

研究報告書

「極薄磁性酸化物中におけるスピン波位相干渉を用いた多入出力演算素子の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015 年 10 月～2019 年 3 月

研究者: 後藤 太一

1. 研究のねらい

近年爆発的に成長する情報化社会は、より低消費電力、より高速、より小型な電子デバイスを要求しているが、これまでの半導体集積回路の微細化や高集積化による高性能化（デナードのスケールリング則とムーアの法則）だけでは、これらの要求に対応しきれない現状にある。これは、電子を移動することによって得られる「電流」を使う電子デバイスの宿命であり、そもそも電子を移動しないで動作するデバイスが実現できれば、大きな技術革新が期待できる。そこで、本研究では、電子を移動せずとも、電子中の自由度の一つであるスピンの位相を情報キャリアとして伝えるデバイスを作製することで、この現状の打開策を示すことを目指した。

特に、極薄の磁性酸化物（絶縁体）中を伝搬するスピン波（あるいは、スピン波スピン流）は、波長が原理上ナノメートルオーダーにまで短縮可能である。これは光の波長よりも短く、電子のド・ブロイ波長よりも長い絶妙な大きさである。そのため、電子回路形成の基盤技術をそのまま用いて、光回路のように波の性質を利用した、これまでのデザインルールに縛られないデバイスが実現可能と考えた。また、絶縁体中を伝搬する情報であるため、電子を移動せずとも、情報を伝えられる。そのため、極めて低い消費電力であり、発熱の少ない高集積度のデバイスが開発できると期待できる。本研究では、これら利点を、多入出力スピン波位相干渉素子を形成することで実証し、スピン波回路の礎を築くことをねらった。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、極薄の磁性酸化物材料を伝搬するスピン波の位相干渉現象を使った新しい論理演算素子のデモンストレーションを目指し、実際に、素材・デバイス・システムの探査・動作実証・新規発想を行った。

本研究の「素材」を担ったのは、「極薄の磁性酸化物材料の形成技術の確立」である。スピン波の低散逸材料として広く知られているイットリウム鉄ガーネット（YIG）膜を、素子として使える面積で均一な単結晶として形成技術を確認し、デバイス開発に十分な数量を形成した。YIG は、スピン波の伝搬距離が長い材料であるため、世界的に重宝されているが、日本国内で単結晶ライクの性能が担保された YIG 薄膜を形成する研究者は、研究開始当初いなかった。これは基盤技術であり、これを確立することで、デバイスおよびシステムへの展開が可能になった。

そして、本研究の「デバイス」を担ったのは、YIG 膜を使ったロジック素子の形成である。想定される実デバイスと同じサイズの三次元モデルに、有限体積法を適用することで、スピン波の伝搬状態や、スピン波位相干渉の状態などを、静的な磁気特性と動的な磁気特性を結びつけて計算できる手法を確認し、デバイスのデザインツールとして、使える方法を確認した。このデ

ザインに基づき、極薄の YIG 膜を使って位相干渉素子の作製・動作実証を行った。その結果、NAND、NOR、XNOR ゲート機能を、YIG 膜を世界にさががけて実証することに成功した。

最後に、本研究の「システム」として、スピン波回路を使ったより複雑な回路「全加算器」のデザインを発想した。領域会議等のさががけ研究者内の交流会で、他レイヤーの研究者に興味を共有し、異なる研究分野の知見を本研究テーマに集約することで、本システムに結びついた。本発想には、さががけ研究期間の NanoTech2018 展示会と JST フェアでの試作デバイスの展示や、Science For Society (SciFoS) 活動、共同フーズビリティスタディ (FS) の活動の成果の一部であるとも考えている。

これらを総合的に、ときに並行して、遂行し、当初掲げた目的の多入力スピン波位相干渉素子を形成・動作実証した。さらに、当初掲げた目標以上の成果となる、スピン波回路を使った全加算器や、新しい導波路構造を発想し、次の研究段階につながるスピン波回路の礎を築いた。

