

面内スピバルブ素子における Hanle 効果

物質系専攻 086046 七海裕貴

指導教員：大谷義近（教授）

キーワード：スピン、非局所注入法、スピン蓄積、スピン拡散、Hanle 効果

1. 研究の背景、目的

近年、「スピントロニクス」という分野が大きな注目を集めている。これまでのエレクトロニクスは電子の持つ電荷 e という物理量を扱ってきた。しかし、電子はもう一つの量子力学的な特性として、スピンと呼ばれる角運動量を持っている。電子スピンは、「アップ/ダウン」（以降↑と↓と略して書く）という二つの状態を持っており、磁性の起源も担っている。この電子スピンを従来のエレクトロニクスに応用し、これまで実現できなかった新しい機能を持たせる試みが研究されている。このようなスピンとエレクトロニクスを合わせた新しい分野を「スピントロニクス」という。現在、スピントロニクスの分野で注目されているものが、「純スピン流」と呼ばれる電荷の流れを伴わないスピン角運動量の流れである。強磁性体(F)/非磁性体(N)接合に電流を流した時、接合界面近傍でスピンの蓄積現象が起こる。純スピン流は、この蓄積されたスピンの拡散現象であり、等量の↑スピンと↓スピンの逆向きに流れ、スピン拡散長程度の大きさで緩和する。

このスピン拡散長は、スピン蓄積効果の距離依存性と Hanle 効果を測定することによって相補的に決定することができる。Hanle 効果とは、拡散伝導するスピン流が歳差運動によってそのコヒーレンスを失う現象のことを言う。これまでスピン拡散長の決定手段としての Hanle 効果は、無限に長い1次元非磁性細線内での拡散過程を仮定しなければならなかった。しかしこのような仮定は、F/N 界面がトンネル接合の場合は有効であるが、接合抵抗が無視できるオーミック接合の場合、スピン流の強磁性細線への染み出しがあるために有効ではなく、Hanle 効果の信号変化はトンネル接合の場合と異なるはずである。そこで、本研究ではオーミック接合における Hanle 効果を実験的に詳しく調べた。



図1：面内スピバルブ素子の模式図。

2. 実験方法

純スピン流の発生および検出は、面内スピバルブ素子を用いて行った。面内スピバルブ素子とは、強磁性細線と非磁性細線からなる図1のような構造を言う。左側の強磁性端子から非磁性細線に電流を流した場合、F/N 接合界面近傍でスピン蓄積現象が起こる。蓄積したスピンは、F/N 接合界面から左右にスピン拡散する。この際、非磁性細線の右側には電流が流れておらず、スピン拡散のみが起こっている。このスピン拡散の流れによって↑スピンと↓スピンの逆向きに流れ、純スピン流が発生する。この純スピン流は、図1に示す右側の強磁性端子で検出することが

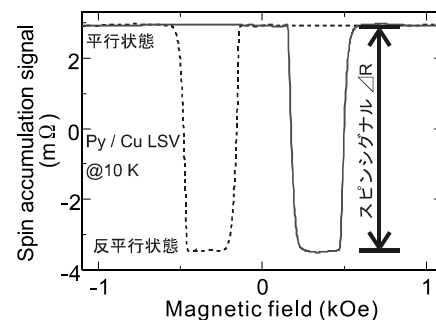


図2：スピン蓄積信号の例。

この純スピン流は、図1に示す右側の強磁性端子で検出することが

できる。スピン注入端子からスピン拡散長程度の範囲内にスピン検出端子を接合した場合、スピン蓄積電圧を検出することができる。この電圧は、2本の強磁性細線の磁化の相対角度に依存しており、平行/反平行時に電圧がそれぞれ最大/最小となる(図2)。

次に、スピン注入・検出強磁性端子の磁化が平行状態で、面内スピンバルブ素子に面直に磁場を印加した場合について考える。このとき拡散伝導するスピンは、歳差運動を誘起されることになる。歳差運動によってスピンの量子化軸が回転し、強磁性検出端子と相対的な角度を持つ。これによってスピンの角度に応じたスピン蓄積信号が検出されることになる。ここで注意しなければならないことは、

スピン流は拡散伝導しているから、各々のスピンは注入端子から検出端子までの伝播時間に分布があるということである。その時間分布によって、スピン検出端子では様々な角度を持ったスピンが検出されることになる。磁場が大きい場合、スピン回転角の広がりが増えるため、スピン蓄積電圧が減衰する現象が起こる。このような磁場によってスピンのコヒーレンスが失われる現象を Hanle 効果という(図3)。

本研究ではオーミック接合における Hanle 効果を調べるために、強磁性体と非磁性細線の接合界面は極清浄にする必要がある。そこで、斜め蒸着法を用いることによって試料作製を行った。また Al を蒸着し、*in-situ* で酸化処理を行うことで接合界面の制御も行った。強磁性体材料として Py(Ni-Fe 合金)を、また非磁性体細線材料として Cu もしくは Al を使用した。

3. 結果・考察

Py/Cu 面内スピンバルブ素子では、接合抵抗が無視できるほど小さいオーミック接合の素子(試料(I))と、接合抵抗が約 10 倍大きい依然として界面はオーミック的な振舞いを示す素子(試料(II))の2種類を作製し、 $T = 10\text{ K}$ で Hanle 効果の測定を行った。図4に示すように、接合抵抗が無視できる試料(I)では、垂直磁場による Hanle 効果の変化が殆ど現れないが、接合抵抗が大きい試料(II)では Hanle 効果による大きな信号変化が得られている。

ここでは Cu のスピン拡散長を 1500 nm としてトンネル接合を計算したが、トンネル

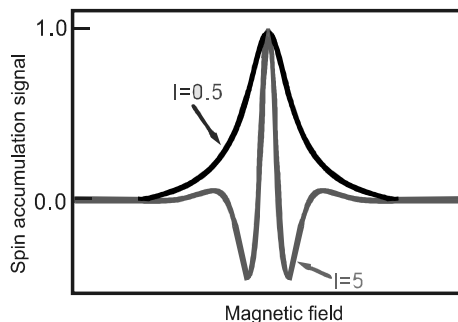


図3: Hanle 効果の磁場依存性。Iはスピン拡散長で規格化された強磁性端子間の距離を示す。

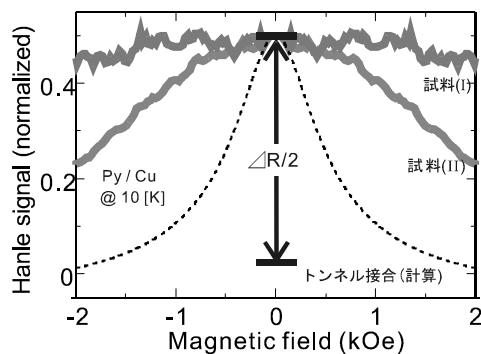


図4: Py/Cuにおける Hanle 効果の磁場依存性。縦軸はスピニングナルで規格化された Hanle 効果によるスピン蓄積信号の減衰の割合を示し、横軸は面内スピンバルブ素子に垂直に印加した外部磁場の大きさを示している。試料(I)と試料(II)の接合抵抗はそれぞれ $0.06\ \Omega$ 、 $0.6\ \Omega$ である。また、トンネル接合であった場合の計算結果はグラフのようになる。

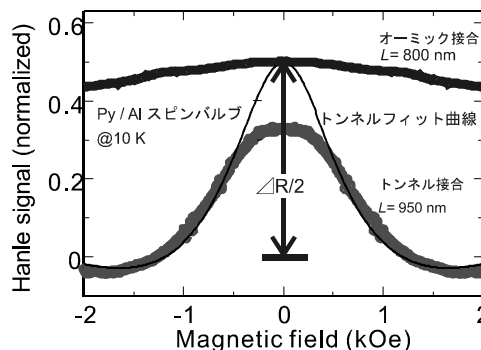


図5: Py/Alにおける Hanle 効果の磁場依存性。

接合の場合は更に大きな変化が起こることがわかる。

次に、比較的トンネル接合を作製し易いと考えた Py/Al 面内スピバルブ素子でも同様の測定を行った。Py/Al の場合、接合抵抗が小さいオーミック型の素子と、*in-situ* で酸化処理を行うことで界面の性質をトンネル型に変えた 2 種類の素子を作製することができた。図 5 に示すように、Py/Al 面内スピバルブ素子でも接合抵抗が大きいトンネル接合では、Hanle 効果による大きなスピニングナルの変化が観測された。トンネル接合の測定結果からフィットを行い、Al のスピンドiffusion長は 640 nm であることがわかった。図 4、図 5 から Al の方が Hanle 効果が大きいことが分かる。これは、トンネル接合における強磁性端子間距離とスピンドiffusion長の関係(図 3)から理解される。

これまでの実験結果から、オーミック接合とトンネル接合での Hanle 効果の振る舞いの変化は、非磁性細線内を流れる純スピンドiffusion流が強磁性検出端子によって影響を及ぼされたことが原因であると考えられる。接合抵抗が非常に小さい場合、スピンドiffusion流が強磁性細線に強く吸収され、純スピンドiffusion流の伝播時間が短くなる。その結果、歳差運動が抑制され Hanle 効果による減衰が小さくなる。

図 6 に示すように、オーミック接合における Py/Cu と Py/Al 面内スピバルブ素子を比較した場合、Py/Al の方が若干 Hanle 効果による信号変化が大きい。これは、非磁性細線のスピンドiffusion抵抗(スピンドiffusion流の流れ難さを表す)から説明することができる。スピニングナルの強磁性体距離依存性から Cu 及び Al のスピンドiffusion抵抗はそれぞれ、 $R_{Cu} = 3.2 \Omega$ 、 $R_{Al} = 7.9 \Omega$ と求めることができるが、スピンドiffusion抵抗が大きい Al では、スピンドiffusion流が Cu に比べて流れ難く、スピンドiffusion流の伝播速度が大きくなったためと考えることができる。

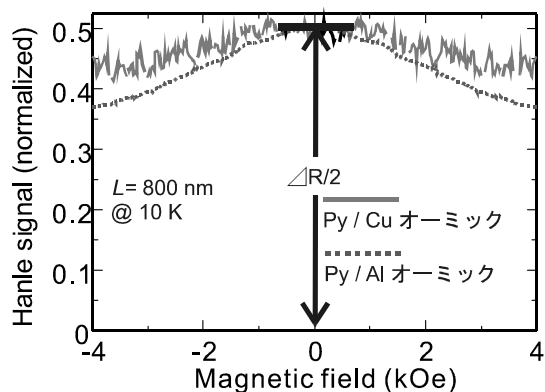


図 6: オーミック接合における Hanle 効果の非磁性材料依存性。実線は Al、点線は Cu での Hanle 効果によるスピンドiffusion信号を示す。

4. まとめ

Py/Cu 及び Py/Al 面内スピバルブ素子を作製し、強磁性端子と非磁性細線の接合条件によって Hanle 効果の信号変化が異なることを明らかにした。接合抵抗が小さいオーミック接合の場合、スピンドiffusion抵抗が小さい強磁性細線が並列に接続されるために、純スピンドiffusion流が流れている細線部のスピンドiffusion抵抗が小さくなり、スピンドiffusion流がトンネル接合に比べ早く流れる。その結果、スピンドiffusion流の伝播時間が小さくなり Hanle 効果による信号変化が小さくなると考えられる。

5. 学会発表

1. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近 (口頭発表)
「面内スピバルブにおける Hanle 効果の接合抵抗依存性」
日本物理学会第 64 回年次大会, 立教大学, 2009 年 3 月
2. 七海 裕貴, 木村 崇, 大谷 義近
「面内スピバルブ素子におけるスピンドiffusion吸収と Hanle 効果」
特定領域研究「スピンドiffusion流の創出と制御」平成 20 年度成果報告会, 2009 年 1 月
他 ポスター 3 件