

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760270

研究課題名(和文) 超低消費電力の自己保持機能を有する導波路型磁気光学スイッチの開拓

研究課題名(英文) Study of waveguide magneto-optic switch having self-holding function for low-power consumption

研究代表者

庄司 雄哉 (Shoji, Yuya)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00447541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：超低消費電力な光ネットワークに有用な自己保持機能を有する磁気光学スイッチを提案し、その実現に向けた開拓研究を行った。自己保持機能は磁気光学導波路の上部に形成した磁気記録材料の不揮発性磁化により得られる。本研究期間において、大きな磁気光学効果を持つCe:YIGを用いた磁気光学スイッチの基礎動作実証と応答速度計測を達成した。また、磁気記録材料の成膜と微小パターン化の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed and investigated a magneto-optic switch with self-holding function for low-power consumption photonics networks. The self-holding operation is obtained by non-volatility in thin-film magnet formed on the magneto-optic waveguides. In this research, we achieved demonstration of the fundamental switching operation and characterization of the response speed of Ce:YIG which has a large magneto-optic effect. Then, we investigated deposition of the thin-film magnet to form micro patterns.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：光スイッチ 磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化防止や原発事故による電力不足の影響で、省エネルギー化はどの分野においても非常に重要な課題となっている。情報通信ネットワークでは、インターネットの動画サービスやスマートフォンの普及による通信量の増大に伴い、通信用電子機器での消費電力増が大きな問題となっている。ネットワークの基幹となっている光ファイバ通信においては、大容量化と低消費電力化を両立するための方針として、光クロスコネクタ技術 (OXC: Optical Cross Connect) と呼ばれる電氣的再生中継を介さずに光信号を伝送する形態が有望視されており、コア網においては既に導入が開始されている。

OXC で要求される光スイッチでは、経路選択が主用途のため比較的低速動作でもよく、安定性と消費電力の低さが最も重要となる。従来の光スイッチでは、あるスイッチ状態を維持するために電流や電圧の印加つまり駆動電力を消費し続けるが、自己保持機能を有する光スイッチでは、単パルスの制御信号の印加によりそれ以降は無電力でスイッチ状態を維持するため、これまでにない超低消費電力の光スイッチ動作が可能となる。

2. 研究の目的

自己保持機能は、機械駆動の MEMS 型光スイッチでも実現可能であるが、長期安定性と集積性の課題から将来の大規模化に難がある。本研究では、OXC に有用な、中速で超低消費電力の導波路型光スイッチを目指し、自己保持機能を有する磁気光学スイッチの開拓研究を行う。図 1 に提案するデバイスの構造概念図を示す。磁気光学薄膜上に光スイッチ回路を形成し、導波路上部に集積した磁気記録材料からの外部磁界により光スイッチ駆動を行うことで、磁気記録材料の磁化不揮発性により自己保持機能を実現する。制御信号の電流値と書き換え速度から光スイッチに必要な消費電力を求め、従来型比で 3 桁以上の低消費電力動作を実証する。

3. 研究の方法

自己保持機能を有する導波路型磁気光学スイッチは、次のステップで研究開発を行う。

(1) 磁気光学ガーネット上の光導波路と、マツハツェンダー干渉計 (MZI) 光回路の作製

磁気光学ガーネット上には、本研究室で成膜可能で導波路型光アイソレータの実績がある (CeY)₃Fe₅O₁₂ (Ce:YIG) を用いる。

光アイソレータでは、入出力が 1 ポートずつの MZI であったが、本光スイッチでは入出力が 2 ポートずつの MZI が必要である。2×2 方向性結合器を作製し、等分岐回路 (3dB カップラ) の最適化を行う。

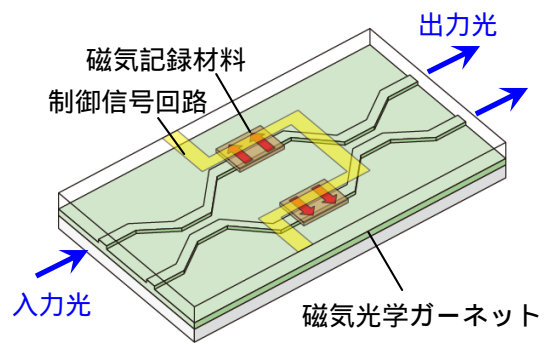


図 1: デバイスの構造概念図

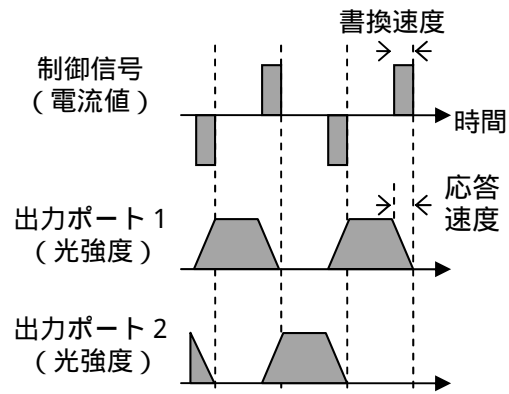


図 2: 自己保持スイッチ動作

(2) 磁気記録材料なしでの導波路型磁気光学スイッチの動作検証と応答速度評価

最適設計を行った MZI 光回路上に、電流により反平行な外部磁界を印加する制御回路を作製する。

磁気記録材料なしの光スイッチに対し、電流による外部磁界の変調を行い、Ce:YIG の磁化応答速度を計測する。文献から見積もられる ~1μs の応答速度を目指す。

(3) 磁気記録材料の集積と自己保持機能の動作実証

磁気記録材料として、FeCoB (残留磁化: 数 kG、保磁力: 数百エルステッド) を想定する。FeCoB の微小パターンを形成し、スイッチングに必要な外部磁場の発生を実現する。

自己保持動作の実証、消費電力の見積
磁気光学スイッチを作製し、FeCoB の磁化書き換えによる光スイッチ動作と、残留磁化による自己保持動作の実証を行う。図 2 に動作実証の計測イメージ図を示す。FeCoB の磁化書き換え速度も 1μs 程度であることを確認し、書き換えに必要な電流値から全体の消費電力を見積もる。

(4) 集積に適した構造の検討

Ce:YIG をベースとした光スイッチの製作と平行して、半導体導波路型光アイソレータの経験を生かし、集積化に適したデバイス構造を検討する。具体的には、半導体導波路上に磁気光学ガーネットを上クラッド層とし

て接合し、他の光デバイスとの集積に適したスイッチ構造を検討する。

4. 研究成果

総括としては、最終目標である自己保持機能を有する磁気光学スイッチの動作実証までは至らなかったが、中期目標としての磁気光学ガーネット上での光スイッチの製作と評価で目標性能以上の応答速度を達成した。その後、自己保持動作に必要な磁気記録材料の形成について新たな課題が明らかとなり、その検討を行った。以下に、研究方法のステップに依り、成果の詳細を記す。

(1)磁気光学ガーネット上の光導波路と、マツハツェンダー干渉計 (MZI) 光回路の作製

Ce:YIG の加工プロセスの開発と導波路の製作を行った。2×2 方向性結合器を作製し、等分岐回路 (3dB カップラ) の最適化を行った。図3に結合器長に対する光分岐比の測定結果を示す。結合器長 0 μm で既に分岐があるのは、接続する曲がり導波路で弱い結合が始まっているためである。以上の結果から、曲がり導波路を含まない方向性結合器の長さ 10 μm において 0.5:0.5(3dB)の分岐が実現される。この設計は、以降のMZIの作製において総じて用いられる。

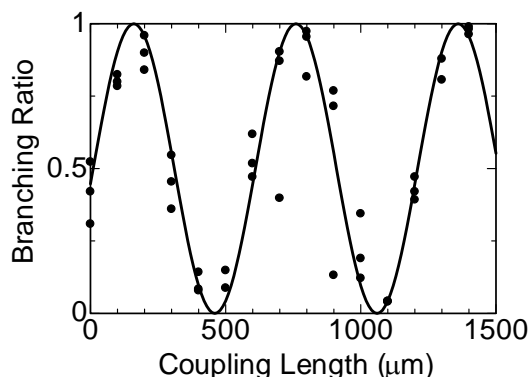


図3：方向性結合器の分岐特性

(2)磁気記録材料なしでの導波路型磁気光学スイッチの動作検証と応答速度評価

Ce:YIG を導波路とするMZI光回路上に、電流により外部磁界を印加する制御回路を作製した。これにより、MZI光スイッチ自体の消光特性と、磁気記録部を介さないCe:YIGの磁化の応答速度を評価できる。光スイッチの動作(出力光の強度変化)は、制御回路の電流印加 外部磁界の発生 Ce:YIG 導波路の磁化方向の変化 磁気光学効果の量の変化 MZI アーム間の位相差の変化、という作用により得られる。図4に、作製した光スイッチの出力2ポートである、BarポートとCrossポートの透過率特性を示す。電流値が高い範囲では、制御回路自体の発熱により、挙動が不安定になった。理想的にはBarポートとCrossポートで反転した動作が得られる

