

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ミリ波増幅器向けGaN-HEMTの高出力・高周波化技術およびデバイスモデル構築
Title(English)	
著者(和文)	牧山剛三
Author(English)	Kozo Makiyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10318号, 授与年月日:2016年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:宮本 恭幸,小田 俊理,浅田 雅洋,波多野 睦子,鈴木 左文,福田 浩一
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10318号, Conferred date:2016/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

ミリ波増幅器向け GaN-HEMT の
高出力・高周波化技術および
デバイスモデル構築

東京工業大学 大学院

理工学研究科 電子物理工学専攻

牧山 剛三

本論文は、ミリ波帯域を使った通信用増幅器向け高出力デバイスとして期待されている GaN-HEMT の研究開発について論述したものであり、以下の内容(目次)から構成される。

1 序論

1-1 背景

1-1-1 高周波・高出力化合物半導体デバイス

1-1-2 ミリ波増幅器向けデバイスの必要性

1-1-2-1 高速・大容量無線通信

1-1-2-2 高精細レーダーシステム

1-1-3 GaN-HEMT の優位性

1-2 GaN-HEMT を用いたミリ波増幅器実現への課題

1-2-1 高出力化のためのデバイス構造・諸元

1-2-2 電子トラップによる過渡応答現象の抑制(電流コラプス)

1-2-3 高電圧動作時の電気特性予測手法の改善(デバイスシミュレーション技術)

2 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 構造設計

2-1 基本構造設計

2-1-1 デバイス性能ターゲット

2-1-2 高歩留まり Y 型ゲート構造の開発

2-1-3 最適 HEMT 構造(障壁層厚、組成)の検討

2-1-4 デバイス諸元最適化

2-2 バックバリア構造設計

2-2-1 ゲート電極微細化によるショートチャネル効果

2-2-2 各種バックバリアによるピンチオフ特性改善効果

2-2-3 AlGaIn バックバリアによるピンチオフ特性の改善

2-2-4 AlGaIn バックバリアによる off 耐圧の改善

3 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 表面パッシベーション技術

3-1 半導体表面トラップ低減技術

3-1-1 電流コラプスの原因とデバイス特性に対する影響

3-1-2 絶縁膜品質の半導体表面に及ぼす影響

3-1-3 開発絶縁膜による電流コラプス改善

3-2 開発技術を用いた AlGaIn/GaN-HEMT MMIC による W 帯増幅器

4 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 高性能化技術の開発

-- デバイスシミュレータの導入による構造設計技術の高度化 --

4-1 実測電気特性および物理解析手法を用いた特性解析(I)

-- AlGaIn/GaN-HEMT の場合 --

4-2 コラプス抑制デバイス構造設計技術(オフセットオーバーハングゲート電極)

4-2-1 デバイスシミュレータを用いたゲート構造最適化

4-2-2 オフセットオーバーハング構造の高周波特性への影響

4-3 InGaIn バックバリアの効果検証

4-3-1 デバイスシミュレータを用いた InGaIn バックバリア構造設計

4-3-2 ショートチャネル抑制効果

4-3-3 電流コラプス改善効果

5 高出力化を実現する次世代 InAlGaIn/GaN-HEMT 技術

5-1 InAlGaIn/GaN-HEMT 技術の選択

5-1-1 従来 InAlN/GaN-HEMT の課題

5-1-2 InAlGaIn/GaN-HEMT による課題解決

5-2 低トラップ表面保護膜

5-2-1 電流コラプスの原因となる電子トラップについて

5-2-2 低トラップ 2 層絶縁膜技術

5-2-3 デバイス適用構造

5-3 InAlGaIn/GaN-HEMT の電気特性

5-3-1 DC 特性について

5-3-1-1 電気特性評価デバイス構造

5-3-1-2 電流-電圧特性(3 端子特性)

5-3-1-3 ドレインコンダクタンス

5-3-2 電流コラプス特性

5-3-3 簡易信頼性評価結果について

5-3-4 HEMT 出力特性

5-3-5 W 帯増幅器 MMIC 出力特性

5-4 実測電気特性および物理解析手法を用いた特性解析(II)

-- InAlGaIn/GaN-HEMT, InAlN/GaN-HEMT の場合 --

5-4-1 高電流密度デバイス実測データ再現モデル

副題：トラップモデルの組み込み

5-4-2 過渡応答特性の比較検討

5-4-3 増幅器動作時の過渡応答計算結果

計算結果に基づく高 ΔE_c デバイスの対電流コラプス優位性検証

5-4-4 GaN-HEMT における衝突イオン化効果の検証

- 6 GaN-HEMT 増幅器におけるトラップの影響に関する考察
 - 6-1 最新技術適用デバイスにおける残留コラプスについて
 - 6-2 増幅器動作に着目したキラートラップについて
 - 6-2-1 W帯増幅器動作時の電流・電圧タイミングチャート
 - 6-2-2 増幅器動作状態と電子のトラップへの遷移機構
 - 6-2-3 SiN 表面トラップの不安定性
 - 6-2-4 ミリ波デバイスにとってのキラートラップ
- 7 今後の課題
 - 7-1 バンド構造制御絶縁膜技術
 - 7-2 低抵抗オーミックコンタクト形成技術
 - 7-3 極微細ゲート(<60nm)対応のバックバリア技術

8 結論

これらの項目について、概要的に解説を加える。

1 序論、1-1 背景について

筆者が、これまで研究開発に携わってきた GaAs, InP, GaN をはじめとする化合物半導体は、Si と比較して大きな電流を取り出せかつ、高周波動作が可能な物理的性質を備えている。現在では、大容量無線通信システムを支えるキーデバイスへと成長している。また、通信用デバイスのみならず、高効率太陽電池、光デバイス、低消費電力ロジック回路向けデバイス、照明用 LED デバイス、高効率電力変換デバイスなど幅広い分野で社会を支えるキーデバイスとなっている。

化合物半導体デバイスは、AlGaAs/GaAs-HEMT の発明をきっかけに、携帯電話端末用増幅器や衛星通信用増幅器の飛躍的普及を実現した。さらに、現在の自動車衝突緩和レーダーなどのレーダーおよびセンサー用半導体デバイスとして、これまでに無い新機能・新サービスの提供を実現した。

また、その極めて優れた電子輸送特性により突出した高周波特性を呈する InAlAs/InGaAs-HEMT の発明は、現在のテラヘルツデバイスへと発展し超高速大容量近接通信や、テラヘルツ波の特性を利用した検査・分析システムへと進化している。

さらに近年では、窒化物半導体が、青色発光 LED などで実用化されている。また、GaN を中心とする窒化物半導体を電界効果トランジスタに応用した AlGaN/GaN-HEMT の開発により、通信用電子デバイスの飛躍的な出力密度の向上が実現した。現在では、モバイル通信基地局の高出力デバイスとして採用され、基地局の高効率化や小型化を実現した。

出力電力と動作周波数の関係およびアプリケーション例を図 1 にしめす。材料系

(AlGaAs/GaAs-HEMT, InAlAs/InGaAs-HEMT, AlGaN/GaN-HEMT)により、適用周波数帯域および期待出力が異なっている。AlGaAs/GaAs-HEMT は、1990 年代初めに製品化され出力 1W 以下、周波数 80GHz 以下のアプリケーションに使用されている。周波数帯域がほぼ同じで 100 倍以上の出力が得られる AlGaN/GaN-HEMT は 2000 年代半ばから製品化されている。

本論文では、通信用高出力半導体として飛躍的な出力特性の向上を実現した AlGaN/GaN-HEMT を用いたミリ波帯(75GHz – 110GHz)向けデバイスの研究開発および、これらの研究で開発された技術を応用した InAlGaN/GaN-HEMT の研究開発成果について報告する。これらのミリ波向けデバイスは、高速・大容量無線通信や高精度レーダーシステム(気象観測用レーダー、航空路監視用データー)等の先進的アプリケーション向けデバイスとして注目されている。

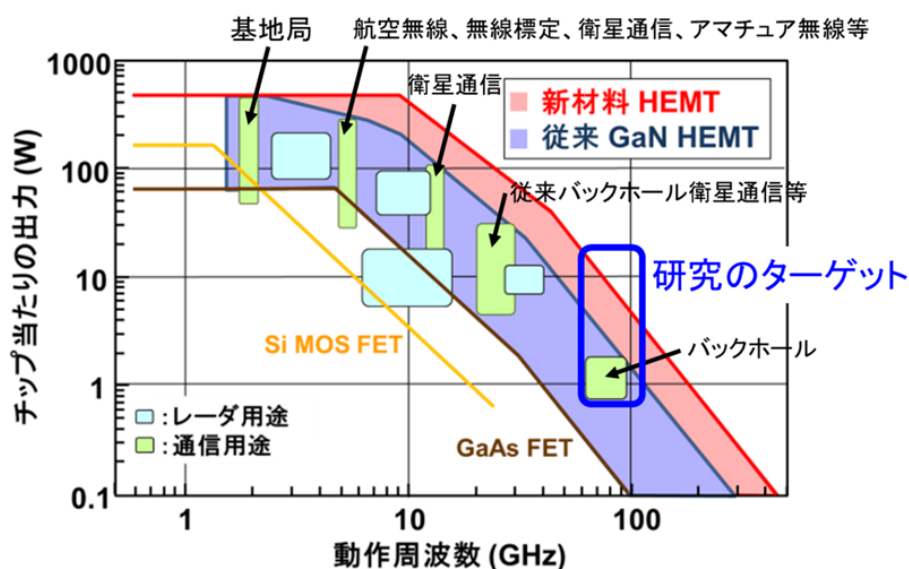


図 1 出力電力の動作周波数依存性

1 序論、1-2 GaN-HEMT を用いたミリ波増幅器実現への課題

GaN-HEMT のチャンネルは、GaN で構成される。一方、障壁層は AlGaIn, InAlN, InAlGaIn などの分極量の異なる材料を採用することができる。この分極は、GaN チャンネルに $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上の高濃度 2 次元電子ガスを生成し、デバイスの高出力化に寄与している。しかしながら、この高濃度 2 次元電子ガスは、on/off 耐圧を低下させかねない。そのためデバイスの構造に対して新規に検討を加える必要がある。

また、高電圧動作する GaN-HEMT は、電流コラプスの影響を強く受ける。電流コラプスは、半導体表面およびパッシベーション中の電子トラップに電子が捕獲されることによって生じる電流低下現象である。本研究では、この電流コラプスの原因と解消技術、そし

