

新奇材料探索を指向した スピン輸送特性評価技術の確立

安 藤 裕一郎*

Establishment of evaluation technique of spin transport properties for material search study

Yuichiro Ando*

Recently, electronics devices which utilize spin polarized current has been attracting much attention because of its low power consumption. Whereas a variety of materials such as nonmagnetic metals, semiconductors, molecules, and so on has been proposed as a channel of the spin devices so far, investigation of spin transport properties e.g., spin diffusion length, spin lifetime, spin Hall conductivity and so on is strongly desired to design a practical spin devices. However, investigation of the spin transport properties is generally complicated and technically difficult compared with the conventional electrical properties. In this study we investigate an uncomplicated way to evaluate the spin transport properties in a variety of materials.

1. はじめに

電子の電荷情報以外にスピンの自由度を情報として利用する「スピントロニクス」が脚光を浴びている。これまでに、多種多様な材料を用いたデバイスが提案され、実用化に向けた研究が進められている。例えば2枚の強磁性体金属薄膜の間に非磁性金属薄膜を挟み、強磁性体薄膜の一方からスピンの向きが揃った電流（スピン流）を流し、もう片方の強磁性体薄膜の磁化の向きによって抵抗を変化させる「巨大磁気抵抗素子」はハードディスクの磁気ヘッドへの応用が期待されている。また、半導体トランジスタ構造のソース・ドレイン部分を強磁性体にして、半導体チャネルにスピン機能を付加する「スピントランジスタ」の研究も活況を呈している。このような研究の発展には対象材料中に於けるスピン輸送特性、即ちスピン情報を輸送できる距離や時間の定量的評価が必須である。電子スピンは角運動量の一種であるが、電子スピン自身では保存量ではなく、軌道角運動量などの他の角運動量へ散逸する。従ってスピンの輸送特性の評価は極めて重要なと言える。電気伝導特性についてはプローバーを用いた簡易測定技術が確立されている。一方、スピン輸送特性に関しては簡易測定技術の確立は困難を極める。その理由は以下の通りである。

- ① 固体中のスピン輸送長は数 μm 程度であり、プローバーでの測定スケールと比較して極めて短い。
- ② スピン輸送特性の評価に不可欠な強磁性体が酸化した場合、スピン注入・検出自身が不可能になる。

本研究では上記①、②を解決し、スピン輸送特性を評価する簡易測定技術の確立を図る。具体的にはサブ μm スケールの強磁性体電極を複数配列した絶縁基板を用意し、その上に対象物質を配置する。（図1参照）力学的接触によるコンタクトを介してスピン注入・検出を行いスピン輸送特性の評価を行う。また②の問題を回避する為、大気暴露後も利用可能な強磁性体プローバを作製する。

2. 実験方法

熱酸化Si基板上に電子線描画装置および電子線蒸着装置を用いてサブミクロン構造の強磁性体電極を形成した。強磁性体電極としては $\text{TiO}_2(0.5\text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 合金（25 nm）/Au(100 nm)/Ti(5 nm)を用いた。 $(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})$ 合金構造についても作製したが、この場合にはコンタクト抵抗が極めて高く、薄膜 Al_2O_3 膜の条件探索が必要であることが判明した。作製したデバイスの模式図および光学顕微鏡像を図1に示す。コンタクトパッドはAu/Ti電極で形成し、電極幅500 nmの強磁性体電極プローブを複数個配置した構造を形成した。（各強磁性体電極の間隔は500 nm）。測定ではチャ

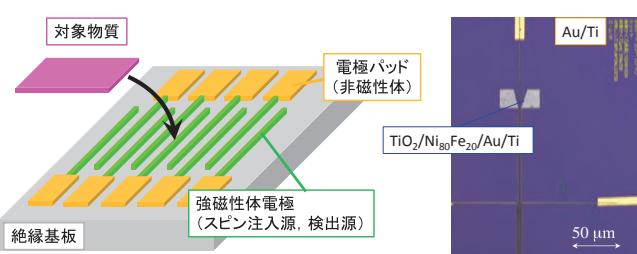


図 1. (左) 本研究で想定しているスピン輸送特性の評価手法と
(右) 実際に作製したデバイスの光学顕微鏡像。

ネルを形成した基板と強磁性体電極プローブを配置した基板を張り合わせ、力学的接触によるコンタクトを形成した。また、力学的接触のコンタクト状態を評価するため、Au(100 nm)/Ti(5 nm)のみを蒸着した電極も形成した。コンタクトの接触状態の評価には半導体パラメータアナライザを用い、スピニ特性の評価には自作の磁気抵抗測定装置を用いた。

3. 実験結果

先ず初めに、力学的接触のコンタクト状態を評価する為に、Au/Ti電極と種々の材料との接触について評価した。まず金ワイヤー（直径 50 μm ）を用い、ポリイミド膜（粘着性）を用いて固定し電流-電圧特性を評価した。図 2 の左図に示す通り、線形性を示す電流-電圧特性が得られ、良好なコンタクトが実現できていることが確認出来た。しかし、同様に基板に蒸着した薄膜（100 nm 厚）をポリイミド膜を用いて固定を試みたところ、電気的コンタクトは全く取れなかった。これは、基板の電極では膜厚が 100 nm 程度と薄い為、ポリイミド膜の粘着力だけでは下地基板に十分な押し付けが出来なかつたためであると考えられる。そこで自作の試料固定用の治具を用いて試料の固定を行い、同様の測定を行った。図 2 の右図に示すように、2 端子測定に於いても比較的線形性の高い電流-電圧特性が得られた。試料固定用治具を用いれば 100 nm 厚程度のチャネルであっても電気的コンタクトは容易に取れることが確認できた。そこで当該素子のスピニ特性が維持されているかを検討する為に、図 3 左図に示す電流電圧配置で磁気抵抗効果の測定を行った。注入電流は直流電流 1 mA とし、測定は 300 K で行った。その結果を右図に示す。スパイク状の信号が ± 10 Oe 近傍に

確認でき、それ以外に 0 Oe を中心としたブロードな山型の信号が確認できる。これらの信号は 2 つの強磁性体の磁化配置を考慮したトンネル磁気抵抗効果で想定される挙動と一致している。長手方向が磁場と垂直となる強磁性電極は外部磁界の掃引によりゆっくりと磁場掃引方向を向く。一方、長手方向が磁場と平行となる強磁性体電極は急峻な反転をする。そのため、2 枚の強磁性体電極の磁化が完全な平行状態、反平行状態となるのは、後者の強磁性体の反転時に起こると予想される。従って得られた信号は、実際に 2 つの強磁性体間をスピニ偏極した電子が輸送されている可能性を示唆している。しかし、スピニ信号にはトンネル磁気抵抗効果以外にも様々な効果が重畠してくることが指摘されているため、信号の起源については今後詳細に検討する必要がある。特筆すべき点は力学的接合で形成したデバイスであるにも関わらず、ノイズレベルが非常に小さく (10^{-7} V)，通常のスピニ輸送実験で想定されるスピニ信号 (10^{-6} V) でも検出が可能である点である。本研究でスピニ信号が極めて小さいのは強磁性体電極の構造（材料種、膜厚等）が最適化されていないためであると考えられる。今後、これらの条件を検討し、種々の材料のスピニ輸送特性評価へと展開していく予定である。

4. まとめ・今後の方針

新奇材料探索を指向し、簡易にスピニ輸送特性を評価できる手法について検討した。力学的コンタクトについて詳細に検討し、オーミック接合の実現およびノイズレベルが極めて小さいコンタクトの形成に成功した。これらのコンタクトはスピニ輸送特性の評価に極めて重要である。磁気抵抗効果測定の結果、トンネル磁気抵抗効果で期待できる信号と一致する信号を検出したが、信号の起源については今後慎重に検討していく予定である。

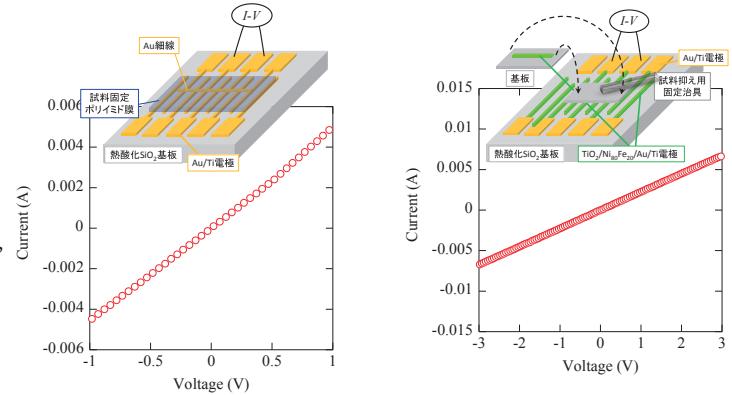


図 2. (左) 有機物吸着による電気的コンタクトの 2 端子電流-電圧特性と (右) 固定治具を用いた電気的コンタクトの 2 端子電流-電圧特性。

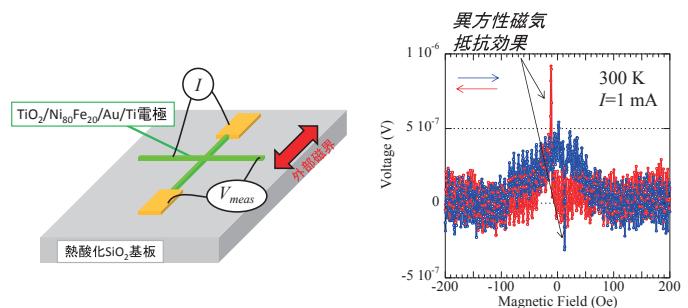


図 3. (左) 磁気抵抗効果測定で用いたデバイスと (右) 測定結果。