

窒化ガリウムHEMT技術の展望

Outlook for GaN HEMT Technology

● 常信和清 ● 吉川俊英 ● 増田 哲 ● 渡部慶二

あらまし

ワイドバンドギャップ半導体である窒化ガリウム(GaN)を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)は高効率デバイスとして様々なグリーンICTシステムへの応用が期待されている。GaN HEMTではピエゾ効果と自然分極効果によりGaNとAlGaNの界面に高密度の2次元電子ガス(2DEG)が蓄積し、オン時の抵抗(R_{on})が低いトランジスタ特性が得られる。高い破壊耐圧と合わせてGaN HEMTはパワーデバイスとしての優れた性能を有している。GaN HEMT技術は携帯電話基地局の電力増幅器向け開発から始まり、レーダーセンサーへの応用に広がり、更に、サーバ電源などのパワーコンバージョン用途への拡大が期待されている。従来、GaN HEMT技術は高出力というキーワードで開発が進められていたが、近年そのメリットは高効率・省電力に移っている。

本稿では、GaN HEMT技術について、省エネルギー貢献というキーワードで展望する。

Abstract

Because of their high breakdown voltage, high switching speed and low on-state resistance (R_{on}), GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs) have come to be widely used as high-frequency power amplifiers in recent wireless communication systems. There are also high expectations for them as next-generation power conversion devices as we aim for a green ICT society. In this paper, first we review high-frequency and high-efficiency GaN HEMTs and their MMIC power amplifier applications. Second, we explain high-efficiency GaN HEMTs on Si for power conversion applications. GaN HEMTs on Si have attracted much attention for their ability to be mass produced and cost performance. We report their power conversion characteristics in a power factor correction (PFC) circuit of a power supply unit for a high-performance server system. Finally, we describe the outlook for GaN HEMT technology that can help us to achieve a green ICT society.

ま え が き

窒化ガリウム（GaN）はLED照明や青色信号機など様々な場面で実用化されている。電子デバイス用途でもGaNを用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）のグリーンICTシステムへの応用が期待されている。HEMTは富士通研究所が世界に先駆けて開発したもので、1980年代に衛星放送受信アンテナの小型化で注目され、歴史的に富士通がリードを続けている技術領域である。GaN HEMTの基本構造を図-1に示す。ピエゾ効果と自然分極効果によりGaNとAlGaInの界面に高密度の2次元電子ガス（2DEG）が蓄積し、オン時の抵抗（ R_{on} ）が低いトランジスタ特性が得られる。また、ワイドバンドギャップ半導体としての高い破壊耐圧と合わせて、GaN HEMTはパワーデバイスとしての優れた性能を有している。

高周波GaN HEMTはワイヤレス通信システムやレーダーシステムの送信用パワーアンプに必要な不可欠なデバイスであり、高出力・高効率性能を有している。例えば、携帯電話の基地局では100 Wクラスの高出力かつ高効率なパワーデバイスが必要とされる。従来のGaAs MESFETやSi LD-MOSFETを用いたパワーアンプでは100 Wクラスのパワーを出すには、複数のデバイスを並列構成にする必要があった。一方、GaNパワーHEMTはその高い出力性能により、一つのデバイスで100 W以上を出すことができ、高効率・省電力のパワーアンプが実現可能となってきた。

最近、活発に研究開発されているのは数十MHz

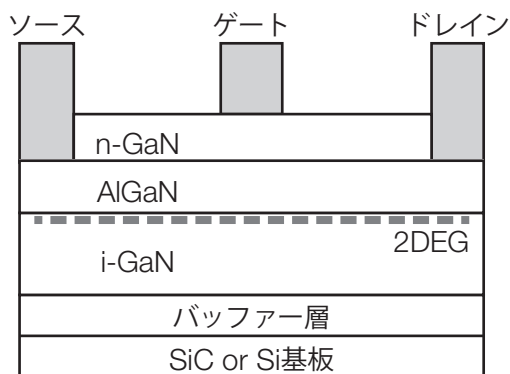


図-1 GaN HEMTの基本構造

以下のパワーエレクトロニクス応用である。GaN HEMTは従来高出力というキーワードで開発が進められていたが、そのメリットは高効率・省電力に移っている。

本稿では、GaN HEMT技術による省エネルギーへの貢献について報告する。

高効率動作

トランジスタ回路を高効率で動作させるには、理想的にはトランジスタの動作中に流れる電流と電圧のうち必ずどちらかがゼロになれば良い。電流・電圧積すなわちトランジスタの消費電力がゼロとなり、100%の動作効率が得られる。しかし、現実にはトランジスタのオン状態で抵抗 R_{on} があり、また、トランジスタの寄生容量により瞬時のスイッチングはできない。従来、増幅器やスイッチング電源装置に多く用いられているシリコン（Si）トランジスタに比べ、GaN HEMTは2次元電子ガス密度が高いことにより低 R_{on} で通電状態における電力損失（オン損失）が低い。また、低寄生容量によりオン状態とオフ状態を切り替えるときの電力損失（スイッチング損失）も低い。この二つの特長により、従来のSiトランジスタに比べてGaN HEMTでは低消費電力動作が可能となる。

パワーエレクトロニクス応用では、スイッチング電源用デバイスとして期待されている。その課題は高速な応答特性のために生じるスイッチング時のリングングである（図-2（a））。余分な電力消費となるリングングをいかに抑えるかが重要となっている。一方、数百MHz以上の高周波増幅器応用では、トランジスタの電流・電圧積がゼロになるように、負荷インピーダンス値を制御し高効率動作させる。例えば、信号周波数（基本波）の偶数倍の周波数での負荷インピーダンス値を無限大に、奇数倍の周波数での負荷インピーダンス値をゼロに調整した逆F級動作では、ドレイン電流波形は矩形に、ドレイン電圧は半波整流波形になる（図-2（b））。ドレイン電流波形が矩形となりピーク電流値が低いため、トランジスタの R_{on} や給電線の抵抗による電力消費や電圧低下を軽減でき高い効率が得られる。一方、ドレイン電圧のピーク値は印加したDC電圧（ V_{DS} ）の約3倍となるためトランジスタには高い耐圧が求められる。GaN HEMT

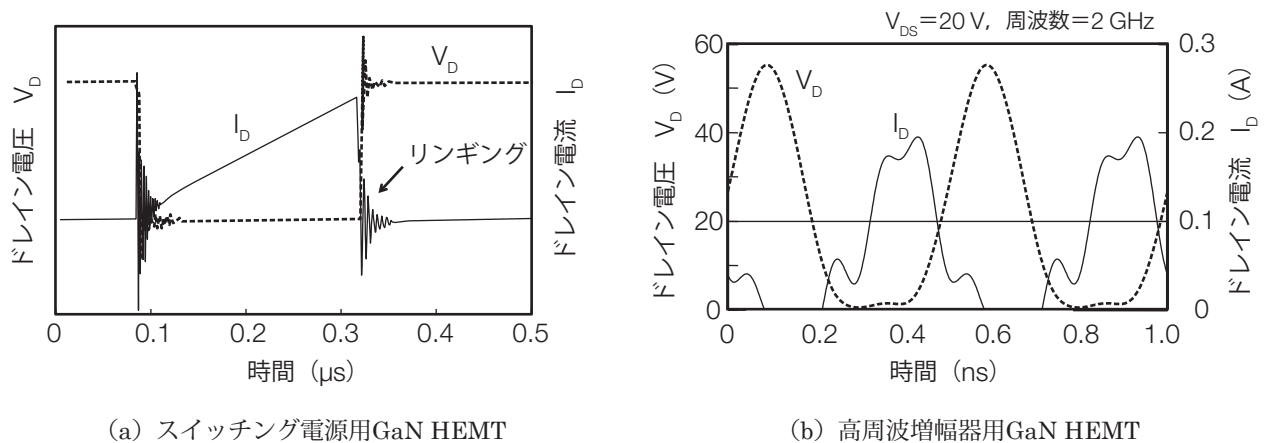


図-2 ドレイン電圧とドレイン電流の波形

は高耐圧特性を特長としており、高効率動作に最適なデバイスである。なお、スイッチング波形の比較から分かるように、スイッチング電源では90%以上の効率が得られるが、高周波増幅器では電流電圧のオーバーラップは残り、通常70%前後の効率となる。

高周波GaN HEMT技術

高周波GaN HEMT技術の開発例として、10 GHz帯で動作する1チップの送受信モノリシックマイクロ波集積回路（MMIC：Monolithic Microwave Integrated Circuit）と、6～18 GHzという広帯域で動作するMMIC増幅器を以下に示す。

ネットワーク社会の進展に伴い、様々な無線システムの電波需要は増加することが見込まれている。それらの送信機・受信機がそれぞれ別々の装置で構成されるよりは、送受信機の機能を統合した送受信チップがあれば一つの装置で対応することが可能となり、システムを小型・省電力化できる。高出力な送信信号と微弱な受信信号を1チップ上で同時に扱うには、送受信信号を効率良く切り替えること、送信信号が受信信号に与える影響を低減することが必要となる。従来これらを両立することが技術的に困難であった。

GaN HEMTを用いた送受切替器を新たに開発した。サイズは1.8 mm×2.4 mmと小型で、0～12 GHzで伝送損失1.1 dBの世界最高レベルの性能を達成した。従来の磁性体を用いた送受切替器に比べ1/10以下の大幅な小型軽量化が可能になった。

また、トランジスタの周りに接地ビアホールを配置し不要な信号放射をシールドするとともに、3次元電磁解析により信号配線を適切に配置し、不要な信号干渉を抑制した。本技術により、大きな出力を有する回路を発振などの誤動作を起こすことなく安定に動作させることが可能になった。この技術を用いて、送受切替器と送信増幅器、受信増幅器を集積した送受信1チップMMICを試作した（図-3）。10 GHz帯で出力6.3 Wを実現しつつ、チップサイズを3.6 mm×3.3 mmと従来の複数チップを用いた場合に比べ1/10以下に小型化することに成功した⁽¹⁾

航空機レーダーのように、従来は周波数帯域ごとに複数の通信装置を利用していた場合でも、一つの増幅器で対応できるようになれば、レーダー機器やワイヤレス通信システムの省エネルギー化、小型・軽量化と広いエリアのカバーを実現できる。例えば、航空機のレーダーでは、降雨に強いC帯（4～8 GHz）と、物体を高い精度で測定できるX帯（8～12 GHz）、Ku帯（12～18 GHz）の複数を切り替えて利用しているが、C～Ku帯にわたる広帯域の増幅器があれば一つで対応することができ、システムを小型・省エネルギー化することができる。従来、複数のGaAsトランジスタを並列に接続した増幅回路が用いられていた。トランジスタの数を増やせば出力を増やすことができるが、同時に回路配線が長くなるため配線損失が大きくなり、18 GHzまでの帯域を確保することが困難であった。

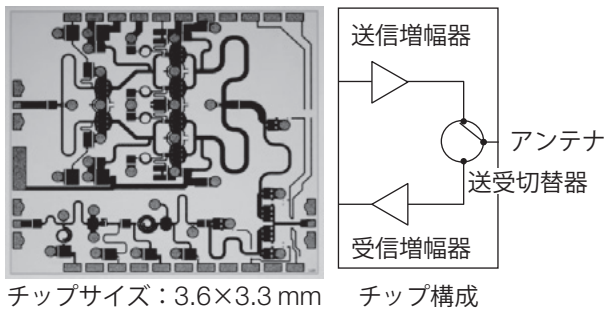


図-3 10 GHz帯GaN送受信1チップMMIC

超広帯域で電力分配と電力合成を行う回路を開発し、半導体基板上に作り込むことにより、GaN HEMT MMICの特性として6～18 GHzという広帯域において従来比2倍となる12.9 Wの出力を実現した⁽²⁾。また、GaN HEMTを用いた受信増幅器を開発し2.7 mm×1.2 mmと小型で、3～20 GHzで信号増幅率16 dB、雑音指数2.3～3.7 dBの世界最高レベルの性能を達成した。更に、これらのMMICを用いた小型で高出力の送受信モジュールを開発した(図-4)。送受信モジュールの大きさを12 mm×30 mmと小型化し、6～18 GHzという広帯域で出力10 Wを実現した⁽³⁾。この技術を用いることで、単一の送受信モジュールで複数の周波数を使用することが可能となり、周波数を使い分けるレーダーや広帯域通信などのシステム統合が進み、機器の小型・軽量化、省エネルギー化が可能となる。

