科学研究費助成事業

6 月 1 0 日現在 平成 27 年

研究種目: 研究活動スタート支援 課題番号: 25889003

研究成果報告書

研究課題名(和文)スピン波を用いた新規スピン流-電流変換機構の開拓

研究課題名(英文)Exploration of novel spin-charge conversion due to spin waves

研究代表者 井口 亮 (Iguchi, Ryo)

機関番号: 11301

研究期間: 2013~2014

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号:40707717

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文):強磁性金属中のスピンの集団運動であるスピン波は伝導電子と強く結合している。本結合を 利用できる新たなスピン-電流変換原理の研究を行った。強磁性金属へのスピン注入とそれに伴う起電力を測定し、注 入するスピン、磁化および電圧測定方向の三方向の関係より調べ、スピン由来の新たな起電力を観測した。起源の特定 のための精度向上に向けてマイクロ波の導入を検討し、この際に必要となるマイクロ波に起因する起電力の分離法を確 立した。

研究成果の概要(英文):In ferromagnetic metals, a spin wave, a collective motion of magnetic moments, strongly couples with conduction electrons. A novel method for spin-charge conversion based on the coupling is studied. We found an unconventional voltage related to injected spins in a ferromagnetic metal. The voltage measurements were done by changing spin polarization, magnetization, and electrodes directions. For further clarification, we considered use of microwave to excite spin waves and established a method for separating voltages due to microwave and others.

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 スピン流

1.研究開始当初の背景

近年、情報の処理や通信の重要性は伸び続 けており、その機能を実現する電子デバイス には高性能化と低消費電力化が同時に求め られている。このような電子デバイスを実現 すべく、電子のスピン角運動量を積極的に利 用するスピントロニクスに注目が集まって いる。スピントロニクスにおける重要な概念 の一つに、スピン角運動量の流れであるスピ ン流がある。電子の持つ電荷ではなく、スピ ン角運動量のみの流れを用いることで、従来 の電流にはない低損失伝送や低電力下での 生成が期待できる。これらは、強磁性絶縁体 におけるスピン角運動量の集団励起である スピン波を用いたスピン角運動量輸送や、温 度勾配によるスピン流の生成現象など、その 利点が実証されている。スピン角運動量を用 いる情報処理や通信デバイスを形成する上 では、従来の電子デバイスとの相補的な統合 が欠かせない。このためには、スピン角運動 量と電気信号の変換が重要であり、本変換を 効率的に実現する要素技術の開発が重要な 課題となっている。現在まで、スピン流から 電流への変換は逆スピンホール効果に依る ところが大きく、材料の選択性は限られてい る。次世代のスピンデバイス実現へ向けては、 スピン流-電流変換技術の更なる開拓が必要 とされる。

2.研究の目的

本研究では、スピン角運動量(以下、スピン) の流れであるスピン流の電気的検出を可能 とする新しい原理の開拓を目指す。そこで、 強磁性金属における局在電子スピンと伝導 電子スピンの結合に着目した。強磁性金属に おいては、スピンを担う媒体として、局在電 子と伝導電子があり、これらは交換相互作用 により強く結合している。局在-伝導電子スピ ン間の交換結合は、局在電子スピンが形成す る集団励起のスピン波と伝導電子流の混成 を引き起こす。この混成により、スピン波を 変調すれば、電流が生成されることが期待で きる。そこで、強磁性金属におけるスピン波 を外部より注入するスピン流により変調し、 電流を生成するという、新たな原理によるス ピン流-電流変換機構の探索を行った。

3.研究の方法

強磁性金属におけるスピン波が伴う伝導電 子流を活用したスピン-電気変換においては、 注入するスピン流とスピン波の間の結合が 重要となる。スピン波には様々なモードが存 在するが、本研究では静磁モードの表面スピ ン波 (Magneto Static Surface Wave) に着 目した。これは平板上の系の面内に外部磁場



図 1. 実験系の模式図。試料への光軸の射 影方向を x, 垂直な方向を y とした。

を印加した際に存在するモードで、その伝播

方向は系の表面の法線ベクトルと外部磁場 の外積方向ただひとつに定まることが知ら れている。この表面スピン波は名前の通り表 面に局在しているため、強磁性金属平板構造 において、片方の表面にスピンを選択的に注 入することで局在する表面スピン波の変調 が期待でき、電流の生成が予想される。 これを実現すべく、本研究では実験系として、 強磁性金属/半導体構造を選んだ。強磁性金 属層へのスピン注入に向けて、円偏光照射に よる半導体 n 型 GaAs 中でのスピン蓄積生成 効果を利用する。n型 GaAs は価電子帯のバン ドがスピン軌道作用により分裂しており、選 択則に起因して、偏光の回転方向に対応した スピンを有する電子が伝導帯に励起される。 GaAs においては、伝導帯の電子と価電子帯の 電子でスピン緩和時間が異なっており、これ がスピン蓄積を形成する起源となっている ことが先行研究で明らかにされている。この スピン蓄積は、伝導体/GaAs 構造においては、 伝導体へのスピン流を駆動する。本研究では この伝導体層に強磁性金属を用いる構造と なっている。

