

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18805

研究課題名（和文）磁性体を用いた集積型光メモリの創製

研究課題名（英文）Integrated optical memory with magnetic materials

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では光導波路によりチップ上に集積可能な光磁気メモリの創製を目指して研究を行った。データ読み出し回路となるリング共振器の外周に、データ書き込み用の光導波路と記録層を配置した構造を考案し、シミュレーションによりその実現可能性を明らかにした。記録層1セルの素子を試作し、外部磁場を印加しながらリング共振器の光透過率を測定することで、記録層にメモリされた磁化情報を読み出し光の強度比として取り出せることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光磁気記録を用いた光メモリはディスク型のストレージ（MOディスク）が存在するが、レンズ等の空間光学系を用いない集積可能な固定型の光磁気メモリとしては世界初の試みである。光信号を記録層の磁化として記録し、その磁化により発生した磁場で光読み出しを行う光メモリ動作を確認することに成功した。将来的な応用として、光通信のみでなく近年注目されている光コンピューティングにおいてデータを一時的に記憶する素子として応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a magneto-optical memory that can be integrated on a chip using optical waveguides. We proposed a structure in which an optical waveguide for data writing and a recording layer are placed around the outer periphery of a ring resonator that serves as a data readout circuit, and clarified its feasibility through simulation. By fabricating a prototype device with one cell in the recording layer and measuring the optical transmittance of the ring resonator while applying an external magnetic field, we confirmed that the magnetization information stored in the recording layer could be extracted as the intensity ratio of the read light.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光メモリ 光磁気記録 光導波路

1. 研究開始当初の背景

光信号データを不揮発に記憶する「通信用の光メモリ」は未だ実現されていない。光メモリは信号の同期や衝突回避のためのキーデバイスであり、光パケットスイッチングなどの次世代光信号処理ネットワーク実現のボトルネックとなっている。

集積型光メモリの研究として、DVD等に用いられる相変化材料を利用したものが原理実証段階で報告例がある。しかし、書換可能回数が数千回程度に限られ、光信号処理の実用に耐えない。非線形光学効果による光双安定状態を用いた光メモリは、バイアス光が必要で安定性がなく、消費電力も高い。一方、本研究の磁気不揮発性を用いた光メモリは書換可能回数が無制限であり、記録層を分割することで多値情報の記録も可能であり、実用上も非常に有望である。

現状の通信システムのノードでは、光信号をいったん電気信号に変換し、DRAMなどのメモリにデータを蓄え電子回路で信号処理してから、再び電気信号を光信号に戻して送信している。このため、光電変換ばかりでなく高速な信号データを電子回路処理するために生じる消費電力の増大が問題となっている。光メモリが可能にする光信号処理は、超高速・高効率な通信システムと光パケットスイッチなどの次世代ネットワーク実現の扉を開く鍵である。本研究は、単に世界初の磁性光メモリの実現に留まらず、光ネットワークの研究開発全体に大きな変革をもたらす潜在性をもった挑戦的な研究である。

着想の原点は、応募者が近年世界に先駆けて成功した(A)不揮発光スイッチと(B)光導波路を用いた光熱磁気記録の成果である。(A)では、図1に示す軟磁性膜CoFeBを用いたリング共振器型光スイッチにおいて、CoFeB層に記録された残留磁化を磁気光学結晶のCe:YIG層に作用させることで不揮発な光透過率制御を達成した。(B)では、Si導波路上に装荷したCoFeB層が導波光を吸収することで発熱し、CoFeB層の保磁力が弱まる効果を利用して、光による磁気記録を実証した。(A)を利用すれば磁気情報から光情報の読み出しができ、(B)を利用すれば光情報から磁気情報への書き込みができる。

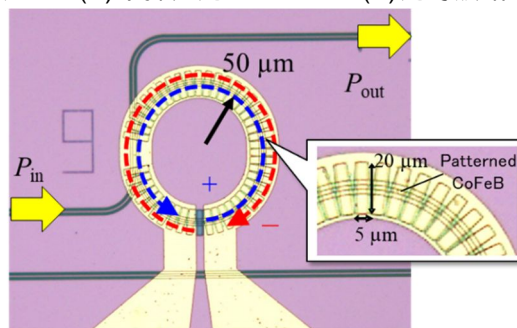


図1 不揮発光スイッチ

2. 研究の目的

本研究は、次世代の光信号処理ネットワークに向けて、磁性体を用いた新しい光メモリの実現を目的とする。光磁気記録メモリではMOディスクがストレージとして商用化されているが、レンズ等の光学系が大きく、回転機構による書き込み・読み込み速度の制約で通信用途には適さない。本研究では、光導波路を用いたソリッドステートの集積型光メモリを創製する。

