

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790037

研究課題名(和文)磁性半導体界面におけるスピン流生成とスピン流による物性制御

研究課題名(英文) Generation of spin current at ferromagnetic semiconductor interface and manipulation of physical property due to spin current

研究代表者

中山 裕康 (Nakayama, Hiroyasu)

慶應義塾大学・理工学部・特任助教

研究者番号：30727011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：金属/強磁性体界面におけるスピン流生成とスピン流を介した物性制御に取り組んだ。スピンポンピングを用いたスピン流生成について、強磁性半導体と金属間のスピン流生成を実証することができたものの、スピン流誘起物性制御の観測には至らなかった。常磁性金属Ptについては、高調波ホール電圧測定によるスピン流の精密測定を行った。その結果、Ptにおいて生成されるスピン流量の温度依存性は小さいことが明らかとなった。このような高調波ホール電圧測定を遂行していく中で、界面スピン蓄積によって駆動されるスピン流の影響を考慮する必要が示された。本研究で得られた知見は、今後のスピン流の研究に対して役立つものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigate generation of spin current at a metal/ferromagnet semiconductor interface. By conducting angular-dependent spin pumping measurements, we successfully separate the voltage induced by the inverse spin Hall effect from the galvanomagnetic effect, which indicates the generation of spin current at metal/ferromagnetic semiconductor interface. We also studied the spin Hall effect by means of the harmonic Hall voltage measurements. By precisely measuring the spin current generated by the spin Hall effect, we find that the spin Hall effect in Pt exhibits small dependence on temperature. We also find that the spin current driven by the spin accumulation can be detected by the harmonic Hall voltage measurement. Our findings establish an effective approach to precisely measure the spin Hall effect, which will play an crucial role in the fundamental research on spintronics.

研究分野：工学

キーワード：スピントロニクス スピン流 スピンホール効果

1. 研究開始当初の背景

スピン流はスピントロニクスにおける基礎物理の探求に重要な役割を果たすとともに、高機能デバイスへの応用の可能性からその生成・制御・検出手法に関する研究が進められている。近年、スピン流と電流・光・熱・音波・力学的角運動量の相互作用(相互変換)に関する研究が進められている。その中でもスピンポンピング法と逆スピンホール効果を組み合わせたスピン流生成・検出手法はスピン流を定量的に研究する上で威力を発揮する。スピンポンピング効果は強磁性体/常磁性体接合において、磁化歳差運動している強磁性体のスピン角運動量の一部が常磁性層の伝導電子に受け渡されることによってスピン流が常磁性層に誘起される現象であり、逆スピンホール効果は常磁性体に注入されたスピン流が常磁性体のスピン軌道相互作用を介してスピン流と直交する方向に電流を誘起する現象である。強磁性体/常磁性体界面におけるスピン角運動量の受け渡しやすさはスピンミキシングコンダクタンスによって記述され、スピンポンピングによる界面でのスピン流生成効率を表す指標となっている。

申請者は強磁性体層として、キャリア誘起強磁性体である強磁性半導体に着目した。常磁性体/強磁性半導体において、高いスピンミキシングコンダクタンスが実現できれば、スピンポンピングの逆効果、すなわちスピン移行トルクを利用することによって伝導電子スピン流を介した強磁性半導体の物性制御を実現できる可能性が有る。

2. 研究の目的

強磁性半導体は正孔を媒介とした磁性スピン間の相互作用を介して磁気秩序を発現する。そのため、電界による正孔数の変調による磁性制御という新しい物理現象の場を提供してきた。一方で、強磁性の発現には低温環境が不可欠であり、キュリー温度の向上が課題とされている。本研究では、強磁性半導体および金属界面を用いたスピン流-磁化相互作用に関する定量手法の構築とスピン流を介した新しい物性制御手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

強磁性半導体(Ga,Mn)As は分子線エピタキシ法により作成し、金属薄膜はスパッタリング法および蒸着法により作成した。

スピンポンピング法を用いた測定に関しては試料を TE₀₁₁ マイクロ波キャビティ中心近傍あるいはウェーブガイド上に設置し、強磁性共鳴時の試料両端に生じる電圧信号を測定した。

高調波ホール電圧測定に関しては、ファンクションジェネレータによって試料に対して交流電流を印加し、ロックインアンプにより、ホール電圧信号の基本波および第二高調波の測定を行った。

