

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04927

研究課題名(和文) 磁性体スピンの全光励起歳差運動を用いた偏波変調信号の多重伝送

研究課題名(英文) Multiplexed transmission of polarization modulation signal using all-optical precession of magnetization of magnetic spin

研究代表者

西林 一彦 (Nishibayashi, Kazuhiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：20361181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁性体[Co/Pd]多層膜と光結合したリッジ型GaAs導波路において、コア層内のモードが磁性体直下を伝搬することで磁気光学効果が増強される事を示唆する結果を実験的に得た。[Co/Pd]多層膜はDCよりRFスパッタ堆積法の方が磁気特性や光励起歳差運動の振幅の制御性が高いことが実験的に示された。導波路に複素誘電率テンソルを含むビーム伝搬法シミュレーションを適用し、コア層内の磁気光学効果が磁性体近傍からモード全体へ広がる事を示した。Y分岐路構造を用いて、磁性体の局所的な磁化反転により磁気光学信号のモード選択的の多重伝送が可能であることをビーム伝搬法を用いて計算的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、コア層と光結合した磁性体による非対称な導波路内の伝搬モードにおける磁気光学的な偏光回転(TE-TMモード間のエネルギー変換)が十分起こり得る事が実験的・理論的に示された。これは光回路において磁性体磁化の光操作による全光・偏光制御が可能であることを示している。特に、磁性体と近接したコア層内のモード伝搬における磁気光学効果のミクロな描像は、本研究で用いた計算手法により初めて可能になったものであり、複素誘電率テンソルの非対角項をと入り入れたビーム伝搬法が、磁気光学効果の空間発展や、磁性体との光結合によりスピン機能を取り入れた光導波路の設計において協力的な手段となりうることを示している。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated that a propagation mode in GaAs ridge waveguide, coupled with a [Co/Pd] multilayers, integrates the magneto-optical (MO) effect during the mode propagation in the core under the magnetic medium. We suggested experimentally that the RF sputtering is prior to DC one on the controllability of the magnetic property and the amplitude of the photo-excited precession of magnetization of [Co/Pd] multilayer. Using the beam propagating method (BPM) concerning the off-diagonal component of the complex dielectric tensor of magnetic medium, we showed that the MO effect on the mode propagation start from the proximity region of the magnetic medium, which spreads to the whole of the electric field distribution. We showed that the mode-selective multiple transmission of MO signal is possible by local magnetization control of a magnetic medium using Y-type branch waveguide, by the BPM simulation.

研究分野：光物性

キーワード：磁気光学効果 光導波路 多重伝送 磁性体

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光通信において光信号転送量の更なる増大のため、光の偏波状態を信号として扱う偏波変調方式（Polarization Shift Keying: PolSK）が注目されている。申請者らは磁性体を偏波変調器の材料として用い、光で操作したスピン状態を光導波路内の伝播光の偏光情報として取り出すことで、スピンの歳差運動まで含めた光メモリができることを原理的に示した。そして磁性体とマルチモードファイバーから成る複合構造を用いて、磁化を外部磁場で局所変調するとコア内の多重な光の中から特定の光の偏光状態をモード選択的に変調し、これを伝送した後に空間的に多重分離できることを原理実証した。

次の目標は磁性体スピンの光操作による偏波変調信号の全光多重伝送の実証である。超短パルスにより磁性体メモリ内の直径 $\sim 10\ \mu\text{m}$ サイズの磁化に歳差運動を励起して偏波変調信号を生成し、多重化した光の中から明瞭に空間分離して検波する事である。近年、近接場や表面プラズモンを用いた記録メディアの大容量化が研究の焦点になりつつ背景もあり、局所光を用いたスピン情報の全光操作・読み出しや光機能の創出の学術的期待は高まっている。一方、この原理に基づく光伝送デバイスを考えた場合、光導波路のように光伝送路の断面積と表面積に圧倒的な比を誇り、その形状を設計加工しやすい構造において、最も制御性と機能性が高い偏波変調信号の多重伝送デバイスが構成できると期待できる。そこで申請者は磁気光学導波路と複数の光パルスを用いて偏波変調信号の全光多重伝送を行うための研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光導波路のコア層表面に分布させた磁性体メモリのスピン状態を光パルスにより局所的に変調し、エバネッセント場を介した磁気光学効果を用いて光導波路内の偏光をモード選択的に変調することで、偏波変調信号の全光多重伝送を実証することである。そして、光導波路の伝播特性と広い表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) 磁気光学導波路の作製と磁気光学信号(MO)の検出

