

GaN パワー・デバイス向けゲート駆動 フォトカプラ

By Robinson Law, Applications Engineer, and
Chun Keong Tee, Product Manager, Broadcom
Inc.

はじめに

窒化ガリウム (GaN) パワー・デバイスは、優れた高速スイッチングによりシステム全体の効率を向上させ、デバイスのコンパクト化と運用コストの削減が可能であることから、シリコン・パワー・デバイスに代わり注目されています。また、このような技術的利点と生産拡大による GaN の低コスト化が相まって、産業用電源や再生可能エネルギー用インバータなどに応用されるようになってきました。

Broadcom® Inc (旧 Avago Technologies) のゲート駆動フォトカプラは、IGBT やパワー MOSFET をはじめとするシリコン系半導体の駆動に広く用いられています。フォトカプラは、制御回路 - 高電圧間に強化ガルバニック絶縁を提供します。同相ノイズが大きい場合でも除去できるため、高周波スイッチング時のパワー半導体の誤点弧を防ぐことができます。本稿では、GaN の利点、ゲート駆動要件、ゲート駆動の設計、試験、および性能について説明します。

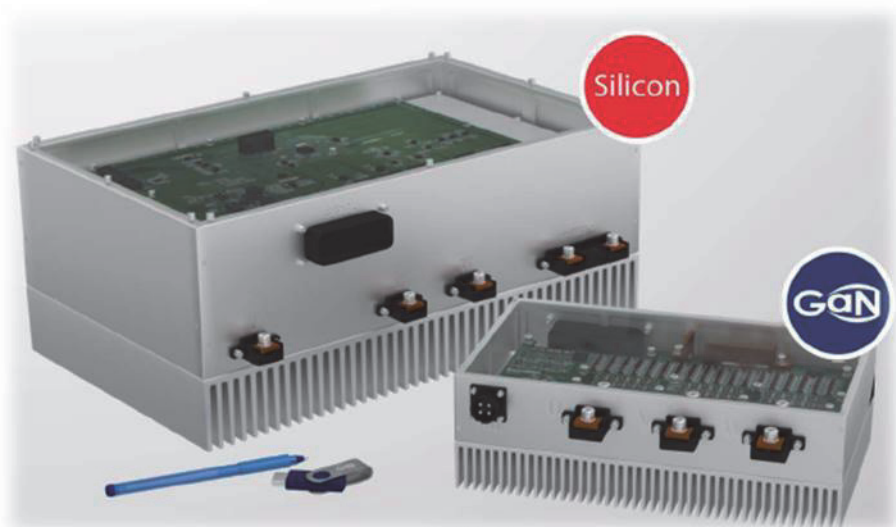
GaN の利点

窒化ガリウムはガリウムと窒素の化合物であり、広いバンドギャップ (3.4 eV) を持ちます。バンドギャップとは、材料の接合部に形成される電子が存在しない領域です。バンドギャップが広い GaN は、ブレイクダウン電圧が高く、導通抵抗が低い性質を持っています。また、電子速度が速く寄生容量が小さいため、スイッチング速度が向上します。

シリコンに対し、GaN は、以下に示す 3 つの大きな利点があります。

- システムの小型化
- システムの低コスト化
- システムの高効率化

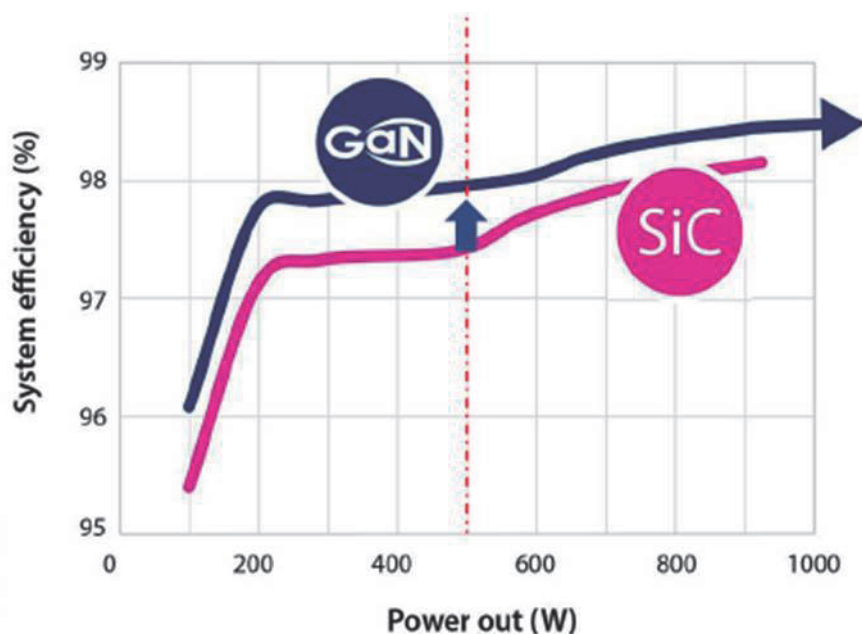
図 1：シリコンと GaN の比較、小型化と低システム・コスト



source : GaN Systems

システムのコンパクト化と低コスト化は、周辺部品の削減と小型化によるものです。GaN は逆導通モードで動作できるため、外部にフリーホイール・ダイオードが必要ありません。また、高周波動作が可能のため、フィルタや磁性部品の小型化につながります（インダクタやトランスなど）。さらに GaN はシリコンに比べて発熱が 60 °C 低いいため、ヒートシンクの小型化にも役立ちます。

