

# 高周波増幅器向け高出力 GaN HEMT と その将来技術

High-Power GaN HEMT for High-Frequency Amplifiers and Its Future Technologies

牧山 剛三\*  
Kozo Makiyama

吉田 成輝  
Shigeki Yoshida

中田 健  
Ken Nakata

情報通信システムは、私たちの社会を支える重要なインフラである。特に電波を用いた無線通信技術は、直近の30年あまりで著しい進歩を遂げ、地上通信では高速データ通信や低遅延を実現する第五世代（5G）サービスが2020年より開始された。一方で、その通信ネットワークは、海洋、宇宙にまで広がり始めている。当社は、この通信インフラを支える伝送デバイス（光通信向けデバイス、無線通信向けデバイス）の開発・製品化を通じて、社会に貢献してきた。無線通信基地局向けキーデバイスである GaN HEMT は、当社が世界で初めて量産・製品化に成功し、現在では世界トップシェアカンパニーとしての地位を確立した。本論文では、GaN に代表される化合物半導体デバイスとその応用の黎明期から現在の GaN HEMT 増幅器、そして将来技術として不連続な性能向上を目指した新規の結晶成長技術やデバイス技術について論述する。

Intelligent communication technology is an indispensable part of the infrastructure that supports modern society. In particular, wireless communication systems using high-frequency radio wave carriers have made remarkable progress in the last 30 years. In 2020, 5th generation services started to realize high-data-rate transmission and low signal latency. The environments in which wireless communication networks have begun to operate have expanded to include the open sea and low earth orbit. Up to date, we have developed many kinds of commercial transmission devices for optical wired and wireless communications. We were the first company in the world to successfully mass produce and commercially ship Gallium Nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs), a key device for cell phone base stations, and have the top market share. This paper describes compound semiconductor devices represented by GaN HEMTs and novel crystal and device technology for discontinuous performance enhancement.

キーワード：モバイルネットワーク、GaN HEMT 増幅器、高周波高出力増幅器、エピ結晶、窒素（N）極性

## 1. 緒言

私たちの日常生活は大量の情報通信により成り立っており、情報機器やセンサー等がインターネットで接続される IoT 技術は、私たちの生活の中核技術に発展しようとしている。この情報通信の進歩は、1980年代より始まったインターネット、衛星放送サービス、携帯電話サービス等、私たちの生活様式を変化させるほど影響が大きいものであった。特に1980年代後半から始まった、インターネットや衛星放送サービスでは、同じ情報を瞬時に世界中に伝播させることが可能になり、社会の構造や国際関係をも変化させた。

ネットワーク向けに多様な光伝送デバイスを開発し、市場において大きなシェアを有している。また、電波を用いた無線通信ネットワークは、主に携帯電話（モバイル通信）サービス網のバックホールおよび基地局-端末間通信で構成される。ここでは、高出力性と高周波性を兼ね備えた増幅器向けデバイスが必須である。データトラフィックに関しては、従来の情報通信では、光ファイバーを用いた有線通信が主流であったが、モバイル端末の爆発的增加にともない無線通信によるデータトラフィックが、有線通信のそれを

## 2. 社会の中の情報通信

手段としての通信技術は、図1に示すように、主に光ファイバーを用いた有線通信ネットワークと高周波電波を用いた無線通信ネットワークの2つに大別される。

さらに、図2に具体的な製品群を示す。光ファイバーを用いた有線通信ネットワークでは、光ファイバーおよび光デバイスでメトロ・ブランチ網を構築し、そのバックボーンの通信速度は、100Gbpsから400Gbpsに高速化されようとしている。さらに近年では、データセンター間の通信需要が高まっており、その通信速度も同様に高速性が求められる。当社では、光ファイバーを中心とする有線通信

