

学位論文の要約

題目 カイラル反強磁性体の磁気輸送特性に関する研究

氏名 小林裕太

序論

“Interesting but useless,”ルイネールは反強磁性体のことをこのように評した。確かに、強磁性体が外部磁場で容易に制御が可能であり、種々の用途に用いられる一方、正味の磁化を持たない反強磁性体が役に立たないと考えるのは自然であろう。しかしながら、薄膜作成や微細加工の技術向上により昨今スピントロニクスにおいてその応用の可能性が見直されている。その契機となったのが 2016 年に報告された、反強磁性磁気構造の電流制御である。電流による磁気構造制御が示されたことで、反強磁性体が持つ THz 帯域の高速ダイナミクスといった優れた特性を自在に応用できる可能性が示されたことになる。

当初、反強磁性体スピントロニクスの文脈でよく用いられていたのは NiO や IrMn, CuMnAs といった隣接する 2 つの磁気モーメントが互いに反平行を向いているコリニア反強磁性体であった。一方、最近カイラル反強磁性体という新たな物質群が注目を集めている。カイラル反強磁性体は隣接する 3 つの磁気モーメントが互いに 120° を向くノンコリニア磁気構造を持つ反強磁性体である。微小なキャント磁化を有するため、外部磁場や電流によって容易に操作が可能である。また磁気構造に由来して有限のベリー曲率をもつため、正味の磁化をほぼ持たないにも関わらず大きな磁気抵抗効果を示す。このようにカイラル反強磁性体は電気的な検出、制御が容易な反強磁性体スピントロニクス材料として注目されている。他方、その物性探索は限られた物質や特性に留まっている。本研究では、以下に示した 2 つの観点からカイラル反強磁性体の基礎物性に関する調査を行っている。

1. カイラル反強磁性体 $L1_2\text{-Mn}_3\text{Ir}$ (111)配向薄膜における外因性異常ホール効果

カイラル反強磁性体 $L1_2\text{-Mn}_3\text{Ir}$ は異常ホール効果が理論的に初めて予言された物質である。スピントロニクスの分野においてもその優れた耐腐食性や大きな交換バイアスから強磁性体のピン止め相として用いられてきた。しかしながら、バルク単結晶ではその巨大な磁気異方性のために磁気構造の制御が難しく、異常ホール効果は未だ観測されていない。著者らは、2020 年 $\text{MgO}(001)$ 単結晶基板上に $L1_2\text{-Mn}_3\text{Ir}(001)$ エピタキシャル薄膜を成膜し、その異常ホール効果を観測している。他方、理論的な予測では $L1_2\text{-Mn}_3\text{Ir}$ の異常ホール効果は

(111)方向に磁場を印加した際に最も顕著な特性が見られるとされている。そこで本研究では、 $L1_2$ - Mn_3Ir の(111)配向薄膜を作成し、その異常ホール効果を調査した。

本研究では、 $MgO(111)$ 単結晶基板上に Mn_3Ir 合金をマグネトロンスパッタによって積層させ薄膜を作成した。結晶配向および $L1_2$ 規則化は X 線回折測定により評価した。基板温度 600°C 以下で積層した試料は(111)配向がみられた一方、基板温度が 700°C の試料では多結晶化がみられた。 $L1_2$ 規則化は基板温度 500°C 以上の試料についてみられた。

得られた試料についてホール抵抗測定を行い異常ホール効果の大きさを評価した。異常ホール伝導度は(001)配向の試料と比較すると同程度の大きさであった。他方、化学規則度 ($L1_2$ 規則化の割合に相当する)によって得られた異常ホール伝導度を規格化すると、(111)配向試料で異常ホール伝導度が大きいことが明らかになった。これは理論的な予測と一致している。更に応答を増大させるためには化学規則度を増加させていくことが重要であると考えられる。また基板温度 700°C の多結晶試料では、 $MgO(001)$ 基板上の試料と同様に保磁力が減少する傾向が見られた。更に、温度依存測定から異常ホール伝導度がシート伝導度に依存して大きく変化することが明らかになった。これは異常ホール効果への外因性の寄与を示唆するものである。

以上の結果は $L1_2$ - Mn_3Ir の基礎物性を明らかにするものであり、反強磁性スピントロニクスに向けた指標となるものである。

2. カイラル反強磁性体 $D0_{19}$ - Mn_3Sn/Pt 二層膜におけるスピン軌道トルク磁化反転のパルス幅依存性

$D0_{19}$ - Mn_3Sn は異常ホール効果が初めて観測された、最も広く研究されているカイラル反強磁性体である。スピントルクによる磁気構造の制御も報告されており、角運動量の受け渡しによる磁気ダイナミクスはよく理解されている

他方、強磁性体のスピントルクによる磁化反転は印加するパルス幅に依存して角運動量の受け渡しによって記述される領域と、確率的な励起によって記述される領域に分かれる。しかしながら、カイラル反強磁性体においてその確率的な励起はこれまであまり着目されてこなかった。本研究では $D0_{19}$ - Mn_3Sn のスピン軌道トルク磁化反転のパルス幅依存性から、確率的な励起過程の調査および熱安定性を見積もりを行った。

本研究では、熱酸化シリコン基板上にマグネトロンスパッタによって $Mn_{77}Sn_{23}$ および $Mn_{68}Sn_{32}$ 合金ターゲットをコスパッタした後、 500°C で1時間アニールし、その後スピン流注入層である Pt を室温で積層させ薄膜を作成した。 $D0_{19}$ - Mn_3Sn の結晶化は X 線回折測定により確認した。磁化および、異常ホール抵抗も先行研究と一致しており $D0_{19}$ - Mn_3Sn が作成できていることを確認した。

続いてスピン軌道トルク磁化反転のパルス幅依存測定を行った。磁化反転の臨界電流値はパルス幅に対して、単調減少を示した。傾きから見積もられた熱安定性の大きさは室温で $\Delta=131.1$ であった。一方見積もられたデバイス温度からはジュール熱が磁化反転に寄与を持つことが示唆されており、 Δ の正確な決定することが困難となった。ジュール熱が従来のスピン軌道トルク磁化反転をアシストしており、エネルギー障壁を効果的に低下させることを考慮すると、実際の Δ は今回見積もられた値よりも高くなると考えられる。

本研究は、 $D0_{19}\text{-Mn}_3\text{Sn}$ の熱安定性という基本的な物性値の下限值を明らかにするとともに、カイラル反強磁性体の熱安定性を見積もる上でのジュール熱の重要性を指摘したものであり、今後のカイラル反強磁性体研究における重要な知見を与えている。