

# パワー GaN 技術： 高効率な電力変換の必要性

 Dilder Chowdhury 博士 - GaN デバイス・アーキテクト

産業界の重要な課題の 1 つは電力損失の削減です。CO2 排出量削減を求める社会的圧力の高まりと、政府による法制度の強化によって、多くの業界が高効率な電力変換と電動化推進のための投資を増加させています。これには自動車の電動化、通信インフラ、サーバーのストレージ、産業オートメーションなどが含まれ、パワー・エレクトロニクスの利用が急激に広がっています。その結果、GaN 技術をベースとした効率的で革新的な、大電力 FET の需要が増加しています。

半導体業界において、電力デバイス革新の最大のモチベーション、および牽引役となっているのは、電力変換の効率向上です。さまざまな技術の中で、シリコン (Si) およびシリコンカーバイド (SiC) ソリューションと比較して、窒化ガリウム (GaN) 技術にはパフォーマンス上の大きな利点があります。特に、GaN 電界効果トランジスタ (FET) は低いシステム・コストながら、システムを軽量化、小型化、低損失化することで最高の効率を發揮します。

パワー GaN トランジスタ、特に GaN-on-Si デバイスが市場に投入されて以来、パフォーマンス、信頼性、コスト、入手性が大きく向上してきました。より高性能な GaN パワー・トランジスタを入手できるようになり、さらなる大電力化が進んでいます。電気自動車 (EV) の要件に適合し、データセンタのアプリケーション、通信インフラ、産業アプリケーションにも適しています。

## 自動車の電動化による効率向上

自動車の電動化は、新しいパワー GaN FET 技術によるメリットを最も多く受けている分野です。電気自動車を取り巻く大きな問題の 1 つは航続距離ですが、電動車 (xEV) に電力損失があると航続距離に影響を及ぼすため、すべての xEV の効率向上には電力変換がカギとなります。このような損失があると放熱のための冷却システムも必要となり、車両システムが複雑化し、重量も増加してしまいます。

自動車業界は、バッテリーの重量と電力密度など多数の問題に取り組んでいますが、以下の領域で大幅な改善が行われています。

- › 電力変換の改善と高効率化
  - › AC/DC 車載充電
  - › DC/DC 電力変換
  - › トラクション・モーター駆動用 DC/AC インバータ
  - › 電力密度の向上
  - › シンプルな駆動 / 制御スキーム
- › トラクション・モーターの改善
  - › 効率の向上
  - › トルクとパワーの増加
  - › 損失の低減
  - › 高 dv/dt 耐性
- › バッテリー、ストレージ、バッテリー管理システムの改善

電力変換の高効率化には多くのメリットがあります。たとえば、200 kW インバータの効率が 95% から 99% に向上すると、最大負荷時の電力損失が 10 kW から 2 kW と約 5 分の 1 に低下します。損失が 8 kW 減る (と駆動力に活用できる) だけでなく、冷却の必要性が減ることで、冷却のためのエネルギー消費量と、冷却システムのサイズと重量が低減されます。その結果、航続距離の延長や、小型バッテリーでの同じ航続距離の実現が可能になります。

**nexperia**

EFFICIENCY WINS.

上記は、超高効率を達成することの重要性を示しています。GaN-on-Si エピタキシャル (epi) をベースとしたパワー GaN FET は、高効率によるこの分野への貢献だけでなく、xEV の大型化をサポートするスケーラビリティも提供します。シンプルな Si 製造 (ファブ) プロセスは、事業を実現するための最適なコスト・ロードマップも可能にします。現在、パワー GaN 技術は 400 V のバッテリー・システム向けの 650 V 耐圧のデバイスをサポートし、最大 800 V のバッテリー・システムと 1200 V のパワー GaN デバイスに対応できます。どちらもパワー・レンジは最大 300 kW です。

