

令和元年6月24日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13670

研究課題名（和文）フェーズドアレイ型マグノンビーム

研究課題名（英文）Phased-array magnon beam operation

研究代表者

関口 康爾（SEKIGUCHI, Koji）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00525579

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：フェーズドアレイ動作に不可欠な等方的なスピン波伝搬を確認するために、超高真空スパッタ装置を使用して面内磁化膜を含む金属多層膜試料を作製した。金属材料でも等方的伝搬を確保できることをあきらかにした。また磁性絶縁体ガーネットでは、フェーズドアレイ動作を模した多入力スピン波実験を実証した。波面を可視化するため、単結晶鉄を用いてスピン波の波面を調べ、エッジ効果によって波面が変調を受けることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、金属材料でも等方的伝搬を確保できることが分かり、ピラー構造だけでなく試料境界を利用した波面制御ができることが分かった。これらとガーネットにおける多入力（多ピラー状態）スピン波励起を模した実験の研究結果は、将来的に、CMOS回路とは異なり、単一素子でNAND回路を実現する可能性を示している。今後、省エネルギーデバイスを目指す基礎基盤成果である。

研究成果の概要（英文）：To detect the isotropic spin wave propagation, we have fabricated multi-layer sample by using ultrahigh vacuum sputtering machine. Even in metallic samples, we detected the isotropic spin wave transport. In case of insulator YIG samples, we fabricated a multi-input logic device which resemble to phased-array magnon beam operation. With epitaxial Fe thin film, we discover new edge effect to cause the spin-wave interference.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピン波 マグノン

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスでは「電荷移動を伴わないスピン流」の制御をすることによって、消費電力が極めて低いデバイスの開発を目指している。スピン流の中では、電子スピン流が数百ナノメートルの短い距離しか伝搬できないのに対し、スピン波スピン流(マグノン)は2桁ほど長い距離(数十マイクロメートル)を伝搬できるため、マグノンは国際半導体ロードマップ(ITRS)において CMOS 後継の次世代演算デバイスの動作原理として重要視されていた。マグノン論理演算の動作も実証されたが、すべて1次元デバイスであった。マイクロデバイスへ応用する道筋が存在しておらず、2次元・3次元的にマグノンの伝搬を制御することが不可欠である。本申請では、マグノンを用いた2次元演算素子の研究開発を進めるため、フェーズドアレイ型マグノンビームが可能であるか検討し、世界に先駆けてその実現に向けた実験・開発手法を提案する。

### 2. 研究の目的

本申請は、超高感度のタンデム型ファブリペロー干渉計を用いたマイクロブリルアン散乱分光法を活用して、消費電力が極めて少ないスピン波(マグノン)論理演算のための「革新的マグノン制御技術」を確立することを目的とする。このため、現在日本では唯一申請者が稼働させているマイクロブリルアン散乱分光装置の空間分解能を考慮しながら、数マイクロメートル程度の試料サイズとなる「フェーズドアレイ型マグノンビーム」を考案し、微細加工技術により作製する。作製したフェーズドアレイ素子によるマグノンビームをマイクロブリルアン散乱分光装置によって可視化することで実証し、マグノン論理演算の基礎を構築する。

### 3. 研究の方法

フェーズドアレイマグノンビームの実現には、スピントルク発振器でのマグノン励起を制御する必要がある。スピントルク発振器を作成し、高速な磁化回転を生じさせ、発振器近傍にスピン波を励起させる。まず、面内磁化膜 Py, CoFeB を含む複合多層膜を超高真空スパッタ装置を使用して作製し、一つのスピントルク発振器によるパルス型マグノン励起実験をおこなう。超高速スイッチと20GHz帯RF信号発生器のくみあわせによってパルス型スピン波励起を実験する。

一方、マグノン位相干渉を活用するには、面内で等方的に伝搬する必要があるため、磁性金属の磁化が膜面垂直方向に向く必要があり、Forward モードスピン波の伝搬およびピラー近傍でのマグノン密度の可視化に挑戦する。ガーネット試料を用いて、磁化が垂直を向いた状態でのスピン波伝搬実験を行い、外部磁場を膜面垂直に印加して波の干渉効果が得られるか調査する。複数個のスピントルク素子を作成し、アレイ型動作が行えるかBLS分光法を活用した空間可視化によって、波面を調査する。

### 4. 研究成果

本研究期間において、

- (1) 実験計測技術として高速スイッチを用いた高周波回路を作製し、ピラー構造に入力する高周波 20 GHz 帯を 1 ナノ秒から数十ナノ秒程度で自在にパルス型に変化させることができるようになり、これをマイクロブリルアン散乱分光装置に組み込んだ。
- (2) ガーネット試料を用いて、磁化が垂直を向いた状態でのスピン波伝搬実験を行った。外部磁場を膜面垂直に 2000 Oe 程度印加した状態での伝搬を確認でき、その伝搬解析によりスピン波の二次元活用にはこのモード(フォワードモードスピン波)活用が重要であることがわかった。
- (3) 超高真空スパッタ装置を使用して面内磁化膜 Py および CoFeB を含む金属多層膜試料を作製した。電気プローブの電磁石によって磁場を膜面垂直方向に印加し、磁化を垂直に立てた状態を作りだし、スピン波伝搬の高速電気検出をすることで金属系におけるスピン波伝搬モードを観測することに成功した。伝搬速度は面内伝搬モードに比べると小さいものの、金属材料でも等方的伝搬を確保できることが分かった。
- (4) 平面でのスピン波伝搬による波面を調べるため、長距離伝搬が可能となる単結晶鉄を用いてスピン波の波面を調べた。その結果、エッジ効果による多重散乱によって波面が変調を受けることが明らかになった。ピラー構造だけでなく、試料境界を利用した波面制御もできることがわかった。
- (5) ガーネットを使用することで、多入力(多ピラー状態)スピン波励起を模した実験をすることができた。これら多入力での入力ディレイをつけることで出力値での重ね合わせ状態を制御することができ、論理回路 OR, AND, NAND, NOR を実現できることを証明できた。フェーズドアレイ型動作によるマグノン伝搬制御に関する、基礎実験をすることができた。これらは CMOS 回路とは異なり、単一素子で NAND 回路を実現する長所を持っていた。
- (6) 磁性多層膜からなるナノピラーをシリコン基板上に複数個並べて微細加工したが、全てがスピントルク発振するフェーズドアレイ動作には至らなかった。スピン波二次元放射実験に関するピラー制御性・歩留まりが本研究最大の関門となることがわかった。

