

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360002

研究課題名(和文) p型非磁性半導体におけるスピン流の生成と検出

研究課題名(英文) Generation and detection of spin current in p-type nonmagnetic semiconductors

研究代表者

松倉 文礼 (Matsukura, Fumihiro)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：50261574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,100,000円、(間接経費) 4,830,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性半導体(Ga,Mn)As/非磁性半導体p-GaAsを用い、p-GaAs中にスピン・ポンピングによるスピン流の生成とその逆スピン・ホール効果による電氣的検出が可能であることを示した。観測される電氣的信号には(Ga,Mn)As中の電流磁気効果による信号が重畳しており、その定量的分離手法を確立した。確立した手法はPy/Pt等の金属材料に対しても適用できることを示した。

研究成果の概要(英文)：By using a ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As/nonmagnetic semiconductor p-GaAs, we have succeeded to generate spin current in p-GaAs by spin pumping and to detect it by electrical voltage induced by the inverse spin Hall effect. We have shown that the voltage is also induced by the galvanomagnetic effects in (Ga,Mn)As, and established the method for separating the voltages of different origins. We have shown that the method is applicable to metallic systems such as Py/Pt bilayers.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

半導体には電子が電気伝導を担う n 型半導体、正孔が電気伝導を担う p 型半導体がある。両方を利用して半導体デバイスが作られることが多い。電子はスピンの担体でもあり、スピンの流れ(スピン流)を担うこともできる。半導体中のスピン流は半導体デバイスに新しい自由度をもたらすものとして期待されている。n 型の半導体におけるスピン流の生成と検出に関していくつかの報告がある。

一方で、p 型半導体におけるスピン流に関する報告は殆どない。p 型半導体においては、スピン-軌道相互作用が大きく、スピンの高速に緩和することが一因である。半導体スピントロニクス設計自由度を拓げるためには、p 型半導体におけるスピン流の生成・検出技術の確立が必要である。

2. 研究の目的

- (1) p 型非磁性半導体におけるスピン流の生成と検出
 - (2) 半導体中のスピン流の諸性質の理解
 - (3) スピン流の高効率生成・高感度検出手法の確立
- を目的とした。

3. 研究の方法

非磁性半導体である p 型 GaAs にスピン流を生成し、そのスピン流を検出する。具体的には、強磁性半導体 (Ga, Mn)As と p-GaAs の積層構造を用いて、スピン・ポンピングにより p-GaAs 中に純スピン流(電流を伴わないスピン流)を生成し、そのスピン流を逆スピン・ホール効果を用いて検出した。単結晶 (Ga, Mn)As/p-GaAs の積層構造は分子線エピタキシ法により成長した。参照試料として (Ga, Mn)As 単層構造も成長した。二つの (Ga, Mn)As は同じ磁気特性を有することを確認した。(Ga, Mn)As/p-GaAs 積層構造においては、p-GaAs 表面の両端に、(Ga, Mn)As 単層構造においては (Ga, Mn)As 表面の両端に電圧検出用のオーミック電極を形成した。

スピン・ポンピングにより p-GaAs 中に純スピン流を生成するためには試料に高周波磁界を印加して (Ga, Mn)As 中に強磁性共鳴を誘起する必要がある。そのため試料をマイクロ波共振器に入れ、9 GHz のマイクロ波を照射し、外部磁界を掃引することで (Ga, Mn)As 中に強磁性共鳴を誘起した。強磁性共鳴時にスピン・ポンピングにより p-GaAs 中へ生成された純スピン流は、逆スピン・ホール効果によって生じる試料両端のオーミック電極間の電圧によって検出した。印加磁界角度をパラメータとした測定も行った。同様の測定を純スピン流の生成を伴わない (Ga, Mn)As 単層でも行い、マイクロ波の電界成分によって誘起される電流磁気効果により発生する電圧についても調べた。

ランダウ-リフシッツ-ギルバート (LLG) 方程式により磁化ダイナミクスを考慮した上

で得られた信号を解析することで、逆スピン・ホール効果と電流磁気効果により発生する電圧の分離方法を確立した。

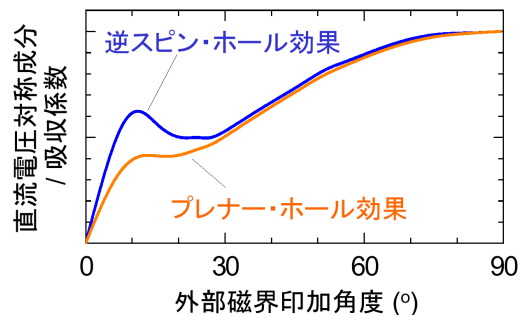
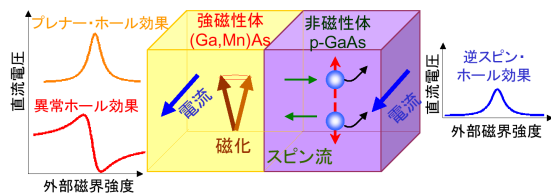
半導体積層構造で確立した手法は、Py/Pt 等の金属材料にも適用可能な一般的手法となることを示した。

