電子ホログラフィ用スピン注入型空間光変調器の研究

Study of Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching for Electronic Holography

正会員 船橋 信彦[†], 正会員 金城 秀和[†], 正会員 青島 賢一[†], 正会員 加藤 大典[†],
 正会員 麻生 慎太郎[†], 正会員 久我 淳[†], 正会員 町田 賢司[†], 正会員 菊池 宏[†]
 Nobuhiko Funabashi[†], Hidekazu Kinjo[†], Ken-ichi Aoshima[†], Daisuke Kato[†],
 Shintaro Aso[†], Kiyoshi Kuga[†], Kenji Machida[†] and Hiroshi Kikuchi[†]

あらまし 電子ホログラフィによる立体像の視域角は、表示装置である空間光変調器 (Spatial Light Modulator, SLM) の画素ピッチで決まるため、広視域化を実現するには、画素ピッチが狭いSLMを開発する必要がある。当所では、スピン注入磁化反転と磁気光学効果を利用したスピン注入型SLM (スピンSLM) の開発を進めている。スピンSLMは、微細な素子の駆動が可能であり、1 μm 以下の狭画素ピッチ化が期待できる。2次元アレイ化には、画素ごとに選択トランジスタを備えたアクティブマトリクス駆動回路が必須となるが、今回、小型のトランジスタでも駆動できるよう素子の低電流化技術を開発した。さらに、画素ピッチ2 μm (画素数100 $\times$ 100) の狭画素ピッチに対応したスピンSLMを試作し、任意の2次元画像の表示と書換え動作に成功した。また、原理検証として、磁性ホログラムを用いて広視域表示実験を行った。

キーワード：電子ホログラフィ，空間光変調器，スピン注入磁化反転，磁気光学効果

1. ま え が き

近年、2次元映像表示においては、ますます高精細化が進み、4K映像あるいは8Kスーパーハイビジョンの本格普及に向けた開発が活発化している。また、VR (Virtual Reality) やAR (Augmented Reality) など、別の形態による新たな映像サービスも注目を集めており、立体映像への潜在的な需要が高まりつつある。当所では、眼鏡などの特殊な機器を使用することなく、自然な立体映像を再生できる空間像再生型立体表示技術の開発を進めており、表示方式の一つとして電子ホログラフィの研究を行っている。

ホログラフィは、物体からの光の波面を記録・再生することにより、原理的に、実物の被写体をそのまま見るのと同じ自然な立体像を再生することができる。すなわち、ホログラフィを用いた立体テレビ¹⁾が実現された場合、両眼視差、輻輳、焦点調整、運動視差など、人間が立体感を知覚するために必要な生理的要因をすべて再現できる理想的な方式であり、究極の立体映像技術と言われている。フィルム等に記録されたホログラムでは、干渉縞の空間的な強度分布が光の透過率や屈折率の変化として記録されており、静止立体像が表示される。

ホログラフィにより動画再生を行うには、ホログラムとなる干渉縞パターンを高速に切替える表示デバイス、すな

わち空間光変調器 (Spatial Light Modulator, SLM) が必要である。ホログラフィは、光が干渉縞で回折することによって生成されるため、干渉縞を表示するSLMの画素ピッチが視域と直接相関を持つことになる。波長 λ でホログラフィ立体再生像を観察できる視域角 Ψ は、画素ピッチ p のSLMにより回折した光の最大回折角 ϕ を用いて、次式で与えられる²⁾。

$$\Psi = 2\phi = 2\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2p}\right) \quad (1)$$

図1に式(1)で計算された視域角と画素ピッチの関係を示す。波長530 nmにおいて、視域角を実用上十分な30度以上とするためには、画素ピッチを1 μm 以下にする必要がある。

図1 視域角と画素ピッチの関係

2016年10月6日受付, 2017年1月19日再受付, 2017年3月1日採録

[†] NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3280)

