OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study on spin-related transport in few-electron lateral quantum dots for the photon-spin interface using a (110) GaAs quantum well
Author(s)	中川, 智裕
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92155
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　中川智裕　）	
論文題名	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）

論文内容の要旨

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。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　　中川　智裕　　）

	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	大岩　顕
	副 査　教授	工藤　一貴
	副 査　准教授	塩貝　純一
	副 査　准教授	藤田　高史
	副 査　教授（筑波大学）	都倉　康弘

論文審査の結果の要旨

近年の量子技術研究の進展に伴って、極低温下の半導体量子構造における少数電子のスピン状態の精密制御やその高精度検出などの技術と物理の理解が格段に進歩してきた。2 次元電子をゲート電圧によって 0 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、パウリスピンブロッケ―ド（PSB）による光生成単一電子スピン検出や光子偏光と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も注目を集める。これは長距離量子情報通信に必須の量子中継器の基盤技術であり、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、様々な技術が確立している（001）面方位上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、遷移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、遷移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、高効率な量子インターフェースとして期待される。しかし、(110)量子井戸特有のスピン軌道相互作用に基づくスピン緩和抑制の研究など多数ある一方で、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)面方位の量子ドットとそのスピン物性は未開拓である。

本研究では、高効率な量子インターフェースの実現に向け、(110)面上の GaAs 量子ドットにおいて PSB と量子状態変換の設計に必要な電子の g 因子などのスピン物性の解明と、量子状態変換の実験で重要になる極低温での光照射のための精密な位置制御法の確立を目指した。まず（110）量子井戸基板の設計・成長および評価から着手した。比較的、移動度が高い 2 次元電子系を使い、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、極低温下での量子輸送測定を行った。その結果、(110) 量子井戸基板を用いた量子ドットの形成を世界で初めて実現した。さらに少数電子領域を実現し、２電子領域と多電子領域において PSB を検出した。そのブロッケ―ド領域で核スピン揺らぎに起因するリーク電流の磁場依存性から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の高効率化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でピエゾ素子による光ファイバ走査と量子ドットサンプルの光電流と反射の高精細なイメージングを実現し、この方法が量子ドットへの精密で有効な光子照射法であることを実証した。これは量子状態変換とその先の量子中継器開発に必須である基盤技術を確立した成果である。

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。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値のあるものと認める。