

スピン流を用いた超低電力量子情報伝送技術の研究開発 (062103005)

Low power information transmission technology using spin current

研究代表者

齊藤英治 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科
(現 東北大学金属材料研究所)

Eiji SAITOH Department of Applied Physics and Physico-Informatics Keio University
(Present address: Institute for materials Research, Tohoku University)

研究期間 平成 18 年度～平成 20 年度

概要

従来の電子技術において、情報の処理や伝送は電流によって実現されていた。スピンの流れ 即ち「スピン流」は電流に替わる新しい情報伝送手段であり、量子情報を電力損失ゼロで運ぶことが可能である。しかしスピン流は、汎用的検出手法が皆無であったため、その観測すら困難であった。申請者らが開拓してきた逆スピンホール効果や磁気構造共鳴現象は、スピン流を生成し敏感に検出する稀有な手法である。本研究は、これらの効果を武器に、スピン流情報デバイスの基本原理を世界に先駆けて構築するものである。本研究により、不純物をドーブした Pt を利用したスピン流の高感度検出技術を開拓し、スピンポンプによる局所スピン流生成の検出、超スピン流の検出に成功した。

Abstract

In conventional electronics devices, information is carried by charge currents, flows of electron's charge. A spin current, a flow of electron's spin is a new carrier of information in solid, which enables information transmission at very low energy consumption. However, a spin current is difficult even to be detected. We have developed a spin-current device physics using spin-detecting methods: the inverse spin-Hall effect and magnetic resonance, which we discovered recently. We have enhanced the spin detection efficiency using the inverse spin-Hall effects by doping impurities to Pt and, using this spin-Hall detector, we detected local spin pumping and spin super current.

1. まえがき

従来の電子技術において、情報の処理や伝送は電流によって実現されていた。電流は 電子の持つ電荷の流れであるが、一方で 電荷は流れることなく スピンのみが流れている状態を作り出すことも可能で、これは「純スピン流」と呼ばれている。純スピンの最大の特徴は、電流とは異なり オームの法則に相当したエネルギー散逸機構が無く、更に量子力学的重ね合わせ状態を生成することが容易である点である。従って、純スピン流を用いることによりエネルギーロス無しの情報伝送・量子情報伝送が実現される。このようなスピン流の途方もない可能性は予想されていたが、純スピン流は 汎用的検出手法が皆無であったため、その観測すら困難であった。

しかし最近になって、申請者らは純スピン流が電流に変換される新しい現象:逆スピンホール効果 を見出し、これを利用することで室温でも高感度なスピン流検出が可能であることを発見した。逆スピンホール効果のこれまでに無い大きな特徴は、スピン蓄積を経ること無くスピン流を直接電流に変換することであり、量子情報スピントロニクスと従来のエレクトロニクスとのインターフェースとして極めて有望である。

上記の進展によって、スピン流利用技術を開拓する道が開けた。本研究の目的は、上記研究成果が揃った千載一遇のチャンスを活かし、ナノ変調構造金属中におけるスピン流・超スピン流(平衡状態で流れる純スピン流)の生成・検出・演算の基礎物理を解明し、世界に先駆けてスピン流を利用した新しい情報技術を開拓するものである

2. 研究内容及び成果

(a) スピントルクメータ効果の開発

NiFe/Pt の Pt 層に電流を流しながら強磁性共鳴の系統的測定を行うことにより、電流印加(スピン流注入)により磁化緩和が変調されることを見出した。重要なことは、この磁化ダイナミクス変調現象において、ダンピング定数の変調量はスピン流に正比例し、その比例定数は磁化や試料体積などの巨視的パラメータのみによって構成されていることである。このことは、このダイナミクス変調効果をスピン流の定量手段として利用できることを示しており、この効果を用いた「スピン流計」を作成可能である。スピン流を定量できる現象は、本効果が世界ではじめてである。

(b) スピン流変調効果の探索

複数のスピン流源を組み合わせ 複数のスピン流を干渉させることで、スピン流を変調することができる。二つのスピン流源を持った NiFe/Pt/Ni 三重膜構造を作成し、逆スピンホール効果を利用したスピン流測定を行い、二つのスピン流の(横成分)干渉効果の観測に初めて成功した。

(c) スピン流生成測定とスピン流検出系の最適化

スピン軌道相互作用の大きな貴金属系を中心にスピンホール効果を系統的に測定したところ、不純物濃度の高い Pt が極めて強いスピンホール効果を示すことを明らかにした。特に、不純物濃度の高いアモルファス Pt において、0.01 のスピンホール角が観測され、これはこの時点で世界中の諸グループで観測されたスピンホール係数の中で最も高い値であった。スピン流の効率的な生成及び検出のためのデータを収集し、金属中のスピンホール効果利用に

適した材料を見出すことに成功した。

(d) 各種磁気ダイナミクスからのスピン流生成の比較

金属複合膜について、スピンポンプによって生じたスピン流がもたらす逆スピンホール電圧の測定を、磁場角度を変えながら系統的に行った。その結果、スピンポンプ効率（磁化歳差運動の軌跡（磁化の先端が描く楕円）の面積の比例することが実験的にも理論的にも示された

