

磁気光学効果を用いた新しい空間光変調器

高木 宏幸・井上 光輝

New Spatial Light Modulator with Magneto-Optic Effect

Hiroyuki TAKAGI and Mitsuteru INOUE

We present new two type magneto-optic spatial light modulators (MOSLMs). First, the electro- and magneto-optical SLM (e-MOSLM) utilizing the concept of photonic crystals (PCs) for hologram data storages. We have theoretically analysed responses of e-MOSLM. The e-MOSLM can modulate the direction of polarization at a low voltage level (<0.5 V) where high intensities (>99 %) of reflected signals are kept. Second, MOSLM with submicron-size pixels are promising for use in wide viewing angle glasses-free holographic three-dimensional displays (nano-MOSLM). In this study, we fabricated two-dimensional pixel array which is made of 800-nm-diameter magnetic domain with TbFe films by thermomagnetic recording. Furthermore, we observed high angle diffracted light by magnetic hologram obtained from this driven method.

Key words: magneto-optic spatial light modulator, magnetophotonic crystal, thermo-magnetic driven, amorphous magnetic film with perpendicular magnetization, three dimensional display

光情報通信技術（光 IT）の著しい進展に伴って、光 IT デバイス・システムの実現が熱望されるようになった。これら光デバイスのひとつとして、空間光変調器（spatial light modulator: SLM）がある。SLM は、二次元配列されたデジタル情報、つまりページデータ情報を光によって処理するデバイスである。代表的な SLM には液晶 SLM がある。位相変調量 360 度程度を得ることができるが、動作速度は数 kHz 以下であった。これら背景のもと、われわれは磁気光学効果を利用した空間光変調器（magneto-optic spatial light modulator: MOSLM）の研究を行ってきた¹⁾。MOSLM は磁気光学効果によって光の偏波方位を制御するデバイスである。磁化のスピンの方位によって光を変調できるため、高速駆動できる。磁性体を透過する光は、磁性体透過後の右円偏光と左円偏光の位相が異なるため、偏光面の回転を受ける。これをファラデー効果といい、磁性体中の磁化 \mathbf{M} と伝搬光の方向 \mathbf{k} が平行である場合に最大となる。また、 \mathbf{M} と \mathbf{k} が平行の場合と反平行の場合では、偏光面の回転方向が逆になる。MOSLM はこのファラデー効果を利用して二次元ピクセル表示を行う。図 1 に示

すように、イットリウム鉄ガーネット（yttrium iron garnet: YIG）などの透明磁性体中の磁化方位を上あるいは下方向にそろえると、それぞれの領域を透過した光は互いに逆方向の偏光面の回転を受ける。この光をどちらかの偏光を透過する検光子を通して見ると、明るい領域と暗い領域が表示される。MOSLM はこれをピクセルに対応させ表示する。また、入力光を円偏光とすることで、位相変調器として使用できる。MOSLM は、（1）磁化反転のスイッチングスピードが早い、（2）堅固・耐放射能性という特長をもつ。

MOSLM が初めて製品化されたのは、1979 年代の Litton 社による反射型 MOSLM であった。本デバイスは光を反射モードで使用するため、ファラデー回転角は 2 倍の特長を有する。一方、1 ピクセルあたりの駆動電流は数百 mA 程度必要であり¹⁾、多数のピクセルを駆動させるには適していなかった。われわれはこれまで、逆磁歪効果を用いた電圧駆動方式の開発、磁性フォトリック結晶（magneto-photonic crystal: MPC）構造²⁾を用いることで ± 30 度程度のファラデー回転をもつ MOSLM を開発してきた³⁾。

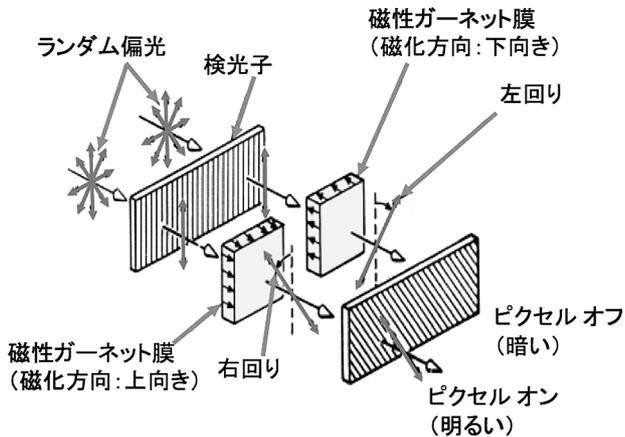


図1 磁気光学空間光変調器.

