

氏名	庄司雄哉
所属機関	東京工業大学
研究題目	磁性薄膜を用いた通信ネットワーク用光メモリの創製

1. 研究の目的

未だ実用化されていない通信用光素子である光メモリについて、磁性体を用いた新規な光メモリの実現を目的として研究を実施した。研究代表者は、光磁気記録によるデータ書き込みと磁気光学効果によるデータ読み出しを用いた新たなデバイス動作・構造を提案している。実現の鍵となるのは、通信波長帯で大きな磁気光学効果を示す磁気光学材料コバルトフェライト膜の開発、キュリー点記録をベースとする光磁気変換方式の開発の二点である。

本提案の磁性光メモリは、データ保持時間に制限がないことやデータ保持に定常的な電力供給を必要としないといった点で実用性に優れている。実用的な光メモリが開発されれば、次世代の光ネットワーク技術として期待されている光パケットスイッチングを実現するブレークスルーとなり、他にも光信号処理の新たな応用（例えば光演算回路など）の創出につながる。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

素子構造と動作原理

本研究では、磁性体と光導波路を組み合わせた新規な光メモリの実現を目標とする。光信号の1ビットデータを磁化方向に変換し記憶する素子である。図1に素子構造を示す。シリコン光導波路を用いて数十マイクロメートルサイズの小型のリング共振器を形成し、その一部に磁気光学材料の上部クラッド層と金属発熱層を堆積する。

提案素子の動作原理について説明する。光の書き込み動作(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。キュリー点記録とは、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、発熱層で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気光学材料に磁化反転が起きる。磁化反転後は材料が冷却されると磁化方向を保持し、データを記憶する。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。光の読み出し動作(磁化情報→光情報)は、磁気光学効果による材料の磁化方向に依存した光の位相変化を利用して、リング共振器の共振特性変化により実現する。図左下の参照光の入力に対し、共振条件を満たす磁化方向では参照光が右上読み出しポートへ透過し、共振条件を満たさない磁化方向では参照光が読み出しポートへ透過しないため、磁気情報から光情報への変換が可能となる。参照光は、大きな発熱が生じない程度の低強度の光を入力する。データのリセットは、書き込みと同じ原理で、高強度のリセット光と書き込み時と反対の外部磁場印加により行われる。

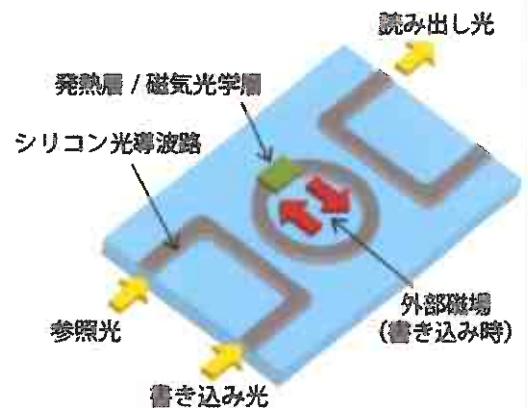


図1: 磁性薄膜を用いた光メモリ

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

実施内容

本研究期間では、提案する光メモリ実現に向けて、次の二点の課題を並行して検討した。

(1) 磁気光学材料コバルトフェライト(CoFe_2O_4)の成膜

数十ミクロンの磁気記録領域を実現するためには、通信波長帯($1.55\mu\text{m}$)で大きな磁気光学効果を有する材料が必要である。磁性光メモリ実現に向けて、磁気光学材料 CoFe_2O_4 の中間層を含めた成膜条件の最適化による結晶性向上による磁気光学効果の増大と低損失化の両立を目指し、検討を行った。

アルゴンガスによるRFプラズマを用いた対向ターゲット式スパッタリングにより成膜した CoFe_2O_4 膜のX線回折解析測定結果を図2に示す。多結晶膜ではあるが、いくつかの CoFe_2O_4 の結晶面が確認できる。この膜をシリコン光導波路上に成膜し光学特性を評価したところ、ファラデー回転係数は文献値の64%に相当する $24,000\text{ deg/cm}$ が測定された。また、光導波路の透過率から見積もった材料損失は文献値の10%程度の $0.74\text{ dB}/\mu\text{m}$ と低損失な値が得られた。

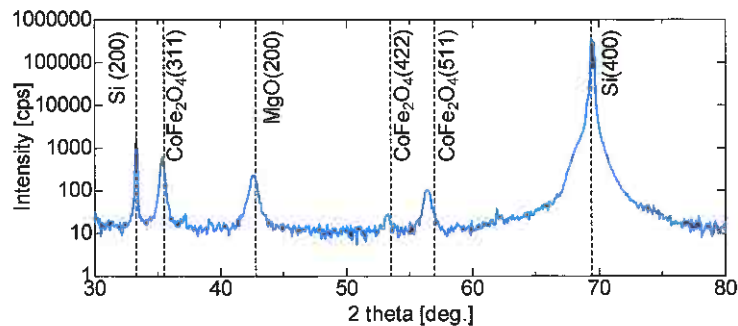


図2：作製した CoFe_2O_4 膜の XRD 測定結果

(2) 光導波路を用いた光磁気変換方式の開発

伝搬光の光吸収による発熱を利用した磁化反転を達成するための光導波路構造を検討した。シリコン導波路でリング共振器を形成し、その上部にTiを装荷したサンプルを作製した(図3)。光メモリの最終構造としてはSi導波路上に CoFe_2O_4 再生層と金属発熱層を順に形成するが、まず金属発熱層のみの評価を行うためにこのような構造を製作した。サンプルへの波長 1550 nm 帯の光波を入力し、リング共振器の共振特性(波長特性)を観測した。金属を装荷したサンプルにおいてのみ、図4に示すように光入力強度に依存した共振特性の変化が観測されたことから、金属部分の温度上昇が確認された。共振ピークの波長シフト量とシリコン光導波路の熱光学係数から温度上昇を見積もったところ、 6.3 mW の光入力時に最大で 100° 程度の温度上昇が得られたことが分かった。このような光入力による発熱を積極的にデバイス動作に利用する研究は新しく、この成果を米国カリフォルニアバークレーで開催された国際会議 Microoptics Conference' 17 等で口頭発表した。

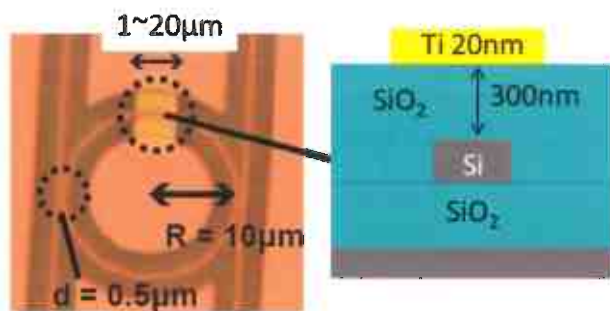


図3：製作した金属装荷リング共振器

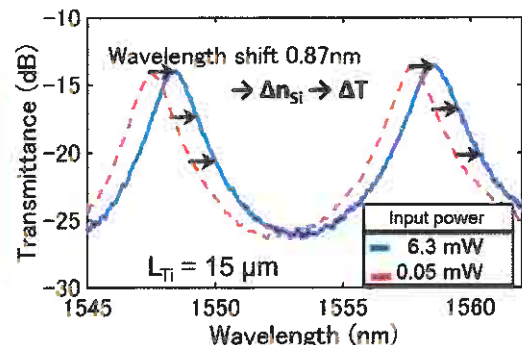


図4：測定した共振特性と波長シフト

3. 研究の結論、今後の課題

磁性薄膜を用いた光メモリの実現を目指し、初期的な検討を行った。結論として、光導波路中の伝搬光の光吸収を用いた新しい磁気制御の可能性を示した。継続した研究によってその実現が見込まれ、下記にそれに向けた今後の課題と検討方針を記す。

