

# 学位論文の要約

題目 スピン輸送現象を利用した反強磁性体磁化の検出

氏名 小田研人

## 序論

現在、電子が持つ内部自由度のうち電荷とスピンの 2 つを相互に利用しようとする研究が盛んに行われており、この研究分野はスピントロニクスと呼ばれている。これまで多くの研究で強磁性体が研究対象とされてきたが、近年では全体として自発磁化を持たない反強磁性体が注目を集めている。それは、反強磁性体は漏れ磁場のないことや共鳴周波数がテラヘルツ領域に存在するという応用上の利点があるためである。反面、自発磁化をもたない故に、反強磁性体の磁化制御はこれまで困難だと考えられてきたため、反強磁性体の磁化配向を電氣的に検出する手法は確立されていなかった。本研究では、反強磁性体の磁化方向を電氣的に検出することを試みた。その手法として、近年発見されたスピンホール磁気抵抗効果 (SMR) が挙げられる。SMR とは、強磁性体/重金属のヘテロ構造において、重金属層のスピンホール効果により生じるスピン流と強磁性層の局在磁気モーメント間の交換相互作用に起因した磁気抵抗効果であり、強磁性体が金属か絶縁体かに関わらず磁化方向の電氣的な検出を可能とする。また、ごく最近、スピン流と反強磁性体の磁化との相互作用を示唆した実験結果が報告されたため、SMR を反強磁性体にも適用することが可能であると考えられる。本研究では、第一に SMR を介したノンコリニア反強磁性体の磁化配向の検出を試みた。第二に、反強磁性体の SMR の温度依存性を調査し、反強磁性体のネール温度の検出を試みた。

本研究で取り扱う反強磁性体は二種類ある。一つ目は Mn 原子が三角格子を構成する反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Ir}$  であり、隣り合う磁化は互いに  $120^\circ$  の角度を成す。二つ目は  $\text{CoO}$  である。 $\text{CoO}$  は、酸素原子を介した超交換相互作用が働く反強磁性酸化物であり、ネール温度が 293 K にあることで知られる。

## 重金属/ノンコリニア反強磁性体の磁気抵抗効果

これまで、隣り合う磁化が反平行に配列した反強磁性体の磁気抵抗効果の研究は報告されてきたものの、 $\text{Mn}_3\text{Ir}$  のようなノンコリニアな磁化構造をもつ反強磁性体の磁気抵抗効果は研究されてこなかった。

本研究では、スパッタリング法によって成膜された重金属 W/ 反強磁性体  $\text{Mn}_3\text{Ir}$  および重金属 Pt/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  ヘテロ構造の薄膜を用いた。これをホールバー素子に加工し、1 mA の電流を流しながら薄膜面内磁場を印加し、抵抗値の磁場印加角度依存性を測定した。その結果、加熱処理後の素子のみ抵抗値が磁場印加角度に依存した。W/  $\text{Mn}_3\text{Ir}$  では、電流の向きと磁場の向きが平行（垂直）の場合は抵抗値が極小値（極大値）を示した。一方で、Pt/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  では、電流の向きと磁場の向きが平行（垂直）の場合は抵抗値が極大値（極小値）を示した。また、W/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  は磁場を電流およびスピン分極方向に対して垂直となる面で回転させたときに磁気抵抗効果が得られたのに対して、Pt/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  は磁場を電流に対して垂直となる面で回転させたときのみ磁気抵抗効果が得られた。

得られた磁気抵抗効果について定性的な議論をするために、磁場に対して平行な磁化成分と直交成分を分離して得られる磁気抵抗効果を議論した。両方の磁化成分において、磁場を電流に対して垂直となる面で回転させると、SMR が現れる。一方で、磁場をスピン分極方向に対して垂直となる面で回転させると、磁化と電流との相対角度により磁性中の電気抵抗が変化する異方性磁気抵抗効果(AMR)が現れる。これを基に得られた磁気抵抗効果を解析した結果、W/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  では、磁場に対して垂直な磁化成分が支配的な SMR と AMR の両方が観測された。一方、Pt/ $\text{Mn}_3\text{Ir}$  では、磁場に対して平行な磁化成分が支配的な SMR が観測された。このように、反強磁性金属のノンコリニアな磁化配向を電氣的に検出することに成功した。

#### Pt/CoO/Pt の磁気抵抗効果の温度依存性

上記の研究において、SMR を介した反強磁性体の磁化の電氣的な検出に成功した。SMR の温度依存性を調査すれば、磁気転移温度の検出が期待できる。そこで、本実験では、ネール温度を 293 K にもつ CoO を用い、Pt/CoO/Pt 三層膜構造の磁気抵抗効果の温度依存性を測定した。

まず、反強磁性体の磁化が磁場応答することで得られる SMR の面内磁場印加角度依存性は以下のように予想される。反強磁性体に外部磁場を印加したとき、各々の磁化は交換磁場を感じるため、外部磁場と交換磁場を足し合わせた方向に磁化は制御される。磁場が十分に弱いとき、磁化は磁場に対して垂直に配向するため、負の SMR が得られる。磁場印加強度を高くすると、磁化は磁場方向に向き始めるため、得られる SMR の大きさは小さくなり、最終的に正の SMR が得られる。一方で、常磁性の場合、磁場を印加すると時間平均磁化が磁場印加方向に生じるため、微小な正の SMR が得られると予想される。

MgO(001)基板の上に Pt(4 nm)/CoO(10 nm)/Pt(4 nm)三層膜構造をスパッタリング法によりエピタキシャル成長させた後、細線長さ 25  $\mu\text{m}$  幅 5  $\mu\text{m}$  のホールバーに素子加工した。作製し

た素子に電流 1 mA を印加し、200 K から 320 K までの 10 K 毎に、抵抗値の面内磁場角度依存性を測定した。その結果、CoO が反強磁性のときは温度の上昇に対して SMR が減少した。この温度領域において、べき乗則を用いて測定結果を  $R(T_N - T)^{\nu}$  でフィッティングすると、 $T_N \sim 291$  K が得られ、CoO のネール温度とほぼ一致した。

一方で、磁気転移温度以上の磁気抵抗効果は、温度上昇とともに増加した。これは、常磁性磁化の温度依存性では説明がつかない。この原因として挙げられるのは、伝導電子にローレンツ力が働くことで生じる正常磁気抵抗効果や、スピン流のスピン分極方向が磁場によって変化することで生じるハンレ磁気抵抗効果といった重金属単体で発現する磁気抵抗効果の寄与である。この温度領域で見られた磁気抵抗効果は、SMR 以上に他の磁気抵抗効果が効いている可能性がある。以上の研究により、SMR を介したネール温度の検出に成功した。今後は、様々な反強磁性体のネール温度の検出だけでなく、別の物性温度の検出もできると期待され、反強磁性体スピントロニクスの研究が加速すると考えられる。