

学位論文題名

Fabrication and characterization of
III-V semiconductor nanowires based on
selective-area metal-organic vapor-phase epitaxy

(有機金属気相選択成長法による

III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成とその評価)

学位論文内容の要旨

近年、ナノテクノロジーという言葉に代表されるように、原子の尺度であるナノメートルの寸法を持つ構造が、その材料から応用に至るまで注目を集めている。その一例として、数十 nm の直径を有する半導体ナノワイヤは、半導体低次元構造という物理面での興味とともに、そのサイズの微小さ故にデバイス応用に対して低消費電力・超高密度集積の可能性を秘めており、将来のエレクトロニクス・情報通信技術を支える材料として期待されている。特に応用面において、半導体低次元構造としての特徴を生かした単電子トランジスタ、半導体ナノワイヤを FET のチャンネルに用い、ゲートがチャンネルを全方位から覆うサラウンディングゲート FET としての応用が期待されている。このサラウンディングゲート FET では、従来のプレーナ型 FET に比較し、高い相互コンダクタンス、ショートチャンネル効果の抑制、急峻なサブスレシヨルドスロープ、更に高 on/off 電流比が得られる優れた特性を示すと期待されている。

これらのデバイス応用では、個々のデバイスが扱う電荷量が極端に小さくなるため、或いは動作原理に基づいて高品質の結晶、半導体構造に対する工夫が必要となる。とりわけ単電子トランジスタでは、電極と結合したドットが必要となるが、ドットを形成するトンネル障壁の厚さ・高さ・間隔の正確な制御が不可欠となる。これまでに幾つかの作製手法が報告されているが、多くの場合この制御が困難なため、特性の均一化、動作温度の高温化が難しく、集積化はほとんど行われていない。これに対し、純粋な気相成長に基づいた半導体ナノワイヤ形成手法では、原子層オーダーの膜厚制御、成長条件に依存した選択的な結晶成長面が現れることを利用し、微小なサイズを有する半導体ナノワイヤに対し、組成・膜厚制御された半導体異種接合の形成が可能である。これにより、半導体細線に結合した良く制御されたドットが形成される。

III-V 族化合物半導体は、一般にシリコンと比較して小さな電子有効質量を持つため、トランジスタの性能を決定する因子の一つである移動度が大きく、量子効果が顕在化する。また、形成可能な異種接合が豊富である。このような特徴を生かし、近年、シリコン上に III-V 族化合物半導体を形成し、トランジスタへ応用することで、その性能を向上させるという試みが再び脚光を浴びている。このような背景のもと、本研究では、有機金属気相選択成長法を用い III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成技術を確立するとともに、ナノワイヤの成長機構・電気特性といった基礎特性を克明に

調べ、FET を基本とするデバイス応用の可能性を探ることを目的としている。

これまでのところ、半導体ナノワイヤは、触媒金属微粒子を半導体基板上に準備し結晶成長を行うことで形成されてきた。形成される半導体ナノワイヤの位置・サイズは、触媒に依存しており、この制御が困難であること、更に触媒に残留する原料により急峻な結晶界面の制御が困難であるといった問題が指摘されてきた。一方、本研究では、有機金属気相選択成長法を用いて半導体ナノワイヤの形成を行う。有機金属気相選択成長は、リソグラフィーを用いるためナノワイヤの位置・サイズ制御性が良いこと、触媒を用いない純粋な気相エピタキシャル成長であるため、急峻な結晶界面制御が期待できるなど、単電子トランジスタ/サラウンディングゲート FET といったデバイス作製に向けた優れた特徴を数多く有する。

本論文は、七章から構成されている。以下にその詳細を記す。

第一章においては、序論として本研究の歴史的背景と半導体ナノワイヤ、有機金属気相選択成長法等について説明し、その後本研究の目的と各章の概要について記す。

第二章では、有機金属気相選択成長法を用いた III-V 族化合物半導体ナノワイヤの作製手順、有機金属気相選択成長法に関して、その原理、形成ファセット等について記述する。

第三章では、有機金属気相選択成長法を用いた GaAs ナノワイヤの形成と、成長特性の評価について記している。GaAs ナノワイヤの膜厚制御に関するデータの蓄積および成長条件を変化させることで、半導体ナノワイヤの横方向、縦方向の独立な成長制御について、実験・考察を行っている。

第四章では、異種半導体接合を用いた半導体ナノワイヤの表面不活性化について記している。従来の半導体ナノワイヤは、表面が“むき出し”であり、かつその直径の微細さからナノワイヤの絶縁化が指摘され、化合物半導体ナノワイヤのデバイス応用は困難であると考えられてきた。GaAs ナノワイヤを AlGaAs で包み込む直径方向へのヘテロ (コア/シェル) 構造は、表面準位によるナノワイヤの絶縁化を抑制する表面パッシベーションの最も有力な手段と考えられる。そこで、第三章に記した、ナノワイヤの縦/横の成長制御を用いることで、コア/シェル構造の形成を行った。この構造に対しフォトルミネッセンスによる光学評価を行ったところ、コアシェル構造において GaAs ナノワイヤの 20 倍程度の発光強度が確認され、ほぼバルク GaAs 基板と同程度の発光強度が得られた。この結果からコアシェル構造による表面パッシベーションの効果が確認された。

第五章では、有機金属気相選択成長法により作製した InGaAs ナノワイヤの電氣的評価について記している。ナノワイヤを成長基板から分離し、Si/SiO₂ 基板上へ散布した後、単一のナノワイヤに対し動径方向ゲート被服率約 80% のサラウンディングゲートナノワイヤ FET 構造を作製した。InGaAs ナノワイヤに対しては、金属/半導体 (MES) 構造 FET を作製し、ナノワイヤの導電形、キャリア密度、および移動度の見積もりを行った。現状では、サラウンディングゲート FET としての優位性は確認できていない。これに対する原因とその対処法について考察している。

第六章では、有機金属気相選択成長法により作製した InAs ナノワイヤの電氣的評価について記している。InAs ナノワイヤに対しては、ゲートリークの抑制のため金属/絶縁体/半導体 (MIS) 構造を用い FET 動作の確認を行った。室温動作に加え極低温評価を行い、InAs ナノワイヤの基本物性、低次元半導体としての評価を試みている。その結果、低温測定において、ゲート電圧を負に印加するに伴い、チャンネルコンダクタンスが一次元伝導に起因するステップから、ドットを介する伝導に起因するピークへと変化する様子が確認された。このドット形成の原因は明らかとなっていないが、説明可能なモデルについて考察している。

第七章では、以上のことをまとめて結論を出し、将来の展望を述べている。

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 本 久 順 一
副 査 准教授 原 真二郎

学 位 論 文 題 名

Fabrication and characterization of III-V semiconductor nanowires based on selective-area metal-organic vapor-phase epitaxy

(有機金属気相選択成長法による

III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成とその評価)

近年、ナノテクノロジーという言葉に代表されるように、原子の尺度であるナノメートルの寸法を持つ構造が、その材料から応用に至るまで注目を集めている。その一例として、数十 nm の直径を有する半導体ナノワイヤは、半導体低次元構造という物理面での興味とともに、そのサイズの微小さ故にデバイス応用に対して低消費電力・超高密度集積の可能性を秘めており、将来のエレクトロニクス・情報通信技術を支える材料として期待されている。

III-V 族化合物半導体は、一般にシリコンと比較して小さな電子有効質量を持つため、トランジスタの性能を決定する因子の一つである移動度が大きく、量子効果が顕在化する。このような特徴を生かし、近年、シリコン上に III-V 族化合物半導体を形成し、トランジスタへ応用することで、その性能を向上させるという試みが再び脚光を浴びている。

このような背景のもと、本研究では、有機金属気相選択成長法を用い III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成技術を確立するとともに、ナノワイヤの成長機構・電気特性といった基礎特性を克明に調べ、FET を基本とするデバイス応用の可能性を探ることを目的としている。

本論文は、七章から構成されている。

第一章においては、序論として本研究の歴史的背景と半導体ナノワイヤ、有機金属気相選択成長法等について説明し、その後本研究の目的と各章の概要について記している。

第二章では、有機金属気相選択成長法を用いた III-V 族化合物半導体ナノワイヤの作製手順、有機金属気相選択成長法に関して、その原理、形成ファセット等について記述している。

第三章では、有機金属気相選択成長法を用いた GaAs ナノワイヤの形成と、成長特性の評価について記している。GaAs ナノワイヤの膜厚制御に関するデータの蓄積および成長条件を変化させることで、半導体ナノワイヤの横方向、縦方向の独立な成長制御について、実験・考察を行っている。

第四章では、異種半導体接合を用いた半導体ナノワイヤの表面不活性化について記している。従来の半導体ナノワイヤは、表面が“むき出し”であり、かつその直径の微細さからナノワイヤの絶縁化が指摘され、化合物半導体ナノワイヤのデバイス応用は困難であると考えられてきた。GaAs ナノワイヤを AlGaAs で包み込む直径方向へのヘテロ (コア/シェル) 構造は、表面準位によるナノワイヤの絶縁化を抑制する表面パッシベーションの最も有力な手段と考えられる。そこで、第三章に記した、ナノワイヤの縦/横の成長制御を用いることで、コア/シェル構造の形成を行った。この構造に対しフォトルミネッセンスによる光学評価を行ったところ、コアシェル構造において GaAs ナノワイヤの 20 倍程度の発光強度が確認され、ほぼバルク GaAs 基板と同程度の発光強度が得られた。この結果からコアシェル構造による表面パッシベーションの効果が確認されている。

第五章では、有機金属気相選択成長法により作製した InGaAs ナノワイヤの電気的評価について記している。ナノワイヤを成長基板から分離し、Si/SiO₂ 基板上へ散布した後、単一のナノワイヤに対し動径方向ゲート被服率約 80

第六章では、有機金属気相選択成長法により作製した InAs ナノワイヤの電気的評価について記している。InAs ナノワイヤに対しては、ゲートリーク抑制のため金属/絶縁体/半導体 (MIS) 構造を用い FET 動作の確認を行った。室温動作に加え極低温評価を行い、InAs ナノワイヤの基本物性、低次元半導体としての評価を試みている。その結果、低温測定において、ゲート電圧を負に印加するに伴い、チャンネルコンダクタンスが次元伝導に起因するステップから、ドットを介する伝導に起因するピークへと変化する様子が確認されている。

第七章では、以上のことをまとめて結論を出し、将来の展望を述べている。

これを要するに著者は、III-V 族化合物半導体ナノワイヤにおいて有機金属気相成長を用いた新しい作製方法を確立し、その基本的物性の解明、半導体ナノワイヤを用いたデバイス応用に対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、電子工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。