審査の結果の要旨

論文提出者氏名　木山　治樹

本論文は「Spin-dependent electron transport in a quantum dot coupled to quantum Hall edge states」と題し、GaAs 系 2 次元電子系に形成される単一量子ドットと量子ホールエッジ状態との間で生じるスピン依存トンネル結合を原理とする「スピンフィルター効果」の高効率化、それを利用した多電子・高スピン状態の緩和測定、さらに非平衡エッジ状態を利用した上向き／下向きスピンの量子ドットへの選択的注入を実現した成果をまとめている。これらの成果は、量子電子光学と呼ばれる電子の粒子性と干渉性を使った半導体量子伝導の新しい研究分野において、スピン自由度の制御と計測を可能にするもので、基礎物理や量子情報処理への応用に対する貢献が大きい。論文は英文執筆され全 8 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、本研究の背景として、半導体低次元系における量子電子光学の最近の進展とともに量子ドット中の電子スピンの有用性と重要性を述べ、二次元電子面内の横型量子ドットとエッジ状態の複合系の研究に取り組む本研究の動機付けを明確にしている。

第 2 章では、まず単一量子ドットの電子状態と電気伝導と共に量子ホール効果と量子ホールエッジ状態について説明し、さらに量子ドットとエッジ状態を用いたスピンフィルター効果について述べている。次に量子ポイントコンタクトを用いた高感度電荷検出と半導体量子ドットにおける電子スピン縦緩和、スピン軌道相互作用による緩和機構など、本研究の基盤となる理論を説明している。

第 3 章では、量子ドットとエッジ状態を用いたスピンフィルター効果がスピン検出に有用であることを示すために行った実験について述べており、フィルター効率の主な制限要因の解明とその改善について議論している。ゲート電圧によりスピン分離エッジ状態の空間的分裂を制御することでフィルター効率を電気的に制御できること、効率 0.91 というこれまでで最高値を達成したことを主たる成果として示している。

第 4 章では、前章で高効率化したスピンフィルター効果を用いて、量子ドット中の電子スピン緩和を検出したことを説明している。同スピンフィルターを 2 電子スピン状態のスピン緩和時間（T_1）の測定に応用し、従来 GaAs 系量子ドットで報告されていたビジビリティよりも高い値で電子スピンの単発実時間読み出しを達成したこと、さらにスピン S=0 からスピン S=1 への緩和時間の電子数依存性が状態密度の増加によるスピン軌道相互作用の増強で説明できることを述べている。

第 5 章では、スピンフィルターを応用して、3 電子の S=3/2 状態や、4 電子の S=2 状態など高スピン状態の緩和レートを測定した結果について述べている。同じ電子数であっても高スピン状態の緩和レートの方が数十倍速いという新しい知見を見出し、ドットの形状

異方性による軌道角運動量選択則の緩和とスピン軌道相互作用による多数のスピン状態との混成が原因であることを説明している。

第 6 章では、エッジ状態から量子ドットへの選択的スピン注入について述べている。従来、量子ドットでは多数スピン（上向き）注入しか実現されていなかったが、上向きと下向きスピンの非平衡エッジ状態を選択的に生成することにより、本研究で初めて電気的にスピンを選択して量子ドットへ注入することに成功した。この手法をエッジ状態スピン操作技術と組み合わせることで、電子スピン状態トモグラフィー等への発展が期待される。またスピン注入の定量的な解析からスピンフィルター効率おける量子ドットの励起状態の寄与を明らかにしている。

第 7 章では、量子ドットにおけるスピン状態トモグラフィー測定手法の理論提案を説明している。測定対象のスピンと参照スピンとの一重項、三重項状態を測定することでスピン状態のトモグラフィーが可能であることを示している。

第 8 章は本研究のまとめと今後の展望を述べている。

以上をまとめると、本研究では、量子ホールエッジ状態に結合した量子ドットにおいて、エッジ状態から量子ドットへのスピンフィルター効果の効率の制限要因を明らかにするとともに、高効率化を達成し、これを量子ドット中の電子スピン緩和測定へ応用し、高ビジビリティ単発実時間電子スピン検出を実現した。また多電子・高スピン状態の電子スピン緩和の系統的な測定を初めて行い、スピン緩和機構を議論した。エッジ状態からの選択的スピン注入の実現は量子ドットへ任意に重ね合わせたスピン状態を注入する事を可能にする.成果で、スピン状態トモグラフィー測定の提案と組み合わせることにより、半導体低次元系の量子電子光学にスピンの自由度を付加する技術である。以上の成果はスピンを使った量子情報処理において量子回路を構成する基盤技術となりうることから本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。