

## 学位論文題名

Fabrication and Electron Device Application of  
Compound Semiconductor Quantum Nanostructures

(化合物半導体量子ナノ構造の作製と電子デバイスへの応用)

## 学位論文内容の要旨

近年、半導体集積回路において、性能向上および生産性向上のために、デバイスの基本寸法の縮小が勢力的に行われている。技術進歩により、デバイスの基本寸法はナノメートルを単位とする領域に達しようとしているが、この領域は半導体中の電子の波長に近く、電子の量子力学的な波動性-粒子性が顕著に現れ始める領域である。これは、電子を無限小の粒子として統計的に扱う現在のデバイスの動作理論に、物理的な限界が訪れることを意味する。一方、この数 10 ナノメートルの極微細な領域で生じる量子力学的な効果、即ち、ポテンシャル障壁のトンネリングや、クーロンブロッケード等の現象を積極的に利用した量子デバイスが提案されている。この量子デバイスの実用化のためには、電子を閉じ込める領域を微細化して量子閉じ込め効果によって生じる離散化したエネルギー準位の間隔を大きくし、より高温でのデバイス動作を可能にすることが必要である。また、より高機能な量子デバイスを実現するためには、均一な特性の量子デバイスを高密度に集積化し、かつ生産性の高い作製技術を見出すことも重要である。化合物半導体は、良好なヘテロ接合が形成可能であり、ヘテロ界面に電子を良好に閉じ込めることができる等の特徴を有しており、量子デバイスの実現に適した材料系である。従来の研究では、化合物半導体表面に配置したスプリットゲートを用いて 2 次元電子ガスを選択的に空乏させて、量子デバイスの基本要素である量子細線や単電子トランジスタを形成していたが、スプリットゲートによる電子の閉じ込めは弱く、デバイス動作は極低温に限られていた。また、化合物半導体の結晶成長の面異方性を巧みに用いた選択成長法は、半導体ヘテロ界面で直接的に電子を閉じ込める量子構造を、無損傷に、大面積に形成可能であり、量子構造の高密度集積化に大きな利点を有する。しかしながら、これらの構造に関する研究は光学的な評価が主であり、電気的特性の評価や、特に量子デバイスへの応用を検討した例は少ない。

本論文は、化合物半導体を用いた、強い電子閉じ込めが期待される量子ナノ構造を作製し、評価し、電子デバイスへの応用を試みるものである。具体的には、電子をナノメートル領域に閉じ込め、かつ、これを制御する、ショットキー・インプレーンゲート構造およびショットキー・ラップゲート構造を提案している。また、量子ナノ構造を実現する手法として、電解液中でショットキー・ゲート電極を形成するインシツ電気化学プロセスや、分子線エピタキシーの選択成長法による量子細線構造の形成という、二つの手法を検討し、構造を作製している。さらに、量子細線トランジスタや、単電子トランジスタへの応用を試みており、コンダクタンスの量子化や単電子輸送現象を、従来報告よりも高温で観測し、本論文で提案した手法の有用性を明らかにしている。本論文は 8 章より構成されている。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、各章の概要を記した。

第2章では、半導体量子構造で観測される基本的な電子輸送現象のうち、本論文において量子構造の評価に用いた現象について概説した。

第3章では、本論文で新たに提案したショットキー・インプレーンゲート構造、およびショットキー・ラップゲート構造を示している。また、各構造の作製に用いた手法として、化合物半導体の基本的な量子構造の成長に用いた分子線エピタキシー法、微細なゲート構造の形成に用いた電子線露光法、良好なショットキー接合を形成可能であるインシツ電気化学プロセスについて示している。

第4章では、作製した量子ナノ構造の評価方法として、光学的評価に用いた走査型電子顕微鏡およびフォトルミネセンス法、また電氣的な評価に用いた測定系について示している。

第5章では、ショットキー・インプレーンゲート構造を有する量子細線トランジスタ構造を作製し、評価した結果を述べている。作製した量子細線トランジスタは良好な電界効果トランジスタ形の特性を示し、その特性は、ショットキー電極/2次元電子ガス直接接合の空乏特性を考慮した、緩やかなチャネル近似モデルおよび定電子速度モデルを用いた解析が、実験結果とよく一致することを示している。インプレーンゲートの制御性について、数値計算による電位分布解析と磁気抵抗振動測定の結果を用いて検討し、細線のキャリア密度を保ったまま実効細線幅がゲートバイアスに対して線形に変化する特徴的な空乏特性を示している。さらに、作製した量子細線トランジスタは、液体ヘリウム温度で明確なコンダクタンスの量子化を示した。この特性は最高で 100 K まで観測されており、AlGaAs/GaAs 材料系では、世界で最も高い観測温度が実現している。この系の細線の横方向閉じ込め強さは、別な測定から 10 meV と見積もられ、従来のスプリットゲート構造よりも強い閉じ込めが実現できることを示している。

第6章では、分子線エピタキシーの選択成長法によって形成した InGaAs リッジ量子細線を用いた量子細線トランジスタを作製し、評価した結果を述べている。InGaAs リッジ量子細線の磁気抵抗振動特性から、良好な1次元電子輸送特性が行われていることが示され、この実験結果から見積もられた実効細線幅 95 nm は、電子顕微鏡による断面観察から得た幅 100 nm と良く一致することを示している。さらに、細線の横方向閉じ込めは 13 meV と見積もられ、スプリットゲート構造に比べて強い閉じ込めが達成されていることを示している。ショットキー・ラップゲートによる実効的な細線幅の制御性について、数値計算による理論的な電位分布計算と、磁気抵抗振動測定の結果を比較したところ、両者は良い一致を示した。さらに、その変化は弱いゲートバイアス領域では一定の細線幅を保ち、あるゲートバイアスから急激に幅が減少するという、ショットキー・インプレーンゲートとは大きく異なる特性を有することを示している。また、ピンチオフ近傍で明確なコンダクタンス振動が 50K まで観測され、また、振動が観測されたゲートバイアス領域で、クーロンブロッケードを示唆するドレイン電流-電圧特性が観測されたことから、ピンチオフ近傍で、単一電子輸送現象が行われていることを指摘している。

第7章では、分子線エピタキシー法の選択成長法で形成した InGaAs リッジ量子細線を用いた単電子トランジスタ構造を作製し、評価した結果を述べている。作製に先立って、数値計算による電位分布をシミュレートし、ショットキー・ラップゲートへのバイアスによって InGaAs 量子細線中に量子ドットとトンネル障壁を形成できることが示している。また、実際に作製したデバイスは単電子輸送効果に基づく明瞭なコンダクタンス振動を示し、振動はスプリットゲート構造を用いた単電子トランジスタの動作温度を大きく上回る 30 K まで観測された。以上の結果から、選択成長法で形成した量子細線構造を用いて、単電子トランジスタが実現できることを初めて示した。

第8章では、本論文の結論を述べている。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	福井	孝志
副査	助教授	橋詰	保

学位論文題名

## Fabrication and Electron Device Application of Compound Semiconductor Quantum Nanostructures

(化合物半導体量子ナノ構造の作製と電子デバイスへの応用)

近年、半導体集積回路のさらなる大容量化、高速化、多機能化のために、デバイス構造の超微細化が進展してきており、100nm以下の素子寸法が実現されようとしている。しかし、この寸法は半導体中の電子波長に近く、電子の有する量子力学的性質が顕著となり、半古典力学的原理に基づく現在の集積回路技術は、本質的な限界に到達すると考えられる。一方、超微細加工技術の進展は、量子力学的効果を積極的に利用した人工的量子構造を用い、個々の電子の粒子性/波動性を制御し、新しい機能を実現する量子デバイスの可能性を開くことになった。化合物半導体は、良好なヘテロ接合が形成でき、このヘテロ界面に電子を効果的に閉じ込めることができるため、量子デバイスの実現に適した材料系であり、また、結晶成長の面方位依存性を巧みに用いた化合物半導体の選択成長は、量子構造を、無損傷に、大面積に形成可能であるという利点を有する。しかしながら、量子デバイスの実用化に必要なヘテロ材料系、デバイス構造、プロセス技術等に関しては、未だ十分な検討がなされていないのが現状である。

本論文は、このような背景のもとで、新しいゲート構造を用いて2次元電子ガスを制御するプロセス技術と分子線エピタキシャル選択成長により作製した量子細線をゲート制御するプロセス技術を開発し、これらを利用して化合物半導体量子ナノ構造を作製し、その電子輸送特性を詳細に評価し、新しい機能を有する電子デバイスへ応用する方法について研究を行ったものである。本論文は8章より構成されている。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、各章の概要が示されている。

第2章では、半導体量子構造で観測される基本的な電子輸送現象の基礎理論がまとめられている。

第3章では、本研究で新たに提案された、ショットキー・インプレーンゲート (IPG)、およびショットキー・ラップゲート (WPG) 構造の基本概念が示されている。また、各構造の作製に用いた手法として、化合物半導体量子構造の成長に用いた分子線エピタキシー法、微細ゲート構造の形成に用いた電子線露光法、ショットキー接合形成に用いたインシツ電気化学プロセスについて説明されている。

第4章では、作製した量子ナノ構造の構造評価、光学的特性評価および電子輸送特性評価に用いた評価法と、特性解析に用いた計算機シミュレーション手法の説明がなされている。

第5章では、ショットキー・インプレーンゲート構造を有する量子細線トランジスタ構造を作製し、その電子輸送特性を評価した結果が述べられている。作製した量子細線トランジスタは良好な電界効果トランジスタ特性を示し、その特性は、ショットキー電極/2次元電子ガス直接接合の空乏特性を考慮した、緩やかなチャンネル近似モデルおよび定電子速度モデルによってよく説明されることが示された。さらに、インプレーンゲートの制御性について、数値計算による電位分布解析と磁気抵抗振動測定より詳しい解析を行った。その結果、細線内のキャリア密度を一定に保ったまま、実効細線幅がゲートバイアスに対して線形に変化するという、インプレーンゲートの特徴的な空乏特性が明らかにされた。作製された量子細線トランジスタにおいて、液体ヘリウム温度で明確なコンダクタンスの量子化が観測され、また、この特性は最高で100Kまで観測されており、AlGaAs/GaAs材料系では、世界で最も高い観測温度が達成された。このインプレーンゲート型量子細線の、サブバンドエネルギー間隔は10meVと計算され、従来のスプリットゲート構造よりも、格段に強い閉じ込めが実現していることが明らかにされた。

第6章では、分子線エピタキシーの選択成長法によって形成したInGaAsリッジ量子細線を用いた量子細線トランジスタを作製し、デバイス特性を評価した結果が述べられている。InGaAsリッジ量子細線の磁気抵抗振動特性から、良好な1次元電子輸送特性が確認され、量子細線のサブバンドエネルギー間隔は13meVと見積もられた。この量子細線にショットキー・ラップゲートを形成し、数値計算と磁気抵抗振動測定より実効的な細線幅の制御性を検討し、その結果、弱いゲートバイアス領域では細線幅はほぼ一定の値を保持し、その後ゲートバイアスに対して急激に細線幅が減少するという、インプレーンゲートとは大きく異なるゲート制御特性が明らかにされた。また、ピンチオフ近傍で明確なコンダクタンス振動が50Kまで観測され、さらに、振動が観測されたゲートバイアス領域で、クーロンブロッケード現象を示唆するドレイン電流-電圧特性が観測されたことから、ピンチオフ近傍で、単電子輸送現象が発現していることが示された。

第7章では、分子線エピタキシー法の選択成長法で形成したInGaAsリッジ量子細線をショットキーラップゲートで制御する単電子トランジスタを作製し、その電子輸送特性を評価した結果が述べられている。まず、数値計算により電位分布をシミュレートし、InGaAs量子細線中に量子ドットとトンネル障壁が形成されるデバイス構造パラメータとゲートバイアス条件を明らかにし、その結果に基づいて、単電子トランジスタを設計・製作した。作製された単電子トランジスタは、単電子輸送に基づく明瞭なコンダクタンス振動とクーロンギャップ特性を示し、選択成長法で形成した量子細線をゲート制御する新しい構造の単電子トランジスタが初めて実現された。また、コンダクタンス振動は、従来のスプリットゲート構造を用いた単電子トランジスタの動作温度を大きく上回る30Kまで観測された。

第8章では、本論文の結論が述べられている。

これを要するに、著者は、新しいゲート構造を有する化合物半導体量子ナノ構造を提案し、そのゲート制御特性を詳細に評価し、さらに、これらの量子ナノ構造を新しい機能を有する電子デバイスへ応用する方法に関して系統的な検討を加え、いくつかの有益な知見を得たものであり、半導体工学の進歩に寄与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あるものと認める。