

# Single Electron Transistors and Their Integrated Circuits Based on Selectively Grown GaAs Nanostructures

(選択成長したガリウム砒素ナノ構造による  
単電子トランジスタとその集積回路に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

現在の情報社会を支える電子産業の発展は半導体デバイスにより支えられてきたといっ  
てよい。この半導体デバイスは Si, GaAs 等半導体結晶により構成され, 加工技術および半  
導体結晶成長技術等の進歩により, サイズ縮小化に従って性能を向上させてきた。この動  
きは同時に, 電子をその波長程度の領域に閉じ込めたときに発現する量子効果を用いた量  
子デバイスの作製を現実的なものとし, 量子細線, 量子ドット等の量子ナノ構造の研究が  
盛んに行われるようになった。こうした状況の中で低消費電力化や電子の離散性を利用し  
た新しいアーキテクチャ構築への期待から単電子デバイスが注目されることになった。単  
電子デバイスは, ナノスケールのドットと細線のトンネル障壁による結合構造を基本要素  
とし, 静電エネルギーの増大がトンネル効果を抑制させる, クーロンブロッケードにより,  
電子一つ一つの制御が可能である。安定動作にはドットの縮小化が必要不可欠であり, こ  
れを実現するのが大きな課題となっているが, 近年, 縮小化をめざす際の目標とされる室  
温動作が可能なデバイスは, いくつか報告が出始めている。しかし, 単電子デバイスによ  
り構成された集積回路に関する研究は, 初期の段階から提案があつたにもかかわらず, シ  
ミュレータによる動作解析の研究が主であり, 実際の回路作製による動作検証はこれまで  
あまり行われてきていなかった。この理由の一つに, 形成プロセスの不安定さにより, 同  
一基板に配置される複数個の単電子デバイスを同時に動作させるのが困難であつた事が上  
げられる。

従来の作製方法は, 1次元方向にサイズに制御された多層薄膜をエッチング等の加工や,  
微細電極からの電界による閉じ込めにより行われてきたが, 加工損傷や閉じ込め強さ, サ  
イズ縮小化の困難さ等の問題を有していた。これらの点を改善する方法として, 化合物半  
導体材料個々の性質の違いから直接エピタキシャル結晶成長により量子ナノ構造を作製す  
る, いわゆる自己組織的な手法も研究されている。この方法は極めて微少な構造を加工損  
傷なしに形成できる利点があるが, その原理上, 位置の制御が困難であり, 電子デバイス,  
特に集積回路への応用の点からは多くの問題を抱えている。

本論文では, 量子ナノ構造を作製するため, 有機金属気相選択成長法を用いる。これは,  
あらかじめパターンニングした成長マスクを有する基板上に結晶成長させ, 成長のみで微細  
な立体構造を得る方法である。加工による手法と自己組織的な手法の両方の利点を有し,  
位置ならびにサイズ制御性に優れる。これによって, 電子デバイスとして応用可能な新し  
い量子ドットアレイ形成手法の開発を試みた。さらにこれを元に単電子トランジスタ (SET)

を作製し、その評価を行った。またこの SET を複数個集積した論理回路を作製し、これまでシミュレーション上でのみ動作が確認されていた単電子集積回路の動作実証を行った。

本論文は6章から構成されている。以下に各章の要旨を説明する。

第1章では、本研究の背景および目的を述べるとともに、各章の概要を記した。

第2章では、本研究で用いた作製手法および評価法について記述している。まず、選択成長用の基板作製に関してリソグラフィ法を含めて簡潔にまとめ、次に、本研究の特徴の一つである有機金属気相選択成長法について、その形成モデル、結晶工学的に安定な面であるファセットの特徴、自己停止機構等、選択成長特有の現象について記述している。評価法に関しては、光学的な評価としてフォトルミネッセンスおよびカソードルミネッセンスについて、また電気的特性の評価に関してもまとめている。

第3章では、有機金属気相選択成長法を用いた量子ナノ構造の作製について述べている。選択成長に用いる GaAs(001) 基板の加工マスクの形状を工夫し、3次元構造の側壁に現れるファセットの種類を{110}面および{111}Bに限り、これらを周期的に配列することによって、100nm-サイズの菱形(001)面構造が形成できることを明らかにしている。このファセットを利用したドットを電氣的に結合できる形で配列した GaAs ドットアレイ構造の形成を行い、カソードルミネッセンスによる光学的な評価から、構造およびその形成メカニズムの考察を行っている。また、構造の周期に変化をつけることやネットワーク構造に拡張することも容易であり、微小菱形(001)面構造を核とするナノデバイスやその集積回路への応用が可能であることも示している。

第4章では、選択成長によって現れるファセットを利用した、SETの作製とその伝導特性について述べている。成長反応種の拡散を利用した形成手法および第3章に記述したファセットによる微小菱形構造を利用した手法の2点の方法を用いて、それぞれ SET を作製した。2K以下の低温における電気伝導特性を評価したところ、両形成方法ともに SET の基本特性が現れていることを実証した。サイズ縮小化、マルチドット構造への拡張性、集積回路への応用の観点から、微小菱形構造を利用した SET が優位であると結論づけている。さらに、多ゲート化、マルチドット化への応用を検討した。

第5章では、第4章で記述した SET の集積回路への応用について述べている。SET に適した電圧利得を要求しないアーキテクチャとして2分決定グラフ(BDD)論理を採用し、その実現方法を検討している。BDDとは、論理関数を有効グラフによって表現する方法であり、情報メッセンジャー(ここでは極少数電子)の伝導経路を分岐スイッチにて制御し、最終到達地点を評価することで論理判定を行うものである。まず、この論理アーキテクチャ構成の最小単位である2分岐スイッチを2つの SET を利用して作製した結果について述べている。この素子は一つの入力枝と2つの出力枝をもち、2つの出力枝に配置している SET のクーロン振動の位相を制御することでスイッチングが相補的に行われるようにするものである。2K以下の低温において分岐スイッチ動作の確認に成功した。次に、この2分岐スイッチを2つ配置し、AND/NAND および OR/NOR として動作する BDD 論理回路を作製した結果について述べている。スイッチングにクーロンブロッケードを用いない FET 動作モードにおいて、期待していた論理すべての動作を確認した。またクーロンブロッケードを用いる単電子動作モードにおける AND/NAND 動作をコンピュータシミュレーションおよび作製した回路の両面から実証している。

第6章では、本論文の結論と今後の展望について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 井 孝 志  
副 査 教 授 雨 宮 好 仁  
副 査 教 授 山 本 眞 史  
副 査 助 教 授 本 久 順 一

## 学 位 論 文 題 名

# Single Electron Transistors and Their Integrated Circuits Based on Selectively Grown GaAs Nanostructures

(選択成長したガリウム砒素ナノ構造による  
単電子トランジスタとその集積回路に関する研究)

現在の情報社会を支える電子産業の発展は半導体デバイスにより支えられてきた。この半導体デバイスは加工技術および半導体結晶成長技術等の進歩により、サイズ縮小化に従って性能を向上させてきた。この動きは同時に、電子をその波長程度の領域に閉じ込めたときに発現する量子効果を用いた量子デバイスの作製を現実的なものとし、量子細線、量子ドット等の量子ナノ構造の研究が盛んに行われるようになった。こうした状況の中で低消費電力化や電子の離散性を利用した新しいアーキテクチャ構築への期待から単電子デバイスが注目されることになった。単電子デバイスは、ナノスケールのドットと細線のトンネル障壁による結合構造を基本要素とし、静電エネルギーの増大がトンネル効果を抑制させる、クーロンブロッケードにより、電子一つ一つの制御が可能である。単電子デバイスにより構成された集積回路に関する研究は、初期の段階からシミュレーション等による提案があったにもかかわらず、実際の回路作製による動作検証はこれまであまり行われてきていなかった。この理由の一つに、形成プロセスの不安定さにより、同一基板に配置される複数個の単電子デバイスを同時に動作させるのが困難であった事が上げられる。

こうした背景から、本論文は、量子ナノ構造およびこれを用いた単電子デバイス/回路の作製に、パターンニングした成長マスクを有する基板上に結晶成長させ、成長のみで微細な立体構造を得る、有機金属気相選択成長法を用いている。加工による手法と自己組織的な手法の両方の利点を有し、位置ならびにサイズ制御性に優れる。これによって、従来、作製が困難とされていた単電子集積回路が実現されることが期待され、その動作は工学的・物理的に非常に興味深い。本論文は6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、本研究の背景および目的を述べるとともに、各章の概要を記している。

第2章では、本研究で用いた作製手法および評価法について記述している。まず、選択成長用の基板作製に関してリソグラフィ法を含めて簡潔にまとめており、次に、本研究の特徴の一つである有機金属気相選択成長法について、その形成モデル、結晶工学的に安定な面であるファセットの特徴、自己停止機構等、選択成長特有の現象について記述してい

る。また、光学的評価や電気的特性の評価に関してまとめている。

第3章では、有機金属気相選択成長法を用いた量子ナノ構造の作製について述べている。選択成長に用いる GaAs(001) 基板の加工マスクの形状を工夫し、3次元構造の側壁に現れるファセットの種類を {110} 面および {111}B に限り、これらを周期的に配列することによって、100nm-サイズの菱形 (001) 面構造が形成できることを明らかにしている。このファセットを利用したドットを電氣的に結合できる形で配列した GaAs ドットアレイ構造の形成を行い、カソードルミネッセンスによる光学的な評価から、構造およびその形成メカニズムの考察を行っている。また、構造の周期に変化をつけることやネットワーク構造に拡張することも容易であり、微小菱形 (001) 面構造を核とするナノデバイスやその集積回路への応用が可能であることも示している。

第4章では、選択成長によって現れるファセットを利用した、SET の作製とその伝導特性について述べている。成長反応種の拡散を利用した形成手法および第3章に記述したファセットによる微小菱形構造を利用した手法の2点の方法を用いて、それぞれ SET を作製している。2K 以下の低温における電気伝導特性の評価の結果、両形成方法ともに SET の基本特性が現れていることを実証している。サイズ縮小化、マルチドット構造への拡張性、集積回路への応用の観点から、微小菱形構造を利用した SET が優位であると結論づけている。さらに、多ゲート化、マルチドット化への応用を検討している。

第5章では、第4章で記述した SET の集積回路への応用について述べている。SET に適した電圧利得を要求しないアーキテクチャとして2分決定グラフ (BDD) 論理を採用し、その実現方法を検討している。BDD とは、論理関数を有効グラフによって表現する方法であり、情報メッセンジャー (ここでは極少数電子) の伝導経路を分岐スイッチにて制御し、最終到達地点を評価することで論理判定を行うものである。まず、この論理アーキテクチャ構成の最小単位である2分岐スイッチを2つの SET を利用して作製した結果について述べている。この素子は一つの入力枝と2つの出力枝をもち、2つの出力枝に配置している SET のクーロン振動の位相を制御することでスイッチングが相補的に行われるようにするものである。2K 以下の低温において分岐スイッチ動作の確認に成功している。次に、この2分岐スイッチを2つ配置し、AND/NAND および OR/NOR として動作する BDD 論理回路を作製した結果について述べている。スイッチングにクーロンブロックードを用いない FET 動作モードにおいて、期待していた論理すべての動作を確認している。またクーロンブロックードを用いる単電子動作モードにおける AND/NAND 動作をシミュレーションおよび作製した回路の両面から実証している。

第6章では、本論文の結論と今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は、有機金属気相選択成長法を用いて伝導デバイスに適した独自のナノ構造形成方法、単電子トランジスタ・集積回路への応用方法、およびそれらの動作検証に関し有益ないくつかの新知見を得たものであり、結晶工学、半導体工学、量子物理学の進歩に対して貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。