

学位論文の要約

題目 強磁性金属薄膜を用いた磁性の電界効果

氏名 水野 隼翔

電子は電荷とスピンの二つの自由度を有しており、金属や半導体における、両自由度に基づいた物理現象の多くは、バンド構造とフェルミ準位を用いて理解できる。そのため、物質中の電子密度を変化させて、両性質を外場により制御しようという試みは古くから行われてきた。例えば、半導体においては、電極/絶縁体/半導体というデバイス構造を用いることで、外部電界により電気伝導特性を制御することが可能である。これは、電界効果トランジスタという形で大きな成功を収め、現代の電子機器の基盤となっている。他方、磁氣的性質においても、磁性半導体を用いることで、強磁性相転移温度を制御可能なことが 2000 年に初めて発見され、電子密度の遥かに大きい磁性金属についても、室温にて保磁力を変調可能であることが最近の 2007 年に報告された。電界の印加に対する磁性の応答を調査することは、フェルミ準位近傍の電子状態が磁性に与える影響を理解するという基礎物理学の観点に加え、外部電界によって磁性を変調・制御するといったデバイス応用の観点からも意義深いと言える。

このような背景の中、本研究では、「垂直磁気異方性」と「異常ホール効果」に着目した。前者の研究は 50 年以上、後者は 100 年以上前から行われており、その歴史は長い。一方で、ここ数十年の間に、前者は次世代型磁気メモリとしての応用の提案、後者は新しい物理的機構の発見がなされており、研究対象としての魅力は尽きない。以下では、それぞれの詳細について記す。

1. 電界による界面垂直磁気異方性及び g 因子の変調

ナノスケールの薄膜は、量子井戸やトンネル効果を始めとする、バルクには見られない量子力学的効果が顕著に現れる系である。近年、異なる薄膜を積層させ、接合界面における電子状態を変化させることで、より特異な物性を見出す研究が盛んに行われている。この界面における物性物理学は、電子スピンのもつ磁氣的な特徴をデバイスに応用することを目的とした、スピントロニクス分野との深い関連の下、研究が推し進められつつある。

例えば、金属薄膜は隣接する物質との界面において、電子スピンと電子軌道との相互作用(スピン軌道相互作用)のために、電界効果、ラシュバ効果、垂直磁気異方性、ジャロシンスキー・守谷相互作用など、磁氣的性質に関する様々な効果を発現することが近

年明らかになってきた。これらの現象は、界面における空間反転対称性の破れにより電子軌道の縮退が解け、電子軌道に空間的偏りを生じることが起源であるとされる。

上記の物理現象の内、本研究では、垂直磁気異方性(PMA)に着目した。PMAを有する磁性多層膜は、低消費電力かつ高密度化が可能な磁気メモリの材料として強い関心をもたれている。界面における軌道磁気モーメントの異方性と異方性磁場との関係は盛んに研究され、PMAの物理的機構は理解されつつある。しかし、界面の電子状態が電界によってどのような影響を受けるのかという研究は未だ十分に成されていない。

以上を踏まえ、本研究では、電界を印加した状態における、界面の軌道磁気モーメントとPMAを測定し、電界の印加が両者の関係に与える影響を明らかにすることを目的とした。

ホモダイナミクス検波を利用した強磁性共鳴(FMR)測定により、ゲート電圧の印加下における、Pt/Co/MgO多層膜の磁気異方性と軌道磁気モーメントとの関係を調査した。実験の結果、界面の物性が顕著に現れる数原子層かつ単層膜の磁性超薄膜に対して、本測定手法を用いることで明瞭なFMRスペクトルを測定することができた。界面では垂直磁気異方性が発現し、同時にg因子の値が変化していることを確認した。これは、界面における電子軌道の偏りと、垂直磁気異方性の発現が結びついていることを意味している。