(2) 詳細

研究テーマ A 「三端子厚膜スピン波位相干渉器の実証」

最初に、厚さが $10\mu\text{m}$ ほどの、いわゆる厚膜のスピン波媒体を使って、スピン波の位相干渉デバイスのコンセプトの一部を実証した。図 1 に、形成した三端子厚膜スピン波位相干渉器を示す。イットリウム鉄ガーネット (Yttrium iron garnet, YIG) を三本の電極上に装荷することで、スピン波を励起・検出をした。両側の入力①と②からスピン波を流し、中央で、位相干渉することで、XNOR のロジック動作を確認した。ここで、利用したスピン波は、後々複雑化することを想定し、前進体積スピン波と呼ばれる、面内のあらゆる方向に伝播可能なスピン波を使用した。しかし、このスピン波は、面内の等方性がよいがために、ノイズが大きいという難点があり、ほとんど使われていなかった。そこで、私は、図2のように、YIG の両端に金薄膜を成膜することで、効率よくスピン波の反射を抑制することができ、その結果、ノイズを劇的に抑えることに成功した。これは、位相干渉をしたときに、特に強く現れる。図3に示すのは、金薄膜が YIG の両端にあるときとないときの、位相干渉結果である。金薄膜がスピン波のノイズを抑制しており、その結果、安定した位相干渉を起こし、ON 状態と OFF 状態を、明確に分離することに成功しているのが分かる。

このように、スピン波回路に必須となる前進体積スピン波を使うための、ノイズの抑制方法を確立した上で、XNOR 動作を確認した。

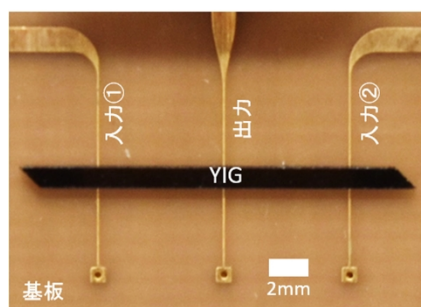


図1 作製した三端子厚膜スピン波位相干渉器の写真

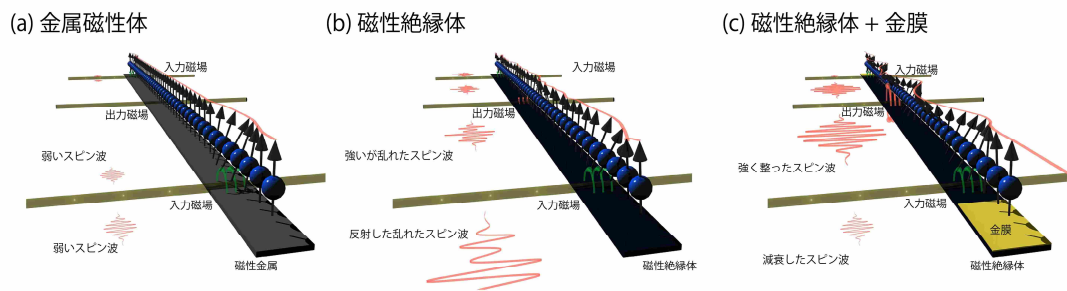


図2 媒体の違いが及ぼすスピン波への影響。磁性金属(a)の中を伝わるスピン波は、エネルギー損失が大きく伝わるスピン波が弱くなってしまふ。エネルギー損失の少ない磁性絶縁体を用いた場合であっても、金膜のない(b)では磁性絶縁体の端の部分で反射するため余分な波ができてしまい、重ねあわせが乱れてしまふ。一方金膜をつけた(c)では端の部分での反射が抑えられて波の重ね合わせが乱されない。

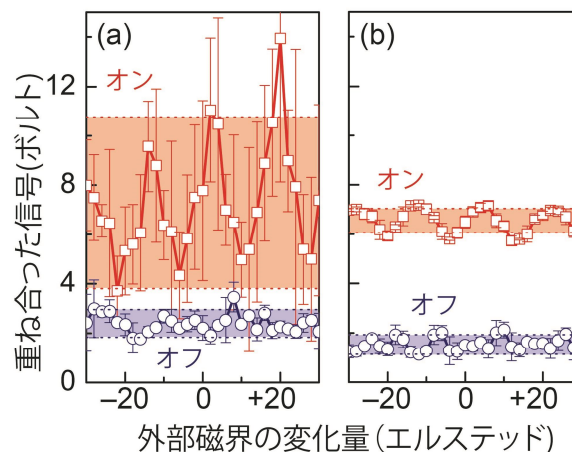


図3 図2で手前の入力信号と奥の入力信号を重ね合わせてその中心での磁場の強度を電気信号に変えて測定した結果。金膜を用いていない場合(a)と金膜を用いた場合(b)でのオン状態(重ねあわせで強めあう状態)とオフ状態(重ねあわせで弱めあう状態)の強度の違い。金膜を用いていない場合は反射などで起こる余分な波のために重ねあわせが乱され、オン状態とオフ状態が重なってしまうところもあり、論理演算素子として機能できない。一方金膜を用いた(b)の場合は余分な波を除去しているため重ねあわせがきれいに起こってオン状態とオフ状態を完全に区別することができる。