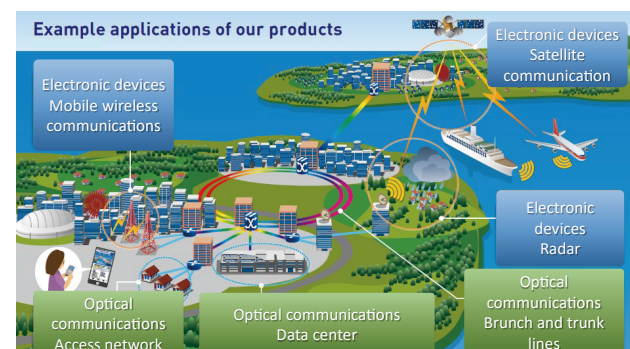


図1 有線および無線通信システムの概要

上回ってきた。本論文では、前述の通信技術の内、無線通信技術の発展とその発展を可能にした化合物半導体技術について論述する。

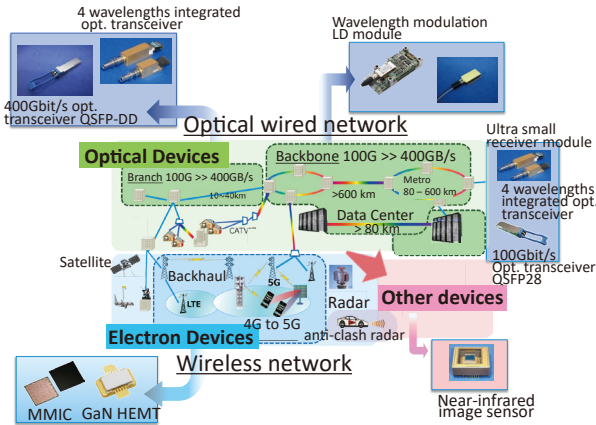


図2 通信システムと半導体伝送デバイス

### 3. 無線通信技術の発展

#### 3-1 高電子移動度トランジスタ (HEMT)

高周波電波を用いた無線通信では、高いデータレートを実現するために、高周波・高出力特性に優れた半導体デバイスが必要であり、1980年に当時の(株)富士通研究所の三村氏により開発された高電子移動度トランジスタ (HEMT)<sup>\*1</sup>は、現在の無線通信を支えるキーデバイスである。このデバイスは、図3に記載するように、電子を発生される領域(ドーピングまたは分極差)と電子が走行する領域が分離され、異種接合界面(ヘテロ接合界面)に発生した二次元電子ガス(2DEG)<sup>\*2</sup>が不純物により散乱されず、電子が移動する速度が速い特徴を持っている。前者の特徴はトランジスタが発生するノイズを低減し、後者の特徴は高周波信号の増幅性能を向上させる。

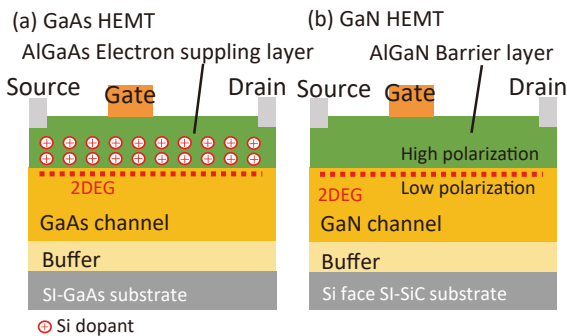


図3 HEMT 概念図

#### 3-2 衛星通信 (衛星放送の開始)

前述したようにHEMTは、低雑音・高周波動作に優れている。したがって、衛星からの微弱電波を増幅する低雑音検出器として好適である。このHEMTの低雑音性が衛星放送受信用パラボラアンテナに採用された。この新技術の採用により、従来は1m以上のサイズであったパラボラアンテナが、30cm程度まで小型化できた。そのため、多くの家庭のベランダに設置でき、一気に普及した。このように、開発当初のHEMTは、主に微弱信号受信デバイスとして注目された。

#### 3-3 モバイル無線通信

現在ではGaN HEMT<sup>\*3</sup>に代表されるように、高周波高出力増幅器向けデバイスとして認知されている。図4に携帯電話の世代ごとの通信規格、通信速度および主に採用された半導体デバイスを示す。

