

令和元年6月4日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06295

研究課題名（和文）光磁気変換を用いた通信用磁性光メモリ

研究課題名（英文）Photonic memory using magneto-optical recording

研究代表者

庄司 雄哉（Shoji, Yuya）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：00447541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：次世代光ネットワーク技術のキーデバイスである通信用光メモリについて、光磁気記録と磁気光学効果を用いた新規な磁性光メモリの実現を目的とし研究を行った。磁性光メモリ実現に向けて、薄膜磁石の残留磁化と磁気光学効果を用いた再生動作の検討、及び、キュリー点記録をベースとする光導波路を用いた光磁気変換方式による記録動作の検討を実施した。記録動作では、リング共振器を用いた高効率な光熱変換方式を開発し、光入力で300以上の温度上昇を確認した。再生動作では、FeCoB薄膜磁石を装荷したMZI型光メモリ回路を作製し、パルス電流により書き込まれた磁化情報を光透過率の変化として読み出す動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報トラフィックの増大に伴い、光ネットワークの大容量化と低消費電力化を両立するための技術開発が必要とされている。従来の電気ルータでは、光信号を電気信号に変換してパケット処理をした後、再度光信号に変換して伝送するため、電子回路の処理速度限界と消費電力増が大きな問題となっている。次世代の光ネットワーク技術として光パケットスイッチングが研究されており、光信号を光のまま伝送処理を行うことで超高速かつ低消費電力の光信号伝送が実現できる。光信号処理ネットワークに向けて、通信用光メモリの実現が求められている。

研究成果の概要（英文）：We have developed photonic memory using magneto-optical effect and magneto-optical recording for application to next-generation photonic network systems. In order to realize proposed photonic memory, we have investigated reading operation with remanant magnetization of thin-film magnet and magneto-optical effect, and writing operation with curie point recording of optical waveguide. For writing operation, we confirmed temperature increase up to 300 oC by light-to-heat conversion using microring resonator. For reading operation, we achieved optical intensity modulation due to the magnetization of thin-film magnet, which was formed on an MZI photonic memory circuit.

研究分野：光デバイス

キーワード：光メモリ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

情報トラフィックの増大に伴い、光ネットワークの大容量化と低消費電力化を両立するための技術開発が必要とされている。従来の電気ルータでは、光信号を電気信号に変換してパケット処理をした後、再度光信号に変換して伝送するため、電子回路の処理速度限界と消費電力増が大きな問題となっている。次世代の光ネットワーク技術として光パケットスイッチングが研究されており、光信号を光のまま伝送処理を行うことで超高速かつ低消費電力の光信号伝送が実現できる。光パケットスイッチングでは、光信号間の同期や衝突回避が要素技術となるが、このキーデバイスである光メモリは未だ実現されていないため、現状では光ファイバ遅延線による光バッファリングを用いた開発が行われている。光信号処理ネットワークに向けて、光メモリの実現が求められている。

### 2. 研究の目的

次世代光ネットワーク技術のキーデバイスである通信用光メモリについて、光磁気記録と磁気光学効果を用いた新規な磁性光メモリの実現を目的とする。本研究では、磁性光メモリ実現に向けて、薄膜磁石の残留磁化と磁気光学効果を用いた再生動作の検討、キュリー点記録をベースとする光導波路を用いた光磁気変換方式による記録動作の検討を行う。

本研究の磁性光メモリを図1に示す。シリコン光導波路を用いた(a)リング共振器型と(b)マッハツェンダー干渉計(MZI)型を提案する。いずれも一部に磁気光学材料と発熱層を上クラッド層として装荷した構造を有する。

光の記録動作(光情報 磁化情報)は、磁気光学材料のキュリー点記録により実現する。キュリー点記録は、高温で磁性体の保磁力が急激に弱まり磁化反転され易くなる現象を利用し、磁気記録を行う方式である。高強度の書き込み光(データ“1”)の入力に対し、磁気光学材料に光吸収による発熱を生じ、これに同期して外部磁場を印加すると磁化反転が起きる。低強度の書き込み光(データ“0”)では十分な発熱が生じず、磁化反転は起きない。光の再生動作(磁化情報 光情報)は、磁気光学効果による光の位相変化をリング共振器やMZIの透過特性変化に変換し実現する。つまり、図左下の参照光の入力に対し、磁気光学材料の磁化方向に依存した光強度が読み出し光として得られるため、磁気情報から光情報への変換が可能となる。データのリセットは、記録と同じ原理で、高強度のリセット光と書き込みと反対の外部磁場印加により行われる。本研究課題の研究期間では、磁性光メモリ実現に向けて次の二点を明らかにする。