既存の電気アドレス型SLMとしては、液晶³⁾⁴⁾やDMD (Digital Micro-mirror Device)⁵⁾、あるいは磁気光学効果を用いたSLM⁶⁾⁷⁾などが報告されており、これらを用いた電子ホログラフィ立体動画再生の実施例⁸⁾も示されているが、画素ピッチは $3.5 \sim 10 \mu\text{m}$ であり、視域角は10度以下に制限される。本論文では、 $1 \mu\text{m}$ 以下の狭画素ピッチ化が期待されるスピン注入磁化反転と磁気光学効果を組合せたスピン注入型空間光変調器 (スピンSLM) の開発状況について報告する。

2. スピンSLMの構造と動作原理

スピンSLMの構造と動作原理について説明する。図2にスピン光変調素子の断面構造を示す。上部透明電極と下部電極との間に、磁化固定層/中間層/光変調層からなる多層構造が微細加工されており、隣接素子間や上下の電極間は絶縁体材料で分離されている。

中間層に導電性材料を適用したものをGMR (Giant Magneto-resistance) 素子、絶縁性材料を適用したものをTMR (Tunnel Magneto-resistance) 素子と呼ぶ。基本的な構造は、書込みにスピン注入磁化反転を用いるMRAM (Magnetic Random Access Memory) と同じであるが、上部電極に透明電極材料を用いた上で、光変調層に磁気光学効果の大きな磁性材料を用いる必要がある。

素子に対して電流を上 (透明電極) から下 (下部電極) へ流すと、磁化固定層を流れる電子の磁気的な性質 (スピン) が磁化固定層と同じ方向に揃えられて、光変調層に注入される。このとき、電流のスピンが光変調層の磁化と相互作用することで、光変調層の磁化方向が反転する。電流方向を逆向きにすると、光変調層の磁化方向を磁化固定層の磁化方向と逆の向きに反転することができる。この現象がスピン注入磁化反転 (Spin Transfer Switching, STS) であり、数百nmよりも小さな素子を高速に制御することが可能である⁹⁾。STSの現象自体は、数ns程度で実現されているが、素子の動作速度は、駆動回路を含めた全体の高周波特性により制限される。

この素子に、透明電極側から偏光した光を照射すると、磁気光学カー効果により、光変調層の磁化の向きに応じて反射光の偏光面が変化するため、偏光フィルタとの組合せにより、光の明暗を制御することができる。

スピン光変調素子は、磁気抵抗 (Magnetoresistance, MR) 効果により、光変調層の磁化方向に応じて抵抗値が変化する。図3に、光変調層と磁化固定層の磁化の向きに対する素子の抵抗変化の様子を示す。素子に流す電流、もしくは素子の膜面垂直な方向に外部から印加する磁界を横軸に、素子抵抗を縦軸にプロットすると、その抵抗変化は光変調層の磁気特性を反映したヒステリシス曲線を示す。光変調層の磁化の向きが磁化固定層と平行の時に抵抗値は最小となり、光変調層の磁化方向が反転して磁化固定層の磁化の向きと反平行の時に抵抗値は最大となる。平行状態の

図2 スピン光変調素子の断面構造

図3 磁化の向きと抵抗変化の様子

抵抗値 (R_{min}) に対する抵抗変化量 (ΔR) の比はMR比と定義される。MR比は、素子のスピン注入効率と相関があるため、スピン注入磁化反転の駆動電流を評価するための大きな指標となる。

スピンSLM開発の初期段階においては、抵抗値によって磁化状態を測定しながら光の応答を測定することで、光変調動作を実証してきた。これまでに、磁気光学材料であるGd-Fe合金を光変調層に適用したGMR型スピン光変調素子を開発し、単素子での光変調の基本動作や 1×10 画素の1次元スピンSLM (画素ピッチ: $1 \mu\text{m}$) を開発した^{10)~14)}。しかしながら、2次元多画素化を図るためには、画素ごとに選択トランジスタを備えたアクティブマトリクス (Active Matrix, AM) 駆動回路の適用が必須となる。AM駆動方式では、所望の素子を確実に選択することが可能であるが、一方で、狭画素ピッチ化によりトランジスタのサイズが小さくなると、駆動可能な電流の大きさが制限される。そのため、スピンSLMの高密度化を実現するには、素子の低電流化が必要となる。

