

Compound Semiconductor Heterostructure Transistors Using Nanowire Channels

(ナノ細線チャネルを有する化合物半導体ヘテロ接合トランジスタ)

学位論文内容の要旨

半導体電子デバイスは論理集積回路、高周波デバイス、電力変換デバイスなど多岐に渡り利用されエレクトロニクス発展を牽引してきた。従来、これらの半導体デバイス材料には Si が用いられ、主としてデバイスの微細化により高性能化が進められてきた。しかし近年、社会の高度情報化が進むにつれ半導体デバイスへのさらなる高性能化への要求が高まり、微細化にともなう漏れ電流の増大、ショートチャネル効果の発現など各種問題が表出してきた。その一方で、GaAs をはじめとする化合物半導体は、Si と比べて高い電子速度、広いバンドギャップなど非常に優れた材料物性を有しており、既に高周波デバイスなど一部の用途においては実用化がなされている。さらに、その優れた材料物性を生かし集積回路や電力変換デバイスなどへの応用も進められている。

微細化技術の進展によりデバイスの基本寸法がナノメートル領域に達すると、半導体デバイス中の電子輸送を支配する物理は古典力学から量子力学へ移行する。しかし、古典的デバイスにおいて量子力学はトンネル現象によるゲートリークなど様々な問題を引き起こす。従って、量子力学に準ずる動作を実現する量子デバイスを、次世代の集積回路を担うデバイスとして研究を進める必要がある。量子デバイスは微細であり、超低消費電力スイッチングなど種々の利点を有するため、高集積論理回路への応用に有効である。GaAs 系材料は、有効質量が小さく高い移動度を持ち、高い結晶成長技術を持つことから量子構造の形成に適しており、優れた量子デバイスの実現に有望である。

AlGaIn/GaN ヘテロ接合は、分極により非常に高い電子密度を有する 2 次元電子ガスを形成でき、その値は AlGaAs/GaAs ヘテロ接合を用いた場合より一桁近く大きい。また、絶縁破壊電圧も Si や GaAs より 10 倍程度高く、高い飽和電子速度を持つ。これらの特長により、超高効率電力変換デバイスや超高速デバイスの実現が期待できる。しかしながら、現在までに報告されている AlGaIn/GaN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)は、物性定数から予測される特性に到達していない。結晶成長技術やプロセス技術が未成熟であることが原因として考えられるが、特に、伝導チャネル中における電界分布が不均一であることから、十分な電界が印加されるに至らず性能が最大限まで引き出されていないことが挙げられる。本質的な材料ポテンシャルをデバイス特性に反映させるためには、ゲート制御性が良く均一な電界制御が可能なデバイス構造が必要となる。

このような背景のもと、本論文は、化合物半導体材料デバイスに関して基礎的検討を行った。GaAs 系トランジスタでは、量子効果を利用した新たな機能をもつ集積回路の実現を目的とし、選択成長技術によるナノ細線チャネルの検討、およびナノ細線チャネルを有する電子輸送デバイスの実験的および理論的な解析を行った。また、GaN 系トラ

ンジスタでは高速・高耐圧・高温動作特性の向上を目指し、ナノ細線チャネル構造を用いることにより AlGa_N/Ga_N HEMT のチャネル中における電界分布の均一性向上を図るとともに、電界分布の解析および電流輸送特性、温度依存性を評価した。

本論文は 6 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、半導体デバイスの現状として、ショートチャネル効果など現在の Si デバイスが抱えている問題点について述べた。Si と GaAs、Ga_N の材料物性を比較・検討することにより、集積回路・無線通信など各種用途への応用における化合物半導体の優位性について説明し、将来のエレクトロニクスにおける化合物半導体の重要性を示した。

第 3 章では、化合物半導体ヘテロ接合トランジスタの基本動作原理を概説した。まず、古典的な電流輸送特性を示した。次に、量子効果を説明する上で必要な各種定数、量子構造について記し、量子輸送特性を説明した。最大発振周波数や電流利得遮断周波数などトランジスタの高周波特性を示す値について説明し、デバイスの高周波化への指針を記述した。

第 4 章では、まず、分子線エピタキシー(MBE)法による AlGaAs/GaAs ナノ細線ネットワークの選択成長手法について記述した。集積度の高い六角形型のネットワークを構成するため、 $\langle -110 \rangle$ 方向および $\langle 510 \rangle$ 方向のナノ細線チャネルを形成し、その幅や位置を成長条件により正確に制御できることを実験結果および理論計算から示した。この MBE 選択成長法により形成したナノ細線チャネルを用いて量子細線トランジスタを作製し、低温において明瞭な量子化コンダクタンスが観測された。さらに、デバイス間の特性のばらつきが小さいことを確認し、均一なナノ細線チャネルが形成されていることを示した。 $\langle -110 \rangle$ 方向および $\langle 510 \rangle$ 方向のナノ細線を組み合わせた Y 字型のデバイスを作製し、明確にパススイッチング動作することを確認した。作製したデバイスの電力遅延時間積を見積り、非常に小さい消費電力で動作可能となり、MBE 選択成長ナノ細線ネットワークを適用した量子集積回路の有効性を示した。

第 5 章では、AlGa_N/Ga_N HEMT のチャネル内における電界分布の均一性向上を図るため、多重台形チャネル型(MMC)構造を提案した。ゲート直下に周期的にトレンチを配することによりナノ細線チャネルが並列に接続し、各チャネルをゲート電極が包囲した構造となる。作製したデバイスは、個々のチャネルの幅が 60 nm であり、全体のゲート幅 60 μm 中に 150 周期分含まれている。個々のチャネル幅の和をとった実効的なゲート幅は 9 μm となる。2 次元ポテンシャル計算によりナノ細線チャネル断面におけるポテンシャル分布を調べ、ナノ細線構造ではゲート電極からの電界がチャネルを包み込むように制御していることを確認した。MMC AlGa_N/Ga_N HEMT は、一般的な平面型の HEMT と比べしきい値電圧が浅くなる結果が得られた。また、120K から 500K までの広い温度領域において、飽和ドレイン電流がほとんど温度依存性を見せない極めて特徴的な特性が得られることを示した。

