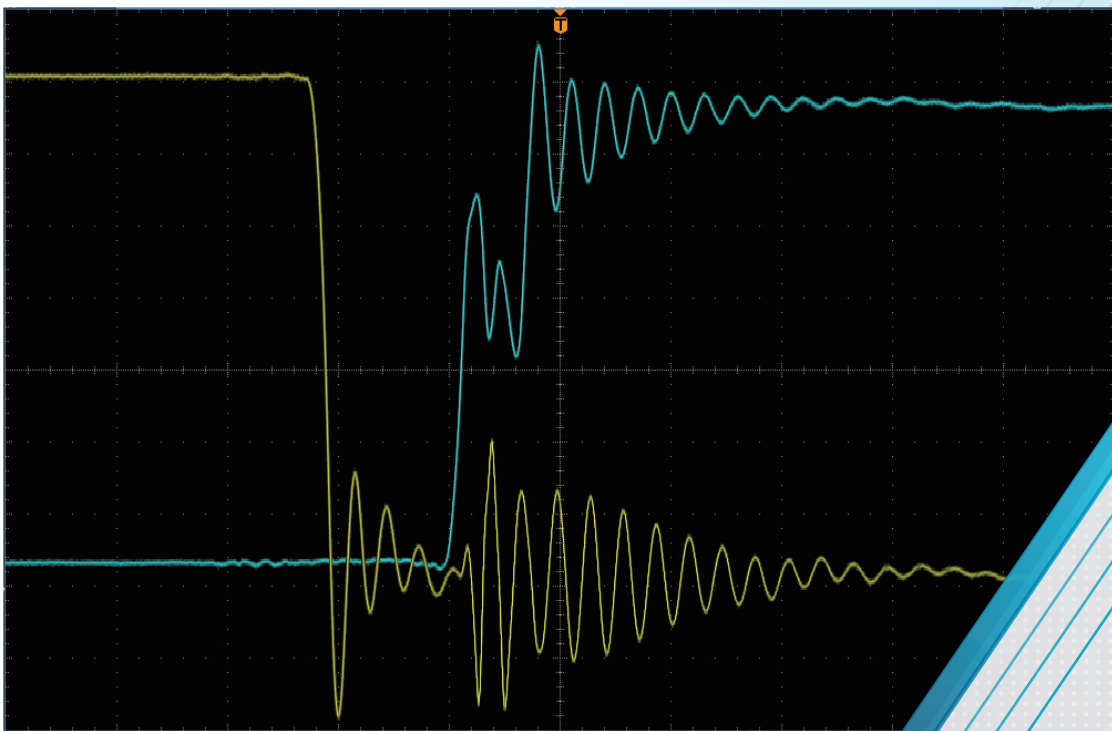


SiC パワー・エレクトロニクス・システムの 効率的な信号測定

アプリケーション・ノート



はじめに

何年もの研究、設計を経て、SiC（炭化ケイ素）のパワー・デバイスがさまざまなパワー・エレクトロニクスのアプリケーションで急速に採用されています。ケイ素（シリコン）からSiCへの移行は、まったく新しいエネルギー効率の設計を可能にしています。

SiCは、シリコンによるIGBTやMOSFETに比べて優れた効率、高速のスイッチング、優れた熱性能があるため、より大きな電力密度と低システム・コストが可能になります。

SiCは、電気自動車（EV）のモータ・ドライブ回路、EVの高速充電ステーション、オンボードおよびオフボード・チャージャ、風力／太陽光発電用インバータ、産業用電源など、ハイパワー、高電圧の設計アプリケーションで使用されています。

技術の進展に伴い、電力変換設計におけるSiC技術の実装はJEDEC規格JC-70.2で文書化されており、SiCによる電力変換半導体の規格とテスト方法が規定されています。

もう一つの技術の進展は、Wolfspeed Wolfpack™ KIT-CRD-CIL12N-FMCなど、SiC FETメーカーの最先端の検証基板にも見ることができます。このような基板のおかげで、さまざまなアプリケーションにおける、動的性能の評価、タイミング、スピード、スイッチング損失、ゲート・ドライバのチューニングなどが可能になります。



図1. Wolfspeed社製、WolfPACK FM3/パワー・モジュール。ピン・グリッド・デザインにより、スケーラビリティと使いやすさに優れている。写真提供：© Wolfspeed. 複製許可取得済み

SiCへの移行において、パワー・システム設計エンジニアが持つと思われる質問を以下に示します。

- 手持ちのテスト・システムで、SiCシステムの高速スイッチング・ダイナミクスを正確に測定できるだろうか。
- ゲート・ドライブの性能とデッドタイムは、どうすれば正確に最適化できるだろうか。
- コモンモード・トランジェントは測定確度に影響するだろうか。
- 観測しているリングングは真実か、あるいはプローブ応答によるものなのか。

エンジニアにとって、このような問題の解決は難しいものです。また、すべての信号が正確に表示できることが重要であり、これにより正しい設計の決断がタイムリーに行えます。過大なマージンと過剰な設計はコストアップになるだけでなく、性能も低下します。適切な計測器を使用することで、すべてに差がつきます。

