

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20535

研究課題名（和文）非線形位相シフトを用いたアクティブ位相制御スピン波ロジック演算素子

研究課題名（英文）Active phase-control spin wave logic computation elements with nonlinear phase shift

研究代表者

井上 光輝（Inoue, Mitsuteru）

東北大学・電気通信研究所・客員教授

研究者番号：90159997

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：単結晶イットリウム鉄ガーネット（YIG）膜を用いて、スピン波の非線形位相シフトを活用した、複数のスピン波ロジック演算を実現する方法を実験及び計算によって検証した。非線形位相シフトによりスピン波の位相干渉をアクティブに制御することで、AND、OR、EXORなどの基本的なロジック演算が可能であることを示した。また、スピン波の位相干渉を利用し、スピン波の伝搬方向を自在に制御できる二次元マグノンニック結晶も作製した。これらの成果により、集積スピン波回路の実現に有用な具体的な素子およびその原理を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子回路の集積度が限界に近づきつつあることを背景に、スピン波を使った集積回路に期待が集まっている。一方で、電子回路を完全に代替できるような機能は実現されていない現状にある。本研究は、このような状況を打開するべく、これまであまり使用されてこなかった非線形応答をスピン波ロジック回路の素子に適用した場合の検討を実験と計算の両面から進めたものである。本研究によって、非線形位相シフトの位相干渉ロジック素子への適用例が示され、さらに、スピン波位相干渉を利用した二次元マグノンニック結晶も実証されたことから、今後、この知見を利用したデバイス開発が進捗すると期待される。

研究成果の概要（英文）：We utilized single-crystalline yttrium iron garnet (YIG) films to experimentally and computationally validate a method for realizing multiple spin wave logic operations using nonlinear phase shifts of spin waves. We demonstrated that basic logic operations such as AND, OR, and EXOR can be performed by actively controlling the phase interference of spin waves through nonlinear phase shifts. Furthermore, by utilizing the phase interference of spin waves, we also fabricated a two-dimensional magnonic crystal that allows for the flexible control of spin wave propagation directions. These results illustrate practical devices and principles useful for the realization of integrated spin wave circuits.

研究分野：磁気工学

キーワード：スピン波 非線形 マグノンクス マグノンニック結晶 二次元マグノンニック結晶 ロジック 人工磁気格子

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

我々は、ナノスケールの人為的構造を導入した磁性ガーネット薄膜で巨大な磁気光学効果が発現することを見出し、スピんでフォトンの流れを制御する磁性フォトニック結晶 (magnetophotonic crystal, MPC) を、を世界で初めて示した。その後、JSPS 基盤研究 (S) などを受け、図 1 に示す一次元から三次元人工構造を有する MPC 形成と、線形・非線形光機能の解明を行ってきた。これら成果は、JST CREST 事業や MEXT 委託事業などで、磁気光学空間光変調器など世界的に見ても例のない新規のデバイス開発につながっている。MPC の機能は光位相干渉に起因するので、磁気を伴う波動であれば同様の機能が発現する。この観点から、基盤研究 (A) で、フォトンの流れをスピンの流れ (スピン波) に替え、磁性ガーネット上に Cu ストライプの周期構造を形成したスピン波のバンドギャップ材料 (マグノニック結晶: magnonic crystal, MC) の性質を調べた。その結果、数 GHz の表面スピン波でシャープなバンドギャップが得られ、マグノニック結晶を用いた高感度磁界センサの可能性を示した。これらの成果を踏まえ、JSPS 基盤研究 (S) で、MPC や MC などの既存材料に人為的磁気周期構造を導入してフォトンやスピンの流れを制御する媒体を人工磁気格子 (artificial magnetic lattice: AML) としてまとめると共に、AML をスピン波媒体として、Beyond CMOS を指向した集積スピン波素子の実現を目指している。

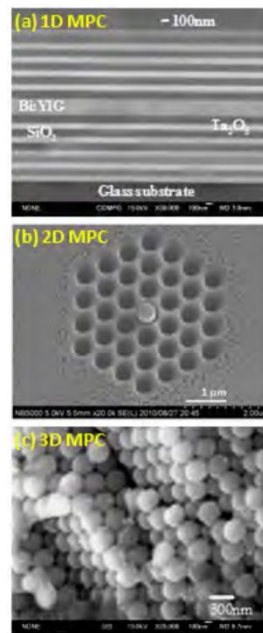


図 1 一次元から三次元構造の MPC

2. 研究の目的

我々は 10 μm 厚の単結晶イットリウム鉄ガーネット (yttrium iron garnet, YIG) 薄膜を用い、線形スピン波ロジック素子で、スピン波の位相干渉による AND、OR、EXOR の基本演算を実証した[1, 2]。しかしこの素子では、(1) 入力スピン波 (Port 1, 2, 3) の位相を外部機器で制御する必要があること、(2) 出力スピン波 (Port 4) の位相情報 (演算結果) 保存のためにスピン波伝搬長の精密制御が不可欠などの難点があり、これらを克服して集積スピン波回路を実現するには革新的な手法導入が必須であった。これに対し、海外のグループでは、スピン波の分散曲線がスピン波電力に依存してシフトし、結果としてスピン波の位相が連続的に大きく変化する (非線形位相シフト) ことを実験的に示していた[3]。このことは、スピン波の振幅制御でアクティブな位相制御が行えることを意味しており、これを用いて電子的な位相制御機能を具備するスピン波ロジック素子が得られることを示唆していた。この着想に基づき、本研究は以下の研究計画で非線形位相シフトを用いた集積スピン波回路の実現に挑戦した。さらに、上記を踏まえ、単結晶 YIG 膜に二次元の人工磁気格子を導入することで、スピン波の位相シフトを利用したマグノニックバンド構造の作製を試みた。

3 非線形位相シフト

単結晶 YIG をスピン波導波路に使用して、スピン波に対して誘導される非線形位相シフトを実験で調べた。この実験では、異なる周波数で共伝搬する 2 つのスピン波を使用した。2 つはそれぞれ、信号波とパルス波で、パルス波は、非線形効果が生じるほど大きな強度とすると、図 2 に示すように、信号波の位相シフト量が、ポンプ波のパワー P_2 の大きさによって変化することを示した。つまり、2 つのスピン波が僅かに位相干渉しない状態をつくっておき、これの片一方のスピン波が非線形効果によって周波数シフトが起こり、2 つのスピン波の周波数が合致したことで、位相干渉が強くなり、このような結果が得られた。これは、非線形シフトによってロジック動作が作り出せることを示している。本結果は、論文等で発表した[4]。

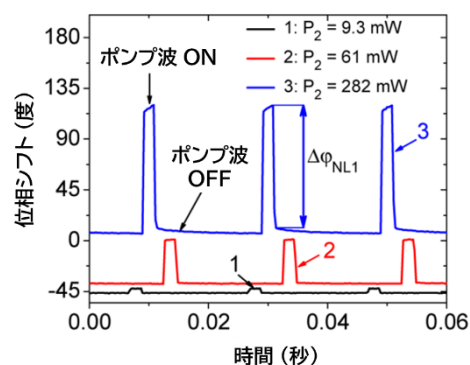


図 2 パルス化したスピン波の非線形位相シフト動作。

4. 二次元人工磁気格子

スピン波損失にあたるダンピング定数が小さな単結晶 YIG 膜を作製した。膜厚は約 10 μm とした。この上に、直径 1 mm 以下の小さな銅製ディスクを周期的に配置した (図 3)。これは、他事業と共担し配備したレーザー描画装置を用いた。これにより、スピン波の波長が周期的に変調され、二次元マグノニック結晶が作製できた。今回の研究では、銅のディスクを六角形に配置することで、スピン波を効果的に反射できることを見出した。このマグノニック結晶によって生