4. 研究成果

(1) 強磁性半導体/金属界面におけるスピン流生成

スピンポンピングと逆スピンホール効果を組み合わせたスピン流生成・検出手法は、強磁性/常磁性積層構造におけるスピン流定量評価に用いられている。本研究では、金属/強磁性半導体界面に生成されるスピン流を Pt/(Ga,Mn)As 構造を用いて調べた。

試料としては Pt(10 nm)/(Ga,Mn)As (50 nm)/GaAs パッド層 (100 nm)/半絶縁性 GaAs (001)基板を用いた。(Ga,Mn)As/GaAs 層は分子線エピタキシ法、Pt 層は RF スパッタリング法で作製した。9 GHz のマイクロ波を導入した TE₀₁₁ マイクロ波空洞共振器の中心付近に試料を設置し、外部磁界を掃引することで強磁性共鳴スペクトルと Pt 層両端に生じる直流電圧を 30 K で測定した。

強磁性共鳴磁化、共鳴線幅、直流電圧信号を解析し、逆スピンホール効果と電流磁気効果(整流効果)により発生する電圧の比率を -69:31 と決定した。また、逆スピンホール効果による電圧の符号は Pt/Py の電圧の符号と逆であることが明らかとなった。これは、Py と(Ga,Mn)As のフェルミ準位でのスピン偏極率の符号が異なることによるものと考えられる。測定結果から求まる Pt/(Ga,Mn)As 界面におけるスピンミキシングコンダクタンスは $6.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}$ であった。この値は、(Ga,Mn)As/p-GaAs における報告値の 13 倍であり、金属積層構造のスピンミキシングコンダクタンスに匹敵する。このように強磁性半導体/金属界面で高効率なスピン流生成が可能であることから、金属から強磁性半導体へのスピン流注入や、強磁性半導体の磁化状態やダンピング定数のスピン流による制御が期待される。

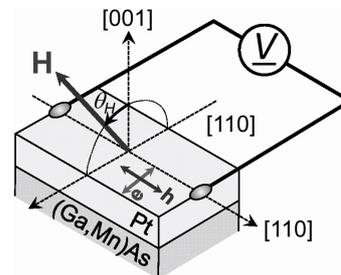


図 1. Pt/(Ga,Mn)As 二層膜試料と測定配置の模式図。

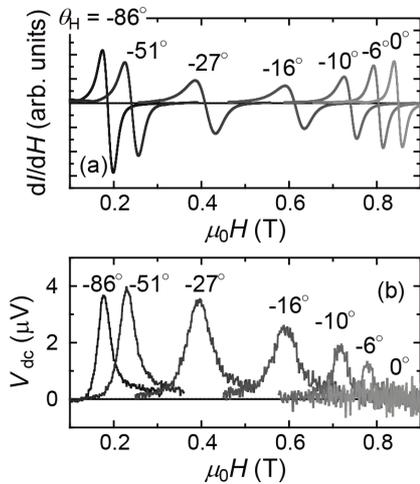


図 2. Pt/(Ga,Mn)As 二層膜における異なる面外磁場角度での FMR スペクトルと電圧信号 .

(2) Bi/Ag 界面におけるスピンの流 - 電流変換

スピン流 - 電流変換について、これまで常磁性体中のスピンホール効果が用いられてきたが、近年、界面におけるスピン - 電流変換現象が報告された。この現象はラシュバ・エデルシュタイン効果と呼ばれ、界面に電流を印加するとスピン蓄積が誘起される現象であり、スピンホール効果の枠組みを超えた新しいスピン流生成手法として注目されている。この逆効果は逆ラシュバ・エデルシュタイン効果と呼ばれ、逆スピンホール効果と同様、スピン流の検出手法として注目されている。スピンプンピングと逆ラシュバ・エデルシュタイン効果を用いた Bi/Ag 界面におけるスピン流 - 電流変換はラシュバ・エデルシュタイン効果を調べる有効な手法になり得る。我々は逆ラシュバ・エデルシュタイン効果に対する理解を深めるため、その温度依存性測定を行った。

試料としては、NiFe(20 nm)/Ag(10 nm)/Bi(10 nm)積層構造を用いた。この試料に対してマイクロ波を照射し、磁場を印加することで強磁性共鳴を駆動すると、スピンプンピングによりスピン流が Ag/Bi 層に生成され、逆ラシュバ・エデルシュタイン効果によって電流へと変換される。ここで生成される電流量を精密に調べることで Ag/Bi 界面における逆ラシュバ・エデルシュタイン効果を調べた。NiFe/Ag/Bi, NiFe/Ag, NiFe/Bi の比較実験を行うことにより、電流信号が Ag/Bi によるものであることが確認された(図 3)。我々は NiFe/Ag/Bi 積層構造において生じたスピン流と Ag/Bi 界面に流れる電流量から、スピン流 - 電流変換効率 λ_{IREE} を求めた。その結果、温度を室温から 40 K まで変化させた場合の上記変換効率は図 4 のような振る舞いを示し、Bi/Ag 界面における逆ラシュバ・エデルシュタイン効果は温度によらず変換効率はほとんど変化しないことが明らか