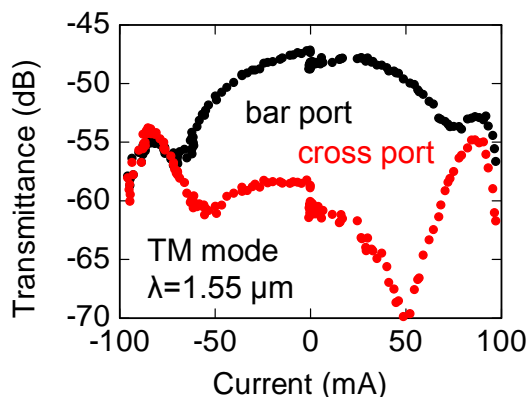


図4：電流駆動(外部磁界)による磁気光学スイッチの消光特性

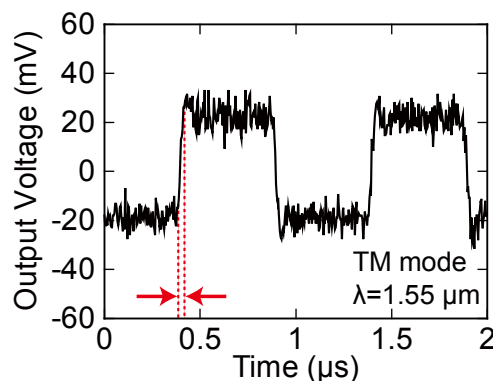


図5：電流駆動(外部磁界)による磁気光学スイッチの時間応答

が、初期位相のずれのため完全な反転は得られなかった。しかしながら、電流の印加方向による透過率特性の違いは磁気光学効果によるものであり、消光比(BarポートとCrossポートの強度比)は最大で20dBが得られた。

次に、電流を矩形波的に変調し、応答速度の測定を行った。図5にアバランシェフォトダイオードで検出した光出力応答の測定結果を示す。変調は1MHzのファンクションジェネレータを用いて行い、その電圧立ち上がり特性と同等の25nsで光出力も応答していることがわかった。利用可能な計測装置の制限でそれ以上の高速変調を試すことはできなかったが、Ce:YIGの磁化反転速度が25ns以下と判明した。自己保持動作で想定している1 μs より十分に高速であることは非常に有意義な結果である。磁気記録材料の磁化反転時間も同等の速度であれば、自己保持動作のための印加パルスの幅が狭くなり、消費電力の削減につながる。

(3)磁気記録材料の集積と自己保持機能の動作実証

磁気記録材料としてFeCoBを選定し、スパッタ法によりその成膜を行った。パターン化しないシート状膜で磁化特性を評価したところ、18kG程度の大きな残留磁化と50エルステッド程度の小さな保持力が得られた。微小パターン化した膜でも同等の特性が得ら

れば、光スイッチの自己保持動作を行うに十分である。

一方、光スイッチの磁気記録部の形状は光導波路に平行な方向に長軸を持つ長方形となるのに対し、必要な磁化方向は光導波路と垂直な短軸方向である（図6(a)参照）。長方形の強磁性体は、構造異方性の影響を受け長軸方向に磁化容易軸が向きやすいため、短軸方向に磁化容易軸を形成するための何らかの工夫が必要であることが判明した。

まず、対向ターゲット式スパッタ法による成長結晶異方性の発現を利用する方法について検討を行った。通常スパッタ法では、ターゲットとサンプルがプラズマ領域を挟んで向かい合っている構成であるのに対し、対向ターゲット式は2枚のターゲットでプラズマ領域を挟み、サンプルはその側面に配置する。このため、サンプルに対してスパッタ粒子は斜めに堆積されるため、ターゲットからの入射方向に平行な軸とそれに垂直な軸とで堆積した膜の結晶性や特性が異なる。これまでの報告例では、ターゲット方向に平行な方向に磁化容易軸が向きやすいことが知られている。パターン化しないシート状膜で磁化特性を評価したところ、入射と平行な軸に磁化容易軸を持つ磁性膜が得られた。しかし、正方形パターンでサイズを20 μm 角程度まで小さくすると結晶異方性は小さくなり、さらに入射に平行な軸が短軸となる長方形パターンでは、構造異方性が顕著となり長軸が磁化容易軸となった。

そこで、所望の磁化方向が長軸となる微小な長方形パターンを導波路に沿って配置する方法を考案した（図6(b)参照）。この手法では、構造異方性も所望の磁化方向に有利に働くことが期待される。図7に、このような長方形パターンを形成した実験結果を示す。100 μm ×50 μm のサイズにおいてシート状膜と遜色のない大きな残留磁化が確認された。

以上の結果を持って研究期間が終了し、最終目標である光スイッチの自己保持動作実証には至らなかった。しかし、磁気記録材料の問題は新たに考案した方法で解決の目処がついており、磁気光学スイッチは前述の通り動作実証が得られているので、これらを組み合わせることで自己保持型光スイッチの実証は実現間近であると考えられる。