じるスピン波が反射する周波数帯をマグノニック・バンドギャップと呼び、これの、入射スピン波に対する角度依存性を評価した(図4)。入射角度が10度から30度の範囲でマグノニック・バンドギャップが発生する周波数がほとんど変わらないことを明らかにした。この結果は、作製した二次元マグノニック結晶を活用すれば、スピン波の伝搬方向を自在に制御できることを示唆している。これまでに、二次元マグノニック結晶のスピン波入射角度に対する変化を実験的に確認した例はなく、論文等で報告し、一定の注目を集めた[5]。

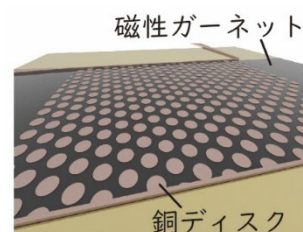


図3 二次元マグノニック結晶の概略図

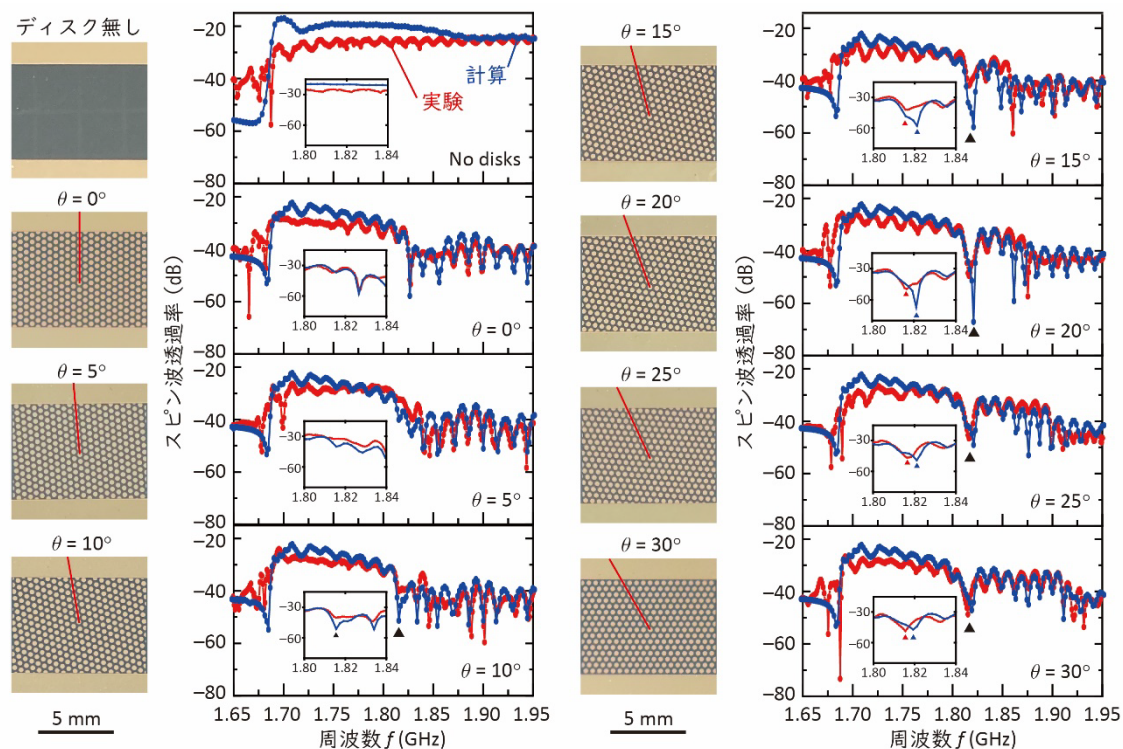


図4 作製した二次元マグノニック結晶の上面写真と、その時のスピン波透過率スペクトル。二次元マグノニック結晶を5度ずつ回転しても、▲で示したスピン波のマグノニック・バンドギャップの周波数がほとんど変化していないことが分かる。つまり、角度依存性が少なく、スピン波の伝搬方向制御に使える可能性を示している。