リッジ型の III-V 族化合物半導体光導波路の伝送部に磁気光学材料として Co/Pd 磁性体多層膜を近接させて両者を光結合した。導波路の電場分布解析を構造の作製工程へフィードバックすることで、検証に適した構造の設計を行い、磁気光学導波路の作製方法を確立した。具体的には、分子線エピタキシー法を用いて GaAs 基板上に GaAs と AlAs から成るコア・クラッド構造を作成し、これをリソグラフ加工によりリッジ型構造(高さ $0.5\ \mu\text{m} \times$ 幅 $2\ \mu\text{m}$)を作成した。その上に DC マグネトロンスパッタ法を用いて垂直磁化を有する Co/Pd 多層膜を積層した後、リソグラフ加工によりコア上に $40\ \mu\text{m}$ 長の磁性体層を設けた。次に、伝播光を導波路にカップリングするための顕微光学系を構築し、磁化の反転による導波路内の伝搬モード($\sim 900\ \text{nm}$)の偏光回転量を光検出し、評価を行った。磁気光学信号の検出は磁石を外部磁場源として用い、磁化反転の後に外部磁場を取り除いて行った。

2) メモリ磁性体とマルチモード・コアカップリングの最適化

コア層から磁性体層への光の染み出し量の増大と、伝播光と導波路のカップリングの増大の両方の条件を満たすように導波路の設計と最適化を電場分布解析により行った。また、Co/Pd 多層膜の全光磁化歳差運動の振幅の増大を図るため、薄膜状態の試料を用いて振幅と成膜方法や構造との関係を実験的に調べた。

偏波変調信号の導波路内伝搬のモデル化は、複素誘電率テンソルの非対角項(ϵ_{xy})を取り入れたビーム伝搬法(BPM)プログラムを導入して行った。BPM 法にはコア・クラッド層の比屈折率差の大きさに厳しい制限があり(\sim 数%以下)、実験で用いた導波路材料には適用できなかったため、導波路としてコア・クラッド層に合成石英材料、磁性体に磁性ガーネットを元とする仮想的な磁性体を用いて原理的な検証を行った。

3) Y型分岐路を用いた偏波変調信号のモード分割多重の原理検証

原理検証は、BPM プログラムを用いて行った。1つの光入力部を持ち磁性体層と光結合したコア層に対して、コア層のみで幅の異なる二つの光出力部を持つ Y 型導波路を設計し、磁性体層の局所的な磁化状態を仮想的に変化させ、各モードにおける磁気光学信号のモード次数に対応する光経路へ分岐させるための検証を行った。

4. 研究成果

1) 図 1(a)に、レンズドファイバーを用いた、伝播光と [Co/Pd] 多層膜層をもつリッジ型 GaAs 導波路とのカップリングの様子を示す。導波路構造と入力光波長の検討(915 nm)の検討により、導波路の吸収損失を 4dB に抑えた。また、レンズドファイバーやナノポジショナを導入し顕微システムの安定化を行った結果、入力損失を $\sim 50\ \text{dB}$ とした。導波路からの出力光に対する磁気光学効果の評価結果を図に示す。[Co/Pd] 多層膜の磁化方向を上下に反転させることで、最大 2.8 度の偏光回転に相当する磁気光学信号を得た。これは、同条件で作製した多層膜試料に対して自由空間で得た極カー回転角 (0.1 度) よりも 30 倍大きい。これは導波路中のモードが

磁性体直下を伝搬することにより磁気光学効果が増強されたことを示唆している。

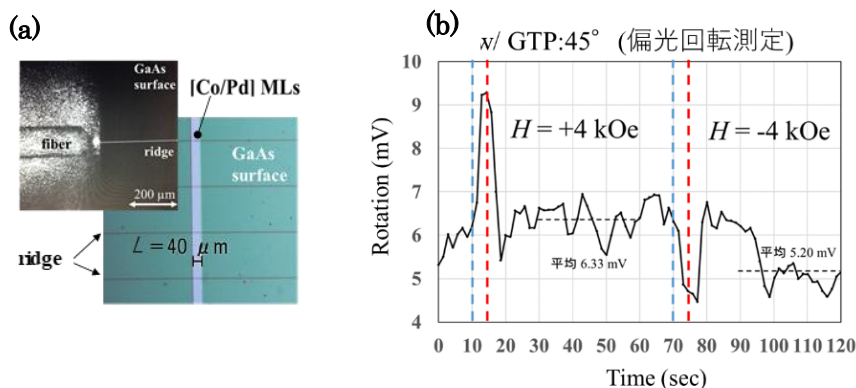


図 1 (a) 導波路の光学顕微鏡像。挿入図： レンズドファイバーを用いた伝播光と導波路のカップリング。(b) GaAs コア層からの出力光における磁気光学偏光回転の測定値。

