

学 位 論 文 題 名

Fabrication and Characterization
of InGaAs Quantum Nanostructure Arrays
by Selective Molecular Beam Epitaxy

(MBE 選択成長による InGaAs 量子ナノ構造アレイの作製と評価)

学位論文内容の要旨

近年、超大規模集積回路(ULSI)技術においてサイズ縮小化が進み、CMOS に代表されるデバイスサイズは、ナノメートルの領域に到達した。この様な領域では、電子の古典力学的運動の制御を動作原理とする従来のデバイスは、もはや満足に動作し得ない。一方で、微細な構造で発現する量子力学的現象を積極的に利用してデバイス動作を実現する研究が盛んに進められている。しかしながら、その主流は単体デバイスの動作特性評価に関するものが大部分であり、デバイスの高集積化・ネットワーク化を前提として取り組んでいる報告はほとんど無い。これは、デバイスの基本構造となる量子構造を均一かつ高密度に形成することが、従来の技術では極めて困難であったためである。量子デバイスを用いて従来の ULSI を凌駕する大規模集積回路を実現するためには、その基本構造となる微細な量子細線や量子ドットを均一かつ高密度に作製する技術とそれらを実際のデバイスへ応用可能な形で結合する技術が必要不可欠となる。

現在、量子細線や量子ドットを形成する技術は数多く提案されているが、その中でも「選択成長」技術は、プロセス加工による損傷が無く、良好な半導体ヘテロ界面を利用した電子の閉じ込めが可能である。また、この手法は位置およびサイズ制御性に優れており、自由度の高い加工パターンを用いて大面積に一度に形成することができる。

本論文は、以上の背景のもと、高速・高温動作デバイスの実現に適した化合物半導体 InP 系材料を用いて、「分子線エピタキシ(MBE)選択成長法」により、デバイス応用可能な各種の量子ナノ構造アレイ作製技術を確立したものである。

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、本研究の歴史的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、量子ナノ構造における電子輸送特性の物理について説明している。はじめに、量子井戸、量子細線および量子ドットにおける電子状態について述べる。また、これらの量子ナノ構造でみられる特徴的な現象として、強磁場下における電子の振る舞い、コンダクタンスの量子化や単一電子トンネリングなどについて述べ、それらを利用したデバイスについて記している。

第 3 章では、化合物半導体量子ナノ構造を作製する技術として、電子線リソグラフィ技術、MBE 法による選択成長技術、デバイス作製技術について述べられている。さらに、成長薄膜および量子構造の評価法として、走査線電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、原子間力顕微鏡(AFM)、フォトルミネッセンス(PL)法、カソードルミネッセンス(CL)法、X 線光電子分光(XPS)法、I-V 法について、それらの原理や具体的装置の概要が説明されている。

第 4 章では、InGaAs リッジ量子細線の基本的な特性とそのデバイス応用について議論している。まず、SEM による構造評価により、MBE 成長条件と細線幅の関係式を導き出した。この関係式を基に作製した細線を PL 法により評価した結果、細線を起因とする発光ピーク位置は量子細線の遷移エネルギーの理論計算結果と非常に良く一致した。次に、細線の磁気抵抗測定を行った結果、明確な一次元伝導を示すシュブニコフ-ド・ハース(SdH)振動が観測された。理論計算により見積もられた細線幅は、PL 測定の結果と同様、設計した細線幅と非常に良い一致を示した。量子細線におけるサブバンド間隔の値は最大で 13meV と求められ、従来の GaAs/AlGaAs 系材料では得られない、強い電子閉じ込めの存在を確認した。また、この量子細線を用いて FET トランジスタを作製し、伝導特性を評価した結果、非常に急峻なゲート制御が可能である事が明らかとなった。

第 5 章では、InP 基板上での InGaAs 量子構造で生じる不均一性の要因とその改善プロセスについて検討を加えている。XPS 法、SEM、TEM および PL 法を用いて詳細に調査した結果、量子構造形成において基板-成長層の界面状態が非常に重要であり、最終的な構造の均一性と光学特性に大きな影響を与える事を明らかにした。そして、成長前処理として原子状水素を用いた低温クリーニングプロセスを導入し、InP/InGaAs 界面状態の最適化を試み、良好な表面モロロジーと光学特性を有する量子構造の形成を可能とした。これにより、実効的なサイズにして 6nm の量子細線構造の作製に成功している。

第 6 章では、ネットワーク回路への応用として結合タイプの量子ナノ構造について述べられている。はじめに InGaAs 量子細線と InGaAs 量子ドットを組み合わせた、量子細線-ドット結合構造の作製とその基本特性について述べる。まず、SEM および AFM 観察に基づき、量子ドット形成のメカニズムとサイズ制御法について検討を加えた。次に、本構造のポテンシャル分布を明らかにするため、詳細な CL 測定を行った結果、本構造が細線-ドット-細線間に二重ポテンシャル障壁が存在し、単電子デバイスに応用可能な構造であることを見出した。このポテンシャルの障壁幅および障壁高さの制御法について検討を加え、最小で幅 85nm、最大で 140meV の二重ポテンシャルの障壁を有する量子細線-ドット結合構造の作製に成功した。さらに、異なる方向の InGaAs リッジ量子細線を組み合わせた新しいネットワーク構造として、量子細線 Y 分岐構造を用いた六角形ネットワーク構造を提案し、実現した。

第 7 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	福井	孝志
副査	教授	佐野	栄一
副査	助教授	葛西	誠也

学位論文題名

Fabrication and Characterization of InGaAs Quantum Nanostructure Arrays by Selective Molecular Beam Epitaxy

(MBE 選択成長による InGaAs 量子ナノ構造アレイの作製と評価)

近年の半導体加工技術の進歩により、ナノメートル・スケールの微細な構造の実現が可能となり、そこで発現する量子力学的現象を利用した量子デバイスを実現する研究が活発に行われ、多くの報告がなされている。しかしながら、その大部分は、単体のデバイスを試作し、極低温でその動作を確認する段階であり、室温動作する高密度集積回路の実現を目指した研究はほとんどなされていない。量子デバイスを用いて従来のシリコン超大規模集積回路(Si ULSI)を凌駕する室温動作の大規模集積回路を実現するためには、室温で量子効果が発現する微細な量子細線や量子ドットの均一かつ高密度アレイを作製する技術と、それを室温動作の量子デバイスと回路の実現に応用する技術を探索・開拓することが必要である。

以上の観点から、本論文は、インジウムリン(InP)系化合物半導体を材料として、分子線エピタキシ(MBE)選択成長法により、量子細線および量子ドットの高密度のアレイを実現する方法を開拓し、その光学的特性と電子輸送特性を詳細に評価するとともに、製作されたアレイを量子デバイス製作に応用するための基礎的検討を行ったものである。本論文は 7 章から構成されている。各章の要旨は次の通りである。

第 1 章では、研究の歴史的背景、研究の目的と各章の概要が述べられている。

第 2 章では、量子ナノ構造で発現する電子物性と光物性について概説している。量子井戸、量子細線および量子ドットにおける電子状態が述べられ、これを反映して現れる新しくかつ特徴的な量子力学的現象について述べている。

第 3 章では、本研究で用いられている化合物半導体量子ナノ構造の作製法およびその評価法について述べている。まず、電子線リソグラフィ法による半導体基板上へのパターン形成法と、その上への MBE 選択成長法による量子構造の形成法が説明されている。次に、形成された量子構造の評価法として、走査線電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、原子間力顕微鏡(AFM)、フォトルミネッセンス(PL)法、カソードルミネッセンス(CL)法、X 線光電子分光(XPS)法、I-V 法について、それらの原理と具体的装置、方法の概要が説明されている。

第4章では、量子細線デバイスの高密度集積化の基礎となる InGaAs リッジ量子細線アレイを InP 加工基板上に形成し、それを光学および電気的手段で評価した結果が述べられている。まず、アレイの断面および平面構造の詳細な評価により、量子細線が選択的に形成されていること、および、細線の寸法が成長条件により精密に制御可能であることが示され、寸法制御のための実験式が導き出されている。次に、細線の PL 法による評価結果では、発光ピーク位置は、理論計算結果と良い一致を示している。さらに、磁気抵抗測定により、明確な一次元伝導を示す特性が観測され、放物線ポテンシャル近似計算から見積もられた細線寸法が、設計値と非常に良く一致することが示されている。最後に、量子細線を用いてショットキゲート型電界効果トランジスタを作製し、その磁気輸送特性を評価した結果、細線の電子の量子閉じ込めの強さを表すサブバンド間隔値として、従来の GaAs/AlGaAs 系量子細線をはるかに凌ぐ大きな値 15meV を得て、量子デバイスの高温動作に明るい見通しを得ている。

第5章では、InGaAs 量子細線アレイで生じる構造不均一性の要因を解明し、その改善を試みた結果が述べられている。SEM、TEM、XPS および PL 法を用いて、量子細線アレイの構造的不均一性と組成や光学特性の関連性を詳細に調べた結果、As 圧下で加工基板を熱清浄化するとき生じる加工基板/成長層界面のラフネスが、量子細線の均一性に大きな影響を与えることが見出されている。次に、これを改善するために、原子状水素を用いた低温クリーニングプロセスを導入すると、原子レベルで平坦な InP/InGaAs 界面構造が実現でき、良好な表面モロロジーと光学特性を有する量子細線アレイの形成が可能となることが示されている。この結果、実効細線幅 10nm 以下の量子細線アレイの実現に成功している。

第6章では、量子細線-量子ドット結合構造アレイや細線の六角形ネットワーク構造を作製し、評価した結果が述べられている。まず、単電子デバイスの高密度集積化を目指し、量子細線と量子ドットを組み合わせた結合構造アレイの形成を試み、SEM、AFM 観察より、このような構造が形成可能であることを示し、形成機構を解明するとともに、形成プロセスの最適化を行っている。さらに、AFM 測定と CL 法を組み合わせたポテンシャル解析から、細線-ドット間に二重障壁ポテンシャルが自己組織的に形成されることを明らかにし、この構造が単電子デバイスの基本構造として有望であることを示している。最後に、量子細線をベースとして 2 分決定グラフ論理回路の高密度集積化を目指し、量子細線 Y 分岐構造と、それにもとづく六角形量子細線ネットワーク構造の実現を試み、原子状水素の導入により、均一なネットワークの形成に成功している。

第7章では、本論文の結論を述べている。

これを要するに、本論文は、インジウムリン系化合物半導体を材料として、分子線エビタキシ選択成長法により、すぐれた光学的特性と電子輸送特性をもつ量子細線および量子ドットの微細かつ高密度のアレイを実現する方法を確立し、量子デバイスの高密度集積化と高温動作化に展望を開くとともに、いくつかの有益な新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。