

論文の内容の要旨

論文題目 ヘテロ接合電界効果トランジスタの高性能化に関する研究

氏名 安藤 裕二

本論文は GaAs、GaN などの化合物半導体を用いたヘテロ接合 FET (図 1) の電流-電圧特性、ゲート容量、アクセス抵抗などの基本パラメータの定式化を含むデバイス設計手法を構築すると共に、それを適用してヘテロ接合 FET の低雑音化、高出力化を図った研究結果をまとめたものである。

第 1 章では本研究を着手するに至った歴史的背景について述べ、本研究の目的と位置づけについて説明した。

第 2 章ではヘテロ接合 FET の基本動作の理解を目的として、DC および小信号モデルの高精度化を図った研究結果について述べた。まず、シュレディンガー方程式とポアソン方程式のセルフコンシステント計算を AlGaAs/InGaAs 歪系 HEMT に初めて適用し、その電荷制御を解析した。その結果、この系では従来の AlGaAs/GaAs 系 HEMT と比べて伝導帯オフセットを大きくでき、キャリア閉じ込めが改善されるため、相互コンダクタンスや遮断周波数が改善されることを指摘した。次に、セルフコンシステントポテンシャル計算によって得られた電荷制御特性に基づいてヘテロ接合 FET の電流-電圧特性や小信号特性の定式化を行った。本モデルによりピンチオフ近傍での相互コンダクタンスの低下や雑音指数の増大を説明でき、これらの現象がキャリア閉じ込めの低下に起因することを明らかにした。

第 3 章では耐圧を維持しつつ寄生抵抗を低減するためのリセスゲート構造を有するヘテロ接合 FET のアクセス抵抗のモデル化を行った研究結果について述べた。2 次元電子サブバンド形成と

AlGaAs 電子供給層を介したトンネル電流の効果を考慮することにより 2 層伝送線路モデルの高精度化を図った。その結果、AlGaAs/(In)GaAs 系 HEMT では高濃度 GaAs キャップ層の導入により AlGaAs 層を介したトンネル電流が増加してソース抵抗が大幅に低減できることを明らかにした。一方、伝導帯オフセットが大きく InAlAs 電子障壁層を介したトンネル電流の寄与が小さい InAlAs/InGaAs 系 HEMT では同様な効果は小さいことが示された。この系で高濃度キャップ層によるアクセス抵抗低減の効果を得るためには、適切な閾値電圧を維持しつつ InAlAs 層の不純物濃度を増やすためのダブルリセス構造などを適用する必要がある。現在の AlGaAs/GaAs 系マイクロ波 HEMT では高濃度キャップ層と浅いオーミック接合を用いるのが主流となっているが、本研究はこのようなオーミック電極の形成技術に理論的根拠を与えたものである。

第 4 章ではヘテロ接合 FET の雑音モデリング技術に関する研究結果について述べた。本雑音モデリング技術は流体力学的電子輸送モデルとインピーダンスフィールド法を組み合わせたものである。AlGaAs/InGaAs 歪系 HEMT の雑音特性の各種設計パラメータ依存性を調べ、FET の低雑音化のためには(1)ゲート長の短縮、(2)チャンネル層内の電子速度の向上、(3)キャリア閉じ込めの改善、(4)寄生抵抗の低減が重要であることを指摘した。寄生抵抗を無視できるまで低減した真性デバイス（ゲート長 $0.1\mu\text{m}$ ）において予測される雑音指数は 12GHz にて 0.07dB 、 100GHz にて 1.0dB で、この系のデバイスには更なる低雑音化の余地があることを明らかにした。InAlAs/InGaAs 歪系 HEMT（ゲート長 $0.15\mu\text{m}$ ）の小信号、雑音特性のチャンネル移動度依存性を解析し、チャンネル In 組成比を $0.53\sim 0.8$ の範囲で変えて作製したデバイスの測定結果と比較した。各 In 組成における測定結果は対応するチャンネル移動度での計算結果と良好な一致を示し、チャンネル高 In 化による小信号、雑音特性の改善はチャンネル移動度の違いにより説明できた。また、チャンネル移動度の向上は利得の向上だけでなく拡散雑音の増大も生じるため、低雑音、高利得化の観点から InGaAs チャンネル層の組成比には最適値が存在することを見出した。本研究を行った 1990 年代当時、雑音性能における InGaAs 系 HEMT の優位性は既に知られていたが、低雑音が得られる原因の分析は未だ十分に行われておらず、本研究はそうした実験事実にも理論的根拠を与えたものである。

第 5 章では化合物半導体のフルバンドモンテカルロ (FBMC) 電子輸送シミュレーションに関する研究結果について述べた。GaAs の電子輸送特性を解析したところ、従来の解析バンドに基づいたシミュレーションでは再現が難しかった高電界での電子速度の飽和特性や電子イオン化係数の電界依存性の測定結果を良く説明できた。FBMC シミュレーションと 2 次元ポアソンソルバを組み合わせることで、GaAs MESFET の解析に初めて適用した。衝突イオン化に伴うゲート電流のドレイン電圧依存性の計算結果は測定結果と概ね一致したことから、MESFET の耐圧決定要因が衝突イオン化であることを確認した。ウルツ鉱構造 GaN の電子輸送特性を解析した結果、電子速度の格子温度依存性が GaAs と比べて非常に小さく、GaN デバイスでは高温動作が容易になることを示唆する結果を得た。本シミュレーションを AlGaIn/GaN 系 HFET の解析に適用した結果、ゲート長 $0.9\mu\text{m}$ にて 50W/mm を超える出力電力密度が期待されることを見出した。さらに、ゲートを微細化して高耐圧が維持できるため、ゲート長 $0.05\mu\text{m}$ では高出力電力密度 16W/mm と同時に 360GHz の高電流利得遮断周波数が両立でき、このデバイスがミリ波、準ミリ波帯の高出力デバイスとしても有望であることを指摘した。 50W/mm という予測値は本研究を行