ホログラムデータストレージや三次元ディスプレイの開発に伴い、新たな機能を有する MOSLM が求められている。これら背景のもとで、われわれはおもに下記の2つの MOSLM を開発している。

(1) ホログラムデータストレージ等への応用を目指し、低消費電力で大きな偏光面変調が得られる MOSLM. 特に、MPC 構造の欠陥層に電気磁気光学膜を用いることで、欠陥層の光の局在状況を電気光学膜内のわずかな屈折率変化で制御し、高い光の利用効率を保ったまま数V電圧で大きな偏光面回転が得られるマルチフェロイック e-MOSLM.

(2) 究極的な三次元ディスプレイである電子ホログラフィーを実現するために、ナノスケールのピクセルをもった位相変調型 MOSLM. 特に、熱磁気書き込み方式を利用することでレーザーの照射面積であるナノスケールのエリアでピクセルを制御できる nano-MOSLM.

本報は、上記2つの MOSLM について報告する。

1. マルチフェロイック磁気光学空間光変調器

1.1 構造と原理

これまでわれわれは、MPC 構造を有する MOSLM を形成するにあたり、MPC 構造中のわずかな屈折率変化で局在状態が大きく変化することを見いだした。この結果から、屈折率変化を電気光学膜で行うマルチフェロイック e-MOSLM を提案した。図2に e-MOSLM の構造を示す。SGGG 基板側から直線偏光を入射すると、誘電体ミラー間で光が多重反射を繰り返し、光は欠陥層に局在する。局在する光の波長は、誘電体ミラーおよび欠陥層のそれぞれの光学膜厚により決定される。基板からみて奥側の誘電体ミラーのペア数 k_r を、手前側の誘電体ミラーのペア数 k_f よりも2倍程度多くすることで、透過光をほぼゼロとした反射型デバイスになる。

磁気光学 (magneto-optic: MO) 材料には、可視光領域で透明かつ大きな MO 効果を有する Bi:YIG を用いている。EO 材料には、同様に可視光領域で透明かつ大きな EO 効果を有するチタン酸ジルコン酸ランタン鉛 (lead lanthanum zirconate titanate: PLZT) を用いている。PLZT に電界を印加するための電極には、透明導電膜である酸化インジウムスズ (indium tin oxide: ITO) を用いている。以上の材料を用いて、e-MOSLM の構造は基板側から順に Antireflection (AR) coat/SGGG substrate/(Ta₂O₅/SiO₂)^{k_r}/Bi:YIG/ITO/PLZT/ITO/(SiO₂/Ta₂O₅)^{k_f}となる(図2)。基板側から光を入射させ、ITO 間の PLZT に電界を印加すると PLZT の複屈折率が変化し、光の位相が変化する。位相の変化に伴い MPC の共振波長も変化するため、特定波長の光の偏光面の回転角が変化する。このようにして、e-MOSLM は PLZT と Bi:YIG により EO 効果と MO 効果をマルチフェロイック的に作用させ、光の偏光面の回転角を変調することができる。

1.2 マトリックスアプローチ法による駆動特性の計算

e-MOSLM の原理確認と構造設計の指針を得るため、マ

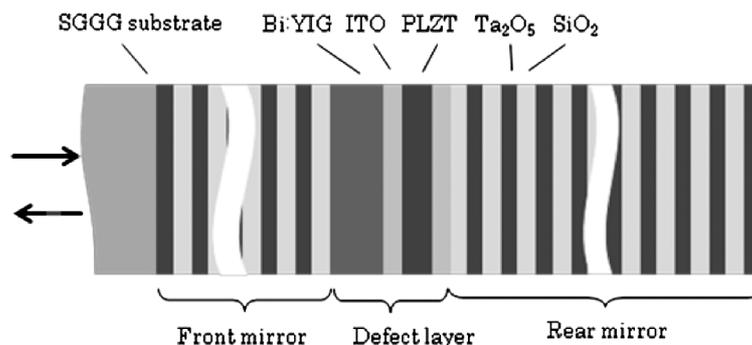


図2 e-MOSLM の構造.

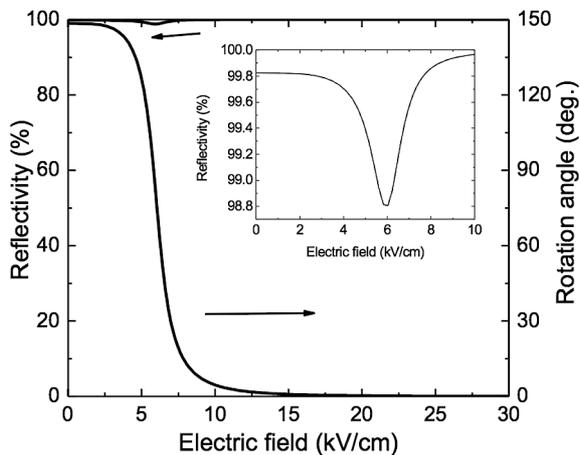


図3 波長780 nmでの印加電圧に対する反射率および偏光面回転角の計算結果。

トリクスアプローチ法を用いて駆動特性の計算を行った。Bi:YIGの光学定数は分光エリプソメーターおよび磁気光学効果測定装置を用いて測定した。PLZTの光学定数は文献⁴⁾にある pulsed laser deposition (PLD) 法により作製された膜のものを使用した。なお、今回の計算では電極であるITOの膜厚は非常に薄いと、簡単化のために省略している。

光の局在する波長(設計波長)は材料の吸収係数がほぼゼロとなる780 nmとした。それぞれの膜の光学膜厚は、誘電体ミラーは $\lambda/4$ 、MO材料層とEO材料層はそれぞれ $m \times \lambda/4$ (m は正の整数、MO材料層は $m=8$ 、EO材料層は $m=2$)となるよう設計した。さらに、MOおよびEO材料層の膜厚はスパッター法により一般的に成膜可能である1 μm 以下とし、EO材料層については電極間の絶縁も確保できるように100 nm以上とした。MO材料層の物理膜厚は712 nm、EO材料層の物理膜厚は173 nmとした。

図3にAR coat/SGGG substrate/(Ta₂O₅/SiO₂)⁹/Bi:YIG/PLZT/(SiO₂/Ta₂O₅)¹⁸の構造に直線偏光を入射し、光線方向にBi:YIGを磁化させ、PLZTに印加する電界の大きさに対する反射率と回転角の変化を示す。この結果から、PLZTの印加電界30 kV/cm程度で、回転角150度の変調が可能である。

2. ナノスケール磁気ピクセル空間光変調器

2.1 構造と原理

立体表示の方式であるホログラフィーは物体光の波面状態を再現するため、眼球の運動、焦点調節などの視覚の生理的要因に負担をかけることなく、裸眼において三次元物体を見ることができる⁵⁾。

一般的にホログラムは写真、印刷等の手段を用いた静止

画の表示が中心であるが、例えばSLM等を用いて電気的手段でホログラフィーを実現する方法に電子ホログラフィーがある。電子ホログラフィーは、SLMによって干渉縞を表示し、参照光をSLMに照射することで、物体光の波面状態を再現できる。SLMは干渉縞を動画方式で表示できるので、三次元像の動画を再生できる。

ホログラフィーが再現する立体画像の視野角は式(1)に示すように、ホログラムを表示しているデバイスのピクセルピッチに起因する^{6,7)}。

$$\phi = 2\sin^{-1}(\lambda/2p) \quad (1)$$

ここで ϕ は視野角、 λ は光の波長、 p はピクセルピッチである。現在広く普及しているSLMは、液晶ディスプレイやプロジェクターなどに用いられている液晶SLMやデジタルミラーデバイス(digital mirror device: DMD)がある。これらSLMは1 μm ~10 μm のサイズのピクセルが100万個程度で、二次元状に配列して構成されている。従来のSLMでホログラムを表示した場合、式(1)より視野角は約3度以下ときわめて狭くなる。そのため広視野角3Dディスプレイ実現のためには、光の波長であるナノスケールのピクセルを多数配列して駆動するSLMが求められている。しかしながら、現状において、ナノスケールのピクセルを有するSLMに多数のピクセル(1億個/1 cm^2)が配列され、それぞれのピクセルを独立して制御することができるSLMは実現されていない。また、半導体プロセスで作成されたSLMには駆動配線やピクセル部分が存在し、構造による回折光がホログラム再生像のノイズとなる。そのため、従来のSLMデバイスの延長上では、上述の3Dホログラフィー用のSLMの実現は困難と考えられる。

