

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26706009

研究課題名(和文) ナノ光マグノニック結晶の形成と光出力型スピン波論理演算素子への応用

研究課題名(英文) Formation of nano-optical magnonic crystals and its application to spin wave logic elements modulating light

研究代表者

後藤 太一 (Goto, Taichi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00721507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ナノスケールの人為的構造を導入した、光の制御が可能なスピン周期構造を提案・形成し、電荷を動かさないスピン波演算素子の実現を目的としたものである。スピン波を使った演算部、磁気情報から光情報に変換する変換器部、及び、スピン波が伝わる磁性膜の形成を並行して行った。演算器部は、当初予定していた以上の複雑構造のスピン波位相干渉素子を形成し、位相情報としてスピン波の演算結果を出力することに成功した。変換器部は、光に対する磁化状態の感度を、光キャビティを用いることで増大し、磁化の状態で、光パルスを制御できた。薄膜スピン波媒体を形成し、スピン波デバイスの小型化が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Magnonic crystals controlling optical waves were proposed in this study. Development of these crystals are divided into three parts. (1) Logic gates using spin waves based on interference phenomena were developed. Two kinds of interferometers were formed using spin wave absorbing techniques. These interferometer showed a high robustness of the spin wave devices. (2) Magnetic films were inserted into the optical cavity to enhance a sensitivity of optical responses to a change of magnetization states. A Q-factor of the optical cavity was quickly modulated, showing two clear separated optical states. This system can transduce the magnetic information to optical one. (3) Nanometer-scale spin-wave media were formed. An interference of spin waves using these thin films were demonstrated successfully.

研究分野：磁気工学

キーワード：ナノ光マグノニック結晶 ガーネット 位相干渉 ロジック回路 スピントロニクス スピンデバイス
磁気 スピン波

1. 研究開始当初の背景

高集積化により、半導体デバイスは発熱の課題に直面し、他の原理に基づくデバイスの開発が求められている。本研究では、スピノ波によって、演算を行い、光でチップ間の配線を行うデバイスを提案した。スピノ波は、伝搬中の発熱が極めて小さいと考えられている。さらに、電磁波とは異なり、スピノ波の媒体厚さを調整することによって、極めて短い波長のスピノ波を作り出すことが出来るため、位相干渉を利用したデバイスを、光を含む電磁波利用型のデバイスに比べて、小型化できることが期待されている。一方で、光波は、損失が小さく遠方まで位相ズレなく伝搬できることから、チップ間伝送に適する。そのため、スピノ波で高集積回路を形成し、これを、磁気情報と光の変換器を介して、光で伝え、演算から輸送まで、電荷が動かないいわゆる電荷費輸送情報処理システムが発想できる。

しかし、研究開始時点において、スピノ波伝搬媒体として最有力である、スピノ波の伝搬損失が小さくて有名な磁性ガーネットを用いた、スピノ波の演算器、磁気・光変換器は、報告例が少なかった。さらに、スピノ波の中でもチップ化に最適なモードである前進体積スピノ波を用いた実現例は無かった。これは、磁性ガーネット中を伝搬する前進体積スピノ波は、端部等での反射が大きく不要なスピノ波が乱立することが原因であった。さらに、膜厚の薄いスピノ波伝播媒体は、形成が難しく、極めて高価である場合が多く、入手困難であるといった課題があった。

2. 研究の目的

以上のような課題を解決し、スピノ波の伝搬損失の小さな磁性ガーネット用いて演算素子を形成し、理論的に予想されているスピノ波の位相干渉ロジック素子を実現することを目的とした。また、薄膜のスピノ波伝播媒体を形成し、スピノ波デバイスの小型化が可能であることを実証することを目的とした。これらと並行し、磁気情報を効率的に光情報に変換可能な素子として、光キャビティを利用して、媒体の磁化状態が変化すると光パルスが出力される光変換器を形成、原理実証を目指した。

3. 研究の方法

スピノ波の演算部、スピノ波伝播媒体、および、磁気と光の情報変換器の形成に開発部を分離し、並行して研究を進めた。

スピノ波演算部、および、変換部は、厚膜のスピノ波媒体を使い原理実証、および各実験のノウハウ集積を優先して、実験を先行した。これらと並行して、ナノメートル厚のスピノ波媒体の形成を行った。

