

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600043

研究課題名(和文)多結晶基板上ガーネットを用いた2次元マグノニック結晶の形成

研究課題名(英文)Formation of two dimensional magnonic crystals using garnets on polycrystalline substrates

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、磁性体を用いた光回路に関する知見を発展させ、スピン波(磁化の波)の配線を、伝播媒体を加工することで形成した。光回路で既に実現されているような、シリコンを細い棒状に加工して、基板上で光を曲げたり、その場に留めたりといった挙動を、同じ波動であるスピン波でも実現した。スピン波の伝播媒体を薄膜形成した。2次元マグノニック結晶と呼ばれる磁性体の2次元周期構造を用いることで、スピン波が曲げられることを確認した。金属周期構造を用いることで、マグノニックバンドギャップ(ストップバンド)の発現を確認した。バッファ層を介して多結晶基板上にイットリウム鉄ガーネットを、スパッタ法を用いて形成した。

研究成果の概要(英文)：Waveguides for spin waves were developed as the analogy of optical waveguides. Spin waves are collective precession of magnetic moments (spins) in magnetic media. Such spin waves have similar characteristics with optical waves. However several essential techniques to use these spin waves in devices have not been developed. To overcome this issue, fundamental properties of spin wave waveguide were studied. The material of the spin wave waveguide was yttrium iron garnet, processed into waveguide shapes. The magnonic band gap was excited with metallic periodic structure. The spin wave waveguide medium was prepared on polycrystalline substrates with buffer layers. The magnetic properties of the prepared films with various conditions were studied.

研究分野：ナノ・マイクロ工学

キーワード：磁性酸化物 スピン波 マグノニック結晶 イットリウム鉄ガーネット 導波路 単結晶薄膜

1. 研究開始当初の背景

最近の光集積回路の発展はめざましく、シリコン導波路を用いて光を所望の方向に曲げる、局在する、共振する等の制御が可能になっている。一方で、磁化の波であるスピン波も、波動であるため、光波と同様の制御が可能である。光と違い、スピン波は、伝播媒体の膜厚によって波長が変化する為、光集積回路では不可能な単位面積あたりの素子密度を実現できる可能性をもつ。

研究代表者は、これまで光を透過する磁性体(イットリウム鉄ガーネット、YIG)をシリコン光集積回路に一体化する研究を行い、磁性体にしか実現できない光アイソレータを形成してきた。この過程で、一般に困難とされている YIG 加工に、シリカの高耐熱性パターニングを用い、形成条件を工夫することでナノスケールのパターニングが可能になることが分かった。そこで、成膜された YIG を用いて、2次元マグノニック結晶を形成する着想に至った。

マグノニック結晶とは、磁気的な周期構造により、スピン波の制御が可能で磁気媒体を指す。スピン波は、電子がその場で歳差運動をするだけで、電荷の移動を伴わない為、電解非輸送型の情報キャリアとして、使うことが出来る。

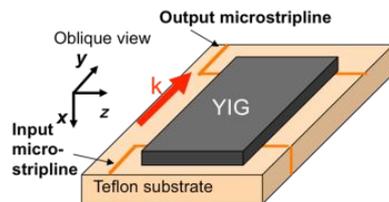


図1 スピン波媒体イメージ

例えば、図1のように2つのアンテナ上に、YIGを装荷することで、図2のような1~3GHz帯のスピン波を励起できる。

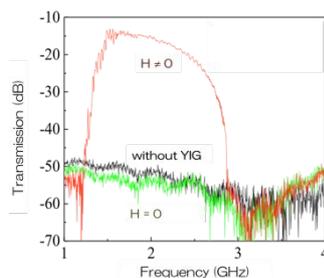


図2 伝搬するスピン波

この YIG 表面上に金属周期構造を作れば、磁気的な周期性の乱れをスピン波が感じ、方向等を制御できると期待できる。

2. 研究の目的

光波と同様に、スピン波の配線を伝播媒体を加工することで実現することを目的とした。これは、究極的には、不揮発性で、電荷が移動しない(発熱のない)回路を作ることを目指すもので、スピン波伝播媒体としてイットリウム鉄ガーネットを採用し、実現した

例は本課題開始時点において、国内外を通じて例が無かった。

3. 研究の方法

本課題を大きく3つに分割し、それぞれにおいて成果を得た。

(1)多結晶基板上 YIG の形成条件探査

スピン波伝播媒体の中でも YIG は入手が難しく、基板が高価であるため、多結晶基板上の YIG 膜の形成方法を探査した。形成には、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た。