図 2：シリコンと GaN の比較、システムの高効率化



source : GaN Systems

高効率化は、スイッチング損失および導通損失の低減によるものです。GaN は電子速度が速く寄生容量が小さいため、スイッチング損失が低減されます。また、同じブレークダウン電圧でのサイズがシリコンよりも小さいため、導通抵抗も低くなります。

GaN の種類とゲート駆動要件

図 3： GaN の種類とゲート駆動要件

	Panasonic	GaN Systems	Brand "T"	Brand "E"
Part Number	PGA26E07BA	GS66508P	Txxxxxx	Exxxxxx
Type	Normally Off (GIT)	Normally Off	Normally On (Cascode)	Normally Off
Ratings	600V/26A (56mΩ)	650/30A(50mΩ)	650V/26.5A(85mΩ)	200/32A
V _{GS} (max)	-10V/I _G <50mA	-10/+7V -20/+10V, transient abs max	-18/+18V	-4/6V
V _{th} (typ)	1.2V	1.7V	2.1V	1.6V
C _{in} /Q _g	0.405nF/5nC	0.260nF/5.8nC	1.13nF/2.2nC	0.875nF/8.2nC
dv/dt (kV/us)	> 100kV/us	> 100kV/us	> 100kV/us	> 100kV/us
Gate Drive Requirements				
Gate Voltage, V _{GS}	12V	+6V	+10V	+5V
Gate Current	<1.5A	<1.2A	<0.7A	<0.5A
Notes	Gate DC holding current <10mA	<ul style="list-style-type: none"> V_{GS} 7V abs max Low static gate current 	Slew rate cannot be control due to Cascode topology	<ul style="list-style-type: none"> V_{GS} 6V abs max Low V_{DS} Passivated Die

図 3 は、各種の GaN と、それぞれのゲート駆動要件を示しています。たとえば E 社製の 200V GaN は、主に 12V DC-DC コンバータなどの低電圧用途に用いられます。T 社の製品は 600V GaN ですが、これはノーマリ・オン・スイッチであり、使用上より安全なノーマリ・オフ・スイッチに変換するには、低電圧シリコン MOS をカスコード接続で使用する必要があります。カスコード構造のため、ゲート抵抗の調整によりスイッチング速度を制御することができないので、電磁障害 (EMI) に関する微調整が複雑になり、スイッチング損失が生じます。

Panasonic 社および GaN Systems 社の製品はノーマリ・オフ・スイッチです。これは、ゲート下に P 型バリア構造を使用してゲート・バイアス電圧 0V 時の高移動度電子を抑制することで実現されています。電子移動度が高いため、GaN の閾値 (V_{TH}) は、シリコン MOS や IGBT の閾値に比べて低くなります。入力容量も 1 nF 未満と非常に小さく、わずか 5 nC でオンにすることができます。

GaN のスイッチングは非常に高速なため、高 dv/dt でのスイッチングを使用する設計には注意が必要であり、高 dv/dt による GaN からゲート・ドライバへのノイズ結合を制御することが重要です。あるいは、GaN のスイッチング誤動作を防ぐために、ゲート・ドライバが 100kV/μs 超のノイズ耐性を備えている必要があります。

Panasonic 社および GaN Systems 社の GaN デバイスは、ノーマリ・オフで使いやすいため、ゲート駆動要件はシリコン MOS の場合と同様です。Panasonic 社の GaN は、ゲートが堅牢なので、12V の高いゲート電圧により高速でのゲートのターン・オンが可能です。GaN Systems 社は、ゲートの充電に 6V を推奨しています。ゲート容量およびゲート電荷量が少ないため、必要なゲート電流も 1.5A 未満という比較的低い値です。

Panasonic 社の GaN では、ゲートの「ON」状態を維持するために、約 10 mA の DC 保持電流が必要です。GaN Systems 社の場合は、絶対最大ゲート電圧である 7V を超えないように特別な注意が必要です。

Panasonic 社製 GaN 向けのゲート駆動設計

図 4： Panasonic 社製 GaN と ACPL-P346 を用いたハーフ・ブリッジ評価基板

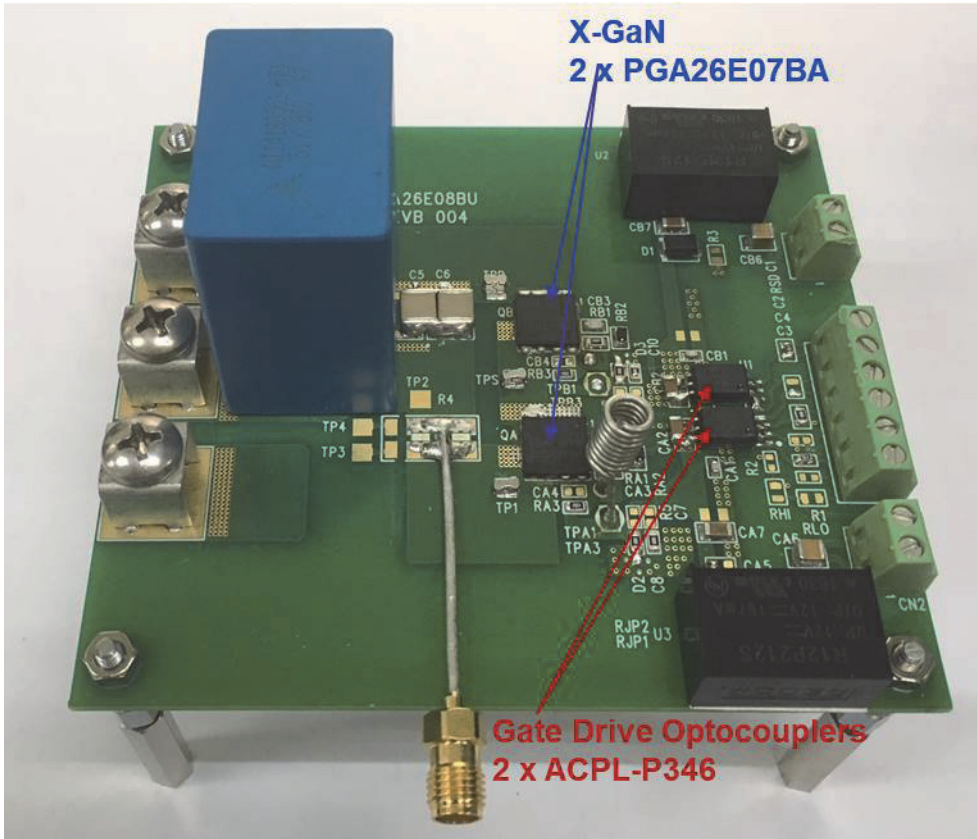


図 4 は、Panasonic 社製 600V 70-mΩ X-GaN トランジスタ PGA26E07BA のハーフ・ブリッジ評価基板です。ゲート駆動には、2 個のゲート駆動フォトカブラ ACPL-P346 を使用して GaN トランジスタを直接駆動する設計となっています。

ACPL-P346 は、高電圧の DC バス電圧で動作する GaN を、絶縁 / 駆動するベーシック・ゲート駆動フォトカブラで、最大出力電流 2.5A のレール・ツー・レール出力により、高電圧を高速スイッチングする GaN を、効率的かつ確実にオン / オフ駆動します。また、ACPL-P346 の最大伝達遅延時間は 110 ns 未満、標準的な立ち上がり / 立ち下がり時間は 8 ns 前後です。高周波動作時の高過渡ノイズの分離には、最低でも 100kV/μs という非常に高い同相除去 (CMR) 特性が必要です。

図 5 : Panasonic 社製 GaN と ACPL-P346 を配置したハーフ・ブリッジ評価基板の回路図

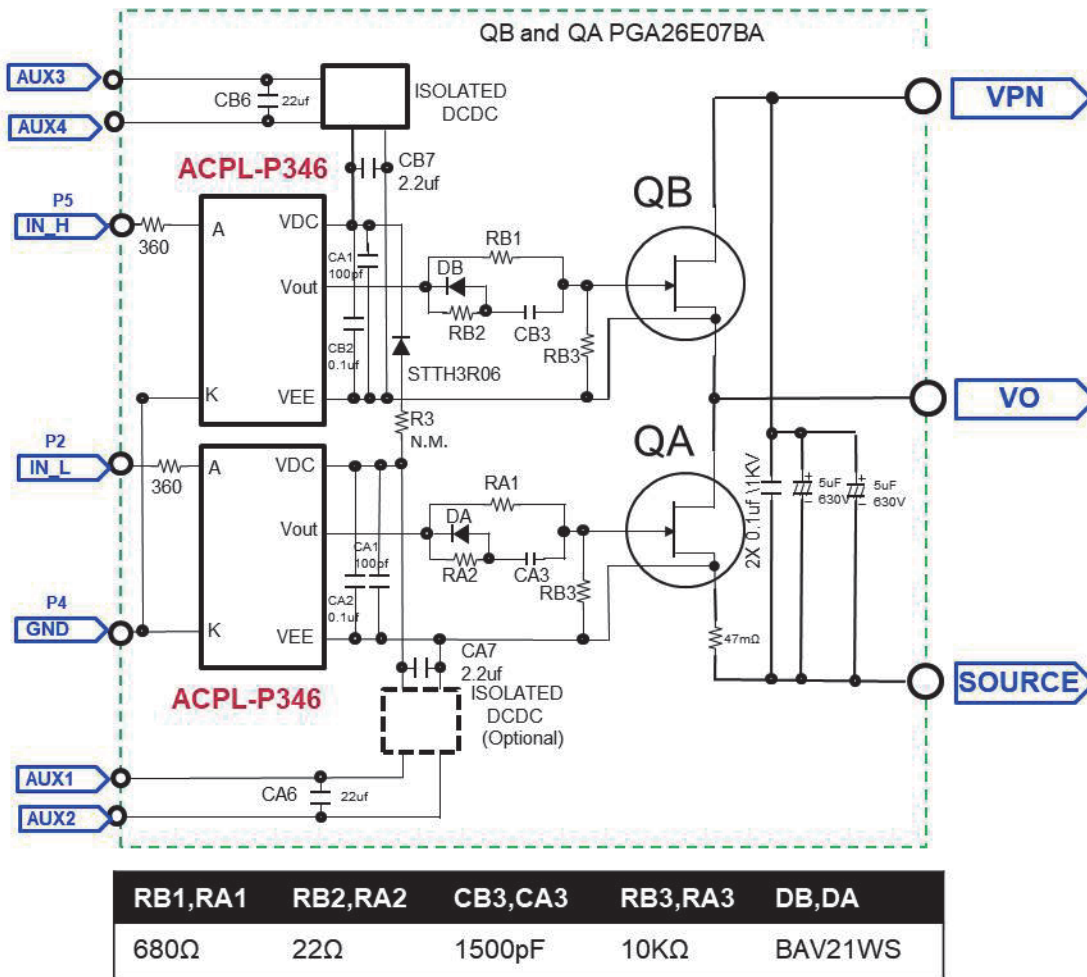


図 5 は、ハーフ・ブリッジ評価基板および ACPL-P346 ゲート駆動設計の回路図を示しています。GaN トランジスタ QB および QA は、継続的にオン状態を維持するため、約 12.5 mA のオン電流を必要とします。これは、ゲート・ドライバにより 680Ω の抵抗 RB1 および RA1 を介して供給されます。

GaN を高速にターン・オンするための初期突入充電電流は ACPL-P346 から供給され、抵抗 RB2 および RA2 によりピーク電流を制限します。コンデンサ CB3 および CA3 は、充電電流を瞬間的に増加させることにより GaN をより速くターン・オンするために使用します。この基板は柔軟な設計を備えており、上段および下段ブリッジ用に 2 個の絶縁型 DC-DC 電源を用いるか、または 1 個の DC-DC 電源とブートストラップ電源を使用することができます。

GaN Systems 社製 GaN に対応したゲート駆動設計

図 6： GaN Systems 社製 GaN と ACPL-P346 を配置したハーフ・ブリッジ評価基板

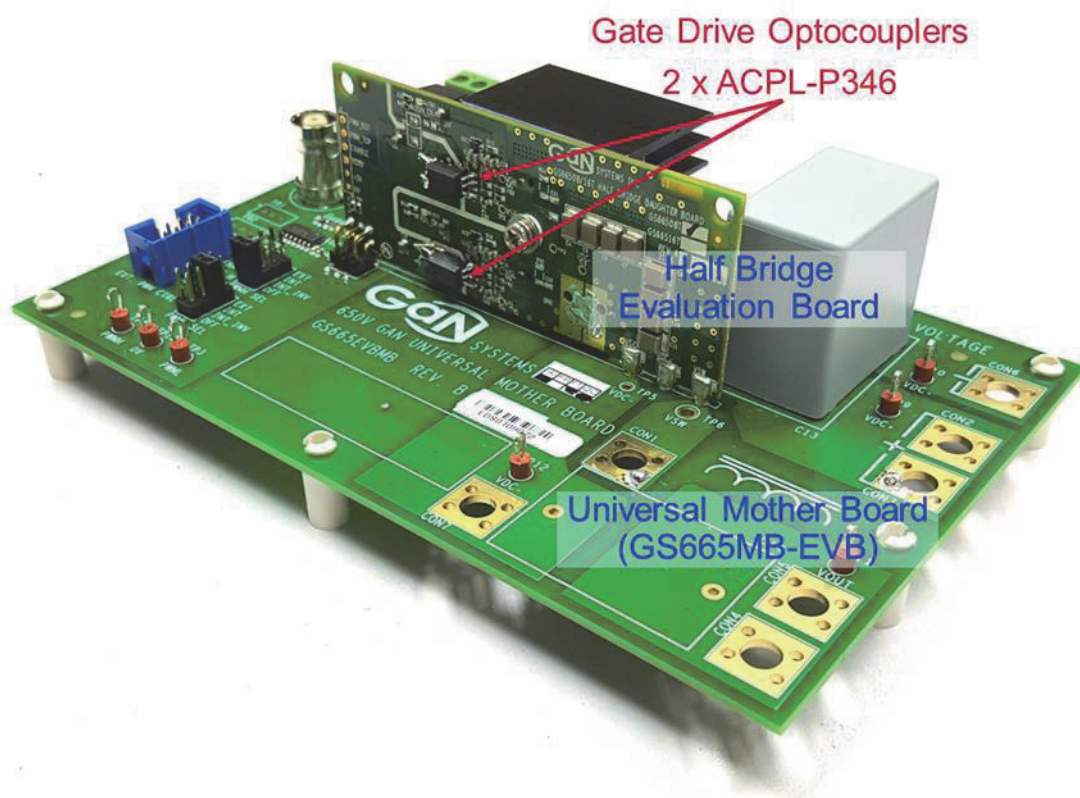
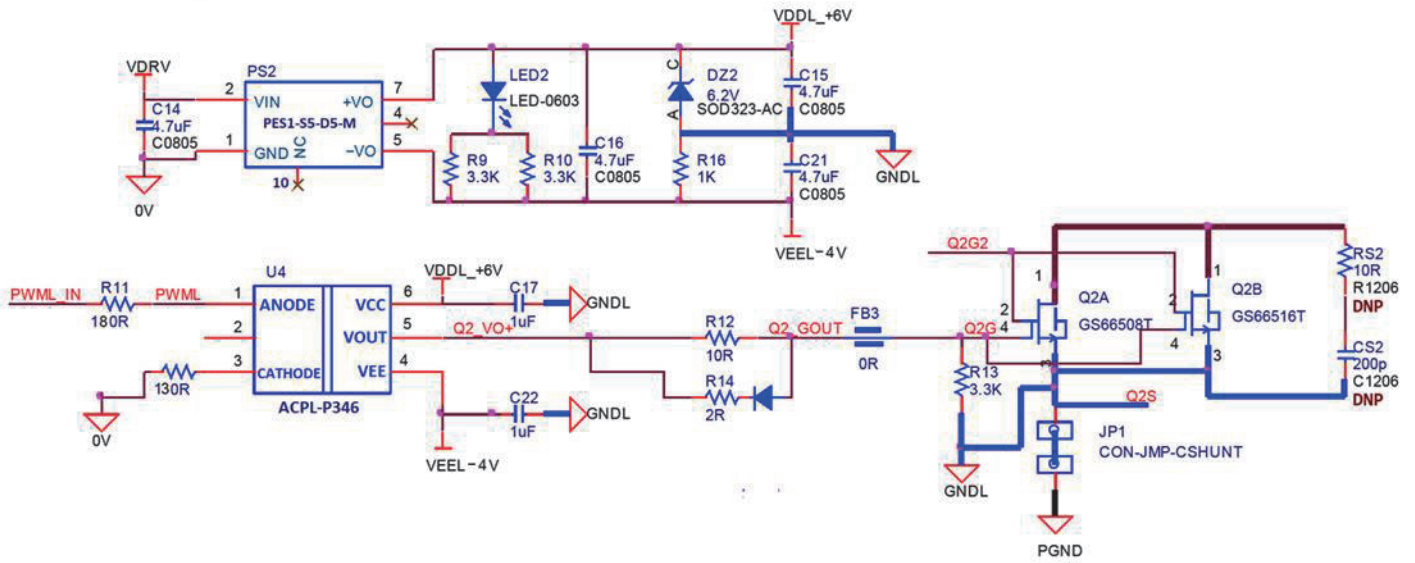


図 6 は、GaN Systems 社製 650V E-HEMT GS66508T (30A/50m) GaN トランジスタ用のハーフ・ブリッジ評価基板です。このハーフ・ブリッジ評価基板も、2 個のゲート駆動フォトカプラ ACPL-P346 を使用して GaN トランジスタを直接駆動する設計となっています。回路図は、下部ブリッジのゲート・バイアス / ドライバ回路を示しており、上部ブリッジも同じ回路を使用します。絶縁型 DC-DC コンバータ (5V - 10V) は、+6V および -4V のバイポーラ・ゲート駆動電源を供給し、より堅牢なゲート駆動と良好なノイズ耐性を実現します。この 10V は、6.2V のツェナー・ダイオードを使用して +6.2V と -3.8V のバイアスに分割されます。ACPL-P346 のゲート駆動出力は、10Ω のゲート電流制限抵抗 (充電用) と、放電用 2Ω 抵抗 (ダイオード付き) と並列接続する 10Ω 抵抗を組み合わせたものです。

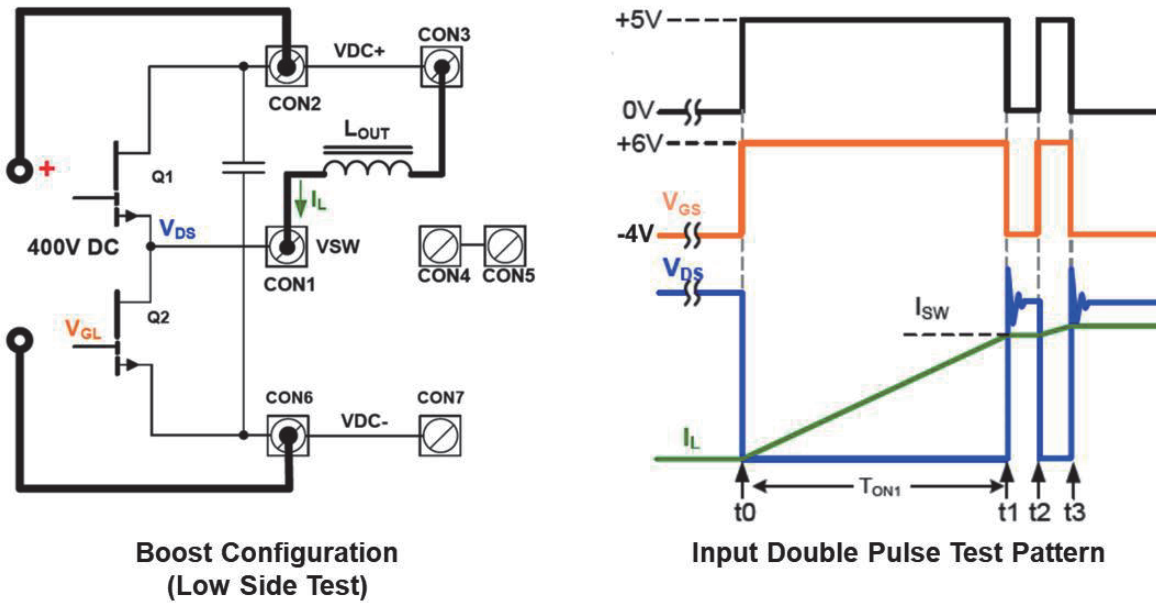
図 7 : GaN Systems 社製 GaN ハーフ・ブリッジ評価基板用 ACPL-P346 ゲート駆動回路



GaN ハーフ・ブリッジ評価基板による試験および性能

Panasonic 社および GaN Systems 社のハーフ・ブリッジ評価基板を使用し、GaN および ACPL-P346 に対してスルー・レート、スイッチング電力損失、および効率の各試験を実施しました。

図 8 : スルー・レートおよびスイッチング電力損失試験時の構成および波形



約 $120\ \mu\text{H}$ ~ $160\ \mu\text{H}$ のインダクタを VDC+ と VSW の間に接続し、ローサイド試験で知られるブースト構成としています。ローサイドの GaN トランジスタ Q2 はブースト・モードでアクティブであり、VDC+/VDC- には 400V のバス電圧が供給されています。高電圧 / 大電流でのデバイスのスイッチング性能を評価するため、大電力で動作させる必要のないダブル・パルス試験を行いました。

