

博士論文要旨

学位申請者:中川 智裕

論文題目: Study on spin-related transport in few-electron lateral quantum dots for the photon-spin interface using a (110) GaAs quantum well

((110)GaAs 量子井戸を用いた光子-スピンインターフェースに向けた少数電子横型量子ドットにおけるスピンに関係した伝導の研究)

論文要旨:

微細加工技術や測定技術の進展とこの数年の量子コンピュータ開発の活発化に伴って、極低温下の半導体量子構造における少数電子の伝導およびスピン状態の高精度な検出および制御の技術が格段に進歩してきた。ヘテロ界面の 2 次元電子層をゲート電圧によってゼロ次元的に閉じ込める横型量子ドットは、量子ビットの候補としても注目されている。さらに GaAs 横型量子ドットでは、ドット中への単一光子照射による単一電子スピンの検出やその間の量子状態変換も実現され、単一光子-単一電子スピン間の量子インターフェースとしての研究も注目を集める。これは量子情報通信の長距離化に寄与する量子中継器を構成する技術であり、量子輸送とフォトニクス技術の新たな融合研究として進展している。

従来の量子状態変換の研究では、(001) 面方位上の量子井戸基板に形成された横型量子ドットが用いられてきた。この場合、励起確率の低い軽い正孔状態を用いる必要があった。一方、(110) 基板では、励起確率がより高い重い正孔を量子状態変換に用いることが原理的に可能であり、量子インターフェースとして有利な材料であることが期待される。しかし、(110)量子井戸におけるスピン緩和機構の研究などは多数ある一方で、横型量子ドットなどゲート制御による量子構造の報告はほとんどなく、(110)面方位に起因する特異なスピン軌道相互作用に基づく量子ドット中の電子スピン物性は未開拓である。

本研究では、(110) 量子井戸基板の設計および評価から始まり、ゲート電極構造の設計、微細加工による量子ドットデバイス作製、極低温下における伝導性の測定を行った。これにより、(110) 量子井戸基板を用いた量子ドットの形成に初めて成功した。少数電子領域を実現し、2 電子領域においてパウリスピンブロッケードを検出した。そのドット電流の振る舞いからドット中の電子スピンの面内磁場に対する g 因子を算出することに成功した。これらは光子-電子スピン量子状態変換にかかわる重要な成果である。また希釈冷凍機中の極低温下の量子ドットへの光子照射実験に向けて、ピエゾ素子と光ファイバを用いた光照射走査による量子ドットサンプルの高精細なイメージングを実現し、量子状態変換実験の基盤技術を確立した。

これらの実験結果は、(110) 基板を用いた量子ドット形成を初めて実現し、電子スピン物性の一端を解明するとともに、光ファイバによる極低温光子照射法を確立することで、より高効率な光子-電子スピン間の量子状態変換を実現する方向性を示した成果である。