3. スピン光変調素子の低電流化技術

従来のGMR型スピン光変調素子における駆動電流密度は、 14 MA/cm^2 と大きい。GMR素子では、MR比が0.1%程度と非常に低いため、スピン注入効率が低く、駆動電流が大きくなってしまうと考えられる。そこで、中間層に極薄のMgOからなる絶縁材料を適用したTMR構造の光変調素子を試作し、スピン注入効率の改善を試みた¹⁵⁾。

図4に開発したTMR型スピン光変調膜の層構成とカー回

図4 素子の層構成とカー回転角の外部磁界依存性

転角の外部磁界依存性を示す。光変調層には、磁気光学材料であるGd-Feを適用しているため、カー回転角は面内磁化膜やMRAMなどに用いられる高MR比材料に比べて、大きな値0.1度を得た。

TMR素子のMR比を向上するには、中間層界面にスピン偏極率の高い材料を適用する必要がある。Tb-Fe-CoやGd-Feは、垂直磁気異方性を示す磁気光学材料として知られているが、スピン偏極率は高くないため、中間層を絶縁材料とするだけでは、MR比の改善は期待できない。そこで、MgO中間層との界面に、高スピン偏極材料として知られているCo-Fe層を挿入した。

Tb-Fe-Co/Co-Fe磁化固定層では、Tb-Fe-Coの大きな垂直磁気異方性によって、面内磁気異方性を有するCo-Feとの積層膜は、一体となって垂直磁化膜の性質を示す。一方、Gd-FeとCo-Feとの積層膜からなる光変調層では、Gd-Feの垂直磁気異方性が比較的小さいために、層全体で面内磁化膜の性質を示す。そこで、Gd-FeとCo-Feとの間に、さまざまな材料を挿入して磁気特性を評価したところ、厚さ0.2 nmの極薄Gd層を適用することによって、Co-FeとGd-Feの界面に垂直磁気異方性が誘起し、光変調層が垂直磁化膜として機能することを見出した。

このようにして開発したTMR膜を、下部電極上にイオンビームスパッタ法で室温製膜した後、電子線リソグラフィとイオンビームミリングを用いたリフトオフ法により、 $560 \text{ nm} \times 560 \text{ nm}$ の微細な素子に加工した。上部電極には、金属電極を用いて電気的特性を評価した。素子抵抗は、素子サイズによって変化するが、面積と抵抗値の積が $200 \Omega \mu\text{m}^2$ 程度となるように、MgO中間層の厚さを1 nm程度に調整した。

素子化後の保磁力は200 Oeであり、角形比1の良好な垂直磁気異方性を示した。MR比は7%であり、MRAM応用で報告されている数十%を超えるような値^{(16)~(18)}と比較すると低いものであった。これは、光変調層のために選択したGd-FeやTb-Fe-Coの耐熱性が低く、MgOの結晶化を促進するための熱処理ができないことに起因する。一方で、従来のGMR素子のMR比と比較すると、大幅に改善されていることから、TMR素子のスピン注入磁化反転特性を

図5 TMRおよびGMR素子のスピン注入磁化反転特性

評価した。

TMR素子およびGMR素子のパルス幅10 μs におけるスピン注入磁化反転特性を図5に示す。反転電流密度は、GMR素子の14 MA/cm^2 から1.0 MA/cm^2 へと1/10以下に低減した。MRAM応用で報告されている高MR比での結果⁽¹⁸⁾と同等以上の低電流化が実現されたことから、TMR効果の適用によるスピン注入効率の改善だけでなく、Co-Fe/Gd/Gd-Fe光変調層に特有の効果も作用したと考えられる。詳細な解析は行っていないが、GMR素子とTMR素子の光変調層には、ともにGd-Feを用いているが、TMR素子の抵抗はGMR素子と比較して2桁程度高い。そのため、パルス電流が流れた際の発熱により、光変調層の保磁力が一時的に減少したのではないかと推察される。

