

# スピントランジスタ構造による 自己形成 InAs 量子ドット中の電子状態検出と 量子ビットへの応用

## 学位論文内容の要旨

電子 1 個で動作するデバイス・単電子素子は、超低消費電力・超高集積化を実現する夢のデバイスとして、1980 年代後半から精力的に研究が行われてきた。現在では単電子トンネル現象として理論・実験両面についてほぼ完成された一つの体系を成しつつある。これをいかに他の領域に応用するかということが、これからの研究では求められる。回路素子応用の観点からは、シミュレーションにより様々な論理回路が提案される一方、実用化に向けての課題を一つ一つ解決していく段階にある。物性の領域では、他の量子・メソスコピック系との相互作用や単電子効果を利用した新しい物理現象の探索などについて、盛んに研究されている。また、量子力学に準ずる動作を実現する量子効果デバイスへの単電子素子の応用も期待されている。低次元半導体量子ナノ構造の持つ電子エネルギーの離散性や、電子の持つスピンの自由度を単電子素子と組み合わせることで、その機能拡張可能性は大きく広がる。

量子計算における基本素子、量子ビットを半導体量子ドット中の電子スピンを用いて構築する際も、スピンの特徴を生かした単電子効果は重要な役割を果たす。パウリの排他原理に基づくスピン・ブロックード現象と、電子間のクーロン斥力に起因するクーロン・ブロックード現象とを組み合わせることで、量子ドット中のスピン状態に依存した帯電効果の違いが現れる。これを利用した量子ドット中の電子スピン状態観測はスピン・ブロックード測定と呼ばれ、特に半導体ラテラル量子ドットによるスピン量子ビットについて、その測定技術が確立されている。一方、電子の閉じ込めポテンシャルが小さいためにミリケルビンオーダーの温度領域での測定が要求されるなど、動作条件が厳しいという問題を抱えている。

電子スピンの閉じ込めに半導体自己形成量子ドットを用いる場合の特徴として、強い量子閉じ込め効果のために通常のヘリウム温度で帯電効果の測定が可能であることや、近傍チャンネル電流モニタにより帯電効果の測定結果がマクロな電流値として得られること、そして積層による量子ドット集積が可能であることなどが挙げられる。一方、量子ドットの位置制御が困難であるという欠点があり、埋め込み単一自己形成量子ドットの電子殻構造についての明瞭な観測は未だ実現されていない。

本論文では、量子ドットが埋め込まれた半導体スピントランジスタ構造について、スピン状態観測のために必要な要素技術である単一自己形成 InAs 量子ドット中のスピン情報を含めた電子状態

検出を評価する。スピントランジスタ構造による単一 InAs 量子ドットの電子状態検出技術は、量子ビット電気信号で動作する半導体素子として構築できる可能性を拓くものである。最終的に役に立つ量子計算を行うためには、量子ビットの集積が不可欠であり、その際半導体集積回路技術を生かすことができる。また、本構造での繰り返しスピン・ブロッケード測定は、これまでに理論でしか示されてこなかった量子ゼノ的測定の実証可能性を示唆するものである。

本論文は7章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べると共に各章の概要を記す。

第2章では、量子ドットと帯電効果、そして電子スピンに関する基本的な物理を述べる。

第3章では、本研究で用いた試料の作成手法について記述する。分子線エピタキシー (MBE) 法による半導体2次元成長、Stranski-Krastanow 成長モードによる自己形成量子ドットの成長、そして強磁性体金属/半導体ヘテロ成長についてそれぞれ説明する。続いて、単一量子ドット素子作製のためのデバイス加工プロセスについて述べる。

第4章では、スピントランジスタ構造作製のための要素技術、強磁性体材料から半導体への電氣的スピン注入について述べる。形状の異なる強磁性体 Fe 電極を半導体 InGaAs 2次元電子ガスチャンネル上にラテラルに配置した場合に得られた磁気抵抗効果を測定することでスピン注入効率を評価した。室温において0.2%の磁気抵抗変化が観測され、わずかながらも強磁性体 Fe 電極がチャンネルへのスピンインジェクタおよびディテクタとして機能していることを実験的に示した。強磁性体電極から半導体ヘテロ構造へのスピン注入について、エレクトロルミネッセンスを用いて評価した。最後に、超短光パルスを用いた時間分解測定法による物性評価について紹介し、それを用いた自己形成量子ドット中の電子スピン寿命の評価方法を提案する。

第5章では、単一量子ドットデバイスの電氣的評価および単電子帯電に起因する近傍チャンネル電流変調について述べる。単一量子ドットデバイスによる帯電であることを明らかにすること、量子ドットの量子準位を検出すること、そして量子ドットへの帯電効果と他の電子トラップへの帯電効果を分離することを目的とし、メサ構造のある少数量子ドットデバイス、メサ構造のない多数量子ドットデバイス、メサ構造のあるドットなしデバイス、メサ構造およびドットのないデバイスの4種類について、測定・比較を行った。それぞれのデバイスについて、まず試料構造について紹介した後、静特性および伝達特性について評価した結果を述べる。1.6 Kでの低ソース・ドレインバイアスにおける伝達特性にて、どのデバイスについても何らかの電子トラップへの帯電に起因するチャンネル電流ピークが観測された。続いて、ゲート電圧を固定したときのチャンネル電流の時間応答特性を解析することにより、それぞれの電流ピークが異なるトラップへの帯電によって生じていることを明らかにした。時間応答特性から求めたトンネルレートから、量子ドットへの帯電によるチャンネル電流ピークが特定できることを示した。最後に、量子ゼノ的測定を想定した量子ドットへの繰り返しスピン注入によるスピン状態読み出しについて、実験手法の提案と測定結果の解釈を、数値シミュレーション結果を用いて説明する。

