

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 01801
研究開発課題名 Beyond5G に資するワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス技術/回路技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

5G における高速・大容量の通信性能、低遅延性、多元接続数を一桁向上する Beyond 5G 機能実現のため、高信頼でありながら、高出力の GaN 高周波デバイスとそれを用いた広帯域・低歪フロントエンド回路設計技術を開発する。GaN 高周波性能と高出力性を最大限に引き出すことで、広帯域無線フロントエンド用デバイスによるテラヘルツ対応の高周波デバイス、広帯域・低歪回路技術の確立を目指す。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

株式会社ブロードバンドタワー<代表研究者>
国立大学法人東海国立大学機構
国立大学法人名古屋工業大学
三菱電機株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 268 百万円 (令和 4 年度 136 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 ワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス技術
研究開発項目 1-a) ミリ波 GaN プロセス技術 (名古屋大学)
研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術 (名古屋大学、名古屋工業大学)
研究開発項目 1-c) ミリ波 GaN 評価技術 (名古屋工業大学)

研究開発項目 2 ワイドバンドギャップ半導体広帯域線形回路技術
研究開発項目 2-a) 高出力高効率パワーセル設計技術 (三菱電機)
研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術 (名古屋大学)
研究開発項目 2-c) 100Gbps 通信方式検討 (三菱電機、ブロードバンドタワー)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	6	6
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	11	9
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	1	1
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：ワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス技術

・研究開発項目 1-a) ミリ波 GaN プロセス技術

本年度は、サーマルリフロー法による 100~150 nm T 型ゲート形成プロセスを改良すると共に、AlGaIn/GaN 系エピ構造設計技術と組み合わせてミリ波 GaN-HEMT のスループロセスを構築した。昨年度開発した二種類のゲート形成プロセス(リフトオフゲート、ミリングゲート)は一長一短があったため、両者の長所を兼ね備えたマイクロフィールドプレート (FP) ゲートを開発。マイクロ FP ゲートは寄生容量小と高歩留りの両立を可能にするもので、特許出願も完了。マイクロ FP ゲート HEMT の初期試作を行い、断面 TEM 観察によりゲート長 120 nm の T 型ゲート形成を確認。さらに、ソースドレイン間距離の最小化を可能にする高濃度 n 型 GaN キャップ層を有するリセス構造 HEMT も検討。現状エピではコンタクト抵抗大となることを確認し、コンタクト抵抗を改善する新規エピ構造を設計済み。

・研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術

本年度は、ミリ波帯・テラヘルツ帯の利得向上を図るデュアルゲート HEMT の開発を進めた。昨年度作製したシングルゲート HEMT の S パラメータの測定結果から抽出した SPICE モデルを拡張することにより、デュアルゲート HEMT のレイアウト設計を実施。新規開発したフォトマスクに上記のミリ波 GaN-HEMT プロセスを用いてデュアルゲート HEMT の初期試作を完了。TEM 分析の結果、ほぼ設計通りのデュアルゲート構造の形成を確認。初期的な評価結果として、デュアルゲート化による短チャネル効果抑制 (gm 向上、gd 低減) と電力利得向上 (fmax : 72→119 GHz) を確認した。

・研究開発項目 1-c) ミリ波 GaN 評価技術

100GHz 以上のミリ波、サブテラヘルツ波用 GaN トランジスタにおいては、微細化によって特に顕著に現れる過渡的な電気的特性、ならびに、微小領域の温度変化が課題になる。

本年度は、マイクロ波領域の過渡特性を評価できるシステムにおいて、トランジスタがオンになっている時間の中での特性変化が評価できるように、直流パルス(トランジスタのオン・オフ)と、高周波特性の測定(マイクロ波信号のオン・オフ)のタイミングを詳細に併せらるような検討を行った。一例としては、80μsec のトランジスタのオンの時間の中で、50μsec のマイクロ波信号のオンを、前半、中央、後半と3ヶ所にセットできるようにした。マイクロ波信号のオンの時間を狭めることも可能であり、ドレイン電流過渡応答(時間変化)に加えて、高周波特性の時間変化の評価が可能となった。

微小領域の温度特性については、局所的な発熱を観察する方法としてサーマルロックイン(パルス状の消費電力下)にて、トランジスタのゲート近傍微小領域の発熱を観察できることを確認した。今年度は評価手法の検討として、市販の GaN トランジスタを用いて、微小のゲート電流を流した状態で評価した。発熱がゲートの部分でスポット状に発生していること、表面温度として観察した発熱がパルスオンに対して遅れを生じていない、つまり、発熱が表面に近いところで生じていることから、ゲートリーク電流が局所的に発生していること、その箇所が発熱として観察できたと考えている。

研究開発項目2：ワイドバンドギャップ半導体広帯域線形回路技術

・研究開発項目 2-a) 高出力高効率パワーセル設計技術

220GHz までの小信号特性測定系(ネットワークアナライザ)において、高精度な測定技術(測定精度±0.2dB)を確立した。

GaN トランジスタ TEG の試作を実施し、トランジスタ TEG の実測の小信号特性を高精度に再現する分布型 GaN トランジスタモデル(モデル化精度±0.5dB)を開発した。

短ゲート化による寄生容量低減の効果などを取り入れることができる仮想モデルや T-CAD モデルを開発し、短ゲート化時の小信号特性を計算で明確化した。

構築した分布型 GaN トランジスタモデルを用いて、ユニットフィンガー幅やフィンガー本数を変化させたときの GaN パワーセルの出力電力密度を計算で明確化した。

- 研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術

(仮想モデルでの 300GHz 帯 PA 性能予測)

100GHz までの測定値をベースとした仮想モデルで、現状より容量成分 50%低減により、利得 7.0dB、帯域幅 18GHz、出力 24.4dBm(0.28W)、が得られることをシミュレーションにより確認 (50um 厚の μ ストリップ線路による整合回路)。

上記回路のベースとなる基本伝送路の検討を推進。TFMS (Thin Film Microstrip Line) 線路が理想的だが、50um 厚の μ ストリップ線路での可能性について検討した。

(試作による回路技術検証)

既存の高 GaN HEMT プロセスを活用し $f_{max}/2$ の 90GHz 帯で、帯域幅 10GHz、出力 29.2dBm を設計しプロセスを進めたが、装置故障のトラブルで試作キャンセル(本年度は設計のみ)。一方、回路技術検証用として、高 f_t 100nm GaAs プロセスでの設計・試作し、試作品の評価検討を推進。⇒ $f_{max}=250\text{GHz}$, $f_t=150\text{GHz}$ の FET (60nm GaN と概ね同 $f_t \cdot f_{max}$) で、上記のカスコード型 PA 設計技術を用いて、80GHz–110GHz 帯単位カスコードアンプの設計・試作・評価を推進し、試作品の実測値でピーク利得 5.5dB(110GHz) が得られたが、10GHz 程度高域側への周波数ずれを生じた。本ずれの主因はファウンダリー提供のトランジスタモデル精度であることを確認、今後の改善策について検討を進めた。

さらに、ゲート長 0.15um・0.25um の汎用の GaNFET プロセスを用いて、利得、 f_{max} を増加させる技術を考案検証した。

- 研究開発項目 2-c) 100Gbps 通信方式検討

Beyond5G 通信における高帯域通信の要求に関してまとめ、想定されるアプリケーションのユースケースを分類し、性能要件について定義した。

IP 通信と無線通信による影響を考慮したシミュレーション環境の構築を行った。無線環境のユースケースに関しては、研究開発項目 2-a, b にて提言している高周波周波数帯のパラメータを活用し、地上ネットワークの通信システムで動作させた際のパフォーマンスに対する影響をシミュレーションし、パラメータの抽出を行った。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1 ワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス技術

本年度は $L_g=50\sim 100\text{nm}$ の微細ゲート電極形成プロセスを開発する。バリア層薄層化と共にキャリア閉じ込めとキャリア濃度を向上した InAlN/GaN 系 HEMT のエピ構造を設計する。微細ゲート GaN-HEMT を作製するためのスループロセスを立案し、 AlGaIn/GaN 系もしくは InAlN/GaN 系エピを用いて微細ゲート GaN-HEMT を作製する。作製した微細ゲート GaN-HEMT から抽出したデバイスモデルに基づいて、デュアルゲート GaN-HEMT を設計する。設計したデュアルゲート GaN-HEMT を上記のミリ波 GaN プロセス技術を用いて作製する。作製したデュアルゲート GaN-HEMT の小信号利得が従来のシングルゲート HEMT と比べて 3dB 以上向上することを実測または実測に基づいたシミュレーションにより確認する。測定結果に基づいて、デュアルゲート GaN-HEMT の SPICE モデルを構築する。

また、本年度は、昨年度に構築したミリ波 GaN-HEMT の直流パルス電源とベクトルネットワークアナライザを同期させたパルス S パラメータ測定系を用いて、種々のサイズを有する微細ゲート AlGaIn/GaN 系 HEMT の評価をおこなう。この結果を、定常状態の S パラメータ測定の結果とデバイスモデルにおいて比較する。微細ゲート AlGaIn/GaN 系 HEMT の増幅器評価を行う。また、R4年度に構築したゲート部の局所的なリーク電流による発熱観察技術を、本研究開発で作製した AlGaIn/GaN 系 HEMT に適用し、局所発熱の有無やその量（数）の評価を行う。 $L_g=50\sim 100\text{nm}$ の微細ゲート電極形成プロセスに適用できるように既存のデバイス作製用マスクパターンの改変も行う。

