

# 高信頼性携帯電話基地局用 GaN HEMTの開発

八 卷 史 一\*・出 口 博 昭・宇 井 範 彦  
 蛭 原 要・生 松 均・西 眞 弘  
 新 田 敦・井 上 和 孝・佐 野 征 吾

Development of High Reliability GaN HEMT for Cellular Base Stations —— by Fumikazu Yamaki, Hiroaki Deguchi, Norihiko Ui, Kaname Ebihara, Hitoshi Haematsu, Masahiro Nishi, Atsushi Nitta, Kazutaka Inoue and Seigo Sano ——  
 In the 3<sup>rd</sup> generation mobile communication systems such as W-CDMA, data traffic by cellular phones and other wireless tools has been steadily increasing. The data traffic is expected to further increase due to the wide spread use of smartphones and the introduction of WiMAX and LTE services that offer high-speed, high-capacity data transmission. A GaN (gallium nitride) HEMT (high electron mobility transistor) is suitable for the high-speed, high-power application owing to its excellent material properties. Although the actual products have been released for the cellular base station application, there are few reports studying the reliability of the GaN HEMT in detail. In this paper, we demonstrate the ruggedness and reliability of the GaN HEMT in several tests and describe the performance of the latest 500W class asymmetric Doherty amplifier with the GaN HEMT.

Keywords: GaN HEMT, base station, reliability, ruggedness, amplifier

## 1. 緒 言

携帯電話などの無線通信システムは、W-CDMA<sup>\*1</sup>に代表される第3世代システム以降、音声通信だけでなくデータ通信量も増加の一途をたどっている。近年は、さらに高速大容量のデータ通信が可能なWiMAX<sup>\*</sup>、LTE<sup>\*2</sup>サービスも開始され、加えてスマートフォンの普及もあり、通信量は今後爆発的に増加すると予測される。このような状況において、携帯電話基地局に使われる増幅素子にも、高速、高出力かつ高効率特性が要求され、従来おもに使われてきたSi-LDMOS<sup>\*3</sup>、GaAs FET<sup>\*4</sup>ではその要求性能を満たすことが難しくなってきた。

バンドギャップが大きく、高破壊電圧、高飽和電子速度と言った優れた特性をもつ窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ GaN HEMT<sup>\*5</sup>は高速、高出力増幅素子に適しており、製品化され始めている。一方で、GaN HEMTの信頼性に関する詳細な報告<sup>(1)</sup>は少ない。

当社は、世界で初めて携帯電話基地局用 GaN HEMT を製品化<sup>(2),(5)</sup>し、製品出荷数はこれまでに100万個を越えている。今後は携帯電話基地局用途に限らず、携帯電話基地局間通信や衛星通信、レーダーなどといったアプリケーションへの応用も検討されており<sup>(3)</sup>、ますます需要の伸びが期待されている。

本論文では、これまでに検証したさまざまな耐久性、信頼性に注目して報告するとともに、GaN HEMTを使ったドハティーアンプ<sup>\*6</sup>の特性も紹介する。

## 2. GaN HEMT 技術

2-1 材料物性 表1に無線通信用に使われる主要な半導体材料の物性値を示す。GaNはSiやGaAsと比較して2倍以上の飽和電子速度 ( $V_{sat}$ ) と、Siの10倍、GaAsの7.5倍の絶縁破壊電界強度 ( $E_c$ ) を有する。高周波、高出力素子の性能比較には飽和電子速度と絶縁破壊電界強度に対して、 $V_{sat} \cdot E_c / 2\pi$ を指標とするJohnson性能指標が用いられるが、このJohnson性能指標で比較すると、GaNはSiと比較して27倍、GaAsと比較しても約15倍と圧倒的な優位性を有している。

表1 主要な半導体材料物性一覧

	Si	GaAs	SiC	GaN
バンドギャップ (eV)	1.1	1.4	3.2	3.4
飽和電子速度 ( $\times 10^7$ cm/s)	1.0	1.3	2.0	2.7
絶縁破壊電界強度 (MV/cm)	0.3	0.4	3.0	3.0
電子移動度 ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	1300	6000	600	1500
熱伝導率 ( $\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$ )	1.5	0.5	4.9	1.5
Siを1としたときのJohnson性能指標	1.0	1.7	20	27

2-2 GaN HEMT 構造 熱伝導性に優れた半絶縁性SiC基板にGaN HEMTを形成することで、良好な放熱特性を実現できる。またAlGaIn/GaNヘテロ接合と、GaNの

