

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高橋 駿

本論文は「Anisotropy of Spin-Orbit Interaction and g-factor in Single InAs Self-assembled Quantum Dots (単一 InAs 自己形成量子ドットにおけるスピン軌道相互作用と g 因子の異方性)」と題し、InAs 量子ドットにおけるラシュバ型スピン軌道相互作用のエネルギーと電子の Lande-g 因子の磁気異方性の大きさ、及び両者の関係について論文提出者が行った研究の成果をまとめたものである。

論文は 7 章から成っている。

第 1 章では、半導体ナノ構造におけるスピン軌道相互作用に関する研究の意義と歴史的背景を述べた後、本研究の主題である InAs 量子ドットのスピン軌道相互作用の特徴と材料の特性を概観し、これを踏まえて研究の具体的な課題設定を行っている。

第 2 章では、本論文の内容を説明する必要な理論的背景、とくに InAs ドットの結晶成長、量子ドットの電気伝導について説明した後、主題であるスピン軌道相互作用と g 因子の基本的な物理と異方性の起源、それらの量子情報単位 (量子ビット) への応用に言及している。

第 3 章では、本研究で用いた試料の構造と電氣的測定の原理について述べている。本実験の工夫として、試料については InAs ドット表面に微小な間隙を挟んで直接金属電極、及び量子ドットの閉じ込めポテンシャルを異方的に変調するためのサイドゲート電極をとり付ける手法、測定手法については外部雑音を抑えるための電気回路構成と外部磁場を回転する手法を説明している。

第 4、5 章は、本論文の中心的な章で、それぞれ、軌道とスピンの角運動量の選択則を利用したラシュバ型スピン軌道相互作用エネルギーと磁気異方性の評価、非弾性コトネルを利用した g 因子と磁気異方性の評価が述べられている。

第 4 章では、まず比較的小さい円盤状のドットを用いて、面内閉じ込めが異方的調和関数で近似できることを単一電子トンネル伝導の磁場依存性から確認し、その結果に基づいてドット内の最低準位から順に、軌道角運動量、スピン角運動量を正確に決定している。さらに、両角運動量がラシュバ型スピン軌道相互作用の選択則を満たす磁場で準位混合を示すことを励起分光法で観測し、同時にスピン軌道相互作用エネルギーを精度よく求めている。また、こうして求めたスピン軌道相互作用エネルギーは磁場回転の角度の余弦関数の絶対値に比例し、従って面内の特定の角度で消失することを観測している。以上の結果は、ラシュバ型スピン軌道相互作用の性質を初めて正確に実験で捉えたもので、ドットの閉じ込めポテンシャルの異方性を考慮した理論計算でよく再現されている。次いで、g 因子の大きさと磁気異方性を励起分光法とスピンのゼーマン分裂を利用して実験的に測定し、スピン軌道相互作用との間に正の相関があることを見出している。これについては、まだ理論の詳細がよく分かっていないが、両者を正確に評価することで初めて明らかになった

知見といえる。

第5章では、比較的寸法が大きく、閉じ込めポテンシャルの3次元性の影響があるドットについて、第4章と同様な手法でg-因子の大きさと3次元的磁気異方性を精度よく検出し、ドットの閉じ込めポテンシャルの3次元性との関連を議論している。とくにg因子の異方性がドット中の電子の数に依存して大きく異なることを見出し、この要因として、ドットを非対称なピラミッド型と仮定して電子波動関数を計算した結果をもとに、関与する軌道タイプの違いを議論している。このドット形状の仮定については、電子顕微鏡の観察結果を基に、電極金属で覆われた部分のドットが空乏化していると考えれば妥当であるとしている。これはまだ推論段階であるが、ナノ細線やナノチューブで従来報告されていることと矛盾しない。さらに本章では、サイドゲートに適切な電圧を加えることによりg因子の異方性が変調できることを見出しており、この結果についても上記ドット形状を考慮して同様に議論している。

第6章では、第4、5章の結果をもとに、スピン軌道相互作用による局所交流磁場発生、g因子の異方性の電圧変調によるスピン歳差運動ベクトルの変調、という2つの手法で単一電子のスピン共鳴を利用したスピン量子ビットが作れることを提案している。この量子ビットの性能に関して、サイドゲート電極にマイクロ波を印加したときのクーロンピークの変化からドットに局所的に印加できる交流電圧を評価し、この値を使って計算したスピン回転周波数が従来値を桁違いに上回ることを指摘している。

第7章は、本研究の結論であり、結果の要約と今後の展望が述べられている。

以上述べたように、本研究は、単一 InAs 自己形成ドットを用いて、半導体ナノ構造におけるスピン効果の基本概念をなす、スピン軌道相互作用と g 因子を初めて定量的に導出し、関連する物理を議論したもので、固体物理、ナノ科学の進展に大きな寄与があったと評価できる。また、これらの研究成果は、量子ドットのスピン軌道相互作用の異方的性質をスピントロニクスや量子情報に利用する技術の基礎を提供するものであり、物理工学としての貢献が大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。