

論文審査の結果の要旨

氏名 松並 絢也

本論文は7章からなり、第1章では本研究でとりあげる半導体2次元電子系の電子スピン共鳴(ESR)の概念と従来の研究状況、本研究の目的、及び実験の特徴が説明されている。ESRによる対角抵抗変化は、電子スピンの状況を直接反映するが、その因果関係は詳しく議論されてこなかった。そのため、高感度な測定法であるにも関わらず、関係する物理量の導出が難しかった。とくによく知られたGaAs/AlGaAs系では、共鳴による対角抵抗変化の符号がその温度微分の符号と一致しており、電子温度上昇の影響を区別して抵抗変化の要因を議論することができなかった。本研究では、電子スピンを乱す他の要因が小さく、また比較的g因子が大きい(GaAs系に比べて)材料であるSi/SiGeヘテロ構造の試料とミリ波帯(100GHz)の高い周波数の共鳴測定、磁場回転機構、を上手く利用することによって、温度の影響を区別して抵抗変化を議論することに成功している。また、同議論をもとに重要な物理量であるスピン緩和時間が導かれている。さらに、同測定の実用として、Fe蒸着表面における2次元電子系とFe原子の磁氣的相互作用の検出を試みている。本章では、これらの研究のシナリオが簡潔にまとめられている。

第2章では、用いた試料の一般的特徴、及び主題であるESRとスピン緩和の議論に必要な物理が説明されている。とくに面内磁場下におけるスピン偏極と抵抗変化の説明は、スピン緩和時間の導出の背景となっていて、丁寧に記述されている。

第3章は試料作製と測定系の章で、まず、Si/SiGeヘテロ構造(結晶基盤は武蔵工大油谷博士の提供)を使ったホールバー試料の作成と電子濃度特性、導波管ミリ波照射系と磁場安定化、次にInAs、InSbへき開とその端面へのFe蒸着機構が説明されている。前者では、自作コイルによる磁場の精密掃引の実現、後者では真空中でのへき開とFe蒸着による試料作成、同真空中での試料冷却と共鳴測定、に工夫が施されており、そのことが良くまとめられている。

第4、5章は、本論文の中心的な章で、それぞれ、斜め方向の磁場下でのESRによる電気抵抗変化の観測と機構解明、面内磁場下でのスピン偏極とESRの測定を基にしたスピン緩和時間の導出が書かれている。ESRによる対角抵抗率の変化の要因として、化学ポテンシャルの変化と電子温度上昇が考えられるが、通常のランダウ準位配置では、両者はともに正の変化をもたらすので分離して調べるのが難しい。本実験で

は、ランダウ準位と化学ポテンシャルの配置を調節して、前者が負の抵抗変化をもたらすように設定し、これを利用して、抵抗率変化の主要因が化学ポテンシャル変化であると結論されている。また、熱浴モデルによる解析の結果、スピン系と軌道運動量系の間で温度が異なる、非平衡状態ができることを指摘している。以上は、独自の実験手法によって、ESR と対角抵抗率の因果関係を初めて明瞭に示したものであり、高く評価される。

第5章では、まず、面内磁場に対する磁気抵抗増大の結果から、スピン偏極率と ESR による抵抗率の変化の関係を求め、次に同磁場下での ESR による抵抗率の減少からスピン偏極率を求め、その結果をブロッホ方程式で解析する、という手順で縦、横緩和時間が導出されている。最後に、得られた結果を従来の報告と比較して、その違いが高周波スピン歳差運動による Rashba 磁場の抑制に起因することが推論されている。求められたスピン緩和時間は信頼性があり、今後の参考データとして価値が高い。従来との比較に関しては、必ずしもコンシステントな説明にはなっていないが、問題提起としては十分興味深い。

第6章は、立ち上げた ESR 技術の応用に関するもので、表面吸着 Fe と 2 次元電子の磁氣的相互作用解明の試みが述べられている。実験として Fe 原子の ESR を表面 2 次元電子系の電気抵抗の変化として検出することが試みられているが、結果的には成功していない。その原因として、従来の研究を参照しながら、磁氣的相互作用そのものが小さいこと、そして、その改善策が議論されている。今後の実験の良い指標となるであろう。

第7章では研究結果が簡潔にまとめられている。

以上、各章を紹介しながら本論文の物理学への貢献点を解説した。試料と測定法を工夫することによって、ESR の要因を突き止め、またスピン緩和時間を導出しようとする研究は独自性の高いもので、得られた結果も当該分野に対して、学術的に優れた寄与をしている。これをまとめた本論文は、学位論文として十分な水準にあることが審査員全員によって認められ、博士論文として合格であると判定された。なお、本論文の内容は、招待講演 1 件を含めて 3 件の国際会議で発表、Physica E と Physical Review Letters に掲載されている。これらの論文の内容は第一著者である論文提出者が中心に研究した結果であり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。