磁気光学材料 CoFe_2O_4 膜の開発においては、比較的低損失な結晶膜の形成を達成したものの、当初の目論見としての MgO 層を介した単一配向膜による大きな磁気光学効果の発現と低損失化には至っていない。 MgO の潮解性のため、成膜後の X 線回折装置を用いた評価では膜質を正しく評価できないことが原因である。また、他機関からの報告では、成膜中の基板温度を $300\sim 400^\circ\text{C}$ に加熱する条件で良好な CoFe_2O_4 膜が得られているが、現在本研究で用いているスパッタ成膜装置では基板加熱機構が搭載されていないため、常温での成膜を行っている。今後は、基板加熱や RHEED による成膜中モニタを搭載した新しいスパッタ装置を利用して、下地の MgO 層の品質改善と良好な CoFe_2O_4 の成膜を検討する。

光磁気記録方式の実現に向けて、光伝搬シミュレーションと数値解析による光吸収効率の計算を進めている。図 5 に解析モデル、図 6 にリング 1 周当たりの吸収損に対する透過率の計算結果を示す。結果として、リング一周当たりの吸収は小さくても共振の強さ(Q 値)を高めることで周回数が増加するため、全体としての吸収効率を高める設計が可能であることがわかる。リング共振器の共振設計つまりバスラインとリング間ギャップの設計や金属の領域長の最適化によって、さらなる効率改善の見込みが得られている。

今後は、熱アシストによる磁化反転が可能となる $200\sim 300^\circ\text{C}$ の温度上昇の実現を目指すとともに、磁性体を装荷したデバイスを製作し、実際に光入力による磁化反転の実証を目指し検討を進める。

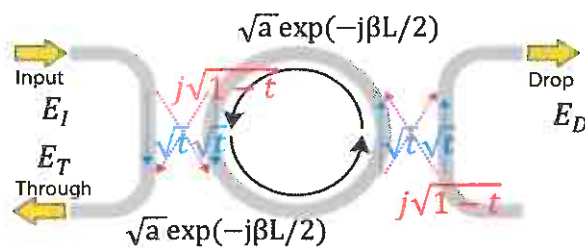


図 5：リング共振器の解析モデル

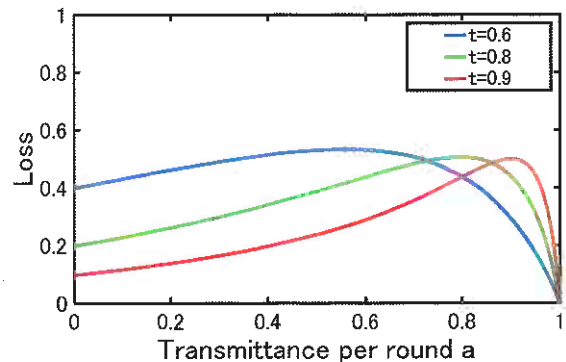


図 6：1 周当たりの吸収損に対する透過率の計算結果

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

スマートフォンやクラウドサービスの普及で情報トラフィック量は増加の一途を辿っている。それに伴う通信機器の消費電力の増加は大きな問題になっており、ネットワークシステムの変革が求められている。電子回路の信号処理負荷を低減し大容量通信と低消費電力を両立する光信号処理ネットワークが期待されており、それを実現するための要素デバイスである光メモリについて研究開発を実施し、その実現可能性を見出した。

4. 2. 学術的価値

光と磁気の相互作用は様々な物性評価において広く利用されている。しかし、その相互作用をデバイスの形態で利用する例は極めて少ない。本研究は、物理学として研究されてきた光と磁気の相互作用を用いて、デバイスという工学としての価値を創造するものである。これが実現されれば、通信ネットワークに限らず、光演算回路や光スピン制御デバイスなどの新しい学術領域の創成にもつながる可能性を持っている。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- [1] T. Murai, Y. Shoji, T. Mizumoto: "Proposal of non-volatile waveguide optical memory using magneto-optical recording," The 21th Microoptics Conference (MOC'16), Berkeley, USA, 13A-1, (2016).
- [2] 村井 俊哉, 庄司 雄哉, 水本 哲弥: 光磁気記録を用いた不揮発性導波路が光メモリの提案, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 15p-B8-8, (2016).
- [3] 村井 俊哉, 庄司 雄哉, 水本 哲弥: 磁性光メモリ書き込み動作に向けたシリコンリング共振器の非線形応答の評価, 電子情報通信学会信学技報, Vol. 116, No. 388, pp.57-62, (2017).