結晶構造に由来した自発分極とピエゾ分極により、 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$  以上の高濃度の二次元電子ガスを発生でき、GaAsを用いたデバイスと比較して10倍の高出力化も実現可能である。ゲート長は携帯電話基地局用デバイスとして十分な利得が得られる最適値に設定した。

さらにGaN HEMTの信頼性確保のための重要なポイントがゲートリーク電流の制御である。これまでの技術開発過程において、 $10^{-6} \text{A/mm}$  オーダーにゲートリーク電流を抑制することが必要と判断し、当社のGaN HEMTは素子の最表面を適切にプロセス処理して、これを実現している。

次に電流-電圧特性を図1に、三端子耐圧特性を図2に示す。最大飽和電流  $I_{\text{max}}$  は  $600 \text{mA/mm}$ 、三端子耐圧は  $250 \text{V}$  である。最大飽和電流と三端子耐圧はトレードオフの関係にあり、これらの特性はSiやGaAsを材料にした他の半導体素子では実現し得ない。GaN HEMTが高出力素子として非常に優れていることを証明している。

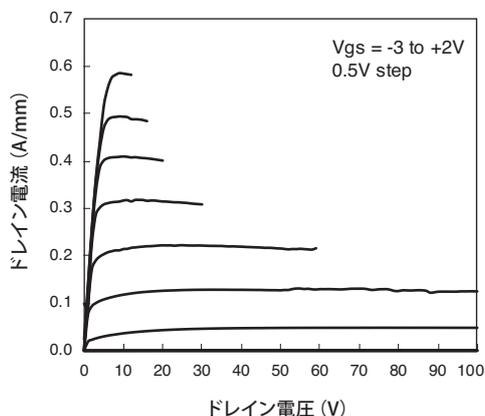


図1 電流-電圧特性

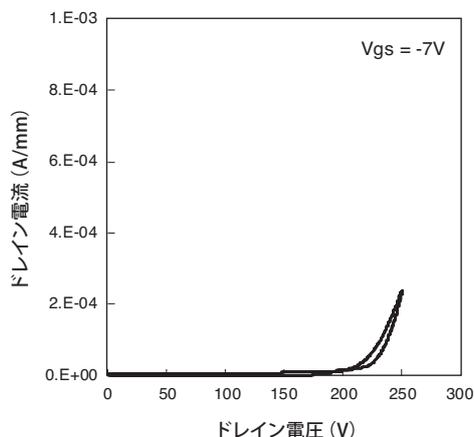


図2 三端子耐圧特性

### 3. 耐久性と信頼性

**3-1 安全動作領域の検証** 一般的に信頼性を論ずる場合、平均故障時間MTTF<sup>\*7</sup>に代表される長期信頼性が注目されるが、製品化においてはさまざまな動作環境における負荷耐久性が重要である。

負荷耐久性を検証するにあたり、まずRF動作時にデバイスに印加される電圧を評価した。実際に動作中の印加電圧を測定することは難しいため、シミュレーションにより見積もった。このときのRF動作は高効率アンプの回路方式に用いられる逆F級動作<sup>\*8</sup>を想定した。

周波数  $2.1 \text{GHz}$ 、ドレイン電圧  $50 \text{V}$ 、 $5 \text{dB}$  利得圧縮時出力電力  $P5 \text{dB}$  でのドレイン電圧波形を図3に示す。最大ドレイン電圧は  $160 \text{V}$  と見積もられた。従ってデバイスの三端子耐圧は少なくとも  $160 \text{V}$  以上必要であるが、図2で示したとおりGaN HEMTの三端子耐圧は  $250 \text{V}$  であり、RF動作時の最大ドレイン電圧に対して十分な耐圧を有している。

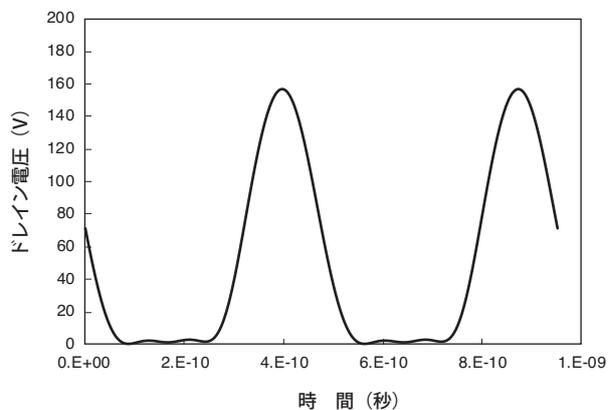


図3 逆F級動作でのP5dB出力時ドレイン電圧波形

次に安全動作領域ASO (Area of Safe Operation) について述べる。半導体素子はその材料やプロセス技術に依存して、印加できる電圧と温度が制限され、破壊せずに動作できる領域を安全動作領域と呼ぶ。言い換えれば、安全動作領域が広い素子ほど、高出力、高温動作に適した増幅素子と言える。

