

学 位 論 文 題 名

III-V compound semiconductor nanowires and
their electron device application

(III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成と電子デバイス応用)

学位論文内容の要旨

今日の高度情報化社会を支えている技術は Si を主とする半導体集積回路技術であり、ムーアの法則に従いトップダウン技術である微細加工によって高密度集積化が実現されてきた。しかし、近年ナノテクノロジーという言葉が頻繁に用いられるように微細化技術はナノメートルオーダーに達し、一方でトップダウン技術の限界に直面しつつある。構造の微細化に伴い構造中のダメージ等の問題が軽視できないことが指摘されており、従来のトップダウン技術に変わる新しい解決法が要求されている。また、材料として Si を用いた場合には Si 固有の物性がデバイスの機能を制限してしまい、電子デバイスの高速化や光学素子を考えた場合、最良の材料とは言い難い。そこで、電子・光学物性に優れた化合物半導体などの新しい材料やデバイスの構造自体も検討する必要があると考えられている。現在、トップダウン技術とは異なるアプローチで注目を浴びているのが、ボトムアップ的な手法によるナノメートルオーダーの微細構造の作製である。特にボトムアップ手法において一次元細線構造であるナノワイヤは国際半導体技術ロードマップにおいて、非常に有望な材料系であると高く評価されている。しかしながら、現在、主流となっているナノワイヤの作製は気相-液相-固相 (Vapor-Liquid-Solid) 法は、位置と成長方向の制御と CMOS 回路への金属触媒の影響が大きな課題となっている。

この課題に対し、本研究では有機金属気相選択成長 (Selective-area Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : SA-MOVPE) 法と呼ばれる手法を用いてナノワイヤの作製を行うことで解決を試みた。SA-MOVPE 法は、Si や GaAs といった半導体基板の (111) 面を用い、SiO₂ 等の非晶質薄膜を堆積後、リソグラフィとエッチングにより数十ナノメートルの微小な周期的な開口部を設け、MOVPE 法により原料を供給することで、その開口部にのみ選択的に結晶成長を行うという、トップダウン技術とボトムアップ技術を融合した技術である。VLS 法とは異なり触媒を必要としない手法であるため結晶の品質が期待でき、リソグラフィを用いて作製するためナノワイヤの位置及びサイズの制御が容易であるため、デバイス応用や集積化の観点からも非常に有望な作製法であると言える。成長方向の制御は (111) 面 (縦方向) と $\{-110\}$ 面 (横方向) の成長特性の対称性を利用することで行われる。本研究では SA-MOVPE 法を用いて集積可能なナノワイヤデバイスの実現を目指すとともに、様々なデバイス応用への道を探る。ナノワイヤにおけるヘテロ構造は、縦 (軸) 方向及び横 (動径) 方向それぞれ独立して形成が可能であり、一連の成長で単電子デバイスを作製しつつ表面パッシベーションを行うことなど、薄膜成長では不可能だった三次元的な成長が可能であるため様々な

優れたデバイス構造の作製が可能である。また、ナノワイヤは成長面を数十ナノメートルと微小領域に制限するため面内二軸方向の歪みの影響が少なくなり、GaAs 基板等の III-V 族基板だけでなく安価な Si 上への InAs ナノワイヤと言った格子不整合系において良好なヘテロ構造ナノワイヤの作製を行うことが出来るという優れた特徴も有している。本論文では、SA-MOVPE 法を用いたナノワイヤの成長メカニズムを明らかにするとともに、縦横独立の成長方向制御を行うことでナノワイヤを用いた新デバイス構造の提案と作製技術の確立を行った。

本論文は第一章から第六章までで構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第一章は、本研究の背景と目的について記すと共に各章の概要を説明している。

第二章では、半導体ナノワイヤの作製手法である有機金属気相選択成長法の基本的な手順及び面方位による成長特性の違いを述べ、構造作製に用いた装置の説明に関して記している。

第三章では GaAs の有機金属気相選択成長に焦点を当て、ナノワイヤの成長メカニズムに関して議論している。成長面である (111)B 面は成長条件により成長が促進される面方位が異なり、低温・高 V/III 比において「ナノワイヤ」成長が起こり、高温・低 V/III 比においては「四面体構造」の成長が起こる。GaAs(111)B 面上に生じる表面再構成と成長条件が密接に関係し、これがナノワイヤの成長モードを決定づけていることが明らかになった。これによりナノワイヤ中に生じる積層欠陥が起こることによりナノワイヤ形状で成長することが明らかになった。

第四章では有機金属気相選択成長を用いた InGaAs ナノワイヤの作製及び、顕微フオルミネッセンスによる組成評価、電気特性評価に関して述べている。InGaAs ナノワイヤは直径が小さくピッチが広いほど成長速度が増加することを確認した。更に、In と Ga の原料供給比を変化させ成長速度依存性の解析を行うことで、In と Ga の拡散長の違いによる InGaAs ナノワイヤ成長モデルの提案を行った。ナノワイヤの成長は成長時間と共に成長速度が増加していくが、ある高さになると高さ方向の成長速度が飽和して一定となり、横方向成長が起こり始める。この高さはナノワイヤ側面である {-110} 面における Ga の拡散長と同程度であると考えられる。また、In と Ga の拡散長の違いを利用し、ピッチを変化させることで一度の成長においても異なる組成を有する InGaAs ナノワイヤの作製に成功した。更に、このナノワイヤを用いた MESFET の作製技術の確立を行い良好な FET 特性を得ることに成功した。

第五章では、第四章で作製を行った InGaAs ナノワイヤ FET の性能を改善するために、InAs チューブチャネル構造の提案を行った。InAs チューブチャネル構造は InP ナノワイヤを成長後、側面に InAs 層の薄膜 (~10nm) を成長させたコアシェル構造である。この構造はナノワイヤの特徴の一つである格子不整合系においても成長面が微小であるために容易に歪が緩和され良好なヘテロ接合が出来るという点を利用している。この構造に対し、シミュレーションによる電気伝導特性評価を行ったところ、サブスレッショルドスロープの低減及び、on/off 比の改善が出来ることを確認した。そこで、実際に InP/InAs コアシェルナノワイヤの成長条件の最適化を行い、形成された構造に対して MISFET の作製及び電気特性の評価を行った。

第六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 本 久 順 一

副 査 教 授 佐 野 栄 一

副 査 准教授 原 真二郎

学 位 論 文 題 名

III-V compound semiconductor nanowires and their electron device application

(III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成と電子デバイス応用)

近年ナノテクノロジーという言葉が頻繁に用いられるように半導体の微細化技術はナノメートルオーダーに達し、一方でトップダウン技術の限界に直面しつつあり、従来のトップダウン技術に変わる新しい解決法が要求されている。そこで、電子・光学物性に優れた化合物半導体などの新しい材料や、デバイスの構造自体も検討する必要があると考えられている。特にボトムアップ手法において一次元細線構造である半導体ナノワイヤは国際半導体技術ロードマップにおいて、非常に有望な材料系であると高く評価されている。

本研究では有機金属気相選択成長 (Selective-area Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : SA-MOVPE) 法と呼ばれる手法を用いてナノワイヤの作製を行うことでこの問題の解決を試みている。SA-MOVPE 法は、Si や GaAs といった半導体基板の (111) 面を用い、SiO₂ 等の非晶質薄膜を堆積後、リソグラフィとエッチングにより数十ナノメートルの微小な周期的な開口部を設け、MOVPE 法により原料を供給することで、その開口部のみ選択的に結晶成長を行うという、トップダウン技術とボトムアップ技術を融合した技術である。

本論文では、SA-MOVPE 法を用いたナノワイヤの成長メカニズムを明らかにするとともに、縦横独立の成長方向制御を行うことでナノワイヤを用いた新デバイス構造の提案と作製技術の確立を行っている。

InGaAs ナノワイヤの作製及び、顕微フォトルミネッセンスによる組成評価、電気特性評価に関しては、InGaAs ナノワイヤは直径が小さくピッチが広いほど成長速度が増加することを確認している。更に、In と Ga の原料供給比を変化させ成長速度依存性の解析を行うことで、In と Ga の拡散長の違いによる InGaAs ナノワイヤ成長モデルの提案している。

また、InGaAs ナノワイヤ FET の性能を改善するために、InAs チューブチャネル構造の提案している。この構造に対し、シミュレーションによる電気伝導特性評価を行ったところ、サブスレッショルドスロープの低減及び、on/off 比の改善が出来ることが確認された。そこで、実際に InP/InAs コアシェルナノワイヤの成長条件の最適化を行い、形成された構造に対して MISFET の

作製及び電気特性の評価を行っている。

これを要するに、著者は、III-V 族化合物半導体ナノワイヤの形成と電子デバイス応用に関する新知見を得たものであり、半導体工学発展に対して寄与するところ大なるものがある。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。