図2に本研究提案当初の集積型光メモリの構造を示す。書き込み動作については、空間光学的な集光を用いる代わりに光導波路からの効率的かつ局所的な光吸収と発熱を利用する。温度上昇により磁気記録層(CoFeB)の保磁力が低下するため、適切な外部磁場を印加しておくことで光信号により誘起された磁化反転を得る。読み出し動作では、磁気記録層の残留磁化が磁場として磁気光学ガーネット(Ce:YIG)の磁化に作用し、その強さに応じた磁気光学効果が誘起される。図2(a)のようなリング共振器からなる光回路により光の透過率が変化することで、参照光の強度変化として読み出し光を得る。

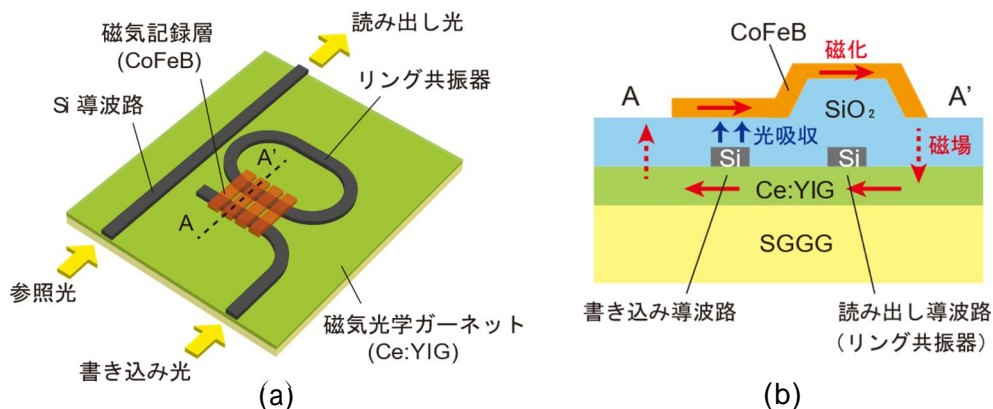


図2 磁性体を用いた集積型光メモリの(a)デバイス構造と(b)記録部の断面構造

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために挑戦する課題は、これら異なる原理に基づく書き込みと読み込みの動作を両立することである。そのために図2のような光デバイス構造を設計・作製し、光メモリの動作を実証する。以下の研究方法・計画によって具体的な課題を順に解決し、最終目標の達成を目指す。研究体制は1グループのみで行う。

・書き込みと読み出しを両立する CoFeB 記録層の設計と磁気特性向上 (1年目)

書き込みでは発熱の観点から 100 nm 以下の薄い記録層が望ましいが、読み出しでは強い残留磁化を得るために厚い記録層が望ましい。これらをバランスする CoFeB 層の設計を熱伝導解析と磁場解析の両面から行うとともに、磁気異方性の強い結晶膜の堆積条件を探索し、残留磁化の強い記録層を作製する。

・書き込みと読み出しを両立する光導波路構造の作製 (2年目)

書き込み導波路では記録層で効率的な光吸収を得るために記録層と光導波路とを近接させる必要があるが、読み出し導波路では光信号の損失につながるため近接できない。そこで、図2(b)のような異なる厚さのクラッド層をもつ導波路構造を作製する。また、記録層が磁気回路として効率的に Ce:YIG を磁化することができる層構造を設計する。

4. 研究成果

書き込み導波路の配置については、当初の図2の構造とは異なり、図3に示すようなリング共振器の外側に記録層を配置した構成を検討したところ、静磁界解析シミュレーションによって、リング導波路の領域に Ce:YIG を磁化飽和する程度の磁界を発生できることがわかった。また、CoFeB 記録層の厚さと縦横のサイズについてもシミュレーションを行い、実際に CoFeB 層のみの磁化特性を測定することで、保磁力が小さいまま残留磁化が強くなる最適な形状があることがわかった。