上述の通り、TMR素子による大幅な低電流化に成功したが、AM駆動方式で画素ピッチ1 μm 以下の超高密度化を実現するには、0.3 MA/cm^2 以下へのさらなる低電流化が必要である。

スピン注入磁化反転は、パルス電流を流して電子のスピンが注入されると、磁性体内で作用するスピントルクが自身の磁気異方性を上回ることにより、磁化反転を生じる現象である。したがって、外部磁界により光変調層の磁気異方性を制御することで、低電流での磁化反転が可能となる。そこで、磁界アシスト法を適用し、スピン光変調素子のさらなる低電流化を試みた⁽²⁰⁾。

図6に、TMR型スピン光変調素子のスピン注入磁化反転における反転電流密度のアシスト磁界依存性を示す。2インチシリコン基板上に同時に作製した15個の素子の平均値とエラーバーを図示している。印加した磁界は、膜面に垂直な方向とし、上向きを正とした。今回試作した素子は、外部磁界による磁化反転の動作磁界が若干シフトしているため、スピン注入磁化反転時に印加した外部磁界からシフト量を差し引いた値をアシスト磁界と定義した。パルス電流の幅は、10 μs である。アシスト磁界を印加しない場合の反転電流密度が、1.0 MA/cm^2 であるのに対して、数十

図6 反転電流密度のアシスト磁界依存性

～100 Oe程度のアシスト磁界を加えると、反転電流密度を半分以上に低減できることが確認された。

4. スピンSLMの試作と評価

低電流化を実現したTMR型スピン光変調素子を用いてAM駆動スピンSLMの試作と評価を試みた^{19) 20)}。視域角を30度以上とするためには、1 μm 以下の画素ピッチが必要であるが、AM駆動スピンSLMでは、トランジスタ上に光変調素子を作製するプロセスの構築が必須であり、画素ピッチが狭いほど、より高い位置合わせ精度が要求される。今回は開発の途中段階として、画素ピッチ2 μm のスピンSLMを試作した。図7にAM駆動スピンSLMの断面構造と試作したSLMの光学顕微鏡像を示す。シリコン基板上に2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ ピッチで100 $\times$ 100画素のMOSトランジスタを配置したシリコンバックプレーンを作製し、表面研磨後に50 mm角に切断した。その後、TMR膜をスパッタ法

(a) AM駆動スピンSLMの断面図

(b) 試作したスピンSLMの光学顕微鏡像

図7 AM駆動スピンSLMの断面構造と光学顕微鏡像

にて製膜し、リフトオフ法を用いて、500 nm角に微細加工した後、全素子に共通の透明電極を形成した。TMR型スピン光変調素子は、画素選択用トランジスタのドレイン側に配線されているCuプラグの上に形成されている。画素間にはSiO₂絶縁層にて分離されているため、各画素のトランジスタを選択することにより、任意の光変調素子にのみ垂直方向の電流を流すことができる。光変調素子は、トランジスタに直列接続された可変抵抗として動作するため、トランジスタの性能と素子抵抗によって駆動電流が決まる。今回試作した素子の抵抗値は、任意の50個の平均で1.2 k Ω であったことから、素子一つ当たり0.75 mAで駆動した計算となる。抵抗値を測定したすべての素子について、抵抗値の外部磁界応答を測定したところ、MR比は約17%であり、角形比の良好なヒステリシス特性を示した。

また、スピン注入磁化反転特性についても評価を行った。アシスト磁界を-35 Oeとすることで、光変調層と磁化固定層の磁化方向が平行である“低抵抗状態”から、光変調層の磁化だけが反転し、“高抵抗状態”となるスピン注入磁化反転を確認した。パルス電流の幅は、1 μs である。

図8にパルス電流印加による磁化反転前後の素子抵抗と、観測された偏光顕微鏡像を示す。個別の素子について、スピン注入磁化反転特性を評価したところ、任意の50個のうち、2個の素子がアシスト磁界を印加しただけで磁化反転してしまったものの、残りの素子はパルス電流によるスピン注入磁化反転が確認された。

