

マイクロ波無線通信用 GaN HEMT の開発

水野 慎也*・山田 文生・山本 洋
西原 信・山本 高史・佐野 征吾

Development of GaN HEMT for Microwave Wireless Communication — by Shinya Mizuno, Fumio Yamada, Hiroshi Yamamoto, Makoto Nishihara, Takashi Yamamoto and Seigo Sano — High-power broadband devices are increasingly required for microwave wireless communication systems such as terrestrial and satellite communication over 6 GHz (e.g., C-band). Formerly, GaAs devices have been used in these systems, however, the properties of GaAs are not sufficient to meet the high-power broadband requirements. To address this challenge, we have focused on the superior physical properties of GaN. Based on our established GaN high electron mobility transistor (HEMT) technology for cellular base stations (e.g., L/S-band), we have developed a GaN HEMT applicable for the C-band such as microwave wireless communications. This paper summarizes the characteristics of the GaN HEMT and a 20W-class internally-matched broadband device equipped with the GaN HEMT.

Keywords: GaN HEMT, microwave, wireless, amplifier, broadband

1. 緒言

窒化ガリウム (GaN) は、シリコン (Si) や砒化ガリウム (GaAs) と比較して、バンドギャップが大きく、飽和電子速度も大きいことから、高出力かつ高速の電子デバイスへの応用が期待されている。当社は、放熱性に優れた炭化ケイ素 (SiC) 基板上の窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ (GaN HEMT^{*}: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) を、携帯電話基地局用途を中心に開発・製品化してきた。動作周波数は、3.5GHz までであった。

図1は現在の通信インフラ網を示す。マイクロ波無線通信は、携帯電話基地局間の通信や衛星通信のことを差し、主に動作周波数は、6GHz帯から16GHz帯までである。従来マイクロ波無線通信用途に使われてきた電子デバイスは、GaAsを使ったデバイスであり、20W級では一つの製

品で500MHzから1GHz程度の帯域である。それゆえ、6GHz帯から16GHz帯の間で帯域が細分化され、製品8種類でサポートしている。GaNを使った高出力デバイスは10GHz帯で60Wを達成し⁽¹⁾、GaAsでは実現できない特性を達成している。一方使用される周波数は、各国、各通信キャリアによって異なり、その通信システムを製造するシステムメーカーは受注システムごとに増幅器を設計・製造している。システムの納入手番の短縮、在庫の縮小により、増幅器の共通化すなわち広帯域増幅器への期待が高まっている。そこでGaN HEMTには広帯域性能についても期待されている。

本稿は、マイクロ波通信用途向けに、新たに開発した GaN HEMT の特性と、この GaN HEMT を用いて試作した 20W 級の広帯域デバイスの特性を示す。

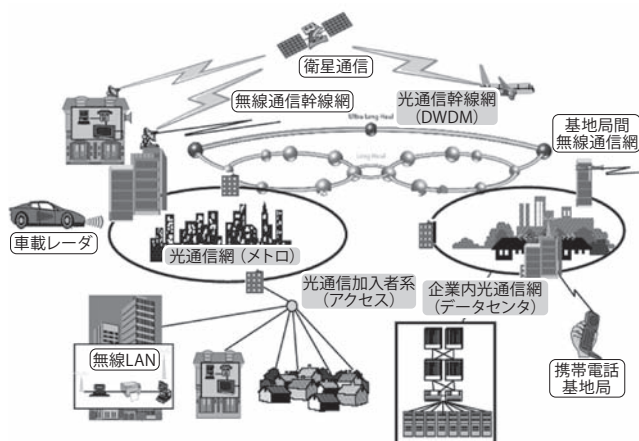


図1 現在の通信インフラ網

2. GaN トランジスタ

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の物性値を示す。GaNはGaAsに対して2倍の飽和電子速度と、約8倍の破壊電界強度を持っている。高周波・高出力素子の性能比較にはJohnson性能指標が用いられ、この指標は飽和電子速度 (V_{sat}) と破壊電界強度 (E_c) に対し、 $V_{sat} \cdot E_c / 2\pi$ で与えられる。Johnson性能指標で見ると、GaAsに比べてGaNは約15倍と圧倒的な優位性を持つ。またGaN HEMTは、熱伝導率の高いSiC基板の上に形成しているため、良好な放熱性を実現でき、高出力増幅器にとって望ましい構造となっている。