試料にはスピン波伝搬特性を考慮して、Fe を強磁性層として用いることとし、Fe/GaAs 構造の作製を行った。Fe 層の形成には電子ビ ーム蒸着を用い、5 mm 角の試料全体に成膜し た。また GaAs 基板には、Si ドープでドープ 濃度は3.5x10¹⁸[1/cm⁻³]の(100)配向基板を用 いた。このとき、光の吸収定数を考慮し、Fe 層の厚さは4 nm とした。また、キャップ層 としてAIを2 nm 成膜してある。電子スピン 共鳴装置を用いた強磁性共鳴測定の共鳴磁



図 2. 縦カー効果による磁化過程の測定結果

場および吸収線幅から、結晶磁気異方性およ び緩和定数を評価した。成膜に際しては複数 の条件を試み、最も緩和定数の良いものを採 用した。

スピン注入のため、試料には波長 670 nm の レーザーを照射した。図1に測定系の概観を 示した。このとき、偏光面は偏光子および4/

波長板および光弾性変調器を用いて制御 した。入射角は、スピンが効率的に注入され ると計算された 65 度とした。試料への入射 にあたってはレンズで集光し、電極に光が当 たることを避けることで光起電力の影響を 抑制した。試料より反射された光の電力はパ ワセンサーを用いて測定した。

スピン注入に由来する電気信号を測定する ため、ロックインアンプを用いた測定系を用 いた。強磁性金属層と電圧計との接続はワイ ヤーボンディングを利用して行った。スピン 由来の信号を分離するため、n型 GaAs におい て生成されるスピン蓄積の分極方向を入射 光の偏光面の回転方向の切り替えにより制 御し、その差をスピン由来の起電力として評 価した。n 型 GaAs において生成されたスピン 蓄積が、強磁性金属/GaAs 構造において強磁 性金属層へ流れることで、強磁性金属層にお いて起電力が発生する。また、本研究におい ては、入射スピン流の分極方向の自由度に加 え、起電力の方向と強磁性金属の磁化の角度 という二つの自由度がさらにある。これらを 調べるべくそれぞれの配置における磁場依 存性、起電力方向依存性を調べ、本研究で探 索する原理による起電力の実証を試みた。

また、マイクロ波による表面スピン波の励 起を行うことで、より高精度な測定が実現さ れると予想し、マイクロ波印可時における電 圧応答を導くことで、新原理による起電力の 分離を可能にすることを試みた。

4.研究成果

まず、試料の磁化ダイナミクス特性を調べ た。厚さ10 nmのFeをGaAs(100)基板に成膜 し、X-band 電子スピン共鳴装置を用いて強磁 性共鳴スペクトルを測定した結果、磁場 H=67 mT で共鳴し、半値全幅は 5.1 mT であること がわかった。外部磁場は面内[100]に沿って 印加した。線幅より Gilbert 緩和定数は 0.04 と求まった。厚さ4 nm の Fe を形成した際に は、共鳴磁場は H=101 mT に上昇した。これ は先行研究と一致しており、膜厚による垂直 磁気異方性の変化であると考えられる。緩和 定数もおよそ三倍に上昇しており、これも先 行研究と一致している。また共鳴磁場の面内 角度依存性により、立方対象異方性があるこ とがわかり、多少の配向成長があることが推 察された。以降の測定では容易軸の[100]に 沿って磁場を印加した。

Fe/GaAs 構造での Fe の磁化過程は縦カー効 果測定により調べた。縦カー効果の信号を図



図 3. 磁場 x 方向印可時の測定結果。

(a) x方向起電力(b) y方向起電力

2 に示す。入射角は65 度とした。磁場を10 mT から-10 mT まで掃引したところ、強磁性層に 由来するヒステリシスが確認された。磁場の 強さがおよそ3 mT で磁化反転し、5 mT 程度 で十分に飽和することがわかった。起電力測 定時に、本磁化過程との対応を議論した。 Fe/GaAs 構造において、Fe 層と GaAs 層間の 電圧電流特性の評価を行った。Fe 層へのスピ ン注入に欠かせないショットキー構造が形 成されていることを確認した。電圧電流特性 は先行研究にある Pt/GaAs 構造とほぼ同じで あり、効率的なスピン注入が期待される。ま た、ショットキー障壁により、強磁性金属層 での電気信号は短絡されることなく、スピン 由来による起電力の測定が可能となる。

次に、レーザー光照射によるスピン由来の 起電力測定を行った。実験では、磁場印加方 向および起電力測定方向は、それぞれ光入射 面に対して平行(x)および垂直(y)の二方向 とし、計四つの構成での測定を行った。光弾 性変調器(PEM)を用いて、高速で時計回りお よび反時計回りの円偏光を切り替えること により、ドリフトの影響が少なくなる高精度 の測定系を構築した。電圧の測定にはロック インアンプを用い、周波数は PEM の基本周波 数とした。

