

微細加工素子を用いた非磁性物質へのスピンプンピング効果の評価

山本 竜也、関 剛斎、小野 新平*、三輪 一元*、高梨 弘毅

(東北大金研、*電力中央研究所)

Characterization of spin pumping effect in microfabricated devices with nonmagnetic materials

T. Yamamoto, T. Seki, *S. Ono, *K. Miwa, and K. Takanashi

(IMR, Tohoku Univ., *Central Research Institute of Electric Power Industry)

緒言

電子の電荷とスピンを同時に利用する「スピントロニクス」がさらなる発展を遂げるためには、様々な物質に対して効率良くスピン注入を行う手法の確立が不可欠である。特に半導体におけるスピンの制御は、スピントロニクスデバイスの多機能化に向けた重要な課題の一つであり、近年では無機半導体だけでなく有機半導体におけるスピン注入・スピン輸送も注目を集めている。有機半導体は、軽元素で構成されていることから長距離スピン輸送が期待され、高性能かつ柔軟という高い付加価値を持ったデバイスが実現できると考えられる^[1]。既に有機半導体においてスピン注入を試みたという報告はいくつか存在するが、有機半導体-強磁性金属間におけるインピーダンス不整合に起因したスピン注入効率の低下が原因で、スピン注入およびスピン輸送に関して統一的な見解は未だ得られていない。

インピーダンス不整合の問題を回避し、有機半導体へ高効率にスピン注入を行う手法の候補としてスピンプンピング効果が挙げられる。スピンプンピング効果とは、強磁性体/非磁性体接合において磁化の歳差運動を励起することによりスピン角運動量が非磁性体の伝導電子へと移行される現象である^[2]。スピンプンピングにより生成されたスピン流は界面における電荷の移動を伴わないため、インピーダンス不整合の影響を受けないとされる^[3]。そこで本研究では、スピンプンピングを用いて、現在有機半導体において最も高い移動度が報告されているルブレン単結晶、および非磁性金属 Cu へのスピン注入を試みた。

実験方法

Fig. 1 に作製した素子の模式図を示す。コプレーナ導波路(CPW)上にスピン注入源となるパーマロイ(Py)矩形電極、および Pt 細線を配置し、Py-Pt 間をルブレン単結晶もしくは非磁性 Cu 細線で架橋した。ルブレン単結晶についてはイオン液体フィルム(ILF)でカバーし、ゲート電圧(V_G)を変化させながら Py の強磁性共鳴(FMR)スペクトルを測定することでルブレン中におけるスピンプンピング効果の評価を行った。

実験結果

Fig. 2a に Cu 細線を有するデバイスの FMR スペクトルを示す。ここでは Pt 細線有り と Pt 細線無しの素子を作製し、Pt 細線有りの素子においては Py-Pt 間を 200 nm とした。2つの素子において共鳴周波数に変化は見られなかったが、スペクトル線幅に若干の増大が見られた。この線幅の増大は、Pt 細線を接続したことによって、Cu 細線中のスピンプンピング由来のスピン蓄積が変化したことと起因すると考えられる。Fig. 2b はルブレン単結晶を有する素子において V_G を変えて測定したスペクトルである。 $V_G = 0$ V の場合に比べて $V_G = \pm 1$ V において共鳴線幅の若干の増大が観察され、 V_G の印可によりルブレン中のキャリア濃度が変化し、スピンプンピングの効率が変化したことを示唆する結果が得られた。

参考文献

- [1] V. A. Dediu *et al.*, Nat. Mater. **8**, 707 (2009).
- [2] K. Ando *et al.*, Nat. Mater. **10**, 655 (2011).
- [3] Y. Tserkovnyak *et al.*, Phys. Rev. Lett. **43**, 117601 (2002).

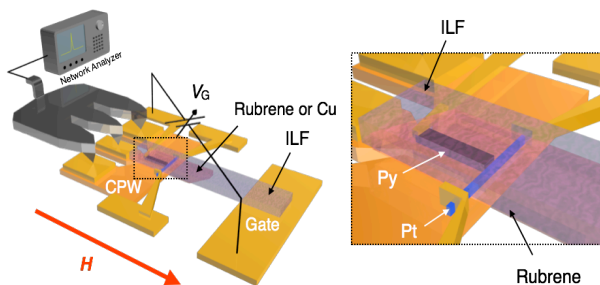


Fig. 1: Schematic illustration of the experimental setup. A Rubrene crystal or a nonmagnetic Cu wire was placed as a bridge between the Py element and the Pt wire. An ILF was put on the rubrene crystal to apply V_G to the device during the FMR measurements.

