

携帯電話基地局用窒化ガリウム電力増幅器 (GaN HEMT) の開発

井上 和孝*・佐野 征吾・舘野 泰範
八巻 史一・蛭原 要・宇井 範彦
川野 明弘・出口 博昭

Development of Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor for Cellular Base Stations — by Kazutaka Inoue, Seigo Sano, Yasunori Tateno, Fumikazu Yamaki, Kaname Ebihara, Norihiko Ui, Akihiro Kawano and Hiroaki Deguchi — High power and high efficiency devices are increasingly required for the 3rd generation and other future cellular base station transmitter systems (BTSs). Gallium nitride (GaN) is ideal for these applications, because of its wide band gap and high saturated electron velocity. We have focused on the GaN high electron mobility transistor (HEMT) on silicon carbide (SiC) substrates and released the world's first commercial BTS device. We have also studied efficiency enhancement techniques, such as Doherty and Class-E circuits. This paper summarizes our R&D activities on the GaN HEMT device and the circuit technology for BTS applications.

Keywords: GaN, HEMT, wireless, cellular, amplifier, efficiency, WiMAX, LTE

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、飽和電子速度ともに大きいことから、大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。

伝送デバイス研究所、及び住友電工デバイス・イノベーション株式会社 (SEDI) では、炭化ケイ素 (SiC) 基板上の GaN の高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor: HEMT) の開発を進めてきた。GaN HEMT の製品化においては、L/S 帯は GaN の物性を生かした高パワー密度等の長所が発揮でき、ゲート加工等のプロセス技術が比較的容易な点からも、参入の突破口となり得る帯域である。

他方で、L/S 帯における代表的アプリには携帯電話基地局がある。携帯電話システムは、W-CDMA などの第3世代以降、音声通信だけでなく高速なデータ通信手段としてのニーズが高まっており、現状は、3.9 世代技術とされる、IEEE802.16e (WiMAX) や、LTE (Long Term Evolution) など、データ通信の高速化に向けた、精力的な開発とサービス提供が進行している。しかしながら、この市場では、これまで価格性能比に優れる Si 横方向拡散 MOS 型トランジスタ (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor: LDMOS) が圧倒的な地位を占めていた。

Si LDMOS に対して GaN はその材料物性を反映して、飽和効率特性で約 10 ポイント高いこと、素子のパワー密度が高く広帯域な特性を得やすいこと、高い放熱性と高効率特性が相まってアンプシステムのファンレス化・小型化が可能なこと、などの利点がある。我々は今後の携帯電話

システムの進展と共に、これら長所の価値が認知されるとの予測に立って開発を進め、世界に先んじて GaN HEMT の製品化を実現した。すでに出荷数は 50 万個を超え、今後ますますの需要の伸びも期待されている。

本論文は、当社の通信用 GaN HEMT 開発を概観し携帯基地局用デバイスとしての主要な特徴をまとめるものである。

2. トランジスタ技術

2-1 材料物性 表1に主要な高速無線用電子材料の物性値を比較する。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有する。実際の素子でも、GaAs 素子に対して 10 倍以上のパワー密度を実現している。

高周波・ハイパワー素子の性能比較には、Johnson の性能指標が用いられる。この指標は、電子飽和速度 (v_s) と絶縁破壊電界 (E_b) に対して $v_s \cdot E_b / 2\pi$ を指標とするものである。Johnson 性能指標でみると Si を基準として GaAs

表1 主要材料物性値

Material	Band Gap Energy (eV)	Critical Breakdown Field (MV/cm)	Thermal Conductance (W/cm·K)	Mobility (cm ² /V·s)	Saturated Velocity (*10 ⁷ cm/s)
Si	1.1	0.3	1.5	1300	1
GaAs	1.4	0.4	0.5	6000	1.3
SiC	3.2	3	4.9	600	2
GaN	3.4	3	1.5	1500	2.7

が1.7倍に対して、GaNは27倍と圧倒的な優位性を持つ。

GaNは、六方晶ウルツ鉱構造でc軸方向に反転対称性を欠くために自発分極を生じ、加えて結晶がひずむことでピエゾ分極も生じる。AlGaIn/GaN HEMT構造はこの2つの分極の寄与で、例えばAl混晶比0.3の場合で 10^{13} 台もの高濃度の2次元電子ガスを実現できる。

また、GaN HEMT構造はSiC等の異種基板上へのエピタキシャル成長により形成されるのが一般的である。異種基板上成長は一見短所にも思えるが、熱伝導に優れるSiC上に形成することで良好な放熱性が実現でき、大出力増幅素子に対して望ましい組み合わせとなっている。図1の物性値からもSiC基板上のAlGaIn/GaN HEMTが、放熱性を確保して高い性能を得られる最適構造であることが分かる。

2-2 第1世代技術 基礎的な検討を経て、開発を加速した際に直面した最大の技術課題は、電流コラプスと呼ばれる過渡的なドレイン電流の低下であった。

電流コラプスは、高ドレイン電圧印加した状態からパルス的に最大順方向ドレイン電流 (I_{max}) を計測して定量化される。図1はこの状態を模式化したもので、半導体表面からは表面空乏層が広がり、ゲート直下は正にバイアスされた状態である。高ドレイン電圧下で加速された電子が表面近傍の深い準位に捕獲されると、それ以後の高速のゲート電位変動に追従できず、チャンネルが狭窄してしまうのが電流コラプスのメカニズムと解されている。高電界下の表面トラップに起因する現象であり、トラップ数低減と電界制御の2点が主な改善手法となる。表2に示す通り、プロセス・エピ・電極設計といった多面的複合的な最適化を進め、コラプスを解消するに至っている。

図2には改善前後のパルスIV波形を示す。左が有意にコラプスがある素子のIV波形、右が本開発を経て実現した波形である。

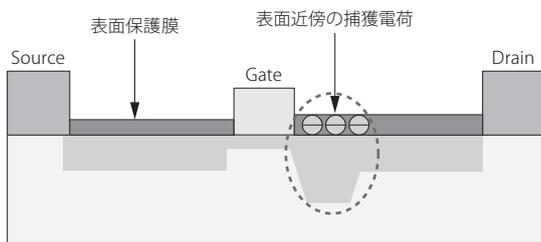


図1 電流コラプスの概念図

表2 電流コラプス改善手法

改善手法	構造要素
トラップ数低減	表面保護膜、表面前処理、エピ構造
電界分布制御	エピ構造、電極諸元

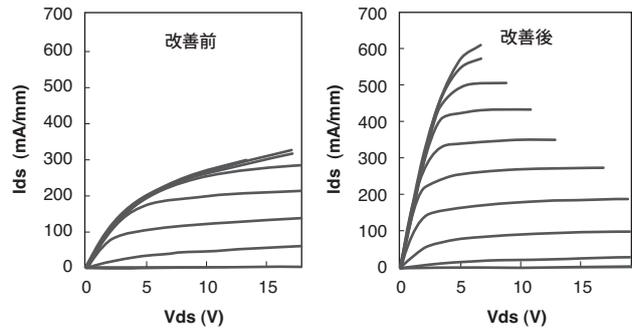


図2 コラプス改善前後のパルスIV波形

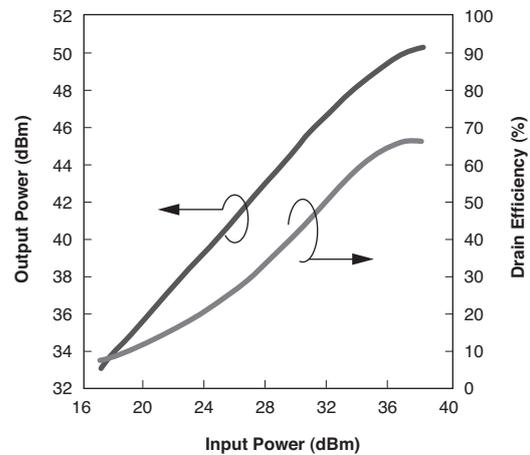


図3 GaN-HEMT100W級デバイス入出力特性

コラプスの抑制により、高いパワー密度と飽和効率が得られることとなった。図3は、第1世代技術を用いた100W級デバイスの2.14GHz, 50V動作時の入出力特性である。

製品化に当たっては、信頼度も重要な課題であり、リーク電流を1つのキーパラメータとして取り組んだ。エピ構造最適化やゲート長を $0.9\mu\text{m}$ に設定する等、低リーク化のために各種パラメータの最適化設計を進め、製品レベルの信頼度を確立し、第1世代の素子技術として確定した。

2-3 第2世代技術 第1世代技術の製品展開と並行して、効率改善技術の探索も進めた。その1つがドハティ回路の検討である。回路技術自体は3章にて論ずるが、ドハティに適した素子として、第2世代素子技術の開発に取り組んだ。

ドハティ用素子として最も強く要求されるのは、良好な飽和効率特性である。図4はトランジスタ等価回路の真性部分であり、a,b,cの3つの経路が主たる電力損失箇所となる。a,b,cの3点、すなわち、ソース抵抗 (R_s) 低減、ドレインコンダクタンス (gd) 低減、ソース・ドレイン間容量 (C_{ds}) 低減、を尺度として素子構造パラメータを最適化した。

効率以外の素子への要求性能として、高線形化や高利得化があったが、GaN HEMTにおいては、両特性ともゲート容量の低減が有効であり、0.6 μm にゲート長を微細化しつつ、エビ構造の最適化を行った。一連の諸要求に対して素子パラメータを最適化して仕様を確定した。2009年には製品認定まで完了し、現在、この技術を適用したデバイスラインアップの整備と拡販が進行している。

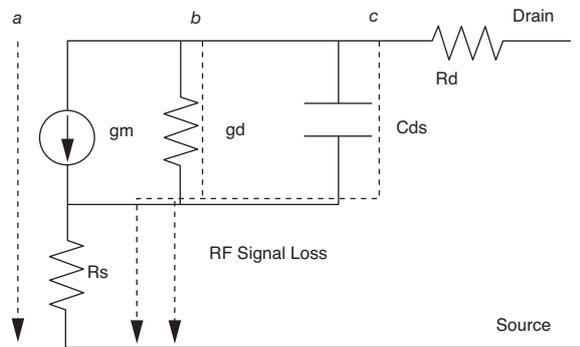


図4 トランジスタ等価回路と電力損失箇所

2-4 基地局技術トレンドとの対応 W-CDMA, WiMAX, LTEといった通信方式の高度化・高情報密度化とともに、アンプの高効率化が進められている。

GaN HEMTはその物性に起因して本質的に高い飽和効率が実現可能で、この利点への理解が浸透するにつれ、GaN HEMTの採用が進んでいくものと予測している(図5)。

効率改善のための技術は、素子技術のみに限定されず、回路技術も重要な比率を占める。次章では、回路技術に注目して、AB級アンプ、ドハティアンプ、E級アンプを解説するとともに、GaNデバイスの特性も紹介する。

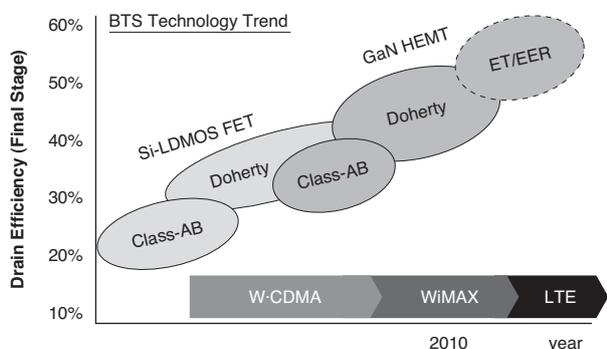


図5 携帯電話基地局トレンドとデバイス効率

3. 回路技術

3-1 AB級アンプ まず第1世代技術において適用を想定したAB級アンプを説明する。A級動作とは、直流ドレイン電流が最大飽和ドレイン電流 (I_{max}) の1/2になるようバイアスする動作であり、理想的には正弦波の電流・電圧波形が確保できる。線形性に優れるが、効率は悪い。他方、B級動作は、直流ドレイン電流がゼロになるようにゲート電圧をセットしたときの動作で、ドレイン電流波形は半波整流波形にクリップされ、ドレイン効率は向上するが、線形性は悪化する。AB級アンプとは、両者の中間的なバイアスで動作させるもので、線形性と効率特性とのトレードオフを見ながら、最適な直流セット電流が選定される。

2005年に飽和出力200WのClass-ABシングルエンドデバイスを発表した⁽¹⁾。ユニットセルを用いたロードプル測定を、実動条件相当の8dBバックオフ点で行い、効率最適インピーダンスを確定、写真1に示す高誘電率基板とウィルキンソン型分配器を用いて整合回路を設計した。実デバイスで34%の動作点効率を実現しており、2005年時点でGaN HEMTの効率優位を実証するものであった。また、

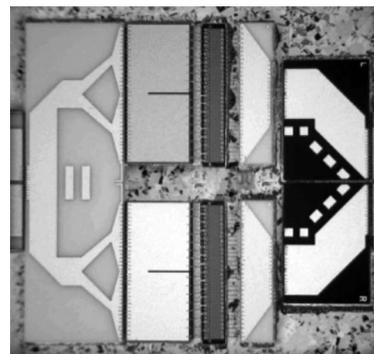


写真1 200W デバイスの内部整合回路

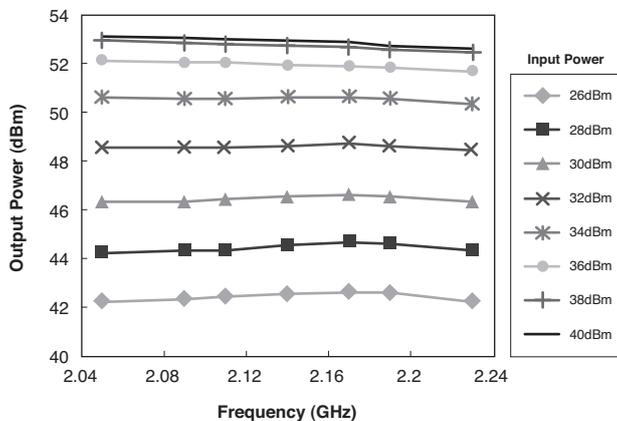


図6 出力電力の周波数依存性

200MHzもの広い帯域幅でフラットな入出力特性が得られている(図6)。高パワー密度のGaN素子ではインピーダンス変換比が小さく済むことが大きく寄与している。

3-2 ドハティアンプ ドハティアンプは、デバイスの出力インピーダンスの変化を、アクティブロードとして利用し、バックオフ点で高効率を実現する手法である。第2章で説明した通り、第2世代技術での想定動作形式でもある。

図7にドハティアンプの構成図と効率特性を示す。ドハティアンプはメインとピークの2つのアンプが並列に接続され、メインはAB級に、ピークはC級にバイアスされる。2つのアンプが同じ飽和出力(P_{sat})を持つ場合、理論的には6dBバックオフ出力で最初の効率ピークとなる。この出力でメインアンプとピークアンプの出力合成点からピークアンプを見たインピーダンスは、ほぼオープンとなっており、メインアンプの負荷は最適インピーダンスの2倍のインピーダンスとなっている。その結果、メインアンプは1/2の出力で飽和状態となっており、最大効率で動作している。一方、ピークアンプの出力はなく、消費電力はゼロである。さらに入力を増加させていくとピークアンプが立

ち上がって出力が合成されると共に、メインアンプの負荷が自動的に変化し、最適インピーダンスに近づいていく。最終的に両アンプとも最適負荷インピーダンスが与えられ、単体アンプの2倍の飽和出力が得られる。

携帯電話基地局のデジタル変調信号増幅では、平均電力に対して高い瞬時ピーク電力が要求されるとともに、良好な線形性も求められる。従って飽和出力から5dBから8dBバックオフ出力点で動作させるのが一般的である。理論上6dBバックオフ点で最大効率を発生するドハティアンプは、高効率動作の点で大きなメリットがある。

2007年には第1世代技術を用いた、W-CDMA用80Wドハティアンプを発表、2.57GHz、ドレイン電圧50V動作の規格出力点で、42%の効率を報告した⁽²⁾。この特性は、GaN HEMTとドハティの組み合わせによる優位性を示すこととなった。さらに第2世代技術の開発とデバイス適用により、2009年には、2.57GHz、50V動作において55%のドレイン効率を達成するに至っている(図8)⁽³⁾。携帯基地局の消費電力の大幅な低減を可能とし、環境負荷低減にも貢献できる技術と言える。

3-3 E級アンプ 本章の最後にE級アンプとその検討結果を紹介する。GaN HEMTの高効率化に向けた回路的な取り組みの中でもGaNの特性を發揮して良好な特性を実現した事例である。E級アンプは、マイクロ波においても動作可能なスイッチングモードの増幅器であり⁽⁴⁾、周波数上限は C_{ds} で決まる。GaNはパワー密度が高く、出力電力当たりの C_{ds} がLDMOSの1/8程度に抑制できる。LDMOSではE級アンプの検討は C_{ds} の制約から主にUHF帯に止まっているが、GaNの登場で、携帯電話に用いられる2GHz帯でも高出力のE級アンプが実現できた。図9にE級動作の回路図、図10に電流・電圧シミュレーション波形を示す。

E級アンプは主に3つの機能；スイッチ、並列キャパシタ、LCR共振器、により構成される。このスイッチがトランジスタのドレイン・ソースに置き換えられ、ゲートによりON/OFFする。共振器の共振周波数は基本周波数とする。スイッチONの時にトランジスタに電流が流れ、OFFの時に並列キャパシタに流れる。このトランジスタとキャパシタの合成電流波形は、共振器の作用により正弦波となる。

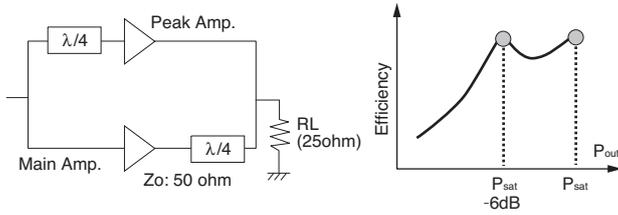


図7 ドハティアンプの構成と理想効率特性

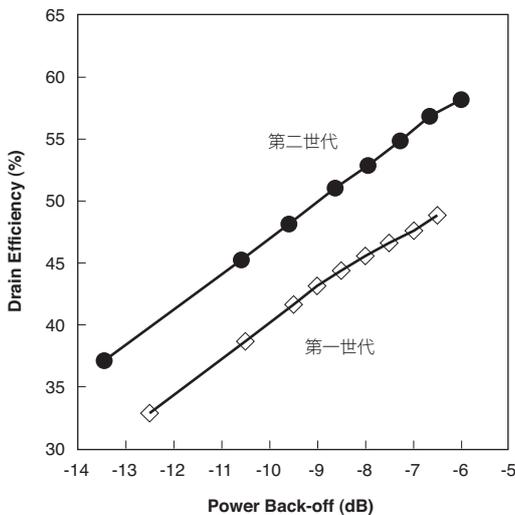


図8 ドハティアンプのドレイン効率プロファイル

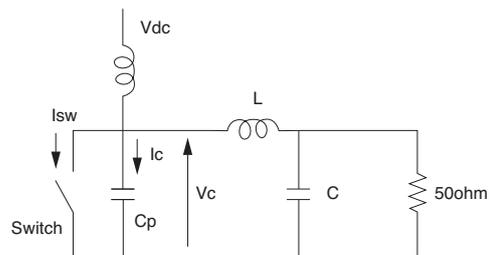


図9 ローパス整合型Class-E回路

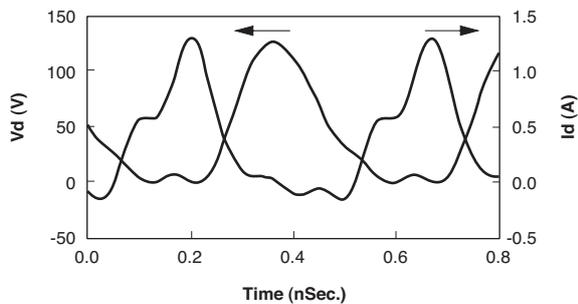


図10 電流・電圧シミュレーション波形

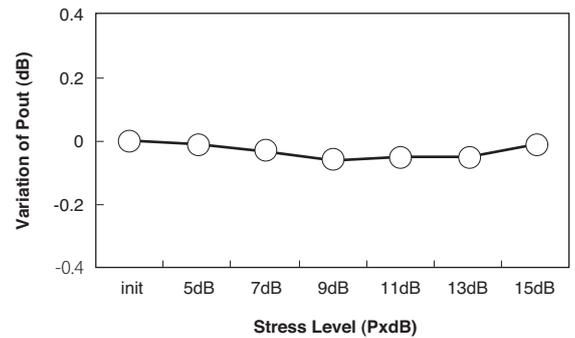


図12 RFステップストレス試験

理想スイッチであれば、そのON/OFFで電流、電圧のどちらかは必ず0となり、電源から供給される電力はDC的には消費されず、全てRFに変換される。さらに、共振器の作用により負荷では基本波成分のみ消費され、DC電力が全て基本波に変換される。理論的には100%効率が得られる。電圧波形のピーク値はスイッチ流通角により変わるが、流通角 110° の時、セットドレイン電圧に対して2.8倍となる。すなわちスイッチには、高速性と低損失だけでなく高耐圧なデバイスが要求される。GaN HEMTはワイドギャップ特性を反映して250V以上の耐圧を有することが、E級アンプ実現に大きく寄与した。2006年に行ったE級アンプの試作において、2.1GHz、50V動作のW-CDMA規格出力点で45%の効率、ピーク効率で82%を実現した⁽⁵⁾。図11にAB級アンプとの入出力特性の対比を示す。AB級アンプに対し8ポイント高い効率値が得られている。

第1、第2世代技術ともに、製品レベルで信頼度検証が完了している。製品信頼度の詳細は当社ホームページを参照頂きたい⁽⁶⁾。図12には、本E級アンプの15dB利得圧縮点までのRF過飽和動作試験（RFステップストレス試験）

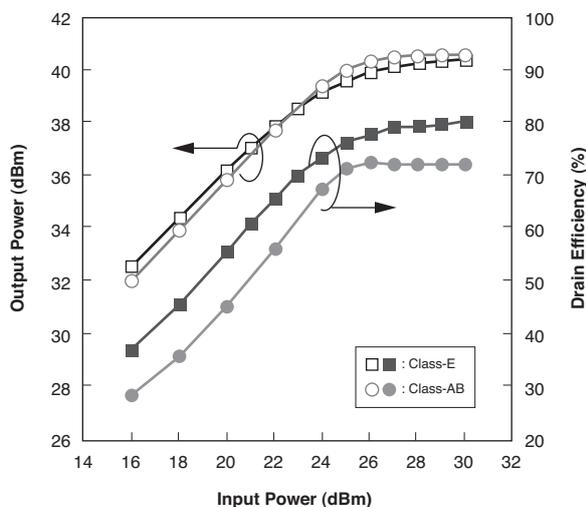


図11 E級アンプ入出力特性

結果を示した⁽⁵⁾。過酷なRF過飽和動作においても破壊や特性劣化は見られず、今後の高効率アンプ素子としても、必要な耐圧、信頼性を有することが期待できる。

4. 今後の展望

今後とも携帯電話システムは情報通信速度の高速化を図るべく世代の更新が進んでいく。同時に、優れたサービスをエリア的にも漏れなく提供する必要がある。そのためには、基地局の敷設とともに、基地局が消費する電力の問題への取り組みも重要となる。

敷設の観点からは基地局のリモート・ラジオ・ヘッド化（RRH：Remote Radio Head）の流れがある。小型・高効率のGaNの採用により、RRH局が小型軽量化することで、基地局自体のコストや、設置のコストと手番が軽減でき、基地局網の整備に寄与できる。

次に消費電力の観点から、既存の基地局アンプは1局当たり3kW程度の電力を消費するが、GaNの採用で2kW程度に低減できる。すなわち、GaNの採用で消費電力は約2/3となる。今後も、GaN HEMT素子の効率向上を進めるとともに、第3章で示したような、GaNの採用で実現可能となる、一層の高効率化回路技術の進展も期待できる。

情報通信網は今や社会インフラとして必要不可欠であり、環境負荷を最小限に抑えつつサービスを維持・拡張していく必要がある。小型基地局の設置促進と、消費電力の抑制を両立させる上で、GaN HEMTは有力な解であると考えている。今後は、LTEなどの3.9世代、さらには将来の第4世代基地局に向け、デバイス開発と製品化を進めていく所存である。

5. 結 言

高耐圧かつ高速性に優れるGaNの材料物性に注目して通信用GaN HEMTを開発してきた。ターゲット市場の1つである携帯電話基地局では、AB級動作を想定して第1世代技術を、次いで、更なる高効率化を実現すべく、ドハティ

動作を想定して第2世代技術を開発した。基地局の小型化や環境負荷低減の流れから GaN HEMT の高効率性が認知され、市場参入を拡大している。今後も LTE や第4世代基地局システムに適した技術開発と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。不純物散乱の少ない高電子濃度のチャネルが形成できる。

※2 RRH

Remote Radio Head : デジタル信号処理機能などを有する親局に光ファイバーを介してつながって基地局を構成する、アンテナや変復調機能等を有する子局のこと。

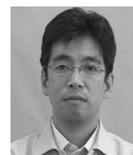
・ WiMAX は米国 WiMAX Forum の米国及びその他の国における商標または登録商標です。

参考文献

- (1) A.Kawano et.al, "High-efficiency and wide-band single-ended 200W GaN HEMT power amplifier for 2.1 GHz W-CDMA base station application", Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, (2005)
- (2) N.Ui S.Sano, "A 80W 2-stage GaN HEMT Doherty Amplifier with -50dBc ACLR, 42% Efficiency 32dB Gain with DPD for W-CDMA Base Station", 2007 IEEE MTT-S IMS Digest, pp.1259-1262 (2007)
- (3) H. Deguchi et.al, "A 33W GaN HEMT Doherty Amplifier with 55% Drain Efficiency for 2.6GHz Base Stations," 2009 IEEE MTT-S IMS Digest, pp.1273-1276 (2009)
- (4) Steve C. Cripps: "RF Power Amplifiers for Wireless Communications" Artech House (1999)
- (5) N.Ui et.al, "A 45% Drain Efficiency, -50dBc ACLR GaN HEMT Class-E Amplifier with DPD for W-CDMA Base Station," 2006 IEEE MTT-S IMS Digest, pp.718-721 (2006)
- (6) http://www.sedi.co.jp/products/newproducts/gan_hemt.html

執筆者

井上 和孝* : 伝送デバイス研究所 新領域研究部
主席
GaN HEMT の研究開発に従事



佐野 征吾 : 伝送デバイス研究所 次世代プロセス研究部
グループ長

舘野 泰範 : 伝送デバイス研究所 次世代プロセス研究部 主席

八巻 史一 : 伝送デバイス研究所 次世代プロセス研究部 主査

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 電子デバイス開発部 マネージャ

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 電子デバイス開発部 マネージャ

川野 明弘 : 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 電子デバイス開発部

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 電子デバイス開発部

*主執筆者