表1 各種半導体の物性定数

| | Si | GaAs | SiC | GaN |
|--|------|------|------|------|
| バンドギャップ: E_g (eV) | 1.1 | 1.4 | 3.2 | 3.4 |
| 破壊電界強度: E_c (MV/cm) | 0.3 | 0.4 | 3.0 | 3.0 |
| 電子移動度: μ_e ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) | 1300 | 6000 | 600 | 1500 |
| 熱伝導率: κ ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$) | 1.5 | 0.5 | 4.9 | 1.5 |
| 飽和電子速度: V_{sat} ($10^7\text{cm}/\text{s}$) | 1.0 | 1.3 | 2.0 | 2.7 |
| Johnson 性能指標 $V_{\text{sat}}E_c/2\pi$ 対 GaAs | 0.57 | 1 | 11.5 | 15.5 |

2-2 AlGaIn/GaN HEMT 構造 GaNはAlGaInとのヘテロ接合によって大きなバンド不連続を形成することができ、ヘテロ接合界面には高濃度の2次元電子層が発生する。さらにGaNの結晶の性質から窒化物半導体の自発分極とピエゾ分極によって $1 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 以上の電子濃度を実現でき、非常に大きい電流密度を駆動できる。また、表1にあるように破壊電界がGaAsの約8倍と非常に大きいため、高電圧動作も可能であり、GaAsを用いたデバイスよりも10倍以上の高出力化も十分可能である。

現在当社で製品化している携帯電話基地局用途のGaN HEMTと異なり、マイクロ波通信用途では、より高周波で動作させる必要がある。そのため、ゲート長の微細化を中心に、ウエハプロセス、電極構造などを最適化した。その結果、ゲート長 $0.35\mu\text{m}$ において、電流利得遮断周波数 f_t^{*2} は27GHzという高周波性能を達成した。

2-3 トランジスタ特性 ゲート長 $0.35\mu\text{m}$ のGaN HEMTの3端子電流-電圧特性を図2に示す。ゲート電圧 V_g が+2Vの最大電流 I_{max} は680mA/mm、しきい値電圧は-2.5Vである。3端子のオフ耐圧は170Vを有しており、動作電圧24Vを想定した時に、十分な値を確保している。また、図3にはゲート幅1mmにおける大信号ロードプル *3 の入出力特性を示す。周波数8GHz、パワー整合、24V動

