

学位論文題名

Effects of surface structures on current stability
of AlGa_N/Ga_N heterojunction transistors(AlGa_N/Ga_N ヘテロ接合トランジスタの電流安定性に与える表面構造の影響)

学位論文内容の要旨

近年、地球温暖化が深刻な問題になっており、これに対して低炭素社会に向けた努力が世界中でなされている。しかしながら、ブラジル、ロシア、インド、中国 (BRICs: Brazil, Russia, India, and China) の国々は経済成長が目覚しく、石油などの一次エネルギー消費量が著しく増大している。このため、エネルギー消費量を抑えるだけでは不十分であり、革新的な省エネルギー技術が求められている。一次エネルギーの約 4 割は電気エネルギーとして生成され、様々な電圧・周波数変換の後に、様々な負荷において消費される。これらの変換には一般的に、シリコン (Si) を用いた電力変換器 (インバーター) が用いられているが、その変換効率は 0.80~0.95 程度であり、Si の物性限界からこれ以上の向上は望めない。一方、窒化ガリウム (Ga_N) は Si の 10 倍の絶縁破壊電界を持つことから、インバーター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 にすることが理論的に可能である。このため、Si インバーターを超える高変換効率の実現が期待されている。またバンドギャップが Si の 3 倍であるため高温動作が可能であり、冷却システムを簡素化したインバーターシステムが構築可能である。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ー用のトランジスタとして活発に研究されている。

しかし、このような優れたポテンシャルを持ちながら、それらを最大限に発揮した AlGa_N/Ga_N HEMT の実用化には至っていない。この理由として一番に挙げられるのが、デバイス動作の信頼性の問題である。Ga_N 系材料は異種基板を用いた結晶成長技術で製造されるため、異種基板との格子不整合によって多くの結晶欠陥が Ga_N 中に形成される。また AlGa_N 表面には高密度の電子捕獲準位 (表面準位) が存在することが示唆され、可逆的なドレイン電流変動の電流コラプス現象や、永続的なデバイス特性劣化の主因となっている可能性が高く、Ga_N 系トランジスタの動作信頼性は確立されていない。

この課題に対し本研究では、まず、デュアルゲート構造を有する AlGa_N/Ga_N HEMT を作製し、オフ状態電圧ストレスを与えた後の電流特性を評価し、電流コラプス機構を考察した。次に、AlGa_N の表面酸化状態と電流変動との相関を調べた。さらに、アルミナ膜による表面不活性化 (パシベーション) および金属-絶縁膜-半導体 (MOS) ゲート構造が、AlGa_N/Ga_N HEMT の電流安定性に与える影響を詳しく評価した。

本論文は 6 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章は序論とし、窒化物半導体の物性的特徴と高効率電力変換による省エネルギーに関して説明し、本研究の目的を述べている。

第 2 章では、AlGa_N/Ga_N HEMT に関して、その結晶構造、分極効果とヘテロ界面での電子蓄積、電子輸送特性、電流-電圧特性をまとめている。

第3章では、GaN系トランジスタで観測された電流変動現象に関してまとめている。まず、オフ状態あるいは大電力動作後にドレイン電流が大幅に減少する「電流コラプス」現象を記述し、これまでに提案されているモデルを説明している。次に、ドレイン電流が永続的に減少する特性劣化の事象とそれを説明するモデルを記述した。最後に、電流コラプスを抑制するために有効である「フィールドプレート構造」を説明している。

第4章では、2つのゲート電極を持つ「デュアルゲート AlGaIn/GaN HEMT」の作製と評価に関して述べている。1つのゲートにオフ状態ストレス電圧を加え、同時にドレイン電圧を加えた状態から、主ゲートの電圧をオン状態にスイッチし、オフ状態ストレス前後のドレイン電流を比較した。スイッチ後のドレイン電流の減少は、オフ状態ストレスを加えるゲートの位置に大きく依存することがわかり、これを説明するモデルを提案した。ドレイン電流減少のオフ状態電圧依存性と数値計算による AlGaIn 表面の電界分布は、提案したモデルにより良く説明できることを明らかにした。その結果、オフ状態では、ゲート電極の両端より AlGaIn 表面にトンネル電子注入が生じ、表面の負帯電がドレイン側およびソース側のアクセス抵抗の増加を引き起こすことにより、ドレイン電流が低下することを明らかにした。

