

面内スピバルブ構造におけるスピン蓄積増強効果

物質系専攻 096002 井土 宏
指導教員：大谷 義近（教授）

キーワード：スピン依存伝導、ナノ磁性、スピン蓄積、スピン注入、面内スピバルブ

【背景・目的】

スピントロニクス研究は、強磁性体中のスピン偏極電流を用いて、巨大磁気抵抗、スピン偏極電流誘起磁化反転・磁化励起高周波発振など様々な現象を実現してきた。近年注目されているスピン蓄積とその空間勾配であるスピン流は、電荷を伴わず、スピン角運動量のみの流れであるため、従来のスピン偏極電流を用いた研究とは質的に異なる現象の誘起が期待されている。特に、スピンホール効果の電気的検出や最近報告された絶縁体中のスピン流の伝播^[1]に象徴されるように、スピン流は金属から絶縁体まで幅広い物質群における物性開拓の道具立てとして重要性を増してきている。

スピン蓄積の代表的な生成手法として、図1(a)に示す面内スピバルブ構造と呼ばれる、2本の強磁性体細線を非磁性体細線で架橋したナノスケール構造が用いられる。強磁性体中のスピン偏極電流を非磁性体中に注入（スピン注入）することで、強磁性体-非磁性体界面に非平衡状態であるスピン蓄積が誘起される。スピン蓄積は非磁性体中で拡散するため、電荷流の存在しない位置にもスピン蓄積が発現する（図1b）。

2001年に Jedema らにより、面内スピバルブ構造による室温でのスピン蓄積観測^[2]が実現して以来、この構造を用いたスピン蓄積の生成・検出について数多くの研究がなされてきた。しかしながら、報告されている非磁性金属中のスピン蓄積量は $1 \mu\text{eV}$ 程度であり、効率的なスピン注入が実現しているとはいえず、スピン蓄積量の増強は喫緊の課題となっている。

これまでには主に、強磁性体/非磁性体界面に清浄な Ohmic 接合を用いた系と、高抵抗トンネル接合を用いた系が報告されている。スピン拡散の機構に着目すると、前者の Ohmic 接合を用いた場合、強磁性体中のスピン偏極電流が非磁性体中に入り込む前に界面付近で緩和してしまうため、効率的なスピン注入が困難であった。これは、スピン拡散のしやすさを特徴付けるスピン抵抗と呼ばれる物性値が、強磁性体においては非磁性体に比べて小さいために、注入スピン偏極電流成分に重畳して、スピン流が非磁性体から強磁性体に押し戻されるバックフローが形成されるためだと理解される。また、後者の高抵抗接合を用いた場合、前者と比較すればスピン注入の効率

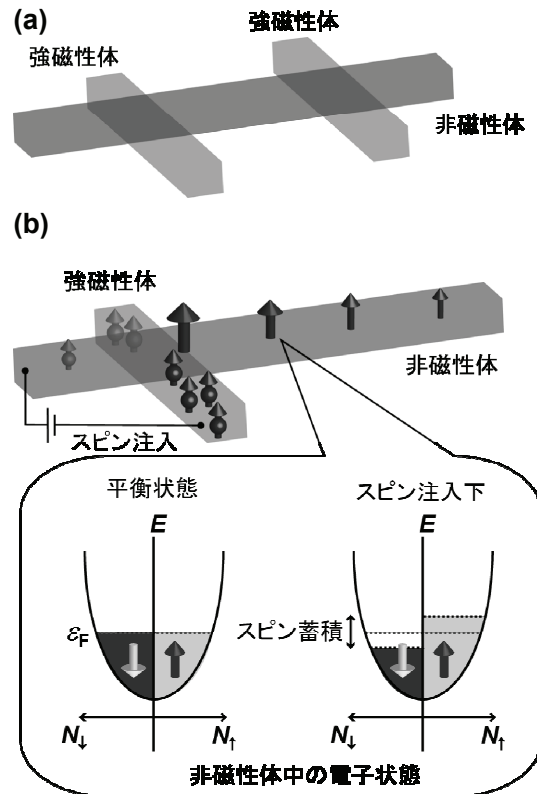


図1：(a) 面内スピバルブ構造 (b) 面内構造による電荷とスピンの流れの分離の模式図。強磁性体から非磁性体にスピン偏極電流 $\uparrow\downarrow$ を注入(スピン注入)すると、非磁性体中にスピン蓄積 \uparrow と呼ばれるエネルギーが誘起される。(N_\uparrow, N_\downarrow : スピン依存状態密度、 E : エネルギー、 ϵ_F : Fermi エネルギー)

は高い。これは界面における抵抗が非磁性体のスピン抵抗より大きいためバックフローが抑制されるためである。しかしながら、高抵抗接合においては、注入可能電流密度は大きく制限されるため³、誘起されるスピン蓄積量も制限されていた。理論的には、効率的なスピン注入を実現するために必要な界面抵抗は、これまでに報告されてきた高抵抗接合素子に比べて 100 倍以上小さいため、このような素子を作製する事ができれば、スピン蓄積は大きく増強されることが期待される。

そこで、本研究ではスピン蓄積量を増強することを目的として界面層の制御を行った。

【実験方法】

強磁性体/非磁性体界面に MgO 層を挿入し、可動板制御により同一バッチ上で異なる MgO 膜厚の面内スピンバルブ素子を作製した。界面層の良好な制御性を有する手法として、立体構造レジストと斜め蒸着法を用いた。非磁性体に Ag、強磁性体に NiFe を用いた。蒸着は全て超高真空下の電子線加熱蒸着法を用いた。

また、スピン蓄積は電気測定により検出した。その際、スピン蓄積が誘起された非磁性体に強磁性体検出端子を接合し、検出電圧が強磁性体磁化に依存する効果を用いた。

【結果および考察】

図 2 (a) に素子の 2 次電子顕微鏡像と測定端子配置・磁場方向を、図 2 (b) にスピン蓄積の測定結果を示す。NiFe 注入端子と NiFe 検出端子の磁化が並行状態と反並行状態の場合に想定される出力電圧の差が明瞭に見られる。低電流密度領域では、出力電圧が注入電流に比例するため⁴、この出力電圧差 ΔV_S を入力電流で規格化した値をスピンバルブ信号 ΔR_S と呼び、スピン蓄積素子の性能指数として用いる。

ΔR_S の界面抵抗依存性を図 2 (c) に示す。界面抵抗の増加に伴い、 ΔR_S の増加が観測された。この結果を考察するために、それぞれの界面状態において、複数の素子を作製し、 ΔR_S の注入端子—検出端子間距離依存性を測定した結果を図 3 (a) に示す。素子の端子間距離が長ければ長いほど、銀細線中のスピン反転確率が高くなるため、 ΔR_S が小さくなる。この特性長のことをスピン拡散長という。

スピンに依存した Boltzman 方程式を面内スピンバルブ素子に適用したモデル⁴を用いて、Ag のスピン拡散長 λ_N 、NiFe のスピン偏極率 p_F 、界面層のスピン偏極率 P の Fitting を行った。その結果、室温と温度 10 K におい

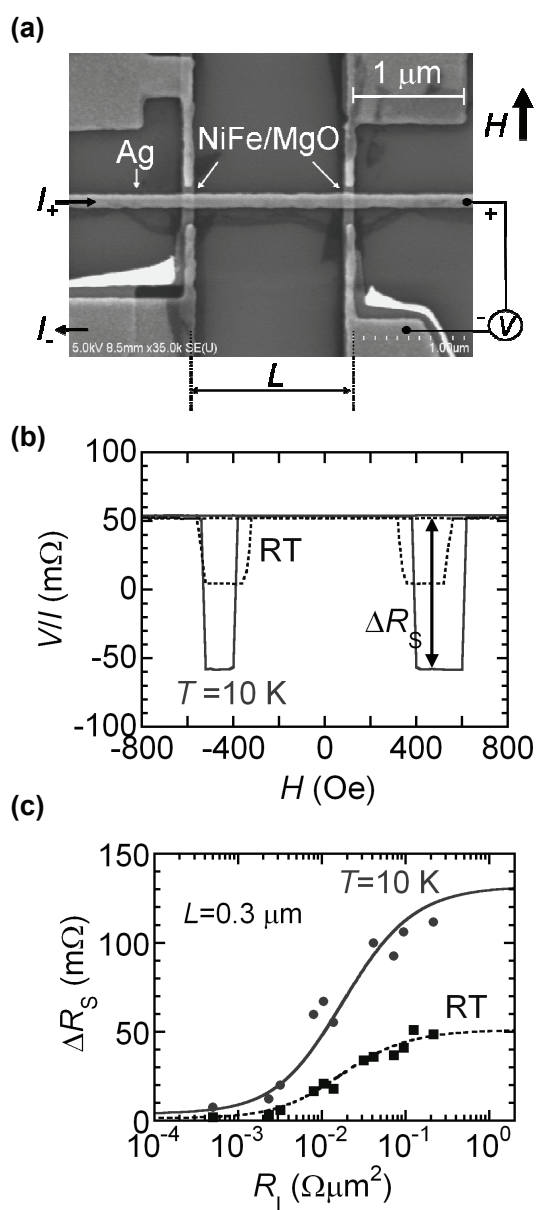


図 2： (a) 作製した面内スピンバルブ素子の 2 次電子顕微鏡像とスピンバルブ測定の端子配置。(b) スピンバルブ測定の結果 (注入—検出端子間距離 $L=0.3 \mu\text{m}$) (c) スピンバルブシグナル ΔR_S の界面抵抗 R_1 依存性。

それぞれ、 $\lambda_N = 300 \text{ nm}, 1100 \text{ nm}$, $p_F = 0.30, 0.35$, $P = 0.42, 0.44$ となった。界面層のスピンの偏極率はこれまで報告されてきた高抵抗トンネル接合の値と比べて大きく^[3]、 ΔR_S はこの2乗に比例するため、これが大きな ΔR_S を得ることのできた主な原因であると考えられる。

さらに、スピン蓄積の達成値を調べた。図3(b)に、温度 10 K において注入電流量を変化させた場合のスピン蓄積(出力電圧差 ΔV_S)を示した。スピン蓄積の電流量に対する単調増加が観察された。電流量 3.5 mA まで素子の作動は確認され、4 mA において素子が破壊された。これは、従来の高抵抗トンネル接合素子に比べて 100~1000 倍小さな界面抵抗の素子を作製したため、大電流の注入が可能であることを意味している。その結果、注入電流量 3.5 mA において、従来の 100 倍以上のスピン蓄積 225 μV を達成した。

【まとめ】

本研究では、スピン蓄積を従来の 100 倍以上の 225 μV に増強することに成功した。これは、従来問題であった、(1) 界面におけるスピン緩和に起因するスピン注入効率の大幅低下 (2) 高抵抗トンネル素子を用いた場合の注入電流量の制限、の両問題の克服によるものである。スピン蓄積の 100 倍にも及ぶ増強効果は、強力な物性開拓の手段に应用可能で、さらには革新的磁気デバイスを生み出す基盤技術として期待される。

【参考文献】

- [1] S. O. Valenzuela, and M. Tinkham, *Nature* **442**, 176 (2006); Y. Kajiwara *et al.*, *Nature* **464**, 262 (2010).
- [2] F. J. Jedema *et al.*, *Nature*, **410**, 345 (2001).
- [3] S. O. Valenzuela *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 196601 (2005).
- [4] S. Takahashi and S. Maekawa, *Phys. Rev. B*, **67**, 052409 (2003).

【論文】

1. H. Idzuchi, Y. Fukuma, L. Wang and Y. Otani, *Appl. Phys. Exp.* **3**, 063002 (2010).
2. Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi and Y. Otani, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 012507 (2010).
3. T. Hirahara, T. Komorida, Y. Gu, F. Nakamura, H. Idzuchi, H. Morikawa, and S. Hasegawa, *Phy. Rev. B* **80**, 235419 (2009).
4. H. Idzuchi, Y. Fukuma, L. Wang and Y. Otani, *IEEE. Trans. on Magnetics.* (accepted). 他共著論文 1 件採録決定。

【学会・研究会発表等】国際学会 1 件、国内学会 3 件 (内口頭 2 件)、研究会 2 件。

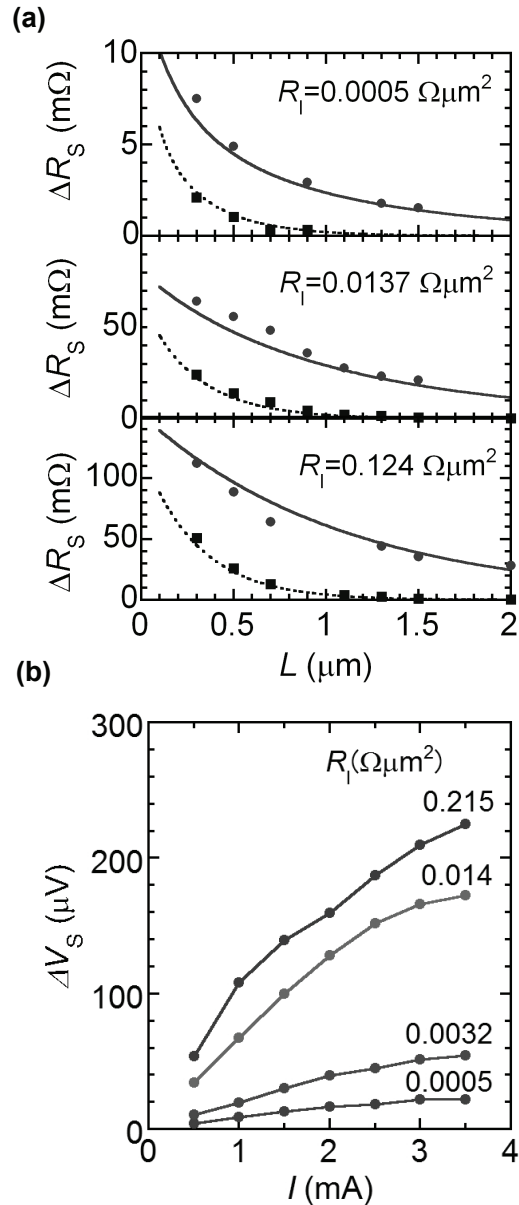


図 3 : (a) スピンバルブシグナル ΔR_S の端子間距離依存性。3 種類の界面抵抗値の結果を示す。実線、点線はそれぞれ温度 10 K と室温における Fitting 曲線。(b) スピン蓄積(出力電圧差 ΔV_S)の注入電流依存性 (温度 10 K、端子間距離 0.3 μm)。4 種類の界面抵抗値の結果を示す。