偏光顕微鏡像の取得方法は次の通りである。まず、8 k Oeの大きな外部磁界を印加し、すべての素子を“低抵抗状態”とした上で、-170 Oeの外部磁界(-35 Oeのアシスト磁界)を印加したときの磁気光学像Aを撮影する。このとき、ほぼすべての素子の磁化方向は変化せず、“低抵抗状態”を保持している。次に、外部駆動回路を用いて100 $\times$ 100画素に対して任意の2次元画像データを書込み、磁気光学像Bを撮影する。B-Aの差分画像を計算することにより、スピン注入磁化反転による偏光顕微鏡像を得た。カタカナの

(a) 磁化反転前後の素子抵抗

(b) 偏光顕微鏡像

図8 磁化反転前後の素子抵抗と偏光顕微鏡像

「イ」の字や「ロ」の字に相当する2次元画像を書込んだところ、多少の画素欠陥は見られるものの、それぞれ明瞭な表示画像を得ることに成功した。

今回試作したスピンSLMは、光変調性能の改善や画素数の増加など、立体ホログラフィ応用に向け、多くの解決すべき課題が残されているものの、狭画素ピッチSLMの実現可能性を示すことができたと考えている。

5. 磁性ホログラムによる広視域立体像表示

スピンSLMによる立体ホログラフィ表示の原理検証を行うため、磁性ホログラムの固定パターンを作製し、広視域立体像の表示実験を行った²¹⁾。図9に試作した磁性ホログラムの断面構造を示す。外部磁界印加による固定パターンの表示(ON)/非表示(OFF)を実現するため、基板上に製膜したGMR膜に、計算機合成ホログラム(Computer Generated Hologram, CGH)の干渉縞パターンを有機レジストによる微細パターンとして転写した後、これをマスクとして中間層までエッチング加工し、Tb-Fe-Co参照層で埋め戻した。光変調層と参照層は、カー回転角が同程度であり、保磁力だけが大きく異なるよう設計されているため、外部磁界の印加によりGd-FeからなるGMR構造の画素のみ磁化反転することができる。

図10に作製した磁性ホログラムによる立体像表示実験に用いた光学系、および再生された立体像を示す。He-Ne

図9 磁性ホログラムの断面構造

図10 立体像表示実験の光学系および立体再生像

レーザから出射された光(波長: 632.8 nm)のビーム径をビームエキスパンダにより $\phi=20$ mmに拡大し、偏光子を通して入射角22度にて磁性ホログラムに照射した。光学系には、磁性ホログラムを回転中心とし、面内で可動するカメラを設けており、さまざまな角度から立体像を撮影した。また、磁性ホログラムの背面には電磁石が設置されており、外部磁界の印加により光変調層の磁化方向のみを反転することができる。そのため、光変調層と参照層の磁化方向を、それぞれ反平行(ON)と平行(OFF)の二つの状態に切替えることで、立体再生像のON/OFF表示を行った。

作成したCGHは、画素ピッチ $1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$ 、画素数 $10\text{K} \times 10\text{K}$ (サイズ: 10 mm角)とし、ホログラム面から0.5 mm後方の位置に、フレーム付きの「イ」の字を二つ直角に組合せた立体構造とした。

試作したスピンSLMの現状でのカー回転角は0.1度であり、計算により回折効率は、 $10^{-4}\%$ 程度²²⁾と見積もれる。改善は必要であるものの、再生した立体像のコントラストは良好で、視域角は設計値にほぼ等しい値(36°)が得られており、大きな運動視差を伴う広視域の立体像が観察された。また、外部磁界制御での磁気光学効果に基づく明瞭な立体像のON/OFF表示にも成功した。なお、立体再生像において、画像の左下にOFF表示でも消えない光点がある。これは、加工時の傷や膜の剥離などにより乱反射された迷光であると推測される。

今回作製した磁性ホログラムは、任意の画像を書換えることはできないが、スピンSLMの画素ピッチや画素数を拡張することで、広視域立体像の表示が、原理上可能であることを確認できた。