となった。

(3) 高調波ホール電圧測定によるスピントルクの定量

試料としてはガドリニウムガリウムガーネット(Gd₃Ga₅O₁₂, GGG)基板上に垂直容易磁化を有する Pt/Co/Pt 積層構造のホールバーを作成し、507 Hz の交流電流と外部磁場を印加しながら高調波ホール電圧測定を行った。Co の上下の層を Pt にすることにより、ラシュバトルクは打ち消し合うこととなる。一方で、スピントルクは上下の Pt 層の膜厚を非対称にすることによって有限のスピンホールトルクが生じることとなる。我々は上述の試料において低磁場領域の第二高調波と基本波の観測に成功した。この測定結果からスピントルクを求めた。

さらに我々はスピン拡散モデルを用いて、Pt/Co/Pt 中のスピントルクの振る舞いに関する記述を試みた。このようなモデルと、Pt および Co の物性パラメタを用いることにより、Pt/Co/Pt 中に生じるスピントルクの振る舞いの記述に成功した。また、スピン蓄積の作るスピントルクも高調波ホール電圧測定により検出可能であることが分かった。このようなスピントルクに関しては現在、研究中である。本研究で得られた結果は、今後のスピン蓄積誘起スピン軌道トルクの研究に対して重要な知見を与えるものと考えられる。

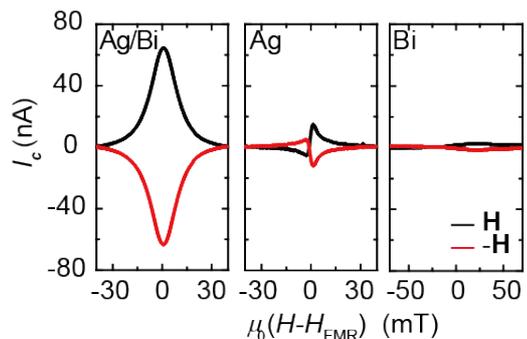


図 3. 強磁性共鳴下におけるスピンプンピング誘起電流量の磁場依存性 .

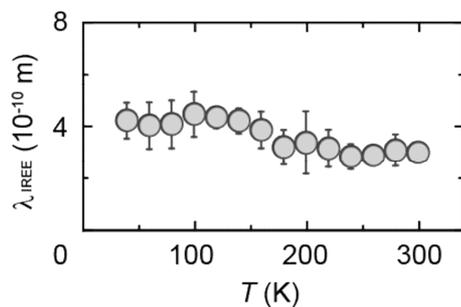


図 4. Bi/Ag 界面におけるスピン流 - 電流変換効率の温度依存性 .

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6件)

Y.-T. Chen, S. Takahashi, H. Nakayama, M. Althammer, S. T. B. Goennenwein, E. Saitoh, G. E. W. Bauer, "Theory of spin Hall magnetoresistance (SMR) and related phenomena" *Journal of Physics: Condensed Matter* **28**, 103004 (2016) (JCPM-101944) [DOI: 10.1088/0953-8984/28/10/103004] (査読有)

S. D'ambrosio, L. Chen, H. Nakayama, F. Matsukura, T. Dietl, and H. Ohno, "Ferromagnetic resonance of Py deposited on ZnO grown by molecular beam epitaxy" *Japanese Journal of Applied Physics* **54**, 093001 (2015). [DOI: 10.7567/JJAP.54.093001] (査読有)

S. Haku, T. Tashiro, H. Nakayama, J. Ieda, S. Entani, S. Sakai, and K. Ando, "Spin pumping blocked by single-layer graphene" *Applied Physics Express* **8**, 073009 (2015). [DOI: 0.7567/APEX.8.073009] (査読有)

H. Nakayama, L. Chen, H. W. Chang, H. Ohno, and F. Matsukura, "Inverse spin Hall effect in Pt/(Ga,Mn)As" *Applied Physics Letters* **106**, 222405 (2015). [DOI: 10.1063/1.4922197] (査読有)

