

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大内 祐貴

電子のスピンと軌道を結合させるスピン-軌道相互作用は、系の対称性に応じてスピン状態を変化させることで磁気輸送特性を決定づける。中でも、空間反転対称性の破れた磁性体においては、磁気スキルミオンに代表される非自明なスピン構造の生成を通して特異な磁気輸送特性が誘起されることが明らかとなってきた。こうした現象は結晶の対称性に依らずとも、強磁性体と強いスピン-軌道相互作用を有する非磁性体とのヘテロ構造を形成することで人工的に実現可能である。その外場制御や材料最適化はスピントロニクスにおける重要な指導原理を供するものとして注目されている。金属材料で多くの研究が行われてきたが、酸化物においても興味深い現象が報告され、新たな研究対象となりつつある。本研究では、ペロブスカイト型酸化物からなるヘテロ構造に注目し、磁気輸送特性や磁気近接効果の測定を行うことで、スピン-軌道相互作用に由来した界面現象の電場制御や、材料依存性を議論している。本論文は "Controlling non-trivial magneto-transport properties induced in oxide heterointerfaces" (酸化物界面に誘起される非自明な磁気輸送特性の制御) と題され、8章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第1章では、本研究の背景としてスピン-軌道相互作用、磁気スキルミオン、ベリー位相が関わる非自明な磁気輸送特性、強いスピン-軌道相互作用を持つイリジウム酸化物の電子状態について述べ、酸化物と金属材料におけるヘテロ構造の先行研究を概観し、本研究の目的を述べている。

第2章では、本研究で用いた実験手法として薄膜の作製と構造解析、磁気輸送特性測定、光学・放射光測定の原理について述べている。

第3章では、本研究で用いる遍歴強磁性体 SrRuO_3 と常磁性半金属 SrIrO_3 のエピタキシャル薄膜成長について詳述している。成長条件の精緻な制御によりヘテロ構造形成に適した高品質薄膜を実現し、それらの基礎的な輸送特性を明らかにしている。

第4章では、 SrRuO_3 と SrIrO_3 からなるヘテロ構造において、 SrRuO_3 に由来する異常ホール効果の電場制御性について述べている。 SrRuO_3 層とゲート絶縁体として用いる SrTiO_3 基板との間に薄い SrIrO_3 層を挿入した構造を採用することで、異常ホール効果を大きく変調できることを見出し、界面付近へ印加される電場の重要性を指摘している。本系の異常ホール効果はスピン-軌道相互作用により生じるバンド構造中の特異点と密接に関係しており、本成果は、遍歴磁性体薄膜におけるスピン-軌道相互作用由来の磁気輸送特性を、ヘテロ構造形成により大きく電場制御した最初の試みという意味で重要である。

第5章では、前章と同じヘテロ構造において、トポロジカルホール効果の電場制御性について述べている。ホール測定と磁気光学測定を組み合わせることで、トポロジカルホール効果を定量的に評価し、電場で制御できることを見出している。本系では磁気スキルミオンがトポロジカルホール効果を与えるとされており、その制御を磁気スキルミオンの大きさ、すなわちジャロシンスキー-守谷相互作用の制御に帰着させ、界面付近への電場印加が、界面における空間反転対称性の破れに由来する効果をも制御可能であると結論している。

第6章では、ヘテロ構造の材料選択における特徴を明らかにするため、 SrRuO_3 と SrIrO_3 からなる超格子を作製し、磁気近接効果について述べている。放射光を用いてX線吸収分光・X線磁気円二色性を測定することで、界面では電荷移動がほぼなく、イリジウムに SrRuO_3 と逆向きに小さな磁気モーメントが誘起されることを明らかにしている。これは、イリジウム酸化物に特有な軌道磁気モーメントの大きな寄与を含み、理論計算と合わせることで、強いスピン-軌道相互作用の影響を受けていることを結論した。近接磁化の大きさにジャロシンスキー-守谷相互作用と単純な相関がないことは、金属材料における実験とは異なる傾向であり、そこで行われてきた議論に新たな視点をもたらさう。

第7章では、電場制御の起源として、界面での電荷移動の可能性を検証している。 SrIrO_3 との界面で大きな電荷移動が期待されるコバルト酸化物に着目し、その磁気輸送特性を明らかにしたうえで、ヘテロ構造においては、トポロジカルホール効果が検出されず、 SrRuO_3 の場合よりも界面の効果が小さいことを見出している。これより、スピン構造制御には界面付近の電位勾配が重要であり、非自明なスピン構造の形成に電荷移動は重要でないことを結論するとともに、イリジウムの価数や強磁性層のスピン-軌道相互作用が重要である可能性を指摘している。

第8章では、得られた成果をまとめ、本研究の意義を述べるとともに、今後の展望を述べている。

以上を要するに、本研究は酸化物エピタキシャル薄膜を用いたヘテロ構造において、スピン-軌道相互作用に由来した磁気輸送特性の電場制御を実証し、界面における材料選択上の特徴を明らかにした先駆的なものである。本研究で得られた電場制御と界面設計に関する知見は、非対称界面におけるスピン現象の材料横断的な基礎学理構築に寄与するとともに、低消費電力かつ高集積なスピントロニクスデバイスを目指す工学的な観点からも重要である。

今回得られた成果は、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待され、よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。