エレクトロニクスの4/5/6シリーズMSO（ミックスド・シグナル・オシロスコープ）、IsoVu™プローブ、オシロスコープで実行可能な自動測定機能により、SiCの回路レベルにおける性能検証が可能になります。

正しく表示するためには、測定チャンネルは、オシロスコープに入力する前に電氣的に絶縁する必要があります。SiCベースのパワー・デバイスは数nsでオン／オフをスイッチングするため、トランジェントの高速の立上り／立下りエッジを取込むためには、オシロスコープとプローブの帯域は200MHz以上であることが求められます。例えば、30MHzのロゴスキー電流センサは、400MHzの電流観測抵抗に比べて、スイッチング損失測定値が30%低下します。これは、30MHzのプローブでは、スイッチング波形をすべて取込むことができないためです（資料3を参照）。このような重要な測定で正確さを求めるには、広帯域と低ノイズの信号が必要になります。

このアプリケーション・ノートでは、CAB011MI2FM3 高性能、ハーフブリッジ・モジュールを中心に説明します。このモジュールは、Wolfspeed社製WolfPACKパワー・モジュール・ファミリの一つである、Wolfspeed® C3M® SiC（炭化ケイ素）MOSFETを搭載しています（図1参照）。このモジュールは、従来のベースプレートをなくすことで熱特性を改善しています。また、ピン・グリッド・デザインにより、スケーラビリティと使いやすさに優れており、同一の標準ハウジングでさまざまなモジュール・オプションが用意されています。これにより、熱管理システム、電気設計において、最小限の変更で、さまざまなコンバータ構成、トポロジが開発できます。

ハードウェアの概要

SiC 検証の測定確度

時間ドメインの測定とスイッチング損失計算の確度は、測定で使用するプローブの確度、帯域、遅延によって影響を受けます。一般的な計測用プローブの比較表はいくつかあります。このアプリケーション・ノートでは、オシロスコープ用プローブの差異に注目し、レイアウト、寄生成分、カップリングなどが測定確度において非常に重要であることを説明します。SiCを利用したパワー・モジュールの検証では、以下の3つのパラメータの測定が重要になります。

- ゲート電圧
- ドレイン電圧
- 電流

ゲート電圧測定

SiCパワー・デバイスのゲート電圧測定は、大きなDCオフセットのノードに比べて小さな電圧信号（約 20Vpp）であり、オシロスコープのグラウンドに対して大きな dv/dt を持っているために困難を伴います。さらに、スイッチング・イベントで最も大きな dv/dt が発生するときこそ、ゲート信号測定で最も重要になります。デバイスのソースがグラウンドに接続されるトポロジであっても、回路グラウンドとオシロスコープのグラウンド間で発生する寄生インピータンスにより、急激なトランジェントで読み値に誤差が生ずることがあります。これを防ぐためには、測定ツールがグラウンドから切り離されていること、かつ非常に大きなコモンモード除去比を持っていることが必要になります。ゲート電圧の従来の測定方法では、図2に示すような差動プローブを使用しますが、新しい光アイソレーション型絶縁プローブであるIsoVuプローブ・システムは、このような測定をより正確に行うことができます。

図4は、一般的な差動プローブと光アイソレーション型絶縁プローブによる、ハイサイド・ゲート電圧測定を比較しています。ターンオン、ターンオフの両方において、デバイスのゲートがスレッショルド領域を通過した後、ゲートで高周波のリングングが観測されています。ゲートとパワー・ループ間のカップリングにより、ある程度のリングングは予想されたものです。しかし、差動プローブでは、光アイソレーション型絶縁プローブに比べてリングングの振幅が非常に大きくなっています。これは、変化するリファレンス電圧によって生ずる、プローブ内のコモンモード電流によるものであり、一般的な差動プローブの欠点です。図4に示すように、差動プローブで測定した波形はデバイスの最大ゲート耐圧を超えているように見えますが、光で絶縁されたプローブで正確に測定すると仕様の範囲内であることは



図2. 差動電圧プローブの例。テクトロニクスの差動プローブ：THDP0200型とアクセサリ



図3. テクトロニクスの光アイソレーション型絶縁プローブ：IsoVu プローブTIVP1型（TIVPMX10X型、±50V センサ・チップ）

明らかです。ゲート電圧測定で一般的な差動プローブを使用している場合、アプリケーション設計エンジニアは、ここで示したようなプロービングや測定システムの影響なのか、あるいはデバイスの定格を実際に違反しているのかを見分けることが難しいため、注意が必要です。このような測定の欠点により、設計エンジニアはゲート抵抗を大きくすることでスイッチング・トランジェントを遅くしてしまい、リングングを抑えてしまいます。しかし、このことはSiCデバイスの損失を不必要に増加させてしまいます。以上のことから、システムを適切に設計し、最適な性能を実現させるためには、デバイスの実際の動的な振る舞いを正確に測定できる測定システムが欠かせません。

