

CuBi 合金におけるスピホール効果の膜厚依存性と三次元解析

物質系専攻 116023 鈴木 裕

指導教員：大谷義近（教授）

キーワード：純スピ流、スピホール効果、スピホール角、スピ拡散長

【研究背景と目的】

近年、スピントロニクス分野で強磁性体や外部磁場を使わずに純スピ流を生成する「スピホール効果」が注目を集めている。スピホール効果は、電流とスピ量子化軸に直交する方向にスピ角運動量のみ流れ、すなわち純スピ流を生成する現象であり、このとき試料両端には電荷ではなくスピが蓄積する。スピホール効果を誘起する物質には様々な報告例があり、半導体や $4d,5d$ 遷移金属及び合金系などがある。特に非磁性体である Cu にスピ軌道相互作用の強い Bi を添加した合金系では非常に大きなスピホール効果が観測されている[1]。スピホール効果を評価する物理量に「スピホール角」と「スピ拡散長」がある。スピホール角は電流と純スピ流の変換効率であり、スピホール効果を定量的に評価する指標になっている。またスピ拡散長はスピが緩和するまでの距離を表しており、スピホール角を決定するために不可欠な物理量である。したがって、スピホール角とスピ拡散長を正しく評価することは非常に重要である。

そこで本研究では CuBi 合金のスピホール角とスピ拡散長を定量的に評価するため、CuBi 合金におけるスピホール効果の膜厚依存性について調べた。さらにその結果を Takahashi-Maekawa による一次元スピ拡散モデル（以下、一次元解析）[2]と Valet-Fert 理論に基づく三次元スピ拡散モデル（以下、三次元解析）[3]を用いて解析を行い、スピホール角とスピ拡散長を定量的に評価したので、その詳細について報告する。

【実験方法】

本研究では、電子線リソグラフィーとリフトオフ法を用いて、図 1 のような面内スピバルブ素子を作製した。2本の強磁性体 NiFe 合金(Py)を非磁性体 Cu で架橋した面内スピバルブ構造に、CuBi 合金が挿入されている。Bi 濃度は 0.5%とし、膜厚依存性を調べるために膜厚を 10-30 nm の試料を作成した。Py1 細線から Cu 細線の上部へと電流を流すことによって、Cu 細線の下部には純スピ流のみを誘起することができる。生成された純スピ流の大部分は、CuBi 細線に吸収され、逆スピホール効果（純スピ流を電荷の流れへと変換する、スピホール効果の逆過程）によってスピホール電圧に変換される。また実際にどのくらいの純スピ流が CuBi 細線に吸収されたかは、Py2 細線を用いた非局所スピバルブ測定から見積ることができる。

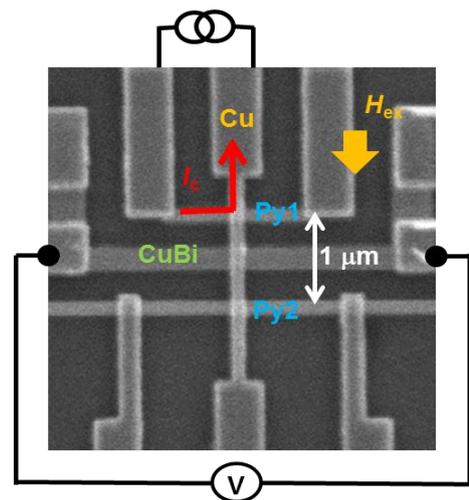


図1 本実験で用いた面内スピバルブ素子の SEM 像。また、逆スピホール効果の測定回路を表している。

【結果・考察】

膜厚 20 nm における $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ (Bi: 0.5at.%) 細線の逆スピンホール効果の結果を図 2 に示す。Cu 単体ではスピンホール効果を示さないが、わずか 0.5% の Bi を添加することでスピンホール効果が発現している。また、スピンホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} に着目すると、その値は $75 \mu\Omega$ 程度であり、非常に大きなスピンホール効果が発現していることが分かる。スピンホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} の膜厚依存性を図 3 に示す。スピンホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} は膜厚が 20 nm 以下ではほぼ一定であるが、膜厚が 20 nm よりも大きい場合には減少していくような振る舞いが見られている。

次にこれらの結果から一次元解析と三次元解析を用いてスピン拡散長とスピンホール角の解析を行った。スピン拡散長は非局所スピバルブ測定から見積もることができる。得られたスピン拡散長の膜厚依存性をプロットすると図 4(a) のようになる。膜厚の増加によってスピン拡散長が長くなっていることが分かる。これはスピン拡散長 λ_{CuBi} と抵抗率 ρ_{CuBi} の関係が反比例であることに起因している[4]。一般的にメゾスコピック系では膜厚の増加に伴い、抵抗率は減少していく振る舞いを示す。このことから、膜厚の増加によって抵抗率 ρ_{CuBi} が減少し、それに伴ってスピン拡散長 λ_{CuBi} が長くなったと考えられる。また、一次元解析と三次元解析でのスピン拡散長を比較すると、三次元解析のスピン拡散長が長くなることが分かる。この理由については、後に図 5 とともに説明する。同様にスピンホール角の膜厚依存性をプロットすると図 4(b) のようになる。スピンホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} と同様に、膜厚が 20 nm 以下ではほぼ一定であるが、膜厚が 20 nm よりも大きい場合には減少していくような振る舞いが見られている。この理由は現在のところよく分かっていないが、膜厚の増加に伴い、スパッタ法で作成した CuBi 細線の端にバリができやすくなるなど試料作成時の問題点が挙げられる。以上のことから、膜厚が 20 nm 以下について着目すると、三次元解析のスピンホール角は $\alpha_{\text{H}}^{3\text{D}} = -24 \pm 9\%$ と非常に大きな値となっている。これは一次元解析でのスピンホール角 $\alpha_{\text{H}}^{1\text{D}} = -12 \pm 4\%$ と比較して 2 倍程大きい値である。したがって CuBi の場合、一次元解析はスピン拡散長とスピンホール角ともに過小評価されている傾向にある。これは一次元解析の場合、Cu 細線から CuBi 細線へ垂直な方向に流れる純スピンのみを考慮しているが、CuBi のように細線の膜厚 t_{CuBi} とスピン拡散長 λ_{CuBi} の関係が

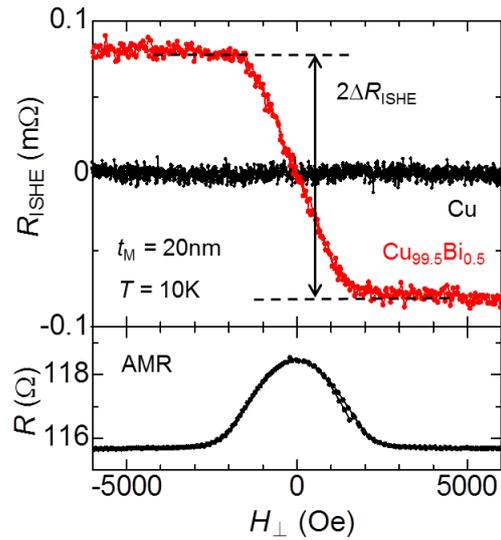


図 2 膜厚 20 nm における $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ (Bi:0.5 at.%) 細線の逆スピンホール効果と Py 細線における異方性磁気抵抗効果(AMR)。

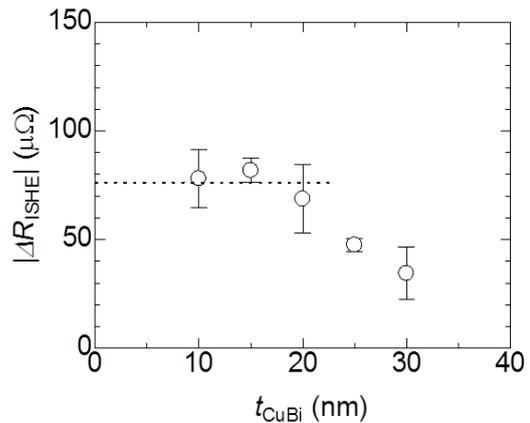


図 3 スピンホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} の膜厚依存性。

$t_{\text{CuBi}} < \lambda_{\text{CuBi}}$ を示す系では横方向への純スピ流(スピ蓄積の勾配)の拡散を考慮する必要があるからである。図 5 は三次元解析によって計算された膜厚 20 nm での $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ におけるスピ蓄積の分布図である。図 5 から確かに横方向へスピ蓄積の拡散があることが確認できる。以上のことから、 CuBi のような $t_{\text{CuBi}} < \lambda_{\text{CuBi}}$ を示す系では Cu/CuBi 接合における横方向への純スピ流を考慮することで、正確なスピ拡散長とスピホール角を得ることができる。

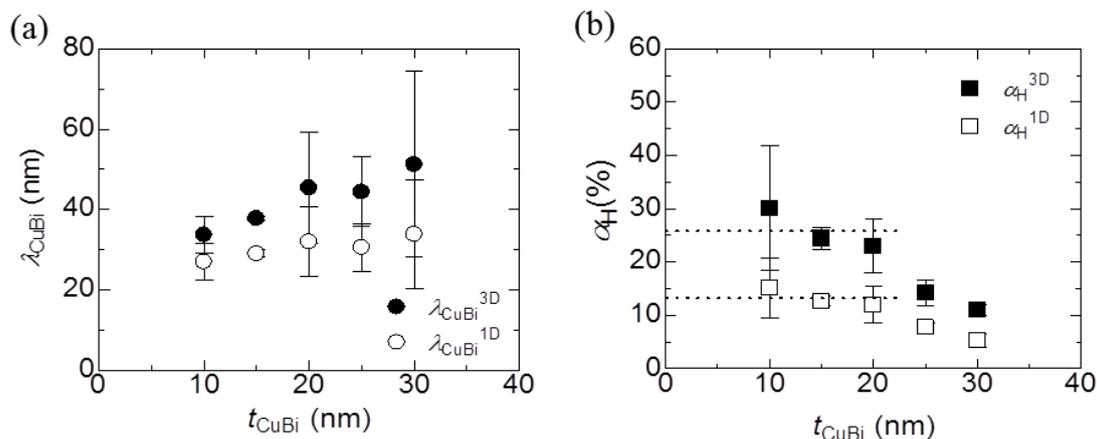


図 4 (a)スピ拡散長の膜厚依存性。 (b)スピホール角の膜厚依存性。

【まとめ】

本研究では、面内スピバルブ素子を用いて CuBi 合金におけるスピホール効果の膜厚依存性を測定した。その結果、スピホール抵抗の変化量 ΔR_{ISHE} は膜厚が 20 nm 以下ではほぼ一定であるが、膜厚が 20 nm よりも大きい場合には ΔR_{ISHE} が減少していくような結果が見られた。さらに CuBi 細線の膜厚 t_{CuBi} とスピ拡散長 λ_{CuBi} が $t_{\text{CuBi}} < \lambda_{\text{CuBi}}$ の関係であることから Cu/CuBi 接合における横方向への純スピ流を考慮することで、正確なスピ拡散長とスピホール角を得ることができた。その結果、膜厚が 20 nm 以下でのスピホール角は $\alpha_{\text{H}}^{3\text{D}} = -24 \pm 9\%$ となり、非常に大きなスピホール角が得られた。

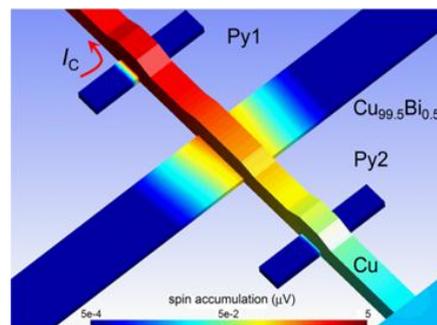


図 5 三次元解析によって計算された膜厚 20 nm での $\text{Cu}_{99.5}\text{Bi}_{0.5}$ におけるスピ蓄積の分布図。
 $t_{\text{CuBi}} < \lambda_{\text{CuBi}}$ より、スピ蓄積が横方向へ拡散している。

参考文献:[1] Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 156602 (2012).

[2] S. Takahashi and S. Maekawa, Phys. Rev. B **67**, 052409 (2003).

[3] T. Valet and A. Fert, Phys. Rev. B **48**, 7099 (1993).

[4] Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 016805 (2013).

学会発表: 日本物理学会 2012 年秋季大会「三次元スピ拡散モデルを用いたビスマス添加による外因性スピホール効果の解析」

日本物理学会 2011 年春季大会「 $6p$ 不純物準位の共鳴散乱による外因性スピホール効果」

日本物理学会 2011 年秋季大会「軽元素不純物によるスピホール効果増強の可能性」