スイッチング電流 I_{SW} は、Q2 に印加される最初のパルス T_{ON1} の時間により定義されます。t1 (ターンオフ) および t2 (ターンオン) は、Q2 が高スイッチング・ストレス下にある状態で、ハーフ・ブリッジ回路のハード・スイッチング過渡状態であるときの測定点です。

スルー・レート試験は、DC 400V および約 30A のハード・スイッチングで実施されました。

図 9 : Panasonic 社製 GaN および ACPL-P346 のスルー・レート試験

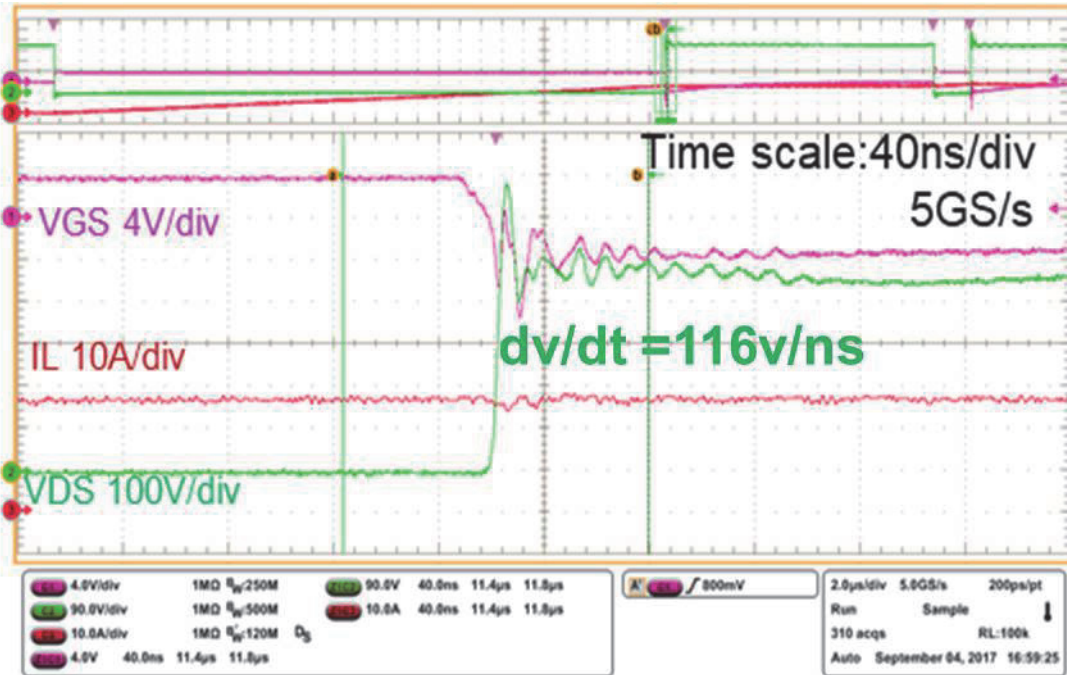
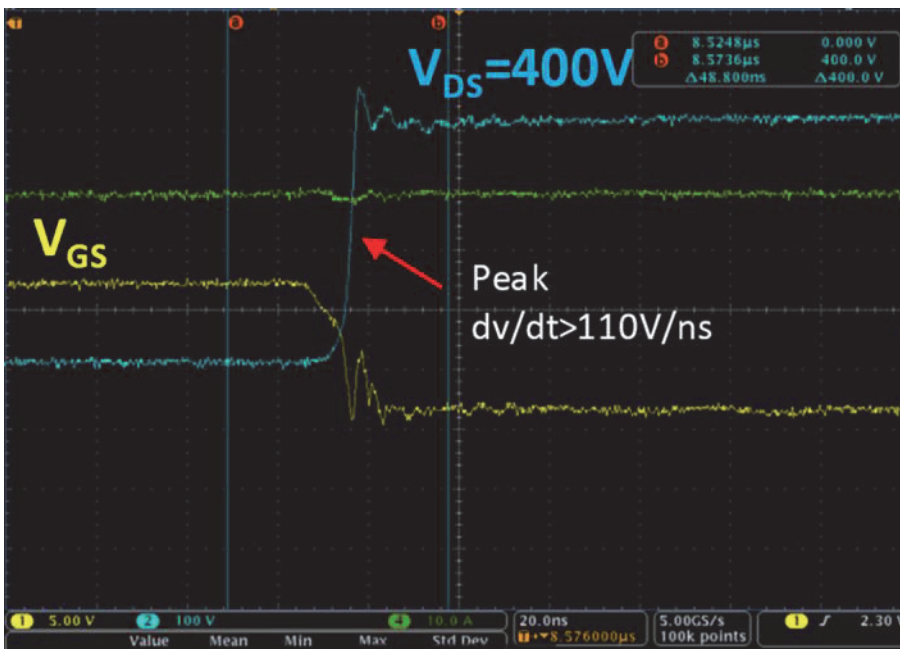


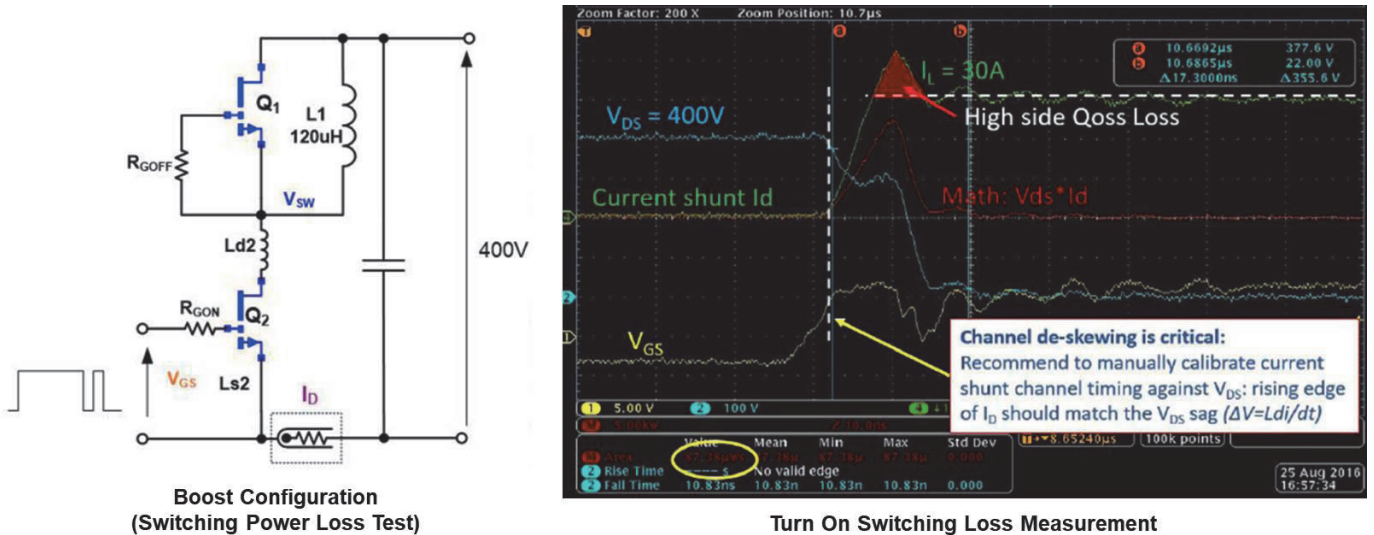
図 10 : GaN Systems 社製 GaN および ACPL-P346 のスルー・レート試験



Q2 のターンオン時およびターンオフ時のスルー・レート (dv/dt) は、それぞれ t1 (ターンオフ) および t2 (ターンオン) で測定されました。最大スルー・レートは 110kV/µs 超で、400V、30A での GaN ハードターンオフ時に測定されました。

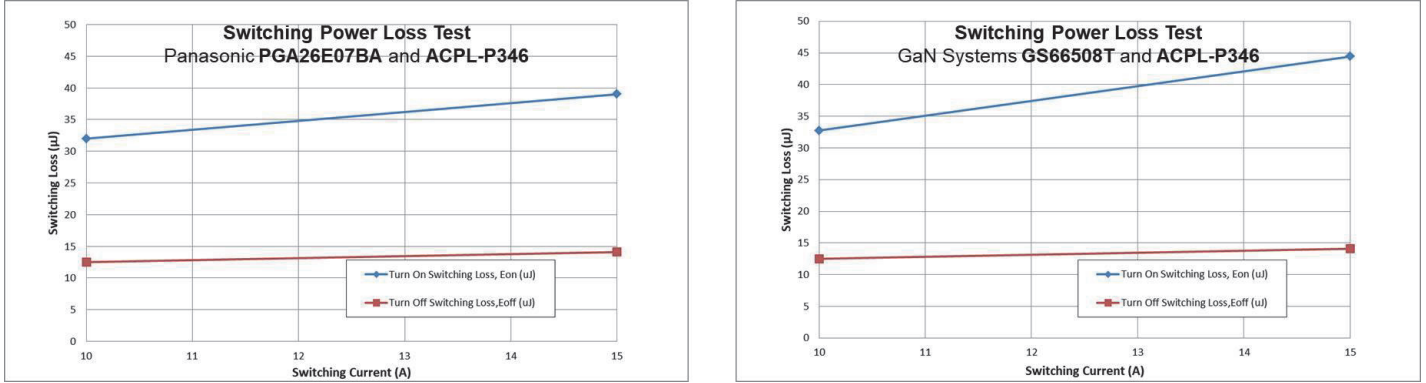
ACPL-P346 の CMR は 100kV/µs 以上です。すなわち ACPL-P346 は、GaN スwitchングによる高過渡 dv/dt ノイズを分離することができます。スコープの波形より、GaN の高スルー・レートがゲート駆動出力およびゲート電圧に影響を及ぼしていないことがわかります。

図 11 : スwitchング電力損失試験時の構成および波形



スイッチング電力損失試験でも同じブースト構成を使用し、 I_D 測定用に電流センサを取り付けています。電力損失の測定には、スルー・レート試験と同じダブル・パルス信号およびタイミングを使用しています。測定は、GaN の目標電流レベルでのターンオンまたはターンオフ監視点で行われました。オシロスコープの計算機能を使用して V_{DS} と I_{DS} を乗算し、その後、オシロスコープの測定機能を使用して電力損失（カーブ下の面積）を求めました。

図 12：スイッチング電力損失の測定



ターンオフ電力損失は赤の線で示され、両方の GaN デバイスの電力損失は、インダクタ負荷電流にかかわらず 15μJ 未満に抑えられています。ターンオン電力損失は青の線で示され、両方の GaN デバイスとも 15A で 40μJ 前後と低い電力損失です。