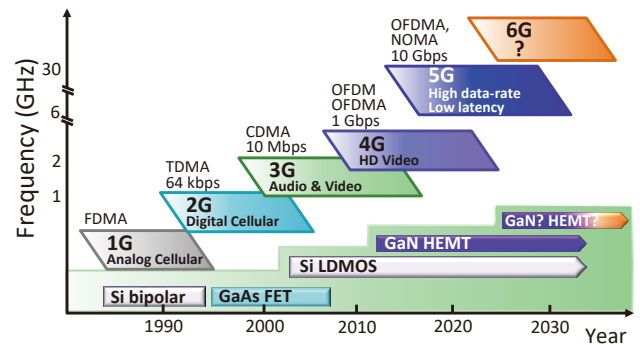


図4 モバイル通信システムと基地局用半導体デバイスの変遷

1990年代、アナログ方式による第一世代(1G)からデータ通信が可能な第二世代(2G)に移行した段階で、当時の自動車電話から個人が通信端末を持ち歩く携帯電話の時代が始まった。この世代から、高周波特性に優れたGaAsが基地局用増幅器として採用された。さらに、携帯端末を使用したAudioおよびVideo再生を可能とする第三世代(3G)システムでは、CDMA方式の採用により10Mbpsの高速通信が可能となった。この世代の基地局向け増幅器としては、Si LDMOSが先行採用されたが、第三世代後半および第四世代のキャリア周波数のハイバンド化に伴い、高周波特性および高出力性に優れたGaN HEMTが初めて採用された。このGaN HEMTは、2007年に当社(製造会社現・住友電工デバイス・イノベーション(株)SEDI)が世界で初めて製品化に成功した。このGaN HEMTは前述の利点に加え、GaAs HEMTまたはSi LDMOSを用いた増幅器と比較して出力密度および電力効率が優れていた。図5にその効果を概略的に示し解説する。

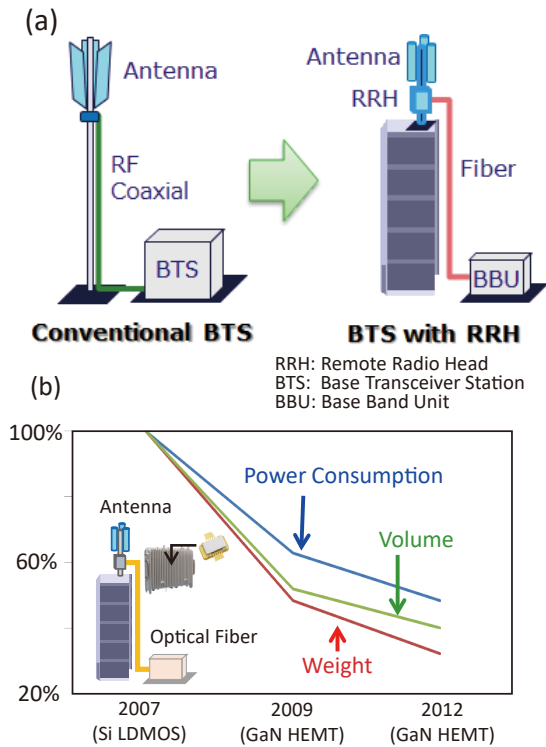


図5 GaN HEMT 増幅器の採用による基地局ユニット体積、重量および消費電力の削減効果

GaN HEMT を用いた増幅器は、効率がよく廃熱が相対的に少なくヒートシンクの小型化を可能にした。これらの効果により、従来の Si LDMOS と比較して、電力消費量で 50% 減、体積で 60% 減、重量で 70% 減の大幅削減に成功した。体積・重量の低減により、ビル等の屋上に設置できる RRH の導入が進み、第四世代 (4G) 基地局敷設数が大幅に増加した。これと連動し、国内そして海外での GaN HEMT 増幅器の需要が大幅に増加した。そして、更なる高データレート (10Gbps) や低遅延を実現する第五世代 (5G) システムにおいても、更なる高周波対応、信号増幅品質改善を実現した上で、GaN HEMT は引き続き基地局用増幅器向けデバイスとして用いられている。第五世代 (5G) システムについては、その市場要求が成熟していない面もあり、このシステムに使用する半導体デバイスも開発途上と言える。筆者の見解として、第五世代 (5G) システムについては、規格の持つ性能を十分に活用するアプリケーションが、利用者側で十分に成熟していないと考えている。同様に、テラヘルツ波が初めて通信に用いられるであろう第六世代 (6G) システムも、半導体デバイスとしては、電波の浸透性の悪さをカバーする高出力性と高周波化の両立が難しく、開発上の大きなハードルとなると考えている。

## 4. 増幅器向け次世代デバイスの研究開発

### 4-1 N 極性 GaN HEMT

ここまで紹介した GaN HEMT は、半導体結晶表面に Ga 原子が並ぶ Ga 極性 HEMT である (図6 (a) 参照)。これまで、更なる高出力化、高周波化および結晶内部のトラップの影響で発生する過渡応答を抑制するための改良技術が開発されてきた。当社は、商品としての Ga 極性 GaN HEMT の性能向上に引き続き取り組むと同時に、2020 年からは、これまでの技術改良の延長線上にはない N 極性 GaN HEMT<sup>\*4</sup> の開発に着手した。図6 (b) に示すように、半導体結晶表面に N (窒素) が並ぶ構造である N 極性 GaN HEMT は、物性的にこれまでとは不連続の技術革新をもたらす可能性がある。

増幅器向けデバイスとしての N 極性 GaN HEMT の大きなアドバンテージは、図7 (a) のシミュレーション結果に示すように、構造上電子はバッファ方向に散逸せずチャネ

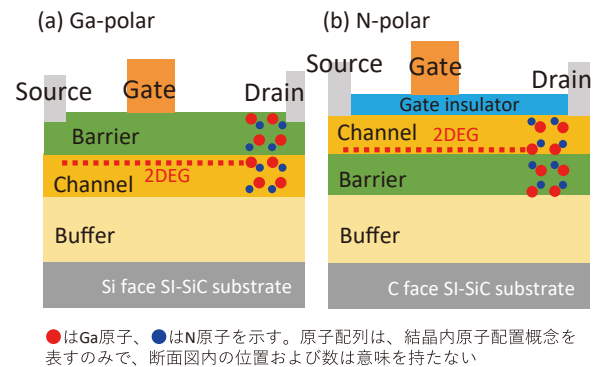


図6 Ga 極性 HEMT と N 極性 HEMT の違い

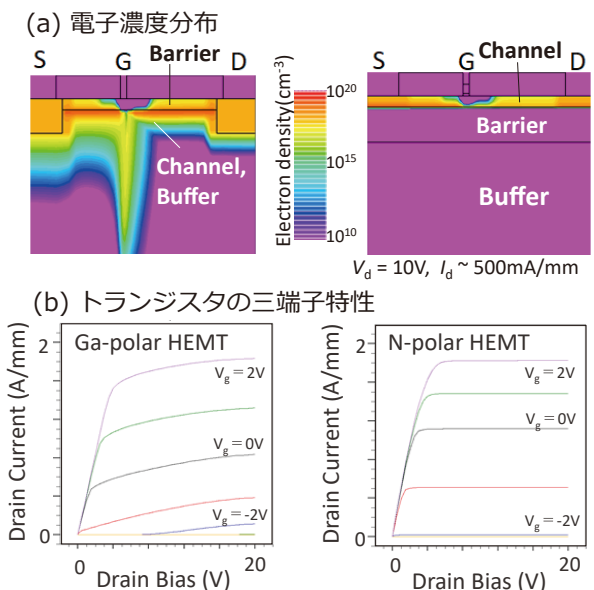


図7 シミュレーションによる特性予測および電子分布の計算



ル内に閉じ込められることである。これは、**図7 (b)** のシミュレーション結果が示すように、トランジスタの線形-飽和特性を改善し、ドレインコンダクタンス<sup>\*5</sup>を低下させ、電力利得遮断最大周波数 $f_{max}$ を改善する。**図8**に、試作デバイス実測による、Ga極性とN極性のドレインコンダクタンスの比較を示す。この特徴は、バッファ領域に残留する電子トラップの影響を遮蔽し、デバイスの過渡応答特性を改善すると予測している。

