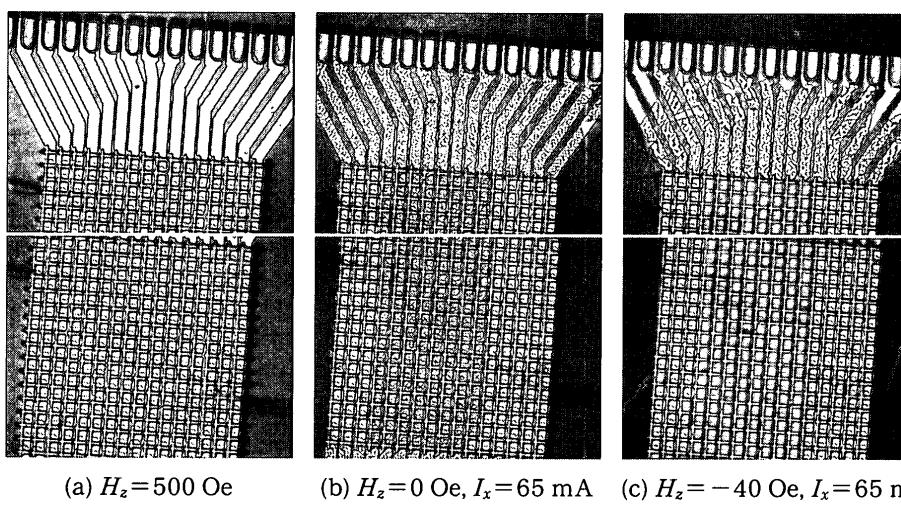


Fig. 10 Pixel states under the static drive of LPE-garnet base MO-SLM with the newly designed X drive lines.

SLM の特長の一つである不揮発性という性質がよく現れている。Fig. 10(c) は上述の状態で反対方向に 40 Oe の垂直磁場を印加した状態であるが、電流が通電されているドライブライン下部のピクセルはすべて反転していることがわかる。R-MOSLM では 1 ピクセル当たり X, Y ドライブライン全体で約 200 mA の電流が必要であるが、今回作製したものでは 1 ピクセル当たり約 60 mA の電流で駆動できる。この値は R-MOSLM の場合に比べておむね 30% 程度の小さい値であり、このドライブラインを利用して低電流駆動型の MO-SLM が得られることを示している。

4. 薄膜ベースの MO-SLM

ピクセルサイズやピクセルギャップ間隔を低減し、素子を小型化する観点からは、上述の厚い LPE ガーネット膜 (約 5 μm 厚) に代えて、より薄いガーネット薄膜で MO-SLM を構成する方が有利である。しかしそく知られているように、ファラデー効果による偏光面の回転角は媒体の厚さに比例することから、よりコントラストが高い高精細 MO-SLM を実現しようとするとき数 μm 以上の厚さのガーネット膜が不可欠となる。

一方、薄いガーネット薄膜を用いても実効的に大きなファラデー回転角が得られる媒体に 1 次元磁性フォトニック結晶¹⁰⁾がある。マイクロ・キャビティ構造をもつ 1 次元磁性フォトニック結晶 (以下 1D-MPC と略記する) は、100 nm スケールの薄い磁性ガーネット膜を用いても大きな磁気光学効果と高い透過率が得られることから、MO-SLM 用の磁気光学体として魅力あるものといえる。Fig. 11 に 1D-MPC を利用して構成した MO-SLM (MPC-MOSLM) の構造を示す。この素子は、125 nm 厚の $(\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{1.5}\text{Dy}_{0.5})(\text{Fe}_{3.8}\text{Al}_{1.2})\text{O}_{12}$ 組成の磁性ガーネット薄膜を中心に、誘電体多層膜でサンドイッチした構造をもつ。ここで

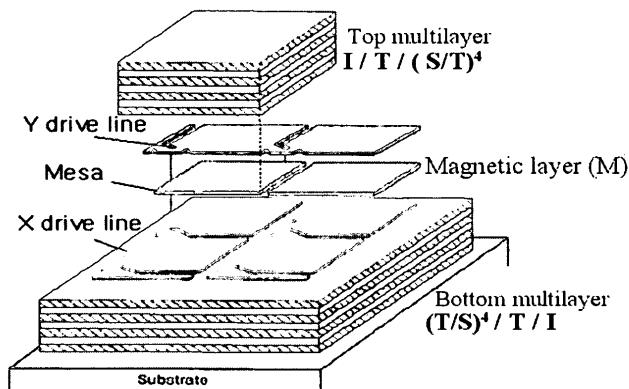


Fig. 11 Magnetophotonic crystal base MO-SLM.

