

学 位 論 文 題 名

AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors utilizing
multi-mesa-channel structures(多重台形チャネル構造を利用したAlGa_N/Ga_N高電子移動度トランジスタ)

学位論文内容の要旨

今日、地球環境保全を考慮した省エネルギーの必要性が高まっている。現在国内においては、インバータなどの電力変換システムを通して消費される電力量は、総供給電力量の約 40% に達しており、その割合は今後も増加し続けるものと考えられる。今求められていることは、こうした電力の節減および利用の効率化であり、特に電力利用の高効率化は著しい省エネルギー効果をもたらす。電力の有効利用には、低損失電力変換システム（インバータシステム）の構築が求められる。現行のインバータの中核素子としてはシリコン (Si) トランジスタが使用されているが、Si の物性限界のため、今後の大幅な効率向上は難しい状況である。

Si に置き換わる次世代電力変換デバイスを実現する半導体材料として期待されているのが、窒化ガリウム (Ga_N) である。Ga_N は Si と比較して約 10 倍の絶縁破壊電界を有しており、電力変換時に熱損失となる動作抵抗を 2 桁以上低減することができる。また Ga_N は Si の 3 倍程度の禁制帯幅を持つため、高温状況下でも安定動作する特長を持ち、電力変換システムの冷却系の簡素化、小型軽量化が期待できる。さらに Ga_N と窒化アルミニウムガリウム (AlGa_N) とのヘテロ接合界面において、分極効果により高密度の 2 次元電子ガス層 (2DEG) が形成されることが知られている。この 2DEG 層をチャネル層として利用する AlGa_N/Ga_N 高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) は、高出力、高耐圧、低損失動作が実現可能であり、次世代電力変換デバイスとして盛んに研究がなされている。

しかしながら、電力変換デバイス応用に向けてはいくつかの課題を抱えている。その 1 つが、ノーマリオフ動作である。電力変換デバイスでは、故障時の負荷の安全を確保するため、入力制御信号（ゲート入力）が 0 の時にオフとなるノーマリオフ動作が必須である。しかし、AlGa_N/Ga_N HEMT は分極効果によりヘテロ界面に 2DEG 層が形成されるため、通常、ゲート電圧を印加しない状況であっても電流が流れるノーマリオン動作となる。ノーマリオフ動作の実現には、AlGa_N/Ga_N HEMT の閾値電圧制御が必須である。また、動作信頼性の面では電流コラプスという問題がある。電流コラプスは、オフおよびオン状態で大きなドレイン電圧（ストレス）を印加する場合、その後のスイッチングでドレイン電流が大幅に低下する現象であり、電力変換時の損失増大および動作信頼性の低下に直結する深刻な問題である。このため、Ga_N トランジスタが電力変換デバイスとして広く普及するためには、これらの課題を解決することを含め、信頼性・動作安定性の向上が不可欠である。

このような背景のもと、本研究では、新しい素子構造を導入することにより、課題の解決に取り組んだ。具体的には、新しいチャネル構造として、ゲート電極直下のみに周期的溝構造を形成した多重台形チャネル (MMC: Multi-Mesa-Channel) 構造を提案し、デバイスの作製ならびに基本特性、電流コラプスの評価を行い、MMC HEMT の動作機構を考察した。その結果、通常構造の planar HEMT との特性比較によって、MMC HEMT の優位性を明らかにした。

本論文は 6 章から構成されている。以下に各章の要旨を記す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べるとともに、各章の概要を記している。

第 2 章では、GaN の結晶構造、AlGaIn/GaN ヘテロ構造における自発分極とピエゾ分極、および分極効果に伴う 2DEG 層の発生機構、GaN および AlGaIn/GaN ヘテロ界面における電気伝導特性について記述している。

第 3 章では、AlGaIn/GaN HEMT の基本構造と動作原理について説明し、次に耐圧とオン抵抗の関係について記述している。続いて、基本的なドレイン電流 - 電圧特性を説明し、最後に AlGaIn/GaN HEMT の課題である閾値電圧の制御技術についていくつかの例を紹介した。

第 4 章では、本研究で提案している多重台形チャネル AlGaIn/GaN HEMT の作製と基本 DC 特性の評価結果に関して述べている。MMC HEMT ではチャネル幅が細くなるに従って、閾値電圧が正方向にシフトすることが見いだされ、本構造による閾値電圧の制御が可能であることが明らかとなった。特にチャネル幅 50 nm の MMC HEMT では、閾値電圧が + 0.2 V となり、ノーマリオフ動作を実現した。台形構造における 2 次元ポテンシャル計算を行い、横方向からの電界が効率よくチャネル内のポテンシャルを変化させ、2DEG を囲い込むように制御していることを示し、この効果が閾値電圧シフトの要因であることが明らかになった。またサブスレッショルド特性から MMC 構造におけるゲート制御性の向上を示した。