4. 研究成果

(1) 演算部

スピノ波演算素子として、二入力一出力の位相干渉素子を形成した(図1)。スピノ波の位相情報が、スピノ波の強度情報として次段に出力する素子である。

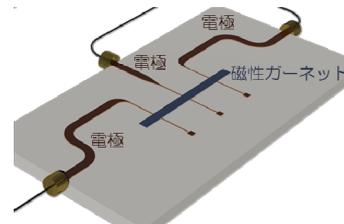


図1 形成した二入力一出力スピノ波位相干渉デバイスの模式図

位相干渉の結果、出力したスピノ波の強度は外部の磁場変化の影響を受ける。これは、外部の温度変化の影響とも読み替えることができる。今回の研究で、前進体積スピノ波を用いるとこれら外乱の影響が極めて大きいことが分かり、スピノ波媒体の端部に金属(今回は金を使用)を用いることで、これを十分抑制できることが分かった。この結果、前進体積スピノ波を用いて、外部磁場が30 Oe程度変わっても、動作に支障が無いことを示した。本成果は、学術論文 [Scientific Reports, 6, 30268 (2016)] 等で報告した。

本素子で得られた知見を発展させ、三入力一出力の四端子素子(図2)を形成した。

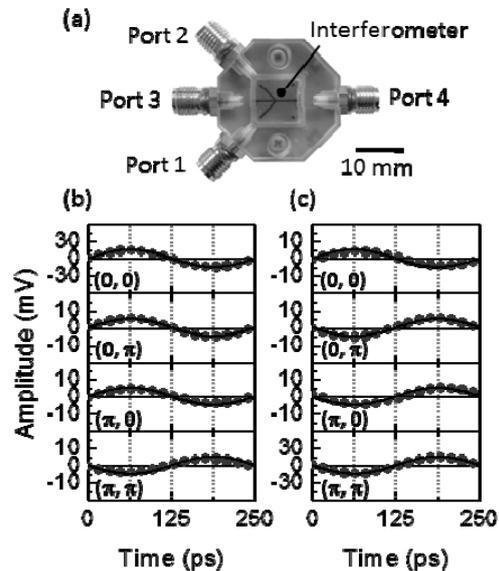


図2 四端子のスピノ波演算素子 (a) 形成した素子の上面写真、(b) OR動作時の出力、(c) AND動作時の出力

端部には、上述のデバイスと同様に、金属膜によるスピノ波吸収層を形成し、安定した位相干渉状態を作り出した。端子数が増えたことにより、これまで、スピノ波の強度による出力だったものが、スピノ波の位相情報による演算となり、多段化に対応したデバイスとなった。図2 (b) (c)は、Port3の位相状態が π 異なるときの特性であり、ロジックとして

の機能を、AND と OR の間で、位相を使って切り換えられることを表している。NOT 回路は、電極位置を変更することで、簡単に実現可能であることから、当該四端子スピン波素子によって、NAND、NOR が実現できたといえる。

(2) 変換部

これらスピン波で演算した磁気の情報、光波に変える変換器の開発も行った。磁気媒体の光変調の大きさは、材料固有の値としては小さいが、これを、光キャビティ中に挿入し、光がキャビティ中に挿入することが、増大可能であると考えた。今回は、磁気ドメインを発現する膜を用いた。光キャビティ中に置き、図3に示すように、磁気状態を変調すると、光パルスの大きさが、1万倍以上変化することを示した。

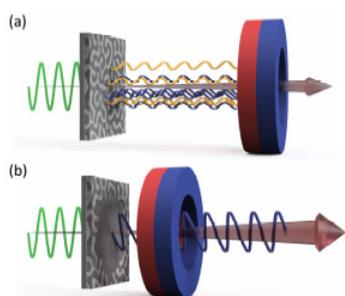


図3 磁気・光変換器のイメージ図 (a) 磁場が磁性膜に印加されていない状態 (b) 磁場が磁性膜に印加されている状態

外部磁場によって、磁気ドメインが消失し、これにより、透過する光の偏光状態が変化することで、光キャビティ内のQ値が変調され、外部に取り出されるパルス強度が大きく変わった。本成果は、論文[Optics Express **24**, 17635-17643 (2016)]で詳細に報告した。

さらに、当該光キャビティの長さを短くすることで、光パルスのオン状態とオフ状態の差をより大きくし、検出しやすくした。本件は、出力の向上した結果をまとめ、論文[Scientific Reports **6**, 38679 (2016)]等で、詳細に報告した。

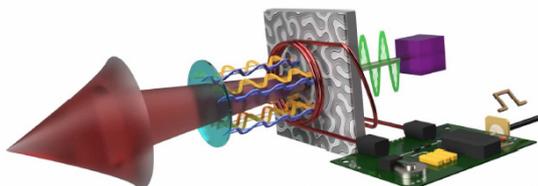


図4 光キャビティ中に挿入された磁気光学膜とシステム全体の模式図

(3) 媒体形成

スピン波伝播媒体をパルスレーザーデポジション法および高周波マグネトロンスパッタ法を用いて形成した。形成した膜を、線状に加工し、厚膜のスピン波媒体で実証したような位相干渉をデモンストレーションし

た。結果的に、厚膜とほとんど同じアイソレーション値を示し、性能を保ったまま、デバイスサイズを小型化することに成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計30件)