図4に、一般的に無線通信用の高出力素子に要求される保証温度である  $200^\circ \text{C}$  でのGaN HEMTの安全動作領域と、逆F級動作時のロードラインを示す。ロードラインは、前述のドレイン電圧波形のシミュレーションと同様、ドレイン電圧  $50 \text{V}$ 、出力電力は  $P5 \text{dB}$  を想定した。なおデバイスの自己発熱によるチャネル温度の上昇を避けるため、DCバイアスはパルス印加して安全動作領域を評価している。  $200^\circ \text{C}$  という高温においても、逆F級動作時のロードラインは安全動作領域内にあり、デバイスは破壊することなく動作可能なことを証明する結果である。

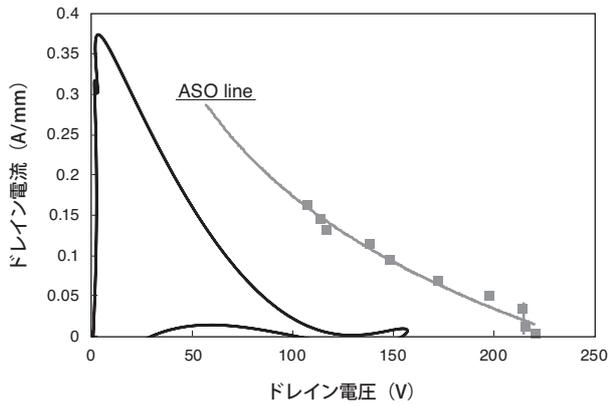


図4 P5dB出力時ロードラインと200°Cでの安全動作領域

**3-2 負荷変動および過入力信号に対する耐久性** ここまでは、GaN HEMTの特性を最大限に引き出すために最適なインピーダンスに整合をとった状態で評価を行った。しかし実際に市場に出た場合は、予期しない状態に対する耐久性も考慮しておく必要があるため、最悪負荷条件(高VSWR<sup>※9</sup>)を想定して、ロードプル<sup>※10</sup>測定系でVSWR10:1、RF連続信号、飽和動作条件で位相を変化させてデバイスを評価したが、破壊、特性劣化は見られなかった。

さらに、通常は設計時に規定した電力以上のRF信号がデバイスに入力されることはないが、市場においては予期しない信号が過入力される可能性もある。そこで13dB利得圧縮時出力電力P13dBまでRF信号を過入力してデバイス特性を評価した。図5に過入力試験での出力電力の変動を示すが、デバイスの破壊や特性劣化は見られなかった。

これらの結果は、当社のGaN HEMTが市場における予期しない負荷変動や信号の過入力においても十分な負荷変動強度を有し、安定動作が可能であることを示している。

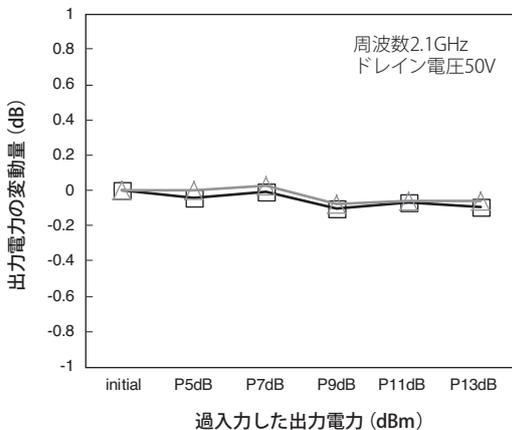


図5 RF過入力試験での出力電力の変動

**3-3 長期信頼性** 最後に長期信頼性について述べる。デバイスのチャンネル温度を250°C、275°C、300°C、315°Cの4条件に振って高温DC通電試験を行った。この試験から活性化エネルギーEaは1.6eVと見積もられた。図6にこのEaを用いてMTTFを計算した結果を示す。デバイスのチャンネル温度が200°CのときのMTTFは $1.07 \times 10^6$ 時間(約122年)と見積もられた。