第 5 章では、MMC HEMT のドレイン電流安定性、電流コラプス耐性について述べている。MMC HEMT の飽和ドレイン電流は、ドレイン電圧の増加に対して優れた安定性を示し、その原因として台形構造側面からの放熱効果が示唆された。また、高温測定の結果、温度上昇に伴う飽和ドレイン電流の減少量が planar HEMT と比較して小さいことが見いだされた。次にオフストレス印加前後の電流電圧特性の比較により、MMC HEMT における電流コラプス現象を評価した。MMC HEMT は planar HEMT と比較して、オフストレス印加後にスイッチングさせた場合のドレイン電流の減少が小さくなることが明らかになった。オフストレス印加に伴うオン抵抗の変化について数値計算を行い、MMC 構造の高インピーダンスチャネル特性が電流コラプスの低減に寄与していることを説明した。

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	教 授	本 久	順 一
副 査	准教授	葛 西	誠 也

学 位 論 文 題 名

AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors utilizing multi-mesa-channel structures

(多重台形チャネル構造を利用したAlGa_N/Ga_N高電子移動度トランジスタ)

インバータと総称される電力変換システムは、情報機器、家電、電気・ハイブリッド車、工場設備など、ほぼ全ての分野に導入されており、省エネルギーのキーテクノロジーとなっている。窒化ガリウム (Ga_N) はシリコン (Si) の 10 倍の絶縁破壊電界を持つことから、インバータに用いるトランジスタのオン抵抗を Si 素子の数百分の 1 にすることが可能である。このため、Si 素子を超える超低損失インバータの実現が期待されている。また、Ga_N と窒化アルミニウムガリウム (AlGa_N) とのヘテロ界面には、自発分極とピエゾ分極によって高密度の 2 次元電子ガス (2DEG: two-dimensional electron gas) が形成されることから、AlGa_N/Ga_N 高移動度トランジスタ (HEMT: high electron mobility transistor) が次世代高効率インバータ用のトランジスタとして活発に研究されている。

しかしながら、電力変換デバイス応用に向けてはいくつかの課題を抱えている。その 1 つがノーマリオフ動作の実現であり、AlGa_N/Ga_N HEMT の閾値電圧制御が必須である。また、動作信頼性の面では電流コラプスという問題がある。電流コラプスは、オフおよびオン状態で大きなドレイン電圧 (ストレス) を印加する場合、その後のスイッチングでドレイン電流が大幅に低下する現象であり、電力変換時の損失増大および動作信頼性の低下に直結する深刻な問題である。これらの課題に対し本研究では、新しいチャネル構造としてゲート電極直下のみに周期的溝構造を形成した多重台形チャネル (MMC : Multi-Mesa-Channel) 構造を提案し、デバイスの作製ならびに基本特性、電流コラプスを詳細に評価し、MMC HEMT の動作機構を考察している。

本論文は 6 章で構成されている。第 1 章は序論である。第 2 章では、Ga_N の結晶構造、AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造における分極効果、およびヘテロ界面における電気伝導特性をまとめている。第 3 章は、AlGa_N/Ga_N HEMT の基本構造と動作原理について説明し、次に耐圧とオン抵抗の関係について記述している。続いて、AlGa_N/Ga_N HEMT の課題である閾値電圧の制御技術についてこれまでの研究例をまとめている。

第 4 章は、本研究で提案している多重台形チャネル AlGa_N/Ga_N HEMT の作製と基本 DC 特性の評価結果を述べている。MMC HEMT ではチャネル幅の減少に従って閾値電圧が正方向にシフトすることが見いだされ、本構造による閾値電圧の制御が可能であることを示した。2 次元ポテンシャル計算を行い、横方向からの電界が効率よくチャネル内のポテンシャルを変化させ、2DEG を囲い込むように制御していることを示し、この効果が閾値電圧シフトの要因であることを明らかに

した。特にチャネル幅 50 nm の MMC HEMT でノーマリオフ動作を実現し、またサブスレッショルド特性から MMC 構造におけるゲート制御性の向上を示している。

第 5 章は、MMC HEMT のドレイン電流安定性、電流コラプス耐性について述べている。MMC HEMT の飽和ドレイン電流は、ドレイン電圧の増加に対して優れた安定性を示し、その原因として台形構造側面からの放熱効果が示唆された。また、高温測定の結果、温度上昇に伴う飽和ドレイン電流の減少量が通常構造の planar HEMT と比較して小さいことが見いだされた。次にオフストレス印加前後の電流電圧特性の比較により、MMC HEMT における電流コラプス現象を評価した。MMC HEMT は planar HEMT と比較して、オフストレス印加後にスイッチングさせた場合のドレイン電流の減少を抑制できることを明らかにした。オフストレス印加に伴うオン抵抗の変化について数値計算を行い、MMC 構造の高インピーダンスチャネル特性が電流コラプスの低減に寄与していることを示している。

第 6 章は本研究の結論をまとめている。

これを要するに、本論文は、新しいチャネル構造としてゲート電極直下のみに周期的溝構造を形成した多重台形チャネル (MMC) 構造を提案し、デバイスの作製ならびに基本特性、電流安定性を詳細に評価しており、ここで得られた基礎的知見は、窒化物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。