

令和6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 名古屋大学
国立大学法人熊本大学
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6年度までの総額 509 百万円（令和6年度 126 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、熊本大学）
研究開発項目 1-c) ミリ波 GaN 評価技術（熊本大学）

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	0
	外国出願	1	0
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	36	13
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	3	1
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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 (名古屋大学)

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- ・短チャネル時のキャリア閉じ込めを改善する高 Al 薄層化バリア構造を設計
- ・GaN 基板上 HEMT にてオフ耐圧 100 V 以上と電流コラプス 10%以下を同時に達成するアンダーパッファ構造を開発
- ・高スループットなサーマルリフロー法を用いた 50~100 nm T 型ゲート形成プロセスを開発
- ・2 層レジスト EB 描画を用いた 50 nm 級 T 型ゲート形成プロセスを開発
- ・ミリ波 AlGaIn/GaN HEMT の基本スループロセスを構築
- ・シート抵抗 $\sim 300 \Omega/\text{sq.}$ とコンタクト抵抗 $\sim 0.1 \Omega\text{mm}$ を両立する 2 層キャップ構造を開発、リセス構造 HEMT に適用
- ・低温成長の InAlN/GaN 系エピに適用可能な要素プロセスを開発、同 HEMT のスループロセスを構築
- ・高 Al 薄層化バリア構造と 50 nm 級 EB 描画プロセスを用いて GaN-HEMT を作製、短ゲートにおける同バリア構造の有効性を実証

研究開発項目 1-b) ミリ波 GaN デバイス技術 (名古屋大学、熊本大学)

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- ・3dB 以上の電力利得向上を可能にする GaN デュアルゲート (DG-) HEMT を発案・設計
- ・100 nm 級サーマルリフロープロセスを用いて DG-HEMT を作製、同素子における短チャネル効果抑制、電流コラプス改善、電力利得 3dB 以上向上を確認
- ・高 Al 薄層化バリア構造と 50 nm 級 EB 描画プロセスを用いて DG-HEMT を作製
- ・上記 DG-HEMT の実測 S パラに基づいて SPICE モデルを抽出、パッド起因の寄生素子を除いた DG-HEMT にて $f_{\text{max}} \geq 300 \text{ GHz}$ を達成できることを確認
- ・テラヘルツ増幅器設計のため GaN-HEMT の等価回路モデルパラメータを研究開発項目 2 に提供
- ・150 nm 級の HEMT のパルス S パラメータ評価系 (系の構築は 1-c で実施) 高周波特性を評価して、CW と比較して利得の低下があることを確認した。
- ・前述のモデル化に必要なパルス S パラメータ評価データを取得して名古屋大学に提供した。
- ・同素子の 25GHz における入出力特性を取得して、ゲート幅 $150 \mu\text{m}$ の素子にて、小信号利得=15dB、最大出力=26.2dBm=420mW(=2.8W/mm)、最大効率=38%を確認した。
- ・DG-HEMT の短チャネル効果抑制、電流飽和特性の改善などの原因をデバイスシミュレーションにて確認した。

研究開発項目 1-c) ミリ波 GaN 評価技術 (熊本大学)

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- ・GaN HEMT のカレントコラプスの一般的な評価方法であるパルス I-V 評価系に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構築した。詳細結果は 1-b に示すが、定常状態 (CW) の測定と比較して利得 (S_{21} 、 f_t 、 f_{max}) の低下が確認された。
- ・定常状態の表面温度測定では、従来の黒化スプレー塗布をやめ、空間分解能を上げて、各ゲートフィンガー部の温度を独立して測定可能になった。
- ・サーマルロックインにより局所発熱箇所の同定ができた。市販品 HEMT ではその箇所に結晶転位があることがわかった。
- ・同様の手法で、名古屋大学で作製した試料における局所発熱の観察ができた。HEMT の動作状態 (ドレイン電圧印加状態) での局所発熱の観察はいまのところできていない。