第5章では、AlGaIn 表面の酸化状態、パシベーションおよび MOS ゲート構造が、AlGaIn/GaN HEMT の電流安定性に与える影響を詳しく調べた。まず、酸素プラズマによる AlGaIn 表面の酸化はドレイン電流を著しく低下させるが、酸窒化反応では電流値に変化が無いことがわかった。次に、原子層堆積法によるアルミナ膜による AlGaIn 表面のパシベーションにより、オフ状態ストレス後のドレイン電流コラプスが抑制されることがわかり、パシベーションにより AlGaIn 表面の電子捕獲準位が低減することが示唆された。このパシベーションと MOS ゲート構造の採用により、電流コラプスは著しく抑制され、ゲート漏れ電流の低減と絶縁膜導入による電界集中緩和が主たる要因であることを明らかにした。

第6章では本研究の結論をまとめた。

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

Effects of surface structures on current stability of AlGa_N/Ga_N heterojunction transistors

(AlGa_N/Ga_N ヘテロ接合トランジスタの電流安定性に与える表面構造の影響)

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、インバーター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 にすることが理論的に可能である。このため、Si 素子を超える高変換効率インバーター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) との異種界面には、自発分極とピエゾ分極によって高密度の 2 次元電子層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) は次世代高効率インバーター用のトランジスタとして活発に研究されている。

しかし、このような優れたポテンシャルを持ちながら、それらを最大限に発揮した AlGa_N/Ga_N HEMT の実用化には至っていない。この理由として一番に挙げられるのが、デバイス動作の信頼性の問題である。この課題に対し本研究では、まず、デュアルゲート構造を有する AlGa_N/Ga_N HEMT を作製し、オフ状態電圧ストレスを与えた後の電流特性を評価し電流コラプス機構を考察している。次に、AlGa_N の表面酸化状態と電流変動との相関を調べ、さらに、アルミナ膜による表面不活性化および金属-絶縁膜-半導体 (MOS) ゲート構造が、AlGa_N/Ga_N HEMT の電流安定性に与える影響を詳しく評価している。

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、AlGa_N/Ga_N 構造に関してその基礎物性パラメータをまとめている。

第 3 章は、Ga_N 系トランジスタで観測された電流変動現象に関してまとめている。まず、オフ状態あるいは大電力動作後にドレイン電流が大幅に減少する「電流コラプス」現象を記述し、これまでに提案されているモデルを説明している。次に、ドレイン電流が永続的に減少する特性劣化の事象とそれを説明するモデルを記述し、最後に電流コラプスを抑制するために有効である「フィールドプレート構造」を説明している。

第 4 章は、2 つのゲート電極を持つ「デュアルゲート AlGa_N/Ga_N HEMT」の作製と評価に関して述べている。1 つのゲートにオフ状態電圧を加え、同時にドレイン電圧ストレスを加えた状態から、主ゲートの電圧をオン状態にスイッチし、オフ状態ストレス前後のドレイン電流を比較した。スイッチ後のドレイン電流の減少は、オフ状態ストレスを加えるゲートの位置に大きく依存することを見だし、これを説明するモデルを提案している。すなわち、オフ状態では、ゲート電極の両端より AlGa_N 表面にトンネル電子注入が生じ、表面の負帯電がドレイン側およびソース側のアクセス抵抗の増加を引き起こすことにより、ドレイン電流が低下することを明らかにした。

第 5 章は、AlGa_N 表面の酸化状態、表面不活性化 (パシベーション) および MOS ゲート構造が

AlGaIn/GaN HEMT の電流安定性に与える影響を記述している。まず、酸素プラズマによる AlGaIn 表面の酸化はドレイン電流を著しく低下させるが、亜酸化窒素プラズマを用いた表面酸化では電流値に変化が無いことを示している。次に、原子層堆積アルミナ膜による AlGaIn 表面のパシベーションにより、オフ状態ストレス後のドレイン電流コラプスが抑制されることを示し、パシベーションにより AlGaIn 表面の電子捕獲準位が低減することを明らかにした。さらに、このパシベーションと MOS ゲート構造の採用により、電流コラプスは著しく抑制され、ゲート漏れ電流の低減と絶縁膜導入による電界集中緩和が電流安定化の主たる要因であることを明らかにしている。

第 6 章では本研究の結論がまとめられている。

これを要するに、本論文は、デュアルゲート構造を有する AlGaIn/GaN HEMT の評価より電流コラプス機構モデルを提案し、AlGaIn の表面状態、アルミナ膜による表面不活性化構造および MOS ゲート構造がドレイン電流変動に与える影響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。