

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889003

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)

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

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使用した。

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ー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 と求めた。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 の磁化過程は縦力一効果測定により調べた。縦力一効果の信号を図

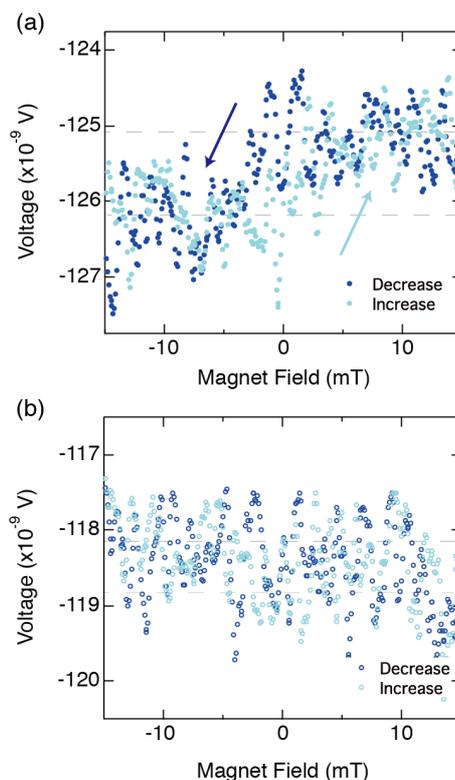


図 3. 磁場 x 方向印可時の測定結果。

(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 y とした

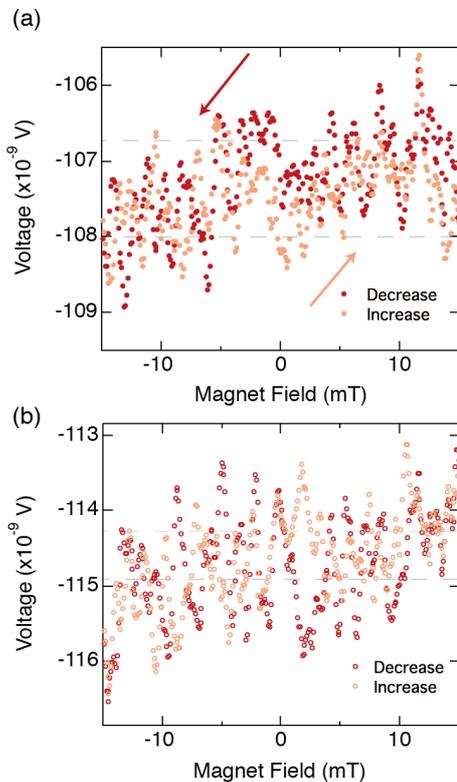


図 4. 磁場 y 方向印可時の測定結果。

(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, R. Iguchi, 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, R. Iguchi, 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 on Spin Pumping Measurements in Insulating Magnet/Metal Systems." *Applied Physics Express*, 査読有, vol. 7, no. 1, 013003 (2014).
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.7.013003>

[学会発表](計 1 件)

Ryo Iguchi, 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