

令和元年6月24日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02098

研究課題名（和文）界面スピン制御によるナノマグノンクス

研究課題名（英文）Nanomagnonics by using interface spin manipulation

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） 33,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究によってナノ・マイクロスケールで加工した試料においてマグノン伝搬に対するエッジ効果を明瞭にとらえることができた。このエッジ効果によって、外部磁場を必要とせずに論理NAND, NOR, PASS, NOT, OR, AND, XORを提案する大きな成果を挙げ、界面・エッジでのマグノン挙動を利用した初めての実績を挙げることができた。基礎学理の研究という観点では、ブリルアン散乱分光装置によって超薄膜Coにおけるマグノン分散関係の検出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エッジ効果・界面効果を活用することでマグノン論理演算素子のプロトタイプとして、論理NAND, NOR, PASS, NOT, OR, AND, XORをたった3つの構成要素で実現できることを示し、多入力多出力素子を作製した結果、単一素子でNANDが組めるなどマグノン演算の有用性を証明することができた。従来の電子演算器にはない利点であり、集積化構造の大幅な簡略化につながる成果である。

研究成果の概要（英文）：We detected an edge/interface effect on the magnon current by Brillouin light scattering experiments. The edge/interface effect enables us to build logic NAND, NOR, PASS, NOT, OR, AND, XOR elements without controlling external magnetic field. In the fundamental physics, we detected the detail magnon dispersion relation in ultra thin Co film in presence of interface spin interactions.

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 マグノン スピン波

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

1. 研究開始当初の背景

電子機器はエネルギー消費が急激に増大し、省エネ性能と高性能化の両立という現代社会の要請にこたえることが徐々にできなくなっている。一方、磁性体には磁石に代表されるようにエネルギーゼロで情報を保持できる特性があり、その性質と同様に低エネルギーで動作が可能な非電荷キャリア (= マグノン) が存在する。磁性体におけるマグノンの研究は、電子機器では得られない省エネルギーなアナログ機能・高周波機能を創発できる可能性を秘めており、近年の先端研究の一つである。しかし、マグノンによる新機能創発には、材料選択を含め基礎研究課題が山積しており、特にナノ領域での界面・エッジ効果の体系的理解を先駆けて行う必要がある。本申請では、金属磁性体における非電荷キャリア制御 (マグノン制御) の土台を築くために、ナノ加工した微細試料においてマグノンを自在に操る方法を確立することを提案する。

2. 研究の目的

本研究の根本の狙いは、磁性体に普遍的に存在するマグノンを、信号を運ぶ非電荷のキャリアとして活用し、新しい省エネルギー・高効率な利用展開を創発することにある。磁性体としてその材料の枠を超えて、酸化物磁性体、反強磁性体をもキャリア媒体として活用するためのサイエンスの理解と応用展開を目指す。本申請では金属磁性体に焦点を絞る、

ナノ構造で顕在化する非電荷マグノンに対する界面・エッジ効果を計測する技術と垂直磁化膜での輸送を実現すること、非電荷マグノンの増幅を実現すること、電界効果による非電荷キャリア・マグノンのフロー制御の原理を構築すること、界面スピントポロジー制御によりマグノンを減衰しない磁気ソリトンに成長させることに挑戦する。

3. 研究の方法

研究代表者らは、電気的な時間分解スピン波検出法を発展させてきた。また国内唯一開発に成功したマイクロブリルアン散乱分光法を用いると 250 nm 空間分解能でマグノン密度分布を明確

にイメージングできる。これらの基盤技術と知見を発展させてナノマグノニクススの基盤を構築するために、初年度はナノ計測技術および微細構造でのマグノン輸送の確立を行った。

世界最高の空間分解能をもつブリルアン散乱分光を行うため、近接場光・原子間力顕微鏡の知見を活用したナノ計測を、フィードバックループを新規に取り入れた測定機構で実施し、マグノン強度の測定を試みた。垂直磁化膜界面に Pt, Ta, W 等を含有するヘテロ界面を作成し、スピン波 (マグノン) 伝搬を電気測定および BLS 分光測定により調査する。また、数 nm の Py や CoFeB 膜をマグノン媒体として、その上部に原子スケールの Co 超薄膜を制作する。Co 超薄膜の磁性を電圧制御することで、磁性薄膜を伝搬するスピン波強度の変調効果の観測を、高速電気測定および BLS 分光方によって試みる。また、界面スピン流の注入度やスピン波励起強度を高めることで非線形効果を生み出し、減衰しないスピン波伝播を実現する基礎研究を展開する。これにより、ソリトン通信と同様の、将来的な低減衰マグノン信号伝搬の基盤技術確立を目指す。