った 2000 年初頭に AlGaIn/GaN 系 HFET で確認されていた出力電力密度の 10 倍を超えていたが、デバイスの改良が急速に進んだ現在では本理論が実証される形となった。

第 6 章では AlGaIn/GaN 系高出力 HFET の高性能化を行った研究結果について述べた。矩形ゲート構造のデバイスを作製した結果、ゲート幅 32mm のデバイスのパルスパワー測定 (2GHz) にて飽和出力 113 W (ドレイン電圧 40V) と、GaN 系デバイスで初めて 100W を超える出力を確認した。しかしながら、CW では高出力電力密度が実現できず、ゲート耐圧と電流コラプスのトレードオフが GaN 本来の高電圧、大電流動作を阻害していることが明らかになった。ゲート耐圧と電流コラプスの改善のため、フィールドプレート構造の適用を検討した。フィールドプレート構造ではオフ時にはフィールドプレート下部のチャンネル全体が空乏化されるため、電界集中が緩和してオフ耐圧が向上する。一方、オン時にはフィールドプレート下部のチャンネル中に 2 次元電子が誘起されるため、電流コラプスの抑制も期待される。フィールドプレート構造 HFET を試作した結果、ゲート耐圧と電流コラプスが同時に改善されることを見出し、ゲート幅 1mm の実用的なサイズのデバイスで初めて 10W/mm を超える出力電力密度を実証した。次に、ゲートリセス構造を適用した結果、ゲートリーク電流の 1 桁低減を確認した。動作電圧の増加が図られ、66V 動作にて開発当時世界最高となる 12.0W/mm の出力電力密度を得た。さらに、フィールドプレートによるゲートドレイン容量増加の課題を克服するため、デュアルフィールドプレート構造を提案した。これはフィールドプレート構造にソース接続した第 2 フィールドプレート電極を追加したもので、ゲートドレイン間に発生する電界の一部を遮蔽することで利得向上を図る。その結果、最大安定化利得が約 3dB 向上し、世界最高レベルの出力、利得、効率の総合特性を実証した。AlGaIn/GaN 系 HFET にフィールドプレートを適用し、マイクロ波パワー特性の向上を見出したのは本研究が初めてであった。フィールドプレートの採用により AlGaIn/GaN 系 HFET のマイクロ波パワー特性は飛躍的に進歩し、本研究以降に行われた AlGaIn/GaN 系 HFET の研究ではフィールドプレート構造の適用が主流となった。その意味で、本研究は GaN 電子デバイス研究において先駆的な役割を果たしたと考えている。

第 7 章では本研究で得られた知見をまとめると共に、ヘテロ接合 FET 研究の今後取り組むべき技術課題について述べた。

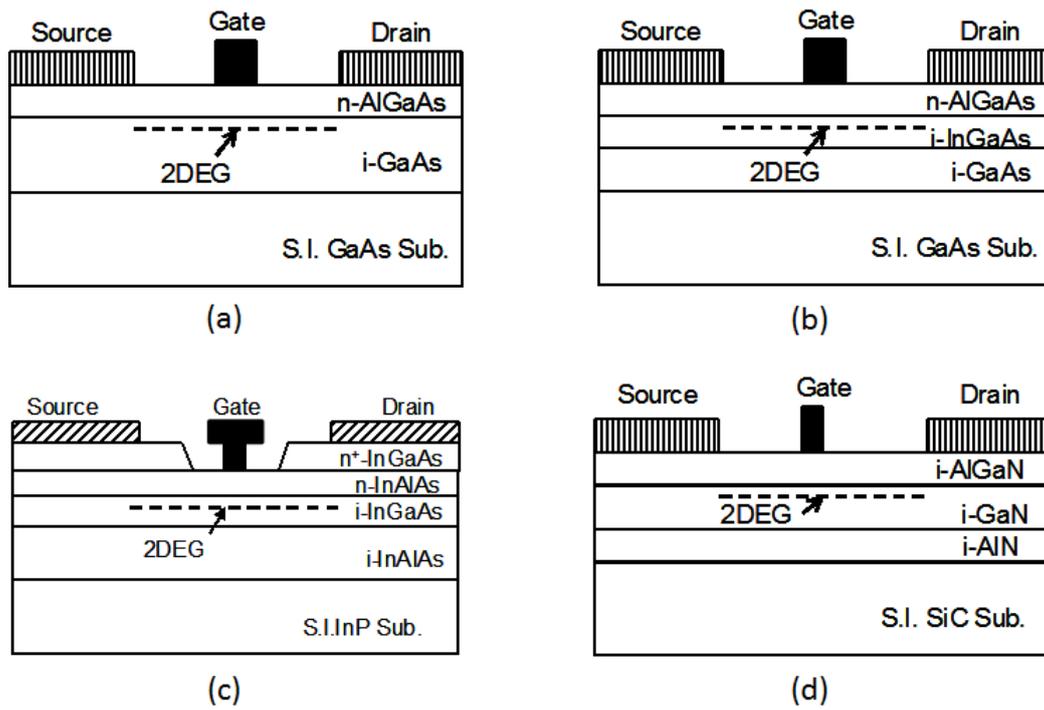


図1 各種のヘテロ接合 FET 構造 : (a)AlGaAs/GaAs 系 HEMT、(b)AlGaAs/InGaAs 歪系 HEMT、(c)InAlAs/InGaAs 系 HEMT、(d)AlGaN/GaN 系 HFET