- ① T. Goto, M. C. Onbasli, D. H. Kim, V. Singh, M. Inoue, L. C. Kimerling, and C. A. Ross, "A nonreciprocal racetrack resonator based on vacuum-annealed magneto-optical cerium-substituted yttrium iron garnet," *Optics Express* **22**, 19047-19054 (2014)、査読有、DOI: 10.1364/OE.22.019047
- ② X. Y. Sun, Q. Du, T. Goto, M. C. Onbasli, D. H. Kim, N. M. Aimon, J. Hu, and C. A. Ross, "Single-step deposition of cerium-substituted yttrium iron garnet for monolithic on-chip optical isolation," *ACS Photonics* **2**, 856-863 (2015)、査読有、DOI: 10.1021/acsphotonics.5b00026
- ③ N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, and M. Inoue, "Demonstration of a robust magnonic spin wave interferometer," *Scientific Reports*, **6**, 30268 (2016)、査読有、DOI: 10.1038/srep30268
- ④ T. Goto, R. Morimoto, J. W. Pritchard, M. Mina, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, T. Taira, and M. Inoue, "Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micromagnetic domains," *Optics Express* **24**, 17635-17643 (2016)、査読有、DOI: 10.1364/OE.24.017635
- ⑤ R. Morimoto, T. Goto, J. Pritchard, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Magnetic domains driving a Q-switched laser," *Scientific Reports* **6**, 38679 (2016)、査読有、DOI: 10.1038/srep38679
- ⑥ T. Goto, D. H. Kim, X. Sun, M. C. Onbasli, J. M. Florez, S. P. Ong, P. Vargas, K. Ackland, P. Stamenov, N. M. Aimon, M. Inoue, H. L. Tuller, G. F. Dionne, J. M. D. Coey, and C. A. Ross, "Magnetism and Faraday rotation in oxygen-deficient polycrystalline and single-crystal iron-substituted strontium titanate," *Physical Review Applied*, **7**, 024006 (2017)、査読有、DOI:

[学会発表] (計 150 件)

- ① T. Goto, R. Morimoto, J. W. Pritchard, T. Yoshimoto, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Development of magneto-optical Q-switched laser using magnetic garnet" 【招待講演】、Asia Pacific Laser Symposium (APLS)、Seogwipo KAL Hotel、Jeju、Korea、2016 年 5 月 11 日.
- ② T. Goto, R. Morimoto, J. W. Pritchard, T. Yoshimoto, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Magneto-optical Q-switching with magnetic garnet film" 【招待講演】、Optics & Photonics International Congress-Laser Ignition Conference (OPIC-LIC)、パシフィコ横浜、横浜、2016 年 5 月 20 日.
- ③ T. Goto, N. Kanazawa, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, and M. Inoue, "Spin wave interference using forward volume mode in yttrium iron garnet" 【招待講演】、The Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism" (EASTMAG)、Siberian Federal University、Krasnoyarsk、Russia、2016 年 8 月 16 日.
- ④ T. Goto, M. C. Onbasli, X. Y. Sun, D. H. Kim, V. Singh, M. Inoue, L. C. Kimerling, and C. A. Ross, "Preparation of Ce:YIG thin films on Si and application to integrated optical isolator on Si substrate" 【招待講演】、International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)、つくば国際会議場、つくば、2016 年 9 月 29 日.
- ⑤ T. Goto, R. Morimoto, J. Pritchard, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Development of thin Q-switched laser driven by magnetic domains"、【招待講演】、応用物理学会秋季講演会、パシフィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 15 日.
- ⑥ N. Kanazawa, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, C. A. Ross, A. B. Granovsky, K. Sekiguchi, H. Uchida, and M. Inoue, "Spin wave majority function by Y-shaped interferometer composed of yttrium iron garnet"、【招待講演】、応用物理学会秋季講演会、パシフィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 15 日.

[産業財産権]

○出願状況 (計 6 件)

名称: Q スイッチ固体レーザー装置
発明者: 後藤太一、井上光輝、高木宏幸、平等拓範
権利者: 豊橋技術科学大学、分子科学研究所
種類: 特許
番号: 特願 2015-207278
出願年月日: 2015 年 10 月 21 日
国内外の別: 国内

名称: スピン波位相変調装置
発明者: 井上光輝、後藤太一、岡嶋伸吾、樋口之雄、長谷川隆
権利者: 豊橋技術科学大学、村田製作所
種類: 特許
番号: 特願 2016-169364
出願年月日: 2016 年 8 月 31 日
国内外の別: 国内

[その他]

- Taichi Goto Web Page
<http://taichigoto.booy.jp/wordpress/>
- 後藤太一 教員紹介ページ
<http://www.tut.ac.jp/university/faculty/ee/740.html>
- スピン・エレクトロニクス グループ ホームページ
<http://www.spin.ee.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤太一 (Goto, Taichi)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00721507