効率試験は、ハード・スイッチング動作での GaN の効率を試験するため、ハーフ・ブリッジ評価ボードを DC-DC コンバータ接続として行いました。Panasonic 社製 GaN の DC-DC は 200V から 380V へのブースト構成とし、GaN Systems 社の DC-DC は 400V から 200V への降圧構成としました (Q1 がオンになるとインダクタが充電され、オフになるとインダクタ電流が出力コンデンサと Q2 を介してフリーホイール・ダイオードのように放電され続けます)。どちらの DC-DC コンバータも周波数 100 kHz、室温下で動作させ、電力レベルを変えて効率試験を行いました。

図 13：効率試験時の構成

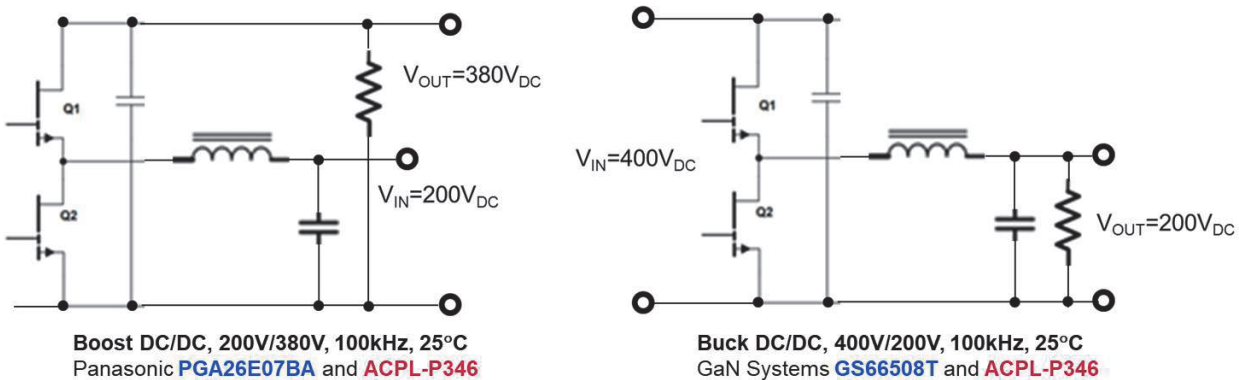
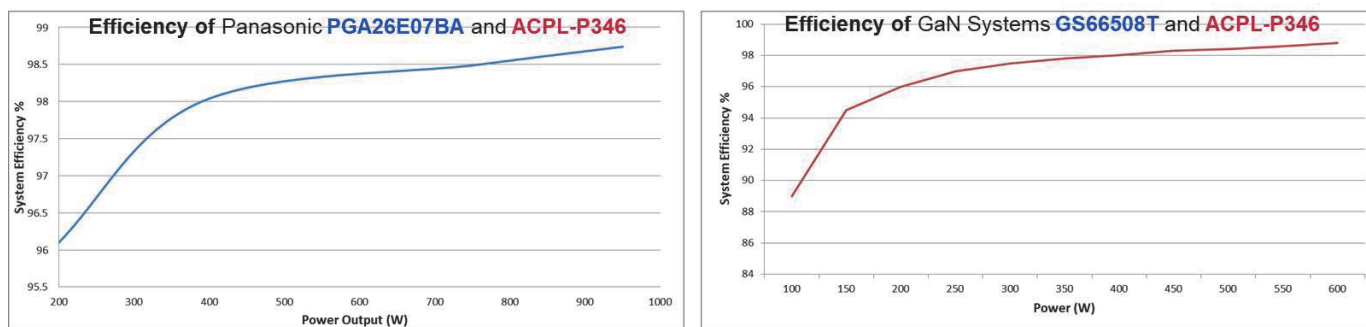


図 14： 効率試験の測定結果



どちらのコンバータも、ほぼ 99% という高い変換効率を示しました。

謝辞

Broadcom は、Panasonic Semiconductor Solutions Singapore ならびに GaN Systems 両社のアプリケーション部門各々の技術支援に対し、ここに謝意を表します。

参考資料

1. ACPL-P346/ACPL-W346 2.5-Amp Output Current Power and SiC MOSFET Gate Drive Optocoupler with Rail-to-Rail Output, Broadcom Inc., AV02-4078EN.
2. ACPL-P346 Panasonic X-GaN Transistor PGA26E07BA Half Bridge Evaluation Board, Broadcom Inc., ACPL-P346-X-GaN-RM100.
3. ACPL-P346 GaN Systems GaN E-HEMT GS66508T Half Bridge Evaluation Board, Broadcom Inc., ACPL-P346-RefDesign-RM101.
4. PGA26E07BA Datasheet, Panasonic Semiconductor.
5. GS66508T Top-side cooled 650 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet, GaN Systems.
6. GN001 Application Guide Design with GaN Enhancement mode HEMT, GaN Systems.

Broadcom、パルス・ロゴ、Connecting everything、Avago Technologies、Avago、および A ロゴは、アメリカ合衆国、他の国々および / または EU における Broadcom および / または関連会社の商標です。

Copyright © 2019 Broadcom. All Rights Reserved.

用語「Broadcom」は、Broadcom Inc. および / またはその子会社を指します。詳細は、www.broadcom.com をご覧ください。

Broadcom は、信頼性、機能または設計を改善するために、本書の製品またはデータを通知なしに変更する権利を留保します。Broadcom によって提供される情報の正確さと信頼性には細心の注意を払っています。しかしながら、Broadcom は、この情報の適用または使用、あるいは本書に記載された製品または回路の適用または使用から生じるいかなる責任も負わず、特許権や他の権利によるいかなるライセンスも譲渡しません。