われわれは、光磁気記録で知られている熱磁気記録方式が磁性メディアにナノスケールの磁区を形成していることに着目し、この手法を応用することで上記の要求を満たすSLMの実現を目指している。磁気ピクセルを形成する光磁気記録材料は垂直磁化を有するアモルファス磁性薄膜を用いている。パルスレーザーと高分解能のレンズを用いて、磁性薄膜表面にサブミクロンエリアに集光されたレーザー光を照射し、キュリー温度まで加熱することで磁化を局所的に消失させ、磁性膜の反転磁界により磁化反転させ、ナノスケールサイズの磁気ピクセルを形成することを試みた。また、形成したナノスケール磁気ピクセルから広視野角のホログラフィーの再生を行った。

2.2 実験結果

磁気光学膜には、熱磁気記録で広く研究されているアモルファスTbFe薄膜(以下、 α -TbFe膜)を使用した。優良

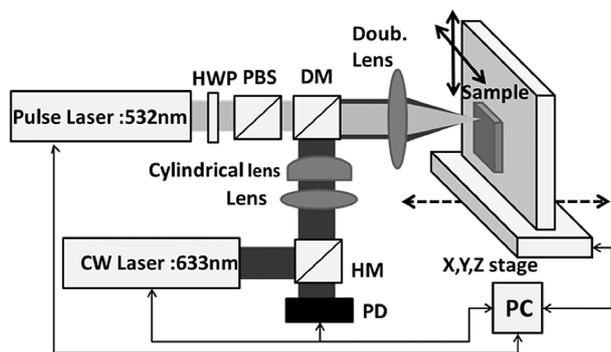


図4 微小領域熱磁気書き込み光学系.

な垂直磁化を示し常温で高い保磁力を得るため *a*-TbFe の組成比は22:78とし、RFマグネトロンスパッター装置を用いて作成した。試料構造は、*a*-TbFe 膜の酸化防止層と特定波長で磁気光学カー回転角をエンハンスさせる層を含む3層構造にした。マトリクスアプローチ法を用いた計算によって、試料の各膜厚は波長 600 nm 付近において磁気光学カー効果が最も大きくなるよう SiO₂ 基板 / SiN (20 nm) / *a*-TbFe (100 nm) / SiN (50 nm) とした。作成した *a*-TbFe 膜の飽和磁化は 1.6 kG、保磁力は 2.5 kOe であり、良質なアモルファス垂直磁化膜が得られた。また、波長 600 nm 付近において偏光面の回転角は最大 1.1 度が得られた。そのときの反射率は 10% であった。

磁性膜に磁気ピクセルを形成するために、3軸自動ステージと高分解能レンズを搭載した微小領域熱磁気書き込み装置を構成した(図4)。熱磁気書き込みによる磁気ピクセル形成には波長 532 nm のパルス YAG レーザー(パルス幅 10 ns, 最大パワー 3.4 mW)を使用し、*a*-TbFe 膜のキュリー温度の 130°C 以上に加熱させるよう局所的にレーザー光の照射を行った。光を集光する高分解能レンズは NA = 0.5 のダブルレットレンズを使用した。パルスレーザーを磁性薄膜に照射した場合、表面ではただちにガウス系の熱分布が生じる。この原理に基づきナノスケールの磁気ピクセルを形成する。レーザーパワーを変化させて磁気書き込みを行い、形成された磁気ピクセルの大きさを調べた。自動ステージとパルス YAG レーザーを同期させ、複数の磁気ピクセルの形成を行った。この装置のフォーカス位置調節には、波長 633 nm の CW レーザーとシリンドリカルレンズを用いて、CD-ROM ドライブ等の光ディスクの再生で用いられているオートフォーカス方式を取り入れた。この手順で形成した磁気ピクセルは、偏光顕微鏡、磁気力顕微鏡(magnetic force microscopy: MFM)等を用いて評価した。図4の微小領域熱磁気書き込み光学系を用いたレーザーパワーに対する磁気ピクセルの直径を測定した。この

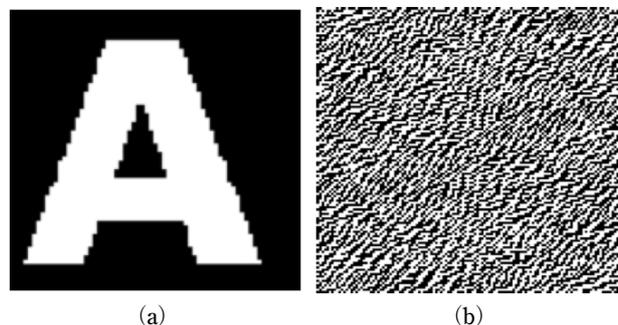


図5 原図 (a) とフーリエ変換像 (b) (128×128 pixels).