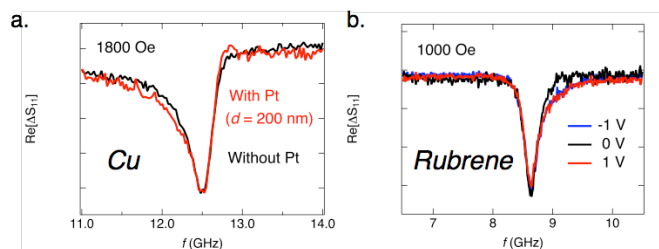


Fig. 2: a. FMR spectra measured for the device with Cu. **b.** FMR spectra measured for device with rubrene under various V_G . The measurements for **a.** and **b.** were performed with applying $H = 1800$ Oe and 1000 Oe, respectively.

非磁性ナノ細線の形状効果を用いた純スピンの増幅

ランジダー・アブドラ¹、アンディー・ヴィック¹、ベン・マーフィー¹、廣畑貴文^{1,2}
(¹ヨーク大、²JST さきがけ)

Spin-current amplification by geometrical effects in a lateral spin-valve

R. M. Abdullah¹, A. J. Vick¹, B. A. Murphy¹ and A. Hirohata^{1,2}

(¹ Univ. of York and ² JST-PRESTO)

はじめに

将来のスピン트로ニクス素子の一翼を担うと期待されている面内スピバルブにおいては、非局所手法を用いると、非磁性体中にスピン偏極電流が注入され、電子の流れとしての電流は生じない。このためジュール熱などを低減できるという利点がある。ところが、スピン注入子からの距離に応じてスピン偏極電流の大きさが指数関数的に減衰することが問題となっている。そこで本研究では、非磁性体の形状をラチェット状に変更することで、検出子・注入子側に流れるスピン偏極電流の抵抗率に差をつけて、検出子側への電流のみを増幅することを目指す¹⁾。

実験方法

図1に示すような強磁性 NiFe ナノ細線(線幅: 200 nm)と非磁性 Cu ナノ細線(線幅: 100 nm)からなる面内スピバルブ素子を、電子線描画と電子ビーム蒸着を組み合わせることで作製した。NiFe 細線間距離は 200 nm とし、その中央に底辺 100 nm・高さ h nm ($0 \leq h \leq 60$ nm) 直角三角形ラチェット構造を有する Cu 細線を配置した。なお、NiFe 細線の長さは 6 μm とし、一方のみ両端を鋭角に加工することで磁化反転磁場に差をつけている。測定は室温で 45 μA の電流を印加して、非局所 DC reversal 法を用いて行った²⁾。

実験結果

図2の通り、面内スピバルブに起因する非局所磁気抵抗(V/I)が得られた。通常の Cu ナノ細線($h=0$ nm)では、NiFe 細線の磁化が平行と反平行配置をとる場合の V/I の差($\Delta V/I$)が (2.81 ± 0.04) m Ω であった。それに対し、 $h=60$ nm の Cu ラチェット細線では、 $\Delta V/I = (21.5 \pm 0.85)$ m Ω となり、7 倍以上の信号増幅を達成した。このような非磁性体の形状制御によるスピン偏極電流増幅は全く新たな概念であり、スピン트로ニクス素子設計及び応用上で非常に大きな可能性を秘めている。

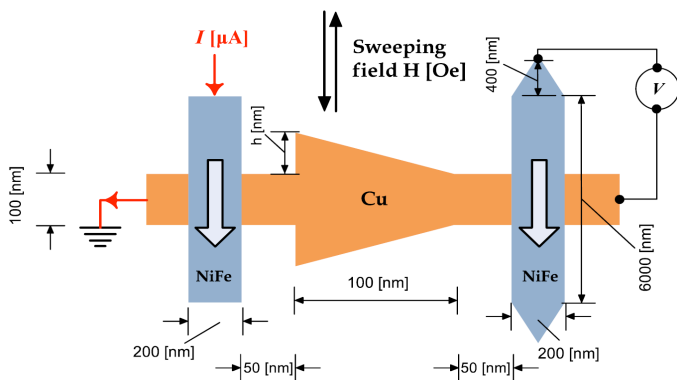


Fig. 1 Schematic diagram of the lateral spin-valve (LSV) with a triangular ratchet.

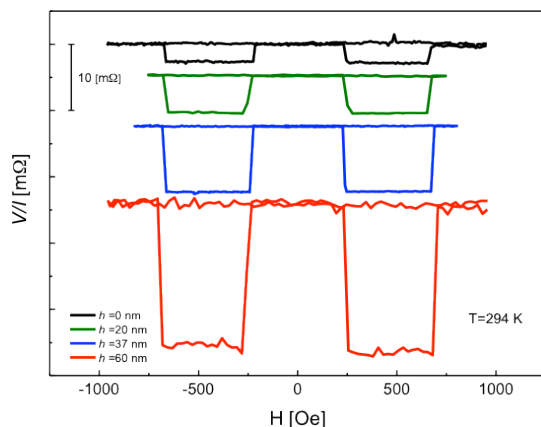


Fig. 2 Non-local signals for the LSV with triangular ratchets with heights (0 ~ 60 nm).