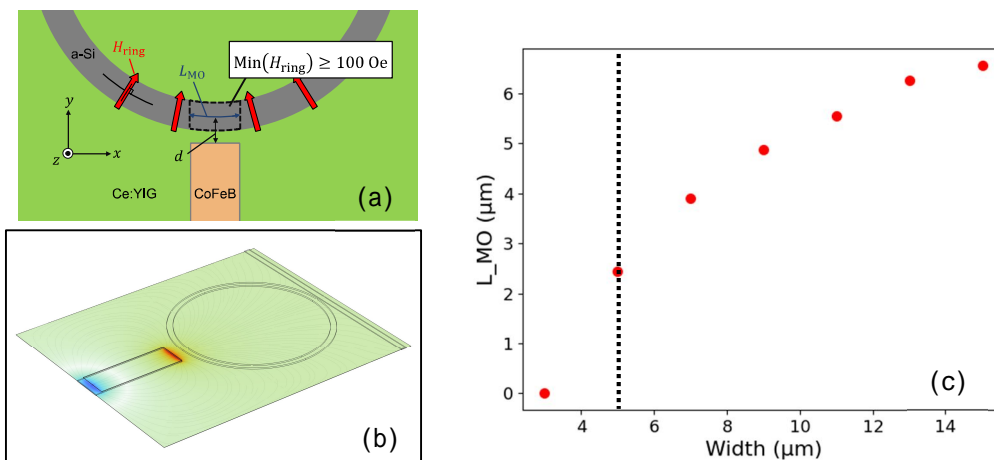


図3 記録層をリング共振器の外側に配置した静磁界解析シミュレーション
(a)モデル図、(b)解析例、(c)記録層の幅に対する磁気光学位相効果の有効長さ

図4(a)に示すリング共振器の外側に1セルの書き込み用の導波路と記録層を形成したデバイスを作製し、その動作特性を評価した。書き込み動作には、準備状態として外部磁場を適切に印加する必要があり、直流電流源をパソコン制御して電磁石からの外部磁場を精密に制御する機構を作製した。まず、外部磁場を少しずつ掃引しながらリング共振器の透過率変化を測定したところ、図4(b)に示すようなある磁場での共振波長のシフトが観測され、Ce:YIGが磁化反転する磁場とCoFeBが磁化反転する磁場の違いが確認された。マイナスからプラスと、プラスからマイナスの掃引方向でヒステリシス的な非対称動作が測定された。しかし、想定よりもCoFeBの反転する磁場つまり保磁力が弱いことがわかった。次に、CoFeBが磁化反転する手前の磁場強度に設定し、書き込み光を入力することで磁化反転の検証を試みた。リング共振器の透過率変化を測定したところ、書き込み光を入力することで共振波長のシフトが確認できたが、書き込み光の入力を止めると元の共振波長に戻ってしまい、完全な磁化反転を得ることができなかった。今後は、より保磁力の高い記録層を形成することで書き込み光による磁化反転を保持し、そのメモリされた磁化によるリング共振器の光読み出し動作が可能であると考えられる。

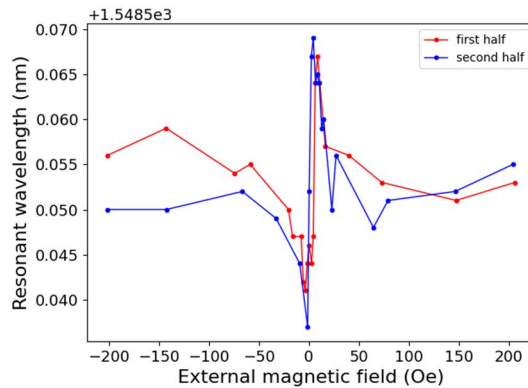
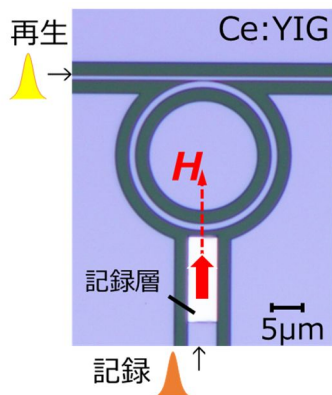


