

学位論文の要約

題目 容易面型の磁気異方性を持つ反強磁性体 NiO におけるスピン輸送および磁区観察に関する研究

氏名 杉浦達

序論

反強磁性体は隣り合うスピンの反平行に向いているため、漏れ磁場が無い、外部磁場擾乱の影響を受けにくい、テラヘルツ帯域の磁化ダイナミクスを有するといったデバイス応上の利点を多く備える。さらに近年スピン流輸送やスピン流生成が可能であることも報告されており、反強磁性体スピントロニクス の有用性が再認識されつつある。特にスピン流輸送特性については、「スピン超流動」と呼ばれる現象が反強磁性体において発現し得ることが理論的に予測され、低散逸かつ省エネルギーな情報キャリアとして注目を集めている。スピン超流動には長距離に渡る面内等方的な磁気秩序（磁気容易面）が必要であるため、反強磁性体の磁気異方性および磁区構造の制御が不可欠である。また、反強磁性体の磁区構造はスピン流輸送に限らず様々な物性現象に深く関わるため、その磁区観察手法の開拓は反強磁性体スピントロニクスの発展において重要な課題の一つである。本研究では、1) エピタキシャル歪みにより磁区構造を制御した反強磁性体薄膜におけるスピン超流動の観測と 2) 実験室スケールで行える反強磁性体磁区観察手法の実証を目指す。

1) 非局所構造デバイスにおけるスピン流・電流・熱流輸送の解析

スピン超流動は、磁性体中の局在スピンの容易面内を一様に回転することにより、その回転軸方向に偏極したスピン角運動量が低散逸に輸送される現象である。従ってスピン超流動を観測するには、系全体で一様な磁気容易面を持つ磁性材料を用意することおよび容易面に対して面直方向に偏極したスピン流を生成・検出することが必要である。本研究ではこれらの要件を満たすために、エピタキシャル歪みにより磁区構造を制御した容易面反強磁性体酸化ニッケル (NiO) 薄膜上に、非従来型のスピン流注入が可能な強磁性体金属細線を取り付けた非局所デバイスを構築し、NiO のスピン輸送特性を調査した。非局所測定の結果、リーク電流由来のシグナルがスピン流シグナルと混在することが明らかになったため、シミュレーションや比較実験を行い、リーク電流の定量的な評価を行った。入力用細線に生じるジュール熱由来の温度上昇まで取り込んだ解析の結果、検出シグナルはリーク電流由来のシグナルと定量的に一致し、スピン流シグナルの抽出は困難であることが分かった。さ

らに、本非局所デバイスにおけるスピン超流動励起に必要な閾電流値と結晶磁気異方性の関係を計算し、実験結果と比較すると、リーク電流由来の検出電圧をスピン超流動シグナルと分離するためには容易面内に存在する結晶磁気異方性磁場を 0.4 mT 以下に抑制する必要があることが明らかになった。磁性固体中で完全に面内等方的な磁気秩序を実現することは極めて困難であるため、スピン超流動を電流により励起する上でリーク電流やジュール発熱の影響は避けられない。従って本研究は、スピン超流動観測に向けた材料設計（異方性磁場の大きさや電流スピン流変換効率等）や検出シグナルの解析において指針となるものである。

2) NiO/NiFe 二層膜における有効磁場の空間イメージング測定

反強磁性磁区観察技術は、反強磁性体中のスピン流輸送やスピン流生成機構を詳細に議論し、反強磁性体スピントロニクスを発展させていく上で不可欠である。しかし正味の磁化を持たない反強磁性体は外場への応答が極めて弱く、その磁区構造を観察する手段も限定的である。X 線磁気線二色性光電子顕微鏡 (XMLD-PEEM) は、元素選択的に反強磁性スピンの方位を特定できるため、信頼性の高い反強磁性磁区観察手法として広く確立されている。しかし XMLD 測定は、内殻準位を励起するために数百 eV 程度の高エネルギーな放射光が必要であり、容易に利用可能な手法とは言い難い。本研究の目的は、磁気光学効果とレーザー走査型の光学イメージング技術を組み合わせた測定セットアップを用いて、実験室スケールで実現可能な反強磁性磁区観察手法を実証することである。そこで本研究では、NiO(001)/NiFe 二層膜において強磁性共鳴 (FMR) を励起し、光学イメージング測定により NiFe の磁気共鳴ダイナミクスを空間マッピングした。NiO の膜厚が 30 nm の試料では、 $[1\bar{1}0]$ 方向に外部磁場を印加した場合と $[110]$ 方向に外部磁場を印加した場合で、FMR シグナルの強度分布が反転することが確認された。これは、反強磁性体 NiO と強磁性体 NiFe 界面において $[1\bar{1}0]$ 方向の有効磁場が働く領域と $[110]$ 方向の有効磁場が働く領域が存在し、強磁性層の共鳴磁場が変調されていることを示している。観測された有効磁場の方位は、NiO のスピン補償面と NiFe の界面に働くスピントロニック型の交換磁場に起因すると解釈でき、交換結合を介した NiO の反強磁性磁区観察が実証された。本研究は、測定系の空間分解能であるサブミクロンオーダーの磁区を実験室スケールで観測可能であることを示しており、簡便な反強磁性磁区観察手法として反強磁性体スピントロニクス研究の発展を加速し得るものである。