(2)2次元マグノニック結晶の形成

スピン波の伝搬方向制御およびバンドフィルタの実現のために、金属(銅ドット)を用いて2次元のマグノニック結晶を形成した。ドットの周期は、伝搬するスピン波の分散関係から波長を予想することで設計した。先の研究では、ドット周期の設計は行われておらず、今回初めて金属周期構造を用いてストップバンドが確認された。図3に形成した2次元マグノニック結晶の模式図を示す。金属を表面に形成するだけで周期構造が形成できるため、YIG へのダメージが無い。これと同様の手法を用いて、1次元マグノニック結晶を形成し、スピン波の局在現象を確認した結果は、学術論文(N. Kanazawa, T. Goto 他, J. Appl. Phys. 116, 083903, 2014)等で報告した。

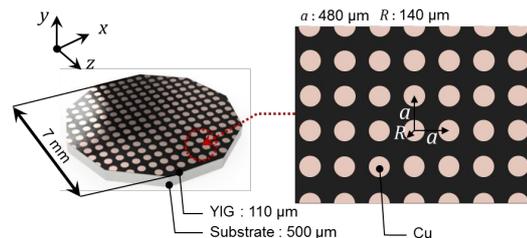


図3 2次元マグノニック結晶の例

(3)スピン波曲げ導波路の形成

スピン波伝播媒体の曲げ角度の異なる YIG 膜を用意した。スピン波の伝搬方向が変化した後も均等に試料に印加される方法として、媒体に対して垂直に磁界を印加可能な測定系および資料固定具を形成した。磁界の大きさは、十分 YIG が磁気飽和する大きさとした。

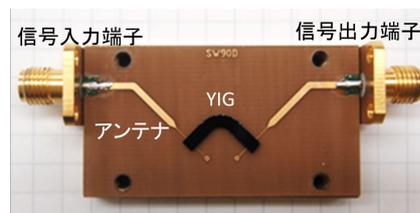


図4 曲げ角度90度の際のスピン波伝播媒体の配置例

4. 研究成果

(1) 5 元素以上の元素を含む窒化膜 (HEAN) のターゲットを形成し、高周波マグネトロンスパッタ法を用いて薄膜堆積した。投入電力 100W、成膜時圧力を 6 mTorr とし、Ar ガスと N₂ ガスの混合雰囲気中で成膜を行った。基板温度は室温とし、Ar ガスと N₂ ガスの流量を変化させた。EDX (Energy dispersive x-ray spectrometry) 及び X 線回折解析を用いて、膜の組成分析を行い、HEAN が形成できていることを確かめた。HEAN 上に、YIG を堆積した。成膜時の基板加熱温度を調整することで、飽和磁化が増大することが確認できた。

(2) 特定周波数における急峻な透過利得の減衰が見られ、マグノニックバンドギャップが発現した。このマグノニックバンドギャップは、スピン波の入射角度を変化するに従って、発現周波数がシフトし、2次元マグノニック結晶特有の応答を示した。本結果は、図5のように、有限要素法を用いたシフト量の試算結果とよく一致した。さらに、有限要素法を用いて、三次元シミュレーションを行った所、金属層におけるスピン波の減衰が見られた。本内容は、学会 IEEE の研究会で報告を行った。

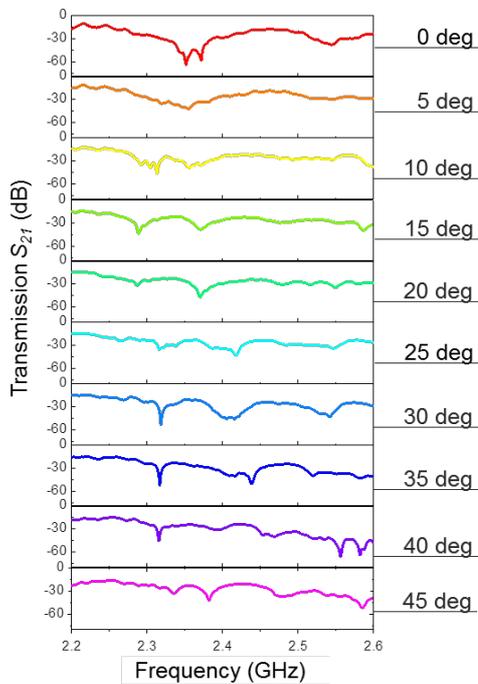


図5 スピン波入射角度を0度(垂直)~45度まで変化した時の透過利得の変化

(3) 曲げ導波路中のスピン波が、これまで広く用いられてきた表面モード(外部磁場がスピン波媒体に対して面内方向に印加される場合に伝搬する波)と前進体積モード(外部磁場がスピン波媒体に対して面直方向に印加される場合に伝搬する波)を用いたときの透過利得の変化を調べた。前進体積モードを用いることで、表面モードに比べ約1.5倍透過利得が高いことが分かった。

