

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870217

研究課題名(和文) 歳差運動を含む磁性体スピンを活用した光ファイバー上分布型デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of a distribution type device on the optic fiber using spin of magnetic media including its magnetization precession

研究代表者

西林 一彦 (Nishibayashi, Kazuhiro)

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任講師

研究者番号：20361181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバの広い側面に磁性体を分布させた磁気光学(MO)導波路を作製し、磁性体スピンを活用した偏光制御デバイスの開発を目指した研究を行った。マルチモードファイバ側面の磁性体内の磁化を局所変調すると、コア内に多重化した光に対してモード選択的にMO信号を載せられ、かつそのMO信号を伝送後に空間的に多重分離できることを実証した。

さらに、多層膜構造の試料を用いてエバネッセント波による磁気光学効果の評価を行い、エバネッセント波がMO効果とその性能指数を増強させることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We fabricated magneto-optical (MO) devices with a magnetic media distributing on the wide side of optical fiber, and developed the polarization control devices using the spin of magnetic media. We clarified that the local modulation of magnetization of magnetic media on the multi-mode fiber generates mode-selective MO signals among the multiplexed light propagating in the core, and also that the MO signal can be spatially demultiplexed.

Further, we evaluate MO effect on the evanescent wave using samples with multi-layer structures, and shows that the evanescent wave enhance the MO effect and its MO figure of merit.

研究分野：光物性

キーワード：磁気光学効果 光制御 磁性体 光ファイバ

### 1. 研究開始当初の背景

磁性体のスピンの用いて光導波路内を伝播する光の偏光を制御できれば光回路にメモリ機能を付加できると期待される。申請者らは、光導波路に近接させた磁性体のスピン状態を光で操作し、これをさらに光導波路を伝播する光の偏光情報として取り出すことで、磁化の歳差運動まで含んだ光メモリができることを原理実証した。このようなスピン・光デバイスを実現するためには、磁性体スピンの状態を光で励起して制御でき、光導波路内の電磁場と磁性体との間に磁気光学(MO)効果が起こることが重要と考えられる。

申請者はフェリ磁性体の磁気光学材料である GdFe 薄膜を用いて を実証した。において磁性体を含む光導波路の作製・加工を考えると磁性金属が有利である。しかし光導波路から磁性金属へ染み出たエバネッセント波における MO 効果の詳細については自明ではなかった。一方でこの原理に基づく光デバイスを考えた場合、光ファイバのように光伝播路の断面積と表面積に圧倒的な比を誇る形状において、もっとも制御性の高いデバイスが構成できると考えられる。そこで申請者は光ファイバを加工し金属 MO 材料を近接させることで、光導波路と磁性体スピンとの間の MO 効果を明らかにするための研究を計画した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、光ファイバのコア層に金属 MO 材料を近接させた磁性体/ファイバコア光結合デバイス(以下、MO ファイバ)を作製し、ファイバコア表面のエバネッセント波と磁性体スピンとの間に磁気光学効果が発現することを実証することである。そして歳差運動を含めた磁性体のスピン状態を反映した磁気光学効果を活用して、光ファイバの伝播特性と大きな面積をとれる側面積を利用した多重な光の制御法を開発することである。

### 3. 研究の方法

#### 1) MO ファイバの作製と MO 信号検出

図 1 に MO ファイバの製作法を示す。申請者らが構築した光ファイバ側面研磨システム (a) を用いてコア径: 50  $\mu\text{m}$  のマルチモード(MM)ファイバのクラッド層を側面に沿って除去し、コア層からのエバネッセント波が加工表面に十分到達する厚さにする(b)。さらに加工面にバフ研磨を施し光学的平坦性を得る(c)。加工部に GdFe 薄膜を DC マグネトロンスパッタ法で堆積し(d : NHK 放送技研)完成する。この作製法はファイバを断線することなく、数 mm 以上の範囲の側面加工が可

能である。本研究での研磨長は 5 mm である。このデバイスの MO 信号はコア径が光の波長に対し十分大きい磁気光学カー効果(MOKE) が主とみなせ、ファイバに入射した光の偏光回転量として検出する。コア内の光強度および MO 信号の空間分布は、ファイバ後方で数 100 倍に拡大したコア像をピンホールを用いて二次元走査することで得た。

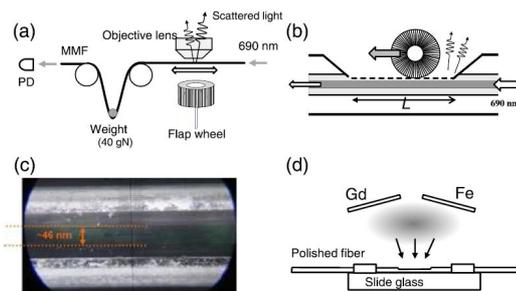


図 1: (a) 光ファイバ研磨加工システム。(b) 回転研磨によるクラッド層の除去。(c) バフ研磨後に得られた加工表面。(d) 加工面への磁性体成膜。

#### 2) 磁性体・光導波路のエバネッセントカップリングの最適化

本研究では議論の簡素化のため伝播光を用いた。試料は作製した [S-LAH79 (高屈折率ガラス)/ SiO<sub>2</sub> ( $d$  nm)/ (Ru/GdFe/Ru)] 構造を用いた。SiO<sub>2</sub> 膜厚( $d$ ) が高屈折率ガラスと磁性体層間のエバネッセント結合の度合いを決定する変数となる。この多層膜構造の MOKE 信号  $\phi_k$  と性能指数(FOM)を、実験および  $4 \times 4$  マトリクス法による電磁場計算で評価した。

### 4. 研究成果

#### 1) MO 信号の検出と偏波変調信号の多重伝送

作製した MO ファイバを用いてコア内の光の伝播モードと MO 信号の関係を調べた。まず、ファイバコア内を少数のモードが伝播する状況 (図 2a) では、コア内の A と B で囲まれた領域に現れるモードで異なる MO 信号が得られた(図 2b)。これは内側の伝播モード A と外側の伝播モード(B-A) で MO 信号が異なる、すなわち次数の異なるモードは異なる MO 信号を持つということを意味している。

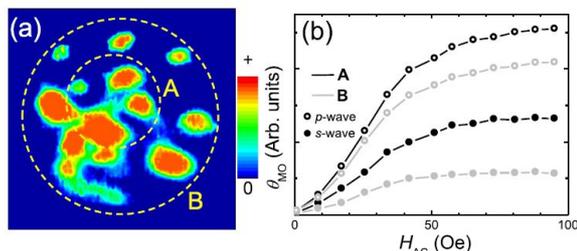


図 2 (a) コア内の光強度の空間分布。(b) A および B 内に現れるモードの MO 信号強度の磁場依存性。

次に、ファイバコア内に多数のモードが伝播する状況では、光強度の分布はコア内での多数のモード間の干渉を反映する複雑な空間パターンを示す(図 3a)。この状態でファイバ側面の GdFe 層上の位置  $z$  ( $= -2, 0, +2$  mm; 0 は加工部の中心位置) に直径 1.3 mm の交流磁場を印可し GdFe の磁化を局所的に変調した。図 4b はこのときコア上のサイト A~D から検出した MO 信号であり、それぞれのサイトが特定の  $z$  に対して MO 信号の最大値を取ることが分かる。これは次のように考えることで理解できる。MO 効果は主に磁性体と接するファイバコアの側面近傍で起こる。コア内で多重化された光はそれぞれの伝播モードに従った光経路を取るため、光が MO 効果を最も強く受ける位置  $z$  はモードによって異なる。MO 効果を受けた光は伝播モードに従い、コアの出射側に特定の空間分布を伴って現れる。すなわち、図 4 の結果は、側面 GdFe 層の位置  $z$  でモード選択的に発生した MO カー信号をファイバコアの出射側端面の特定位置  $(x, y)$  で検出したことを意味する。