5. まとめ

スピン波の強度変化によって、スピン波の非線形位相シフトを生じさせ、これと位相干渉を組み合わせることで、位相干渉ロジック回路動作を実現した。さらに、スピン波の自由な操作を目的に、二次元マグノニック結晶を実現した。これらの成果の詳細は、論文等で報告を行った。

<引用文献>

1. T. Goto, T. Yoshimoto, B. Iwamoto, K. Shimada, C. A. Ross, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "Three port logic gate using forward volume spin wave interference in a thin yttrium iron garnet film," *Sci. Rep.* **9**, 16472 (2019).
2. N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "The role of Snell's law for a magnonic majority gate," *Sci. Rep.* **7**, 7898 (2017).
3. A. B. Ustinov, and B. A. Kalinikos, "A microwave nonlinear phase shifter," *Appl. Phys. Lett.* **93**, 102504 (2008).
4. A. B. Ustinov, N. A. Kuznetsov, R. V. Haponchyk, E. Lähderanta, T. Goto, and M. Inoue, "Induced nonlinear phase shift of spin waves for magnonic logic circuits," *Appl. Phys. Lett.* **119**, 192405 (2021).
5. K. Mori, T. Koguchi, T. Watanabe, Y. Yoshihara, H. Miyashita, D. Grundler, M. Inoue, K. Ishiyama, and T. Goto, "Orientation-dependent two-dimensional magnonic crystal modes in an ultralow-damping ferrimagnetic waveguide containing repositioned hexagonal lattices of Cu disks," *Phys. Rev. Applied* **21**, 014061 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 後藤太一、井上光輝	4. 巻 17
2. 論文標題 500THz帯域における磁気光学	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 まぐね	6. 最初と最後の頁 109-114
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 Goto Taichi、Inoue Mitsuteru	4. 巻 141
2. 論文標題 Development of One-dimensional Magnonic Crystal using Forward Volume Spin Wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 327 ~ 332
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejfms.141.327	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 Ustinov Alexey B.、Kuznetsov Nikolai A.、Haponchyk Roman V.、Lahderanta Erkki、Goto Taichi、 Inoue Mitsuteru	4. 巻 119
2. 論文標題 Induced nonlinear phase shift of spin waves for magnonic logic circuits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192405 ~ 192405
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0074824	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 該当する
1. 著者名 Mori Kanta、Goto Taichi、Watanabe Toshiaki、Koguchi Takumi、Nakamura Yuichi、Lim Pang Boey、 Ustinov Alexey B.、Inoue Mitsuteru	4. 巻 55
2. 論文標題 Broadband excitation of spin wave using microstrip line antennas for integrated magnonic devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ac3f10	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 該当する

1. 著者名 Mori Kanta, Koguchi Takumi, Watanabe Toshiaki, Yoshihara Yuki, Miyashita Hibiki, Grundler Dirk, Inoue Mitsuteru, Ishiyama Kazushi, Goto Taichi	4. 巻 21
2. 論文標題 Orientation-dependent two-dimensional magnonic crystal modes in an ultralow-damping ferrimagnetic waveguide containing repositioned hexagonal lattices of Cu disks	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.21.014061	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 該当する