研究テーマB「四端子厚膜スピン波 AND と OR の実証」

それまで、基本的な位相干渉実験に留まっていた上記を発展させ、実際のコンピューターの構成単位の一つである演算素子を電子回路と同じように実現することを行った。本研究では、YIG 厚膜をフォークの形(Ψ型)に加工し、すべての演算パターンを1つの素子の組み合わせで実現できる「完全性」を持った論理演算素子を作製し、その動作を実証した。導波路を金薄膜で覆い、スピン波線の幅を狭くすることで、単一波長のスピン波(だけが伝わるよう(シングルモード導波路となるよう))に形成して、信号処理に不要なスピン波の発生を抑制した。電子回路では、幅や高さ、長さといった形状は、オームの法則によって比例や反比例として働き、扱いやす

いが、スピン波では、ある一定の幅では急激に余分なスピン波が増えたり、適切な長さになければ位相干渉が乱れたりする。つまり、形状に対する非線形な応答を持つため、扱いが容易ではなかった。そこで、本研究では、この点を説明・理解してデバイスを設計・作製することに成功した。具体的には、実モデルと同サイズのモデルを三次元で作製し、これを、静磁近似を適用して有限体積法によって解くことによって、スピン波伝搬が計算できるので、YIG の形状や金薄膜の厚さを変化して、適切な構造を探索した後に、形成に着手した。形成した四端子厚膜スピン波素子は、図4のように、3つの入力と1つの出力をもつ。波が持つ強度と位相の2つの独立した情報のうち、この素子は位相の状態を入力し、演算の結果を位相の状態として出力する。これにより、同素子は、多段化することが可能になり、応用上極めて重要な要件を満たしたことになる。さらに、入力3の端子の位相を0か π に変化すると、AND か OR のどちらかの機能を選択できる点も応用上の利点と言える。これは、多数決論理回路であることと同意であり、これも、より複雑な演算素子実現のために極めて重要である。

以上より、四端子の位相干渉デバイスが、当初予定通りに実証できたと言える。

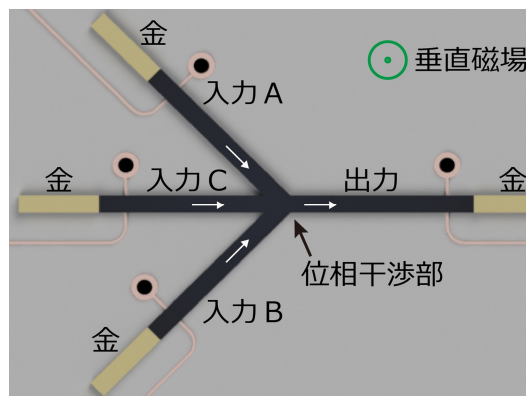


図4 四端子厚膜スピン波 AND と OR。3つの入力端子からスピン波を入力すると、位相干渉部で重ね合わされたスピン波は、自動的に、出力端子に演算結果を出力する。