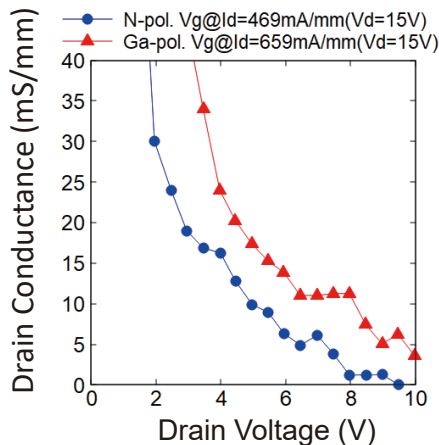


図8 実測によるGa極性とN極性HEMTのドレインコンダクタンス比較

#### 4-2 量産を睨んだプロセス開発

前述したように、N極性Ga<sub>N</sub> HEMTはデバイスの更なる高出力化、高周波化およびGa<sub>N</sub> HEMT特有のトラップによる過渡応答を低減するために有望視されている。ところが、半導体結晶表面に窒素原子が並ぶN極性Ga<sub>N</sub>結晶は、酸・アルカリ溶液・プラズマ照射処理等に耐性がなく結晶の損傷や電気特性の劣化を招く。これらの処理は、Ga極性Ga<sub>N</sub> HEMT結晶にはほとんど影響を与えない。この課題を解決するために、従来のGa極性Ga<sub>N</sub> HEMT量産プロセスの再設計・再構築を進め、量産設備を用いたN極性Ga<sub>N</sub> HEMTの試作に成功した。

#### 4-3 4インチN極性Ga<sub>N</sub> HEMTエビ技術

化合物半導体デバイスの性能は、Siデバイスと異なり、結晶（エビ）成長技術に大きく左右される。Siのような単結晶・単一元素結晶とは異なり、GaAsやInPは立方晶系閃亜鉛鉱型構造、Ga<sub>N</sub>は六方晶系ウルツ鉱型構造であり、2種類から4種類の元素から構成される化合物である。例えばGa<sub>N</sub> HEMTの場合は、Ga<sub>N</sub>とAlGa<sub>N</sub>のヘテロ接合によりバンドエンジニアリングが可能でHEMT構造を構成できる。

当社は、次世代製品開発のために、前述したN極性Ga<sub>N</sub> HEMTを、設計上は6インチまで対応できる有機金属気相成長法<sup>\*6</sup>により製造する技術を開発した。従来技術では、残

留キャリアとして素子間分離領域にも導電性を発現する不純物取り込みが多く、かつ結晶表面ヒロック（結晶欠陥）の発生が抑制できなかった。今回開発した結晶成長技術では、不純物の混入量を大幅に低減でき、その結果ヒロックの出ない結晶構造を採用できた（**図9**および**写真1**参照）。

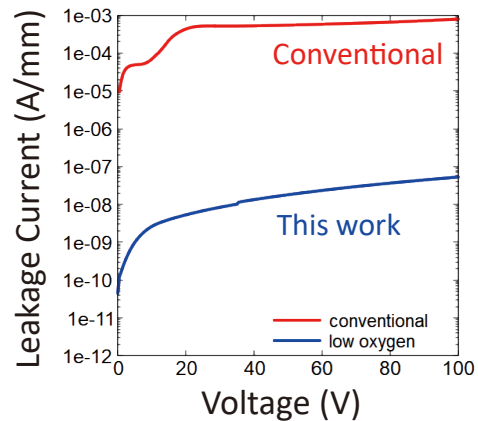


図9 不純物取り込み抑制技術による素子間分離部のリーク電流抑制効果

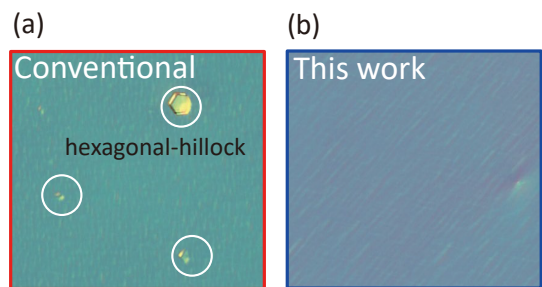


写真1 新規結晶技術によるヒロック低減

#### 4-4 新規MIS技術開発への挑戦

このN極性Ga<sub>N</sub> HEMT開発では、ゲート絶縁膜<sup>\*7</sup>技術が新たに開発された。開発で採用したMIS構造は、Metal（ゲート電極金属）-Insulator（ゲート絶縁膜）-Semiconductor（半導体）の積層構造を指す。電気的特徴から絶縁ゲートとも呼ばれる。ゲート絶縁膜部分が酸化膜（Oxide）の場合は、MOS構造とも呼ばれる。1980年代より、Si MOSFETと同様に、GaAsを用いたMOS FETやMIS HEMTの開発が盛んにおこなわれてきたが、GaAs等化合物半導体とゲート絶縁膜界面を中心としたトラップ準位の影響で、正常に動作するデバイスを作製することが困難であった。そのため、化合物半導体デバイスでは、半導体表面に直接ゲート金属材料を接合させるショットキー接合ゲート電極が採用されてきた。一方、N極性Ga<sub>N</sub> HEMTでは、**図6 (b)** に示したように高濃度2DEGが蓄積されたGa<sub>N</sub>チャネル上

にゲート電極が配置されるため、ゲートリーク電流が増大する物理上不可避な課題があった。この課題を解決するために、原子層堆積法 (Atomic Layer Deposition) を利用した高耐圧・高誘電 HfSiOx の開発に着手した<sup>(1)~(3)</sup>。この HfSiOx は、HfOx と SiOx の極薄膜多層ラミネート構造を堆積した後、堆積後熱処理により混合・原子結合再形成が進行する。図 10 に、Ga 極性 GaN HEMT 上に作製した HfSiOx 膜の誘電率および破壊耐圧測定結果を示す。開発した HfSiOx ゲート絶縁膜は、比誘電率 13.5、破壊耐圧 8.5MV/cm を実現した。これは、N 極性 GaN HEMT 先行研究で用いられてきた窒化ケイ素 (SiN) ゲート絶縁膜と比較して、比誘電率で約 2 倍、破壊耐圧でおよそ 1.2 倍の優れた性能である。一方、簡易的な評価手法ではあるが、Ga 極性 GaN HEMT の HfSiOx 界面電荷密度は、 $10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  程度と推定されている。今後高精度の測定手法により N 極性 GaN HEMT 上での検証も進める。

以上のように、ゲート絶縁膜に関しては開発途上であるが、ゲート絶縁膜の基本電気特性および後述する試作デバイスの出力特性から、従来は困難であった化合物半導体での MIS 構造に一定の実現可能性を見出したと言える。この技術は、ゲートリーク低減にとどまらず、入力インピーダンスの安定化やデバイス信頼性の向上の観点からも、注目される当社の独自技術である。

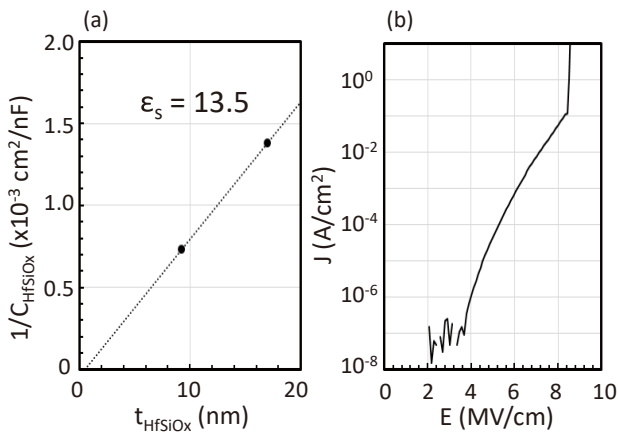


図 10 HfSiOx 膜の比誘電率および破壊耐圧測定

#### 4-5 製作した N 極性 GaN HEMT の電気特性

以上述べてきたように、4 インチ量産対応設備を用いた N 極性 GaN HEMT の試作に成功した。作製した GaN HEMT を写真 2 に示す。また、その出力特性を図 11 に示す。製作したデバイスは、N 極性 GaN HEMT としては、競合機関の先行研究と並ぶ、高出力 (8.09W/mm) を達成した。この研究開発では、従来の Ga 極性 GaN HEMT の構造上の特徴に起因する物性限界を超えることができる要素技術群およびその技術統合を達成することができた。

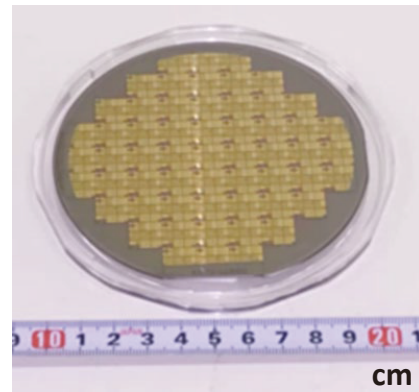


写真 2 量産向け設備を用いて、4 インチ SiC 基板上に作製された N 極性 GaN HEMT

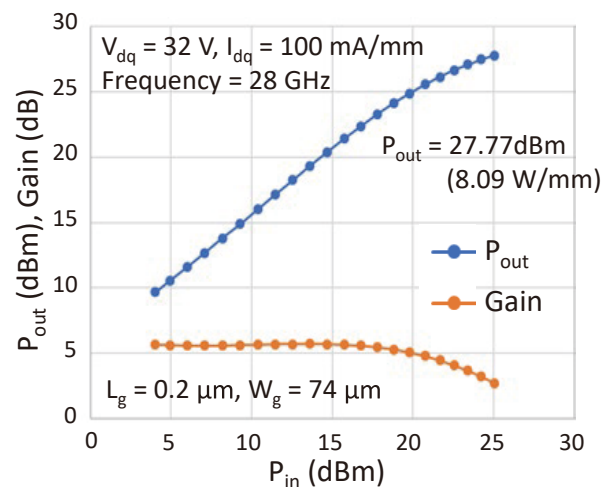


図 11 作製した N 極性 GaN HEMT の出力特性

### 5. 将来課題

前述したように、通信需要は有線・無線ともに急速に増加している。私たちの社会は情報通信システムなしでは成り立たない。しかし、これらのネットワークシステムは、膨大な電力を消費する。表 1 に、科学技術振興機構 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業から出された、将来のネットワーク関連電力需要予測を引用する。ワーストケース予測ではあるが、モバイルネットワークの消費電力は大幅に増大し、社会全体の電力消費から見ても大きな問

表 1 情報ネットワークにおける電力需要

(TWh / year)	2018	2030
Entire Network exclude data center	490	2400
Base station for Mobile network	280	1970
Energy consumption ratio of mobile network(%)	57	82

題である。電力消費量の観点からは、基地局用 GaN HEMT の電力効率 は 80% 程度あり、ほぼ物理限界まで効率を高めることに成功している。さらに、モバイル端末に GaN HEMT を導入する研究も進んでおり、海外企業は Si 増幅器に比べて 20%、GaAs 増幅器に比べても 6% 効率が高い最先端 GaN HEMT を開発している<sup>(4)</sup>。