・研究開発項目 1-a) ミリ波 GaN プロセス技術（4月～3月）

1. $L_g=50\sim 100\text{nm}$ の微細ゲート電極形成プロセスを開発する。
2. バリア層薄層化と共に微細ゲートにてキャリア閉じ込めとキャリア濃度を向上した InAlN/GaN 系 HEMT のエピ構造を設計する。
3. 微細ゲート GaN-HEMT を作製するためのスループロセスを立案し、 AlGaIn/GaN 系もしくは InAlN/GaN 系エピを用いて微細ゲート GaN-HEMT を作製する。

・研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術（4月～3月）

1. 作製した微細ゲート GaN-HEMT から抽出したデバイスモデルに基づいて、デュアルゲート GaN-HEMT を設計する。
2. 設計したデュアルゲート GaN-HEMT を上記のミリ波 GaN プロセス技術を用いて作製する。
3. 作製したデュアルゲート GaN-HEMT の小信号利得が従来のシングルゲート HEMT と比べて 3dB 以上向上することを実測または実測に基づいたシミュレーションにより確認する。測定結果に基づいて、デュアルゲート GaN-HEMT の SPICE モデルを構築する。
4. $L_g=50\sim 100\text{nm}$ の微細ゲート電極形成プロセス用にマスクパターンを改変する。

・研究開発項目 1-c) ミリ波 GaN 評価技術（4月～3月）

1. パルス I-V 特性（直流）と S パラメータとを同期させたパルス S パラメータ測定系を用いて、2022 年度に作製した $L_g\sim 100\text{nm}$ の AlGaIn/GaN HEMT を評価する。1 の結果を用いたデバイスの等価回路モデルを作製し、その結果と定常バイアス状態の S パラメータによるモデルとを比較する。
2. $L_g\sim 100\text{nm}$ の AlGaIn/GaN HEMT の高周波増幅器評価を準ミリ波帯でおこない、直流特性、S パラメータ特性から予想される特性との比較を行う。

3. 局所リーク電流による発熱観察技術を、本研究開発で作製した AlGaIn/GaN 系 HEMT (Lg~100nm) に適用し、局所発熱の有無やその量 (数) の評価を行う。

研究開発項目 2 ワイドバンドギャップ半導体広帯域線形回路技術

広帯域線形フロントエンド回路の基盤技術開発を行い、現状帯域の 2 倍以上の比帯域、隣接チャネル漏洩電力<-25.7dB 以下のパワーアンプを試作により実証する。メモリー効果によって変調波の線形性に悪影響を与える電流コラプスや過渡熱応答に関わるデバイスパラメータを織り込んだ等価回路モデルを作成し、300GHz 帯までの高出力広帯域線形回路実現に重要な現実的なパラメータ改善指標を研究開発項目 1 と協力して抽出する。

当該年度においては、100GHz~300GHz 帯で動作する短ゲートトランジスタの電子トラップを考慮したトランジスタモデルを用いたシミュレーションにより 300GHz 帯パワーアンプの性能予測を行う。また、既存のプロセスにて実現可能な周波数帯にて従来比 2 倍弱の比帯域を有するアンプを試作評価し、設計手法の効果を確認する。また、Beyond 5G において 100Gbps の通信を目指す GaN パワーアンプの通信特性と通信システムとしての通信性能を検討するためのシミュレーション環境を構築する。

- 研究開発項目 2-a) 高出力高効率パワーセル設計技術 (4月~3月)
 1. 歪特性のモデリングに向けて、100-300GHz で動作可能な短ゲートトランジスタまたはそれを用いた PA の 3 次相互変調歪 (IM3) 特性を測定する。
 2. 歪特性のモデリングに向けて、2022 年度に作成したトランジスタモデルをトラップの影響を考慮できるモデルに改良する。
 3. 受動回路素子の高精度モデリングに向けて、受動回路素子の小信号特性の測定を実施する。
- 研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術 (4月~3月)
 1. 広帯域線形回路実現方法を検討し、2-a) で作成した仮想モデルを基にシミュレーションベースで 300GHz 帯パワーアンプの性能予測を行う。
 2. 前年度の試作結果を反映させて、既存プロセスを用いて、最大発振周波数の 1/2 程度の周波数における従来比 2 倍の比帯域を有するアンプの再試作を実施し、設計手法の効果の確認と 300GHz パワーアンプ実現に向けた課題抽出を行う。
- 研究開発項目 2-c) 100Gbps 通信方式検討 (4月~3月)

Beyond 5G において 100Gbps の通信を目指す GaN パワーアンプの通信特性と通信システム全体としての通信性能の両面から検討するためのシミュレーション環境を構築する。

以上