実験から磁気ピクセルはレーザーパワーが 50~190 μW の範囲のときに形成されることがわかった。照射するパワーが 200 μW 以上の場合、エネルギー密度が高くなり磁気光学膜の融解が起こった。40 μW 以下の場合に磁気ピクセルが形成されなかったのは、試料表面の温度が磁化反転の温度に達しなかったためと考えられる。また、レーザーパワーが小さいほど磁気ピクセルは縮小する傾向を示し、50 μW のとき直径 800 nm の磁気ピクセルを形成できた。レーザーを集光するレンズの回折限界は 1.2 μm であるため、上述で示した通り、表面にガウス系の熱分布を形成させ、レンズの回折限界を超えてナノスケールの磁気ピクセルが形成されていると考えられる。以上の結果より、微小領域熱磁気書き込み装置を用いることで、ナノスケールの磁気ピクセルが高密度で配置され、配線がない SLM を作成できた。これは SLM にホログラムを表示した際、表面状態による回折光が発生しないため、低ノイズで再生できることを示唆している。

磁気ピクセルからのホログラフィー像の再生を行った。初めに、試料上に磁気ピクセルでフーリエ変換パターンを描画した。このフーリエ変換パターンは特定の画像(図5(a))を計算機でフーリエ変換し、位相情報のみを抽出したのち二値化したものを用いた。このフーリエ変換パターンのピクセルは 1 μm サイズで描画を行った。フーリエ変換パターン(図5(b))を熱磁気書き込みした磁性膜の偏光顕微鏡像(図6)を示す。磁性膜に描画したフーリエ変換パターンは 128×128 pixels の磁気ピクセル(1 μm 幅)で形成した。

画像再生光学系を用いてこの試料の再生を行ったときのスクリーン像を図7(a)に示す。フーリエ変換前の原図(図5(a))と磁気ピクセルからの回折光(図7(a))で同じ像が得られており、この再生した画像は計算機上でフーリエ変換した像(図7(b))と一致している。フーリエ変換パターンの磁気ピクセルから 2D のフーリエ像を表示することができた。また、視野角は式(1)の計算で求めた

