

窒化ガリウムHEMT技術の パワーエレクトロニクスへの応用

GaN HEMT Technology for Power Electronics

● 廣瀬達哉 ● 今井三貴 ● 渡部慶二

あらまし

窒化ガリウム(GaN)はワイドバンドギャップ半導体と呼ばれる化合物半導体材料であり、既に光源用LEDとして実用化されている。GaNを用いたGaN HEMT(高電子移動度トランジスタ: High Electron Mobility Transistor)は低い動作抵抗と高い破壊耐圧を有し、あらゆる電力・エネルギーを扱う機器の高効率・小型化を実現できる次世代のパワー半導体である。GaN HEMTも、既に高周波ワイヤレス通信システムやレーダーシステムの送信用電力増幅器として実用化されている。近年では、破壊耐圧600 V以上のGaN HEMT構造を大口径かつ安価なシリコン(Si)基板上に製造する技術の確立とあいまって、データサーバやPC用途のスイッチング電源用パワーエレクトロニクス機器の高効率化に向けた開発が急ピッチで進められている。富士通研究所では、将来のICT製品への適用に向けてGaN HEMTを用いたスイッチング電源の研究開発を進めている。

本稿では、これまで開発してきたGaN HEMT技術をスイッチング電源へ応用する際の設計技術、および省エネルギーへの貢献について報告する。

Abstract

Gallium nitride (GaN) is one of the wide-band gap compound semiconductors and it has already been put to practical use in areas such as light-emitting diodes. Because of the very low on-state resistance and high-breakdown voltage characteristics of GaN HEMT, it will be used in next-generation power devices since it offers high efficiency and miniaturization for all types of power-energy equipment. GaN HEMT is already practically used in GHz-band power amplifiers such as wireless communication systems and radar systems. Along with the recent success of establishing mass production of a GaN HEMT with breakdown voltage of over 600 volts on a Si wafer, there is active development of highly efficient power electronics equipment such as switching power supplies for data server systems and PCs. Aiming to enhance the power efficiency of future information and communications technology (ICT) products, Fujitsu Laboratories' conducting research and development on switching power supplies using GaN HEMTs. This paper describes Fujitsu Laboratories' developed GaN HEMT circuit design technology for power electronics, especially switching power supplies.

ま え が き

窒化ガリウム (GaN) はワイドバンドギャップ半導体と呼ばれる化合物半導体材料であり、LED照明や装飾イルミネーション用光源として既に実用化されている。GaNはシリコン (Si) 半導体と比較して高い破壊耐圧^{(1),(2)} および高い電子飽和速度を有していることから、高速スイッチ素子や高周波増幅素子に向けた実用化研究も盛んに進められている⁽³⁾。その代表的な構造が高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) である⁽⁴⁾。

HEMTは、1979年に富士通研究所が世界に先駆けて発明し、10 GHz帯衛星放送受信アンテナの小型化では歴史的に世界をリードし続けている技術である。GaNを用いたHEMT (GaN HEMT) は、Siを用いたスーパージャンクション (SJ) 型金属-酸化物-半導体電界効果型トランジスタ (Si MOSFET) に比べて、そのキャリア密度は $5 \sim 10 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ と非常に高い。そのため、後述する真性オン抵抗 (R_{on}) をSiの1/5 ~ 1/10にでき、高い破壊耐圧を備えた高速動作可能なパワーデバイスを実現しやすい。図-1は、半導体電子デバイスの R_{on} と破壊耐圧との関係を炭化ケイ素 (SiC) およびスーパージャンクション型を含むSJ Si MOSFETと比較したものである。この図より、GaN HEMTはほかの半導体よりも高い破壊耐圧と低い R_{on} を実現できる有望な電子デバイスであると

言える⁽⁵⁾。この特長を利用し、GHz帯ワイヤレス通信やレーダーシステムの送信用電力増幅器として実用化されている。

近年、600 V以上の高い破壊耐圧を有するGaN HEMT構造を、大口径かつ安価なSi基板上に製作できるようになった⁽⁶⁾。これにより数百ボルト以上の高い電圧下での動作を要求される高出力スイッチング電源などのパワーエレクトロニクス機器への応用が可能となり、グリーンICTシステムの実現が間近となっている。その一方で、地球温暖化対策のための更なる省エネが叫ばれており、求められる消費電力削減量が年々増加している。

2016年2月、米国エネルギー省 (DOE) はACアダプターなどの外部電源機器の効率基準を引き上げ、電力規制はより厳しくなっている⁽⁷⁾。このため、あらゆるエレクトロニクス機器の高効率化が課題となっている。更に、携帯電話やスマートフォン、タブレットの普及に伴い、これらの機器の充電用ACアダプターについても、高効率化に加えて小型化への要求も増大している。筆者らは、環境貢献の一環としてGaN HEMTを用いた電源機器の高効率・小型化に取り組んでいる。

本稿では、GaN HEMTをパワーエレクトロニクス機器、特にスイッチング電源に応用する際の設計技術および省エネルギーへの貢献について報告する。

GaN HEMTが高効率である要因

トランジスタをスイッチ素子として利用するスイッチング電源において、そのスイッチ素子の動作損失のない理想的な状態とは、スイッチ素子に流れる電流と電圧のうち、どちらか一方がゼロになっていること、すなわち電流と電圧の積がゼロになることである。しかし現実には、スイッチ素子であるトランジスタの各電極 (ドレイン、ゲート、ソース) に直列に抵抗成分が存在し、特に電流が流れるドレイン電極とソース電極の間に消去することのできない寄生抵抗が生じる。また、スイッチ素子に流せる電流量は、それを構成するトランジスタの持つ電子濃度に依存して有限となるため、これが真性オン抵抗となる。

寄生抵抗成分とこの真性オン抵抗により、電流が流れているときにはスイッチ素子の両端の電圧

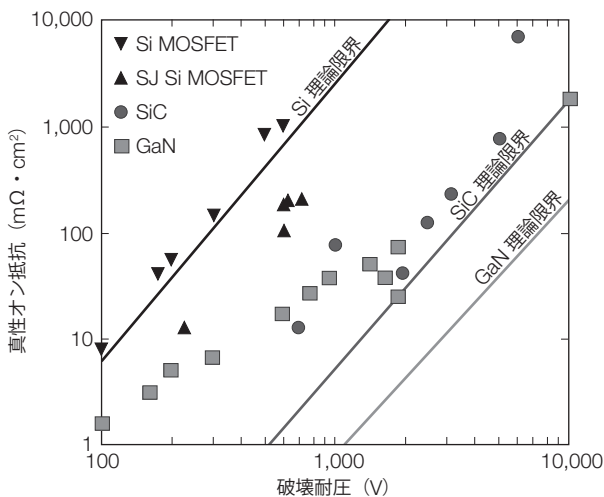
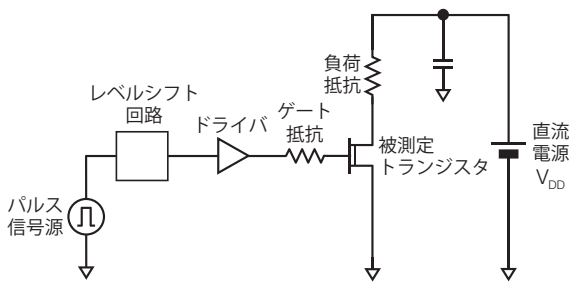


図-1 ワイドバンドギャップ半導体の性能比較

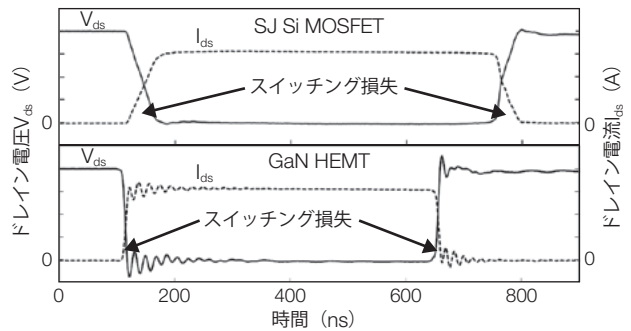
表-1 GaN HEMTとSi MOSFETとの比較

	しきい値電圧 V_{th} (V)	オン抵抗 R_{on} (m Ω)	DS間耐圧 BV (V)	最大定格電流 I_{max} (A)	入力容量 C_{iss}^* (pF)	出力容量 C_{oss}^* (pF)	帰還容量 C_{rss}^* (pF)	ゲート電荷蓄積 Q_g (nC)
GaN HEMT	2	100	600	20	450	140	1.3	14
Si MOSFET	3	190	600	20.7	2,400	60	7	87

★ : $V_{ds}=600$ V



(a) パルス応答特性評価回路



(b) GaN HEMTとSJ Si MOSFETのパルス応答特性

図-2 パルス応答特性の比較

はゼロにならず電力損失が生じる。これをオン損失と呼ぶ。更に、各電極間には物理的に消去することのできない寄生容量が存在することから、スイッチ動作が切り替わる過程において、寄生抵抗と寄生容量によって電流、電圧の時間的な変化率は有限となる。このため、電流と電圧の積がゼロにならず電力損失が生じる。これをスイッチング損失と呼ぶ。

カスコード型GaN HEMTおよびSi MOSFETの主な電気的特性を表-1に示す。最大定格電流 I_{max} が同等であっても、GaN HEMTのオン抵抗 R_{on} はSi MOSFETの約1/2である。また、スイッチング損失に関係するパラメーターである各電極間容量 C_{iss} 、 C_{oss} 、 C_{rss} およびゲート電荷蓄積量 Q_g についても、出力容量を除いてSi MOSFETの1/5程度と非常に小さい。これら電気的特性の違いは、パルス応答特性に現れる。

図-2 (a) はトランジスタのパルス応答特性評価に用いた測定系の模式図である。電源電圧 V_{DD} を400 V、負荷抵抗を25 Ω としている。図-2 (b) は、GaN HEMTおよびSJ Si MOSFETのパルス応答特性結果である。実線がドレイン電圧波形、破線が電流波形である。それぞれの波形が交差する点より下の三角形の領域がスイッチング損失に相当し、GaN HEMTのスイッチング損失はSi MOSFETに

表-2 スイッチング特性比較

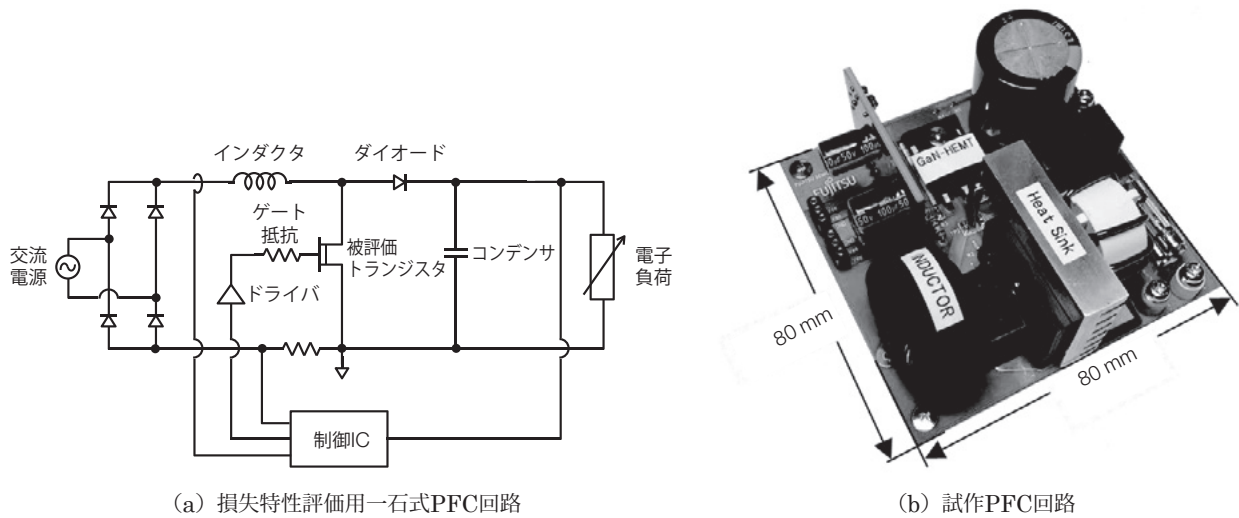
	GaN HEMT	Si MOSFET
オン時間 (ns)	7.0	41.5
オフ時間 (ns)	7.5	30.5
オン損失 (μ J)	5.6	45.4
オフ損失 (μ J)	13.7	46.9

比べて非常に小さいことが分かる。スイッチング特性の比較を表-2に示す。GaN HEMTは、スイッチング時間を1/4 ~ 1/6に短縮し、スイッチング損失については1/3 ~ 1/8まで低減していることが分かる。オン抵抗、スイッチング損失が低いことから、GaN HEMTはパワーエレクトロニクス機器をより高効率化することに適していると言える。^{(8),(9)}

PFCによる高効率動作実証

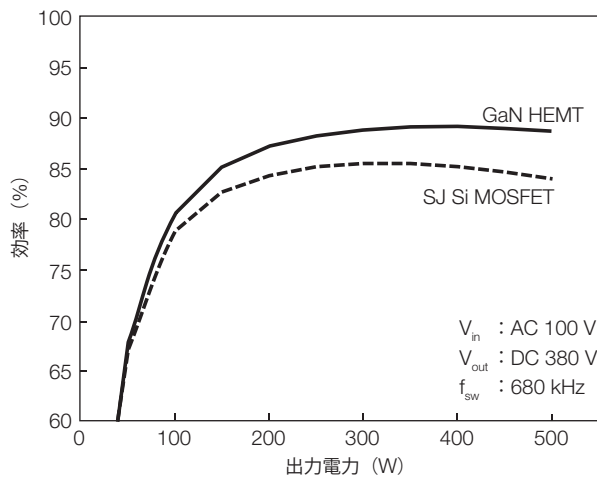
実際のパワーエレクトロニクス機器での効率を確認するために、力率改善 (PFC : Power Factor Correction) 回路にGaN HEMTを実装し評価した。図-3 (a), (b) は、評価に使用した単一スイッチによるPFC回路である。制御ICのスイッチング周波数を680 kHzと従来の約10倍とし、出力に接続された電子負荷装置で出力電力を制御し、出力電力と効率との関係性を評価した。

図-3 (c) に示すように、100 W程度の出力電力



(a) 損失特性評価用一石式PFC回路

(b) 試作PFC回路



(c) 効率特性の比較

図-3 損失評価用一石式PFC回路と効率特性

の小さい領域では、効率差は0.5～1ポイント程度であるが、出力が大きくなり、スイッチング損失の影響が大きくなる領域では効率の差は広がり、500 Wでは約5ポイントと非常に大きくなる。従来のスイッチング周波数の約10倍としたにもかかわらず、高い出力領域において高効率を実現できている^{(8),(9)}。この結果から、GaN HEMTはパワーエレクトロニクス機器を高効率化できるパワーデバイスであると言える。この技術を用いて、サーバ向け2.5 kW出力PFCも開発されている⁽¹⁰⁾。

パワーエレクトロニクス機器の小型化への取り組み

前述のとおり、GaN HEMTは高いスイッチング周波数のもとでも高効率を実現できるデバイスで

ある。このスイッチング周波数を高くすることで、以下で説明するように機器の小型化が可能となる。

パワーエレクトロニクス機器においてそのサイズを決める要因の一つとして、トランスなどのコイル部品が挙げられる。パワーエレクトロニクス機器には、多くのコンデンサやコイルなどのリアクタンス部品が使われており、これらの部品のインピーダンスは動作周波数に依存する。逆に言えば、部品自体の特性値が小さくても周波数を上げることで必要なインピーダンスを獲得できる。つまり、スイッチング周波数を高くすることで小型化が可能になる。

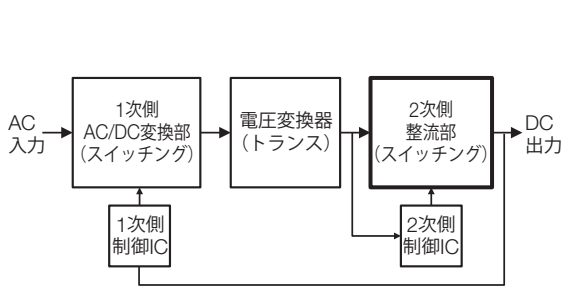
近年、携帯電話やスマートフォン、タブレットなどの携帯端末の普及が進み、世界で約21億台が

稼働している。これらの機器は、本体に内蔵されたバッテリーの許容稼働時間を越えた利用が増え、ユーザーが充電用ACアダプターやモバイルバッテリーを携帯するケースが増えてきている。しかし、5 W程度の小さい電力機器であれば、携帯に支障のないサイズのACアダプターは存在するが、10 W以上のものはサイズが大きくなり、しかも重くなる。GaN HEMTを用いれば、10 WクラスのACアダプターを、効率を改善すると同時に、従来の5 Wクラスのサイズと同等にできる。筆者らは、タブレットでも利用可能な出力12 Wで大きさがわずか15.6 cc、効率87%の世界最小・最高効率のACアダプターをGaN HEMTを用いて実現することに成功している。⁽¹⁾ その技術的概要について説明する。

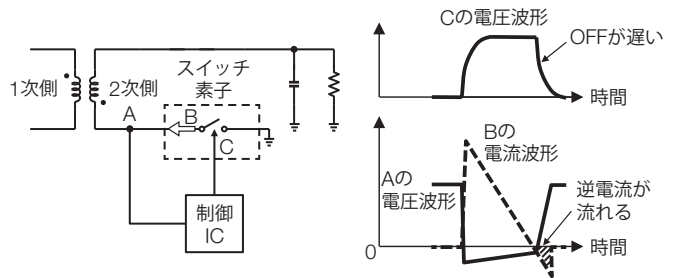
図-4 (a) に示すように、スイッチング方式のACアダプターでは、コンセントから入力された交流電圧を接続機器に応じた直流電圧として出力するために、電圧変換器（トランス）と一定周期で電流をオン・オフするスイッチによって安定した直流電圧を得る。入力からトランスまでの回路ブロックを1次側（AC/DC変換部）、トランスから出

力までの回路ブロックを2次側（整流部）と呼ぶが、低損失化を狙うため、同期整流方式を採用した。

図-4 (b) に示すように、同期整流の場合、制御ICより出力される制御信号波形の形状によっては損失を増大させてしまう。2次側のスイッチ素子が電流を流すタイミングを、1次側のスイッチ素子によるオン・オフ動作と合わせ、常にGaN HEMTに適切なタイミングで電流のオン・オフを確実に行うためには、制御ICから出力される制御信号波形の傾斜が急になるように調整する必要がある。2次側の制御ICの基本動作は、スイッチ素子の電圧に合わせてスイッチ素子のオン・オフを制御する電圧を発生させる。しかし、高速動作の影響でオフの動作が相対的に遅くなり、その結果スイッチ素子電圧の上昇中に一時的に通常と逆向きの電流が生じ、これが損失となる。そこで図-4 (c) に示すように、2次側の制御ICとGaN HEMTとの間に新たにタイミングを制御する回路を導入し、制御ICが生成する電圧の波形を調整することとした。これにより、従来発生していた高速動作の際の損失電流発生を抑制でき、GaN HEMTの持つ低い動作

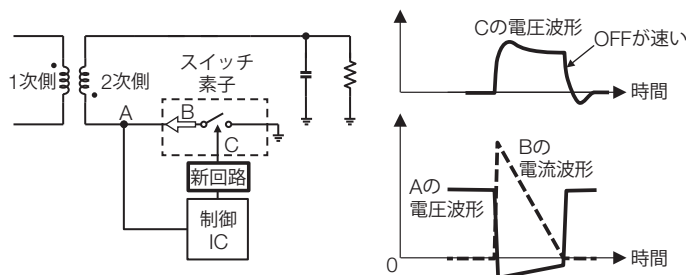


(a) ACアダプターの構成



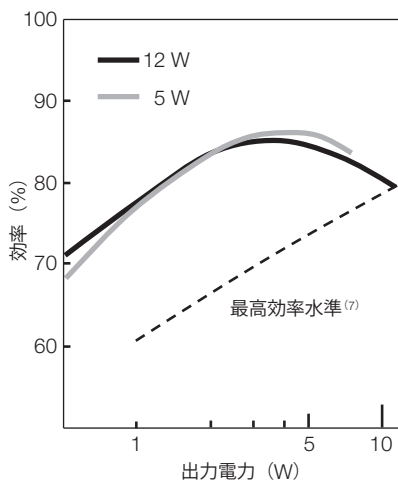
A: スイッチ素子の電圧
B: スイッチ素子を流れる電流
C: Aに応じて制御ICが生成するスイッチ素子のオン・オフ電圧