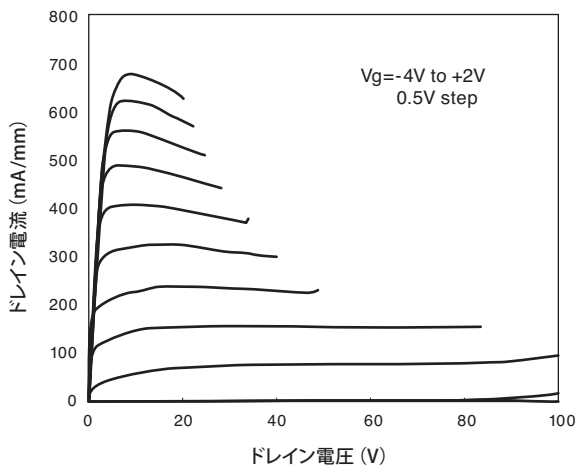


図2 GaN HEMTの3端子電流-電圧特性

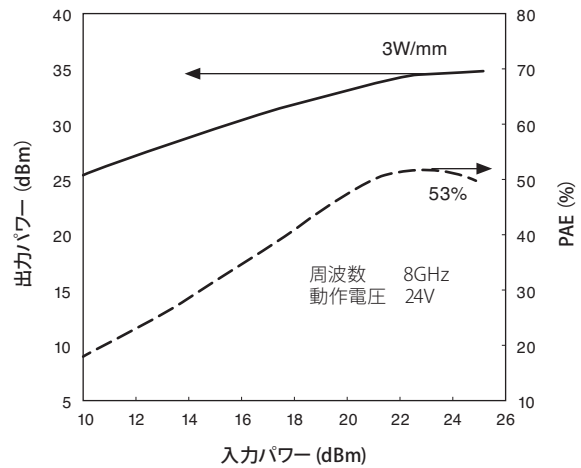


図3 入出力特性 (パワー整合)

作においてRF出力3W/mm、電力付加効率PAE *4 は53%と良好な特性を得た。

3. 20W級C帯広帯域GaN デバイス

3-1 帯域制限 広帯域整合する場合、Q値と出力インピーダンス (Z_{out}) が帯域を制限している。図4に示すトランジスタの出力側の等価回路に対し、Q値は無損失の整合回路を無制限に構成し、理論的に帯域を予測する場合の指標 $^{(2)}$ であり、出力インピーダンスは、無損失の整合回路を有限の回路要素で構成し、インピーダンス変換比に対し帯域を制限するものである $^{(3)}$ 。Rdsは出力コンダクタンス、Cdsは出力キャパシタンスである。表2には、C帯でRF出力20W級を構成する場合のGaAs FET、GaN

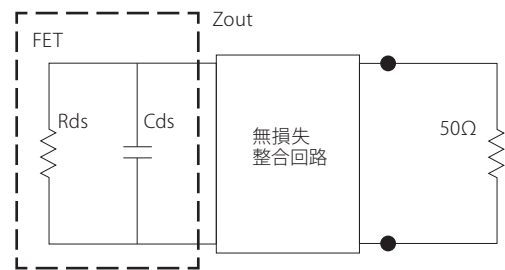


図4 FETの出力側等価回路と整合回路

表2 20W級のデバイスパラメータ比較

| | Cds (pF) | Rds (Ω) | Cds*Rds (psec) | Z_{out} (Ω) | 変換比 ($50/Z_{\text{out}}$) |
|----------|----------|------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| GaN HEMT | 0.9 | 57 | 51 | 5.5 | 9.1 |
| GaAs FET | 8.4 | 4.9 | 41 | 0.7 | 71 |

HEMTのデバイスパラメータを示す。帯域制限Q値とは、この表では $Cds * Rds$ の絶対値に置き換えられ、値が小さいほど広帯域性能があることを表す。GaAs FETとGaN HEMTでは10%程度の差で、GaAs FETの方がより広帯域性能を有しているが、実際は有限の回路要素で構成し、内部整合型デバイスにおいては、2~3段のフィルターで構成しなければならない。GaN HEMTの Z_{OUT} が大きく、変換比が9.1で実現できるのに対し、GaAs FETの場合の変換比は71である。2段のフィルター構成で実現できる帯域(比帯域)とインピーダンス変換比との関係を計算したものが図5である。GaN HEMTは比帯域0.7に対し、GaAs FETは0.4であり、GaN HEMTはGaAs FETよりも広帯域性能があることが分かる。その主な要因は、GaN HEMTはGaAs FETよりもRF出力密度が大きくデバイスサイズ(ゲート幅)を小さくできるためである。

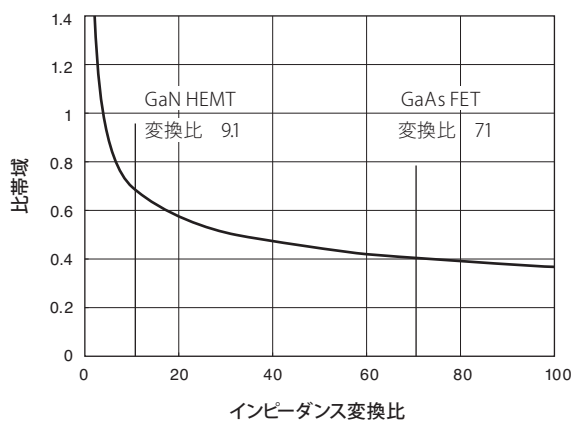


図5 変換比と比帯域(2段フィルター構成)

3-2 GaN デバイス特性 写真1に、GaN HEMTを用いて内部整合型のデバイスの内部写真を示す。ゲート幅は12mmのチップ1つで構成されている。出力側は前項記載の通り2段のフィルターで構成され、入力側も同様に設計し、3段のフィルターで出力側と同等の帯域となるようにしている。帯域は5.9~8.5GHzが含まれるように設計している。小信号特性は、図6のように得られ、5.9~8.5GHzを十分包括している。線形利得は14dB程度が得られた。帯域の中心周波数7.2GHzにおける大信号入出力特性を図7に示す。20W(43dB)以上の飽和出力と約40%の電力付加効率PAEが得られた。大信号特性の帯域特性を示したものが図8である。5.9~8.5GHzの帯域において、飽和出力20W(43dBm)以上、線形利得13.5dB、電力付加効率PAEは38%を達成した。GaAs FETの場合は5.9GHzから8.5GHzまでを、破線で示す4つの製品群(ELM5964-18F、ELM6472-18F、ELM7179-18F、ELM

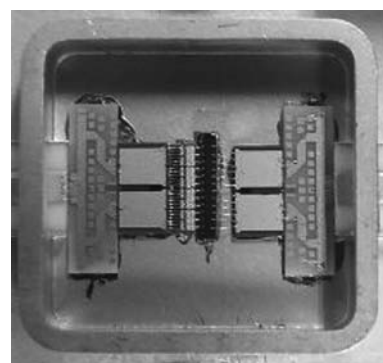


写真1 広帯域内部整合型20W GaN HEMTの内部

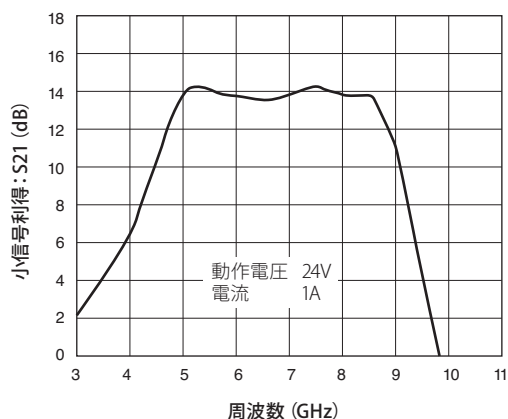


図6 20W GaN HEMTの小信号特性

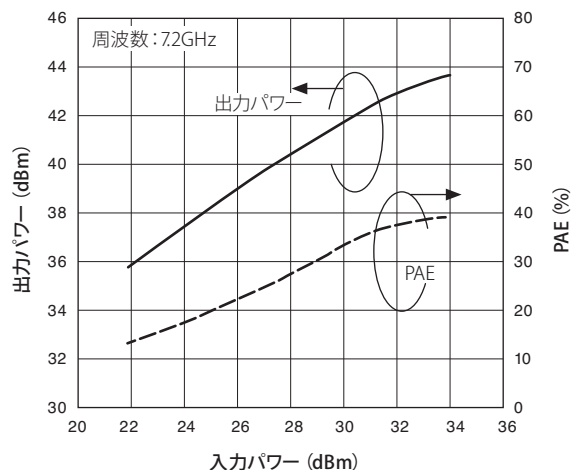


図7 20W GaN HEMTの入出力特性

7785-18F)で構成されるが⁽⁴⁾、GaN HEMTの場合1つで実現できた^{(5)、(6)}。さらに、GaN HEMTの広帯域20W デバイスは、GaAs 製品に比べ周波数8.5GHzにおいてPAEで3ポイント、線形利得で5.5dBも優れた特性を実現できた。