ここまでは、無線通信デバイスについて論述してきたが、電子機器およびそれを用いたサービスの拡大・多様化により、私たちの社会は豊かになってきた。しかし、社会全体の消費電力は増加の一途をたどっている。グローバルな研究開発も、低消費電力を意識した開発にシフトしている。例えば、従来の大きく効率の低い電源アダプターは、GaN を用いた高効率で小型の製品に置き換わってきている。また、EV 等に必須な電力変換デバイスには、Si IGBT に加え、SiC を用いた FET が導入され始めた。これらは、低炭素社会実現のため重要な基礎技術である。

## 6. 結 言

本論文では、今では私たちの生活や経済活動に欠かせない情報通信システムや、そのシステムを支える様々な半導体デバイスについて解説した。さらに、モバイル無線通信について、第一世代から第六世代までの変遷について述べた。また、最新の技術開発として、当社が製品化にむけ研究開発に取り組んでいる最先端技術である N 極性 GaN HEMT について解説した。

最後に、今後の課題としての電力問題について述べた。この分野では、グローバル企業が大量のリソースを投入し、技術の革新を急速に進めており、多くの電子機器等が刷新されてきている。当社は、このビジネストレンドを掴み、更なる発展を目指す。

## 7. 謝 辞

本論文で論述した N 極性 GaN HEMT 開発について、『この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」(JPNP20017) の委託事業の結果得られたものです。』

## 用 語 集

### ※1 高電子移動度トランジスタ (HEMT)

High Electron Mobility Transistor : HEMT は、化合物半導体ヘテロ接合で構成される電界効果トランジスタである。高周波性と低雑音性に優れる。

### ※2 2次元電子ガス (2DEG)

HEMT のヘテロ界面近傍に形成される電子で、デバイス表面とは法線方向の運動が制限される。非常に高い移動度を有する。

### ※3 GaN HEMT

主に AlGaIn と GaN のヘテロ接合から構成される HEMT。AlGaIn の高分極起因の高電子濃度と GaN の高耐圧性により高出力デバイスとして利用される。

### ※4 N 極性 GaN HEMT

一般的な Ga 極性 HEMT と比較し、原子配列およびヘテロ接合が反転した構造。

### ※5 ドレインコンダクタンス

トランジスタの飽和特性の優劣を示すことが出来る指標。この数値が小さい方が、高周波アンプに好適。

### ※6 有機金属気相成長法

有機金属化合物を使い、気相中で熱平衡状態での結晶成長を行うことができる。

### ※7 ゲート絶縁膜

半導体表面とゲート金属を絶縁する絶縁膜。化合物半導体では、作製が困難とされてきた。

## 参 考 文 献

- (1) H. Ota et al., "Significant of Nitrogen and Aluminum Depth Profile control in HfAlON Gate Insulators," ECS transactions, 3 (3) 41-47 (2006)
- (2) T. Nabatame et al., "Influence of HfO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> interface layers on the characteristics of n-GaN/HfSiO<sub>x</sub> capacitors using plasma-enhanced atomic layer deposition," Journal of Vacuum Science & Technology A 36, 062405 (2021)
- (3) E. Maeda et al., "Change of characteristics of n-GaN MOS capacitors with Hf-rich HfSiO<sub>x</sub> gate dielectrics by post-deposition annealing," Microelectronic Engineering 216 (2019) 111036.
- (4) H. W. Then et al., "Advanced Scaling of Enhancement Mode High-K Gallium Nitride-on-300mm-Si (111) Transistor and 3D Layer Transfer GaN-Silicon Finfet CMOS Integration," 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2021, pp. 11.1.1-11.1.4

執 筆 者

---

牧山 剛三\* : シニアスペシャリスト  
伝送デバイス研究所 主幹  
工学博士



吉田 成輝 : 伝送デバイス研究所 主査



中田 健 : 伝送デバイス研究所 部長



---

\*主執筆者