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Kanta Mori, Toshiaki Watanabe, Takumi Koguchi, Yuichi Nakamura, Pang Boey Lim, Kazushi Ishiyama, Mitsuteru Inoue and Taichi Goto
2. 発表標題 Broadband excitation of spin wave using microstrip line antennas for integrated magnonic devices
3. 学会等名 Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) Technical Meeting on Magnetics
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichi Goto
2. 発表標題 Development of spin-wave control device using composite structure of non-magnetic metal and magnetic insulator
3. 学会等名 Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) Annual Conference of Fundamentals and Materials Society (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichi Goto, Takumi Koguchi, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama and Pang Boey Lim
2. 発表標題 Magnetic domains of iron garnet film calculated by micromagnetic simulation
3. 学会等名 Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanta Mori, Toshiaki Watanabe, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama and Taichi Goto
2. 発表標題 Fabrication of two-dimensional magnonic crystals using yttrium iron garnets and non-magnetic metals
3. 学会等名 Spinics Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Koguchi, Pang Boey Lim, Kazushi Ishiyama, Mitsuteru Inoue and Taichi Goto
2. 発表標題 Calculation of magnetic domains of magnetic garnets using micromagnetic simulation
3. 学会等名 Spinics Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Yoshihara, Pang Boey Lim, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama and Taichi Goto
2. 発表標題 Optical and Magneto-optical Effects of Epitaxially Grown Ce:YIG/YAG
3. 学会等名 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Koguchi, Kanta Mori, Pang Boey Lim, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama and Taichi Goto
2. 発表標題 Propagation properties of spin wave in non-magnetic metal-covered YIG waveguide
3. 学会等名 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichi Goto
2. 発表標題 Development of spin-wave logic gate and spin-controlled laser using magnetic garnet
3. 学会等名 Japan Society of Applied Physics (JSAP) Spring Conference (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanta Mori, Takumi Koguchi, Toshiaki Watanabe, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama and Taichi Goto
2. 発表標題 Design of two-dimensional magnonic crystals using yttrium iron garnets and non-magnetic metals
3. 学会等名 Japan Society of Applied Physics (JSAP) Spring Conference
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taichi Goto, Ken Aoki, Hibiki Miyashita, Yuki Yoshihara, Takumi Koguchi, Pang Boey Lim, Mani Mina, and Mitsuteru Inoue
2. 発表標題 Spin controlled laser using magnetic garnet film
3. 学会等名 International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Koguchi, Tadashi Ataka, Pang Boey Lim, Mitsuteru Inoue, and Taichi Goto
2. 発表標題 Simulation of magnetic domain for spin wave logic device
3. 学会等名 International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanta Mori, Taichi Goto, Toshiaki Watanabe, Pang Boey Lim, and Mitsuteru Inoue
2. 発表標題 Broad excitation band of spin wave using microstrip line for magnonic device
3. 学会等名 International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Alexey B. Ustinov, Boris A. Kalinikos, Taichi Goto, and Mitsuteru Inoue
2. 発表標題 Nonlinear spin-wave logic gates based on magnetic films
3. 学会等名 Trends in MAGnetism (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Korekawa, Yuichi Nakamura, Mitsuteru Inoue, Pang Boey Lim, Hironaga Uchida, and Taichi Goto
2. 発表標題 Effect of iron site substitution on the magnetic and optical properties of Bi-substituted garnets for magnetic hologram memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kanta Mori, Taichi Goto, Toshiaki Watanabe, Takumi Koguchi, Yuichi Nakamura, Pang Boey Lim, Alexey B. Ustinov, and Mitsuteru Inoue
2. 発表標題 Broadband excitation of spin wave using microstrip line antennas for integrated magnonic devices
3. 学会等名 Japan Society of Applied Physics (JSAP) Spring Conference
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kanta Mori, Takumi Koguchi, Toshiaki Watanabe, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama, and Taichi Goto
2. 発表標題 Design of two-dimensional magnonic crystals using yttrium iron garnets and non-magnetic metals
3. 学会等名 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Magnetics Conference (Intermag) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanta Mori, Takumi Koguchi, Toshiaki Watanabe, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama, and Taichi Goto
2. 発表標題 Fabrication of two-dimensional magnonic crystal using yttrium iron garnets and non-magnetic metals
3. 学会等名 International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takumi Koguchi, Yuki Yoshihara, Pang Boey Lim, Mitsuteru Inoue, Kazushi Ishiyama, and Taichi Goto
2. 発表標題 Micromagnetic simulation of sub-micron scaled magnetic domains in magnetic garnet films
3. 学会等名 International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本事業期間中に研究分担者は移籍・昇進しており、本事業の若手研究者育成への貢献が認められる。

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
研究 分 担 者	後藤 太一 (Goto Taichi) (00721507)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	

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		
ロシア連邦	サンクトペテルブルグ電気技術 大学		