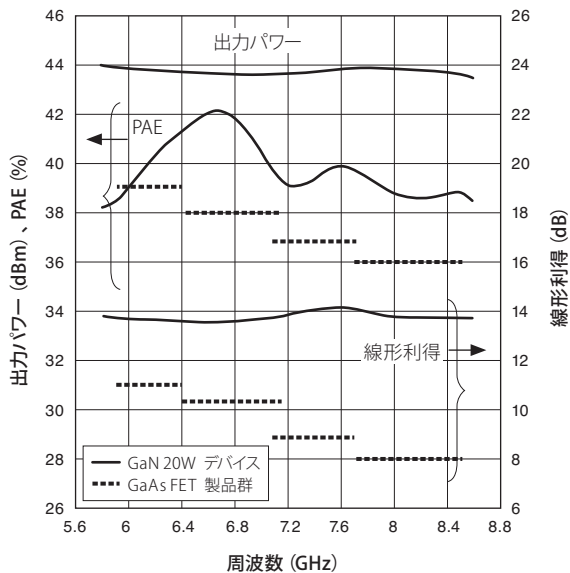


図8 20W GaN HEMTの対域特性

4. 結 言

携帯電話基地局用途で製品化してきた GaN HEMT を、微細化技術を中心に改良し、より高周波であるマイクロ波無線通信用途向けの GaN HEMT の開発を行ってきた。GaN HEMT の高出力という特長だけでなく広帯域という特長を生かし、C 帯 20W 級においては GaAs FET の製品 4 つ分を GaN HEMT は 1 つで実現することができた。今後 マイクロ波無線通信に適した GaN HEMT の技術開発とともに、GaN の高出力・広帯域といった特長を生かした製品化を進めていく。

用語集

※1 HEMT

High Electron Mobility Transistor：半導体接合界面に誘起される 2 次元電子を利用したトランジスタ。不純物散乱の影響の少ない高電子濃度のチャネルが形成できる。

※2 ft

transition frequency：電流利得遮断周波数またはカットオフ周波数ともいう。トランジスタの高周波性能を表す指標の 1 つ。

※3 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特性を評価するもの。

※4 PAE

Power Added Efficiency：電源から増幅器に供給された DC 電力が、電力増幅器により付加された電力（出力電力から入力電力を差し引いた電力）に変換される効率を表す指数。

参考文献

- (1) T. Yamamoto et al., "A 9.5-10.5GHz 60W AlGaN/GaN HEMT for X-band High Power Application," EuMIC 2007, pp. 173-175 (Oct. 2007)
- (2) R.M. Fano, "Theoretical Limitations on the Broadband Matching of Arbitrary Impedance," J. of Franklin Inst., vol. 249, pp. 57-84 and pp. 139-154 (Jan.-Feb. 1950)
- (3) G. L. Matthaei, "Tables of Chebyshev Impedance Transforming Networks of Low-Pass Filter Form," Proceedings of IEEE, pp. 939-963 (Dec. 1964)
- (4) <http://www.sedi.co.jp/e/>
- (5) S. Mizuno et al., "A 5.9-8.5GHz 20 Watts GaN HEMT," 2010 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.123-126 (Dec. 2010)
- (6) 山田文生 他、「C 帯広帯域アンプ用 GaN HEMT の開発」、2011 電子情報通信学会総合大会、C-10-7 (Mar. 2011)

執筆者

水野 慎也*：伝送デバイス研究所
GaN HEMT の研究開発に従事



山田 文生：伝送デバイス研究所
山本 洋：伝送デバイス研究所 博士（工学）
西原 信：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
山本 高史：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
佐野 征吾：伝送デバイス研究所 グループ長

*主執筆者