

(論文内容の要旨)

本論文は、Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体 FET を用いたマイクロ波高出力増幅器の高性能化に関して、高耐圧ヘテロ接合 FET (HJFET) の設計技術を中心に、マイクロ波高出力増幅器の高出力化、高効率化、低歪化、広帯域化のための検討及び新しい回路技術の提案、設計法確立を行い、得られた結果をまとめたものであり、6 章からなっている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景について述べ、化合物半導体 FET の研究開発経緯と、マイクロ波高出力増幅器研究の意義、技術動向、課題を示している。そこでは、無線システムにおける長距離大容量伝送の実現に必要な高出力 FET の高耐圧化、高出力化及び高出力増幅器の高出力化、高効率化、低歪化、広帯域化の課題を述べ、本研究の目的を明確化している。また、本論文で実現したマイクロ波高出力増幅器の高性能化により無線システムの省エネルギー化が図られることを示している。

第 2 章では、高出力増幅器搭載の基本となる高耐圧高出力ヘテロ接合 FET (HJFET) 技術を示している。まず、HJFET の高耐圧化設計とパルス分散抑圧構造設計を示し、ダブルリセス構造 GaAs 系高出力 HJFET 構造を提案している。ダブルリセス構造設計では、耐圧を決定する構造パラメータを解析的に導出し、高濃度 GaAs 層と低濃度 GaAs 層からなるダブルキャップ構造を考案し、高出力 HJFET として最大電流 400mA/mm 以上、耐圧 26V 以上と大幅な電流耐圧相関の向上を示している。さらに表面準位に起因する時定数 1msec 近辺のドレイン電流パルス分散特性に関して、考案したダブルキャップを有するダブルリセス構造高出力 HJFET は、ダブルキャップの低濃度層中に表面空乏層が閉じ込められることでパルス分散を抑制していることを示している。また、高耐圧 FET の新しい構造として提案された GaAs フィールドプレート構造 FET (FPFET) の高電圧動作下での 3 次相互変調歪 (IM3) を解析的に導出し、IM3 が入力側負荷インピーダンス、ゲート容量の非線形性、相互コンダクタンスの非線形性のみで決定されることを示している。

第 3 章では、高出力 HJFET を搭載した X-Ku 帯高出力増幅器の設計技術、特性を示している。増幅器設計では、まず大信号入力状態の能動素子の負荷を考慮した擬似大信号等価回路を提案し、この擬似大信号等価回路を使って設計を行った X-Ku 帯高出力 HJFET 増幅器は、出力 5W 以上で効率 50%以上と、HJFET による高出力増幅器特性としては世界トップレベルの出力効率相関を実証している。また、高調波処理回路を出力回路に導入し、20dB 以上の 2 倍波抑圧量を実証している。準ミリ波帯以上の高出力増幅器設計では、マルチセル構造を分布定数モデルで表現することを提案し、設計精度向上を実現している。さらに、小型広帯域合成回路を考案し、28GHz 帯 4W 級 MMIC 合成増幅器等、世界トップレベルの高出力特性を有する小型高出力 HJFET 増幅器を実現している。超高耐圧 GaAs 系 FPFET に関しては、初めて移動体基地局用増幅器を実現し、出力 230W、最大電力付加効率 42%を確認し、その有用性を実証している。

第4章では、高出力増幅器の低歪化解析及び歪補償技術の研究を進めて、新しい歪補償技術を提案している。まず、位相シフトを決定するデバイス非線形パラメータとの関係をゲートリーク電流の効果も導入した厳密な解析式を導入し、関係を明確化している。得られた結果より、非線形容量を使ったプレディストーション型リニアライザを考案し、X-Ku帯HJFET増幅器及び準ミリ波帯MMICの内部回路に搭載して最大8dBの歪補償を確認している。また、増幅器自ら発生するハーモニクス成分を増幅して使う、アクティブハーモニックフィードバック法を提案し、10dB以上の歪補償を実現している。さらに、増幅器のメモリ効果に関して、デバイスパラメータと基本波及びベースバンドインピーダンスの関係を厳密な解析式を導入して解明している。また、変調信号のエンベロープ成分に同期をかけてゲートバイアスを変調することで増幅器の低歪化と高効率化を狙ったダイナミックバイアス法を提案し、5dBの歪補償と歪規格での効率向上を確認している。

