

氏名	安藤 裕一郎
所属機関	京都大学大学院工学研究科電子工学専攻
研究題目	微細加工プロセスを用いない簡易スピン輸送特性評価手法の確立

1. 研究の目的

電子のスピン自由度を制御・利用する「スピントロニクス」が脚光を浴びており、金属・半導体・絶縁体、有機物・無機物など、多様な材料においてスピン輸送特性の評価が最重要課題となっている。伝導率やキャリア移動度に代表される電気伝導特性の評価では、プローバを用いた簡易測定が可能である。スピン輸送特性に対しても簡易測定の手法が確立されれば、材料探索研究の飛躍的な発展が期待される。しかし、以下に示す理由により、当該手法の確立は困難を極める。

- ① スピン輸送長は一般にサブ μm ～数 $10\mu\text{m}$ 程度であり、プローバのスケールと比較して極めて短い。
- ② スピン輸送特性評価に不可欠な強磁性体が酸化した場合、スピン特性の著しい劣下を引き起こす。その為、大気中での強磁性体プローバの利用が困難である。

本研究では上記のような問題を克服し、幅広い材料に適用可能であり、かつ簡便にスピン輸送特性を評価できるプローバ“ナノスピンプローバ”の開発を行うことを目的とした。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

【実験方法】熱酸化 Si 基板 (SiO_2 膜厚 500 nm) をアセトン、イソプロピルアルコールをもちいて洗浄した後、電子線描画装置 (エリオニクス社製 ELS7500) を用いて Au パットの描画を行った。電極パットとして Au(100 nm)/Ti(5 nm)層を堆積 (電子線蒸着装置, 真空度: 1×10^{-6} Pa 以下) し、リフトオフ法を用いて非磁性電極を形成した。次に同様の手法 (電子線描画装置, 電子線蒸着法) を用いてサブミクロン構造の強磁性体電極を複数形成した。強磁性体電極としては TiO_2 (0.5 nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 合金 (25 nm) を用いた。強磁性電極の別候補として $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 合金構造も作製したが、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。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)。各強磁性電極の反転磁界 (磁化が反転するに必要な外部磁界) に差をつけるため、一部の強磁性電極には 50 μm 角の強磁性パット、もしくは強磁性電極先端が細くなった構造を形成した。通常の強磁性電極の反転磁界を比較して、前者は小さい反転磁界、後者は大きい反転磁界が期待される。

測定ではチャン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、スピン特性の評価には自作の磁気抵抗測定装置を用いた。全ての測定は室温で行った。

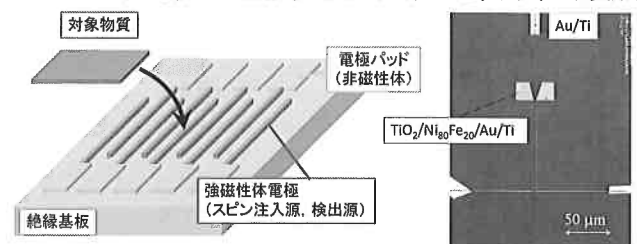


図 1. (左)本研究で想定しているスピン輸送特性の評価手法と (右)実際に作製したデバイスの光学顕微鏡像。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

【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 Cu 薄膜細線（100nm 厚）および $\text{TiO}_2/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜細線（25nm 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 以下程度と非常に薄い為、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ったためであると考えられる。そこで自作の試料固定用（金属製の骨組みにゴム製のコーティングをした）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 厚以下のチャンネルでも電気的コンタクトは容易に取れることが確認できた。

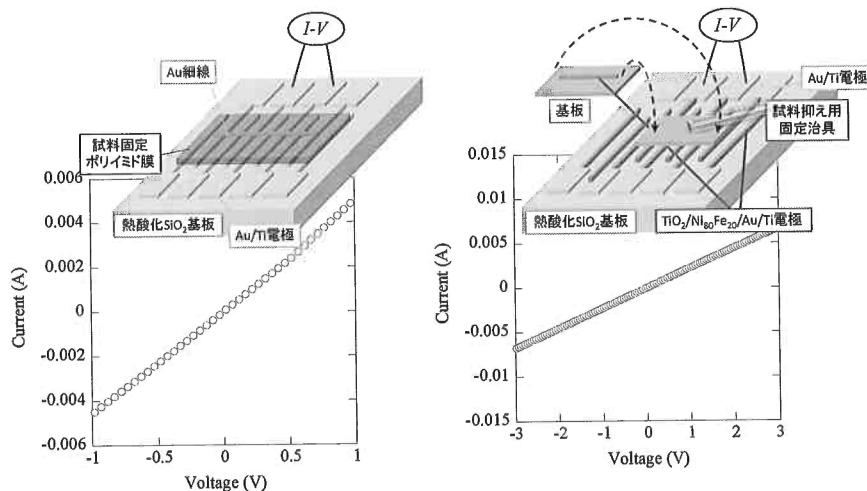


図 2. (左)有機物吸着による電気的コンタクトの2端子電流-電圧特性と(右)固定治具を用いた電気的コンタクトの2端子電流-電圧特性.

そこで当該素子のスピン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 1mA 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 $\pm 10 \text{ Oe}$ 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のみ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ン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、スピン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畳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)、通常のスピン輸送実験で想定されるスピン信号 (10^{-6} V) でも検出が可能である点である。本研究でスピン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。

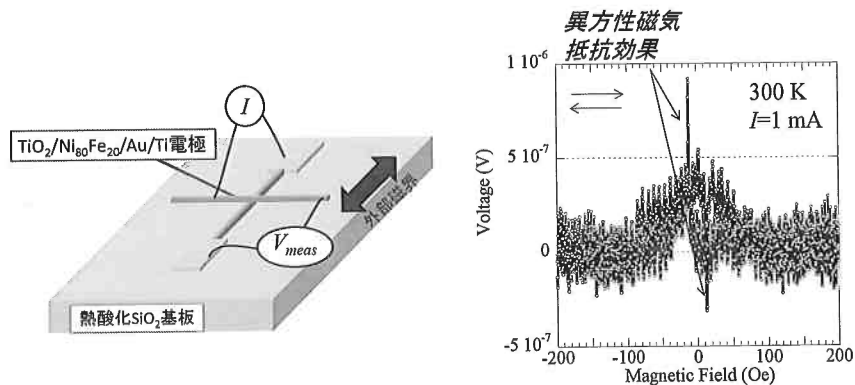


図 3. (左)磁気抵抗効果測定で用いたデバイスと(右)測定結果.

3. 研究の結論、今後の課題

微細加工を用いない簡易スピントランスポーション特性評価手法の確立を目指し、多岐にわたる材料のスピントランスポーション特性評価が可能な強磁性プローブを実現する技術の確立を行った。プローブ自体が薄膜であるため、力学的コンタクトを取る時に比較的強い力学的応力を印加する必要があったが、これは自作の固定治具で解決した。しかし、強い力学的コンタクトは有機物などの柔らかい材料では対象物質にダメージを与えてしまう恐れがある。基板そのものにエッチングを加え、プローブ部分の相対高さを向上するなどの工夫が必要となると考えられる。スピントランスポーション特性の評価としては、強磁性体プローブを2本力学的接触した素子においてトンネル磁気抵抗効果に起因すると思われる信号を検出することに成功した。これは一方の強磁性電極を対象材料とみれば、対象物質のスピントランスポーション特性評価が可能になったことを意味する。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)、通常のスピントランスポーション実験で想定されるスピントランスポーション信号 (10^{-6} V) でも検出が可能である点である。本研究でスピントランスポーション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、種々の材料のスピントランスポーション特性評価へと展開していく予定である。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

本研究はまだ初期的実証に留まっており、あらゆる材料のスピン特性を評価するにはコンタクトの形成手法、強磁性体/トンネル絶縁膜の作製手法の最適化など数多くの課題があることは事実である。しかし、実際に簡易な方法を用いたスピンの評価手法が実現可能であることが証明され、有機物のスピndeバイスなど、微細化が難しい対象においてもスピン特性の評価が可能になることが明らかとなった。材料探索における新たな評価手法となる可能性があり、将来的には社会的価値が向上する研究であると判断できる。

4. 2. 学術的価値

これまでに一度大気解放をした強磁性体電極を用い、かつ力学的コンタクトを用いたスピン輸送特性評価は報告されていない。本研究で大気解放や力学的コンタクトであってもスピン輸送が可能であることが確認できた。スピン特性評価の新たな可能性を証明した研究であり、学術的価値は非常に高いと判断できる。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

現状では予定なし。強磁性体電極の作製方法の改善などを行い、より確実な技術確立を行った後に投稿予定である。