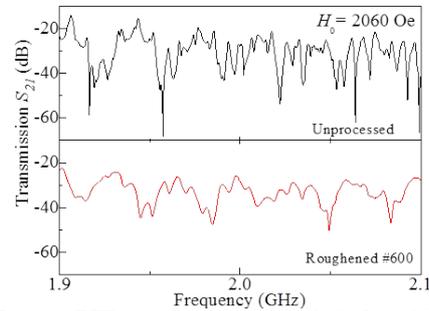


図6 粗面加工により抑制された前進体積モードのスピン波のリブル

一方で、面内等方性の高い前進体積モードは、端面反射を起源とする不要なスピン波が定在波を作るため、伝搬制御が難しいことが明らかになった。そこで、局所的に媒体表面の粗さを増加することで、スピン波を散乱し、反射を抑える構造を導入することを発想し、実際に、表面粗さを制御することで、透過利得の不要なリブルの発現を抑制することに成功した。本内容は、学術雑誌に投稿した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

N. Kanazawa, T. Goto, and M. Inoue, "Spin wave localization in one-dimensional magnonic microcavity comprising yttrium iron garnet," *J. Appl. Phys.* 116, 083903 (2014)、査読有、DOI: 10.1063/1.4893936

T. Goto, N. Kanazawa, A. Buyandalai, H. Takagi, Y. Nakamura, S. Okajima, T. Hasegawa, A. B. Granovsky, K. Sekiguchi, C. A. Ross, and M. Inoue, "Spin wave differential circuit for realization of thermally stable magnonic sensors," *Appl. Phys. Lett.* 106, 132412 (2015)、査読有、DOI: 10.1063/1.4916989

N. Kanazawa, T. Goto, J. W. Hoong, A. Buyandalai, H. Takagi, and M. Inoue, "Metal thickness dependence on spin wave propagation in magnonic crystal using yttrium iron garnet," *J. Appl. Phys.* 117, 17E510 (2015)、査読有、DOI: 10.1063/1.4916815

S. Shichi, N. Kanazawa, K. Matsuda, S. Okajima, T. Hasegawa, T. Okada, T. Goto, H. Takagi, and M. Inoue, "Spin wave isolator based on frequency displacement nonreciprocity in ferromagnetic bilayer," *J. Appl. Phys.* 117, 17D125 (2015)、査読有、DOI: 10.1063/1.4915101

[学会発表](計35件)

T. Goto, N. Kanazawa, J. W. Hoong, A. Buyandalai, H. Takagi, and M. Inoue, "Thickness Dependence of Spin Wave Propagating in Magnonic Crystals with Metallic Periodic Structure on Yttrium Iron Garnet," WSCM, BEXCO, Busan, Korea, 2015年3月25日

T. Goto, J. W. Hoong, N. Kanazawa, R. Morimoto, H. Takagi, and M. Inoue, "Effect of thicknesses of yttrium iron garnets and metal periodic structures on spin wave in magnonic crystals," ICAUMS (AUMS, Hainan International Convention and Exhibition Center, Haikou, China, 2014年10月29日

T. Goto, N. Kanazawa, H. Takagi, and M. Inoue, "One dimensional magnonic crystal using yttrium iron garnet," in MSJ Spin Electronics Specialized Conference, VBL, Naogyu Univ. Japan, 2014年7月30日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計4件)

名称：スピン波非可逆素子、および、高周波非可逆回路素子
発明者：岡嶋伸吾、井上光輝、高木宏幸、後藤太一
権利者：株式会社村田製作所、豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2015-26785
出願年月日：2015年2月13日
国内外の別：国内

名称：H測定装置、H測定方法
発明者：岡嶋伸吾、井上光輝、高木宏幸、後藤太一
権利者：株式会社村田製作所、豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2015-26786
出願年月日：2015年2月13日
国内外の別：国内

名称：磁気センサおよび磁気検出回路
発明者：岡嶋伸吾、井上光輝、高木宏幸、後藤太一
権利者：株式会社村田製作所、豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2015-26787
出願年月日：2015年2月13日
国内外の別：国内

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
発明者：後藤太一、井上光輝
権利者：豊橋技術科学大学
種類：特許
番号：特願 2016-044967
出願年月日：2016年3月8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