て電流コラプス現象を予測するシミュレーション技術の確立に注力した。

2 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 構造設計、2-1 基本構造設計

2005 年に開始したミリ波増幅器向け GaN-HEMT 研究開発では、デバイスの出力密度目標を動作周波数 90GHz で 1W/mm とした。また増幅器 MMIC 設計上、動作周波数 90GHz での利得の要求値を 6dB と設定した。この場合の動作電圧(V_{ds})を示す。

$$P_{out} = 1 \text{ W}, I_{max}=0.8 \text{ A/mm}, W_g = 300\mu\text{m}$$

$$P_{out} = \frac{V_{max}-V_k}{2\sqrt{2}} \times \frac{I_{max}}{2\sqrt{2}} = 1 \text{ W/mm}$$

$$\begin{aligned} \text{要求性能: Breakdown Voltage } (BV_{gd}) \\ > V_{max} \times 3 = 100 \text{ V} \end{aligned}$$

AlGaIn/GaN-HEMT での最大電流を 0.8A/mm とした場合、出力目標を満たす動作電圧は 30V-35V 程度となる。さらに、大信号 RF 信号入力を考慮して、off 耐圧は動作電圧の 3 倍程度の 100V 以上を必要とする。目標性能を表 1 に示す。

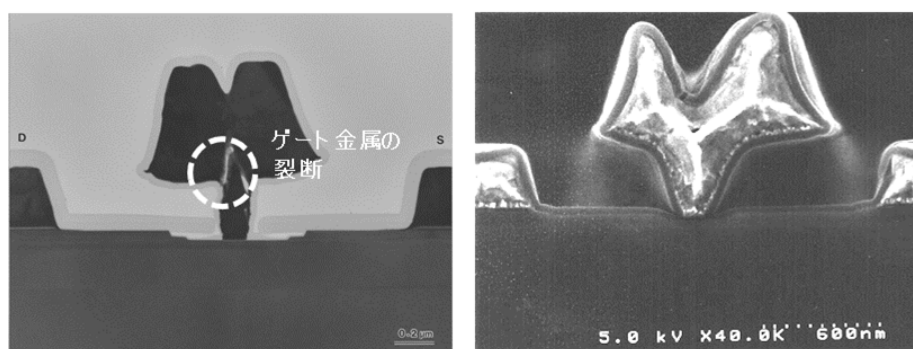
表 1 目標性能

最大電流(A/mm) @ $V_g=2\text{V}$, $V_{ds} = 10 \text{ V}$	0.8
オフ耐圧 BV_{gd} (V)	100
最大発振周波数 f_{max} (GHz)	180

さらに、ミリ波増幅器 MMIC では、大きな出力を得るために数百 μm 以上の総ゲート幅を持つデバイスが用いられる。そのため、ゲート長 0.1 μm 級デバイスを高い歩留まりで作製する技術が必要である。さらに、性能目標である $f_{max}>180\text{GHz}$ を達成するには、高い電流利得遮断周波数(f_t)とゲート抵抗の低減が必要である。

従来の GaAs-HEMT では、図 2(a)に示す T 型ゲート電極構造を用いていた。このゲート構造は、ゲート長を規定する T 型ゲート電極下部(ファインゲート部)とゲート抵抗の低減を狙った幅広のゲート電極上部(オーバーゲート部)から構成される。このゲート電極構造では、図示するようにファインゲート部とオーバーゲート部境界に蒸着時に発生する空洞が生じる。この空洞は不可避な現象であり、蒸着・リフトオフ法によるゲート長 0.15 μm 未満のゲート電極形成時に発生する。この障害は、ゲート長 0.15 μm 未満のゲートにほぼ全数発生し、デバイス試作上致命的な障害であった。そのため、筆者はレジストの熱変形現象を応用し、安定した Y 型ゲート形成技術を完成させた。この手法により形成された電極形状を図 2(b)に示す。ファインゲート部とオーバーゲート部の接続部の空洞は完全に消滅した。この Y

型ゲート電極(ゲート長 $<0.15\mu\text{m}$)は、99.94%の歩留まりで形成できることが InP-HEMT デジタル回路試作実験で証明されている。また、この形状は前述のゲート抵抗低減に寄与する。従来 T 型ゲートではオーバーゲート部からファインゲート部に繋がる経路に空洞があり、ゲート抵抗を上昇させていた。一方、本 Y 型ゲートでは、接続部は十分な厚みを有しており抵抗増大要因にならない。この Y 型ゲート電極技術は、筆者のたずさわるすべてのミリ波 GaN-HEMT デバイス(MMIC)および筆者がたずさわるテラヘルツ InP-HEMT デバイス(IC)に採用されており、この技術なしではデバイス(MMIC, IC)の作製は不可能である。



(a)T 型ゲート電極

(b)Y 型ゲート電極

図 2 ゲート電極形状

2 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 構造設計、2-2 バックバリア設計技術

ゲート長の微細化によりゲート空乏層の効果が低下しソース・ドレイン間電流がオフしにくくなる。これがいわゆるショートチャネル効果である。特に GaN-HEMT のような高い電流密度を持つデバイスでは、ゲート電極の電位としてはオフ状態であっても、ゲート空乏層下を回り込んでドレインからソースに流れる電流が GaAs-HEMT 以上に多く流れる。図 3 に、バッファ層にショートチャネル抑制効果を施していない場合の閾値(V_p)のゲート長(L_g)依存性および off 耐圧評価結果を示す。測定結果から分かるように、従来構造 GaN-HEMT では、 $0.5\mu\text{m}$ 以下のゲート長で急激な V_p のマイナス側シフトが認められる。これは、ゲート電圧すなわちゲート空乏層でソース・ドレイン電流が遮断できなくなっていることを示している。この結果は、ショートチャネル抑制手段なしでは、 $L_g=0.1\mu\text{m}$ 程度の微細ゲートを使用するミリ波デバイスは事実上作製困難であることを示している。さらに、off 耐圧は 10V 程度と非常に低く、実質的にトランジスタをオフすることが出来ないことがわかる。

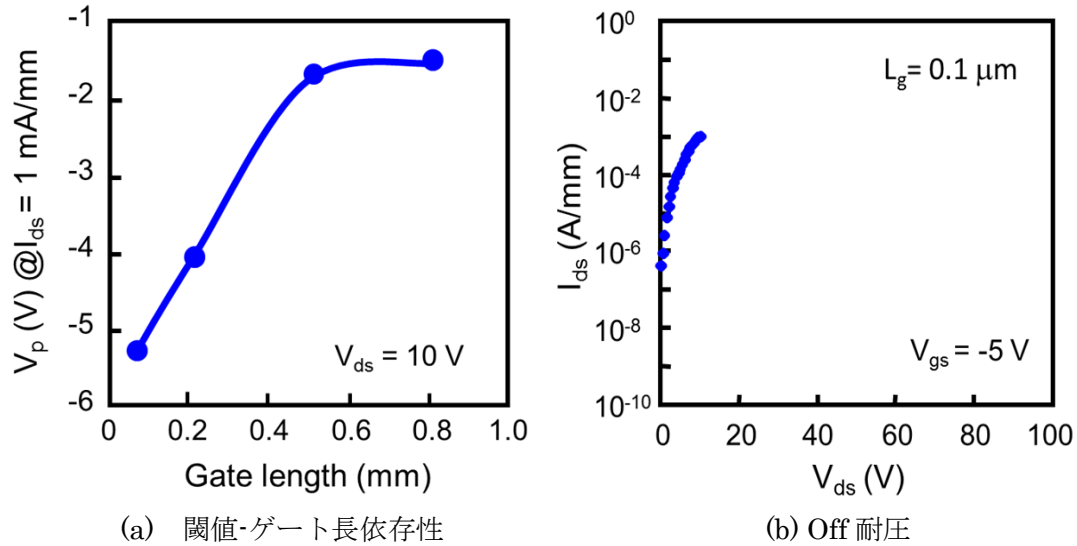


図 3 従来技術によるショートチャネル効果および Off 耐圧

筆者らは事前の試作評価を重ね、GaN チャンネルの薄層化と AlGaIn バックバリア構造の併用が好適であると判断した。図 4 に、GaN チャンネルの厚みを減少させた場合の X 線反射半値幅を示す。チャンネルの厚みは、 $1\mu\text{m}$ から $0.25\mu\text{m}$ まで変化させて、GaN チャンネル層の結晶品質の変化を評価した。さらに、図 5 に HEMT 表面の Nomarski 顕微鏡像を示す。評価結果が示すように、GaN 層の薄層化は少なくとも GaN チャンネルの結晶品質の低下の原因となる。また、HEMT 表面のモホロジー観察結果から、X 線半値幅から検知させる結晶品質の劣化と同時に表面にまで影響する荒れが生じていることもわかる。この表面荒れは、経験上特にゲートショットキー界面の信頼性を劣化させる一因となり、ゲートリーク電流の増大等の影響も呈する。また、表面トラップ起因の電流コラプスにも影響を与えると推測され改善が望まれる。そのため、GaN チャンネル品質および表面モホロジー改善のため、薄膜化した GaN チャンネルの代わりに、AlN 核形成層と GaN チャンネルの間に低 Al 組成の AlGaIn バックバリアを挿入した。図 4 に示すように、AlGaIn バックバリアの挿入により、2次元電子ガスが生成させる障壁層/チャンネルヘテロ界面と SiC 基板との実効的距離が離れ、結晶品質が改善することがわかる。また、前述したように AlGaIn 層は電子障壁となりバックバリアとしても機能する。