参考文献

- 1) 廣畑貴文、スピンバルブ素子 (特願 2012-246581、PCT/JP2013/079599).
- 2) R. M. Abdullah *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* (submitted).

単層グラフェンを用いたスピン流-電流変換の観測とその評価

大島諒¹、酒井敦¹、安藤裕一郎^{1,2}、新庄輝也^{1,2}、浜屋宏平¹、
河原憲治³、吾郷浩樹³、白石誠司^{1,2}
(¹阪大院基礎工、²京大院工、³九大先導研)

Observation and evaluation of spin-charge conversion in single-layer graphene

R. Ohshima¹, A. Sakai¹, Y. Ando^{1,2}, T. Shinjo^{1,2}, K. Hamaya¹, K. Kawahara³, H. Ago³, and M. Shiraishi^{1,2}
(¹Osaka Univ., ²Kyoto Univ., ³Kyushu Univ.)

はじめに

その高い移動度と長いスピン拡散長から、単層グラフェン (SLG) を用いたスピンドバイスへの期待が高まっている[1]。そこで、最近軽元素で構成された高分子材料でのスピン流-電流変換現象の観測が報告された[2]ことを踏まえて、同様にスピン軌道相互作用の小さい物質でありスピン物性の明らかな単層グラフェンにおける逆スピンホール効果を利用したスピン流-電流変換現象の観測とその評価を行ったので報告する。

実験方法

強磁性絶縁体である $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 基板に CVD 法を用いて合成した大面積単層グラフェンを転写プロセスにより形成した。その後、検出用電極として金電極を真空蒸着法により形成した。試料サイズは YIG 基板が $1.5 \times 3 \text{ mm}^2$ 、電極幅が 1 mm となっている。測定には電子スピン共鳴 (ESR) 装置を用いて強磁性共鳴を誘起し、ナノボルトメータを用いてそのときの電圧の変化を観察した。

実験結果

Fig. 1 に強磁性共鳴下の電圧の変化を示す。共鳴磁場周りでの明瞭な電圧の変化が観測された。これは逆スピンホール効果による起電圧を示唆する信号である。また、Fig. 2(a), (b) に電圧値のマイクロ波のパワー依存性および磁場の印加角度依存性をそれぞれ示す。磁場の印加角度依存性は逆スピンホール効果によって得られる起電圧 E_{ISHE} は

$$E_{\text{ISHE}} \propto \mathbf{J}_s \times \boldsymbol{\sigma} \quad (1)$$

の関係と一致する。ここで、 \mathbf{J}_s は注入されるスピン流、 $\boldsymbol{\sigma}$ はスピン偏極ベクトルである。さらにスピン流の大きさはマイクロ波のパワーに比例することから Fig. 2 の結果は理論とよい一致を示しており、得られた信号が単層グラフェンの逆スピンホール効果による信号であることを支持するものとなっている。また、以上の結果から単層グラフェンにおけるスピン流-電流変換効率を示すスピンホール角の値が 6.1×10^{-7} と見積もることができた[3]。

参考文献

- 1) M. Shiraishi and T. Ikoma, *Physica E* **43**, 1295 (2011).
- 2) K. Ando *et al.*, *Nature Mater.* **12**, 622 (2013).
- 3) R. Ohshima, M. Shiraishi *et al.*, *Phys. Rev. B*(R), submitted

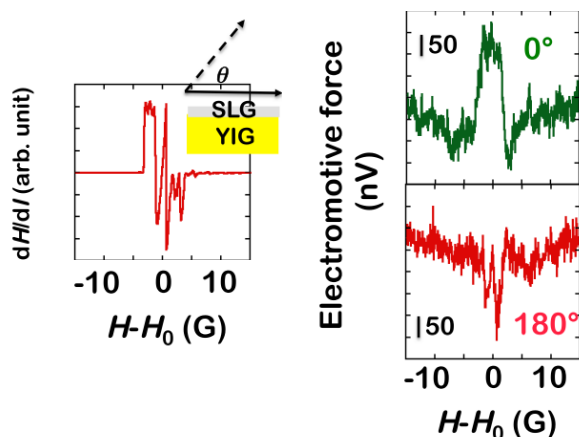


Figure 1: The FMR spectrum of the YIG at $\theta=0^\circ$ (the left panel) and the electromotive force in SLG/YIG at $\theta=0^\circ$ and $\theta=180^\circ$ (the right panel).