4. 研究成果

本研究期間において、

- (1) ナノ空間で顕在化する界面効果やエッジ効果のナノ構造依存性を完全に可視化する必要がある。これに SNOM 技術を取り入れて数十 nm の分解能に向上するように図って、ソフトウエアのフィードバック安定化により空間制御は数十 nm を実現しており、マグノン伝搬のエッジ効果をとらえることに成功した。
- (2) 興味深いことに、金属垂直磁化膜ではマグノン輸送の報告がなかったが、Co/Pt, FePt においてスピン流を注入してマグノン輸送の分光計測を行ったところ、伝搬距離が短いもののスピン流による分光スペクトル変化が認められ、マグノン伝搬が確認できた。
- (3) 電子スピン流からスピン変換 (増幅効果) が生じ、界面から流入するスピン流によってマグノン変調が生じるが、マグノン波数とマグノンモードによってどのように変換強度が影響を受けるのか理解するため、これまで金属で観測されていなかったモードにおけるスピン変換効果を初めて観測し、波数依存性の実験を開始することに世界で初めて成功した。
- (4) バルク試料のガーネットにおいては金薄膜を利用した三端子構造によって安定的な論理演算を構築することができた。
- (5) 鉄単結晶におけるマグノン伝搬を可視化し、エッジ効果・界面効果によるマグノニック機能を開発する応用物性研究を行った。鉄単結晶を活用することで、磁性体を均一に磁化させるための外部磁場を必要とせずマグノン伝搬を起こすことに成功した。
- (6) 鉄単結晶におけるエッジ効果・界面効果を活用することでマグノン論理演算素子のプロトタイプとして、論理 NAND, NOR, PASS, NOT, OR, AND, XOR をたった 3 つの構成要素で実現できることを示した。
- (7) 波動原理に基づく論理演算の有望性が出てきたため、ガーネット材料で多入力多出力素子を作製した。その結果、単一素子で NAND が組めるなどマグノン演算の有用性を証

明することができた。従来の電子演算器にはない利点であり、集積化構造の大幅な簡略化につながる成果である。

- (8) 従来技術を使った非線形磁気ソリトン成長の基礎的成果を上げることができたので、本研究の技術を組み合わせることで界面トポロジー制御による磁気ソリトンの伝搬特性変調など将来的な外部制御の基礎を築いた。

以上の結果は当初計画の完全達成とまでにはなっていないが、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9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
8. “Generation of broadband near-field optical spots using a thin-film silicon wave guide with gradually changing thickness”, K. Zhang, S. Taniguchi, and T. Tachizaki, , Optics Letters, 2018, Vol.43, 5937(2018). 査読有
9. “Nanometer-precise optical length measurement using near-field scanning optical microscopy with sharp single carbon nanotube probe”, T. Tachizaki, T. Nakata, K. Zhang, I. Yamakawa, S. Taniguchi, Ultramicroscopy, 2018, Vol.186, 18(2018). 査読有

〔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をう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, C. A. Ross, K. Sekiguchi, A. B. Granovski, Y. Nakamura, H. Uchida, and M. Inoue, MRS Fall Meeting 2018, 2018

〔図書〕(計 件)

〔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：千葉 大地

ローマ字氏名：CHIBA, daichi

所属研究機関名：東京大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁): 10505241

研究分担者氏名：立崎 武弘

ローマ字氏名：TACHIZAKI, takehiro

所属研究機関名：東海大学

部局名：工学部

職名：講師

研究者番号(8桁): 20632590

(2)研究協力者

研究協力者氏名：キュンジン リー

ローマ字氏名：LEE, kyung-jing

研究協力者氏名：ヘルムート シュルツハイス

ローマ字氏名：SHULTHEISS, helmut

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。