

金属ナノ構造における非局所スピントランスポート

物質系専攻 66124 佐藤孝哉

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

1. 序論

電流の担い手である電子は、素電荷以外に、上向きおよび下向きスピンドランスポートで表されるスピンドランスポート角運動量を持っている。これまでのエレクトロニクス素子においては、専ら非磁性体で構成され、伝導に及ぼすスピンドランスポートの寄与は無視されてきた。しかし、近年 1988 年の巨大磁気抵抗効果の発見を契機に、強磁性金属中を流れるスピンドランスポート偏極した伝導電子を用いることにより、スピンドランスポート情報を反映した伝導特性を誘起することができることが明らかになり、スピンドランスポートエレクトロニクス分野として活発な研究が進められている。

スピンドランスポート偏極している強磁性金属から非磁性金属に電子を注入する（電流を流す）と、接合近傍にスピンドランスポート蓄積が誘起される。非平衡に蓄積したスピンドランスポートはその情報を消失しながら定常状態へと拡散伝導する。このようなスピンドランスポート拡散現象を詳細に調べることは、スピンドランスポート反転散乱機構の解明やスピンドランスポートの流れ（スピンドランスポート流）を制御する観点から重要である。そこで本研究では非磁性金属中でのスピンドランスポート拡散現象、特に温度依存性について詳細に調べた [1]。

2. 実験

本研究ではスピンドランスポート蓄積の緩和挙動についてスピンドランスポートバルブ測定を行うことで実験的に調べた。試料作製にはリフトオフ法を用いた。作製した代表的な試料の走査型電子顕微鏡（SEM）像を Fig.1 に示す。

試料は、2本の強磁性パーマロイ Py 細線とそれを橋渡しする非磁性 Cu 細線からなる面内スピンドランスポートバルブ構造である。この試料に、Fig 2(a) に示すように、一方の Py/Cu 接合界面に電流 I を流し Cu 細線内にスピンドランスポート蓄積を誘起する。前述のように、蓄積したスピンドランスポートは拡散するため、電流を流していない右側にもスピンドランスポート拡散によるスピンドランスポート流が発生する。ここで、もう一方の Py 細線と Cu 細線間の電圧は、Fig. 2(b) に示すように、2本の Py 細線の磁化の相対角度に依存することになり、平行、及び反平行時に、それぞれ、電圧が最大、最小となる。

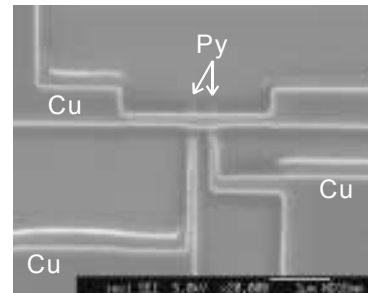


Fig.1 面内スピンドランスポートバルブ素子の SEM 像

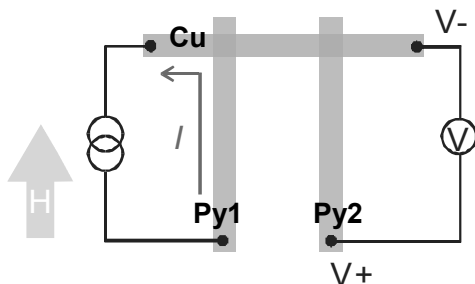


Fig.2(a) 非局所スピンドランスポートバルブ測定回路図

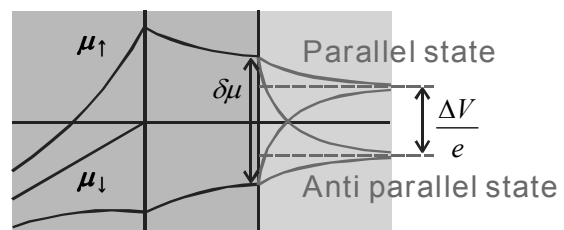


Fig.2(b) 非局所スピンドランスポート測定における電気化学ポテンシャル

典型的な非局所スピバルブの測定結果を Fig.3 に示す。平行、及び反平行状態に対応した電圧変化が明瞭に観測されており、Py 1 から注入されたスピが Cu 細線内を拡散し、Py2/Cu 界面においても蓄積が保持されているのが確認できる。ここで、抵抗変化である ΔR をスピ蓄積信号と呼び、接合部のスピ蓄積 $\delta\mu$ と次の関係があることが知られている。

$$\Delta R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{p\delta\mu}{eI}$$