次に、本測定手法により、ゲート電圧を印加した状態でFMRを測定し、電界により有効磁場とg因子が共に変化していることを明らかにした。そこで、界面に元々存在する「内的な」軌道の異方性と、外部電界の印加によって生じる「外的な」軌道の異方性に誘起されるそれぞれの磁気異方性を比較した。Brunoモデルの枠組みにおいて、「外的な」軌道異方性に対する磁気異方性への変換効率Aが、「内的な」軌道異方性における同値よりも4倍小さくなるという結果を得た。両係数のズレは、変換効率Aそのもの、あるいはスピン軌道相互作用定数がゲート電圧に対して変調され得ることを示唆している。

以上の解析により、電界の印加下における、軌道と磁気異方性の詳細な関係が明らかとなった。本結果は、デバイス応用も期待されている磁性の効率的な電界制御に対して重要な指針を与えるものである。加えて、界面の軌道磁気モーメントを定量的かつ実験室にて簡便に評価できる本手法は、電界を用いた、磁性を効率良く変調できる材料を探索する際の評価技術となり、今後、外場と界面における電子軌道の偏りとの関係性の理解及び、磁性の制御の実現に寄与することが期待される。

2. 遍歴強磁性体 SrRuO₃ における異常ホール効果の電界変調

ナノスケールの薄膜において、近年、量子力学的な位相であるベリー位相に基づいた特異な物性を見出す研究が注目を集めている。例えば、磁性金属では、ベリー位相に起因した仮想磁場(ベリー曲率)が運動量空間において現れ、内因性異常ホール効果や内因

性スピントロニクス効果、異常ネルンスト効果、磁気光学効果など、様々な磁気的性質に深く関与することが分かってきた。ベリー曲率由来の現象は、バンド構造を制御することにより、巨大な効果の発現や外場に対して非線形な振る舞いを示すことが理論的に示されており、このような内因性機構の系の探索が盛んに行われている。

上記の背景の中、本研究では、遍歴強磁性体であるペロブスカイト酸化物 SrRuO_3 に着目した。 SrRuO_3 はフェルミ準位近傍にバンド交差を含む特異な電子状態を有し、強磁性体におけるホール効果である異常ホール効果の符号が温度に対して変化するという、通常の強磁性金属とは異なる磁気特性が報告され、ベリー曲率が重要な役割を果たすと考えられている。しかし、温度変調による磁化の変化は熱揺らぎの影響があり、フェルミ準位の変化と完全には対応していない。そこで、本研究では、電界の印加により電子密度を変調させる電界効果と呼ばれる手法に着目し、強磁性金属 SrRuO_3 薄膜において、電界の印加に対する異常ホール効果の応答を調査し、内因性機構の寄与を明らかにすることを目的とした。

パルスレーザー堆積法により作製された GdScO_3 sub./ SrRuO_3 (4 nm)/ BaTiO_3 (1 nm) をホール素子形状に加工した後、ゲート電圧を印加するための HfO_2 (50 nm) を原子層堆積法により積層し、ホール効果測定を行った。電気抵抗率の温度依存性から SrRuO_3 が 135 K において強磁性転移することを確認した。126.4 K から温度を上げると異常ホール抵抗率は上昇し、その符号は負から正へと反転することを確認した。そして 126.4 K において、電界の印加によって符号が反転することを初めて観測した。 SrRuO_3 の磁化方向は電界によって反転しないため、観測された異常ホール抵抗率の電界変調は、化学ポテンシャルの変化に伴って、占有状態におけるベリー曲率の積分値が変化したためと考えられる。

また、 BaTiO_3 層のない SrRuO_3 単層膜においては、温度変化による異常ホール抵抗率の符号の反転や電界による変調が見受けられなかった。 SrRuO_3 層の上部に BaTiO_3 層を接合した場合、結晶構造を崩さない状態で Ru-O-Ru 結合角が変化することが分かっており、これは、ヘテロ構造化による酸素配位環境の操作に伴ってバンド構造が変化し、ベリー曲率に影響を及ぼしたことを意味している。

以上により、 SrRuO_3 における異常ホール効果において、バンド構造に由来した内因性機構が強く寄与することを示した。今後、ヘテロ構造を駆使したバンド構造の制御と外部電界の印加によって、より効率的な電子輸送の外場変調が期待される。