2) Co/Pd 多層膜の光励起磁化歳差運動の振幅の増大や制御の指針を得るため、磁化特性や振幅の、製膜における基板および作製法 (DC および RF スパッタ堆積法) の依存性を調べた。RF 法は DC 法に比べて Co 層厚の変化に対して磁気異方性が広い範囲で制御できることが示された (図 2(a))。これは Co/Pd 界面の急峻性が DC スパッタ法で得られたものに対して高いことを示唆している。また磁化歳差運動の振幅も RF 法の方が大きくなる可能性が認められた (図 2(b))。しかし同時に歳差運動の振幅にはシード層の平坦性も影響する事が示唆されたため、歳差運動の振幅制御と増大のためには GaAs (001) 基板直上のシード層 (Ta) の平坦性との関係も調べる必要がある事が分かった。

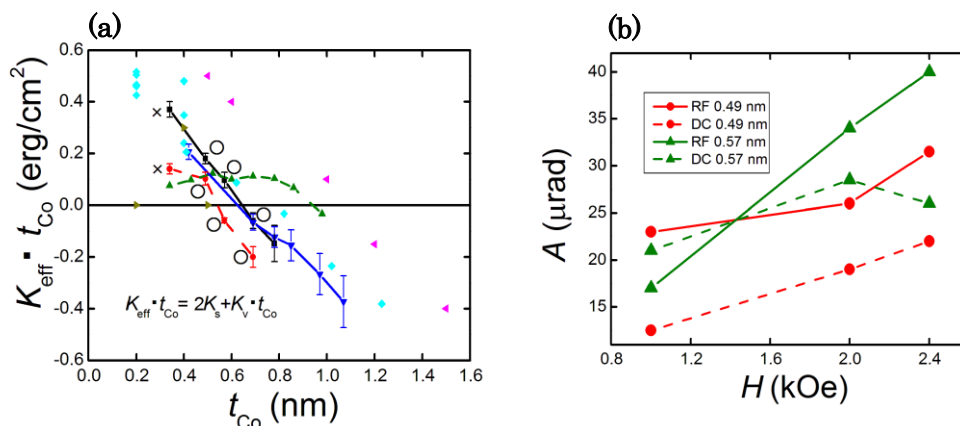


図 2 (a) RF および DC 法スパッタにより作製した Co/Pd 多層膜の磁気特性と Co 層厚の関係。(b) 光励起磁化歳差運動の振幅の外部磁場依存性。

磁性体と光結合したリッジ型導波路中の伝搬モードにおける磁気光学効果の発生過程を、複屈折率テンソルを含む BPM 計算によりシミュレーションした。導波路の設計は、有効な BPM 計算を行うためコア/クラッド間の比屈折率差を～数%以下とした。具体的には屈折率が僅かに異なる合成石英光から成るリッジ型導波路 (幅: 2 μm、高さ: 0.5 μm) のコア層直上に、磁性ガーネットを基にした仮想的な磁性薄膜 (厚さ: 50 nm、磁気光学極カー回転: ~0.1 度) を設置し、0 次モードに対して計算を行った。磁気光学的な偏光回転の電場強度を抽出することで、磁気光学効果はモード伝搬の初期において磁性薄膜近傍からモードの分布全体へと広がる事が示された (図 3)。

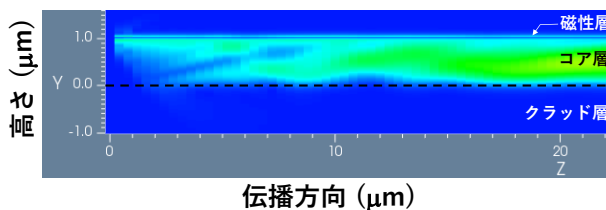


図 3: 磁性体と光結合した導波路に TE モードを入射した時の、導波路中心部における TM モードの電場強度。

一方で、伝搬長 40 μm における偏波面回転角度の計算値は前年度、[Co/Pd]/GaAs/AlAs/GaAs 導波路で得た実験値 (数度の偏光回転) より 1-2 桁小さかった。実験で用いた構造は比屈折率差が大きく BPM を適用できなかったため、計算値と実験値の大きな差異が BPM の計算原理によるものか今後の検討が必要である。