4. 研究成果

強磁性半導体 (Ga, Mn)As/ 非磁性半導体 p-GaAs 積層構造を対象に、半導体積層構造においてもスピン流の生成とその電氣的検出が可能であること、また電流磁気効果が観測される電圧にどのような影響を与えているかを明らかにした。スピン流の生成と検出はスピントロニクスにおける基盤技術である。非磁性体中へのスピン・ポンピングによる純スピン流の生成と逆スピン・ホール効果によるその電氣的な検出は金属積層構造を中心に研究が行われてきた。スピン・ポンピングによるスピン流の生成には強磁性体にマイクロ波を印加し、マイクロ波磁界により強磁性共鳴を誘起する必要がある。マイクロ波は電界成分も有するため、強磁性体中に電流磁気効果も誘起する。逆スピン・ホール効果により発生する直流電圧を検出するためには、それに重畳する電流磁気効果による直流電圧についての理解が必要とされる。

図(上)に測定に用いた素子の模式図と、外部磁界を掃引した際に強磁性共鳴磁界付近で生じると予測される逆スピン・ホール効果と電流磁気効果(プレナー・ホール効果及び異常ホール効果)により発生すると予測される直流電圧の計算結果を示す。実際の実験においても、これらの電圧が重畳した形状の電圧を観測した。逆スピン・ホール効果をプレナー・ホール効果による電圧は同一の形状を持つため、電圧形状からだけではこれらの効果により生じる信号の分離は不可能である。

図(下)に逆スピン・ホール効果とプレナー・ホール効果により発生する電圧の外部磁界角度依存性の計算結果を示す。電圧の外部



印加磁界角度依存性が異なることを利用して、二つの効果による電圧の分離が可能であることを明らかにした。(Ga, Mn)As/p-GaAs 半導体積層構造においては、逆スピン・ホール効果により発生する電圧は電流磁気効果により発生する電圧の 10%以下であり、純スピン流の定量的評価には電流磁気効果の定量的評価を必要とすることを示した。また同様の解析手法は、スピン・ポンピングと逆スピン・ホール効果の研究において広く利用されている Py/Pt 金属において観測される電圧に対してでも適用できることを示した。

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 4 件)

- ①L. Chen, S. Ikeda, F. Matsukura, and H. Ohno,
DC voltages in Py and Py/Pt under ferromagnetic resonance,
Applied Physics Express, Vol. 7, 013002 (4 pages) (2014). 査読有
- ②S. Kanai, M. Yamanouchi, S. Ikeda, Y. Nakatani, F. Matsukura, and H. Ohno,
Electric field-induced magnetization switching in CoFeB-MgO - static magnetic field angle dependence,
IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 50, 4200103 (3 pages) (2014). 査読有
- ③S. Kanai, Y. Nakatani, M. Yamanouchi, S. Ikeda, F. Matsukura, and H. Ohno,
In-plane magnetic field dependence of electric field-induced magnetization switching,
Applied Physics Letters, Vol. 103, 072408 (4 pages) (2013). 査読有
- ④L. Chen, F. Matsukura, and H. Ohno,
Direct-current voltages in (Ga, Mn)As structures induced by ferromagnetic resonance,
Nature Communications, Vol. 4, 3055 (6 pages) (2013). 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ①L. Chen, F. Matsukura, and H. Ohno,
DC voltages in (Ga, Mn)As and its adjacent p-GaAs under ferromagnetic resonance,
Seventh International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (Spintech VII), Chicago, USA, July 29-August 2, 2013.
- ②F. Matsukura, L. Chen, and H. Ohno,
dc voltages induced by magnetization dynamics in (Ga, Mn)As-based structures,
The 2nd AIMR-CNSI Workshop, Sendai, Feb. 22, 2013.
- ③F. Matsukura,

Electromotive forces induced by magnetization dynamics in (Ga, Mn)As,
WUN-SPIN2012, Sydney, Australia, July 23-25, 2012. (招待講演)

- ④L. Chen, F. Matsukura, C. P. Lin, and H. Ohno,
Electrical signal related to ferromagnetic resonance in (Ga, Mn)As/p-GaAs bilayer structure,
The 9th RIEC International Workshop on Spintronics, Sendai, May 31-June 2, 2012.
- ⑤F. Matsukura, L. Chen, C. P. Lin, M. Yamanouchi, and H. Ohno,
Electromotive forces in (Ga, Mn)As-based structures,
The 9th RIEC International Workshop on Spintronics, Sendai, May 31-June 2, 2012. (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.ohno.riec.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松倉 文礼 (MATSUKURA, FUMIHIRO)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授
研究者番号：50261574

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :