

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆受託者 : 株式会社ブロードバンドタワー、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
- ◆研究開発期間 : 令和3年度～令和6年度(4年間)
- ◆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)

2. 研究開発の目標

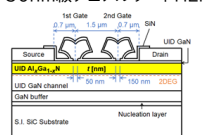
GaNデバイスの高周波においても高出力な特長を活かしたテラヘルツ帯(30GHz～100GHz→100GHz～300GHz)で動作するワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス、ミリ波帯を用いる広帯域・低歪回路技術、100Gbps通信方式を開発

3. 研究開発の成果

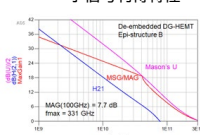
研究開発項目1:ワイドバンドギャップ半導体高出力デバイス技術

100～300GHzで動作可能なGaN-HEMTの基本デバイス技術を確認する。作製したHEMTから抽出したパラメータを増幅器設計のため研究開発項目2に提供する。

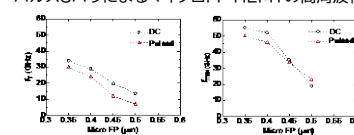
50nm級デュアルゲートHEMT



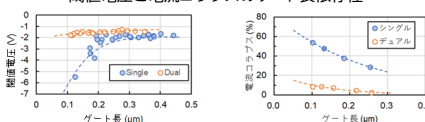
小信号利得特性



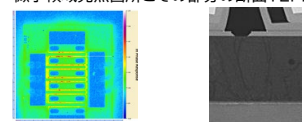
パルスSパラによるマイクロFP HEMTの高周波特性



閾値電圧と電流コラプスのゲート長依存性



微小領域発熱箇所とその部分の断面TEM



- 高キャリア閉じ込めAlGaN/GaNエビ技術
- 50nm級T型ゲートプロセス技術
- GaNデュアルゲートHEMT設計・評価技術

- パルスSパラ評価におけるシーケンス
- CWとパルスSパラ評価

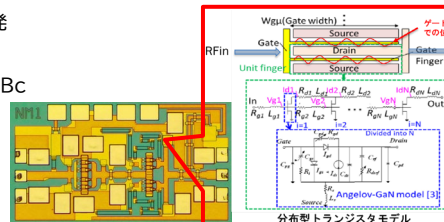
研究開発項目2)ワイドバンドギャップ半導体広帯域線形回路技術

テラヘルツ(100～300GHz)帯広帯域線形パワーアンプ(PA)実現に向け、GaNトランジスタモデリング技術の開発、PAの要素回路技術の開発と試作による実証を目標とする。また、Beyond5G社会像調査と、アプリケーションからの要求定義を目標とする。

a) テラヘルツ対応分布型トランジスタモデルの開発

b) 100GHz超かつ $f_{max1/2}$ 超の動作周波数、現状帯域幅2倍以上、隣ch漏洩電力<-25.7dBcを実現する回路技術を試作により実証する。

c) Beyond5Gを視野に入れたユースケースに合わせた通信要件の整理



研究開発項目1-a):ミリ波GaNプロセス技術

- 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AlGaN/GaNエビ構造を設計
- 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
- 高Al薄層化AlGaN/GaNエビ構造と50 nm級EB描画プロセスを用いてGaN-HEMTを作製

研究開発項目1-b):ミリ波GaNデバイス技術

- 電力利得を3dB以上向上し得る新規素子としてデュアルゲート(DG-)HEMTを考案、設計
- DG素子の短チャネル効果消失、電流コラプス抑制を見出し、電力利得3dB以上向上を確認
- DG素子のSPICEモデルを抽出、パッド起因の寄生素子除いた同素子にて $f_{max} > 300$ GHz達成できること確認
- 増幅器設計のためシングルゲート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。モデル化に必要なパルスSパラメータ評価データを名古屋大学に提供
- ゲート幅150 μmの素子にて、小信号利得=15dB、最大出力=26.2dBm = 420mW (=2.8 W/mm)、最大効率=38%を確認
- 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

研究開発項目1-c):ミリ波GaN評価技術

- DCとRF入力を同期したデバイス評価パルスSパラメータ測定系を構築した。
- 表面温度測定において、各ゲートフィンガー部の温度を独立して測定可能であることを確認。
- サーマルロックインにより局所発熱箇所の同定に成功。

研究開発項目2-a):高出力高効率パワーセル設計技術

- 分布型トランジスタモデルは出力電力予測精度±0.5dBで高精度に実測を再現することを確認。
- 電力密度を最大に引き出すための分布型モデルを用いたパワーセル設計手法を確立。
- ニューラルネットワークを適用した回路モデルは3次相互変調歪(IM3)について、1.5dBの精度で実測を再現することを確認

研究開発項目2-b):広帯域線形PA設計技術

- 短ゲート化で実現可能な仮想モデルにて300GHz帯で動作するPAが実現可能なことを確認した
- $f_{max} = 190$ GHzのGaN HEMTを用いて、動作周波数103GHz(> $f_{max}/2$)、帯域幅9.4GHz(>2*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通信方式の検討

- 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
- 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での無線接続が可能であることを確認

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
6 (0)	1 (0)	1 (1)	36 (13)	0 (0)	0 (0)	3 (1)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1)特許出願、論文発表等

最終目標としていた国内出願数を達成し、既存の国内出願を基礎としたPCTへの外国出願を実施した。これらの内容について適宜論文投稿を行い、研究論文1件、小論文1件、査読付き収録論文4件が採択された。

(2)成果のトピック

特許申請(PCT出願):東海国立大学機構

「電界効果トランジスタ」

ゲートフィンガー先端に所定のインピーダンス素子を接続することによってフィンガー内定在波分布を変化させることで 利得、fmaxの高い電界効果トランジスタを提供する。

(3)外部発表(出展):三菱電機

マイクロウェーブ展2022「Post 5G/Beyond 5G/6Gに向けた研究開発」、2023「6G通信に向けた研究開発」、2024「サステナブル社会を支えるデバイス技術」として継続的に外部発表(出展)を実施した。

(4)外部発表(論文、発表)

国際学会、国内学会等にて論文、口頭発表等を精力的に行い、目標数を上回った。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

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。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。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。

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。

今後の展開

	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Ga_Nヘテロエピタキシャル結晶、微細ゲート構造)				100GHz～300GHz ・ 高出力Ga_N 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Ga _N 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 - 上記実現の為のGa_Nデ バイスパラメータ検討				100GHz～Ga_N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					

2031年以降の実用化・事業化を目指し、テラヘルツ帯Ga_N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Ga_N HEMT開発、MMIC増幅器技術
- ・ 100GHz超のGa_N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