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）

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- サブテラヘルツ帯小信号特性測定系構築及び GaN トランジスタの試作・評価を行い、パワーセルの出力電力に関して分布型モデルの精度検証を実施した結果、検証周波数範囲：1～100GHz において GaN トランジスタのパワーセルの出力電力予測精度 $\pm 0.5\text{dB}$ を確認。
- 分布型モデルを用いたパワーセル設計手法により、単位ゲート幅 $28\mu\text{m}$ 以下のレイアウトであれば潜在的な電力密度に対して 90%以上の電力密度が得られることを明らかにし、電力密度を最大に引き出すパワーセル設計手法を確立。
- ニューラルネットワークベースの回路モデルを用いて電子トラップによるコラプス特性をモデリングした結果、3 次相互変調歪 (IM3) について、実測値として -25dBc が得られる条件にて -23.5dBc のシミュレーション結果が得られることを確認。

研究開発項目 2-b) 広帯域線形 PA 設計技術（名古屋大学）

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- 1-a)、2-a)と連携して作成した短ゲート GaN HEMT 仮想モデルに、2-b)で開発した SC-gate (Standing-wave Controlled gate) 構造を適用することで、300GHz 帯で動作する PA が実現可能なことを確認した。
- $f_{\text{max}}=190\text{GHz}$ の GaN HEMT を用いて、動作周波数 103GHz、帯域幅 9.4GHz ($>2\times$ 現状他帯域)、隣接チャネル漏洩電力 -25.7dBc 未満の線形アンプを試作により実現した。

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）

最終目標を達成し、以下の成果を得た。

- パワーセルモデルを使用して設計した 100GHz 帯 PA と 300GHz 帯 PA の送信シミュレーションを行った結果、24GHz 帯域を有する 300GHz 帯 PA において 64QAM の変調波信号を用いることで 100Gbps 以上の通信が実現できることを確認し、100Gbps での通信が実現できるための条件を明確化。
- EVM を現状と同等程度に維持したまま、GaN トランジスタを高周波化することで、100Gbps での無線接続が原理的に可能であることを確認。
- モバイルシステムへ適応した場合の通信パフォーマンスのシミュレーションとして、100Gbps を超える大容量通信を実装する際に 100～300GHz のような高周波数帯で、周波数帯域幅と EVM による通信への影響を多値変調毎の可視化を行った。同時にモバイル通信システムとして応用した場合にどのような応用が考えられるかを自由空間電波伝播シミュレーションによる可視化を行った。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

①計画

GaN デバイス技術に関して海外での研究開発も進んでおり、海外で先行して実用化されることがないように GaN デバイス技術の基本特許だけでなく改良特許、周辺特許の取得を進め、特許網を構築する必要があると考えており、引き続き、国内特許取得や海外特許取得を進める。

今プロジェクトにて利得余裕の無い $f_{max}/2$ 超周波数領域、さらには従来技術では増幅動作が不可能であった f_{max} を超える周波数帯での増幅器を実現する基礎的な回路技術が確立された。 $f_{max}/2$ 超領域での回路技術に関しては、更なるブラッシュアップを行い、現状の GaN HEMT 性能で実現可能な W 帯程度の周波数帯での電力増幅器での実用化につなげられる研究を継続する。また、 f_{max} 近傍や f_{max} を超える周波数帯での増幅動作を可能とする SC-gate 技術に関しては、小信号増幅動作時にはある程度予想した動作が実現出来る目途が立っているが、電力増幅器として必要な大信号増幅器への適用、実用化には、モデル化や非線形容量の考慮等、まだいくつかの研究課題が残っている。更に、小信号動作においても低雑音増幅器への応用検討等の研究課題がある。これら研究を継続するために新たなプロジェクトの立上げを模索する。

2031 年以降の実用化・事業化を目指し、テラヘルツ帯 GaN デバイス実用化技術、及びテラヘルツ帯フロントエンド・通信モジュール技術開発を継続する。

- 100GHz から 300GHz 高出力 GaN HEMT 開発、MMIC 増幅器技術
- 100GHz 超の GaN フロントエンド IC 開発
- 高出力広帯域通信モジュール実装技術開発

