

令和3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3年度133百万円)
※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	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	2	2
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	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

ミリ波 HEMT では利得低下に繋がるフィールドプレートを設けられず、電流コラプスや耐圧低下などの課題が顕在化する。この課題を克服するため、本研究では電流コラプスとリーク電流改善の観点から最適化したバッファ構造を採用し、キャリア閉じ込めを向上する AlGaIn/GaN 系ヘテロ構造を設計した。基地局用大型素子にも対応できる高スループットな微細電極形成技術として、サーマルリフロープロセスをベースとした 150 nm 級 T 型ゲート形成プロセスを開発した。T 型ゲート形成プロセスに基づいてミリ波 GaN-HEMT のスループットを立案した。

・研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術

GaN-HEMT の実測データから抽出した SPICE モデルにスケールアップ則を適用することにより、微細ゲート HEMT のミリ波特性を予測した。シミュレーション結果に基づいて、ミリ波 GaN-HEMT のレイアウト設計を行った（設計特性： $f_{max} > 100\text{GHz}$ (D モード)、 $f_{max} > 50\text{GHz}$ (E モード))。ミリ波 HEMT 試作の TEG メニュー（ゲート周り寸法振り、マルチフィンガー素子レイアウト振りなど）を決定し、フォトマスクの設計を完了した。

・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、特に顕著に現れる過渡的な電氣的特性（ドレイン電流の時間変化）、ならびに、微小領域の温度変化が評価できるシステムの動作確認を行った。前者については特段の課題はなく、次年度以降の GaN トランジスタの評価に適用可能であることが分かった。一方、後者においては、評価の感度をたかめるために用いている黒化スプレーの影響が大きいといった課題の抽出を行い、次年度にこの改善と併せて、評価を行う必要があることが分かった。

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 までの小信号特性を連続的に測定することが可能な測定系（ネットワークアナライザ）の立ち上げを完了した。

ユニットフィンガー幅やフィンガー本数、ゲートピッチなどを様々に作り出した GaN トランジスタ TEG の試作を実施した。また、ユニットフィンガー幅とフィンガー本数の双方の効果を考慮できるよう拡張した分布型 GaN トランジスタモデルを開発した。

短ゲート化による相互コンダクタンスの向上や寄生容量低減の効果などを取り入れることができる T-CAD モデルを開発した。

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した。

・研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術

単位 PA で利得 10dB・出力 $> 0.25\text{W}$ (100GHz 帯)・比帯域 7% 超を検証

100GHz 超での高利得・高出力化の課題に対応すべく、グラウンドコプレーナ線路による 1) 多段 PA 化、2) カスコード PA 化により単位要素回路の有用性を検証した。

ファウンダリー素子評価ならびに 2022 年度に試作する回路の電力特性を評価するために、少なくとも 100GHz 以上の電力特性測定が可能な測定系の選定と導入を行い、オンウエハ評価系に組みこみ、基本動作性能を評価した。

・研究開発項目 2-c) 100Gbps 通信方式検討

Beyond5G では、次世代のアプリケーションを社会実装するため、通信に関する性能値が提言されている。提言の多くは、通信技術の観点から性能値を定めるため、具体的なアプリケーション・コンテンツの特性に応じた通信スペックの提案はなされていない。

よって本研究では、今後 10 年で社会実装されるアプリケーションから、マルチメディアコ

ンテンツに焦点を当て、アプリケーション技術を分類し、利用用途と通信特性に応じた通信要件毎の分類を行った。

(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

GaN+HEMT 増幅器の低歪・広帯域化を実現すべく、電流コラプス小と高耐圧と同時にキャリア閉じ込めを改善した AlGaIn/GaN 系などのエピ構造設計技術と $L_g=100\sim 150\text{nm}$ の T 型ゲートを形成するプロセス技術を組み合わせてミリ波 GaN+HEMT のスループロセス技術を構築する。設計した GaN+HEMT をこのミリ波 GaN プロセスを用いて作製する。作製した GaN+HEMT の評価結果に基づいて、単体デバイスのパラメータを抽出する。上記デバイスパラメータに基づいて、小信号利得 3dB 以上向上を可能にする新規構造のミリ波 GaN デバイスを設計する。また、ミリ波 GaN+HEMT のパルス IV 特性、S パラメータ、大信号入出力特性および微小領域熱分布の評価技術を構築する。