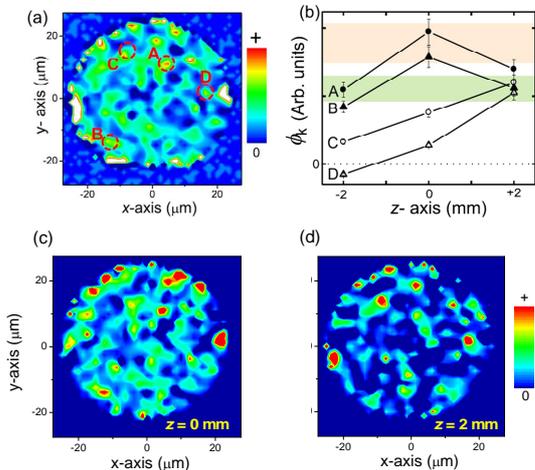


図 3 (a) ファイバコア上の光強度分布。(b) コア上のサイト A~D における MO 信号の磁場印可位置  $z$  依存性。  $z = 0$  mm (c) および  $z = 2$  mm (d) のときの MO 信号の空間分布。

MO 信号が現れるモードを差分法により見積もったものが図 4c および d である。磁場を  $z = 0, +2$  mm の磁化に印可したときの MO 信号の空間パターンは明らかに異なっており、MO 効果が異なるモード上に現れていることが分かる。この結果は、MM ファイバ内の多重な光の偏光を側面の磁性体からモード選択的に制御し、かつそれを伝送後に空間的に多重分離できることを示しており、偏波変調信号のモード多重化およびその多重分離の可能性を実証するものである。

## 2) エバネッセント場による MO 効果の増強

図 4 は SiO<sub>2</sub> 膜厚が異なる 4 種の試料 ( $d = 0, 25, 50, 100$  nm) の GdFe 層に対して空気側 (IAS) と高屈折率ガラス側 (IDS) から p 偏光を入射したときの MO 信号である。この絶対値

の最大値  $\phi_k^{\text{MAX}}$  は IAS が 0.3 度であるのに対し、IDS は 0.4 度 ( $d = 100$  nm) ~ 1.4 度 ( $d = 0$  nm) と優位に大きい。 $d = 0$  nm の試料の  $\phi_k^{\text{MAX}} = 1.4$  度は偏光回転量として大きな値である(通常の MO 材料は ~0.1 度)。図 4b および 4c は  $\phi_k^{\text{MAX}}$  と FOM の最大値 FOM<sup>MAX</sup> の  $d$  依存性である。IAS はどちらの値も  $d$  の減少に対してほぼ一定であるのに対して、IDS は共に増大する。 $d$  の減少により高屈折率ガラス上のエバネッセント場の GdFe 層内への浸入長が増加するため、この結果はエバネッセント場による MO カー効果と性能指数の増加を示している。これらの実験結果は数値計算の結果と良く一致する。

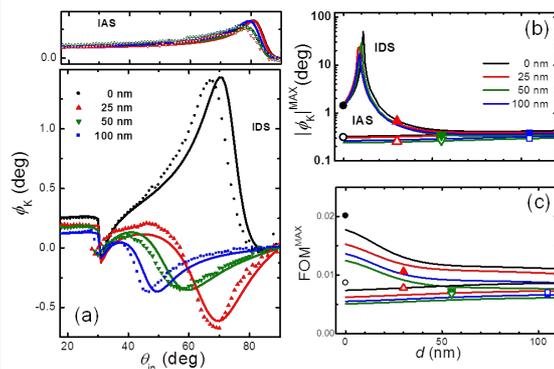


図 4 (a) 試料の MO 信号の入射角度依存性。点線は測定値、直線は計算値を示す。MO 信号 (b) および FOM (c) の最大値の SiO<sub>2</sub> 膜厚依存性。

これを元に  $d = 0$  nm のときの IDS の場合について、 $\phi_k$  および FOM<sup>MAX</sup> の GdFe 膜厚 ( $d_{\text{GdFe}}$ ) 依存性を計算すると、 $d_{\text{GdFe}} < \sim 30$  nm の領域で両方の値が  $d_{\text{GdFe}}$  の減少に伴い増大した。GdFe 層の光電場の侵入長が ~25 nm であるため、GdFe 内のエバネッセント場の成分が増加するに従い MO カー効果と性能指数が増大するといえる。なお、図 4b の IDS の  $\phi_k^{\text{MAX}}$  に対する計算値は  $d \sim 13$  nm 付近で 90 度回転のピークを見せるが、このとき FOM 値は光吸収の増大を反映して急峻に減少するため、偏波変調器としての利点は極めて小さくなる。以上から、磁性体・光導波路カップリングの最適化のためには薄い磁性金属膜を導波路の光伝送路上に直接設置し、十分エバネッセント場を作用させることが望ましいという指標を得た。これは光がモード伝播する光導波路においても重要な指針となると思われる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