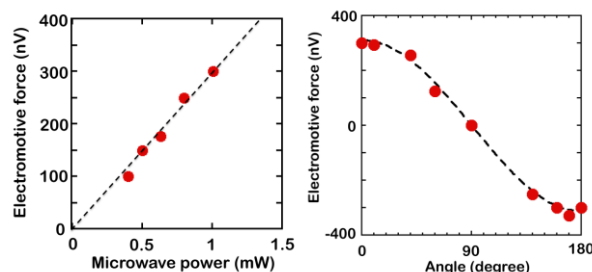


Figure 2: (a) The microwave power dependence of the electromotive force. (b) Angular dependence of the electromotive forces under 1 mW. The filled circles are experimental data.

微小強磁性スピントジョセフソン接合の純スピンの流分布

米田守重、小畑修二*、丹羽雅昭**

(日本電子専門学校、*電機大理工、**電機大工)

Distribution of pure spin current in the small ferromagnetic spin Josephson junction

M.Yoneda, S.Obata, M.Niwa

(Japan Electronics College, *Tokyo Denki University.& School of Science & Engineering, **Tokyo Denki University.& School of Engineering)

はじめに

最近のスピンエレクトロニクス分野で、電荷の流れを伴わない、スピン自由度のみの流れである純スピンの流に関する研究が注目されている。我々は、純スピンの流による強磁性トンネル接合として、超伝導に於けるジョセフソン接合のアナログとして、微小強磁性スピントジョセフソン接合のモデルを導入し、これを解析するための理論的を構築した。本講演では、微小強磁性スピントジョセフソン接合に於いて、純スピンの流の分布について、理論解析した結果を報告する。

モデルと結果

我々は Fig.1 に示すような、厚さ d の非磁性体薄膜の両脇を微小強磁性体でサンドイッチ状に、FM(強磁性)/NM(非磁性)/FM 接合ように挟んだ微小強磁性スピントジョセフソン接合モデルを考案した。

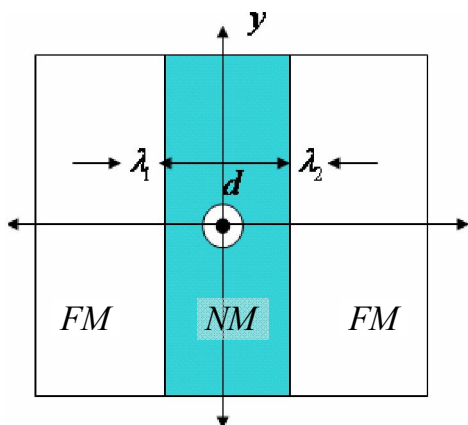


Fig. 1. Schematic of FM / NM / FM junction

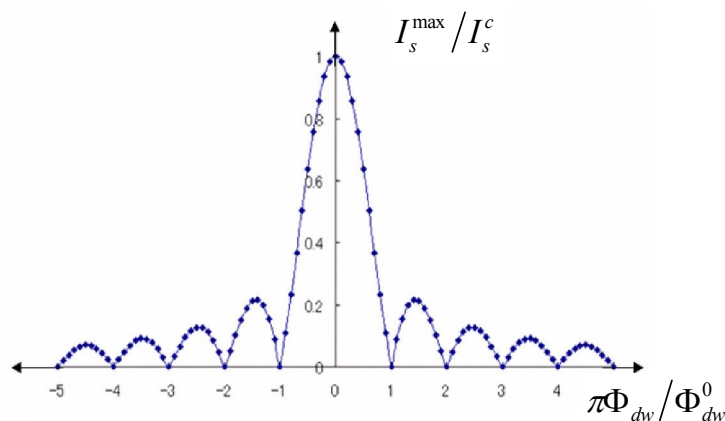


Fig. 2. Dependence of the critical spin current intensity by the number of quantum domain wall

ここで、 λ_1 は左側の強磁性 1 の spin 磁場(電位の次元)の侵入長、 λ_2 は右側の強磁性 2 の spin 磁場の侵入長である。我々の定義した微小強磁性スピントジョセフソン接合とは、接合の最大長 L が、これらの侵入長より小さい場合、 $L > \lambda_1, \lambda_2$ である。このような系について研究するため、我々はスピン磁気モーメントを粒子的に取り扱う理論を提案し、強磁性スピントジョセフソン接合に適した形式に理論を再構築した。我々の理論を用いて計算した結果の一つとして、Fig.2 に、量子磁壁の数による臨界スピンの流強度の依存性を示した。

参考文献

- 1) F. S. Nogueira and K.-H. Bennemann: Europhys. Lett. 67 (2004) 620-626