

絶縁体中のスピン流を用いた超低電力量子情報伝送・演算機能デバイスの研究開発 (102102001)

Low power information transmission and processing device using spin current in insulator

研究代表者

安藤和也 (30579610) 東北大学金属材料研究所 (2111301000)

Kazuya Ando Institute for Materials Research, Tohoku University

研究期間 平成 22 年度

概要

物質中のスピンの流れ「スピン流」は電流に替わる新しい情報伝送手段である。ジュール熱による莫大なエネルギー損失が問題となる電流に対し、スピン流にはこれに相当するエネルギー散逸機構がなく、スピン流の利用により超低電力電子デバイスが実現可能となる。本研究は、スピン流の生成・検出を中心としたスピン流情報デバイスの基礎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、スピン流の電氣的検出手法が体系化され、これを用いて極めて汎用的なスピン注入法を確立した。

Abstract

A spin current, a flow of spins in a solid, is a new carrier for information transmission in a solid. In contrast to conventional electronic devices, which show the huge energy loss due to Joule heating, spin currents allow the achievement of electronic devices at very energy consumption. This work develops a base of spin-current device physics: the generation and detection of spin currents. We have developed an electric method for detecting spin currents and a way for versatile spin injection.

1. まえがき

CMOS に代表される現代の電子情報処理デバイスは電流により駆動されている。しかし電流による情報伝送・演算にはジュール熱による莫大なエネルギー損失が伴い、素子構造微細化の限界とともに、極めて本質的な問題となっている。電子には電荷・スピンの自由度があり、その両方に情報を担わせることができる。電流に代わる次世代省エネルギー電子情報技術の担い手として、電子のスピンの流れ「スピン流」がある。ジュール熱による深刻なエネルギー損失問題を抱える電流に対し、スピン流にはオームの法則に相当するエネルギー散逸機構がなく、且つ量子情報を担わせることができる。従ってスピン流を利用することにより、ジュール熱によるエネルギーロスの全くない量子情報輸送が可能となり、現在の計算機アーキテクチャーを原理から変革する省エネルギー量子情報デバイスが実現できる。

スピン流による情報伝送・処理デバイスを構築するためには、スピン流の生成・検出を基幹とするスピン流利用技術の確立が不可欠である。金属・半導体でしか利用できない電流に対し、スピン流は絶縁体中でも利用することが可能であるという著しい特長を有する。絶縁体中のスピン流は金属・半導体のスピン流と比較して伝送損失が極めて小さく、且つ高い制御性が期待される。本研究は、スピン流の生成・検出の基礎学理を解明し、世界に先駆けてスピン流に基づく情報伝送・処理デバイスの基盤を開拓することで次世代の電子情報技術を切り拓くものである。

2. 研究内容及び成果

(a) スピンポンピング及び逆スピンホール効果によるスピン流生成・検出の体系化

磁化ダイナミクスによるスピン流生成とスピン流検出を系統的に調べ、それぞれの最適条件を開拓した。磁化ダイナミクスによるスピン流生成は磁化歳差運動の軌道によって支配されることを明らかにし、軌道運動を物質・外部磁場により制御することで逆スピンホール効果を用いてこれを実証した。またス

ピン流検出部の試料形状を系統的に変化させ、スピン流検出効率と形状効果の関係を体系化した。スピン流検出部の膜厚（スピン流注入方向）を変化させた場合、スピン流信号は膜厚に反比例し、最適なスピン検出部膜厚は検出部のスピン拡散長程度であることが明らかとなった。さらにスピン流信号が生じる方向及びその垂直方向に形状を変化させた場合のスピン流信号はマクロスケールの試料サイズにおいて電極間距離に比例し、さらにこの垂直方向の試料サイズはスピン流信号と無関係であることが明らかとなった。以上の実験結果を説明する現象論的モデルを逆スピンホール効果モデルと電気回路モデルを組み合わせることで構築し、本研究開発における絶縁体からのスピン流検出に最適なスピン流検出部設計の指針が見出された。

(b) 電界制御可能なスピン注入源

磁化ダイナミクスを用いた極めて汎用的なスピン流注入手法を確立し、これまで不可能であると考えられてきた低抵抗界面を介した高抵抗物質へのスピン流注入を実現した。

スピン流注入にはインピーダンスミスマッチと呼ばれる本質的な問題があり、スピン注入効率が電気抵抗率に支配され、電気抵抗の大きい物質へのスピン流注入は長いスピン流研究の歴史の中で最も重要且つ本質的研究課題であった。これまでに、磁性半導体或いはトンネルバリアの利用により半導体へのスピン注入は可能となっていたが、多くの場合低温での動作に限定されていた。このような非常に精力的な研究にもかかわらず、低抵抗界面でのスピン注入は報告されておらず、室温でのオーミック接合を介した半導体へのスピン流注入は不可能であると考えられてきた。本研究では、磁化ダイナミクスを利用することでスピン偏極キャリアの注入ではなく、キャリアの輸送なしにスピンのみに作用するポテンシャルを与えることで、インピーダンスミスマッチ問題を根本的に回避してスピン流

注入が可能となることを明らかにした。本スピン注入手法は強磁性/常磁性界面での動的な交換相互作用を利用するものであり、さらにこの交換相互作用を電氣的に制御可能であることを示し、電氣的制御可能な極めて汎用的スピン注入手法を体系化した。以上の成果は現在知られている中で最も汎用的且つ効果的なスピン注入源を明らかにしたものであり、今後のスピントロニクス研究に大きな役割を果たすことが期待される。

(c) 絶縁体中スピン流検出の最適化

絶縁体中を伝導するスピン波モードに着目し、スピン流検出効率のモード依存性を調べ、モード選択によりスピン流の極めて高感度な検出が可能となることを示した。

YIG/Pt 接合においてスピンポンピング誘起逆スピンホール効果を精密に調べ、逆スピンホール効果によるスピン流信号がスピン波共鳴モードに極めて強く依存し、且つ表面モードとバルクモードでスピン流検出効率が大きく異なることを見出した。さらにスピン流検出効率は表面モードの場合、モード番号にも強く依存し、高次モードのスピン波スピン流を利用することで、絶縁体中を伝導するスピン流の検出効率を一桁以上向上させることが可能であることを実験的に明らかにした。これは、金属/絶縁体接合におけるスピンポンピングにおいて界面のスピンダイナミクスが支配的であることを示す結果であり、スピン流検出の最適化には表面モードの利用が不可欠であることを表している。

(d) 金属/絶縁体界面における非線形スピン流生成

磁性絶縁体中の非線形現象を利用することでスピン流の非線形生成を実現した。

現代の電気回路が受動素子・能動素子により構成され、電流に対する非線形現象が回路構成において重要な役割を果たしているように、スピン流回路の実現にはスピン流に対する非線形現象が不可欠である。磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネットからのスピンポンピングを系統的に調べることで、これまで知られていた強磁性共鳴に起因するスピン流生成の他に、強磁性共鳴条件から大きく外れた条件でもスピン流が生成されることを逆スピンホール効果を用いることで見出した。本現象を系統的に調べ、このスピン流生成が非線形磁気相互作用を経由したスピンポンピングによるものであることを明らかにした。この非線形磁気相互作用により駆動されるスピンポンピングは励起マイクロ波に対して明確な閾値を示し、この閾値以上で非線形にスピン流が増大することを実証した。このような非線形スピン流生成はスピン流回路構成に必須となるものである。

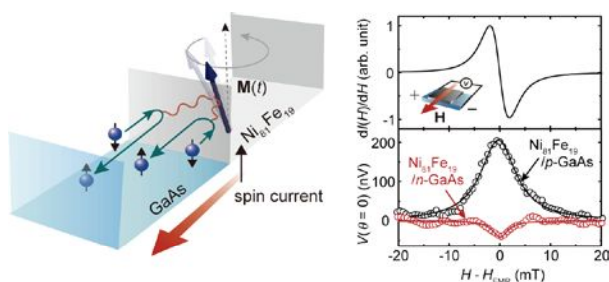


図 1. スピンポンピングを用いた半導体へのスピン流注入と半導体中の逆スピンホール効果を用いた高感度スピン流検出。

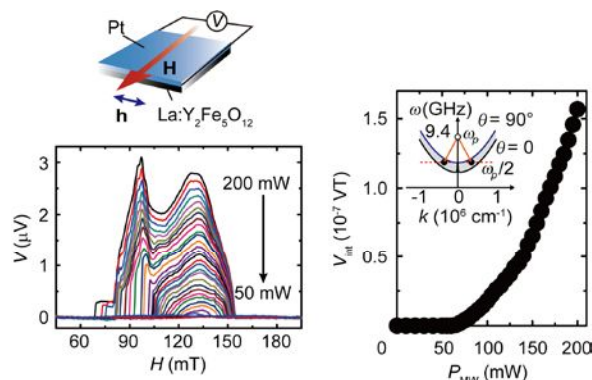


図 2. 非線形磁気相互作用を用いたスピン流の非線形生成と逆スピンホール効果を用いた検出。

3. むすび

本研究により築かれたスピン流利用技術の基礎により、絶縁体中スピン流を利用した情報伝送・処理デバイスへの応用研究が加速し、これを利用したスピントロニクスデバイスの実現が期待される。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, Y. Kajiwara, H. Nakayama, T. Yoshino, K. Harii, Y. Fujikawa, M. Matsuo, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Inverse spin-Hall effect induced by spin pumping in metallic system," *Journal of Applied Physics* vol.109 No.10 pp.103913_1-103913_11 (2011 年 5 月 23 日).
- [2] K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem," *Nature Materials* vol.10 No.9 pp655–659 (2011 年 6 月 26 日).
- [3] K. Ando, T. An, and E. Saitoh, "Nonlinear spin pumping induced by parametric excitation," *Applied Physics Letters* (in press).

【受賞リスト】

- [1] 安藤和也、井上研究奨励賞 “金属薄膜系における電流・スピン流・磁化ダイナミクス相互作用に関する研究”、2011 年 2 月 4 日。
- [2] 安藤和也、インテリジェントコスモス奨励賞、“スピン流を用いた超省エネルギー量子機能デバイスの創出”、2011 年 5 月 16 日。
- [3] 安藤和也、船井研究奨励賞、“磁化ダイナミクス及び光スピンと結合したスピン流物性に関する研究”、2011 年 5 月 28 日。

【報道発表リスト】

- [1] “スピン流 1000 倍超注入に成功”、日刊工業新聞 17 面、2011 年 6 月 27 日。
- [2] “東北大と JAEA 新スピン流注入手法を発見”、化学工業日報、2011 年 6 月 27 日。
- [3] “電子の磁石「スピン」材料に簡単注入東北大超省エネ基板技術に”、日経産業新聞 9 面、2011 年 6 月 28 日。

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www-lab.imr.tohoku.ac.jp/~ando/>