K. Nishibayashi, H. Yoneda, K. Kuga, Y. Iwasaki, and H. Munekata, Enhancement of magneto-optical effect via the evanescent

wave and its figure of merit, Jpn. J. Appl. Phys., 2016 掲載確定、査読有。

**K. Nishibayashi**, H. Yoneda, K. Kuga, T. Matsuda, and H. Munekata, "Demonstration of polarization modulated signals in a multi-mode GdFe-silica hybrid fiber", Appl. Phys. Lett. 106, 151110:1-5 (2014).、査読有。

J. Saeki, **K. Nishibayashi**, T. Matsuda, Y. Kitamoto, and H. Munekata, "Incidence Angle and Polarization Dependence of Photo-Induced FMR in Co/Pd Multilayers", J. Magn. Soc. Jpn. 38, 151 (2014).、査読有。

〔学会発表〕(計 10 件)

**K. Nishibayashi**, H. Yoneda, K. Kuga, Y. Iwasaki, and H. Munekata, "Evaluation of optical coupling between magnetic layers and optical waveguides for polarization modulators", Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology 2015, Penang, November 29- December 2, Malaysia, 2015, pp. Mo-P-12.

**K. Nishibayashi**, H. Yoneda, K. Kuga, and H. Munekata, "Demonstration of Spatial Demultiplexing of Polarization Modulation Signal Based on Magneto-optical Modulation of Multiplexed Lightwave in Fiber", 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sapporo, September 27-30, 2015, pp.266, PS-7-23.

**K. Nishibayashi**, H. Yoneda, K. Kuga, T. Matsuda, and H. Munekata, "Multiplexed transmission of polarization modulation signal in magneto-optical hybrid fiber", 59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference, Honolulu November 3-7, 2014, pp. DT-08.

**K. Nishibayashi**, J. Saeki, K. Yamamoto, T. Matsuda, Y. Kitamoto, and H. Munekata, "High efficient excitation of all-optical magnetization precession in Co/Pd multilayer films", Solid State Devices and Materials", Tsukuba, September 8-11, 2014. pp. M-1-2.

J. Saeki, **K. Nishibayashi**, T. Mazda, Y. Kitamoto, and H. Munekata, "Incidence and polarization dependence of photo-induced FMR in Co/Pd multilayers", Magnetics and Optics Research International Symposium for New Storage Technology 2013, Omiya, December 2-5, Japan, 2013, pp. P64.

**K. Nishibayashi**, H. Yoneda, K. Kuga, and H. Munekata, "Fabrication and characterization of magneto-optical hybrid structures", Magnetics and Optics Research International Symposium for New

Storage Technology 2013, Omiya, December 2-5, Japan, 2013, pp. P142.

**西林一彦**、米田仁紀、久我淳、松田喬、宗片比呂夫、"磁気光学ファイバを用いた偏波変調信号の空間的多重分離", 第19回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-19, 0-18, 東京大, (2014, 12月16日)。

**西林一彦**、米田仁紀、久我淳、松田喬、宗片比呂夫、"偏光変調信号の多重伝送をめざした磁気光学ファイバの評価", 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C7-5, 北海道大, (2014年)。

岩崎大和、**西林一彦**、松谷晃宏、佐藤美那、久我淳、宗片比呂夫、"光導波路とエバネッセント結合した GdFe 薄膜の磁気光学応答", 第62回応用物理学会春季学術講演会, 11a-A13-5, 東海大, (2015年3月11日)。

T. Matsuda, **K. Nishibayashi**, H. Munekata, "Study on the onset of photo-excited precession of magnetization in Co/Pd multilayers", 第62回応用物理学会春季学術講演会, 11p-D11-2, 東海大, (2015年3月11日)。

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www.isl.titech.ac.jp/~munelab/index-j.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西林一彦 (Nishibayashi Kazuhiro)

東京工業大学 科学技術創成研究院・特任講師

研究者番号：20361181

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし