

金属ナノ構造における 純スピンの高効率制御技術と 高機能スピンデバイスの開発

スピンデバイスの更なる低消費電力化・高性能化を目指して

木村 崇

九州大学 稲盛フロンティア研究センター
教授



研究の背景

強磁性体が有する不揮発特性と巨大磁気抵抗効果などのスピン依存伝導現象を絡めて電子デバイスを動作させるスピンデバイスは、高性能かつ省エネルギーな動作が可能な次世代ナノエレクトロニクスデバイスの最有力候補として、近年大きな注目を集めている。このスピンデバイスにおいて、重要な役割を担っているのが、電子の運動をもたらすスピン角運動量の流れ“スピン流”である。スピン流は、スピン依存伝導現象の担い手であるのみならず、隣接する強磁性体へのスピン角運動量のキャリアとなり、角運動量のトランスファーを介して、スピン注入による磁化反転をも可能にする。これらスピン流誘起の物理現象を観測するためには、積層（縦型）構造からなる二端子デバイスを用いるのが主流であるが、この場合、素子全体に電流が流れるため、スピン流は電流に重畳したスピン偏極電流という状態で存在する（図1(a)）。そのため、観測される電気信号は、スピン流とは関係ない電流誘起の現象が支配的となり、各物質中でのスピン流の振る舞いを詳細に調べるのが困難であった。

研究の成果

受賞者は、横型デバイスの構造的柔軟性に着目し、複数の強磁性ナノ細線とそれらを橋渡しする非磁性ナノ細線で構成される多端子横型スピバルブ構造を作製した。本素子において、図1(b)のように電流を流すことで、強磁性細線からスピン偏極電流が注入され、非磁性細線内にも非平衡なスピン偏極電流が形成される。

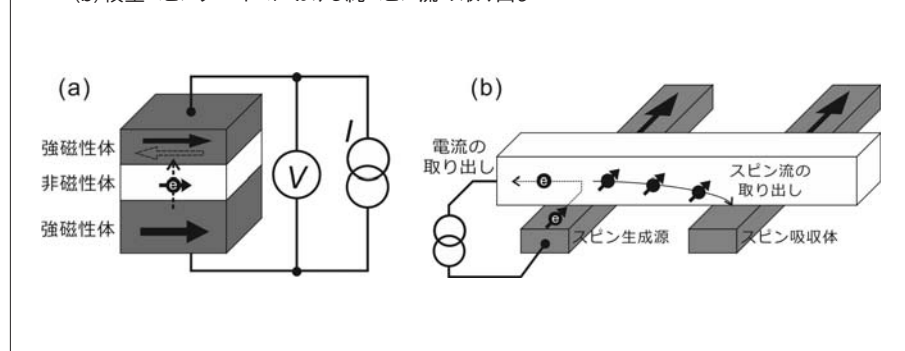
ここで、スピン偏極電流の電流成分は、非磁性細線の左側に印加されている電界により抽出されるが、スピン流に関しては、非平衡状態から平衡状態への緩和により流れ方が決定する。このことを用いて、受賞者は、図1(b)のように、スピン緩和強度が大きい物質を非磁性体の右側に接続することで、スピン流のみを選択的に抽出する技術を開発することに成功した[1, 2]。このような電流の無いスピン流のみからなる電子の流れは純スピン流として知られており、受賞者が開発した純スピン流の取り出し法はスピン吸収効果として広く知られている。

受賞者は、前述のスピン吸収効果をナノ磁性体への効率的な純スピン流注入技術へと高度化させ、巨大な純スピン流が注入可能な素子を試作し、純スピン流注入でも、スピン注入磁化反転が可能であることを実証した[3]。大きなスピン偏極電流の注入により、ナノ磁性体の磁化反転が生じることは、既に多くの実証例があり、その起源はスピン流であると理解されていたが、純スピン流による磁化反転の実証は、スピン流の役割を決定的にする実験であり、その物

理的意義は極めて大きい。更に、純スピン流による磁化反転は、ジュール発熱や電流誘導磁界によるスピン不安定性の問題の解決につながると共に、スピン偏極電流では実現不可能な巨大純スピン流の創出が可能であるため、次世代のスピンデバイスの微細化限界を打破する書き込み（磁化反転）技術としても期待できる。

つづいて受賞者は、スピン吸収効果を利用したスピン軌道相互作用の大きな白金へのスピン注入技術として適用することで、これまで困難とされてきたスピンホール効果の室温での電氣的検出に世界で初めて成功した[4]。スピンホール効果とは、スピン軌道相互作用が存在する物質中に電流 (I_c) を流すと、電流と垂直方向にスピン流 (I_s) が発生する現象であり、また、その逆変換も存在する。ここで、スピンの偏極方向を S とすると、 $I_c \propto S \times I_s$ の関係が成り立つ。本技術を用いれば、スピン流と電流の変換が可能となり、更に、強磁性体を用いない新しいスピン流生成・制御技術としても応用できるため、近年、注目されている。明瞭なスピンホール効果を観測するには、大きなスピン軌道相互作用が必要であるが、その

図1 (a) 積層（縦）型スピンデバイスにおけるスピン注入と
(b) 横型スピンデバイスにおける純スピン流の取り出し



ような物質中では、スピン拡散長が極端に短いため、スピン流の制御・検出が困難であった。そこで受賞者は、スピン拡散長の長い銅とスピン緩和の強い白金を組み合わせ、スピン吸収効果により、スピンの流れの方向を制御する技術を開発した。図3のように、銅細線と直交するように白金細線を接続した場合、スピン流の流れの方向が、接合面に垂直になる。ここで、スピン注入源となる強磁性体の磁気モーメントを銅細線の長手方向に揃えておくと、上述の $I_c \propto S \times I_s$ の関係から、逆スピンホール効果によって、白金細線に沿った電流が誘起され、白金細線の両端に電圧が発生する。実験から得られたPtのスピンホール伝導率は、これまで半導体で得られていた値の1万倍以上であることが分かり、本実験から、スピンホール効果の応用に向けた研究が一気に加速した。