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
ワイドバンド ギャップ半導体 高出力デバイス 技術	テラヘルツ帯 GaN デバイス基盤技術				テラヘルツ帯 GaN デバイス実用化技術					
	• 100GHz～300GHz GaN 増幅素子/GaN 非線形素子 (高品質 GaN ヘテロエピタキシャル結晶、微細ゲート構造) • 150nm AlGaIn 系 HEMT 技術 ($f_{max} > 100\text{GHz}$) • 高利得化に向けたデュアルゲート HEMT 技術				• 50nm InAlN 系デュアルゲート HEMT 技術 ($f_{max} > 300\text{GHz}$) • 低歪化に向けた GaN 基板 HEMT 技術 • 100GHz～300GHz 高出力 GaN HEMT • MMIC 増幅器技術					
ワイドバンド ギャップ半導体 高出力回路技術	広帯域通信 GaN 回路基盤技術				テラヘルツ帯 フロントエンド/通信モジュール技術					
	• 300GHz 帯広帯域線形パワーアンプ用回路要素技術検討 • 上記実現のための GaN デバイスパラメータ検討				• ～300GHz 能動/受動デバイスモデリング • 300GHz GaN PA 回路要素技術の実証 • 100Gbps 無線通信基盤技術 • 100GHz～GaN フロントエンド IC • 高出力広帯域通信モジュール実装技術					

図 1. 研究実施内容と今後の展開

②展望

本研究課題で開発したデバイス技術は GaN の利得不足に対してブレイクスルーとなる可能性がある。しかし、開発したデバイス技術は未だ可能性実証フェーズであり、実用化までには素子構造・プロセス・性能のリファイン、参画企業への技術移管、信頼性確認など多くのステップを要すると考えている。

2030 年以降に実用化される 6G 通信システムの構築に本研究開発で得られた GaN デバイス技術や GaN デバイス高性能化に関する知見を活用したい。6G 通信システムにおける GaN デバイスは Si ベースのデジタル信号処理回路の中で送信用アンプなど Si では置き換えられない機能を担うキーコンポーネントとなると考えている。引き続き研究開発を継続することで、超高速通信やセンシング用のパワーアンプの実用化が可能となると思われる。

GaN-HEMT、それらを用いた高出力高効率パワーセル設計技術、および 100Gbps 通信方式検討の研究開発の開発成果の発展・普及として、通信用途だけでなくセンシング応用やエネルギー応用への展開・普及が考えられる。例えば 90GHz 帯ボディスキャナーは現在、主要空港におけるセキュリティゲートなどで使われているが、高価格なため十分に普及していない。本委託研究の成果として 90GHz 帯高出力デバイスが安価かつ小型な半導体デバイスで実現されるようになれば、システム全体の低価格化、小型化が実現され、地方空港などでも使われるようになるだけでなく、鉄道・バスなどの交通インフラ、役所や図書館などの公共設備、シアターなど不特定多数の人間が出入りする民間施設のセキュリティ向上に貢献する。

また、100GHz 帯の電磁波は化学反応の促進に有効であることが知られている。本研究開発の成果である高出力な 100GHz 帯 GaN デバイスを化学反応装置に適用することにより、化学反応の速度を何十倍もあげることができるだけでなく、従来は合成が不可能であった新しい化合物の生成に発展する可能性がある。

2031 年以降に実用化・事業化する W 帯通信を用いて、従来の地上インフラが届かない地域での高速・安定した通信を実現し、気候変動や環境汚染の監視、自然災害の予測に貢献する。それらの市場規模は 2030 年までに年間で 1246 億ドルまで拡大する見込である。本研究開発で得られた W 帯等の活用に関する知見をシステム提案や方式提案を行う際の H/W 実現性を示すバックグラウンドデータとして活用する。これらを通じて、H/W 本周波数帯の早期参入や市場形成によるデファクトスタンダード化を目指す。

以上