6. む す び

将来の電子ホログラフィへの応用を目指し、スピン注入型空間光変調器の研究開発を進めている。TMR型スピン光変調素子による低電流化技術を開発するとともに、画素ピッチ $2\text{ }\mu\text{m} \times 2\text{ }\mu\text{m}$ (画素数 100×100)のスピンSLMを試作し、偏光顕微鏡による観察において、任意の2次元画像の書換えに成功した。また、磁性ホログラムの固定パターンを作製し、スピンSLMによる広視域立体像表示が原理上、可能であることを確認した。引き続き、光変調性能の改善や狭画素ピッチ化・多画素化を進め、立体映像表示の実現に向けて開発を進めていく。

謝辞 本研究の一部は、国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT)の委託研究「革新的な3次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術の研究開発」によるものである。

〔文 献〕

- 1) E.N. Leith, J. Upatnieks, B.P. Hildebrand and K. Haines: "Requirements for a wavefront reconstruction television facsimile system", J. SMPTE, 74, 893 (1965)
- 2) 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**, 17, 3703-3713 (1999)
- 3) M. Furuya, R. Sterling, W. Bleha and Y. Inoue: "D-ILA Full Resolution 8K Projector", SMPTE Cong. Proc., 2009, 10, 1-9 (2009)
 - 4) 情報通信研究開発機構委託研究: 「究極立体映像用超高密度・超多画素表示デバイスの研究開発」平成25年度研究開発成果概要書, http://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_155.html
 - 5) P.F. Van Kessel, L.J. Hornbeck, R.E. Meier and M.R. Douglass: "A MEMS-based projection display", Proc IEEE, **86**, 8, 1687-1704 (1998)
 - 6) W.E. Ross, D. Psaltis and R.H. Anderson: "Two-Dimensional Magneto-Optic Spatial Light Modulator for Signal Processing", Opt. Eng., **22**, 4, 485 (1983)
 - 7) J.H. Park, H. Takagi, K. Nishimura, H. Uchida and M. Inoue: "Magneto-optic spatial light modulators driven by an electric field", J. Appl. Phys., **93**, 10, 8525 (2003)
 - 8) F. Yaraş, H. Kang and L. Onural: "State of the Art in Holographic Displays: A Survey", J. Display Technol., **6**, 10, 443-454 (2010)
 - 9) E.B. Mayer, D.C. Ralph, J.A. Katine, R.N. Louie and R.A. Buhrman: "Current-induced switching of domains in magnetic multilayer devices", Science, **285**, 6, 867-870 (1999)
 - 10) K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, N. Kawamura, K. Kuga, N. Shimidzu, F. Sato, T. Kimura and Y. Otani: "Spin transfer switching in current-perpendicular-to-plane spin valve observed by magneto-optical Kerr effect using visible light", Appl. Phys. Lett., **91**, 5, 052507 (2007)
 - 11) K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, N. Kawamura, K. Kuga, N. Shimidzu, T. Kimura, Y. Otani and F. Sato: "Magneto-optical and Spin-transfer switching properties of current-perpendicular-to-plane spin valves with perpendicular magnetic anisotropy", IEEE Trans. Magn., **44**, 11, 2491-2495 (2008)
 - 12) K. Aoshima, N. Funabashi, K. Machida, Y. Miyamoto, K. Kuga, T. Ishibashi, N. Shimidzu and F. Sato: "Submicron Magneto-Optical Spatial Light Modulation Device for Holographic Displays Driven by Spin-Polarized Electrons", J. Display Tech., **6**, 9, 374-380 (2010)
 - 13) K. Aoshima, Y. Hashimoto, N. Funabashi, K. Machida, K. Kuga, H. Kikuchi, N. Shimidzu and T. Ishibashi: "Spin transfer switching of current-perpendicular-to-plane giant magneto resistance with various Gd-Fe free layer compositions", J. Appl. Phys., **111**, 07C911 (2012)
 - 14) K. Aoshima, K. Machida, D. Kato, T. Mishina, K. Wada, Y. Cai, H. Kinjo, K. Kuga, H. Kikuchi, T. Ishibashi and N. Shimidzu: "A Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching for 3D Holography Applications", J. Display Tech., **11**, 2, 129-135 (2015)
 - 15) H. Kinjo, K. Machida, K. Matsui, K. Aoshima, D. Kato, K. Kuga, H. Kikuchi and N. Shimidzu: "Low-current-density spin-transfer switching in Gd₂₀Fe₇₈-MgO magnetic tunnel junction", J. Appl. Phys., **115**, 203903 (2014)
 - 16) S.S.P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P.M. Rice, B. Hughes, M. Samant and S.H. Yang: "Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers", Nature Materials, **3**, 862-867 (2004)
 - 17) S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando: "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions", Nature Materials, **3**, 868-871 (2004)
 - 18) S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H.D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno: "A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction", Nature Materials, **9**, 721-724 (2010)
 - 19) K. Aoshima, H. Kinjo, K. Machida, D. Kato, K. Kuga, T. Ishibashi and H. Kikuchi: "Active Matrix Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin-Transfer Switching", J. Display Tech., **12**, 10, 1212-1217 (2016)

