

学位論文題名

Growth of GaAs Quantum Wires and Their Networks
by Selective Molecular Beam Epitaxy(選択分子線エピタキシー法によるガリウムヒソ量子細線および
そのネットワークの成長)

学位論文内容の要旨

半導体量子構造を基本とする単電子トランジスタや量子細線トランジスタのような量子ナノデバイスは、従来不可能であった高度な演算や、低消費電力での動作が可能であり、次世代集積回路を構成するキーデバイスとして注目されている。また、近年なされた動作実証に基づき、これらの量子ナノデバイスを用いた、高密度集積回路の実現が期待されている。このような量子集積回路の実現には、微細な電極の形成や配線手法など、量子サイズに対応した作製プロセスとともに、高密度集積化に適した量子構造作製プロセスの開発が必要不可欠である。

これまでに高密度集積回路を実現するための手法の一つとして、量子細線を組み合わせて六面形となるように配列したヘキサゴナル細線ネットワーク上にショットキーゲートを施し、二分決定グラフ(BDD)論理回路を実装する方法が提案されている。具体的には、プレーナー基板上に形成した GaAs/AlGaAs ヘテロ構造を、電子線リソグラフィとウェットケミカルエッチングにより加工することで、BDD 量子集積回路の試作がなされ、低温から室温まで正確に動作することが確認されたが、サイズがリソグラフィサイズに制限されることや加工損傷の問題から、室温における量子近傍での超低消費電力動作が、非常に困難な状況にある。そのため、新たな手法を用いて、より細かい細線を高密度に集積した細線ネットワーク構造を作製することが必要となる。

量子構造を形成する手法は数多く報告されているが、中でも加工基板上への分子線エピタキシー(MBE)選択成長法は、半導体結晶成長過程における面方位依存性を利用するため、加工損傷のない量子構造を、位置と大きさを同時に制御しながら形成することが可能である。さらに、初期基板の設計自由度が高く、様々な結晶方位を利用することが可能であるため、半導体量子ドットや量子細線を多数結合させた高密度量子ネットワークの実現に有力な手法となる。

このような背景のもと、本論文では、加工基板上への MBE 選択成長法を用いて、GaAs(001)面および GaAs(111)B 面基板に、ヘキサゴナル GaAs/AlGaAs 量子細線ネットワークの作製することを目的としている。(001)面および(111)B 面基板を用いた加工基板上への選択成長によって形成される $\langle -110 \rangle$ 方向、 $\langle 510 \rangle$ 方向および $\langle -1-12 \rangle$ 方向に沿った量子細線構造の形成過程を詳細に評価し、実験と計算機シミュレーションによる理論的考察結果から成長メカニズムを明らかにしている。さらに、これらの検討結果をもとに、非常に均一なヘキサゴナル細線ネットワークを作製する手法を確立するとともに、構造的および光学的な評価結果から、量子集積回路の基本構造の設計方針を示している。

本論文は 8 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、本論文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、半導体量子構造が注目されるようになったこれまでの歴史、量子構造のもつユニークな特徴を述べるとともに、一般的な作製方法等について述べている。

第 3 章では、本論文で用いた半導体ナノ構造の実現手法である加工基板上への MBE 選択成長法の特徴を述べるとともに、GaAs/AlGaAs 量子細線構造の作製手順、また作製された構造の構造的評価法である走査型電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)、X 線回折(XRD) や、光学的評価法であるフォトルミネッセンス法(PL)、カソードルミネッセンス法 (CL) についてそれらの原理や具体的な装置の概要を説明している。また、埋め込み型量子細線が材料供給に伴い下部の AlGaAs 障壁層の上に選択的に形成される様子や GaAs(001)面、(111)B 面とともに形成過程時に現れる成長境界面について述べ、この成長境界面を用いた形成される量子細線構造のサイズや位置制御について説明している。

第 4 章では、工業的に有用である GaAs(001)面上にメサストライプ状に加工を施した基板上へ MBE 選択成長した GaAs 量子ナノ細線の形成について述べている。まず $\langle -110 \rangle$ 方向に沿った GaAs 量子ナノ細線構造の形成を試みた。加工基板へ材料成長を行なうと、(111)A 面と(113)A 面が現れ、メサ頂上部の(113)A 面上に量子ナノ細線構造の形成に成功した。この細線構造を SEM や AFM による構造的評価および PL や CL を用いた光学的評価結果を示し材料成長量の選択性や作製条件の最適化について述べている。ここで得られた成長条件をもとに、細線幅 40nm の量子細線構造の形成に成功した。またヘキサゴナル量子細線ネットワークの形成に向け、 $\langle 510 \rangle$ 方向や $\langle 100 \rangle$ 方向に沿った GaAs 細線形成への検討について述べ、これらの構造の構造的および光学的評価結果を示している。

第 5 章では、高密度高均一なヘキサゴナルネットワークの形成のため、結晶配列が面上で 120° 回転させた場合にも同じになる三回対称性を持つ GaAs(111)B 面上に $\langle -1-12 \rangle$ 方向に沿ったメサストライプ状に加工した基板上へ MBE 選択成長を試みた。実際に $\langle -1-12 \rangle$ 方向加工基板上へ MBE 成長を行なうと、メサ頂上部の(111)B 面上に選択的に量子ナノ細線が形成される。作製された $\langle -1-12 \rangle$ 方向 GaAs 量子ナノ細線構造について、成長温度や V/III 比、材料組成比が及ぼす成長境界面への影響の調査結果を構造的評価および光学的評価用いて述べている。この最適化された成長条件をもとに、40nm の細線幅をもつ三角形の $\langle -1-12 \rangle$ 方向量子細線を作製することに成功した。

第 6 章では、これまで(001)面および(111)B 面上に作製された細線構造の形成過程で現れる成長境界面の観察をもとに行なった、理論計算による成長シミュレーションについて原理、手法について説明している。ここで用いた計算機シミュレーションにより加工基板上への量子細線形成メカニズムを明らかにし、形成条件の最適化について示している。また理論計算結果が実験結果と良い一致を示したことから、本論文で用いている計算機シミュレーションによる定量的解析手法の有用性も示した。

第 7 章では、以上で得られる知見をもとに、GaAs (001) 面および(111)B 面加工基板上にヘキサゴナル量子ナノ細線を作製し、構造的および光学的評価結果を示している。(001)面上では節点密度 $3.2 \times 10^8 / \text{cm}^2$ 、(111)B 面上では節点密度 $1 \times 10^7 / \text{cm}^2$ のヘキサゴナル細線ネットワークの作製を行なった。ともに表面ラフネス 2nm 以下で、各方向に沿った細線が滑らかにお互い接続し、しかも広範囲わたり非常に均一にヘキサゴナルネットワークを形成することに成功した。さらに、作製条件の最適化により、さらなる高密度化の可能性を示し、量子集

積回路への応用への有用性を示した。

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 橋 詰 保
副 査 教 授 酒 井 洋 輔
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 助 教 授 佐 藤 威 友

学 位 論 文 題 名

Growth of GaAs Quantum Wires and Their Networks by Selective Molecular Beam Epitaxy

(選択分子線エピタキシー法によるガリウムヒソ量子細線および
そのネットワークの成長)

ガリウムヒソ(GaAs)やインジウムリン(InP)を中心とした化合物半導体による高効率光デバイスや超高周波電子デバイスの著しい進展は、現在の高度情報通信システムの急速な発展の原動力となっている。さらに、「ユビキタスネットワークシステム」における通信データの大容量化と変調方式の高度化に対応するために、量子ナノ構造等を利用した新しい原理で動作するデバイスとその高密度集積回路の開発が要請されており、微細な電極の形成や配線手法など、量子サイズに対応した作製プロセスとともに、高密度集積化に適した量子構造作製プロセスの開発が急務となっている。

量子構造を形成する手法は数多く報告されているが、中でも加工基板上への分子線エピタキシー(MBE)選択成長法は、半導体結晶成長過程における面方位依存性を利用するため、加工損傷のない量子構造を、位置と大きさを同時に制御しながら形成することが可能である。さらに、初期基板の設計自由度が高く、様々な結晶方位を利用することが可能であるため、半導体量子ドットや量子細線を多数結合させた高密度量子ネットワークの実現に有力な手法となる。

このような背景のもと、本論文は、加工基板上への MBE 選択成長法を用いて、量子細線を組み合わせて六画形（ヘキサゴナル）となるように配列したヘキサゴナル GaAs/AlGaAs 量子細線ネットワークを作製し、詳細な実験と計算機シミュレーションより成長メカニズムを明らかにするとともに、量子集積回路の基本構造の設計方針を検討したものである。

本論文は 8 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、本論文の背景と目的を述べている。

第 2 章では、半導体量子構造が注目されるようになったこれまでの歴史、量子構造の持つユニークな特徴を述べるとともに、主な作製方法を説明している。

第 3 章では、本研究で用いた加工基板上への MBE 選択成長法の特徴と GaAs/AlGaAs 量子細線構造の成長手法を説明している。また作製された構造の評価法として、走査型電子顕微鏡 (SEM)、原子間力顕微鏡 (AFM)、X 線回折 (XRD)、フォトルミネッセンス法 (PL)、カソードルミネッセンス法 (CL) についてそれらの原理や具体的な装置の概要を説明している。

第 4 章では、メサストライプ状に加工を施した GaAs(001)面に量子ナノ細線を MBE 成長した結果について述べている。まず<110>方向に沿った GaAs 量子ナノ細線構造の形成を試み、断面に(111)A 面と(113)A ファセット面を持つ細線構造が成長し、メサ頂上部の(113)A 面上に量子ナノ細線を形成できることを明らかにしている。成長した細線の構造的・光学的評価結果に基盤にして成長条件を最適化し、細線幅 40nm の量子細線構造の形成に成功している。さらに、<510>方向や<100>方向に沿った GaAs 細線成長を行い、ヘキサゴナル量子細線ネットワークの形成の設計指針を得ている。

第 5 章では、高密度高均一なヘキサゴナルネットワークの形成の検討を行った。三回対称性 (面内で 120° 回転させた場合にも結晶配列が同じになる) の GaAs(111)B 面上に、<-1-12> 方向に沿ったメサストライプ加工基板上へ MBE 選択成長を試みた。メサ頂上部の(111)B 面上に選択的に量子ナノ細線が形成されることが明らかとなり、成長温度、V/III 比、材料組成比が成長境界面へ与える影響を詳細に評価し、成長条件の最適化を行った。その結果、三角形状断面を有する<-1-12>方向量子細線において、最小線幅 40nm が得られた。

第 6 章では、GaAs(001)面および(111)B 面上に作製された細線構造の形成過程で出現する成長境界面に関し、シミュレーションによる詳細な検討を行った。まず、シミュレーションに用いた原理と手法を説明し、次に実験結果との比較を行った。本論文で用いたシミュレーションによる計算結果は、断面 SEM などにより詳細に観察した細線断面の成長境界面を良く再現することができ、本手法の有用性が示された。さらに、実験結果とシミュレーション結果との比較より加工基板上への量子細線形成メカニズムを考察し、成長モデルの提案と形成条件の最適化を行った。

第 7 章では、成長機構に関する基礎的検討結果を踏まえ、GaAs (001) 面および(111)B 面加工基板上にヘキサゴナル量子ナノ細線を作製し、構造的および光学的評価を行った。(001)面上で節点密度 $3.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、(111)B 面上で節点密度 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ のヘキサゴナル細線ネットワークの作製に成功した。両ネットワークにおいて、各方向に滑らかに接続した細線構造が (表面ラフネス 2nm 以下)、高均一に形成されていることを明らかにするとともに、量子集積回路応用への有用性を示した。

第 8 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、GaAs 加工基板上への MBE 選択成長法を用いて、ヘキサゴナル GaAs/AlGaAs 量子細線ネットワークを作製し、詳細な実験と計算機シミュレーションより成長メカニズムを明らかにするとともに、量子集積回路の基本構造の設計方針を検討したものであり、ここで得られた量子細線構造の物性評価と制御に関する新しい知見は、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者と認める。