第6章では、量子ドットが埋め込まれたスピントランジスタ構造を量子ビットに適用する提案について紹介し、その量子ビット動作のための最適構造の設計について述べる。InAs 系材料による積層自己形成量子ドットを用いるにあたって、電子スピン共鳴 (ESR) による量子ドット中スピンの選択操作を行うためのデバイス構造設計および実験条件について記述する。次に、隣接積層量子ドット中のスピン間に働く交換相互作用に関して、ハイトラー・ロンドン近似による計算から得ら

れた素子構造依存性について説明する。これら量子ビット動作は、実現可能な構造・実験条件で達成されることが示された。

第7章では、本論文全体の総括を行う。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 陽 完 治

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 武 藤 俊 一 (工学研究科)

学 位 論 文 題 名

## スピントランジスタ構造による

## 自己形成 InAs 量子ドット中の電子状態検出と

## 量子ビットへの応用

近年、固体素子による量子計算実現のための研究が盛んに行われるようになってきた。半導体による量子ビットが実現し、その集積ができれば、半導体集積回路技術を生かすことができる。本論文では、半導体による量子ビットをめざして量子ドットが埋め込まれた半導体スピントランジスタ構造において、スピン状態観測のために必要な要素技術を評価した。

本論文の構成は以下のようになっている。第 1 章では、本研究の背景と目的を述べると共に、各章の概要を記している。第 2 章では、量子ドットと帯電効果、そして電子スピンに関する基本的な物理を述べる。第 3 章では、本研究で用いた試料の作成手法について記述する。分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた **Stranski-Krastanow** 成長モードによる自己形成量子ドットの成長、そして強磁性体金属/半導体ヘテロ成長についてそれぞれ説明する。続いて、単一量子ドット素子作製のためのデバイス加工プロセスについて記している。第 4 章では、微細構造評価法の一つ、ピコ秒超音波法を用いた物性評価を紹介する。2 次元透明薄膜への適用結果について説明した後、自然形成量子ドットのような低次元ナノ構造に適用する可能性について記した。第 5 章では、スピントランジスタ構造作製のための要素技術、強磁性体材料から半導体への電氣的スピン注入について述べた。形状の異なる強磁性体 Fe 電極を半導体 InGaAs 2 次元電子ガスチャンネル上にラテラルに配置した場合に得られた磁気抵抗効果を測定することでスピン注入効率を評価した。室温において 0.2 第 6 章では、単一量子ドットデバイスの電氣的評価および単電子帯電に起因する近傍チャンネル電流変調について述べた。量子ドットへの帯電効果と他の電子トラップへの帯電効果を分離することを目的とし、メサ構造のある少数量子ドットデバイス、メサ構造のない多数量子ドットデバイス、メサ構造のあるドットなしデバイス、メサ構造およびドットのないデバイスの 4 種類について、測定・比較を行った。それぞれのデバイスについて、まず試料構造について紹介した後、静特性および伝達特性について評価した結果を述べる。1.6 K での低ソース・ドレインバイアスにおける伝達特性にて、どのデバイスについても何らかの電子トラップへの帯電に起因するチャンネル電流ピークが観測された。続いて、ゲート電圧を固定したときのチャンネル電流の時間

応答特性を解析することにより、それぞれの電流ピークが異なるトラップへの帯電によって生じていることを明らかにした。時間応答特性から求めたトンネルレートから、量子ドットへの帯電によるチャンネル電流ピークが特定できることを示した。また、InAs 自己形成量子ドット中の電子について初めて、近傍チャンネルとの間に生じるトンネル過程の時間分解測定を行った。最後に、量子ゼノ的測定を想定した量子ドットへの繰り返しスピン注入によるスピン状態読み出しについて、実験手法の提案と測定結果の解釈を、数値シミュレーション結果を用いて説明する。第7章では、量子ドットが埋め込まれたスピントランジスタ構造を量子ビットに適用する提案について紹介し、その量子ビット動作のための最適構造の設計について述べた。InAs 系材料による積層自己形成量子ドットを用いるにあたって、電子スピン共鳴 (ESR) による量子ドット中スピンの選択操作を行うためのデバイス構造設計および実験条件について記述した。次に、隣接積層量子ドット中のスピンの間に働く交換相互作用に関して、ハイトラー・ロンドン近似による計算から得られた素子構造依存性について議論した。これら量子ビット動作は、実現可能な構造・実験条件で達成されることが示された。

これを要するに著者は、半導体による量子ビットをめざして量子ドットが埋め込まれた半導体スピントランジスタ構造において、スピン状態観測のために必要な要素技術を評価するため、微細構造の作製および微細構造評価方法の開発、強磁性体金属から半導体へのスピン注入評価、InAs 量子ドット中のスピン情報を含めた電子状態検出および近傍チャンネルとのトンネル結合の評価、量子ビットとして動作させるための最適構造の設計をおこない、有益ないくつかの知見を得た。これらの結果は、半導体工学、量子情報工学の進歩に対して広く貢献すると考えられる。よって、著者を北海道大学博士 (工学) の資格を授与される資格があるものと認める。