以上の結果は当初計画の完全達成とまでになっていないが、各項目で新規現象を発見し、デバイス原理の証明など予想を超える結果も得られており、今後、ナノマグノニクス研究を支える十分な成果を挙げることができたといえる。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計7件)

1. “Demonstration of robust magnonic spin wave interferometer”, N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, H. Takagi, Y. Nakamura, and M. Inoue, Scientific Reports, 2016, Vol.6, 30268(2016). 査読有
2. “Spin wave absorber generated by artificial surface anisotropy for spin wave device network”, N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, H. Takagi, Y. Nakamura and M. Inoue, AIP advance, 2016, Vol.6, 95024(2016). 査読有
3. “Current-induced modulation of backward spin-waves in metallic microstructures”, N. Sato, S.J. Lee, S.W. Lee, K. J. Lee, and K. Sekiguchi, Journal of Physics D : Applied Physics, 2017, Vol.50, 94004(2017). 査読有
4. ”Spin-wave propagation in cubic anisotropic materials”, K. Sekiguchi, S.W. Lee, H. Sukegawa, N. Sato, Se.H. Oh, D. McMichael, and K.J. Lee, NPG Asia Materials, 2017, Vol.9, e392(2017). 査読有
5. “The role of Snell’s law for a magnonic majority gate”, N. Kanazawa, T. Goto, K. Sekiguchi, A. B. Granovsky, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, Scientific Reports, 2017, Vol.7, 7898(2017). 査読有
6. “Time-domain propagating spin-wave spectroscopy for forward spin waves in a ferromagnetic metal”, K. Sekiguchi, D. Chiba and T. Tachizaki, Japanese Journal of Applied Physics, 2018, Vol.57, 0902B4(2018). 査読有
7. “The basis of magnon transistors”, K. Sekiguchi, AAPPS Bullentin, 2018, Vol.28, 2(2018). 査読無

### 〔学会発表〕(計13件)

- 1) “ナノマグノニクス-microBLS 分光が拓く磁性体の新しい可能性”, 関口康爾, 誘電体・磁性体若手夏の学校 2016.08.27, ルーセントタカミヤ(山形県・山形市)
- 2) “イットリウム鉄ガーネットを用いた 型スピン波位相干渉器の作成”, 金澤直輝、後藤太一、高木宏幸、中村雄一、ロスキャロライン、グラノフスキーアレクサンダー、関口康爾、内田裕久、井上光輝、第77回応用物理学会秋期学術講演会、2016.09.15 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- 3) “イットリウム鉄ガーネットを用いた 型干渉器によるスピン波多数決回路”, 金澤直輝、後藤太一、高木宏幸、中村雄一、ロスキャロライン、グラノフスキーアレクサンダー、関口康爾、内田裕久、井上光輝、第64回応用物理学会春期学術講演会、2017.03.15F パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- 4) “Three-port spin wave waveguide comprising 50 nm YIG”, T. Yoshimoto, T. Goto, K. Shimada, K. Sekiguchi, C. A. Ross, A. B. Granovski, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, Magnonics 2017.
- 5) “Forward volume spin waves propagating in thin YIG films”, T. Yoshimoto, T. Goto, K. Shimada, K. Sekiguchi, C. A. Ross, A. B. Granovski, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2017.
- 6) “Spin wave logic element using four-port YIG using absorbers”, T. Goto, K. Sekiguchi, C. A. Ross, A. B. Granovski, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, Magnonics 2017.
- 7) “Logic gates using forward volume spin waves based on yttrium iron garnets”, T. Goto, K. Sekiguchi, C. A. Ross, A. B. Granovski, H. Takagi, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2017.
- 8) “Fundamentals of spin-wave based logic functions”, K. Sekiguchi, 2017 Japan-Korea Spintronics Workshop, 2017.
- 9) “Nanomagnonics in cooperation of spin current”, K. Sekiguchi, Collaborative conference on material research, 2017.
- 10) ”前進体積波モードのスピン波を用いた位相干渉演算器の開発 IV”, 後藤太一、関口康爾、グラノフスキーアレクサンダー、ロスキャロライン、高木宏幸、中村雄一、内田裕久、井上光輝、マグネティックス研究会、2017
- 11) “Generation of fast propagating spin-wave for magnonic logic functions”, K. Sekiguchi, Collaborative Conference on Materials Research CCMR2018, 2018.
- 12) “Edge mode spin wave nonreciprocity for magnonic logic functions”, K. Sekiguchi, 5-th International conference of Asian Union of magnetics Societies IcaUMS 2018, 2018.
- 13) “Yttrium iron garnet waveguide for forward volume spin wave interference”, T. Goto, T. Yoshimoto,

〔その他〕  
ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。