第 6 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 佐 野 栄 一
副 査 准教授 葛 西 誠 也

学 位 論 文 題 名

Compound Semiconductor Heterostructure Transistors Using Nanowire Channels

(ナノ細線チャネルを有する化合物半導体ヘテロ接合トランジスタ)

従来の半導体デバイス・集積回路には主として Si 材料が用いられ、デバイスの微細化をベースとする高性能化が進められてきた。しかし近年の高度情報化の驚異的進行により、半導体デバイスへのさらなる高性能化への要求が高まり、Si エレクトロニクスには微細化にともなう漏れ電流の増大、ショートチャネル効果の発現などの限界が見え始めている。ガリウム砒素 (GaAs) や窒化ガリウム (GaN) などの化合物半導体は、Si と比べて高い電子速度、広いバンドギャップなど非常に優れた材料物性を有しており、既に高周波デバイスなど一部の用途においては実用化がなされている。さらに、その優れた材料物性を活かした集積回路や電力変換デバイスなどへの応用も進められており、Si の材料限界を打破する次世代デバイス・集積回路の有力候補である。

次世代エレクトロニクスへの切り口として、これまでの半導体中の古典力学的電子輸送を利用したデバイスを超える、新概念・新動作原理に基づくデバイス構造の研究が考えられている。量子力学的動作に基づいた量子効果デバイスはその 1 つの候補であり、超高集積度、超低消費電力スイッチング動作などの利点を有する。GaAs 系材料は、有効質量が小さく高い移動度を持ち、高い結晶成長技術を持つことから量子構造の形成に適しており、優れた量子デバイスの実現に有望である。窒化物半導体をベースとするヘテロ接合は、分極効果により非常に高い電子密度を有する 2 次元電子ガス層を形成でき、また、絶縁破壊電界も Si や GaAs より 10 倍程度高く、高い飽和電子速度を持つ。これらの特長により、超高効率電力変換デバイスや超高速パワーデバイスの実現が期待できる。しかしながら、現在までに報告されている高電子移動度トランジスタ (HEMT) では、その優れた物性定数から予測される特性に到達していない。伝導チャネル中における電界分布が不均一であることから、十分な電界が印加されるに至らず性能が最大限まで引き出されていないことが原因の 1 つと考えられている。

このような背景のもと、本論文では、化合物半導体材料を利用した次世代デバイスに関して基礎的検討を行っている。第一に、GaAs 系ナノ細線チャネルを有するトランジスタの電子輸送特性

を詳細に解析し、量子効果を利用した新たな機能をもつ集積回路応用の可能性を検討している。次に、ナノ細線チャネル構造を持つ GaN 系トランジスタを作製し、電界分布および電流輸送特性を解析して、これまでの半導体デバイスでは実現できなかった新しい動作特性の実現を試みている。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の歴史的背景と目的を述べている。

第 2 章では、現在の Si デバイスが抱えている問題点をまとめるとともに、Si と GaAs、GaN の材料物性を比較・検討することにより、集積回路・無線通信など各種用途への応用における化合物半導体の優位性について記述している。

第 3 章では、化合物半導体ヘテロ接合トランジスタの基本動作原理を概説している。まず、古典的な電流輸送特性を示し、デバイスの高周波化・高電力化への指針を記述している。次に、量子効果を利用したデバイス構造・量子輸送特性を説明している。

第 4 章では、まず、分子線エピタキシー (MBE) 法による AlGaAs/GaAs ナノ細線ネットワークの選択成長手法について記述している。[-110] 方向および [510] 方向のナノ細線チャネルを形成し、その幅や位置を成長条件により正確に制御することにより、高集積度の六角形型の細線ネットワークを実現している。この MBE 選択成長法により形成したナノ細線チャネルを用いて量子細線トランジスタを作製し、低温において明瞭な量子化コンダクタンスを観測した。さらに、Y 字型デバイスのパススイッチング動作を実証し、その電力遅延時間積の評価により超低消費電力動作を確認し、ナノ細線ネットワークを適用した量子集積回路の有効性を示している。

第 5 章では、AlGaIn/GaN HEMT のチャネル内における電界分布の均一性向上を図るため、多重台形チャネル型 (MMC) 構造を提案している。ゲート直下に周期的溝構造を配することにより、チャネル幅が数 10nm 程度のナノ細線チャネルが並列に接続され、各チャネルをゲート電極が包囲した構造としている。2 次元ポテンシャル計算によりナノ細線チャネル断面におけるポテンシャル分布を調べ、ナノ細線構造ではゲート電極からの電界がチャネルを包み込むように制御していることを確認した。この効果により、多重台形チャネル型 AlGaIn/GaN HEMT は、一般的な平面型の HEMT と比べしきい値電圧が浅くなる結果が得られた。また、120K から 500K までの広い温度領域において、飽和ドレイン電流がほとんど温度依存性を示さない極めて特徴的な特性が得られることを見出している。

第 6 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、ナノ細線チャネルを持つ化合物半導体トランジスタを作製し、量子輸送に基づく超低消費電力・高集積度集積回路構築の可能性を示し、また、チャネル電界分布の均一化による新しい電流輸送特性を見出しており、ここで提案しているデバイス構造と得られた電流輸送特性は、次世代半導体デバイス研究に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ある者と認める。