A. Nomura, T. Tashiro, H. Nakayama, and K. Ando, "Temperature dependence of inverse Rashba-Edelstein effect at metallic interface" *Applied Physics Letters* **106**, 212403 (2015). [DOI: 10.1063/1.4921765] (査読有)

Y. Shiomi, T. Ohtani, S. Iguchi, T. Sasaki, Z. Qiu, H. Nakayama, K. Uchida, and E. Saitoh, "Interface-dependent magneto transport properties for thin Pt films on ferrimagnetic $Y_3Fe_5O_{12}$ " *Applied Physics Letters* **104**, 242406 (2014). [DOI: 10.1063/1.4883898] (査読有)

[学会発表](計10件)

野村晶代, 田代隆治, 中山裕康, 安藤和也, 「Temperature dependence of inverse Rashba-Edelstein effect at Ag/Bi interface」平成27年度「ナノスピントランスポルト」年次報告会 東北大学 (宮城県・仙台市) 2016年1月7日。(ポスター発表)

野村晶代, 田代隆治, 中山裕康, 安藤和也, 「Ag/Bi 界面における逆 Rashba-Edelstein 効果の温度依存性」第20回スピントラ

ン工学の基礎と応用 PASPS-20, 東北大学 (宮城県・仙台市) 2015年12月3日。(口頭発表)

野村晶代, 田代隆治, 中山裕康, 安藤和也, 「Ag/Bi 界面における逆 Rashba-Edelstein 効果の温度依存性」日本物理学会 2015年秋学期大会 関西大学 (大阪府・吹田市) 2015年9月16日。(ポスター発表)

Hiroyasu Nakayama, Lin Chen, Hsiao Wen Chang, Fumihiko Matsukura, Hideo Ohno, 「Ferromagnetic resonance induced electrical signals in Pt/(Ga,Mn)As」第62回応用物理学会春季学術講演会 東海大学 (神奈川県・平塚市), 2015年3月12日。(口頭発表)

中山裕康, 陳林, 張曉文, 大野英男, 松倉文礼 「スピントラッキングによる Pt/(Ga,Mn)As 界面のスピントラッキング」新学術領域研究「ナノスピントランスポルト」平成26年度スピントラッキング年次報告会 京都大学 (京都府・西京区), 2015年3月4日。(ポスター発表)

Hiroyasu Nakayama, Lin Chen, Hsiao Wen Chang, Fumihiko Matsukura, Hideo Ohno, 「DC voltages in Pt/(Ga,Mn)As under ferromagnetic resonance」第19回半導体スピントラッキングの基礎と応用 PASPS-19 東京大学 (東京都・文京区), 2014年12月16日。(口頭講演)

中山裕康, Lin Chen, Hsiao Wen Chang, 松倉文礼, 大野英男, 「Pt/(Ga,Mn)As 構造における強磁性共鳴下の直流電圧信号」応用物理学会東北支部 第69回学術講演会 東北大学 (宮城県・仙台市), 2014年12月4日。(口頭講演)

塩見雄毅, 大谷隆史, 井口敏, 佐々木孝彦, 邱志勇, 中山裕康, 内田健一, 齋藤英治, 「Interface-dependent magnetotransport properties for thin Pt films on ferrimagnetic $Y_3Fe_5O_{12}$ 」第75回応用物理学会秋季学術講演会 北海道大学 (北海道・札幌市), 2014年9月17日。(ショート口頭講演付きポスター講演)

Sophie D'ambrosio, Lin Chen, Hiroyasu Nakayama, Fumihiko Matsukura, Tomasz Dietl, and Hideo Ohno, "dc Voltages Measured in Py/ZnO under ferromagnetic Resonance" 12th RIEC International Workshop on Spintronics 東北大学 (宮城県・仙台市), June 26th 2014. (ポスター発表)

中山裕康, 「強磁性金属/強磁性半導体積層構造における磁化ダイナミクスとスピントラッキング」平成26年度ナノ・スピントラッキング実験施設研究発表会 東北大学 (宮城県・仙台市) 2014年7月23日。(口頭講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：スピントロニクスデバイス及びこれを用いた記憶素子

発明者：安藤和也，中山裕康，田代隆治，桑原勇作

権利者：学校法人慶應義塾

種類：特願

番号：2015-241179

出願年月日：2015年12月10日

国内外の別：国内

取得状況(計 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 裕康 (NAKAYAMA, Hiroyasu)

慶應義塾大学・理工学部・特任助教

研究者番号：30727011

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：