



GaN HEMT を用いた携帯電話基地局向け 広帯域・高出力・高効率アンプ

Wideband High-Power High-Efficiency Amplifiers with GaN HEMTs for Base Station Applications

秋山 章*
Akira Akiyama

James Wong

Andrei Grebennikov

渡辺 直樹
Naoki Watanabe

出口 博昭
Hiroaki Deguchi

蛭原 要
Kaname Ebihara

GaN HEMTは高出力・高効率かつ広帯域という特長があり、近年は携帯電話基地局向けにシェアを伸ばしている。LDMOSと比べ、GaN HEMTは広帯域化により適しているため、市場要求であるマルチバンド対応高出力基地局への貢献が期待される。本報告では、当社のGaN HEMT技術を用いて開発した内部整合回路付きGaN HEMT、およびそれを用いた高出力・広帯域・非対称ドハティアンプの開発結果を報告する。180Wチップを2個搭載したトランジスタの内部回路は、広帯域特性を満たしつつ小型パッケージ内に実装できるよう、高誘電体基板を用いて構成した。このトランジスタを3個用い、LTEのB1、B3バンドで動作するように回路を工夫した非対称ドハティアンプを設計、試作し、1.8-2.2GHzの広帯域において、最大出力電力59.2dBm、8dBバックオフ時の効率50%以上を実現した。

Gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) are characterized by high power, high efficiency, and wideband operation. In recent years, they have gained market share for base station applications. GaN HEMTs are more advantageous for wideband applications than LDMOSs and therefore expected to contribute to the establishment of high-power multi-band base stations. This paper presents a packaged GaN HEMT device with internal matching circuits. A high-power wideband asymmetric Doherty amplifier using the devices are also described. The transistor has a pair of 180 W GaN dies. The internal matching circuit is designed with a high-dielectric substrate so that it can be mounted in a compact package while maintaining the wideband characteristics. The asymmetric Doherty amplifier is fabricated using three transistors to cover B1 and B3 LTE bands. It achieves an output power of 59.2 dB and drain efficiency of more than 50% at 8-dB power backoff in the 1.8-2.2 GHz range.

キーワード：GaN HEMT、広帯域、高出力、高効率、非対称ドハティアンプ

1. 緒言

窒化ガリウム (GaN) を用いた高周波トランジスタは、高出力、高効率かつ広帯域の実現が可能であり、無線通信インフラの小型化、軽量化、低消費電力化に大きく貢献することが期待されている。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^{*1}: Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor) の研究および開発を2000年から進め、2006年に世界で初めて量産を開始して以来、GaN HEMT市場を牽引している⁽¹⁾。

GaN HEMTが市場に出始めた頃は製造コストが高く、受け入れられる用途は限定的であった。特に低コストが要求される携帯電話基地局増幅器 (アンプ) 用トランジスタとしては、長い間安価なシリコン (Si) LDMOS FETが主流であった。近年、携帯電話基地局の小型化、低消費電力化の要求が高まるにつれ、効率特性に優れたGaN HEMTが採用されるようになり、年々シェアを伸ばしている。GaN HEMTの更なる需要が期待される用途として、マルチバンド対応基地局アンプがある。従来の基地局アンプは1台で

1つのバンドしか動作できず (図1)、複数バンド対応の基地局にはバンド毎に別々のアンプが必要だったのに対し、1台の広帯域アンプのみで複数バンド対応するものである。基地局本体のコスト、及び設置コストの低減を狙ったものであるが、単に複数のバンドで動作させるだけではなく、状況に応じて特定バンドの出力電力を大きくするといった柔軟な運用が可能となる (図2)。これは、バンド毎に別々のアンプを用いる構成では不可能な運用方法である。マルチバンド対応基地局アンプの実現には広帯域対応可能なRFトランジスタが必須であるが、GaN HEMTは、特性上LDMOS FETより広帯域化に適している。

価格面では、ウェハサイズの大口径化 (3-inch→4-inch化) や増産効果による低コスト化が進んでおり、基地局向けに採用が加速している。現在、複数のGaN HEMTサプライヤの台頭のみならず、LDMOS FETで大きなシェアを持つサプライヤも基地局向けGaN HEMT製品を開発、発売するなど⁽²⁾、今後更なるGaN HEMT市場の成長が期待されている。

本稿では、携帯電話基地局向けに開発した高出力GaN

HEMT、およびそれを用いた広帯域・高出力・高効率非対称ドハティアンプについて報告する。

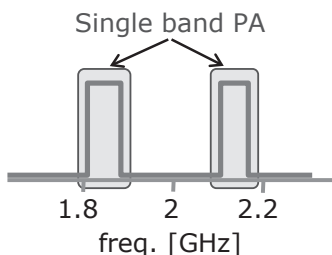


図1 シングルバンドアンプ

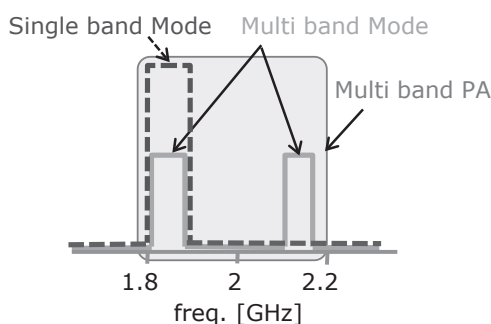


図2 マルチバンド対応アンプ

2. GaN HEMTの特長

表1に、高出力RFトランジスタに用いられる各種材料の特性をまとめる⁽³⁾。当社のGaNトランジスタは以下の特長を有する。

- ① ワイドバンドギャップであり高電圧動作が可能。
- ② 飽和電子速度が高いため高電流密度が得られる。
- ③ 熱伝導度が高いSiC基板上に結晶成長。

GaN HEMTは、上記①②の特長から単位ゲート幅あたりの電力密度が非常に高い。したがって、単位ゲート幅あたりのドレイン-ソース間容量(Cds)が同程度であっても、同一出力電力あたりのCdsはLDMOSと比較して格段に小さくなるため、高周波における損失が小さく、高出力かつ高効率のRFトランジスタが実現できる。また、電力密度が高いため、同一出力電力あたりのデバイスサイズがLDMOS FETより小さくなり、インピーダンスが高くなる。これは、広帯域動作を実現する上で極めて有利であり、高出力のマルチバンド対応基地局においてGaN HEMTはLDMOS FETより適していることを示す。さらに、当社のGaN HEMTは熱伝導度が高いSiC基板上に結晶成長しているため、良好な放熱性が得られる。これは、高出力RFトランジスタにおいて、特性と信頼度の面で有利な特長である。

表1 高出力RFトランジスタ材料の特性比較

| 材料 | バンドギャップ (eV) | 絶縁破壊電界 (MV/cm) | 熱伝導率 (W/cm/K) | 飽和電子速度 ($\times 10^7$ cm/s) |
|------|--------------|----------------|---------------|------------------------------|
| Si | 1.1 | 0.3 | 1.5 | 1.0 |
| GaAs | 1.4 | 0.4 | 0.5 | 2.0 |
| SiC | 3.3 | 3.0 | 4.9 | 2.0 |
| GaN | 3.4 | 3.3 | 2.1 | 2.5 |

※ : 当社GaN HEMTに適用

3. 内部整合回路付き高出力GaN HEMT

図3に、本報告で用いるGaN HEMTトランジスタの内部回路ブロック図を示す。2つの入出力端子を持つパッケージを用い、それぞれに180W GaN HEMTチップを搭載する。構造上、GNDは共通化されるが、入出力はそれぞれ独立している。

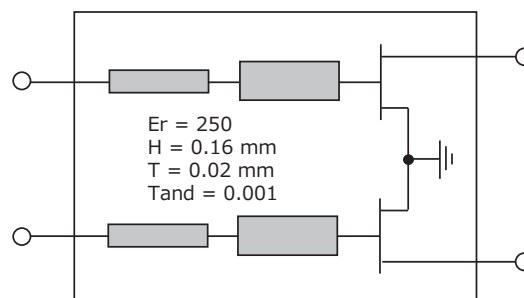


図3 GaN HEMTの内部回路

RFトランジスタの高出力化は、多数のユニットFETを並列接続し、デバイスサイズを大きくすることで実現可能であるが、同時にゲート-ソース間容量(Cgs)が増加することにより入力インピーダンスが非常に低くなってしまい、180Wクラスの出力電力の場合、GaN HEMTであっても 1Ω 以下となってしまう。低インピーダンスのままでは、外部整合回路でのインピーダンスマッチングが極めて困難になってしまうため、パッケージ内部に低損失の整合回路を設け、パッケージ端面におけるインピーダンスが大きく(1Ω 以上)なるようインピーダンス変換を行う。また、広帯域特性実現のためには、インピーダンスの周波数分散を小さくする必要があるため、インピーダンス変換比が小さな変換回路を2段用いる。内部回路の大きさはパッケージサイズによる制限を受けるが、高誘電率の基板を用いることで小型パッケージ内に実装可能な整合回路を実現している。トランジスタの内部写真を写真1に示す。1つの高誘電体基板とワイヤで2段のインピーダンス変換回路を構成して

いる。なお、出力側は、入力側に比べGaN HEMTのインピーダンスが高く、内部整合回路がなくともパッケージ端のインピーダンスが十分高いため、整合回路は設けない。

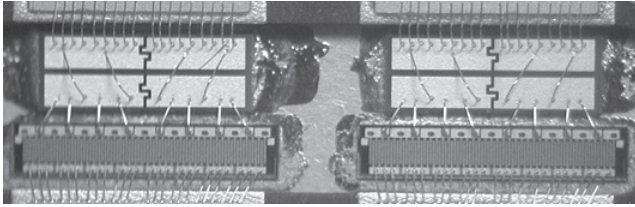


写真1 トランジスタ内部写真

本報告では、パッケージ端で入出力を直接合成することで1つの360Wトランジスタとして扱う。この時の1dB利得圧縮時ロードプル測定結果を図4に示す。測定条件はVd = 50V、Idq = 450mA、周波数 = 2GHzである。出力側負荷インピーダンス1.2-j1.1Ωにおいて最大出力電力55dBm、および負荷インピーダンス1.3+j0Ωにおいて最大効率61%が得られている。

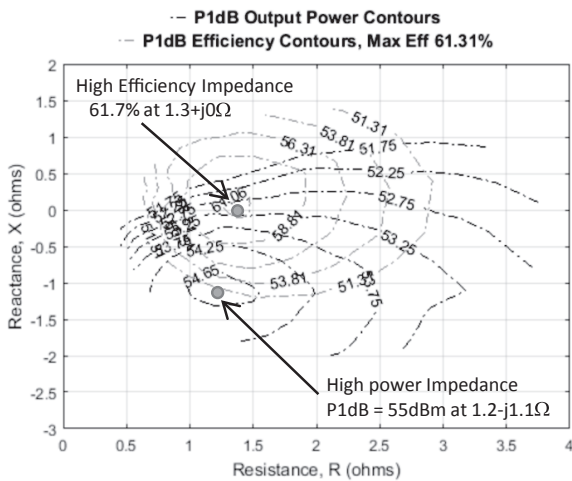


図4 ロードプル測定結果

4. ドハティアンプ

携帯電話においては、高速大容量通信を実現するためにデジタル変調方式が採用されている。この場合、平均出力電力が低い場合においても、瞬間的にはそれより6dBから10dBほど大きい出力電力が発生する。したがって、携帯電話基地局アンプには、平均出力電力で高効率を実現し、

かつ平均出力電力より6-10dB高い最大出力電力が得られることが要求される。そのため、バックオフ時に高効率を得られるドハティ結合と呼ばれるアンプ技術が多く使われる。

4-1 対称および非対称ドハティアンプ

図5、図6に、それぞれ対称ドハティアンプと非対称ドハティアンプの回路構成例を示す。どちらも、AB級動作するキャリアアンプ (CA) とC級動作するピークアンプ (PA) を並列させることで実現する^{(4),(5)}。バックオフ時にはキャリアアンプのみが動作するが、高出力動作時にはピークアンプも動作し、キャリアアンプで不足する電力を補う。対称ドハティアンプでは、キャリアアンプとピークアンプに同じ出力電力のアンプを用いるが、非対称ドハティアンプでは出力電力が異なるものを用いる。