図3に入射方向と磁場印加方向(x)が平行とした平行配置での起電力を示す。入射電力は 3.3 mW とした。図3(a)にあるように、入射 方向と電圧測定方向(x)が平行のとき、磁化 過程に対応した起電力の発生が認められた。 一方で、(b)に示す電圧測定方向を v とした



図 4. 磁場 y 方向印可時の測定結果。

(a) x 方向起電力(b) y 方向起電力

ときは磁化過程に対応した起電力は生じて いない。表面スピン波の伝播方向は磁場に対 して垂直であることから、y 方向起電力が期 待されたが、予想に反して x 方向へ現れた。 また、(b)の配置では、GaAs/Fe 系における逆 スピンホール効果による起電力が生じる。こ のため、二つの起電力が打ち消し合っている 可能性も挙げられる。

図4に入射方向と磁場印加方向(y)を垂直と した垂直配置での起電力を示す。図4(a)およ び図 4(b)は、入射方向と電圧測定方向(x お よび y)が平行および垂直のとき起電力であ る。本配置においても、x方向起電力が y方 向起電力と比較して磁化過程に優位に依存 している結果が得られた。ただし、磁化の角 度が 90 度異なることから、平行配置とは異 なる起電力の起源をもつと考えられる。ここ では、磁場印加方向が y方向であることから、 x 方向電圧が本研究で目標とした起電力を含 む。また、対称性から逆スピンホール効果に よる寄与はx方向電圧には現れない。このこ とから、図4(a)に示す起電力は、スピン注入 による表面スピン波の変調により生成され た可能性を示唆している。しかしながら、よ り詳細な解明が必要であり、それには更なる 測定精度の向上が求められる。

測定精度向上法の一つに、マイクロ波によ る磁化ダイナミクスの励起が挙げられる。し かし、マイクロ波で励起した際には、期待さ れる効果に付随して、新しい起電力が重畳す るために測定が困難になることが知られて いた。マイクロ波と磁化ダイナミクスが電流

磁気効果による結合により整流効果が現れ るために、直流起電力が現れる。このため、 マイクロ波によるアシストを行う際には、マ イクロ波由来の起電力の分離を精度よく行 う必要があった。本研究では、より一般的な 磁化のエネルギーから出発し、磁化ダイナミ クスを Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式に 基づいて解析することで、面内磁気異方性が ある系でも適用可能な起電力の詳細な挙動 を導出した。また、近年発見されたスピンホ ール磁気抵抗効果を含むことで、より広範な 系での寄生起電力の挙動を明らかにできた。 本計算結果は、磁化ダイナミクスにより生じ た逆スピンホール効果の定量評価手法の確 立に展開することができ、実験的にもその有 用性を明らかにすることができた。本分離手 法を活用すれば、マイクロ波励起を組み合わ せた測定においても、異なる原理によるスピ ン由来の起電力の高精度な分離が可能であ り、円滑な研究の展開が期待される。

5.主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

S. M. Haidar, <u>R. Iguchi</u>, A. Yagmur, J. Lustikova, Y. Shiomi, and E. Saitoh. "Reducing Galvanomagnetic Effects in Spin Pumping Measurement with Co75Fe25 as a Spin Injector." Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 117, no. 18, 183906 (2015). http://dx.doi.org/10.1063/1.4921359

J. Lustikova, Y. Shiomi, Z. Qiu, T. Kikkawa, <u>R. Iguchi</u>, K. Uchida, and E. Saitoh. "Spin Current Generation From Sputtered Y3Fe5012 Films." Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 116, no. 15, 153902 (2014).

http://dx.doi.org/10.1063/1.4898161

Ryo Iguchi, Koji Sato, Daichi Hirobe, Shunsuke Daimon, and Eiji Saitoh, " Effect of Spin Hall Magnetoresistance Spin Pumping on Measurements Insulating in Systems." Magnet/Metal Applied Physics Express, 査読有, vol. 7, no. 1, 013003 (2014). http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.013 003

〔学会発表〕(計 1件)

<u>Ryo Iguchi</u>, S. M. Haidar, Ahmet Yagmur, Jana Lustikova, Yuki Shiomi, and Eiji Saitoh, "Spin pumping and rectification effect driven by ferromagnetic resonance in cavity", IEEE International Nanoelectronics Conference 2014, 2014 年 7 月 29 日, Hokkaido Univ, Japan.

- 6 . 研究組織
- (1)研究代表者
 井口 亮 (Iguchi, Ryo)
 東北大学・金属材料研究所・助教
 研究者番号: 40707717

(3)連携研究者

佐藤 浩司 (Sato, Koji) 東北大学・原子分子材料科学高等研究機 構・助教 研究者番号:70708114