第5章では、高出力増幅器の広帯域化、マルチバンド化技術の研究を進めている。まず、S帯広帯域HJFET増幅器では、外部回路として比帯域10%以上の逆相合成による簡易電力合成回路を考案し、出力90W以上を400MHz帯域で実現して世界最高の出力帯域相関を実証している。また、電力分配合成回路に逆相遅延線路を導入して、2つの周波数の低周波側に関して1/4波長ショートスタブを使うことで高周波側におけるオープン点を作り、2周波数の中間周波数帯にストップバンド帯を形成して電力分配合成を行う、デュアルバンド増幅器を考案している。考案した電力分配合成回路の伝送損失としては、800MHz帯において-0.5dB、2.1GHz帯において-0.8dBを実現すると同時に、中間周波数帯にストップバンドを実現している。本回路を搭載した窒化ガリウム（GaN）高出力増幅器は2.1GHz帯で14dB以上、900MHz帯で10dB以上の利得を実証し、本提案方法が有効であることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、化合物半導体 **FET** の高耐圧化、高出力化を実現し、マイクロ波増幅器の高出力化、高効率化、低歪化、広帯域化のための設計法を確立するという、新しい **FET** および回路技術に関して得られた研究成果をまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

1. 高出力 **FET** 特性とマイクロ波高出力増幅器性能との関係を明確化し、高出力 **FET** の高耐圧化、高出力化およびマイクロ波高出力増幅器の高出力化、高効率化、低歪化、広帯域化により、無線システムで実現しうる省エネルギー化への効果を明確にした。
2. 高耐圧化とパルス分散抑圧を同時に実現する、ダブルキャップ構造を有するダブルリセス高出力 **GaAs** 系ヘテロ接合 **FET** を提案した。また、**GaAs** フィールドプレート構造 **FET** の高電圧動作下での 3 次相互変調歪を解析的に検討し、歪量が入力側負荷インピーダンス、ゲート容量、相互コンダクタンスの非線形性のみで決定されることを示した。
3. 大信号状態の能動素子の負荷を考慮した擬似大信号等価回路を提案し、実現した **X-Ku** 帯高出力 **HJFET** 増幅器は出力 **5W** 以上、効率 **50%** 以上を実証した。さらに、準ミリ波帯ではマルチセル構造を分布定数モデルで表現することを提案し、**Ka** 帯最高出力の小型高出力増幅器を実現した。また、超高耐圧 **GaAs** 系 **FPFET** を初めて移動体基地局に適用し、その有用性を実証した。
4. 歪特性を決める **FET** の位相シフト量と、非線形パラメータとの関係を明確化した。さらに、非線形容量によるプレディストーション型リニアライザを提案し、実証した。また、増幅器自ら発生するハーモニクス成分を増幅して使う、アクティブハーモニックフィードバック法を提案し、有用性を実証した。また、増幅器のメモリ効果に関して、デバイスパラメータとインピーダンスの関係を解明した。さらには、変調信号のエンベロープ成分と同期によるゲートバイアスを変調することで増幅器の低歪化と高効率化を狙ったダイナミックバイアス法を提案し、歪補償と歪規格での効率向上を確認した。
5. 外部回路に比帯域 **10%** 以上の逆相合成による電力合成回路を考案し、**S** 帯 **HJFET** 増幅器特性として出力 **90W** 以上を帯域 **400MHz** で実現した。また、電力合成回路に逆相遅延線路を導入して、2 周波数の中間周波数帯にストップバンド帯を形成させるデュアルバンド増幅器を考案し、**L** 帯 **GaN** 増幅器への適用により有用性を実証した。

以上、本論文は化合物半導体 **FET** の高耐圧化、高出力化、およびマイクロ波高出力増幅器の高出力化、高効率化、低歪化、広帯域化技術を確立し、高出力増幅器の高性能化を大きく発展させたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 5 月 11 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。