ここで、 p は Py のスピ偏極率である。スピ蓄積信号 ΔR はスピ緩和が小さい程大きくなるため、その大きさから非磁性金属内のスピ緩和過程を調べることができる。本実験では非磁性金属として Cu および Al を用いた素子におけるスピ蓄積信号の温度依存性、及び Py 電極間隔依存性を測定し、それぞれの金属におけるスピ緩和過程を調べた。

3. 結果・考察

Py/Cu/Py と Py/Al/Py のスピバルブ(Py-Py 端子間距離 200nm、Cu 膜厚 120nm、Al 膜厚 20nm) に対する規格化したスピ蓄積信号の温度依存性を Fig.4 に示す。両試料共、100K 以上の領域では、昇温に対しスピ蓄積信号が減少していることが分かる。これは電子-フォノン散乱の影響であると考えられる。しかし、Py/Cu/Py スピバルブ素子の場合には 50K 近傍でスピ蓄積信号が極大を取るのに対し、Py/Al/Py スピバルブ素子の場合には単調減少している。この差異は以下のように説明できる。

試料を低温にすることにより、電子の平均自由行程が長くなるが、平均自由行程の増加に伴い、表面酸化層によるスピ反転散乱の影響が大きくなる(Fig.5)。Cu 酸化層はスピ反転確率が大きいため、Py/Cu/Py 素子では、平均自由行程が膜厚と同程度にまで長くなると、スピ散乱確率が増え、スピ蓄積が減少すると考えられる。一方、Al の酸化層は、界面で電子がスペキュラー散乱されるためスピ反転の確率は極めて小さくすると予想される。そのため低温においても、電子-フォノン散乱によるスピ反転が支配的になると考えられる。

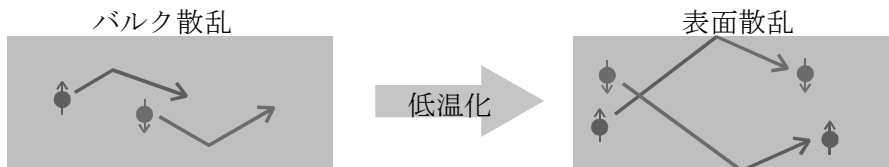


Fig.5 散乱過程の温度変化

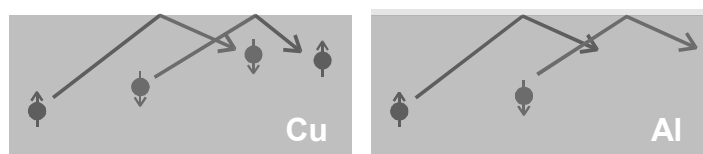


Fig.6 Cu と Al の表面酸化層による影響

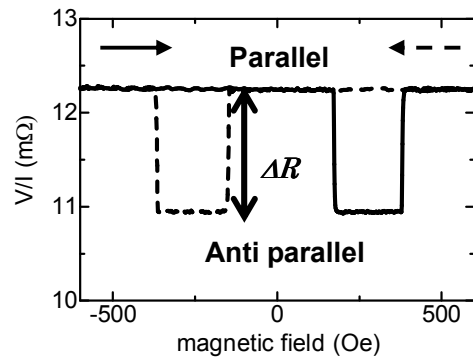


Fig.3 非局所スピバルブ測定

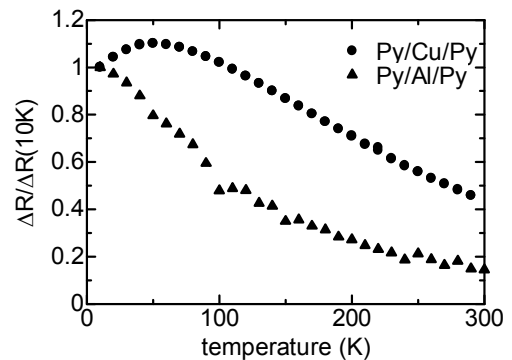


Fig.4 規格化スピ蓄積信号の温度依存性

さらに Cu の表面酸化層の影響を調べるために Py/Cu/Py スピンバルブの Cu 膜厚を 30nm, 60 nm, 120 nm, 320 nm と変化させて同様の測定を行った。各膜厚におけるスピンの蓄積信号の温度依存性の測定結果を Fig.7 に示す。この測定結果の特徴は、Cu の膜厚が薄くなるに伴い a) スピン蓄積信号が減少すること、b) スピン蓄積信号が最大となる温度が高温側に移ること (Fig.8) である。a) の理由としては、Cu の膜厚が薄いほど表面酸化層によるスピン反転散乱の影響が強く現れるためスピン蓄積信号の緩和が促進され、スピン蓄積信号が小さくなったためと考えられる。b) については、Cu の膜厚が薄い試料ほど、高温側で平均自由行程が膜厚に近づき、前述の表面酸化層によるスピン反転散乱により、極大温度が高温側に推移したためと考えることができる。

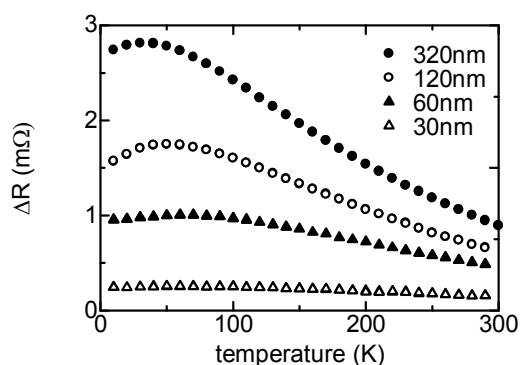


Fig.7 Py/Cu/Py スピンバルブの各 Cu 膜厚における スピン蓄積信号の温度依存性

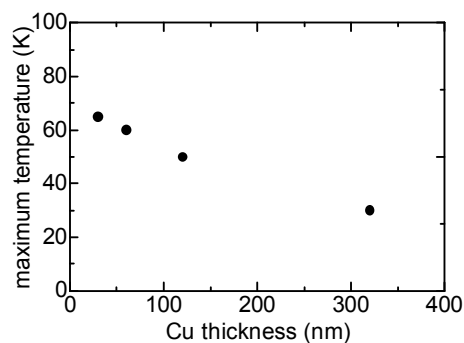


Fig.8 スピン信号の極大温度の Cu 膜厚依

4. まとめ

Py/Cu/Py、及び Py/Al/Py スピンバルブ素子を斜め蒸着法とリフトオフ法により作製し、それらのスピン蓄積緩和挙動を非局所スピンバルブ測定から実験的に調べた。Cu 細線においては、スピン蓄積信号の温度依存性、及び Cu 膜厚依存性から、Cu 細線では、低温で表面酸化層によるスピン反転散乱が主要なスピン緩和機構であることが分かった。一方、Al 細線においては、スピン信号は温度に対して単調に変化し、Al の表面酸化層によるスピン反転散乱の影響は小さく、電子-フォノン散乱が主要なスピン緩和機構であることが分かった。その他、同様のスピンバルブ構造と非局所スピン注入法を用いて、スピンホール効果の電氣的検出にも成功した[2]。

5. 論文・学会発表

- [1] T. Kimura, **T. Sato** and Y. Otani Phys Rev. Lett. in press
- [2] T. Kimura, Y. Otani, **T. Sato**, S. Takahashi and S. Maekawa Phys Rev. Lett. (2007)
- [3] 「NiFe/Cu 及び Co/Cu 面内スピンバルブ素子における磁気伝導特性」, 日本物理学会 2006 年度秋季大会
- [4] 「強磁性パーマロイ細線のスピンホール効果と異常ホール効果」, 日本物理学会 2007 年春季大会
- [5] 「NiFe/Cu 面内スピンバルブ素子における磁気伝導特性」, 第 45 回茅コンファレンス