・研究開発項目 1-a) ミリ波 GaN プロセス技術

1. 電流コラプス小と高耐圧と同時にキャリア閉じ込めを改善した AlGaIn/GaN 系などのヘテロ構造を設計する。
2. $L_g=100\sim 150\text{nm}$ の T 型ゲートを形成するプロセス技術を構築する。
3. これらの技術を組み合わせてミリ波 GaN+HEMT のスループロセス技術を構築する。

・研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術

1. 100GHz 以上の f_{max} を有する D モード HEMT、および、50GHz 以上の f_{max} を有する E モード HEMT を設計する。
2. 上記のミリ波 GaN プロセスを用いて、設計した GaN+HEMT を作製する。GaN+HEMT の評価結果に基づいて、単体デバイスのパラメータを抽出する。
3. 上記デバイスパラメータに基づいて、小信号利得 3dB 以上向上を可能にする新規構造のミリ波 GaN デバイスを設計する。
4. ミリ波 GaN+HEMT のパルス IV 特性、S パラメータ、大信号入出力特性および微小領域熱分布を評価する。評価結果を踏まえて、GaN+HEMT の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

1. パルス IV 特性（直流）と S パラメータとを同期させた評価システムを構築し、動作実証を行う。
2. ミリ波 GaN プロセス技術を用いて作製した GaN+HEMT のマイクロ波周波増幅器としての基本的な入出力特性を取得する。
3. 市販品の GaN+HEMT ならびに本研究開発で作製した GaN+HEMT の微小領域熱分布を取得し、発熱箇所の同定ならびにゲート間距離の影響を評価する。

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

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 $< -25.7\text{dB}$ 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 \sim 300GHz 帯で動作する仮想 GaN 高周波デバイスモデルの作成とパワーセル設計技術の検証および仮想デバイス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実証し、設計手法の効果を確認する。

Beyond5G 社会像調査を行い、必要とされる通信方式についての調査に加え、6G も視野に入れた実際に必要とする通信容量や速度を、ユースケースやユーザ利用用途に合わせ、要求されるスペックを整理し、本共同研究にて開発する技術へ反映する。また、技術動向調査、通信

規格動向調査結果から、100Gbps 通信実現に向けた PA 技術要求事項をまとめる。

- 研究開発項目 2-a) 高出力高効率パワーセル設計技術
前年度に開発した分布型 GaN トランジスタモデルと 300GHz までの動作を前提とした仮想 GaN デバイスマデルを組合せ、300GHz 対応素子プロセスを想定した GaN 仮想トランジスタモデルを作成する。
前年度に開発した分布型 GaN トランジスタモデルを用い、最適なパワーセル設計手法を確立し、試作によりその妥当性（出力電力予測精度 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内および回路理論上得られる最大電力の 90%以上の出力電力が得られること）を検証する。
- 研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術
 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. 前年度に既存プロセスにて基本設計とレイアウトを完了した最大発振周波数の 1/2 程度の周波数における増幅器要素回路の試作を行い、従来比 2 倍の比帯域を有するアンプを試作実証し、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
 1. Beyond5G で利用されるアプリケーションを想定し、ネットワーク回線および無線ネットワークで求められる性能に関して定義する。
 2. 1. で定義する通信性能に対して、周波数・変調方式・多重化方式の観点から数値シミュレーションを行い、100Gbps 無線通信における性能に依存するパラメータ候補を抽出する。

以上