実際に当社GaN HEMTの市場故障率は5Fit以下と非常に小さく、市場実績からも十分な負荷変動強度と長期信頼性を有することが実証されている。

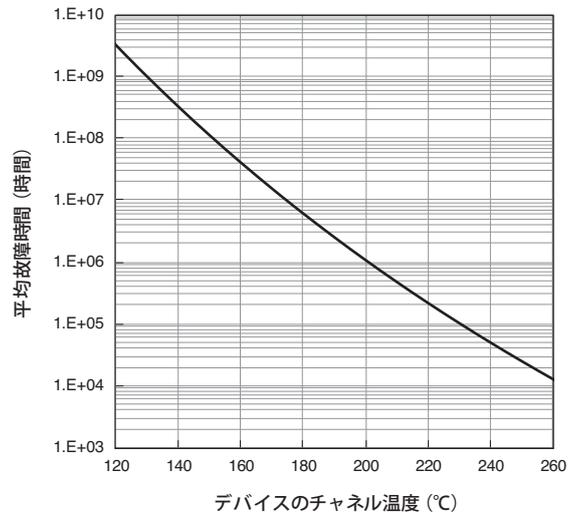


図6 高温DC通電試験から予測した平均故障時間

## 4. 2.6GHz高出力GaN HEMTデバイス

300W級と200W級のGaN HEMTデバイスを組み合わせた500W級の非対称ドハティーアンプを作製した。写真1にドハティーアンプの写真を、図7と図8に入出力特性及び効率特性を示す。2.6GHz帯において飽和出力57.3dBm(537W)、13.5dBの線形利得、50%以上のドレイン効率を達成した。

一方で、携帯電話などの無線通信システムでは高効率特性を維持しつつ歪み特性を向上させる必要があり、そのためにDPD(Digital Pre-Distortion)による歪み補償を行うことが一般的である。図9に、市販されているDPD装置を用いたW-CDMA信号入力時の歪み補償時の特性を示す。飽和出力電力から7dBバックオフした平均出力電力50.3dBm(107W)において、歪み特性を示す隣接チャネル漏洩電力比ACLR(Adjacent Channel Leakage Ratio)は5MHz離調時に-50.6dBcを達成し、そのときのドレイン効率は48%が得られた<sup>(4)</sup>。これらは今後さらに高周波、高出力、低消費電力化することが予想される携帯電話基地

