

令和元年6月6日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05977

研究課題名（和文）電圧制御型スピン波演算素子の要素技術開発

研究課題名（英文）Development of voltage-driven spin wave logic devices

研究代表者

塩田 陽一（Shiota, Yoichi）

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：70738070

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強磁性体金属における電圧効果を利用したスピン波デバイスの開発を目的に研究を行った。まず高周波電圧によって磁気共鳴を励起した時、特異な軌道を描く歳差運動が観測された。この非線形現象を理解することは、電圧によるスピン励起に向けて重要な知見であると思われる。次にPt/Co/MgO系において、スピン波伝搬に対する電圧効果を評価した。さらに、得られた結果を元にスピン波ロジック演算操作に必要な電圧変調量を計算した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン波論理演算素子はその波動性制御により多端子素子を含めた様々な機能性付与と低損失な情報伝送が可能であると期待されている一方、スピン波の生成、制御に大きな電流通電を必要とする点が課題となっている。本研究では従来の電流制御を一掃し、全電圧制御型のスピン波論理演算素子の原理実証を行うことで低駆動電力化への有効性を示す。電圧によるスピン波生成、伝搬制御の実現は、低消費電力な論理演算素子の応用化を推進することができると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated possibility of the voltage-driven spin wave logic devices using voltage effect in ferromagnetic metals. Firstly, we observed a peculiar magnetization trajectory when the precession of magnetization was excited by microwave voltage. The understanding of this nonlinear phenomena might become important to excite the spin wave by voltage effect. Then, we evaluate the voltage effect on interface magnetic properties by propagating spin wave. Based on this, we calculate the possibility of an voltage-controlled phase shifter for spin wave logic devices.

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 磁化ダイナミクス 電圧効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、情報化社会の急速な進展により、電子機器の低消費電力化を進めることは、重要な課題の一つである。また電子機器の小型化・高速化が求められる中、スピントロニクスデバイスが注目を集めている。例えば、電力を供給しなくても記録を保持することができる不揮発な磁気抵抗メモリーである Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM) や書込み電力をさらに低減させた Spin-Transfer-Torque-MRAM (STT-MRAM) は、半導体メモリーである Dynamic Random Access Memory (DRAM) の置き換えに向けて、精力的な研究・開発が進められている。申請者はこれまでに、従来の電流駆動型である STT-MRAM に比べて、さらに低消費電力な書込みが期待できる電圧駆動型 MRAM の実現に向けて研究を行ってきた。

近年新たなスピントロニクスデバイスとして、磁性体中の磁気モーメントの波である「スピン波」を情報の媒体として利用したデバイスの研究が盛んに行われている。スピン波は周波数・位相・強度などの情報を有しており、それらを制御したり干渉させたりすることによって、様々な論理演算を行う事ができる。また nm~ μm オーダーの波長を有していることや、スピン波の伝搬には電荷の移動に伴うジュール熱の発生がないことから、小型で低消費電力な情報伝達が可能である。一方、従来のスピン波論理演算素子は電流磁場によって励起・制御されるものがほとんどであり、演算操作に大きな電力を消費する事が問題となっている。

2. 研究の目的

上述の背景、および申請者のこれまでの研究成果を元に、磁性体中の磁気モーメントの波である「スピン波」の生成、強度・位相制御を電圧で操作する新しい技術の開発に取り組む。これにより、従来の電流駆動型に比べ超低消費電力でかつ高速動作可能なスピン波論理演算素子の基盤技術を構築するとともに、スピン波に対する電圧効果の物理起源解明に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では電圧によるスピン波の生成、強度・位相制御に最適な材料、素子構造設計から、スピン波伝搬の観測、論理演算動作の実証まで広く取り組む。研究期間内には以下の事を明らかにする。

- 一 非磁性/強磁性/絶縁層構造を有する構造において、大きな電圧効果を示す材料の組み合わせを探索する。またその構造において、電圧によって誘起される磁化ダイナミクスを詳細に調べる。
- 一 ネットワークアナライザによる電気的検出手法、及び光学的検出手法を用いて、スピン波の伝搬機構を詳細に調べる。特にスピン波の共鳴周波数、群速度、伝搬距離について調べる。上記のデバイスにおいて、電圧印加用電極に直流電圧を加えながら測定を行い、垂直磁気異方性及びジャロシンスキ・守谷相互作用への電圧効果の大きさを明らかにし、スピン波の電圧制御に最適な膜構造を調べる。
- 一 電圧によって励起されたスピン波伝搬の観測を目指す。また効率的にスピン波を励起できる素子の形状について検討を行う。

以上の成果を元に、電圧駆動型のスピン波論理演算動作の可能性を調査する。

4. 研究成果

まず MgO/CoFeB 接合系において電圧による垂直磁気異方性変調の効率を上げるために Ta 下地層に対する CoFeB の組成依存性及びアニール温度依存性を調べた。するとすべての組成において 250°C 付近のアニール温度で電圧効果は最大となり、また Fe と Co の組成比率を 7:3 にした時に大きな電圧効果が得られた。これらの事はスピン波を効率的に制御する上で重要な知見であると考えている。