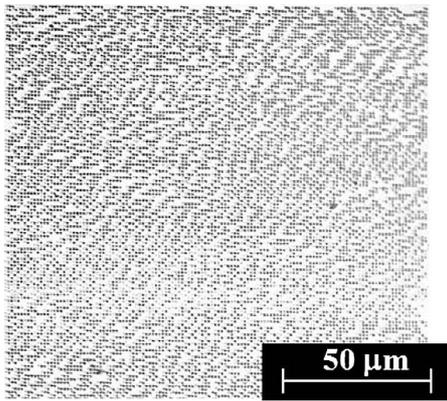


図6 ナノスケール磁気ピクセルの偏光分光顕微鏡像。

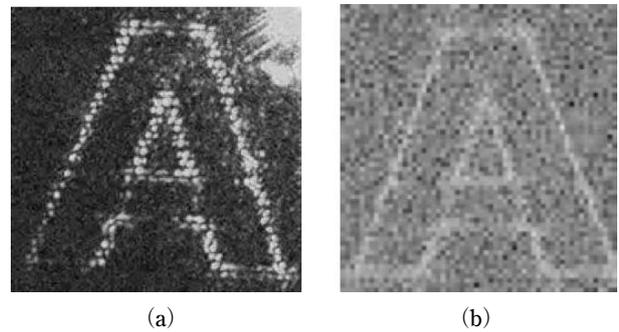


図7 磁気ピクセルからの再生像 (a) と、図5 (b) の逆フーリエ変換像 (b)。

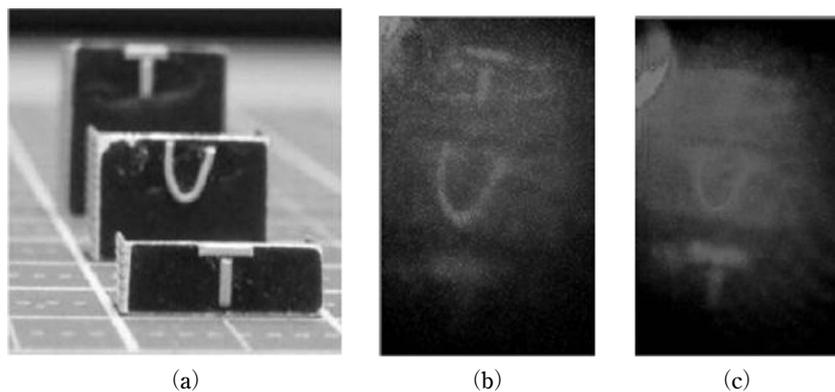


図8 3D ホログラム像。(a) 原図、(b) 奥のTの字にフォーカスを合わせたホログラム像、(c) 真中のUの字にフォーカスを合わせたホログラム像。

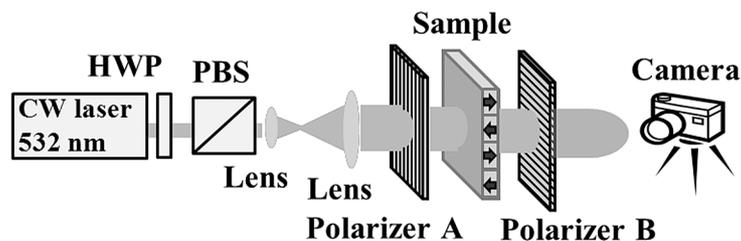


図9 画像再生光学系。

値と同じ30度であった。

最後に、物体像(図8 (a))のホログラムパターンを、二光束干渉光学系を用いて取得した。取得したホログラムパターンを、7 mm×7 mmのエリア(1 μm²/pixel)で形成した。

画像再生光学系(図9)を用いてこの試料の再生を行ったときの3D像を、図8 (b), (c)に示す。記録した3D物体(図8 (a))と磁気ピクセルからの回折光(図8 (b), (c))で、同じ像が得られている。またホログラム像は文字の配置の奥行き、運動視差を表現できており、磁気ピクセルから3Dのホログラム像を表示することができた。ま

た、視野角は式(1)の計算で求めた値と同じ30度であった。これは、磁気ピクセルにより形成されたホログラムパターンを表示した際、広い視野角で再生することが可能であることを示唆した結果である。

本報では、磁気光学空間光変調器(MOSLM)の最近の研究成果を紹介した。新しいMOSLMとして、磁性フォトリソニック結晶を利用した高コントラストマルチフェロイックe-MOSLMを提案し、理論計算から駆動特性の評価を行った。e-MOSLMは低消費電力駆動(<5 V)で、光の利用効率が高く(>99%)、変調量が大きいこと(>150度)

がわかった。今後は e-MOSLM を開発し、ホログラムデータストレージ等のさまざまなアプリケーションへの応用を検討する。

続いて、広視野角用電子ホログラフィー 3D ディスプレイ用のナノスケールピクセルをもつ MOSLM の開発を紹介した。実験では微小領域熱磁気書き込み装置を用いて、アモルファス TbFe 垂直磁化膜上にナノスケールの磁気ピクセルを二次元的に配列させることができた。また、磁気ピクセルで形成したホログラムパターンからは、30 度の視野角のホログラフィー像が再生できた。これは広視野角の立体画像を十分に表示できることを示唆している。

文 献

- 1) J. K. Cho, S. Santhanam, T. Le, K. Mountfield, D. N. Lambeth, D. Stancil and W. E. Ross: "Design, fabrication, switching, and optical characteristic of new magneto-optic spatial light modulator," J. Appl. Phys., **76** (1994) 1910-1919.
- 2) M. Inoue and T. Fujii: "A theoretical of magneto-optical Faraday effect of YIG films with random multilayer structure," J. Appl. Phys., **81** (1997) 5659-5661.
- 3) K. H. Chung, T. Kato, S. Mito, H. Takagi and M. Inoue: "Fabrication and characteristics of one-dimensional magnetophotonic crystals for magneto-optic spatial light phase modulators," J. Appl. Phys., **107** (2010) 09A930.
- 4) M. Gaidi, A. Amassian, M. Chaker, M. Kulishov and L. Martinu: "Pulsed laser deposition of PLZT films: Structural and optical characterization," Appl. Surf. Sci., **226** (2004) 347-354.
- 5) 三科智之: "立体電子ホログラフィー技術", 電子情報通信学会誌, **93** (2010) 492-498.
- 6) D. Gabor: "A new microscopic principle," Nature, **161** (1948) 777-778.
- 7) T. Mishina, F. Okano and I. Yuyama: "Time-alternating method based on single-sideband holography with half-zone-plate processing for the enlargement of viewing zones," Appl. Opt., **38** (1999) 3703-3713.

(2012 年 8 月 10 日受理)