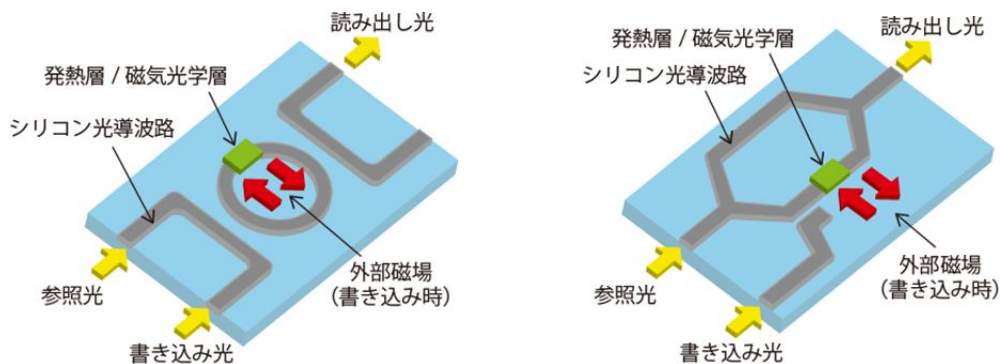


図1: 磁性光メモリ。(a)リング共振器型、(b)MZI型

#### (1) 記録動作: 光導波路を用いたキュリー点記録方式の開発

本研究で用いるキュリー点記録では300程度程度の加熱が必要である。まず、光導波路シミュレータを用いて、伝搬光の光吸収による発熱が得られる導波路構造を設計する。次に、シリコン光回路とその上部に発熱層(金属)を装荷したサンプルを製作し、導波路への光入力による温度上昇を達成する。その後、リング共振器やMZIの光回路内に磁性金属を装荷し、導波路伝搬光によるキュリー点記録方式による光書き込み動作の実現を明らかにする。

#### (2) 再生動作: 薄膜磁石の残留磁化と磁気光学効果を用いた光読み出し

研究代表者はこれまでに光アイソレータと呼ばれる磁気光学効果によって光透過率が変化する光デバイスを開発してきた。本研究では、軟磁性材料FeCoBからなる薄膜磁石を磁気光学導波路上に形成し、薄膜磁石に記録された磁化情報を光信号の強度として読み出す再生動作について検討を行う。

### 3. 研究の方法

#### ・光電磁界シミュレータを用いた伝搬光の光吸収による発熱構造の設計

光信号は主に Si を導波層として伝搬する。磁気光学層には CoFe204 や CeY2Fe5012 などの磁性薄膜を想定する。発熱層は発熱効率の高い磁性金属を用いる。この導波路構造に対し、各層厚さをパラメータとして光吸収と発熱の数値解析を行い、ピークパワー mW 程度の光信号パルスで十分な温度上昇が得られる構造を設計する。

また、光の伝搬方向に沿った温度分布、パルスの時間幅依存性などを時間領域差分法 (FDTD) などの電磁界シミュレータを用いて解析する。

#### ・金属酸化物装荷サンプルの製作と発熱量の計測

シミュレーションで設計した発熱動作を実験的に確かめる。Ti などの金属発熱層をシリコン光導波路上に堆積したリング共振器を製作し、高強度の光パルスを入射した際の波長特性の変化を測定し、光吸収による発熱に由来する熱光学効果を計測する。そこから発熱層の温度上昇を求め、設計にフィードバックし、所望の温度上昇が得られる導波路構造を実現する。ピークパワー mW 程度の光パルス入力で、磁性材料のキュリー点 300 程度の温度上昇を目指す。