また MgO/FeB/W をフリー層とする垂直磁化型のトンネル磁気抵抗素子を用いて高周波電圧を印可した際の磁化ダイナミクスをホモダイン検波法を用いて明らかにした。高周波電圧の電圧強度が低い(-30 dBm)時には、電圧による共鳴励起特有の非対称ローレンチアン型の共鳴ピークが得られたが、電圧強度を大きくして行くと磁化の歳差角が大きくなり共鳴ピークが低周波側にシフトし、歪んだ共鳴スペクトルが観測された。また興味深いことに、電圧強度をさらに大きくしていくと、図 1(a) に示すように共鳴周波数の 1/2 の周波数のところにも共鳴ピークが観測された。磁化ダイナミクスを明らかにするためにマクロスピンシミュレーションを行ったところ図 (b) に示すように実験結果をきれいに再現できた。さらに 2 つの共鳴ピークにおける磁化の軌道を調べた結果、4.0 GHz の時は円を描いて歳差運動しているのに対して、2.2 GHz の時は 2 重の円を描いて歳差運動しているこ

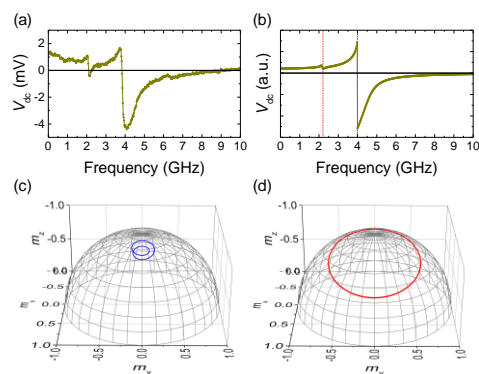


図 1 電圧励起による磁気共鳴のホモダイン検波スペクトル

(a) 実験結果 (b) シミュレーション結果
(c) 4.0 GHz (d) 2.2 GHz の高周波電圧を印可した磁化の軌道の計算結果

とがわかった。これらの非線形現象を理解することは、電圧によるスピン波励起に向けて重要な鍵になると思われる。

次に、Pt/Co/MgO 系において評価を行った。Pt/Co/MgO 系は界面垂直磁気異方性 (PMA) および界面ジャロシンスキ・守谷相互作用 (DMI) に関する多くの研究が進められており、その系において電圧効果を評価する事に意義があるものと考えた。スパッタリング法を用いて熱酸化 Si 基板上に Pt/Co/MgO 接合を成膜し、次にゲート電圧を加えるために高誘電率 HfO₂ を原子層堆積装置 (ALD) を用いて成膜した。次に、スピン波が伝搬する領域にゲート電極を有するデバイスを微細加工により作製し、ネットワークアナライザを用いてスピン波の伝搬特性を評価した。

まずスピン波の伝搬方向に依存した共鳴周波数の違い (非相反性) から界面 DMI の大きさを評価した。次に電圧印可下で共鳴周波数シフトを調査した。図 2 に電圧印可による共鳴周波数シフトを示す。電圧に対して共鳴周波数がほぼ線形にシフトしている。またスピン波の伝搬方向に依存して変調量がわずかに異なることがわかった。これらのシフト量を詳細に解析することで、Pt/Co/MgO 系における電圧による界面 PMA 及び界面 DMI の変調量を評価する事ができた。またスピン波ロジック演算操作に必要な π 位相変調に必要な電圧変度も計算により見積もった。その結果、これまでに報告されている電圧変調量でも十分実現可能であることがわかった。

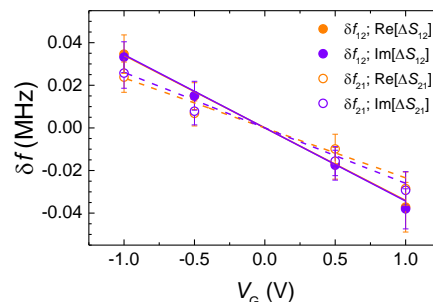


図 2 Pt/Co/MgO における電圧によるスピン波共鳴周波数の変調量

また本研究課題の申請時には主に強磁性金属を用いた電圧効果の研究を想定していたが、磁気緩和定数は極めて小さくスピン波伝搬の媒体に適した強磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット (YIG) にも着目して研究を進めた。まずはスパッタ成膜によってナノメートル膜厚で制御された YIG が作製できる成膜条件の探索を行った。その結果、20nm 薄膜の YIG を作成することに成功し、また YIG におけるスピン波伝搬の膜厚依存性を調べた。今後、電圧効果の観測に向けて研究を進めていく予定である。

さらに CoFeB/Ru/CoFeB の人工反強磁性体におけるスピン波伝搬の観測も行った。この系では上下の強磁性体が非磁性層を介して反強磁性的に層間交換結合していることに加えて、スピン波が存在する時には双極子磁場による相互作用のために、強磁性単層とは異なるスピン波の特性を有する事がわかった。具体的には、磁場を加える方向によって、スピン波の分散関係が波数に対して非対称となり、巨大な非相反周波数シフトが観測された。これは、これまで報告されていたジャロシンスキ・守谷相互作用による周波数シフトに比べても非常に大きな効果であった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) F. Ando, D. Kan, Y. Shiota, T. Moriyama, Y. Shimakawa, and T. Ono, "Fabrication of Nanocentrosymmetric Nb/V/Ta Superlattice and its Superconductivity" *Journal of the Magnetics Society of Japan*, **43**, 17-20 (2019) 査読有
<http://dx.doi.org/10.3379/msjmag.1903L001>
- (2) M. Ishibashi, K.T. Yamada, Y. Shiota, F. Ando, T. Koyama, H. Kakizakai, H. Mizuno, K. Miwa, S. Ono, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, "Electric field effect on exchange interaction in ultrathin Co films with ionic liquids" *Applied Physics Express*, **11**, 063002 (2018) 査読有
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.11.063002>
- (3) F. Ando, M. Ishibashi, T. Koyama, Y. Shiota, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, "Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film" *Applied Physics Letters*, **113**, 252402 (2018) 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.5078553>
- (4) S. Kasukawa, Y. Shiota, T. Moriyama, and T. Ono, "Evaluation of electric field effect on interface magnetic properties by propagating sin wave in Pt/Co/MgO structures" *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**, 080309 (2018) 査読有
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.57.080309>
- (5) F. Ando, K.T. Yamada, T. Koyama, M. Ishibashi, Y. Shiota, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, "Microscopic origin of electric-field-induced modulation of Curie temperature in cobalt" *Applied Physics Express*, **11**, 073002 (2018) 査読有
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.11.073002>
- (6) Y. Shiota, T. Nozaki, S. Tamaru, K. Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa,

and Y. Suzuki “Reduction in write error rate of voltage-driven dynamic magnetization switching by improving thermal stability factor”
Applied Physics Letters, **111**, 022408 (2017) 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4990680>

[学会発表] (計 21 件)

- (1) 塩田 陽一 他, “Magnetization compensation temperature and field-driven domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO layer”
第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019 年
- (2) 石橋 未央 他, “Spin wave propagation in synthetic antiferromagnets”
International School on Spintronics and Korea-Japan Spintronic Workshop (国際学会), 2019 年
- (3) 粕川 周平 他, “Electric Field Effect on Propagating Spin Wave in YIG Thin Films”
2019 Joint MMM-Intermag (国際学会), 2019 年
- (4) 安藤 冬希 他, “反転対称性の破れた Nb/V/Ta 人工格子の作製とその超伝導”
日本物理学会 2019 年春季大会, 2019 年
- (5) 船田 晋作 他, “フェリ磁性体 GdCo におけるスピン波測定”
日本物理学会 2019 年春季大会, 2019 年
- (6) 石橋 未央 他, “人工反強磁性体におけるスピン波伝搬”
日本物理学会 2019 年春季大会, 2019 年
- (7) 安藤 冬希 他, “Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film”
International Conference on Magnetism (ICM) 2018 (国際学会), 2018 年
- (8) 石橋 未央 他, “Electric field effect on exchange interaction with ionic liquids in Co ultra-thin film”
International Conference on Magnetism (ICM) 2018 (国際学会), 2018 年
- (9) 安藤 冬希 他, “Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film”
23rd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS) (国際学会), 2018 年
- (10) 石橋 未央 他, “Electric field effect on exchange interaction with ionic liquids in Co ultra-thin film”
23rd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS) (国際学会), 2018 年
- (11) 安藤 冬希 他, “電極計上を利用した Pt/Co 薄膜における磁区の電界書込み”
日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年
- (12) 粕川 周平 他, “YIG 薄膜におけるスピン波伝播の電界効果”
日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年
- (13) 塩田 陽一 他, “Spin wave propagation in sputter-deposited YIG nanometer films”
Intermag 2018 conference (国際学会), 2018 年
- (14) 塩田 陽一 他, “Spin wave propagation in sputter-deposited YIG nanometer films”
第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年
- (15) 安藤 冬希 他, “Pt/Co 薄膜におけるキュリー温度の電界変調の微視的起源”
日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年
- (16) 石橋 未央 他, “イオン液体を用いた Co 超薄膜における交換相互作用の電界効果”
日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年
- (17) 粕川 周平 他, “Pt/Co/MgO 薄膜におけるスピン波伝搬の電圧変調”
日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年
- (18) 塩田 陽一 他, “Evaluation of write error rate for voltage-driven dynamic magnetization switching”
第 78 回応用物理学会学術講演会 (招待講演), 2017 年
- (19) 安藤 冬希 他, “Electrical control of exchange interaction in ultrathin Pt/Co film”
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年
- (20) 安藤 冬希 他, “Electric field effect on exchange interaction in ultrathin Pt/Co film”
2017 MMM Conference (国際学会), 2017 年
- (21) 塩田 陽一 他, “Voltage-induced perpendicular magnetic anisotropy change and switching in Ta/Co_xFe_{100-x})₈₀B₂₀ multilayers”
第 64 回春季応用物理学会, 2017 年

[その他]

ホームページ等

<http://rdb.kuicr.kyoto-u.ac.jp/researchers/view/285/ja>

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者
なし

※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。