は誘電体多層膜に SiO_2 と Ta_2O_5 ならびに電流ドライブラインとしても動作する ITO 膜を用いた。全体の膜構造は次のとおりである。 $(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)^4(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{ITO})/\text{Bi:YIG}/(\text{ITO}/\text{Ta}_2\text{O}_5)(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5)^4$ 。1D-MPC は磁気光学効果が増大する光波長を設計できる特長をもつので、動作波長を $\lambda_T = 633 \text{ nm}$ として素子を設計した。このとき各層の厚さは以下のとおりである。 SiO_2 層: 111 nm, ITO 層: 110 nm, Ta_2O_5 層: 76 nm。また素子基板には安価なガラス基板(コーニング 1737, 0.8 mm 厚)を用いた。

X, Y ドライブラインには、透明電極である ITO を用いた。ITO 膜層の屈折率は電気炉による 750°C 程度の高温急速熱処理の後で SiO_2 層の屈折率とほぼ同じであったので、ITO 膜を誘電体多層膜の一つに選び、磁性ガーネットを ITO でサンドイッチする構造を選んだ。こうすることで ITO 膜はガーネット膜直上、直下に配置でき、ピクセル駆動上都合がよい(より低い電流値でガーネットピクセルの駆動が可能になる)。

MPC-MOSLM に用いた磁性ガーネット薄膜は、各々のピクセルが X-Y ドライブラインによって独立にスイッチングし、スイッチング後にはその状態を維持しなければならない。これを実現するには、磁性ガーネット薄膜の保磁力が 400 Oe より小さくかつヒステリシスループの角形比がほぼ 1 となる磁気特性をもつ必要がある。ここでは YIG ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) をベースとして、Bi を多量に置換することでファラデー回転角を増加させ、かつ角形比が 1 に近づくよう Dy で置換した。また保磁力を小さくするために Al を添加した。これら元素の置換及び添加効果を調べるために、Dy を置換しない非化学量論組成 $(\text{Bi}_{1.5}\text{Y}_2)(\text{Fe}_{3.8}\text{Al}_{1.2})\text{O}_x$ ターゲットと、Dy を 0.5 および 1.0 mol% を添加したセラミックターゲットを作製し、これらターゲットを用いて RF マグネットロンスパッタ装置により磁性酸化物薄膜を形成した。作製した薄膜試料は、750°C、10 分間の急速熱処理法によりガーネット結晶化させた。これら熱処理後試料の磁気特性を Fig. 12 に示す。同図からわかるように、Dy 置換量 (x) を増大することで保磁力は増大し、飽和磁化は低下した。この結果から、磁性ガーネット膜は Dy 置

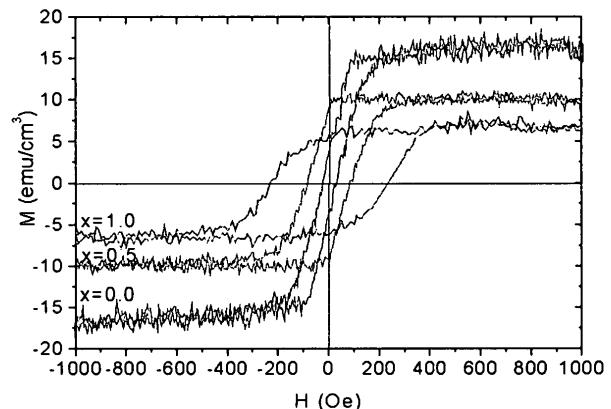


Fig. 12 Change in the magnetic properties of garnet sputtered films as a function of Dy substitution x in the target composition of $(\text{Bi}_{1.5}\text{Y}_{2-x}\text{Dy}_x)(\text{Fe}_{3.8}\text{Al}_{1.2})\text{O}_x$.

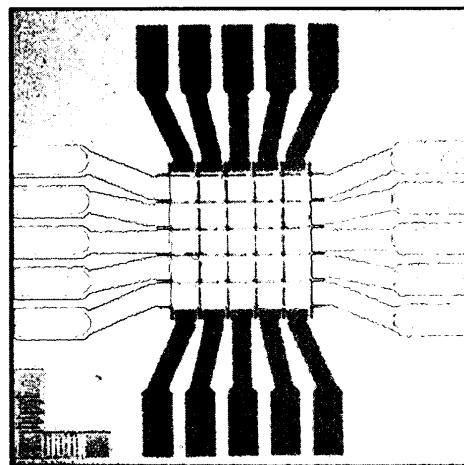


Fig. 13 Top view of the MPC-MOSLM with a 5×5 pixel array.