### 高電圧シリコン・トランジスタは限界に

高電圧 (HV) パワー半導体スイッチは、あらゆる電力変換の基礎をなす構成要素です。それに代わるものがないため、現在 Si ベースの絶縁ゲート・バイポーラ・トランジスタ (IGBT) は技術的に成熟しているにもかかわらず、トラクション・インバータ市場の大多数を占めています。Si IGBT の改良や SiC ダイオードとの組み合わせによって、徐々に高効率化が進んでいますが、これ以上の改善の可能性は限られています。Si IGBT は動作周波数 (速度) に根本的な制限があり、高温時、および低電流領域の特性も劣っています。

高い周波数では Si スーパー・ジャンクション (SJ) 技術が、AC/DC 力率改善回路 (PFC) や DC/DC 電力変換の市場で優位に立っています。ただし、スイッチング・クロスオーバー、導通特性、逆回復損失など素材特有の制限から、高周波動作時に高効率を達成する能力に制限があります。

### 代替技術としてパワー GaN が台頭

一方、GaN や SiC などのワイド・バンドギャップ (WBG) 素材は、逆回復損失がなく、非常に低いスイッチング・クロスオーバー損失 (極めて高速なオン/オフ特性を持つため) と低い導通損失をもたらします。高い臨界電場と高い移動度を併せ持つ WBG 素材は、高電圧に対して非常に低いドレイン・ソース間オン抵抗  $R_{DS(on)}$  と、極めて優れたスイッチング性能指数を持っています。WBG デバイスが市場に投入され始めたことで、大きな展望が開け、Si IGBT/Si SJ デバイスが本質的に持つ多くの制約が取り除かれました。

ダイオードの逆回復によって Si SJ FET を使用できなかった、一部の困難なスイッチング・アプリケーション・トポロジーでは、パワー GaN FET を容易に使用でき、部品点数の削減と高効率、シンプルな制御スキームというメリットを活かすことができます。パワー GaN FET によって可能になる高いスイッチング速度と高い動作周波数によって、信号制御の改善、高いカットオフ周波数のパッシブ・フィルタ設計、低いリップル電流が実現され、インダクタ、キャパシタ、トランスを小型化できます。その結果、コンパクトで小型のシステム・ソリューションによってコストが削減されます。

図 1 に、GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) の断面を示します。GaN と窒化アルミニウム・ガリウム (AlGaN) 層の接合界面で合成される自発分極とピエゾ分極による、2 次元電子ガス (2DEG) の形成によって動作します。エピタキシャルはシード層に通じて Si 基質上に形成されます。次に、純粋な GaN 層が成長する前に、GaN 層と AlGaN 層の傾斜層が追加されます。最後に、AlGaN の薄膜層によって 2DEG が形成されます。この層の電子移動度は、その名のとおりに非常に高くなります。

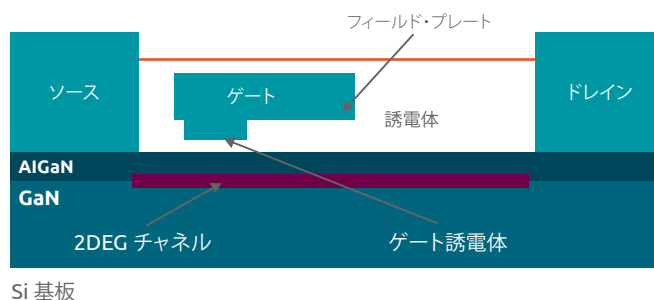


図 1 GaN HEMT の構造

### カスコードのシンプルさと堅牢さ

現在のパワー GaN FET には、エンハンスメント・モード (E モード) またはシングル・ダイ・ノーマリー・オフ・デバイスと、デプレッション・モード (D モード) または 2 ダイ・ノーマリー・オフ・デバイスという、主に 2 つのオプションがあります。E モード・ゲートには安定度とリーク電流という問題があるのに対して、2 ダイ・ノーマリー・オフまたはカスコード構成の D モード・デバイスは現在では、シンプルで堅牢です。そのため、スイッチング周波数 1 MHz 以下の動作にはカスコード GaN FET が最も適しています。