以上により、スピンポンプの効率を大きくするためには、スピン緩和定数と磁化軌道の面積を最大化すれば良い、という基本的な指針が得られた。この最的化により、 10^8 spins/sm² のスピン流の検出に成功した。

また、磁性体を 50nm 幅の細線と膜を含む構造に微細加工することで磁気異方性を制御し、強磁性共鳴磁場の空間分布を与えることで、試料の任意の位置からスピン流を発生させることに成功した。

(e) 強磁性 NiFe 薄膜におけるスピンゼーベック効果

温度勾配によるスピン流、スピン圧生成を Pt 薄膜中の逆スピンホール効果を用いて観測することに成功した

（Nature 誌に論文が掲載された）。温度勾配下の強磁性金属には、温度勾配に沿った方向に正味のスピン流が誘起されることを予言した。これがスピンゼーベック効果である。一様な温度勾配が誘起するスピン圧は線形分布となり、高温側、低温側ではそれぞれ逆符号となる。このような分布のスピン圧が、スピンゼーベック効果の特徴である。

本研究では、Pt 薄膜中の逆スピンホール効果を用いて、スピンゼーベック効果によって生じたスピン圧を観測した。逆スピンホール効果を用いることで、スピン圧を高感度かつ電氣的に検出することができた。

本研究で初めて観測されたスピンゼーベック効果は、スピントロニクスデバイスにおけるスピン流源としての利用が期待される。また、スピンゼーベック効果の有するマクロスケールにスピン流を生成できるという稀有な特徴は、スピン流物理を実験的に調査するための有用な手段の 1 つとなるだろう。特に、スピンゼーベック効果によるスピン流は長さに関する制限は原理的にないことが重要であり、本実験も 10mm の長距離にわたってスピン流を流すことに成功している。

(f) スピン流変調技術の開発及びスピン流の伝送・検出

磁気異方性のあるフェライト系酸化物にスピン流を試料両端から注入し、スピン相互トルクを利用したスピン波スピン方向制御素子試作を行った。第 2 のスピン波の強度に対し出力スピン波強度はスイッチング挙動を示し、スピ

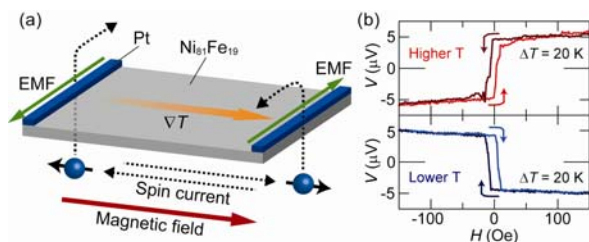


図 1 (a) スピンゼーベック効果の概念図。(b) NiFe におけるスピンゼーベック効果信号。

ン波の変調が実現されたことを示している。

以上により、本研究で設定した目標は、予定以上の成果で達成された。本研究により、スピン流を利用したスピン情報技術のルートのひとつが確立されたと言える。

3. むすび

本研究により、スピン流利用技術の基礎が築かれ、超低損失や高量子コヒーレンス、低配線遅延効果を活かしたスピン流の応用研究が加速し、スピン流を駆使したスピントロニクスデバイスが実現されることが期待できる。特に、逆スピンホール効果を発見し、これをスピン流検出原理として現実的に使えるようなレベルまで引き上げたことのインパクトは大変大きい。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Ando, S. Takahashi, K. Harii, K. Sasage, J. Ieda, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Electric manipulation of spin relaxation using spin-Hall effect”, Physical Review Letters, Vol.101, No.98, pp036601_1-036601_4, July, 2008
- [2] K. Ando, Y. Kajiwara, S. Takahashi, S. Maekawa, K. Takemoto, M. Takatsu, and E. Saitoh, “Angular dependence of inverse spin-Hall effect induced by spin pumping investigated in a Ni81Fe19/Pt thin film”, Physical Review B, Vol.78, No.1, pp014413_1-014413_6, July, 2008
- [3] K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshihara, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Observation of the spin-Seebeck effect”, Nature, Vol.455, No.7214, pp778-781, October, 2008

【申請特許リスト】

- [1] 安藤和也、針井一哉、榎耕平、齊藤英治、「磁気抵抗型ランダムアクセスメモリ」、日本、平成 19 年 10 月 31 日
- [2] 梶原瑛祐、内田健一、安藤和也、齊藤英治、「スピントロニクスデバイス及び情報伝達方法」、日本、平成 20 年 6 月 5 日
- [3] 内田健一、梶原瑛祐、中山裕康、齊藤英治、「熱電変換素子」、日本、平成 20 年 6 月 12 日

【受賞リスト】

- [1] 齊藤英治、サー・マーティンウッド賞、“スピン流生成・検出技術に関する研究”、2008 年 11 月 12 日
- [2] 齊藤英治、丸文研究奨励賞、“スピン流生成・検出のための基礎物理現象の開拓”、2009 年 3 月 4 日
- [3] 受賞決定 齊藤英治、IUPAP Young Scientist Award (International Union of Pure and Applied Physics), “For the fabrication of highly original nanostructures and for the discovery of important spin transport phenomena, including the spin-Seebeck effect and the inverse spin-Hall effect.”、2009 年 7 月

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.saitoh.appi.keio.ac.jp/>
研究の概要。