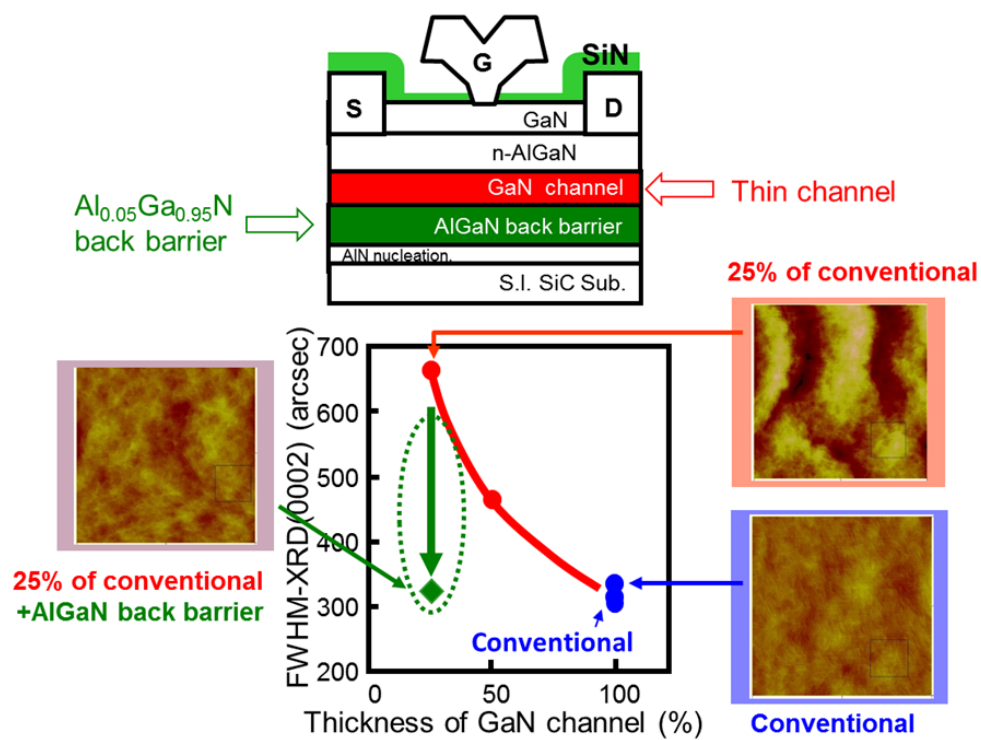


図 4 結晶構造と X 線半値幅の関係

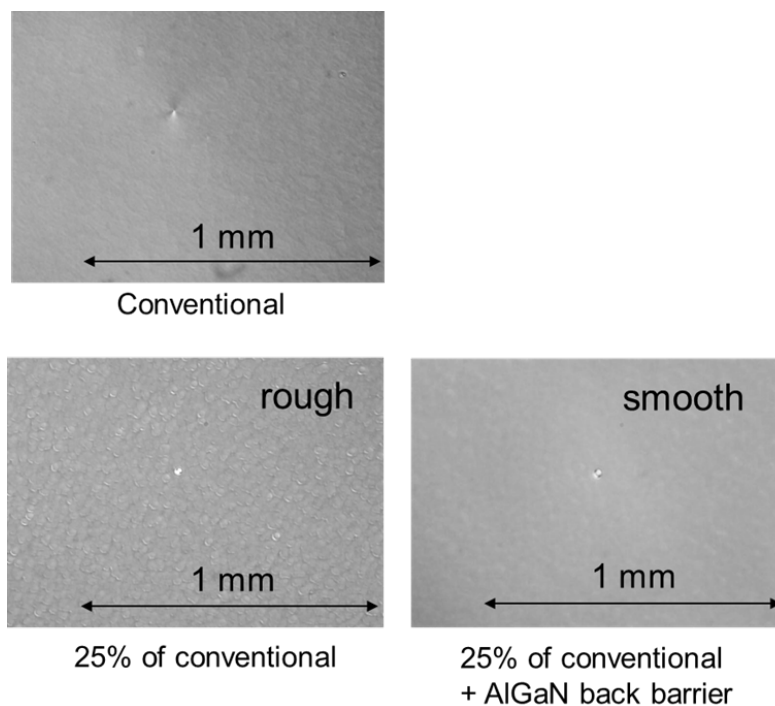


図 5 Nomarski 顕微鏡像

以上の結晶的知見を踏まえて、最適なバックバリア構造を採用した微細ゲートを有するミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT の試作を実施し、増幅器適用の観点から諸電気特性を評価した。

図 6(a)に、試作したデバイスの閾値の L_g 依存性を示す。図示するように、 $L_g=0.8\mu\text{m}$ から $L_g=0.08\mu\text{m}$ までのデバイスで安定した閾値が得られた。これは、薄膜 GaN チャンネルと AlGaIn バックバリアが、ショートチャネル抑制に効果を呈していることを示している。

図 6(b)に、オフ耐圧特性を示す。従来のマイクロ波向け GaN-HEMT エピ構造では、 $L_g=0.1\mu\text{m}$ デバイスでのオフ耐圧が 10V 程度(ゲート電圧 $V_{gs}=-5\text{V}$)であり、全く実用に供することが出来ないことがわかる。一方、薄膜 GaN チャンネルと AlGaIn バックバリアを用いたデバイスでは、少なくともドレイン電圧 $V_{ds}=100$ までの範囲で破壊耐圧基準(ドレイン電流 $I_{ds}=1\text{mA/mm}$)を上回することはなかった。

これらの実験結果から、薄膜 GaN チャンネルと AlGaIn バックバリアを採用したデバイスは、ミリ波帯で十分な利得を有する増幅器向けデバイスとして適格であると結論した。

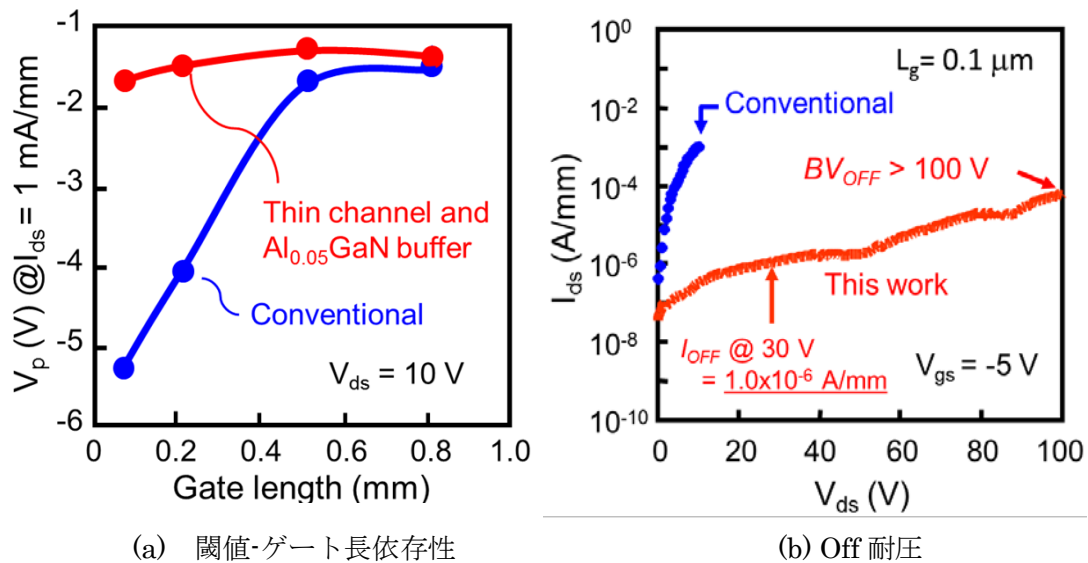


図 6 従来技術によるショートチャネル効果および Off 耐圧

さらに、図 7 に試作したデバイスの小信号特性を示す。測定結果から、良好な RF 特性を示していることがわかる。

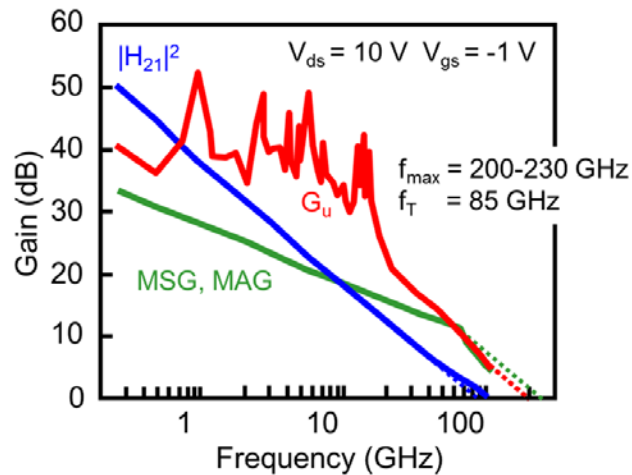


図7 試作デバイスの小信号特性

3 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 表面パッシベーション技術

3-1 半導体表面パッシベーション技術

電流コラプスとは、半導体内部や表面に存在する電子トラップに電子が捕獲されることにより伝導帯電位が増大することにより発生する。障壁層やチャネルの伝導帯電位の上昇は、キャリア濃度の低下すなわち電流密度の低下に直結する。そのため、電流コラプスの発生した HEMT では、電流密度が低下し出力の低下が生じる。筆者は、電流コラプスは GaN-HEMT 特有のものではなく、程度の差はあれ多くの化合物半導体デバイスで生じると考えている。ただ、GaN-HEMT は、マイクロ波帯(L 帯)向けデバイスで 50V、ミリ波帯向けデバイスで 30V 程度の動作電圧(ドレイン電圧 V_{ds})が印加される。この動作電圧は、商用 GaAs デバイスの一般的スペックである 10V を大きく上回る。この大きな動作電圧は電子のトラップ捕獲を促進し大きな電流コラプスを生じさせる。さらに、ミリ波デバイスでは、高い高周波性能を実現するために、ゲート電極長(L_g)を 0.1 μm 程度まで短縮する必要がある。ゲート長の短縮はゲート電極周辺の電界強度を増大させる。この高い電界集中も電流コラプスを生じさせる原因となる。

図8に電流コラプス発生メカニズムを示す。電流コラプスに関与するトラップとしては、①バルク内トラップ、②SiN/Barrier 界面トラップ、③SiN 表面トラップがある。本章における研究は、②SiN/Barrier 界面トラップ低減に寄与する。

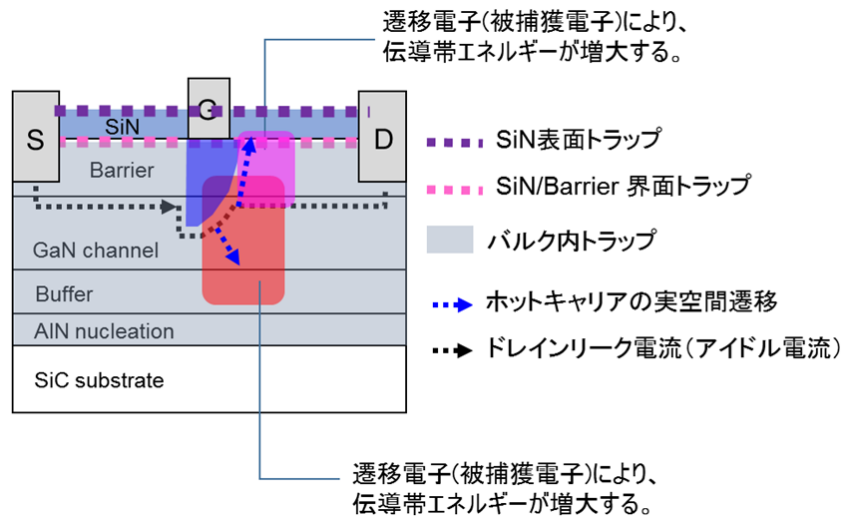


図 8 電流コラプス発生メカニズム

実験に用いた GaN-HEMT デバイスの表面は、窒化ケイ素膜で被覆されている。この窒化ケイ素膜は、主にプラズマ CVD により成膜される。プラズマ CVD を用いた窒化ケイ素膜成膜では、Si 原料として SiH_4 、N 原料として N_2 もしくは NH_3 を用いる。これらのガス比を変えることで、多様な窒化ケイ素膜を成膜することが出来る。すなわち、化学量論比(ストイキオメトリ)が成立しない膜さえも成膜出来ることを意味している。GaN-HEMT は、その目的に応じて最適な品質の窒化ケイ素膜を選択出来る。

本研究では、その目的を電流コラプスの低減としている。図 9 に、GaN-HEMT にストイキオメトリ窒化ケイ素膜を適用した場合(Low[Si-H])の、X 線光電子分光法(XPS または ESCA)による $\text{O}1s$ 信号スペクトルを示す。また、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜を適用した場合(High[Si-H])の、X 線光電子分光法による $\text{O}1s$ の信号スペクトルを示す。評価結果から、ストイキオメトリ窒化ケイ素膜を適用した場合、Si-O と Ga-O の結合の比率をそれぞれ計算すると、Si-O が 80%、Ga-O が 20%と定量された(垂直方向からの信号検出により得られたデータを波形分離)。一方、水平から 15° 傾斜した方向からの信号検出により得られたデータを波形分離すると、ほとんどの信号が Si-O を示しているとの結果になった。また、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜を適用した場合、Si-O と Ga-O の結合の比率をそれぞれ計算すると、Si-O が 100%と定量された(垂直方向からの信号検出により得られたデータを波形分離)。これは、Ga の酸化状態が解消されていること示している。参考データとして、水平から 15° 傾斜した方向からの信号検出により得られたデータを波形分離すると、ほとんどの信号が Si-O を示しているとの結果になった

評価結果から、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜は、半導体表面の Ga-O を低減することがわかる。Ga-O は酸化状態が不完全な場合、ダングリングボンド(電子トラップ)を形成し、電流コラプスの原因となる。さらに、定量性は高くないものの、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜は、Si の酸化を抑制していることが伺える。

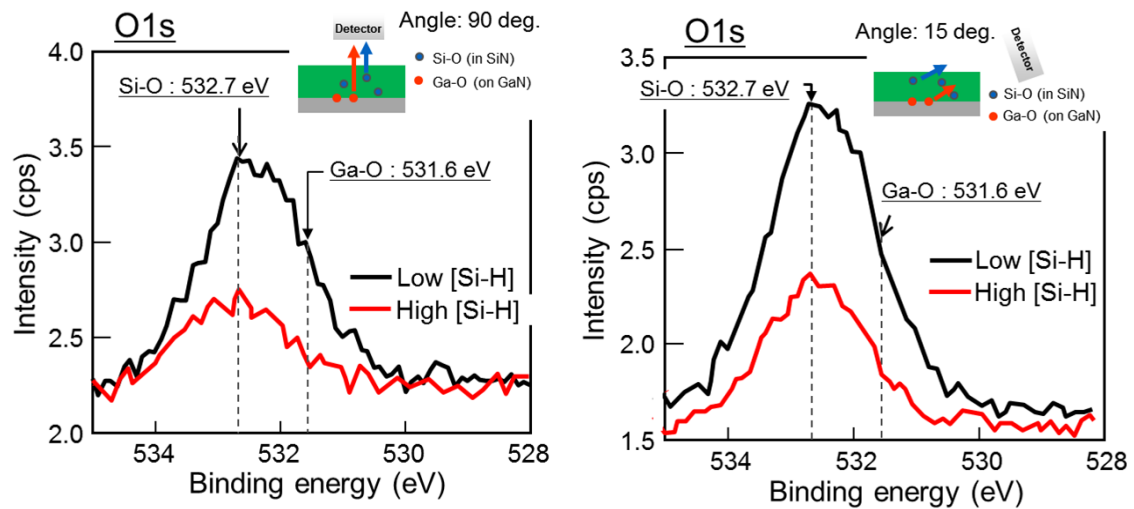
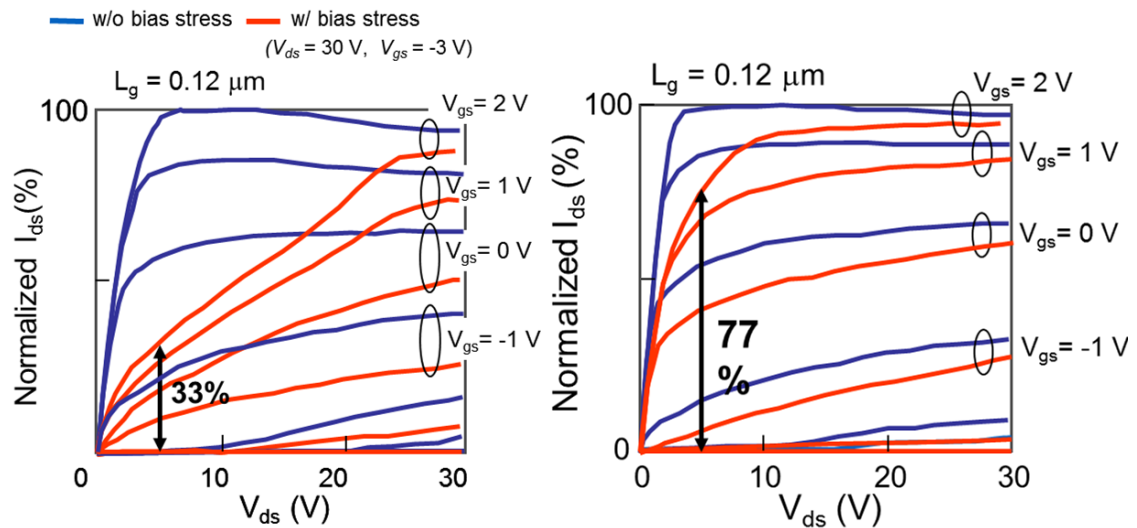


図9 O1s 信号スペクトルの SiN 品質依存性

図 10 に、GaN-HEMT にストイキオメトリ窒化ケイ素膜を適用した場合のパルス IV 特性および、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜を適用した場合のパルス IV 特性を示す。実験結果から、高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜を適用することにより電流コラプスが大幅に改善できることが実証された。



(a) ストイキオメトリ窒化ケイ素膜を適用した場合(Low[Si-H])

(b) 高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜を適用した場合(High[Si-H])

図 10 パルス IV 特性

3 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 表面パッシベーション技術

3-2 開発技術を用いた AlGaIn/GaN-HEMT MMIC による W 帯増幅器

我々は、低電流コラプスを実現するこの新規窒化ケイ素膜技術による出力特性改善実証実験を行った。前述したように増幅器実動作時の電圧ストレスは、Pulse-IV 評価時に用いられるオフストレス条件よりも大きい場合がある。さらに 75GHz の速い入力信号に対する電流コラプスの影響を厳密に評価することは困難であり、比較的能量準位の浅い電子トラップ濃度が高い場合、数十 GHz 帯での動作は大きな電流コラプスを引き起こす可能性がある。そのため、実際にミリ波帯増幅器 MMIC の試作を行ない、出力特性の評価を行った。なお、配線層間膜容量の影響による高周波特性の低下を防ぐために、配線はエアブリッジ方式を採用した。図 11 に試作したミリ波増幅器のチップ写真を示す。さらに、図 12 に出力特性を示す。75GHz での最大出力は 31.3dBm、出力密度で 1.3W/mm の優れた出力特性を得た。また、小信号特性評価から推測される帯域幅は 13GHz となり、広い帯域幅も確認された。

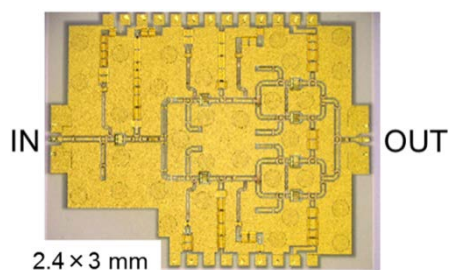


図 11 ミリ波増幅器 MMIC

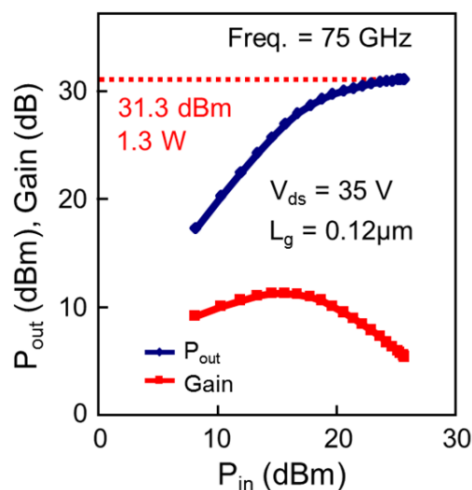


図 12 パワー特性

図 13 にベンチマークを示す。ベンチマークでは、作製したミリ波増幅器 MMIC の出力特性と、他研究機関から発表されている出力データとを比較した。今回実証した出力特性は、他機関からは発表されている増幅器の出力と比較して大きいことがわかる。

以上、筆者らは、ここまでミリ波 GaN-HEMT 向け適正エピ構造、デバイス構造および好適窒化ケイ素膜技術を開発し、2010 年時点で世界最高出力を有するミリ波増幅器の性能実証実験に成功した。

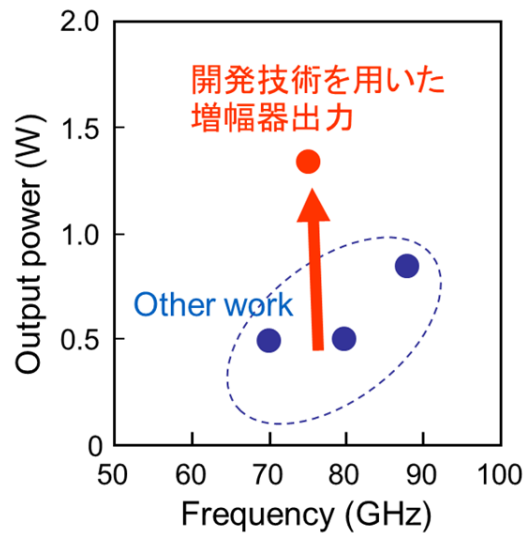


図 13 ミリ波増幅器ベンチマーク

4 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 高性能化技術の開発

4-2 コラプス抑制デバイス構造設計技術(オフセットオーバーハングゲート電極)

ミリ波増幅器向けデバイスでは、ソースフィールドプレート等の電流コラプスを緩和する手段を採用することが出来ない。少なくとも現段階ではミリ波増幅器向けデバイスへの配線層間膜適用は、高周波特性を維持の観点から困難である。一般的には、ゲート長 L_g の短縮により高周波特性を向上させることは出来るが、GaN-HEMT 等の高出力デバイスの場合、ピンチオフ性能の維持、ゲート電極端電界集中、長ゲート幅 W_g デバイスの歩留まり維持、ゲート抵抗の増大による f_{max} の低下などの影響のため、安易に配線層間膜による高周波特性低下をゲート電極の微細化で解決をすることが難しい。

本研究では、配線層間膜を用いるソースフィールドプレートの代わりに電流コラプスを抑制する手法について、実試作による実測データおよびデバイスシミュレータを用いた効果検証結果について論ずる。

筆者は、図 14 に示すオフセットオーバーハングゲート電極構造によりゲート電極端での電界集中が緩和され、電流コラプスの緩和や信頼性の向上が実現すると考えた。

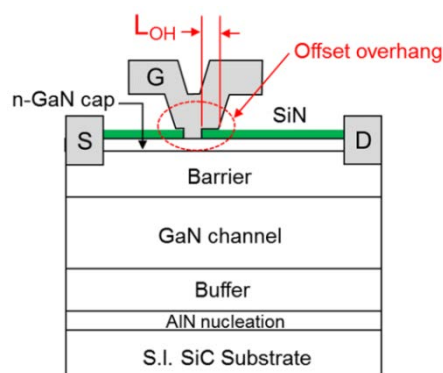


図 14 試作したデバイス構造

一般論として、オーバーハング量 L_{OH} が大きくなると、ゲート電極端の電界集中が緩和されて電流コラプスが改善する。この電界集中緩和効果を検証するために、デバイスシミュレーションによる電界強度計算を実施した。電界強度分布のゲートオーバーハング量 L_{OH} 依存性を、図 15 に示す。ピンチオフ状態での電界強度分布の計算であるため、簡便なドリフト拡散モデルで計算を行った。計算結果から、オーバーハング量 L_{OH} の増大に伴ってゲート電極ドレイン端の電界強度が低下しているのがわかる。GaN キャップ内および AlGaIn 障壁層内部ともに電界強度の低下が見られ、電流コラプス改善に効果を発揮すると考えられる。

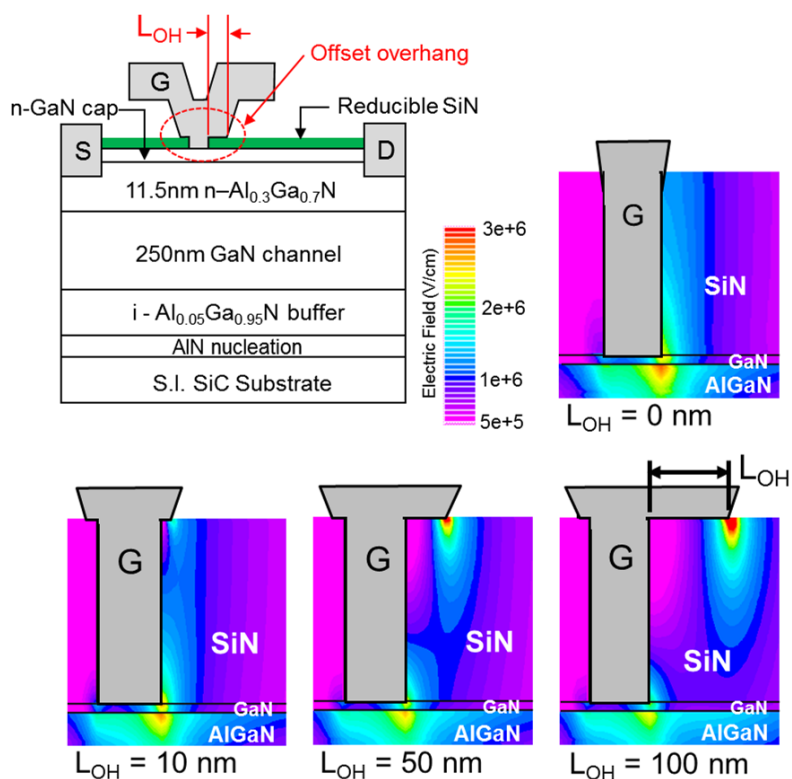


図 15 オフセットオーバーハングゲート電極による効果計算結果

さらに、デバイスシミュレータを用いた過渡応答計算により、電流コラプス(ドレイン電流の過渡応答特性)の評価を行った。図 16 に過渡解析に用いたオフストレス波形を示す。電子トラップは、図 17 に示すように、半導体表面から 100nm の範囲に、伝導帯端から 0.6eV のバルク部電子トラップ(離散準位)が $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の濃度で存在するについて計算を実施した。図 18 にドレイン電流の過渡応答計算結果を示す。これらの計算結果は、オフセットオーバーハングにより所謂電流コラプスが改善することを示している。

$$\text{Current collapse ratio} = \frac{I_{ds} @ V_{ds} = 5 \text{ V w/ Bias stress}}{I_{ds} @ V_{ds} = 5 \text{ V w/o Bias stress}}$$

Bias stress: $V_d = 30 \text{ V}$, $V_g = -3 \text{ V}$

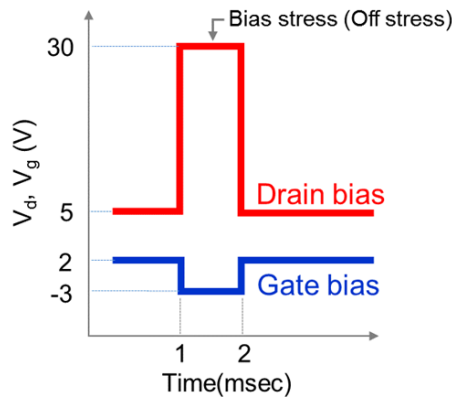


図 16 オフストレス

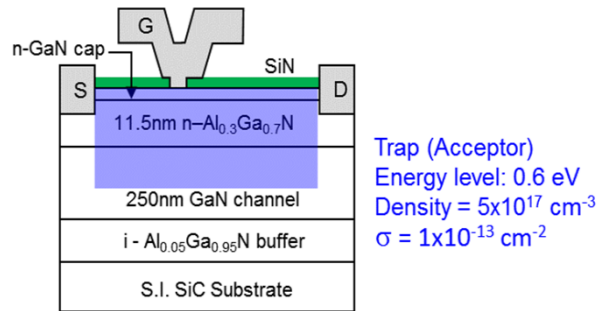


図 17 トラップモデル

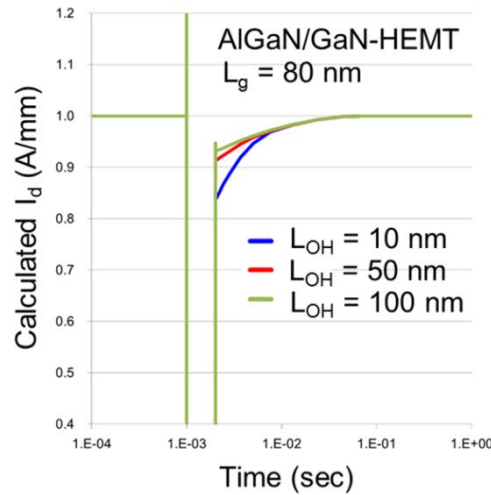


図 18 ドレイン電流過渡応答特性計算結果

さらに、図 19 に、実測電流コラプスのオフセットオーバーハング量 L_{OH} 依存性評価結果を示す。実験結果から、オフセットオーバーハング長 L_{OH} が長くなると電流コラプスが改善し、その効果は、 L_{OH} :10nm 当たり電流コラプス 1%程度の改善効果であることが分かつ

た。これは、ゲート電極端の電界強度の低下に伴い、その下の半導体内部での電界強度も同時に緩和され、コラプス改善につながったと考えている。これらの計算・実測結果から、オフセットオーバーハング構造は、ゲート電極ドレイン端の電界強度緩和に効果的であり、かつ電流コラプスを改善することがわかった。

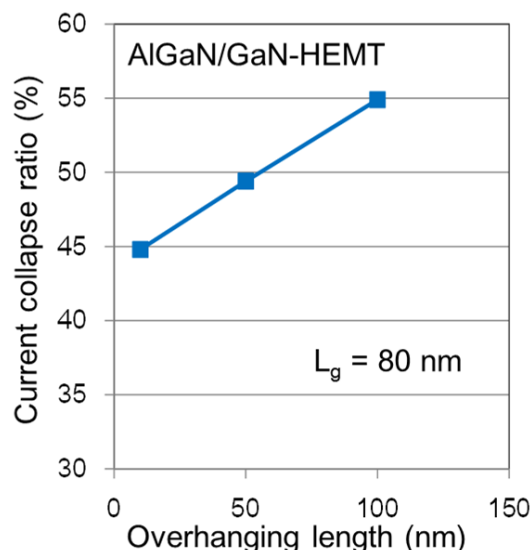


図 19 電流コラプスのオーバーハング量依存性

4 ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 高性能化技術の開発

4-3 InGaIn バックバリアの効果検証

筆者は、さらなるショートチャネル抑制効果と電流コラプス抑制を両立するバックバリアの探索を続けている。本章では、新バックバリア候補としての InGaIn バックバリアの効果について検証した結果について論じる。本実験では、UCSB の研究グループより発表されていた逆ピエゾ効果を利用した InGaIn バックバリアの構造設計を実施し、開発ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT への適用を試み、ミリ波増幅器向けデバイスとしての可能性を評価した。

参照した他機関業績: T. Palacios et al., "AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors With InGaIn Back-Barriers," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 27, no. 1, pp.13-15, 2006.)

図 20 に、設計・試作した InGaIn バックバリア構造デバイスのピンチオフ特性を示す。実験結果が示すように、InGaIn バックバリアは AlGaIn バックバリアと比較して優れたショートチャネル抑制効果を呈することがわかった。さらに、図 21 に実測コラプス率のゲート長依存性を示す。AlGaIn バックバリアと比較して、実効的なトラップ総量が少ないと推測される(詳細説明省略)InGaIn バックバリア品は、良好なコラプス特性を示した。

これらの実験結果から、ミリ波増幅器向けデバイスへの InGaIn バックバリア適用は効果

的であると結論した。

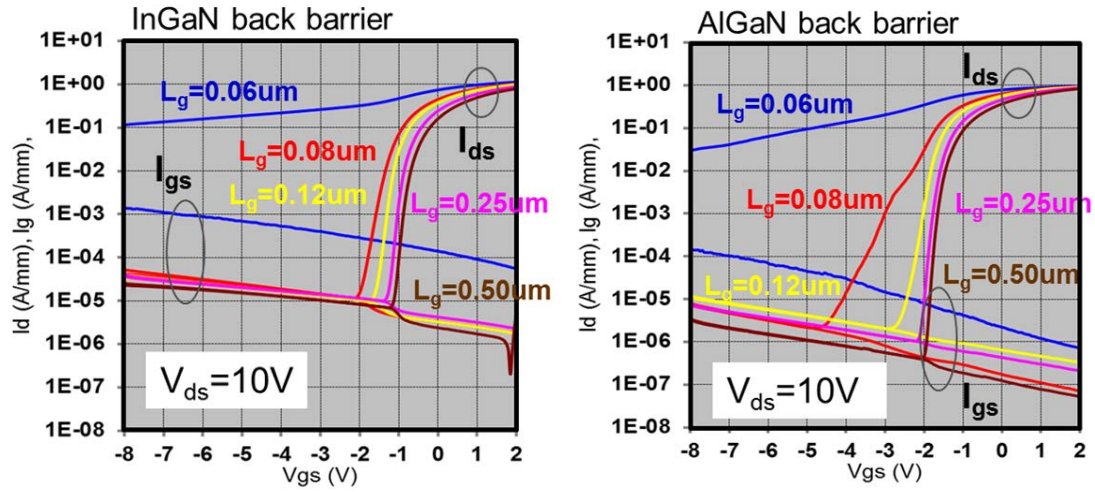


図 20 ピンチオフ特性のバックバリア依存性

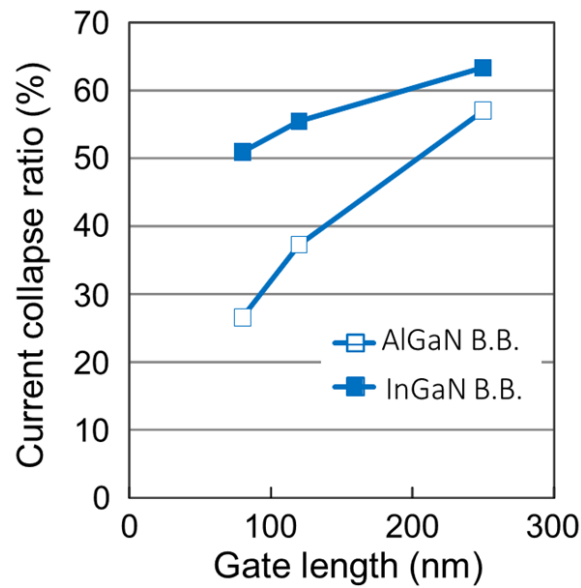


図 21 電流コラプスのバックバリア種依存性

5 高出力化を実現する次世代 InAlGaN/GaN-HEMT 技術

5-1 InAlGaN/GaN-HEMT の選択

筆者らの開発技術は、これまで AlGaN/GaN-HEMT を用いて 1.3W/mm@75GHz の出力特性を実現してきた。しかしながら、より遠距離の無線通信をより小さなアンテナで実現するには、さらに大きな出力密度が必要である。また、高いデータレートを実現するため

には、優れた高周波特性を同時に実現する必要がある。筆者は、当面の出力目標を現行放熱技術限界を加味し 3-4W/mm 程度と設定した。また、想定動作周波数も大気による電波吸収が顕著になる前の 100GHz 程度での増幅器動作を目標とした。

これらの目標を達成するために、筆者らは In 系窒化物半導体を障壁層とする HEMT の研究開発を開始した。研究開発では、窒化物半導体特有の電流コラプス緩和技術をはじめとする新規技術開発を実施した。

高い自発分極を有し、多くの 2 次元電子ガス(キャリア)を生成することが可能な InAlN は、デバイスの高出力化の観点から非常に注目されている。さらに、自発分極によるキャリア生成は、非常に薄いバリア層を用いた場合も、十分に高いキャリア濃度を得られるメリットがある。これは、微細ゲート電極を有する高周波トランジスタのショートチャネル効果抑制の観点からは、非常に大きなメリットである。ショートチャネル効果は、ゲート電極の微細化にともなうドレインリーク電流増加として顕在化する。これは、増幅器の効率低下やオフ耐圧の低下原因となり、高出力化の阻害要因になる。さらに、In 組成 17-18% の InAlN/GaN-HEMT は、GaN チャネルと格子整合する(一般的な MOCVD 製 InAlN/GaN-HEMT で採用されている AlN 中間層の影響は無視とした場合)。格子整合系のメリットは、ヘテロ界面での低ストレスによる電子散乱影響緩和、歪による結晶の物理的劣化の抑制、歪による InAlN 層内および表面の欠陥密度低減効果などが期待できると筆者は考えている。

しかしながら、現状の InAlN/GaN-HEMT には結晶成長上の課題がある。広く研究されている基本構造では、電子の走行するチャネル層は GaN で構成される。この GaN チャネル及びその下部のバッファ層は、相対的に高温で成膜される。一方、InAlN 成膜に適切な温度は、GaN チャネル等の成膜温度よりも数百度低い。実際の結晶成長では、GaN チャネル成膜後 AlN 中間層を成膜し、一旦表面を保護する。この状態で、InAlN 成膜適正温度まで降温させ、降温後 InAlN を成膜する。InAlN の上部に再度 GaN(キャップ層)を成膜するためには再度成膜温度を高める必要があるが、InAlN の結晶品質を保つことが出来ず、酸化の影響を受けやすい InAlN が最表面となる。これが、結晶成長上の課題の一つである。さらに、InAlN 障壁層の成膜自体の高い難易度が、結晶成長上の課題の二つ目である。結晶成長では一般的に MOCVD 法が用いられる。MOCVD 法では、成長条件の観点から InN と AlN には大きな適正成長条件の隔たりがある。同時に高い品質を得られる成長条件ウィンドウが非常に狭いことが知られている。そのため、現状では高品質な InAlN は得られていない状況である。

そのため、筆者は InAlGaIn/GaN-HEMT の開発に注力した。図 22 に InAlN/GaN-HEMT および InAlGaIn/GaN-HEMT の表面モフォロジー(AFM)および 2 端子順方向ゲート特性を示す。

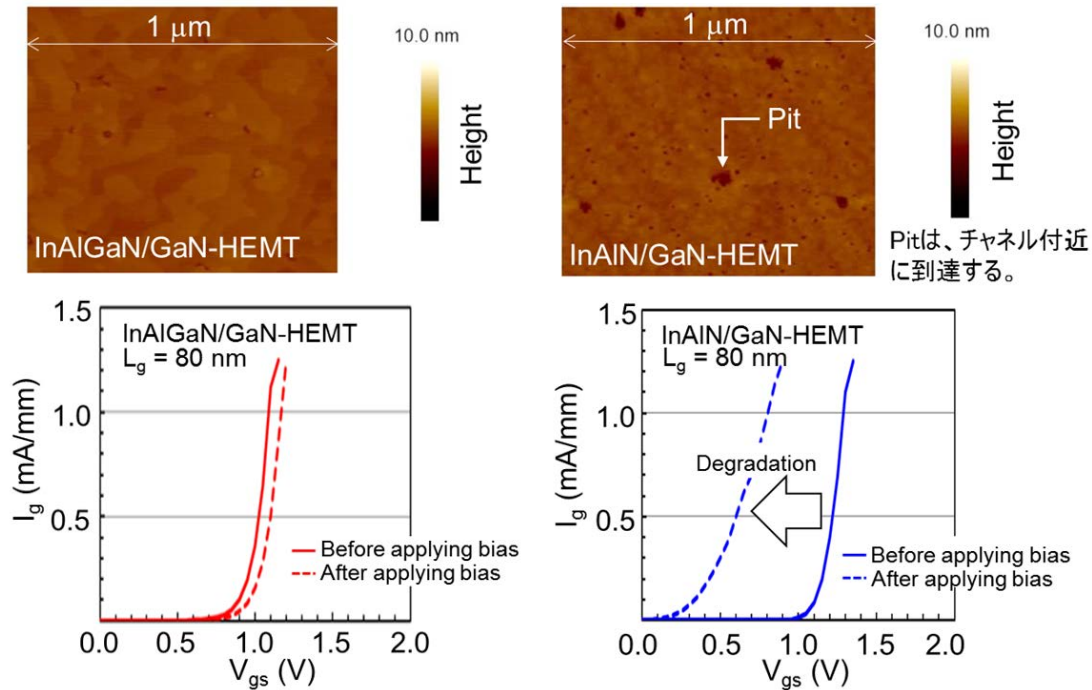


図 22 表面モフォロジーおよび2端子順方向ゲート特性

実験結果から、現状の InAlN/GaN-HEMT の表面には、多くのピットが存在し、かつ電圧電流ストレス(最大 $V_{ds}=20V$, 最大 $V_{gs}=+2V$, 最大 $I_{ds}=1.5A/mm$ 程度)で、ショットキー界面が劣化することがわかる。一方、InAlGaN/GaN-HEMT では、表面ピットおよびショットキー界面の劣化が観測されなかった。これらの実験結果から、筆者は W 帯増幅器向けデバイスとしては、InAlGaN/GaN-HEMT が優位であると結論した。

5 高出力化を実現する次世代 InAlGaN/GaN-HEMT 技術

5-2 低トラップ表面保護膜

GaN-HEMT を用いた増幅器では、電流コラプスが出力を低下させる。特に、半導体表面を覆う例えば窒化ケイ素(SiN)膜の電子トラップは、電流コラプスの原因となる。前述した高 Si-H 基濃度窒化ケイ素膜は、GaN キャップ表面に形成される不完全な状態の酸化膜を絶縁膜自体および成膜雰囲気の水素により還元し電流コラプスの低減に成功したが、電流コラプスを完全に抑制するには至っていない。一方、ゲート長の短縮や高電流密度構造による低シート抵抗化は、ゲート電極端における電界強度を増大させる。この観点からは、100GHz 程度での動作を目指す In 系窒化物半導体では、さらなる電流のコラプスの抑制が必須となる可能性がある。

本研究では、半導体表面を覆う絶縁膜中および絶縁膜表面トラップの低減を目的とした新規絶縁膜技術の開発に着手した。まず、新規絶縁膜技術開発にあたり、課題の整理を行

なう。半導体表面を覆う絶縁膜は、空气中で酸化を起こす。前述したように、この酸化現象は、絶縁膜表面での Si-N 結合の破壊をおこし電子トラップを生成すると考えている。さらに、筆者の経験上この酸化は絶縁膜内部に浸透し、絶縁膜全体で電子トラップを生じさせる。そのため、半導体表面を覆う絶縁膜の品質としては、耐酸化性が大きな要素になると筆者は考える。耐酸化性は、絶縁膜表面が酸化しないこと、および酸化が絶縁膜内部に浸透しないことを両立する必要がある。

筆者は、この 2 つの性質を満たすために、プラズマ CVD を用いた窒化ケイ素 SiN 膜の成膜条件を最適化することにより耐酸化性膜を得た。開発した耐酸化性膜の深さ方向-酸素濃度プロファイルを、2 次イオン質量分析法(SIMS 法)を用いて評価した。分析結果を図 23 に示す。

従来、半導体表面の被覆に用いていた窒化ケイ素膜と比較して、開発した耐酸化性を有する窒化ケイ素膜は、膜表面からの酸化が抑制されていることが分かる。さらに、開発した耐酸化性膜は膜自体に含有されている酸素濃度が低いことが分かる。筆者は、この分析結果が示す膜性質は、前述した酸化による電子トラップ形成を抑制すると考えている。さらに、耐酸化性窒化ケイ素膜の電子トラップを定量的に評価するために、電子スピン共鳴法(ESR)により分析した。分析結果を、図 24 に示す。本分析手法では、マイクロ波の磁界強度変化時の吸収スペクトル積分値から、ダングリングボンド濃度を定量することが可能である。分析結果から、従来の窒化ケイ素膜のダングリングボンド濃度が $4.6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ であるのに対して、開発した耐酸化性窒化ケイ素膜では $2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ であり、50%以上のダングリングボンド低減効果が確認できた。ここで定量されたダングリングボンドは、窒化ケイ素膜中の不対電子を示しており、電子トラップとして作用すると考えている。

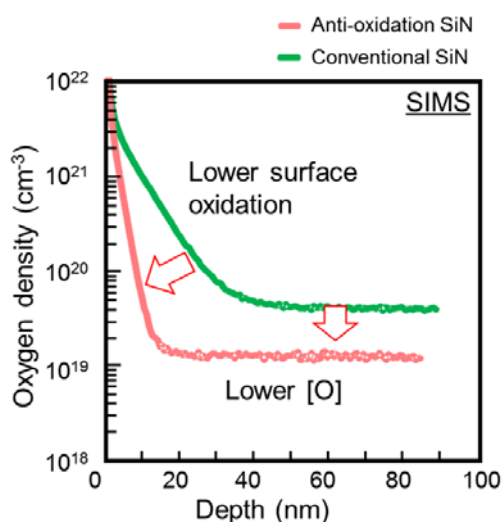


図 23 SIMS 分析結果

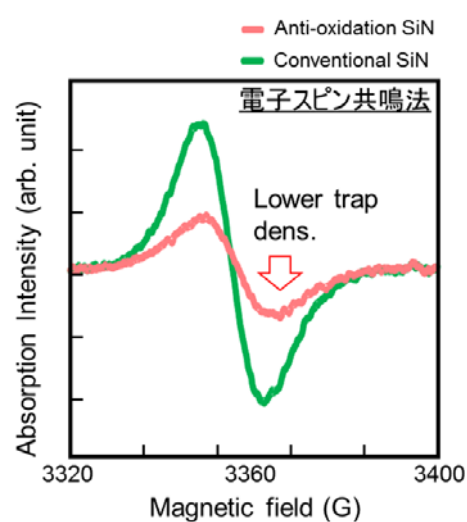


図 24 ESR 分析結果

これらの実験結果から、開発した耐酸化性窒化ケイ素膜は、それ自体の酸化を防ぎ、か

つダングリングボンド濃度が大幅に低減されていることが証明された。本来、ミリ波デバイスは、高周波特性を維持するために、配線層間膜を用いないエアブリッジ配線を用いることが多い。そのため、本耐酸化性窒化ケイ素膜は、実質的にデバイス最表面となり、窒化ケイ素膜の耐酸化性は非常に重要な要求性能となる。

5 高出力化を実現する次世代 InAlGa_N/Ga_N-HEMT 技術

5-3 InAlGa_N/Ga_N-HEMT の電気特性

今回のデバイス開発で採用したデバイス構造を図 25 に示す。半導体表面を被覆する絶縁膜は、前章で報告した半導体表面酸化物の還元作用がある高 Si-H 基濃度窒化ケイ素(還元性窒化ケイ素)膜と耐酸化性窒化ケイ素膜の積層構造を採用した。この 2 層窒化ケイ素膜は、半導体表面の還元作用と、膜自体の酸化防止を両立し、電子トラップの低減や生成抑制を実現する絶縁膜構造である。なお、耐酸化正窒化ケイ素膜は、下層の還元性窒化ケイ素膜の酸化も防止することかが期待できる。これらの効果により、電流コラプスを安定して抑制できると考えている。

さらに、このデバイス構造では、ゲート電極端の電界強度の低減を目的にオフセットオーバーハング構造も採用した。また、障壁層には、電流密度向上を目的に InAlGa_N 障壁層を用いた。この InAlGa_N 障壁層を採用した InAlGa_N/Ga_N-HEMT のシート抵抗は、InAl_N/Ga_N-HEMT のシート抵抗を同程度になるように Al 組成および障壁層膜厚を調整した。

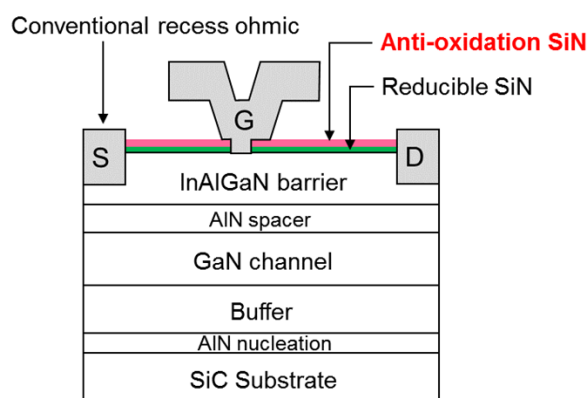


図 25 開発した InAlGa_N/Ga_N-HEMT

2 層窒化ケイ素膜の効果を調べるために、InAlGa_N/Ga_N-HEMT および従来の AlGa_N/Ga_N-HEMT のパルス IV 特性を測定した。測定結果を図 26 に示す。ゲート長は、W 帯で十分な利得をえるために 80nm とした。また、増幅器の動作から必要な最低限のオフストレスとして、 $V_{ds}=20V$, $V_{gs}=-3V$ とした。測定結果が示すように、両材料系ともに改善が認められるが、AlGa_N/Ga_N-EHMT では Knee 電圧付近で比較的明確な電流コラプスがみとめられる。一方、InAlGa_N/Ga_N-HEMT では Knee 電圧付近での電流コラプスも比

較的抑制されている。Knee 電圧付近の電流コラプス低減により、電流・電圧スイング幅が拡大し増幅器の高出力化を実現する。

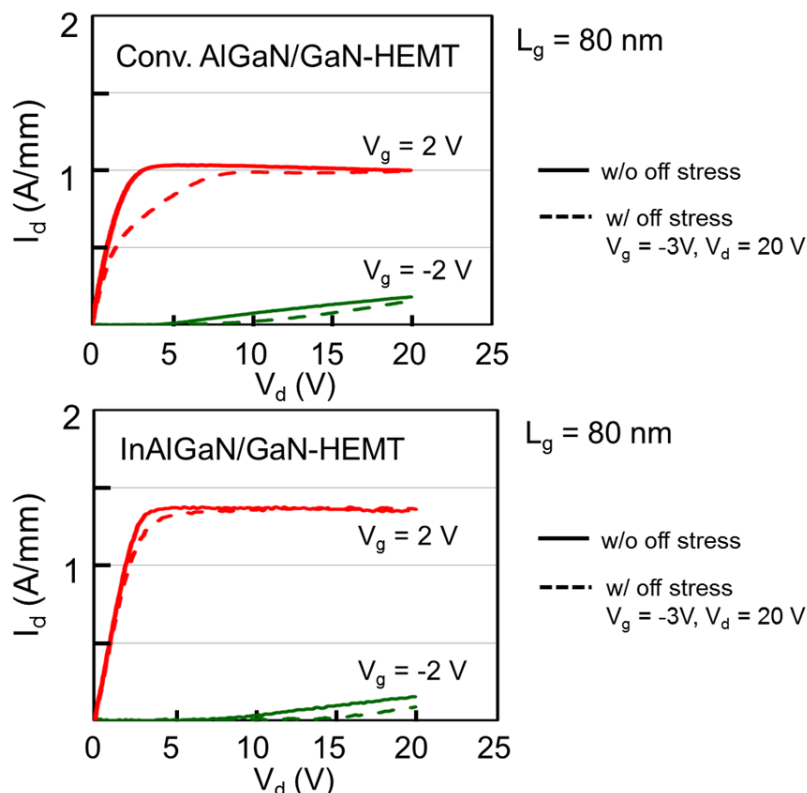


図 26 パルス IV 特性

次に、開発した InAlGaIn/GaN-HEMT の出力特性をロードプル法により評価した。測定は、プリマッチ回路を持った HEMT デバイスで実施した。入出力特性を図 27 に示す。測定結果から、96GHz において、3.0W/mm の優れた出力密度が実証された。なお、本測定においては、明確な出力飽和領域まで測定が出来なかった。これは、入力信号側のアンプの性能(周波数特性)に律速されたもので、実際の出力密度(飽和出力密度)は、さらに高められると考えている。図 28 に、開発デバイスの出力特性と、他研究機関から報告されているディスクリットデバイスまたは MMIC の出力密度のベンチマークを示す。図中点線は、他機関から発表されている出力密度データを 6dB/oct の傾きで結んだものである。周波数-出力密度の場合、この線は明確な物理的意味を主張できないが、間接的には一定の傾向を示すと考えている。ベンチマーク結果から、開発したデバイスの出力密度は、W 帯 (75GHz-110GHz)において、大幅な出力密度の向上を成し遂げたことが分かる(2016.6 現在)。

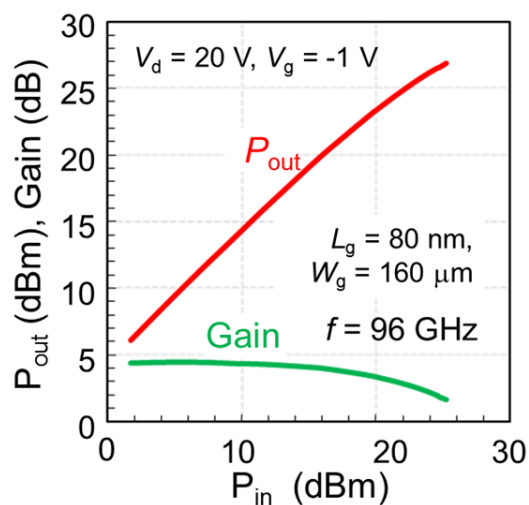


図 27 単体 HEMT 出力特性

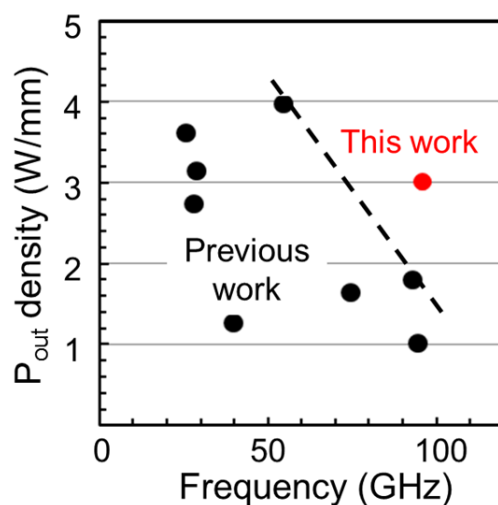


図 28 ベンチマーク

さらに筆者らは、開発した InAlGa_N/Ga_N-HEMT を用いて W 帯増幅器 MMIC を試作し、出力特性の評価を行った。作製した W 帯増幅器 MMIC は、2 ステージカスケードユニットから構成させる。この増幅器は、高ゲイン、低ロスマッチング回路を有している。評価結果から、作製した増幅器 MMIC は、86GHz かつ CW 信号条件に、最大出力 1.15W、最大出力密度 3.6W、最大 PAE(効率)12.3%を実証した(図 29 参照)。さらに、図 30 に、これまでに他機関から発表された出力特性と比較したベンチマーク図を示す。作製した増幅器 MMIC は、2016.6 月現在で最も優れた出力特性を CW 動作モードで実現したことがわかる。

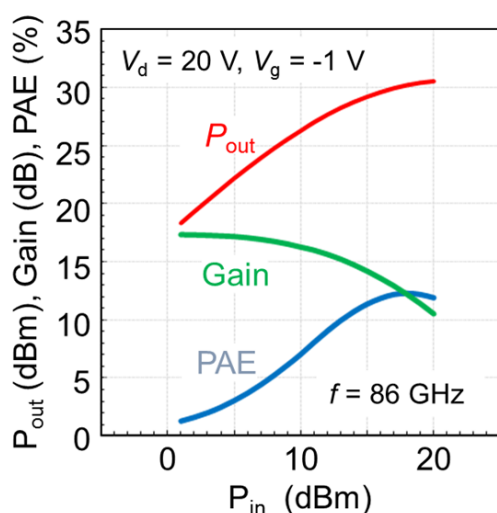


図 29 MMIC 出力特性

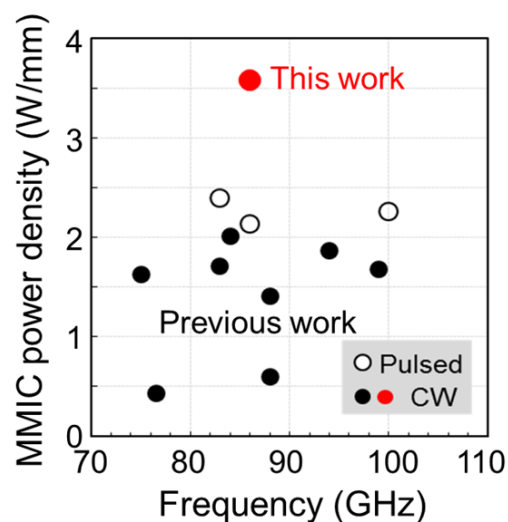


図 30 MMIC ベンチマーク

以上、本研究開発技術を用いた InAlGa_N/Ga_N-HEMT は、優れた出力特性を実現した。

さらに筆者は本研究で、InAlGaN/GaN-HEMT 構造の物理的優位性や、増幅器動作状態で電流コラプス影響について、デバイスシミュレータを用いた解析を行った。詳細については、本論文内で論述する。

8 結論

筆者は、2005 年より今日までの研究で、GaN-HEMT のミリ波無線通信用途およびレーダー用途での利用を目指し、GaN-HEMT 向けデバイスプロセス開発、デバイス・エピ基本設計、ゲート構造開発、絶縁膜改善、新規障壁層材料の適用による高電流密度化等により、世界最高出力密度を達成するデバイス技術体系を構築した。この研究成果は、学会内で高い評価を受けるとともに、コンシューマ側からも一刻も早い製品化が期待されている。

さらに、2012 年からは大学研究室での作業を中心に、デバイス開発にデバイスシミュレーションの技術を適用し、効率的かつ迅速な研究開発手法を構築した。GaN-HEMT 特にミリ波系のデバイスにデバイスシミュレーションを適用している少ないケースとして、高い達成水準に到達したと考えている。また、これらの研究において主導的に研究開発を進め、多くの基本的部分でのデバイス特許の出願に至った。

本論文の結びに際し、本研究で成し遂げた研究成果について概要を綴る。

【ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT 研究・開発】

2005 年以降、筆者らは AlGaIn/GaN-HEMT の基本構造決定や出力特性改善技術開発により、商用水準の AlGaIn/GaN-HEMT 増幅器 MMIC を実現した。

【ミリ波増幅器向け AlGaIn/GaN-HEMT のさらなる高性能化】

2012 年以降は、デバイスシミュレータ (TCAD) を用いた実測データ再現技術の研究を開始した。デバイス構造設計に TCAD 解析結果を反映させることにより、新規ゲート構造や新規バックバリア設計を行い、デバイスの高性能化を実現した。

【次世代ミリ波増幅器向け InAlGaIn/GaN-HEMT 研究・開発】

さらに 2014 年以降は、更なる高出力化のために、In 系窒化物半導体デバイスの開発に本格的に着手した。本研究では、デバイスシミュレーション技術を活用したデバイス内電子輸送特性解析により、電気特性上の優位性および限界についての知見を明示した。また、デバイス技術としては、電流コラプスを極限まで改善する多層絶縁膜技術を開発適用し、世界最高性能の HEMT および MMIC 増幅器の開発に成功した。

【デバイスシミュレータを用いた特性解析技術の研究・開発】

本件では、まず InAlGaIn/GaN-HEMT などの高電流デバイスに、特性解析上必要な各種物理モデルを入れ、計算を収束させる技術開発に取り組んだ。開発した技術(ノウハウ)を用い

て、増幅器動作状態での各種トラップの影響解析や、InAlGa_N/Ga_N-HEMT の物理的優位性に対する解析を行い、一定の理解に到達した。

最後に、序論で提示した研究ターゲットについて、達成水準を評価した。当初設定した周波数帯域での、高出力化を実現できた。しかしながら、出力目標上限は未達である。筆者らのこれまでの検討の結果、更なる高出力化には冷却技術の開発が不可欠であることが分かっている。今後は、冷却技術研究開発にも注目し研究開発を推進していく。

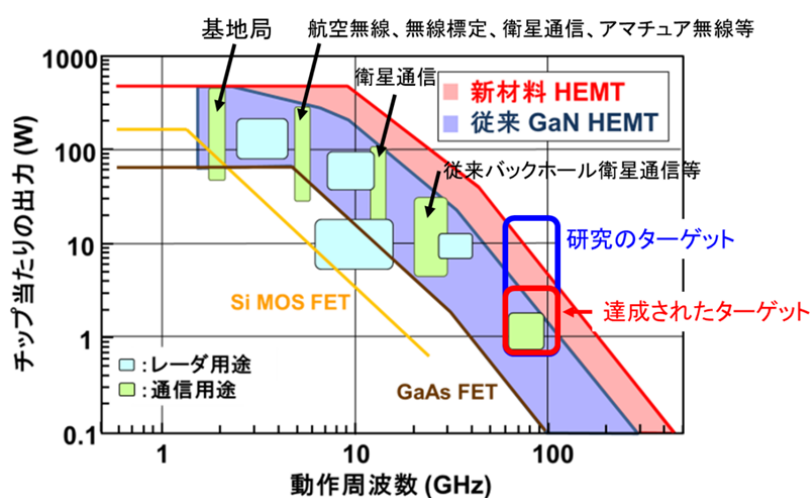


図 31 出力電力の動作周波数依存性

以上