- 20) H. Kinjo, K. Aoshima, N. Funabashi, T. Usui, S. Aso, D. Kato, K. Machida, K. Kuga, T. Ishibashi and H. Kikuchi: "Two micron Pixel Pitch Active Matrix Spatial Light Modulator Driven by Spin Transfer Switching", electronics, **5**, 3, 55 (2016)
- 21) K. Machida, D. Kato, T. Mishina, H. Kinjo, K. Aoshima, K. Kuga, H. Kikuchi and N. Shimidzu: "Three-Dimensional Image Reconstruction with a Wide Viewing-Zone-Angle Using a GMR-Based Hologram", OSA Topical Meeting Digital Holography and 3-D Imaging (2013) DTh2A.5
- 22) K. Wada, R. Antos, K. Aoshima, K. Machida, K. Kuga, H. Ono, H. Kikuchi, N. Shimidzu and T. Ishibashi: "Aperture-ratio dependence of the efficiency of magneto-optical first-order diffraction in GdFe stripe arrays with alternating perpendicular magnetization", Opt. Commun., **371**, 67-71 (2016)

ふなばし のぶひこ 船橋 信彦 2001年, 東京工業大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。放送技術研究所にて, 垂直磁気記録技術, スピントロニクスの研究に従事。博士(工学)。正会員。

きんじょう ひでかず 金城 秀和 2006年, 筑波大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。長崎放送局を経て, 2011年より, 放送技術研究所に勤務。スピントロニクスの研究に従事。正会員。

あおしま けんいち 青島 賢一 1990年, 千葉大学卒業。同年, 富士通研究所入社。2002年より, NHK放送技術研究所に勤務。スピントロニクスの研究に従事。博士(工学)。正会員。

かとう だいすけ 加藤 大典 2003年, 関西大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。名古屋放送局を経て, 2007年より, 放送技術研究所に勤務。プラズマディスプレイパネル, スピントロニクスの研究に従事。正会員。

あそう しんたろう 麻生 慎太郎 2010年, 東京大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。広島放送局を経て, 2014年より, 放送技術研究所に勤務。スピントロニクスの研究に従事。正会員。

くが じゅん 久我 淳 1983年, 早稲田大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。大阪放送局を経て, 1986年より, 放送技術研究所に勤務。垂直磁気記録技術, スピントロニクスの研究に従事。正会員。

まちだ けんじ 町田 賢司 1993年, 広島大学修士課程修了。同年, NHK入局。広島放送局を経て, 1995年より, 放送技術研究所に勤務。垂直磁気記録技術, スピントロニクスの研究に従事。博士(工学)。正会員。

きくち ひろし 菊池 宏 1984年, 豊橋技術科学大学大学院修士課程修了。同年, NHK入局。神戸放送局を経て, 1987年より, 放送技術研究所に勤務。有機デバイス, 光エレクトロニクスの研究に従事。博士(工学)。正会員。