換量 $x=0.5$ のセラミックターゲットを用いて形成した組成のものを用いた。

素子はピクセルサイズ $100 \times 100 \mu\text{m}$ 、ピクセル数 5×5 および 16×16 (ピクセルギャップ間隔 $5 \mu\text{m}$) のものをリフトオフプロセスで試作した。MPC-MOSLM の場合、Fig. 10 に示したように、ピクセル微細加工は厚さ 100 nm 程度のガーネット薄膜と ITO 薄膜のみでなく、5 μm 厚の LPE ガーネット膜を用いた場合に比べ作製が容易である特長をもっている。以上のプロセスにより試作した MPC-MOSLM の一例として、 5×5 素子の概観写真を Fig. 13 に示す。

これら MPC-MOSLM のうち、 16×16 のピクセルをもつ試料について光学および磁気光学特性を調べた。Fig. 14 に MPC-MOSLM の透過率波長スペクトルとファラデー回転角波長スペクトルを示す。図中黒は、比較のために測定した 125 nm 厚の磁性ガーネット単層膜の特性である。同図からわかるように磁性ガーネット単層膜の場合にはターゲット波長 633 nm における透過率は 80% 以上であ

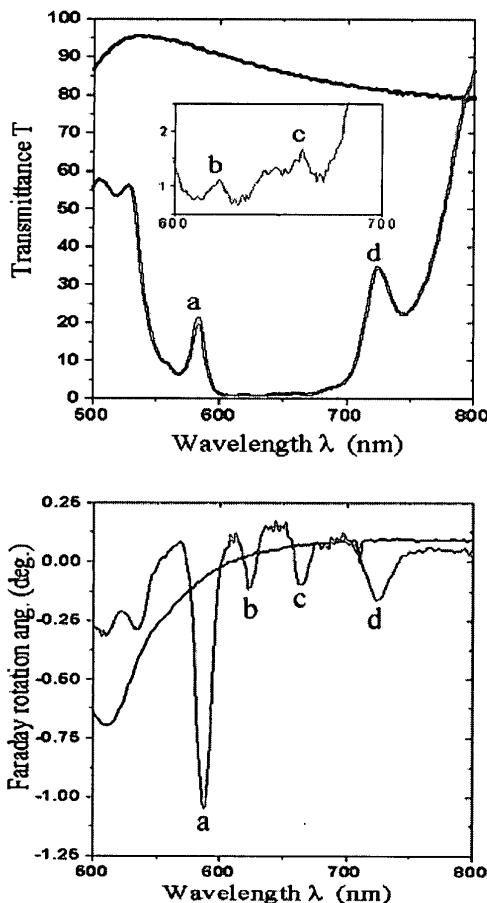


Fig. 14 Optical and magneto-optical responses of the 16×16 type MPC-MOSLM.

るが、ファラデー回転角はほとんど 0° であった。これは膜厚が 125 nm と薄いことによる。一方、MPC-MOSLM の場合は約 $550\text{~}800\text{ nm}$ の波長でフォトニックバンドギャップが明瞭に現れ、そのギャップ中に a から d で示した四つの波長で局在に基づく透過率およびファラデー回転角の増大が認められた。 a の局在モードの透過率は約 22% で、ファラデー回転角は約 1.05° 、 d の局在モードでは透過率は約 35% 、ファラデー回転角は約 0.25° であった。このことは、構造化（メサ）した 1 次元磁性フォトニック結晶でも、当該媒体が本来示す特性が保存されていることを示しており、MPC-MOSLM 実現の可能性を示唆するものである。

以上の結果を踏まえ、外部から印加したバイアス磁場によるピクセルのスイッチング状態を調べた。しかし明確なスイッチングを観測することはできなかった。これは RF マグネットロンスパッタ法で熱処理を併用して形成した MPC-MOSLM の磁性ガーネット膜が多結晶状態にあり、結晶粒界における磁壁ピンニングによってピクセルのスイッチングが妨げられているためと思われる。したがって MPC-MOSLM に用いる磁性ガーネット膜は、結晶粒が小さなものを実現するか、あるいは単結晶状態のガーネット膜が不可欠であると結論され、今後の検討課題として残さ

れている。

5. まとめ

高速動作可能な固体 SLM 実現を目的として、磁気光学効果を利用した MO-SLM についてこれまでの開発の経緯と我々の研究結果の一部を紹介した。

MO-SLM はピクセル内の磁化方位制御を原理とするので、いかに小さな磁場（したがって電流）で素子を駆動するかが重要である。本報では、ドライブライン形状を工夫することで従来の R-MOSLM の約 30% 程度の電流値で駆動できる MO-SLM が得られることを示した。最近ではピクセル形状の操作や、パーマロイ薄膜とのハイブリッド化も駆動電流低減に有効であることがわかっている¹¹⁾。現在これらの LPE ガーネット薄膜ベース MO-SLM は、コンピュータ制御によるドライバシステムの開発とカスタムボード化が進行している。