(b) 従来制御ICによる2次側同期整流の問題点



(c) 波形整形技術による効率改善

図-4 開発したACアダプターの高効率化技術



(a) 効率特性



(b) 実機

図-5 ACアダプターの効率特性と実機

抵抗を活かしながら適切なタイミングで電流出力を可能にした。

出力電力と効率の関係を図-5 (a) に示す。図中、5 W仕様と12 W仕様の2種類を示しているが、それぞれの出力に応じてトランスを最適化してある。最大効率で87%を達成し、世界最高水準の効率を得た。本技術を適用したACアダプターを同図 (b) に示す。

む す び

本稿では、GaN HEMT技術のパワーエレクトロニクス応用へ向けた設計技術について述べた。GaN HEMTは、高い破壊耐圧を持ちながら低いオン抵抗と高速スイッチング性能に優れ、前述した無線応用やPFC、ACアダプターなどの電力応用向け機器の小型・高効率化に適したデバイスである。

今後、GaN HEMTデバイス自身およびその性能を活かせる回路、実装方式を含めたGaN HEMTデバイス技術を更に発展させ、クラウドネットワークを通じたM2M (Machine to Machine) 分野やIoT (Internet of Things)、環境、化学、自動車産業など、省エネルギー・小型化に課題ICTシステムの価値向上に向けた提案を継続し、省エネルギー問題の解決と低炭素社会の実現に大きく貢献していく。

参考文献

- (1) T. Kobayashi et al. : High-voltage power MOSFETs reached almost silicon limit. Proceedings ISPSD'01, p.435 (2001).
- (2) G. Deboy et al. : A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon. Proceedings of IEDM'98, p.683 (1998).
- (3) 金村雅仁ほか：高出力AlGaIn/GaN MIS-HEMT. 信学技報, Vol.105, No.524, p.51 (2006).
- (4) 三村高志ほか：HEMT－開発経緯と現状. FUJITSU, Vol.36, No.4, p.346-354 (1985).
- (5) Xiucheng Huang et al. : Analytical Loss Model of High Voltage GaN HEMT in Cascode Configuration. Trans. On Power Electronics, Issue 99, IEEE(2013).
- (6) 富士通セミコンダクター：省エネ新市場を拓く窒化ガリウムパワーデバイスの量産化に目途。
<http://jp.fujitsu.com/group/fsl/release/20121108.html>
- (7) CUI INC : Efficiency Standards for External Power Supplies.
<http://www.jp.cui.com/catalog/resource/efficiency-standards-for-external-power-supplies.pdf>
- (8) 廣瀬達哉ほか：Si基板上に作製したGaN HEMTカスコードデバイスの動特性解析. 電学技報, EDD-13-58 (2013).
- (9) T. Hirose et al. : Dynamic Performances of GaN HEMT on Si in Cascode Configuration. IEEE, Applied Power Electronics Conference 2014 (2014).

- (10) H. Nakao et al. : 2.5-kW Power Supply Unit with Semi-Bridge-Less PFC Designed for GaN-HEMT. Proc. APEC2013, 28th annual, IEEE (2013).
- (11) 富士通研究所：世界最小・最高効率の12ワット出力ACアダプターを開発。
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/12/9.html>

著者紹介



廣瀬達哉 (ひろせ たつや)
デバイス&マテリアル研究所
先端デバイスプロジェクト
GaN HEMTの研究開発に従事。



今井三貴 (いまい みき)
デバイス&マテリアル研究所
先端デバイスプロジェクト
GaN HEMTの研究開発に従事。



渡部慶二 (わたなべ けいじ)
デバイス&マテリアル研究所
先端デバイスプロジェクト
GaN HEMTの研究開発に従事。