3) 磁性体と光結合したモード分割型 Y 分岐路を用いた、局所的な磁化反転による磁気光学信号のモード選択的多重伝送の原理検証を、BPM を用いて行った。計算には上記で用いた材料をもつ埋め込み型の導波路を用いた。Y 分岐路は磁性体薄膜と光結合した導波路(入力側: WG1)を、磁性薄膜がなくコア層幅の異なる二つの出力導波路(出力側: WG2, 3)に分岐させた構造を用いた。構造の最適化を検討した結果、WG1 に入力したそれぞれ 0, 1 次の TE モードにおいて、磁性体の局所的な磁化反転により磁気光学信号(TM モード)が発生した後、モードの次数に依存して出力導波路 WG2, 3 へ分配された(図 4)。磁気光学信号の分配効率や Y 分岐路のモード分配効率で決まることが示された。また、磁気光学信号の発生における各モード間の混線率は、局所磁化と各モードの結合効率(磁性体直下における各モードの分布割合)に依存することが分かった。これより導波路を用いた多重伝送の効率を向上させるためにはモード分布・形状の設計が必要であることが示された。

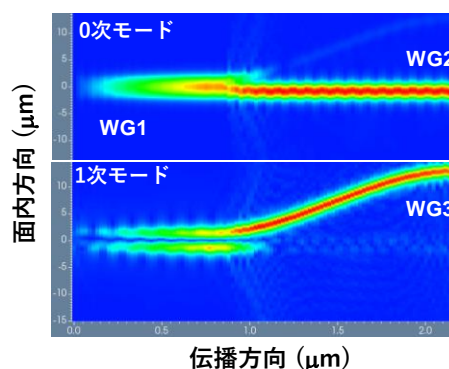


図 4: 磁性体と光結合した Y 型導波路を用いた磁気光学信号のモード選択的伝送。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 9 件)

- 1) 道廣健斗, 小川峻太, 西沢望, 宗片比呂夫, 西林一彦, "GaAs 光導波路と [Co/Pd] 磁性体積層膜による偏波変調器", 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-B303-12, 早稲田大学 (2018 年 3 月 17 日)。
- 2) 西林一彦, 西沢望, 宗片比呂夫, "磁性体磁化を利用した光導波路の偏光制御", 第 10 回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プロジェクト」シンポジウム -グローバル・リーダーをはぐくむ光科学-, 京都大学 (2018 年 1 月 23 日)。
- 3) 宗片比呂夫, 西沢望, 西林一彦, "スピントロニクス", 第 10 回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プロジェクト」シンポジウム -グローバル・リーダーをはぐくむ光科学-, 京都大学 (2018 年 1 月 23 日)。
- 4) 道廣健斗, 小川峻太, 西沢望, 宗片比呂夫, 西林一彦, "垂直磁化積層膜を組み込んだ光導波路による偏波変調の測定", 第 22 回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会 (PASPS-22), P-33, 大阪大学 (2017 年 12 月 4 日)。
- 5) 小川峻太, 西林一彦, 西沢望, 宗片比呂夫, "Co/Pd 多層膜における光誘起歳差運動の基板と堆積法による差異", 5p-C18-2, 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会 (2017 年 9 月 5 日)。
- 6) 西林一彦, "全光動作型スピン・光デバイスの設計", 第 64 回日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会, 名古屋大学 (2017 年 6 月 19 日)。
- 7) 小川峻太, 岩崎大和, 西沢望, 宗片比呂夫, 西林一彦, "RF 及び DC スパッタリング法で作製した Co/Pd 多層膜の磁気特性と光有機歳差運動", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 14p-P10-47, パシフィコ横浜 (2017 年 3 月 14 日)。
- 8) 道廣健斗, 岩崎大和, 西沢望, 宗片比呂夫, 西林一彦, "光誘起歳差運動を組み込んだマッシュエンダー型全光デバイスの設計", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-P14-2, パシフィコ横浜 (2017 年 3 月 16 日)。
- 9) 西林一彦, 岩崎大和, 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 II", 第 77 回応用物理学会周期学術講演会, 15p-B8-6, 朱鷺メッセ (2016 年 9 月 15 日)。

[その他]

ホームページ等

<http://www.munelab.first.iir.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。