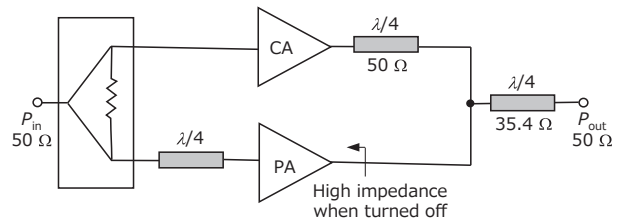


図5 対称ドハティアンプ

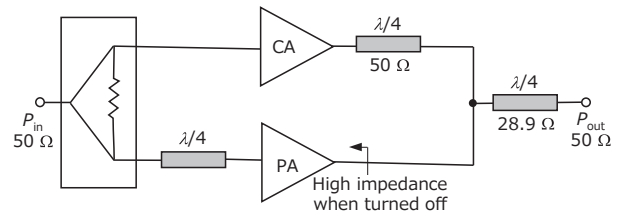


図6 非対称ドハティアンプ

ドハティアンプおよび一般的なAB級アンプの出力電力に対する効率特性を図7に示す。AB級アンプでは、飽和出力時に最大効率が得られるが、バックオフが大きくなると効率が大幅に低下する。対称ドハティアンプの場合は、飽和出力から6dBバックオフした出力点が効率最大となる。そのため、ここが平均出力となるようにアンプを設計すれば、平均出力時に高効率、かつ平均出力より6dB高い最大出力電力が得られる。非対称ドハティの場合、一般的にピークアンプ側の出力電力を大きくする。これにより、より大きくバックオフした出力点が効率最大となる。例えば、キャリアアンプとピークアンプの電力比を1:2とした場合、9.5dBバックオフした点で最大効率が得られる。通信容量増大に伴い、ピーク電力と平均電力差が大きい変調方式が

要求されており、今後の基地局用ドハティアンプでは非対称構成が主流になっていくと考えられる。

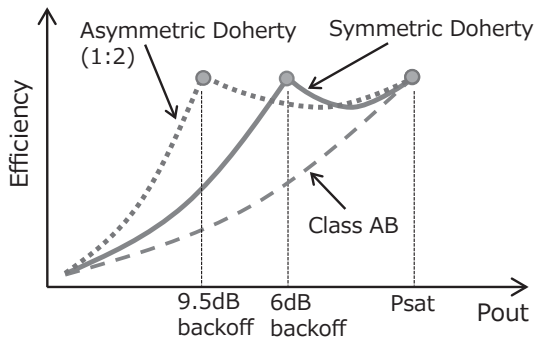


図7 ドハティアンプの効率特性

4-2 ピークアンプ出力側に半波長線路を追加した非対称ドハティアンプ

一般に、出力電力が高いデバイスはインピーダンスが低いため、外部整合回路をマイクロストリップ線路で構成する場合、幅の広い線路を用いる必要がある。また、広帯域特性の実現にはインピーダンス変換比が小さい方が望ましいため、できるだけ低インピーダンスで構成するのが望ましい。ドハティアンプの場合、出力側でキャリアアンプとピークアンプを合成させるが、幅の広いマイクロストリップ線路はレイアウトの自由度が小さくなり、回路構成が困難となることがある。この場合、ピークアンプ出力側に半波長線路を追加することで、ドハティ動作を損なうことなく回路レイアウトの自由度を増やすことができる。なお、キャリアアンプとピークアンプの位相を揃える必要があるため、キャリアアンプの入力側に $\lambda/4$ 長の線路を挿入する。出力電力比1:2の場合の回路構成例を図8に示す。

4-3 複数トランジスタをピークアンプに用いた非対称ドハティアンプ

非対称ドハティアンプの構成方法として、3個のトランジスタを用い、1個はキャリアアンプ、2個はピークアンプとすることも可能である。図8の非対称ドハティ回路を本コンセプトに適用した構成例を図9に示す。3-wayドハティアンプの構成と似ているが、3-wayドハティアンプでは2台のピークアンプの整合回路が異なり、それぞれが別々に動作開始するのに対し、本回路では2つのピークアンプの回路と動作が同一であるという点異なる。キャリアアンプとピークアンプの出力電力比1:2の場合、全てのアンプ出力が同じになるため、同一のトランジスタ3個で構成可能である。

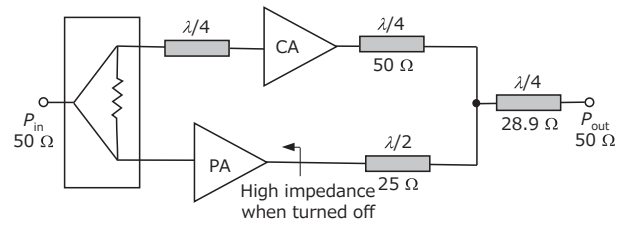


図8 ピークアンプ出力側に半波長線路を追加した非対称ドハティアンプ

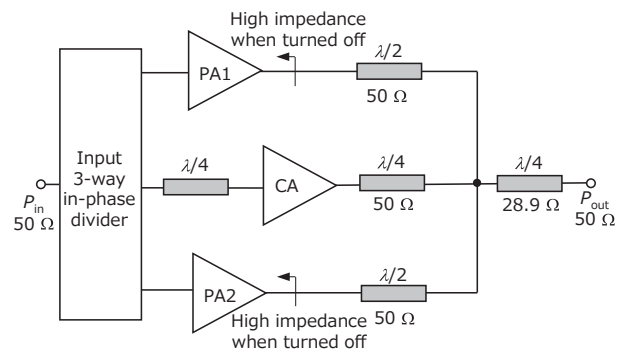


図9 複数トランジスタをピークアンプに用いた非対称ドハティアンプの構成例

図10に、この構成による試作評価結果例を示す。動作帯域は、携帯電話LTE基地局のB1バンド(2.11-2.17GHz)である。第2章で述べた180Wx2トランジスタを3個用いている。55V動作時において、飽和出力電力60dBm(1kW)、最大効率83%、電力利得15dBが得られた。また、20MHz幅LTE信号(PAR=9dB)での評価では、平均出力電力100W(10dBバックオフ)において55%の高効率が得られた。

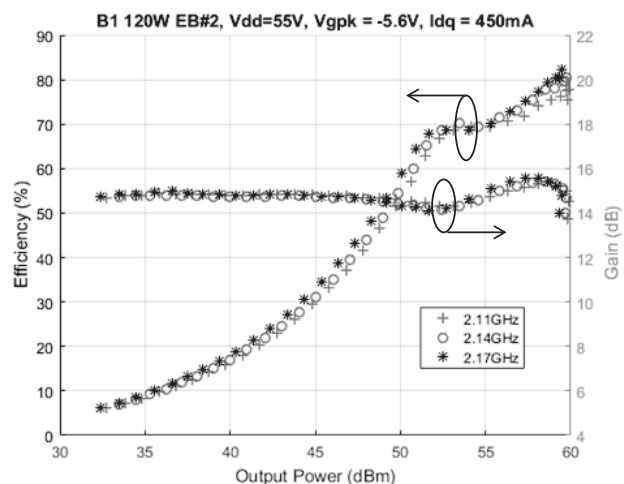


図10 2.11-2.17GHz帯ドハティアンプの特性

5. 1.8-2.2GHz帯ドハティアンプの試作

高出力マルチバンドアンプとして、LTE基地局のB1バンドとB3バンド（1.805-1.88GHz）で動作する広帯域非対称ドハティアンプを設計、試作した。前述のドハティアンプと同様、180W×2トランジスタを3個用いて回路を構成する。

ブロックダイアグラムを図11に示す。広帯域に渡り良好な特性を得るには、周波数に対するインピーダンス分散を抑える必要がある。そこで、キャリアアンプ側整合回路に半波長線路を追加し、そのインピーダンスを適切に選択することにより、トランジスタ出力端での負荷インピーダンスが最適負荷付近を保つよう設計した。それに伴い、合成位相を揃えるために、ピークアンプの入力側整合回路に半波長線路を追加している。ドハティ合成回路のインピーダンス変成器は一般的に用いられる $\lambda/4$ 変換回路ではインピーダンス分散が大きくなるため、テーパ線路を用いることでインピーダンスの周波数分散を抑える。

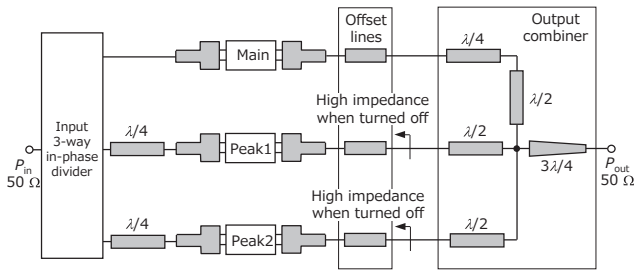


図11 1.8-2.2GHz帯ドハティアンプの構成

測定結果を図12に示す。55V動作時において、2dB利得圧縮時の最大出力電力は59.2dBm、最大効率78%が広帯

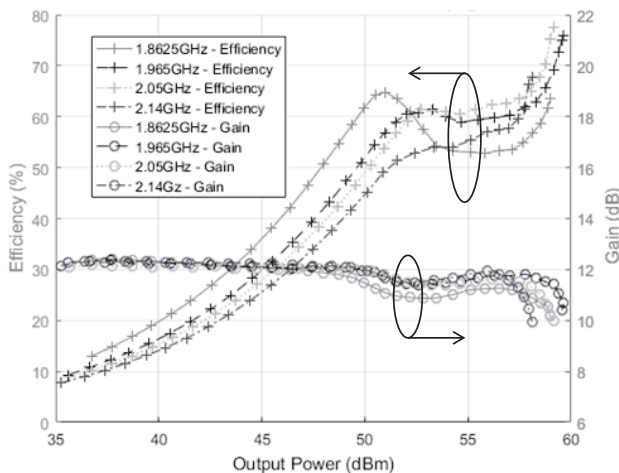


図12 1.8-2.2GHz帯ドハティアンプの特性

域に渡り得られた。また、8dBバックオフ時の効率は50%以上である。

6. 結 言

高出力・広帯域携帯電話基地局向けに開発された高出力GaN HEMTと、それをを用いたマルチバンドドハティアンプの評価結果を示した。最大出力59.2dBm（832W）、8dBバックオフ時（平均出力132W）において効率50%以上を達成した。本成果は、今後の携帯電話基地局市場の要求となるマルチバンド対応高出力・高効率・広帯域アンプ向けに非常に有益である。

本稿では、マルチバンド対応の高出力基地局用GaN HEMTを報告したが、GaN HEMTは高周波性能が優れているため、次世代の5G基地局通信（～6GHz/28GHz）においても需要が期待できる。

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ンネルが形成される。

参考文献

- (1) H. Sano et al., "A 40W GaN HEMT Doherty Power Amplifier with 48% Efficiency for WiMAX Applications," 2007 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium Digest
- (2) <https://www.nxp.com/products/rf/rf-power/rf-power-gan-portfolio:RF-POWER-GAN-PORT> など
- (3) 高橋清、長谷川文夫、吉川明彦、「ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス」、森北出版（2006年）
- (4) H. Deguchi, et al., "A 33W GaN HEMT Doherty Power Amplifier with 55% Drain Efficiency for 2.6GHz base stations," 2009 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest
- (5) H. Deguchi et al., "A 2.6GHz Band 537W Peak Power GaN HEMT Asymmetric Doherty Amplifier with 48% Drain Efficiency at 7dB BO," 2012 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest

執筆者

秋山 章* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
マネージャー
博士 (工学)



James Wong : Sumitomo Electric Europe Ltd.
Ph. D.



Andrei Grebennikov :
Sumitomo Electric Europe Ltd.
Ph. D.



渡辺 直樹 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



出口 博昭 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
課長



蛸原 要 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
開発部長



*主執筆者