図4 (a)作製した記録層1セルの光磁気メモリと(b)外部磁場を掃引した場合のリング共振器の透過率の変化

顕著な成果

書き込み動作については、光パルス入力に対する磁化反転動作の実験結果について Optics Express 誌に投稿していたものが掲載された。また、再生層となる Ce:YIG の磁化反転速度を評価するため 2021 年度から検討を進めたコプレーナ線路を用いた光スイッチの高速応答の検討結果について、成果発表した国際会議 OECC/PCS2022 と応用物理学会学術講演会で Best Student Paper Award と講演奨励賞を受賞する評価を得た。リング共振器の外側に記録層を配置する検討結果について成果発表した学生が、電子情報通信学会ソサイエティ大会で学術奨励賞を受賞する評価を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Yuya Shoji	4. 巻 13
2. 論文標題 Nonvolatile photonic switch with magnetic materials on a silicon photonic platform	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Opt. Mater. Express	6. 最初と最後の頁 2489 ~ 2496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.498243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daiki Minemura	4. 巻 21
2. 論文標題 Design of ultra-low-loss magneto-optical isolator fabricated by u-transfer printing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE ELEX	6. 最初と最後の頁 20230521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.20.20230521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihiro Honda	4. 巻 31
2. 論文標題 Extended optical waveguide theory with magneto-optical effect and magnetoelectric effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 32017 ~ 32043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.496200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Daiki Minemura	4. 巻 31
2. 論文標題 Compact magneto-optical isolator by u-transfer printing of magneto-optical single-crystal film on silicon waveguides	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 27821 ~ 27829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.497731	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shun Yajima	4. 巻 31
2. 論文標題 High-speed Modulation in Waveguide Magneto-Optical Switch with Impedance-matching Electrode	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 16243 ~ 16250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.480835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 庄司 雄哉	4. 巻 52
2. 論文標題 集積型光アイソレータのための磁気光学結晶集積技術	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 371 ~ 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Toshiya Murai	4. 巻 30
2. 論文標題 Light-induced thermomagnetic recording of thin-film magnet CoFeB on silicon waveguide for on-chip magneto-optical memory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Opt. Express	6. 最初と最後の頁 18054 ~ 18065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.448460	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shun Yajima	4. 巻 61
2. 論文標題 Integrated photonic traveling salesman problem probabilistic solver with polynomial calculation time complexity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys	6. 最初と最後の頁 52003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac55e2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Paolo Pintus	4. 巻 5
2. 論文標題 An integrated magneto-optic modulator for cryogenic applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Electronics	6. 最初と最後の頁 604 ~ 610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41928-022-00823-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shuyuan Liu	4. 巻 10
2. 論文標題 Silicon-based integrated polarization-independent magneto-optical isolator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 373 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.483017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zhu Liang	4. 巻 62
2. 論文標題 Improvement of extinction in optically-controlled silicon thermo-optic switch based on micro-ring resonator with distinct probe signal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys	6. 最初と最後の頁 32001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbc5d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 庄司 雄哉	4. 巻 41
2. 論文標題 若手研究者の挑戦：光導波路を用いた光磁気記録デバイス ~ソリッドステート光メモリへの挑戦~	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 200 ~ 203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西山 伸彦	4. 巻 105
2. 論文標題 異種材料集積を用いた機能可変光集積回路	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 1368 ~ 1374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 庄司 雄哉	4. 巻 9
2. 論文標題 磁気光学効果を用いた自己保持型光スイッチの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 次世代高速通信に対応する光回路実装、デバイスの開発	6. 最初と最後の頁 360 ~ 365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yuya Shoji
2. 発表標題 Performance Estimation of Photonic Neural Network Accelerator with Magneto-optical Switch Array
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Hara
2. 発表標題 Phased-array Type 1×4 Wavelength Selective Switch with Silicon Waveguides
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shun Yajima
2. 発表標題 High-speed Switching of Waveguide Magneto-Optical Switch with Coplanar Electrode
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shun Yajima
2. 発表標題 Scaling Analysis of an Integrated Photonic Traveling Salesman Problem Accelerator
3. 学会等名 27th Microoptics Conference (MOC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄司 雄哉
2. 発表標題 導波路型光アイソレータの開発と集積化に向けた検討
3. 学会等名 第163回微小光学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢島 駿
2. 発表標題 コプレーナ線路による磁気光学スイッチの高速スイッチング
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuyuan Liu
2. 発表標題 TE-mode Magneto-optical Isolator Based on Asymmetric Microring
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄司 雄哉
2. 発表標題 ソリッドステート光メモリの実現に向けた光導波路型光磁気記録メモリ
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 翔平
2. 発表標題 自己保持型磁気光学スイッチのSOI基板上集積に向けた研究
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Shoji
2. 発表標題 Low-loss Integrated Optical Isolator on Silicon Photonics Platform
3. 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhu Liang
2. 発表標題 Optically-Controlled Silicon Thermo-Optic Switch Based on Micro-Ring Resonator
3. 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yisheng Ni
2. 発表標題 Compact Phased Array Type Wavelength-selective Switch Based on Silicon Photonics
3. 学会等名 12th International Symposium on Photonics and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄司 雄哉
2. 発表標題 導波路型光アイソレータの進展
3. 学会等名 Photonic Device Workshop (PDW) 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢島 駿
2. 発表標題 高周波線路による磁気光学スイッチの高速スイッチング
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峰村 大輝
2. 発表標題 薄膜Ce:YIG/SGGGのSi導波路上への μ -トランスファー プリンティングを用いた導波路型光アイソレータの製作
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	カリフォルニア大学サンタバーバラ校		