(4)集積に適した構造の検討

半導体導波路上に磁気光学ガーネットを上クラッド層として接合したMZI型光アイソレータにおいて、高い消光比や広帯域な動作を実現した。また、2×2入出力MZIからなる光サーキュレータの動作実証にも成功した。これらのデバイスは磁気光学効果を利用したものであるため、同じ構造を本光スイッチへ応用することが可能である。

(5)その他

最後に、特許出願について報告する。本光

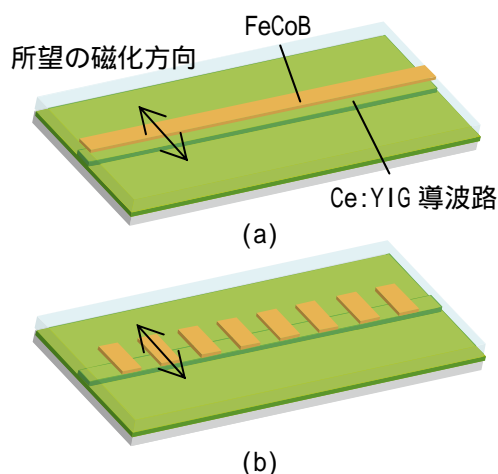


図6：磁気記録材料のパターン、(a)初期の検討形状、(b)新たに考案する形状

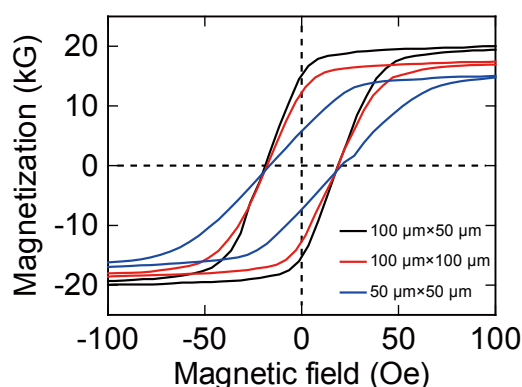


図7：長方形パターン化したFeCoBの磁気ヒステリシス特性

スイッチはTMモード(縦偏波)の入力光のみで動作をするが、TEモード(横偏波)のどちらでも動作する偏波無依存動作が可能な新規な導波路構成について特許出願を行った。

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4件)

Yuya Shoji, Tetsuya Mizumoto, "Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics", Science and Technology of Advanced Materials, 査読有, vol.15, 2014, p.014602

DOI: 10.1088/1468-6996/15/1/014602

Yuya Shoji, Yuya Shirato, Tetsuya Mizumoto, "Silicon Mach-Zehnder interferometer optical isolator having 8 nm bandwidth for over 20 dB isolation", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol.53, 2014, p.022202

DOI: 10.7567/JJAP.53.022202

Kota Mitsuya, Yuya Shoji, Tetsuya Mizumoto, "Demonstration of a silicon

waveguide optical circulator”, IEEE Photonics Technology Letters, 査読有, vol.25, 2013, pp.721-723
DOI: 10.1109/LPT.2013.2247995
Yuya Shoji, Masatoshi Ito, Yuya Shirato, “MZI optical isolator with Si-wire waveguides by surface-activated direct bonding”, Optics Express, 査読有, vol.20, 2012, pp.18440-18448

〔学会発表〕(計 6 件)

庄司雄哉, “帯域 8nm でアイソレーション 20dB 以上を有するシリコン導波路型光アイソレータ”, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日~20日, 同志社大学(京都府)

Yuya Shoji, “Over 20-dB isolation with 8-nm bandwidth in silicon MZI optical isolator”, 10th IEEE International Conference on Group IV Photonics (GFP), 2013年8月28日~30日, Grand Hilton Seoul (韓国)

Yuya Shoji, “(招待講演)Silicon-based magneto-optical isolator and circulator fabricated by direct bonding” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2013年8月12日~15日, Scandic Victoria Tower Stockholm (Sweden)

Yuya Shoji, “(招待講演)Optical nonreciprocal devices on silicon waveguide platforms”, The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communication Conference / Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), 2013年6月30日~7月4日, 国立京都国際会館(京都府)

岸雄佑, “自己保持型光スイッチに向けた MZI 型磁気光学スイッチの動作検証”, 2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012年9月11日~14日, 富山大学(富山県)

Yuya Shoji, “Si-wire MZI optical isolator fabricated by direct bonding”, The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP), 2012年8月29日~31日, San Diego (USA)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 導波路型磁気光学デバイス及びその製造方法
発明者: 庄司雄哉, 水本哲弥

権利者: 東京工業大学
種類: 特許
番号: 特願 2014-045544
出願年月日: 2014年3月7日
国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄司 雄哉 (SHOJI, Yuya)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 00447541

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: