

Si へのスピン注入におけるトンネルスピン分極率の温度依存性の解析

Analysis of temperature-dependent tunnel spin polarization in spin injection into Si

岡本 祥太¹, 佐藤 彰一^{1,2}, 田中 雅明^{1,2}, 中根 了昌¹

¹Dept. of Electrical Eng. and Information Systems, ²Center for Spintronics Research Network (CSRN),

The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan okamoto_s@cryst.t.u-tokyo.ac.jp

強磁性体/トンネル障壁層/シリコン(Si) からなる磁性トンネル接合を用いて、スピン偏極した電子を Si 中に生成するスピン注入の研究が盛んに行われている[1-6]。これまで、スピン依存伝導物理の解明と制御が着実に進展しているが、「温度上昇に伴うトンネルスピン分極率 P_S の低下」の原因は明らかとなっていない。本研究では、 P_S の温度依存性を解析する現象論的な手法を提案し、実験で得られた P_S と $I-V$ 特性に適用して解析し、原因について考察した結果を報告する。

我々は、トンネル障壁層と Si の界面に存在する準位密度 $D_{it}(\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2})$ と P_S には負の相関があることを示し、欠陥準位を介したスピントリップ伝導機構があることを定量的に明らかにした[5]。この結果は、欠陥準位を介した伝導機構の頻度が温度上昇と共に増加することが P_S 低下の原因となりうることを示唆している。これに基づき、次のようなモデルを提案する。Hanle 信号測定時に磁性トンネル接合に印加する定電流 I_B は、温度依存性の無い伝導機構による電流成分 I_{TI} と温度依存性のある伝導機構による電流成分 I_{TD} から構成される ($I_B = I_{TI} + I_{TD}$)。ここで、 I_{TI} と I_{TD} のスピン分極率をそれぞれ P_{TI} と P_{TD} とすると、全スピン流は $P_S I_B = P_{TI} I_{TI} + P_{TD} I_{TD}$ と表される。 I_{TI} は直接トンネルなどのスピン保存する伝導機構であり、 P_{TI} は常に一定値となる。一方、 I_{TD} はフォノンを介した非弾性伝導機構であり、スピン非保存の伝導が多く含まれる。 I_{TD} では常にスピンがフリップする ($P_{TD} = 0$) 場合、温度 T と I_B に依存する P_S を $P_S(T, I_B)$ として上述の関係式を用いると、 $P_S(T, I_B)/P_{TI} = I_{TI}(T)/I_B = \gamma^{TI}(T, I_B) = 1 - \gamma^{TD}(T, I_B)$ となる。ここで $\gamma^{TI}(T, I_B)$ は全電流 I_B に占める $I_{TI}(T)$ の割合、 $\gamma^{TD}(T, I_B)$ は全電流 I_B に占める $I_{TD}(T)$ の割合である。実験において、右辺の各温度における $I-V$ 特性から見積もられた $\gamma^{TI}(T, I_B)$ と、左辺の各温度における Hanle 信号から見積もられた $P_S(T, I_B)/P_{TI}$ の温度依存性が一致すれば、モデルの妥当性が示されることになる。ここでは、測定最低温度の 4 K において定電流 I_B はスピン保存の弾性伝導機構のみを持つと仮定し、 $P_{TI} = P_S(4 \text{ K}, I_B)$ 、 $I_{TD}(4 \text{ K}) = 0$ として解析を行った。

Fig.1 は実験における磁性トンネル接合 Fe(4 nm)/Mg(1 nm)/MgO(0.8 nm)/ n^+ -Si(001)(リン添加濃度 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)を持つ三端子デバイス構造とスピン抽出配置での Hanle 信号測定のセットアップである。温度 $T = 4 - 295 \text{ K}$ において、一定電流 $I_B (= -5, 10, 30 \text{ mA})$ を印加して垂直方向の磁界を掃引しながら Hanle 信号を測定し、フィッティングによって $P_S(T, I_B)$ を見積もった[3-5]。Fig. 2(a) に各温度における磁性トンネル接合の $I-V$ 特性から見積もられた $\gamma^{TI}(T, I_B)$ を各電流 I_B ごとに色付けて示す。 I_B が小さい方が温度上昇に伴う $\gamma^{TI}(T, I_B)$ の減少が大きい。Fig. 2 (b) に Hanle 信号とフィッティングから見積もられた $P_S(T, I_B)$ を用いて、 $P_S(T, I_B)/P_S(4 \text{ K}, I_B)$ を各電流 I_B ごとに色付けて示す。Fig. 2(b)の $P_S(T, I_B)/P_S(4 \text{ K}, I_B)$ は、Fig. 2(a)の $\gamma^{TI}(T, I_B)$ の特徴とおおよそ一致していることがわかる。このことから、温度上昇に伴う $P_S(T, I_B)$ の低下は、スピントリップ伝導機構である $I_{TD}(T)$ の割合 $\gamma^{TD}(T, I_B)$ が温度上昇に伴い増大することが原因である可能性が高いことが判明した。

謝辞：本研究の一部は、CREST of JST (No. JPMJCR1777), Spintronics Research Network of Japan, Grants-in-Aid for Scientific Research (Grant 20H02199)の支援を受けた。

参考文献：[1] T. Suzuki et al., *Appl. Phys. Exp.* **4**, 023003 (2011). [2] A. Tiwari et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 04CD05 (2017). [3] S. Sato et al., *Phys. Rev. B* **96**, 235204 (2017). [4] R. Nakane et al., *Appl. Phys. Lett.* **112**, 182404 (2018). [5] R. Nakane et al., *Phys. Rev. Mater.* **3**, 024411 (2019). [6] S. Sato et al., *Phys. Rev. B* **102**, 035305 (2020).

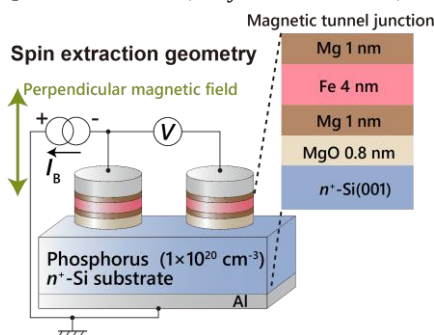


Fig. 1 Schematic illustration of a three-terminal device and the measurement setup to obtain Hanle signals.

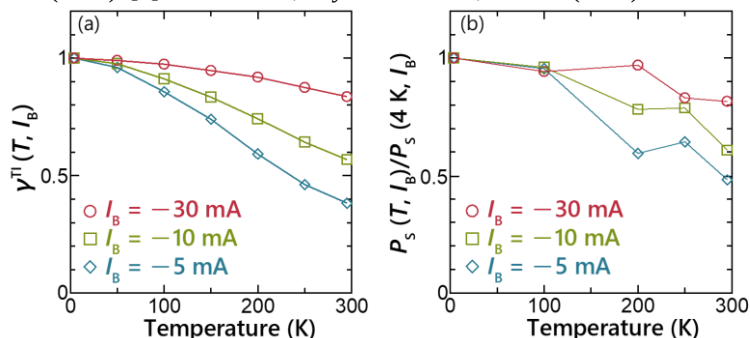


Fig. 2 (a) $\gamma^{TI}(T, I_B) = 1 - \gamma^{TD}(T, I_B)$ estimated from the $I-V$ characteristics measured at temperature T . (b) $P_S(T, I_B)/P_S(4 \text{ K}, I_B)$ estimated from the Hanle signals measured at T with a constant bias current I_B .