GaN-on-Si の 2 ダイ・ノーマリー・オフ構成では非常に柔軟な設計が可能です。Nexperia の GaN FET は、酸化膜 / 絶縁体ゲートによる  $\pm 20$  V のゲート定格、4 V のゲート・スレッショルド電圧を持ち、実際のターン・オフ電圧は 0 V で、ゲート電荷もわずかです。そのため、これらのデバイスと組み合わせるのはシンプルな Si 用ドライバが適し、0 ~ 8、10、または 12 V など、どのようなゲート・ドライバも使用できます。一方、SiC 技術では一般的に、デバイスのターン・オフのために少なくとも 15 V と、負電圧のゲート・ドライブ機能を持つ超大電流ドライバが必要になり、ドライバのコストが上昇し、ドライバ損失とスイッチング損失が増大します。Nexperia の GaN デバイスには、堅牢なフリーホイール経路を実現する、極めて良質なアンチパラレル・ダイオードも内蔵されています。カスコード・バージョンは、ゲート駆動設計の自由度が非常に高く、自動車業界で求められる堅牢性を備えています。

図2は、低電圧(30V)の堅牢なSi MOSFETとDモード GaN FETをカスコード構成にすると、Eモード・デバイスのゲート構造が持つ主要な問題のすべてが解消され、取り扱いが全体的に非常にシンプルになることを示しています。低電圧Siベースのゲート構造は、エンジニアが使い慣れた非常に成熟した技術です。

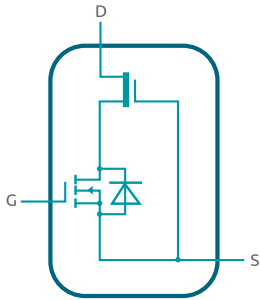


図2カスコード構成

低電圧Siの逆回復電荷( $Q_{rr}$ )は非常に小さく(図3参照)、パワー GaN 技術を十分に活用できます。さらに、カスコード・デバイスのドライブはシンプルです。さまざまなバイアス状態でのカスコード・デバイスの動作を図4に示します。パワー GaN FETは双方向形式で使用できるため、シンプルな双方向電力変換が可能になります。

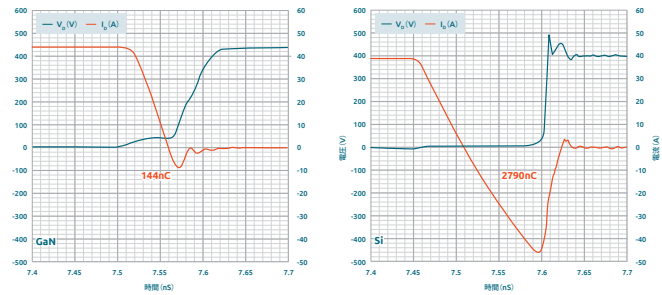


図3 GaN FETとSi FETのQrr(逆回復電荷)

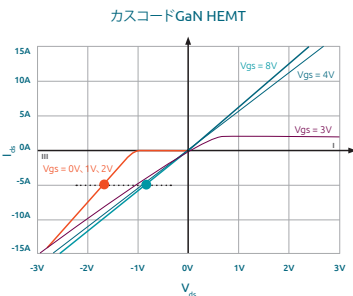
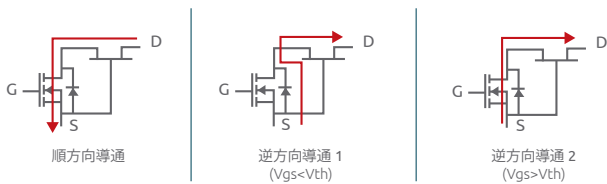


図4 GaN FETの動作

## アプリケーションと性能

AC/DCのPFCステージ、DC/DCコンバータ(図5)、もしくはトラクション・インバータ(図6)であるかにかかわらず、ほとんどのトポロジーの構成要素はハーフブリッジです(図7)。そのため、シンプルな昇圧コンバータでGaN FETとSi FETを比較すると、GaN FETは卓越した性能を発揮します。

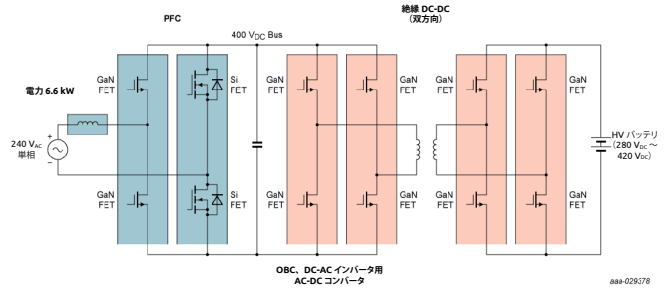


図5 AC-DC PFCステージと絶縁 DC-DC 構成

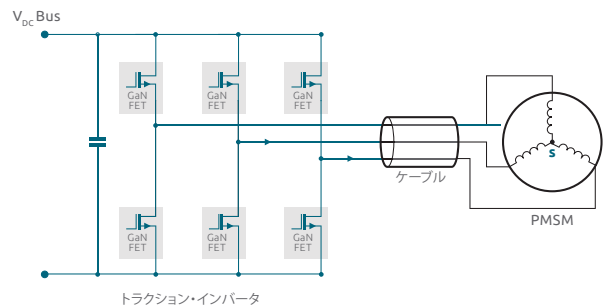


図6 トラクション・インバータ

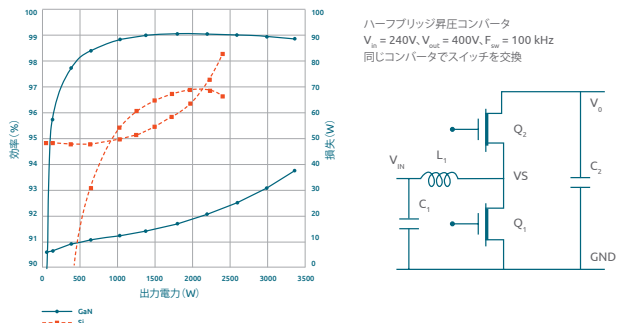


図7 ハーフブリッジ昇圧コンバータ (GaN スイッチ vs. Si CoolMOS)

逆回復損失とスイッチング・クロスオーバー損失がないため、GaN FETには損失がほとんどありません。dV/dtが約200V/nsであるため、ほぼ理想的なターン・オンとオフ損失を実現できます。GaNスイッチは非常に高速で、ギガヘルツ周波数帯の無線周波数の増幅によく使用されます。このような周波数では非常に低い電圧での動作となりますが、どちらもGaN HEMT構造を使用しているため、その特長が表れています。

GaN デバイスは非常に高速で、高dV/dtと高dI/dtのアプリケーションで使用できるため、PCBレイアウトを最適化するよう注意する必要があります。レイアウトを最適化して寄生インダクタンスを最小限に抑えることが、パワー GaN を使用するうえでの一番の基本です。

表面実装パッケージと、低インダクタンス、大電流の高性能モジュールの性能を最大化することが不可欠です。

現在のところ、トラクション・インバータに GaN デバイスを使用することは、モーター巻線を保護するために  $dV/dt$  を大幅に低くすることを意味します。 $dV/dt$  が 10 V/ns でほぼ制限されるため、モーターの性能を大きく向上させ、周波数を 40 kHz まで高め、電力密度を大幅に改善する可能性を秘めています。

### 品質と信頼性

現在では、パワー GaN FET 技術は品質と信頼性が優れています。複数のベンダーが合同電子デバイス委員会 (JEDEC) と車載電子部品評議会 (AEC) の Q101 品質規格を実証しています。これらは、パワー GaN 技術の信頼性を実証するために適合しなければならない最低基準です。

ただし、GaN デバイスにとって既存の品質規格は十分ではありません。新しい素材であることと、動作が異なるためです。たとえば、パワー GaN FET では動的  $RDS_{(on)}$  または電流コラプス現象がよく知られています。動的  $RDS_{(on)}$  に影響を与える素材品質、トラッピング、適切なデトラッピングは測定可能であり、現在では値が 10% 近くまで改善されたため、安心して使用できます。

AEC Q101 を超えて、実際の動作条件下での GaN FET の信頼性を検証するため、1 つは GAN063-650WSA をハイサイド、1 つはローサイドで使用する、同一のハーフブリッジ回路 (電流連続導通モード) をいくつか用意しました。

これらを同期昇圧コンバータとして、以下の条件で 1,000 時間連続動作させました。Vin = 200 V、Vout = 48 V、Pout = 80 W、Tj = 175°C、周波数 = 300 KHz。1,000 時間の耐久試験中に性能低下が見られたサンプル回路はありませんでした。高温スイッチング試験後に、すべてのデバイスで動的  $RDS_{(on)}$ 、リーク電流、スレッショルド電圧のシフトが試験されました。すべてのパラメータは安定し、パラメータのシフトは許容レベルを下回っていました。

過渡電圧 800 V というデバイス仕様は試験によって保証され、過電圧スパイクを心配する必要がありません。同様に、電圧や温度など他の過大なストレスが使用され、寿命に対するさまざまな加速係数が定義されて、アプリケーション状況での FIT (Failure in Time) 率が推定されています。製品の出荷数が増加していけば、実際のフィールド故障率が確定することでしょう。

### 市場への投入

パワー GaN 技術は、高効率の電力変換用として市場投入できる状態になっています。自動車以外の分野での採用が始まっており、低損失と高電力密度を利用できる、車載アプリケーションでも間もなく使用されることでしょう。Si 技術は市場が確立されているものの、限界に近づいています。利点が明らかとなり、イ搭載されるデバイス数が増加していけば、パワー GaN 技術が高効率電力変換の標準となるでしょう。

詳細については、[www.nexperia.com/gan-fets](http://www.nexperia.com/gan-fets) をご覧ください。

### Nexperia について

Nexperia は世界ですべての電子設計に求められる必要不可欠な半導体の量産のエキスパートとして、世界をリードしています。Nexperia はダイオード、バイポーラ・トランジスタ、ESD 保護デバイス、MOSFET、GaN FET、アナログ / ロジック IC などの広範な製品ポートフォリオを提供しています。本社はオランダのナイメーヘンで、年間製品出荷数は 900 億を超えており、各製品は自動車業界が設定した厳格な基準に適合しています。Nexperia の製品はプロセス、サイズ、消費電力、性能の面で効率のベンチマークとして高い評価を得ており、貴重な電力とスペースを削減し業界をリードする小型パッケージで提供されています。Nexperia はアジア、欧州、米国で 12,000 名を超える従業員を雇用しています。

### 営業拠点

#### © 2021 Nexperia B.V.

All rights reserved. 事前に書面により著作権者の同意を得た場合を除き、本書の全体または一部を複製することを禁じます。本書に記載された情報は何らかの見積もりまたは契約を形成するものではなく、正確で信頼できるものとするを旨としており、予告なく変更されることがあります。本書を使用した結果に関して、発行者はいかなる責任も負いません。本発行物は、特許またはその他の産業用あるいは知的財産権の下での何らかのライセンスを、譲渡または暗示するものではありません。

[nexperia.com](http://nexperia.com)

#### 発行日:

2021 年 5 月