局システムにおいて、当社の GaN HEMT の優位性を示す特性である。

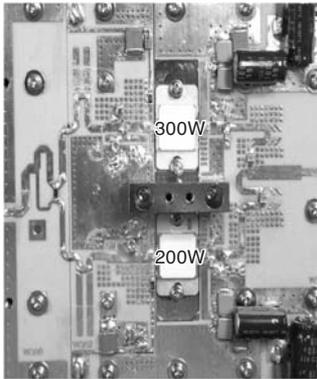


写真1 500W級非対称ドハティーアンプ

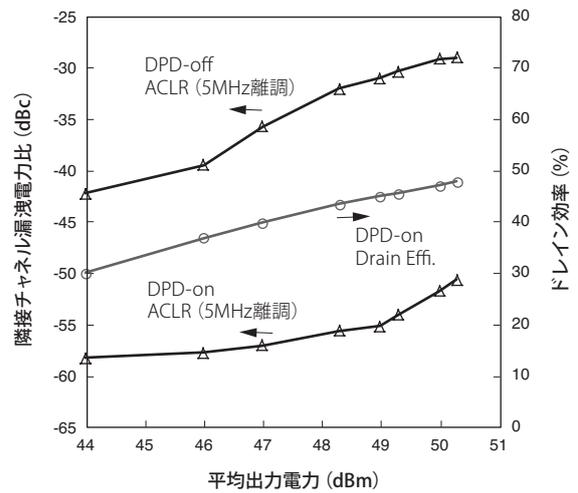


図9 非対称ドハティーアンプのDPD補償時の特性

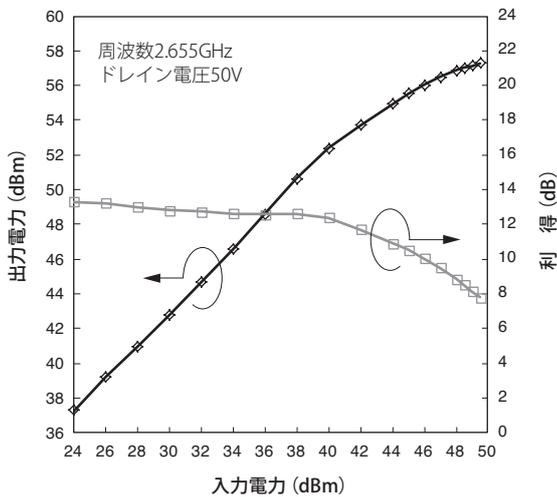


図7 非対称ドハティーアンプの入出力特性

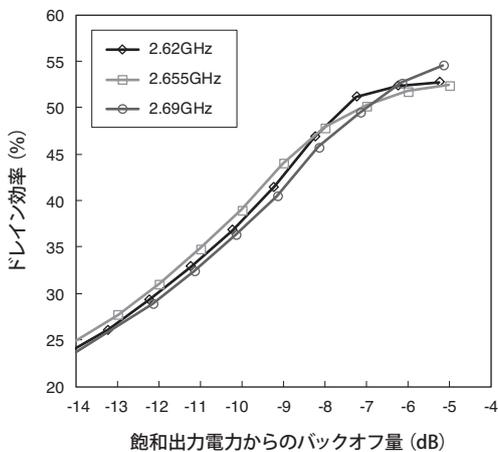


図8 非対称ドハティーアンプのドレイン効率特性

## 5. 結 言

携帯電話をはじめとする無線通信のデバイスにはますます高周波、高出力、低消費電力化が要求されており、GaN HEMTはその材料物性からこれらのアプリケーションに適したデバイスである。一方で製品化のためには、従来以上に詳細な信頼性検証が必須になってきている。

本論文は、GaN HEMTの耐久性、信頼性に注目して報告するとともに、2.6GHz帯500W級非対称ドハティーアンプを作製し、当社のGaN HEMTが十分なデバイス特性を有していることを示した。今後もWiMAX、LTEをはじめとする次世代携帯電話基地局システムに適した技術開発、製品化を進めていく。

\* WiMAX は、米国 WiMAX Forum の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

## 用語集

### ※1 W-CDMA

Wideband Code Division Multiple Access : 第3世代携帯電話の通信方式の1つ。第2世代に比べて高品質な通話と高速データ通信が特徴。

### ※2 LTE

Long Term Evolution : 第3世代携帯電話の後継システムで第3世代と同一の周波数帯を利用して、より高速なデータ伝送を特徴とする。

### ※3 Si-LDMOS

Si-Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor : Si 横方向拡散MOS型トランジスタの略でSiを使った半導体デバイス。

### ※4 GaAs FET

Gallium Arsenide Field Effect Transistor : 素材にガリウム砒素を用いている高周波増幅に適した電界効果型トランジスタ。シリコンに比べ、電子が5倍近いスピードで移動できることから、マイクロ波増幅等に適している。

### ※5 HEMT

High Electron Mobility Transistor : 高電子移動度トランジスタ。半導体ヘテロ接合界面に二次元電子層を形成したことを特徴とする。低雑音、高利得の特性を持っている。

### ※6 ドハティーアンプ

増幅器の高効率化技術の1つ。2つのデバイスを用い、出力が小さい領域でも高効率を得られることが特徴。2つのデバイスの出力が異なる場合は非対称ドハティーアンプと呼ぶ。

### ※7 MTF

Mean Time to Failure : 半導体素子が稼働開始してから故障するまでの平均時間。

### ※8 逆F級動作

増幅素子の動作方式の1つで、電圧振幅波形が半波正弦波、電流振幅波形が方形波で、それぞれの振幅波形が重ならないため増幅器の高効率化が図れる。

### ※9 VSWR

Voltage Standing Wave Ratio : 電圧定在波比のことで、電圧定在波の極大、極小の比。負荷整合状態を示すパラメータとして用いられる。

### ※10 ロードプル

大信号特性の評価方法の1つ。チューナーと呼ばれる機械式のインピーダンス可変装置を用いて、インピーダンス整合条件を変えながらデバイス特性を評価できる。

### 参 考 文 献

- (1) F. Yamaki, et al., "Ruggedness and Reliability of GaN HEMT", IEEE EuMIC Digest, pp. 328-331, Manchester, UK (October 2011)
- (2) 井上和孝 他、「携帯電話基地局用窒化ガリウム電力増幅器 (GaN HEMT) の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、pp.97-102 (July 2010)
- (3) 水野慎也 他、「マイクロ波無線通信用GaN HEMTの開発」、SEIテクニカルレビュー第180号、pp.65-68 (January 2012)
- (4) H. Deguchi, et al., "A 2.6GHz Band 537W Peak Power GaN HEMT Asymmetric Doherty Amplifier with 48% Drain Efficiency at 7dB BO", IEEE Int. Microwave Symposium Digest, pp. 1-3, Montreal, Canada (June 2012)
- (5) <http://www.sedi.co.jp/products/wireless/index.html>

### 執 筆 者

八巻 史一\* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 マネージャー



出口 博昭 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 マネージャー

宇井 範彦 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 マネージャー

蛭原 要 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 課長

生松 均 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 マネージャー

西 真弘 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部

新田 敦 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
品質保証部 マネージャー

井上 和孝 : 伝送デバイス研究所 グループ長

佐野 征吾 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
電子デバイス事業部 プロジェクトリーダー

\*主執筆者