#### ・薄膜磁石記録された磁気情報の光読み出し動作の実証

光導波路上に薄膜磁石と磁化反転用の導線を形成する。導線にパルス電流を印加し、発生した誘導磁場で薄膜磁石に磁化情報を記録する。同時に光導波路に連続光を入力し、薄膜磁石の残留磁化により制御された磁気光学効果を光透過率の変化として計測する。これにより、メモリされた磁気情報を光情報として取り出す光読み出し動作を実証する。

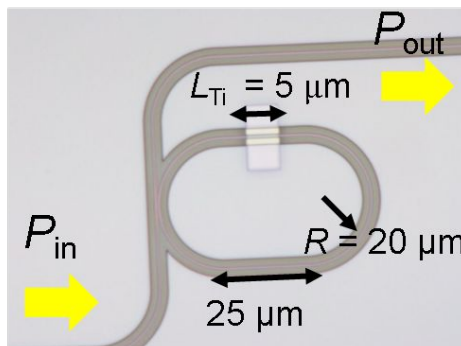
### 4. 研究成果

#### (1) 記録動作：光導波路を用いた高効率な光熱変換の実証

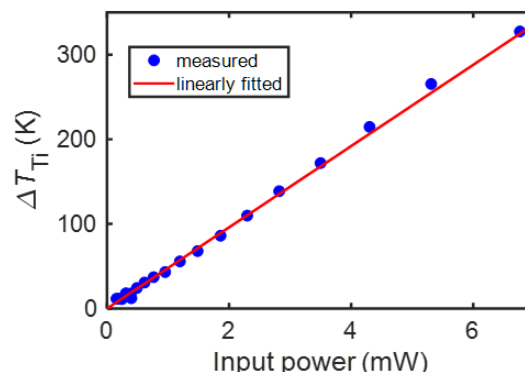
提案する光メモリの独創的な点は、光導波路を伝搬する光信号の吸収によって生じる発熱を利用する点である。一般的にキュリー点記録では 200~300 の発熱が必要とされ、空間光学系とレンズを用いた集光によって局所加熱をする。一方、光導波路では高い強度の光を入射すると非線形光学効果によってキャリア遷移に伴う吸収が生じるため、任意の領域で吸収と発熱を制御することは難しい。本研究では、リング共振器を利用することでこの課題解決を図った。

本研究では、光吸収を生じつつ光共振を利用するため、発熱層の吸収や過剰損失を考慮したリング共振器の詳細な設計を行った。その結果、ある周回損失に対してリング共振器全体の吸収損失を最大化するリング-バスライン間の結合効率が異なることがわかった。この結果を考慮し、**図 2** に示すようなシリコン導波路と金属 (Ti) 発熱層を装荷したリング共振器を作製した。Ti を装荷する伝搬長  $L_{Ti}$  とリング-バスライン導波路のギャップを変化させたデバイスを複数作製し、それらの透過特性を評価した。

測定では、光吸収によって温度が上昇すると熱光学効果により材料の屈折率が変化するため、共振波長が長波長側へシフトする様子が観測され、入力光強度が高いほどシフト量は大きい結果が得られた。この入力光強度に対する波長シフト量の変化について、光電磁界分布解析、非線形光学効果、自由キャリア吸収、熱伝導解析など様々な現象を考慮して温度上昇量を解析した結果を**図 3** に示す。この結果から、入力光強度 6.8mW に対して温度上昇量 300 以上が得られたことが確認された。これは一般的な磁性金属に対してキュリー点記録を行うのに十分な温度上昇量であり、提案手法による光磁気変換の可能性を示すものである。今後は金属発熱層を磁性金属に置き換えて同様のデバイスを作製し、光入力に依存した磁化反転動作を確認することで、光 磁気変換の実証を目指す。