上記に加えて、受賞者は、スピнкаイラリティ検出素子[5]、電気的スピン量子化軸制御素子[6]など、横型デバイスの柔軟性を最大限利用したユニークで高機能スピンデバイスを次々に提案・実証した。更に、非磁性細線中のスピン散乱機構に関しても、“温度を下げ過ぎると表面散乱の増大によりスピン拡散長が短くなる”という従来の予想とは大きく異なる実験事実を発見し

図3 室温でのスピンホール効果の電気的検出に成功した素子の電子顕微鏡写真とその動作概念図

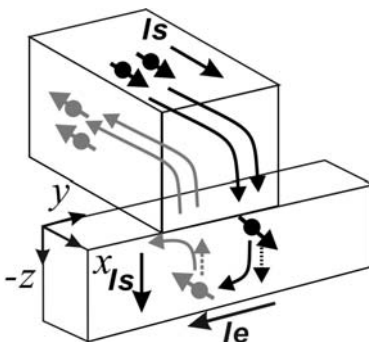
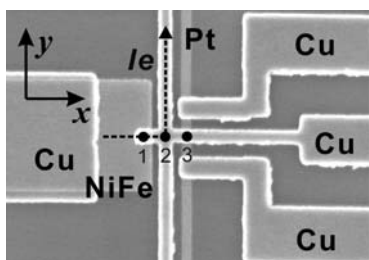
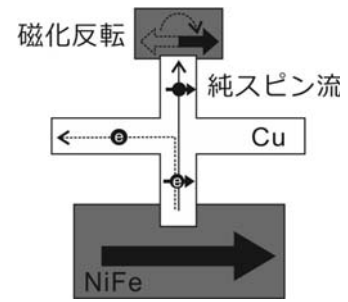
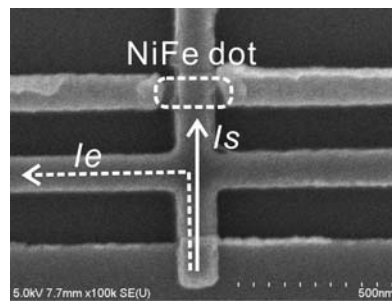


図2 純スピン流注入によるナノ磁性体の磁化反転を実証した素子の電子顕微鏡写真とその動作概念図



た[7]。最近では、高スピン偏極材料として注目されているホイスラー合金を純スピン流の生成源として適用することで、純スピン流の生成効率を一桁向上させることに成功[8]し、更に、縦型と横型を組み合わせた新奇な純スピン流生成構造も開発し、これまでの横型構造に比べ、40倍以上大きな超巨大スピン流を生成することにも成功している[9]。

将来の展望

純スピン流では、無駄なジュール発熱が生じないため、生成源の多端子化や吸収面の多面化により、従来型スピン注入法

では不可能な巨大純スピン流の三次元注入も可能となる。更に、スピン流の電気的制御技術を高速化することで、スピン流の高速回転も可能となり、極めて高速で効率的な磁化反転技術への展開が期待される。このように、純スピン流を用いることで、さまざまな利点が存在すると期待できるが、これらの有効性を証明するためには、いち早い実験的検証が必要である。

本研究は、理化学研究所、東京大学物性研究所、九州大学稲盛フロンティア研究センターにおいて実施したものであり、大谷義近先生をはじめ、各所属機関の関係者の皆様ならびに国内外の多くの共同研究者の皆様深く御礼申し上げます。

References(参考文献)

- [1] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi : Suppression of spin accumulation in non-magnet due to ferromagnetic ohmic contact, Appl. Phys. Lett. 85, 3795 (2004).
- [2] T. Kimura, J. Hamrle and Y. Otani : Estimation of spin-diffusion length from the magnitude of spin-current absorption: multiterminal ferromagnetic / nonferromagnetic hybrid structures, Phys. Rev. B 72, 014461 (2005).
- [3] T. Kimura, Y. Otani and J. Hamrle : Switching magnetization of nanoscale ferromagnetic particle using nonlocal spin injection, Phys. Rev. Lett. 96, 037201 (2006).
- [4] T. Kimura, Y. Otani, T. Sato, S. Takahashi and S. Maekawa : Room temperature reversible spin Hall effect, Phys. Rev. Lett. 98, 156601 (2007).
- [5] T. Kimura, Y. Otani and J. Hamrle : Determination of magnetic vortex chirality using lateral spin valve geometry, Appl. Phys. Lett. 87, 172506 (2005).
- [6] T. Kimura, Y.C. Otani and P.M. Levy : Electrical control of the direction of spin accumulation, Phys. Rev. Lett. 99, 166601 (2007).
- [7] T. Kimura, T. Sato and Y. Otani : Temperature evolution of spin relaxation in NiFe/Cu lateral spin valve, Phys. Rev. Lett. 100, 066602 (2008).
- [8] T. Kimura, N. Hashimoto, S. Yamada, M. Miyao, and K. Hamaya : Room-temperature generation of giant pure spin currents using Co2FeSi spin injectors, NPG Asia Materials 4 e9 (2012).
- [9] S. Nonoguchi, T. Nomura, and T. Kimura : Nonlocal spin transports in nanopillar-based lateral spin valve, Appl. Phys. Lett. 100, 132401 (2012).