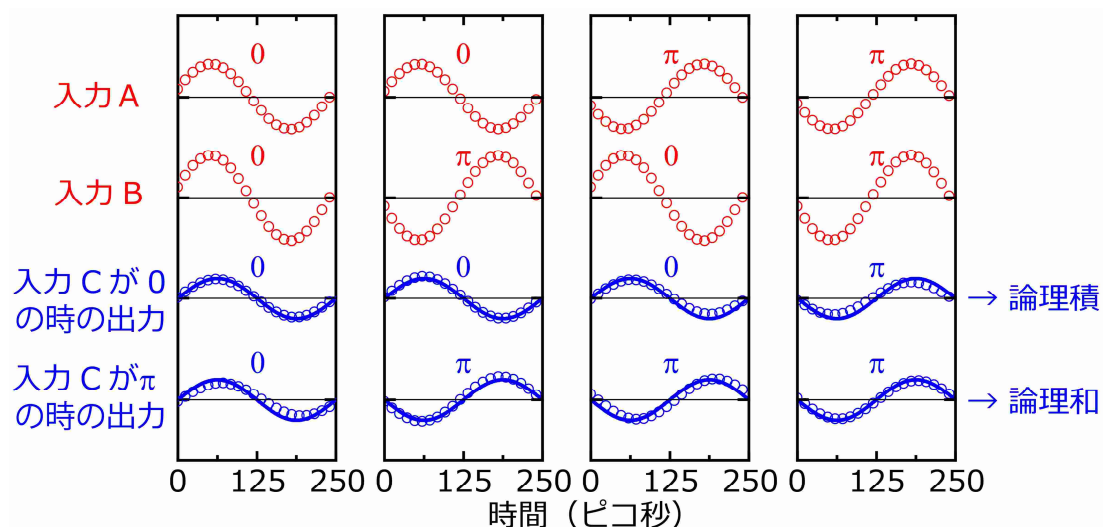


図5 四端子厚膜スピン波素子の入出力波形。0と π は波の位相を表す。入力Cが0のときANDを表し、 π のときORを表す。NOTは、出力ポートの位置を半波長分ずらすことで簡単に実現できるため、これは、NAND、NORを実現できたと言っても差し支えない。位相出力であるため、これは多段化できる素子である。

研究テーマ C 「薄膜イットリウム鉄ガーネットの形成」

スピン波回路の短波長化、集積化には、導波路材料の薄膜化が必須であるが、もっとも損失が少ない材料として知られる YIG の薄膜化は困難とされ、デバイス応用にまで至っている例は本研究開始時点で全くなかった。そこで、パルスレーザー堆積法と、単結晶薄膜 X 線回折装置を駆使し、デバイス応用に資する厚さ数十ナノメートルの YIG 膜を形成した。得られた膜は、面内・面直の両方向で単結晶と呼べる高品質なものであった。また、磁気特性も、バルク YIG に匹敵するものが得られている。

研究テーマ D 「薄膜イットリウム鉄ガーネットを用いた演算素子の実証」

上記で得られた薄膜 YIG を三端子、四端子のスピン波位相干渉素子に適用した。本結果は論文投稿中であり、結果の掲載は控えたいが、概要をここに示す。上述の単結晶 YIG 膜を、導波路状に、電子線描画装置を用いてパターンニングし、この上部にコプレーナウェーブガイドを形成した。コプレーナウェーブガイドで励起されたスピン波は、導波路を伝わり、ほとんど、上記の厚膜スピン波導波路と同じように振る舞った。結果として、同じ機能を、単純に 1 万分の 1 程度小型化することに成功している。これは、三端子・四端子素子の両方で見られており、膜特性を単結晶ライクに維持することができれば、高集積化が可能で、スケール則が成り立つことを示している。

以上のように、厚膜 YIG を用いてデバイスコンセプトを実証し、極薄の YIG 膜の形成技術を確認、その後、薄膜 YIG においても、厚膜 YIG と同程度の性能を実証することに成功した。したがって、当初の予定したデバイスの必須デモンストレーション項目をクリアし、スピン波回路の礎を築けたといえる。

3. 今後の展開

今後は、さきがけ研究期間中に育ったスピン波にまつわるネットワークを強化し、現実社会に実装される機能をチップレベルで融合する研究を進める。素子サイズ・集積度などの性能値の議論・改善は当然進めるが、ケースは限られるが半導体回路よりも優れた場面を見出したため、この強みを生かした、社会・産業界へ展開する方法・アイデアを検討・試験に挑戦していきたい。

4. 自己評価

当初の計画どおりの成果が得られた。同時に、部分的に当初の想定を超えた成果が得られた。当初の想定を超えた部分は、特に、他の研究者、産業界の研究者らとの自由な交流による刺激・指摘・議論にところが大きいと考えている。

本研究は当初から、極めて大量の入力端子が想定されるケースへの応用展開を想定しており、本研究によってその礎が確立されたと言っていい。研究開始当初は、物理的興味に留まっていたスピン波に関する研究が、本研究により、工学的議論が可能なレイヤーの研究にまで押し上げることができたと見ている。実際、NAND、NOR が実証されたことで、論理演算における完全性が満たされたため、次のステップである全加算器に相当する機能をスピン波回路で実現する段階へ展開する明確な道筋が本研究によって示され、実際にそれに必要な

研究体制の議論・構築に進んでいる。今後の展開に私自身、期待している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. 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," Sci. Rep. 6, 30268 (2016).
2. 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," Phys. Rev. Applied 7, 024006 (2017).
3. 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).
4. T. Yoshimoto, T. Goto, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, C. A. Ross, and M. Inoue, "Thermally stable amorphous tantalum yttrium oxide with low IR absorption for magnetophotonic devices," Sci. Rep. 7, 13805 (2017).
5. T. Yoshimoto, T. Goto, K. Shimada, B. Iwamoto, Y. Nakamura, H. Uchida, C. A. Ross, and M. Inoue, "Static and Dynamic Magnetic Properties of Single-Crystalline Yttrium Iron Garnet Films Epitaxially Grown on Three Garnet Substrates," Adv. Electron. Mater. 4, 1800106 (2018).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 3件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発明者: 後藤太一, 井上光輝, 高木宏幸, 平等拓範

発明の名称: Q スイッチ固体レーザー装置

出願人: 豊橋技術科学大学, 分子科学研究所

出願日: 2015/10/21

出願番号: 特願 2015-207278

2.

発明者: 井上光輝, 後藤太一, 岡嶋伸吾, 樋口之雄, 長谷川隆

発明の名称: スピン波位相変調装置

出願人: 株式会社村田製作所, 豊橋技術科学大学

出願日: 2016/8/31

出願番号: 特願 2016-169364

3.

発明者: 後藤太一, 井上光輝

発明の名称: スピン波回路ならびにアドレスエンコーダおよびアドレスデコーダ

出 願 人：豊橋技術科学大学
出 願 日：2016/3/8
出 願 番 号：特願 2016-044967

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

●主要な学会発表

1. 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," in Euro-Asian Symposium Trends in Magnetism (EASTMAG), (Federal Agency of Research Organizations, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, 2016), p. I1.9, [Invited].
2. T. Goto, R. Morimoto, J. W. Pritchard, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, M. Mina, T. Taira, and M. Inoue, "Magneto-optical Q-switch lasers generating kW order pulses based on domain motions in rare-earth iron garnet," in Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Magnetism Conference (Intermag), (Convention centre Dublin, Dublin, Ireland, 2017), pp. 1678 (HC-1603), [Invited].
3. T. Goto, R. Morimoto, H. Takagi, Y. Nakamura, P. B. Lim, H. Uchida, and M. Inoue, "The Magneto-optical Q-switch laser generating 1 kW pulses," in Magnetism Society of Japan (MSJ) Special Meeting on Spin Electronics (Magnetism Society of Japan (MSJ), Nagoya Univ., Nagoya, Japan, 2017), [Invited].
4. T. Goto, K. Sekiguchi, C. A. Ross, A. B. Granovsky, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "Logic gates using forward volume spin waves based on yttrium iron garnets," in Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), (Moscow State University, Moscow State University, Moscow, Russia, 2017), pp. 3RP-E-4, [Invited].
5. T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, C. A. Ross, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, "Spin wave circuits using forward volume mode in yttrium iron garnet," in International Conference on Magnetism (ICM), (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Moscone Center, San Francisco, California, USA, 2018), pp. E4-01, [Invited].

●受賞

1. 後藤太一、一般社団法人 レーザー学会、論文発表奨励賞、(2016 年 5 月 31 日)
2. 後藤太一、一般社団法人 電気学会、優秀論文発表賞、(2016 年 9 月 5 日)
3. 後藤太一、公益社団法人 応用物理学会、講演奨励賞、(2017 年 3 月 14 日)
4. Taichi Goto、The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Nagoya Section、IEEE Nagoya Section Young Researcher Award、A(2017 年 12 月 23 日)
5. 後藤太一、愛知県、第 12 回わかしゃち奨励賞(基礎研究部門)最優秀賞、(2018 年 1 月 30 日)
6. Taichi Goto、英国物理学会出版局、Outstanding Reviewer Awards 2017、(2018 年 2 月 24 日)

7. 後藤太一、一般社団法人 電気学会、優秀論文発表賞(基礎・材料・共通部門表彰)、(2018年9月4日)

●著作物

1. 後藤太一、井上光輝、「マグノニック結晶を用いた電流センサの開発」、Annual Report of The Murata、31、73-80、(2016)。
2. 後藤太一、「ライダー応用向け磁気光学効果を使った薄膜 Q スイッチレーザー」、科学技術交流ニュース、24、1、14、(2017)。
3. 後藤太一、「2.2 高密度磁気ホログラム記録」、電気学会技術報告 フォトンとマグノンを活用した最先端研究、1440、4-10、(2018)。

●プレスリリース

1. JST、豊橋技術科学大学、慶應義塾大学の共同プレスリリース、「スピン波を使った最高性能の位相干渉器を開発～金の膜を用いてエネルギー損失100分の1を実現～」、(2016年7月22日)
2. JST、豊橋技術科学大学、慶應義塾大学の共同プレスリリース、「磁気の性質を使って論理演算を実現～電流を流さない新しいコンピューターが期待～」、(2017年8月11日)