**図 2** 作製した金属発熱層を有するリング共振器の光学顕微鏡写真



**図 3** 入力光強度に対する温度上昇量の解析結果

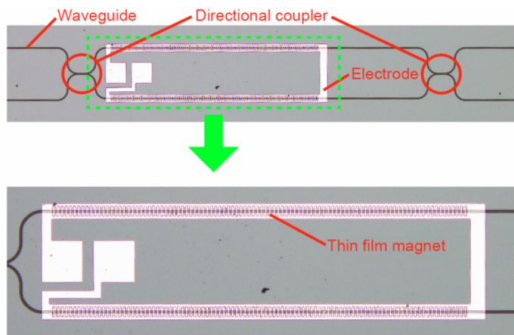


## (2) 再生動作：

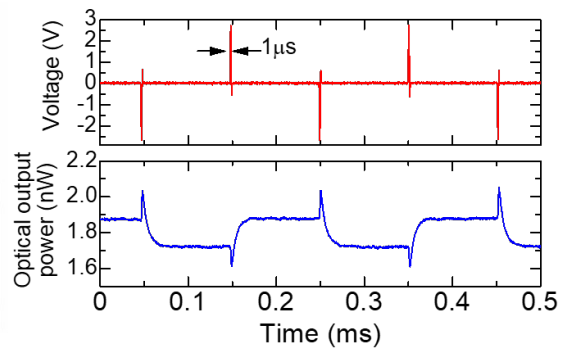
薄膜磁石に記録された残留磁化で光信号の再生動作を実証するため、**図4**に示すマッハツェンダー干渉計(MZI)からなる光回路上に薄膜磁石をアレイ化したデバイスを作製した。初期検討として、リング共振器でなく MZI を利用した理由は、磁化方向が一様である点と、干渉アームの光路長を長くすることで位相シフト量を増やすことができるためである。干渉計の各アームで反平行な方向に磁化することで位相差が得られる。また、薄膜磁石の磁化方向は光導波路の伝搬方向に垂直である必要があるため、構造異方性を利用して長方形にした薄膜磁石をアレイ化することで磁化容易軸の方向に制御した。

まず、自然放光(ASE)光源からの広帯域光をデバイスに入力し、スペクトラムアナライザを用いて波長特性を測定した。薄膜磁石を磁化するために Ag 導線に電流を印加し、電流を止めた後に透過光スペクトルを測定した。その結果、電流を止めた状態で異なる光スペクトルを観測し、薄膜磁石の残留磁化が Ce:YIG 層に作用して磁気光学移相効果を生じていることが確認された。このときの消光比は、波長 1566nm において最大で 15.6dB が得られた。次に、電流をパルス幅 1 $\mu$ s、繰り返し 0.1ms で符号の反転した制御信号に整形して印加し、透過光強度の時間応答を測定した。**図5**に示す結果のように、パルス状電流に同期して透過光強度の状態が変化し、電流がゼロでもその状態を保持する応答が確認された。光出力が変化する際のスパイク上の応答は、薄膜磁石の磁化と反対方向に変化することから、電流による印加磁場が Ce:YIG にも影響したためと考えられる。また、光出力の応答は光検出器の出力を増幅するために用いたアンプの帯域制限を受けており、増幅が不要な高い光出力のデバイスを実現できれば、より高速の応答が期待できる。

以上の結果から、薄膜磁石に記録された磁化方向を光信号の出力強度として変換するメモリ再生動作の実証に成功したと言える。今後は、最終形態となるリング共振器を用いて同様の再生動作を実証する。



**図4** 作製した MZI 型光メモリの光学顕微鏡写真



**図5** パルス状電流印加時の透過光強度の時間応答

本研究開発課題では、次世代光ネットワークとしての光信号処理ネットワークの重要な光素子のひとつである通信用光メモリについて、光磁気変換を用いた新しい光メモリを提案しその実現を目的とした。3 年間の研究期間において記録動作と再生動作を両立する最終的な光メモリの動作実証には至らなかったが、提案手法のポイントとなる導波路中を伝搬する光による効率的な光熱変換の実現を達成した。また、薄膜磁石の磁化方向として不揮発にメモリされた情報を光信号強度として抽出する再生動作の実証にも成功した。

今後の課題は、記録動作では、薄膜磁石を発熱層として光熱変換を生じさせ、キュリー点記録による磁化反転を実現することである。再生動作では、リング共振器型の光回路上に記録層となる薄膜磁石を形成し、その残留磁化により磁気光学移相効果と共振状態を制御して光信号出力を得ることである。これらを同一構造で実現することで、世界初の磁性光メモリの実証を目指し、研究を継続していく。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- [1] Y. Shoji and T. Mizumoto, “(Invited) Silicon waveguide optical isolator with direct bonded magneto-optical garnet,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 3, p. 609 (Feb. 2019)., 査読有
- [2] Y. Shoji and T. Mizumoto, “(Invited) Waveguide magneto-optical devices for photonics integrated circuits,” *Opt. Mater. Express*, vol. 8, no. 8, pp. 2387-2394 (Aug. 2018)., 査読有
- [3] R. Yamaguchi, Y. Shoji, T. Mizumoto, “Low-loss waveguide optical isolator with tapered mode converter and magneto-optical phase shifter for TE mode input,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 16, p. 21271-21278 (Aug. 2018) , 査読有
- [4] K. Okazeri, K. Muraoka, Y. Shoji, S. Nakagawa, N. Nishiyama, S. Arai, T. Mizumoto, “Self-holding magneto-optical switch integrated with thin-film magnet,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 371-374 (Jan. 2018)., 査読有
- [5] 庄司雄哉, 水本哲弥“磁性体を用いた光制御デバイス”, *フォトニクスニュース*, 第3巻, 第2号(2017年7月) 65-68 ページ, 応用物理学会フォトニクス分科会, 査読無
- [6] Y. Shoji, A. Fujie, and T. Mizumoto, “(Invited) Silicon waveguide optical isolator operating for TE mode input light,” *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 6, p. 4403307 (Dec. 2016)., 査読有
- [7] K. Miura, Y. Shoji, and T. Mizumoto, “Mach-Zehnder wavelength selective switch embedded with microring resonators,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, p. 022201 (Jan. 2017)., 査読有
- [8] E. Ishida, K. Miura, Y. Shoji, H. Yokoi, T. Mizumoto, N. Nishiyama, S. Arai, “Amorphous-Si waveguide on a garnet magneto-optical isolator with a TE mode nonreciprocal phase shift,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 1, pp. 452-462 (Jan. 2017)., 査読有

他 5 件

〔学会発表〕(計 48 件)

- [1] T. Mizumoto, K. Okazeri, Y. Shoji, K. Muraoka, S. Nakagawa, N. Nishiyama, S. Arai, “(Invied) Photonic functional devices based on magneto-optics,” *International Conference on Fiber Optics and Photonics 2018 (Photonics 2018)*, New Delhi, India, (Dec. 2018).
- [2] T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invied) Optical nonreciprocal devices fabricated with directly bonded magneto-optical garnet”, *OSA Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP 2018)*, Lima, Peru, (Nov. 2018).
- [3] R. Yamaguchi, Y. Shoji, T. Mizumoto, “Demonstration of Silicon Waveguide Optical Isolator for TE Mode Input”, *23rd Microoptics Conferene (MOC ' 18)*, Taipei, Taiwan, B-2 (Oct. 16, 2018).
- [4] R. Yamaguchi, Y. Shoji, T. Mizumoto, “TE mode input operation of waveguide optical isolator with tapered mode converter and magneto-optical phase shifter”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2018*, San Diego, USA, M3I.3 (Mar. 2018).
- [5] K. Okazeri, K. Muraoka, Y. Shoji, S. Nakagawa, N. Nishiyama, S. Arai, T. Mizumoto, “Self-holding operation of magneto-optical switch using thin-film magnet”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2018*, San Diego, USA, Th3C.2 (Mar. 2018).
- [6] T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invited) Direct bonding of Magneto-optical materials for optical-noreciprocal devices,” *Energy Materials Nanotechnology (EMN) Meetings 2017*, Orlando, USA (Dec. 2017).
- [7] Y. Shoji, T. Mizumoto, “(Invited) Magneto-optical nonreciprocal devices for silicon photonics,” *Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics (IPR 2017)*, New Orleans, USA (July 2017).
- [8] T. Mizumoto and Y. Shoji, “(Invited) Optical isolators in silicon photonics,” *The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24)*, Tokyo, Japan (Aug. 2017).

他 40 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：全光スイッチ及び光学装置  
発明者：庄司雄哉、村井俊哉、水本哲弥  
権利者：庄司雄哉、村井俊哉、水本哲弥  
種類：特許  
番号：2018-163966  
出願年：2018  
国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6．研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名： 水本 哲弥

ローマ字氏名： Tetsuya Mizumoto

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。