一方、薄膜ベースの MPC-MOSLM は、小型固体 SLM を実現する観点から上述の LPE ガーネット膜を用いた MOSLM よりも魅力が大きい。この素子を動作させるには、誘電体膜とともに積層する磁性ガーネット薄膜粒界での磁壁ピンニングを克服する必要がある。多結晶グレインサイズを小さくしてこの問題を回避する方策もあるが、我々はより積極的にエピタキシャル成長磁性ガーネット薄膜を用いた磁性フォトニック結晶の作製と MO-SLM への応用を試みている¹²⁾。

以上の MO-SLM は、いずれも駆動電流により発生する磁場で磁化方位を制御するものであるが、発熱などの問題がなく高速にランダムアクセス可能な MO-SLM として TTL レベルの電圧で駆動する MO-SLM¹³⁾ がある。この素子はまだ開発の途についたばかりであるが、すでに電圧でピクセル反転する素子が得られており、今後の展開が期待される。

謝 辞 本研究の一部は、平成 13 年度文部科学省科研費特定研究(A)（超機能グローバル A03）ならびに科学技術交流財団先導的科学技術共同研究事業により行ったものであり、関係各位に深謝する。

参考文献

- 1) "Holographic Data Storage," ed. by H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, p. 251 (Springer, 2000).
- 2) 例えは、D. T. Amm and R. W. Corrigan: Photonic West-Electronics Imaging '99, Projection Display V, January (1999).
- 3) 例えは、S. S. Orlov, E. Bjornson, W. Phillips, L. Hesselink, R. Okas, and R. Snyder: Post deadline paper, ODS 2000 (2000).
- 4) J.-P. Krumme, H. Heitmann, D. Mateika, and K. Witter: *J. Appl. Phys.*, **48**, 366 (1977).
- 5) M. V. Lognnov, V. V. Randoshkin, Yu. N. Sazhin, V. P.

- Klin, B. P. Nam, and A. G. Solov'ev: *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **36**, 493 (1981).
- 6) W. E. Ross, D. Psaltis, and R. H. Anderson: *Opt. Eng.*, **22**, 485 (1983).
- 7) J.-K. Cho, S. Santhanam, T. Le, K. Mountfield, D. N. Lambeth, and D. Stancil: *J. Appl. Phys.*, **76**, 1910 (1994).
- 8) W. E. Ross, J. P. Karins, T. Maki, J. Lucas, L. G. Kelly, J. Cho, D. N. Lambeth, T. Le, K. Mountfield, S. Santhanam, D. Stancil, M. Randles, J. Whitlock, and D. Garrity: *Proc. SPIE*, **1959**, 21 (1993).
- 9) S. A. Serati, T. K. Ewing, R. A. Serati, K. M. Johnson, and D. M. Simon: *Proc. SPIE*, **1959** (1993).
- 10) 高山知子, 仲村健志, 弥生宗男, 井上光輝, 藤井壽崇, 阿部正紀, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, **24**, 391 (2000).
- 11) J. Park, K. Nishimura, J. Cho, and M. Inoue: *J. Appl. Phys.*, in press (2002).
- 12) J. Park, 西村一寛, J. Cho, 井上光輝, in preparation for publication.
- 13) J. Park, 西村一寛, J. Cho, 井上光輝, in preparation for publication.

(2002年2月12日受理)

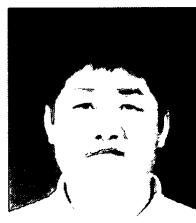


Jae-hyuk Park ジャえゅっく ぱく
平11 慶尚大学校工科大学大学院修士課程（韓国）入学、平12 AIEJ 短期派遣留学生（豊橋技術科学大学）。平13 豊橋技術科学大学大学院博士課程（電子情報工学専攻）入学、現在に至る。
専門 磁気デバイス工学 (工修)



西村一寛 にしむら かずひろ
平8 豊橋技術科学大学大学院修士課程了、平13 東京工業大学大学院博士課程了。同年 豊橋技術科学大学助手、現在に至る。平12 日本応用磁気学会誌論文賞受賞。

専門 磁性薄膜工学 (工博)



Jae-kyong Cho ジャえきょんぐ ちょう
昭58 ソウル大学大学院修士課程了、平3 東京工業大学大学院博士課程了、同年 カーネギーメロン大学助手、平5 慶尚大学校工科大学副教授、現在に至る。CNK Incorporation 社長（兼務）。
専門 磁性酸化物、SLM (工博)



井上光輝 いのうえ みつてる
昭58 豊橋技術科学大学大学院修士課程了、大阪府立高専助教授を経て平5 豊橋技術科学大学助教授、平9 東北大学電気通信研究所助教授を経て、平13 豊橋技術科学大学教授、現在に至る。平12 (株)オプトウェア取締役（兼務）、平14 スタンフォード大学客員教授。
専門 磁性材料工学 (工博)