パワー GaN HEMT技術

パワー GaN HEMTは、従来のSiパワーデバイスに比べ R_{on} が小さく高速動作が可能などの特長により、電源の変換効率改善や小型化が期待されている。特に、電源のスイッチング周波数を従来の数百kHz以下から1 MHzを超えるように設定できればトランスやインダクタなどの磁気部品やキャパシタ部品の小型化と軽量化、省電力化が可能になる。

パワー GaN HEMTではゲート電極にプラス電圧を印加し2次元電子ガス密度を上げることにより R_{on} を低減する。しかし、前述の高周波GaN HEMT構造では、ゲート金属電極を半導体に直接形成するショットキー型電極構造を採用しているため、ゲート電圧を2 V程度しか印加することがで

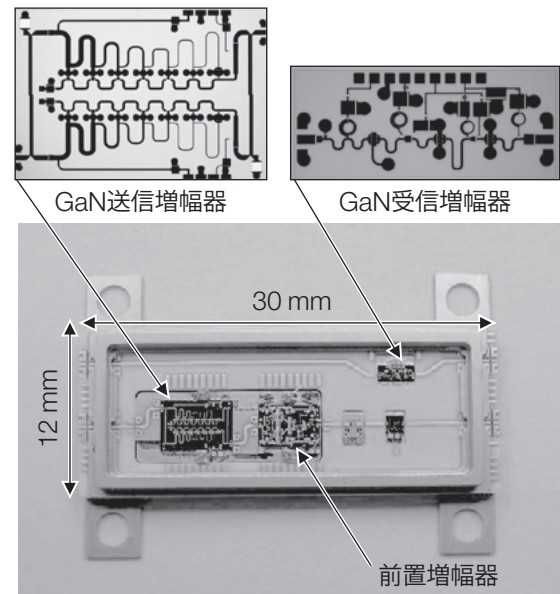


図-4 広帯域GaN HEMT送受信モジュール

きない。そこでパワー GaN HEMT技術として金属と半導体の界面に絶縁膜を挟んだ絶縁ゲート構造を開発した。その結果、2 V以上にゲート電圧を印加することができ低 R_{on} 特性が得られた。また、スイッチング電源用で課題となるリングングに対しても耐性が向上した。

ゲート絶縁膜としてバンドギャップの大きな Al_2O_3 を採用し、成膜にはALD (Atomic Layer Deposition) 法を適用した。ALD法は原子層レベルで膜厚を制御することにより平坦かつ均一性の高い絶縁膜を得ることができる。GaAsやInPなどの従来の化合物半導体では絶縁膜と半導体の界面に電子トラップが多く、Si MOSFETのように絶縁ゲート構造を採用することは非常に困難であった。一方、GaNの界面トラップは比較的少ないが絶縁ゲート構造にするには不十分であった。界面トラップは、GaN HEMTがオンする電圧 V_{th} の安定性に影響する。ゲート電圧を正に印加すると、絶縁膜と半導体界面のトラップに電子が捕獲され V_{th} がシフトしてしまう⁽⁴⁾。著者らは V_{th} シフトの要因が Al_2O_3 内のAlOH不純物と Al_2O_3 /GaN界面のGa酸化物であることを見出し、それらを除去することで V_{th} シフトを2 V前後から0.25 Vまで低減することに成功した⁽⁵⁾。

パワー GaN HEMTの実用化には製造コストの低減も重要となる。著者らは富士通セミコンダクター

と共同で大口径化による低コスト化が可能なSi基板を用いたGaN on Si技術を開発した。6インチSi基板上に良質なGaN結晶を成長する技術やスイッチング時の R_{on} の上昇を抑制するための電極構造の最適化などのデバイス技術を開発した。開発したパワー GaN HEMTを使って評価用電源回路を試作し、従来のシリコンデバイスを上回る電力変換効率を得ることに成功した。また、中尾らにより試作された、力率改善回路部にパワー GaN HEMTを搭載したサーバ用電源⁽⁶⁾において、2.5 kWの高出力動作が実証された(図-5)。入力AC 230 V、出力DC 12 Vでのトータル効率はピーク値で94.3%を達成した。これらの結果は、パワー GaN HEMTのグリーンICTシステム用途への道を開くものと考えられる。更には、太陽光発電用パワー・コンディショナーやエアコン電源などへの応用により低炭素社会への貢献も期待できる。

今後の展開

GaN HEMTを用いた技術は、前述の無線通信、電力変換機器の小型・省エネルギー化に加え、本稿では述べなかったが各種のセンシング機能からクラウドネットワークを通じたM2M (Machine-to-Machine) 分野への展開も期待されている。センシングにおいては、GaN HEMTの高速かつ高感度の特性を生かし、環境やバイオ、構造物解析など各種の用途展開が検討されている。M2M、ICT分野を通じて、GaN HEMTはエネルギー・スマートシティ、車・交通、食糧・流通・農業、健康・医療・福祉、環境、教育などのインテリジェントな社会基盤をデバイスから支える新たなフィールドへの進出が期待される。

む す び

本稿では、省エネルギーをキーワードに高周波増幅器用途および電力変換用途のGaN HEMT技術を報告した。GaN HEMTは低オン抵抗と高速スイッチング性能に優れ、今後もGaN HEMT技術の更なる向上と、その性能を生かせる回路的試みを進めることにより、低消費電力化と小型化を低コストで実現でき、更に新たなフィールドへ進出する可能性があると考えている。本デバイス利用による様々なICTシステムの価値向上に向けた提案を

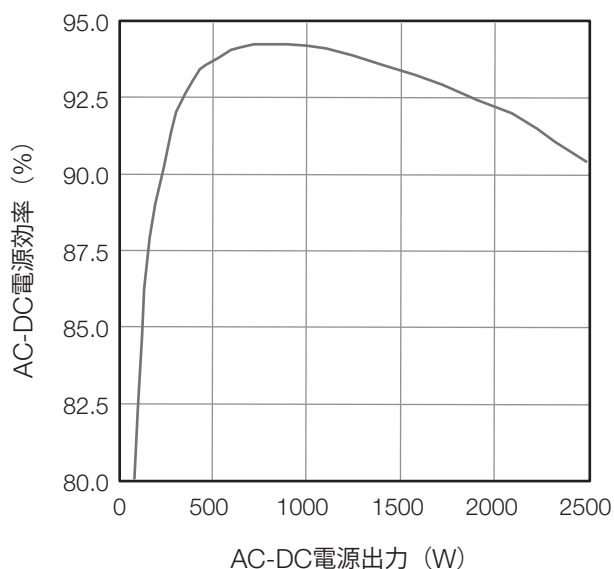


図-5 パワー GaN HEMTを搭載したサーバ用電源装置の出力と効率の特性

行い、低炭素社会の実現に大きく貢献していく。

参考文献

- (1) S. Masuda et al. : GaN single-chip transceiver frontend MMIC for X-band applications. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June 2012.
- (2) S. Masuda et al. : Over 10 W C-Ku band GaN MMIC non-uniform distributed power amplifier with broadband couplers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, p.1388-1391, May 2010.
- (3) S. Masuda et al. : C-Ku band GaN MMIC T/R frontend module using multilayer ceramics technology. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, June 2011.
- (4) T. Imada et al. : Reliability analysis of enhancement-mode GaN MIS-HEMT with gate-recess structure for power supplies. IEEE International Integrated Reliability Workshop (IIRW), p.38-41, October 2011.
- (5) S. Ozaki et al. : Effect of Oxidant Source on Threshold Voltage Shift of AlGaIn/GaN MIS-HEMTs Using ALD- Al_2O_3 Gate Insulator films. Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS-MANTECH), 11a.1, 2012.

(6) H. Nakao et al. : 2.5-kW Power Supply Unit with Semi-Bridge-Less PFC Designed for GaN-HEMT.

IEEE Applied Power Electronics Conference, March 2013.

著者紹介



常信和清 (じょうしん かずきよ)
基盤技術研究所 所属
現在, GaN HEMTの開発に従事。



増田 哲 (ますだ さとし)
基盤技術研究所 所属
現在, GaN HEMTの研究開発に従事。



吉川俊英 (きっかわ としひで)
基盤技術研究所 所属
現在, GaN HEMTの研究開発に従事。



渡部慶二 (わたなべ けいじ)
基盤技術研究所 所属
現在, GaN HEMTの研究開発に従事。