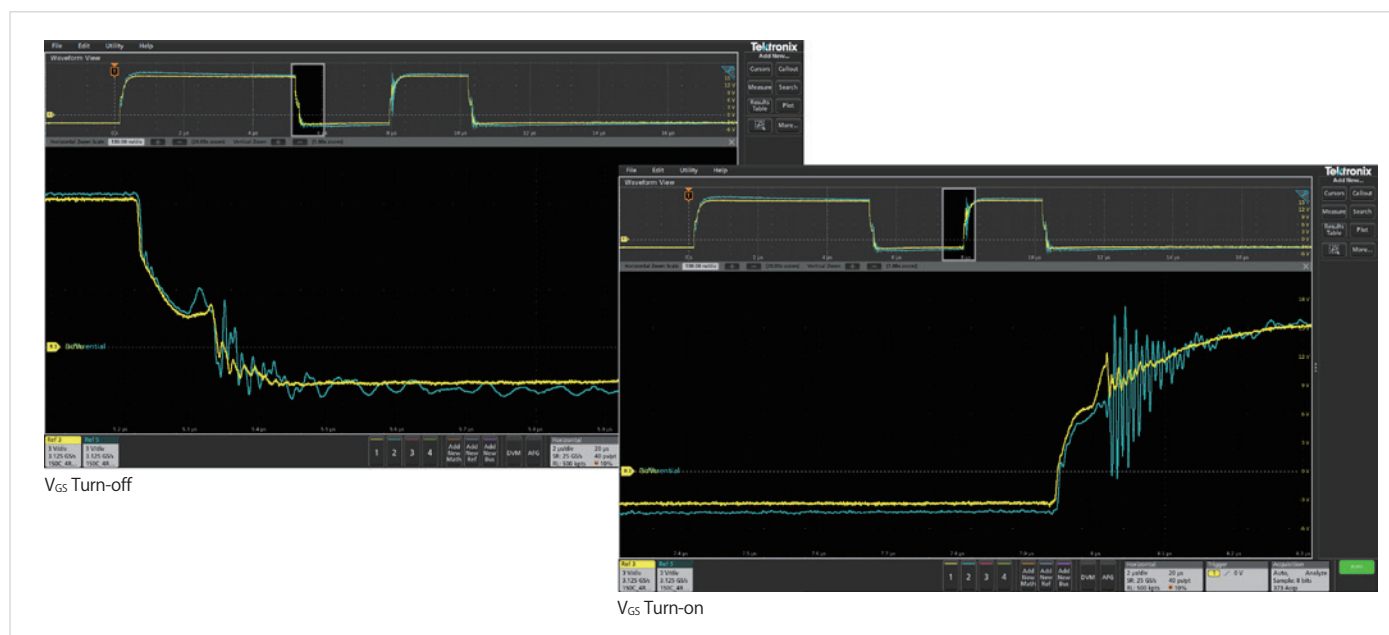


図4. 差動プローブ (青の波形) と IsoVu 光アイソレーション型プローブ (黄の波形) の比較

ドレイン電圧測定

パワー・エレクトロニクス・システムの電圧測定では、差動プローブと、グランド基準のプローブ (受動プローブ) を使用する、2種類の測定方法があります。図2に示すような差動プローブは、問題なしに、回路に任意のノードを加えることができるため、ごく一般的な方法となります。一方、図5に示すようなグランド基準のプローブは、プローブのシールド・ピンがオシロスコプのアース・グランドとつながっているため、測定には注意が必要です。正しい方法でグランド基準の測定を行わない場合、プローブのグランド基準で小さなグランド電流が発生するため、測定の確度が大きく損なわれることがあります。この影響は、SiC設計では顕著になります。SiC設計では、大きな dv/dt のためにオシロスコープ・プローブのグランド基準で寄生電流が流れ、測定誤差を生むことがあります。グランド基準のシールドがパワー信号に接続されている場合はより大きな問題となり、アース・グランドに大きな電流が流れてプローブまたはオシロスコープが損傷することがあります。計測器とアース・グランドを正しく接地しないと、オシロスコープを覆っている金属部分がバスの電圧に浮き、最悪の場合、測定者の安全を脅かすことになります。



図5. テクトロニクスのTPP0850型電圧プローブ。シングルエンド、グランド基準のプローブであり、50 : 1の減衰比 (最大1000V_{rms}) と800MHzの周波数帯域を持つ

グランド基準のCVR (Current Viewing Resistor) を使用する場合も、グランド接続の問題はより深刻になります。図6に示すように、グランド基準のプローブ (受動プローブ) とCVRを併用すると、オシロスコープのシールド経路でCVRがバイパスできます。これにより、すべてのパワー・デバイス電流がオシロスコープを流れるため、電圧プローブまたはオシロスコープは損傷します。これは、安全上の脅威にもなります。一般に、ドレイン・ソース電圧測定では差動プローブの使用が推奨されています。

不適切なプローブ・グランドによるデバイス電流

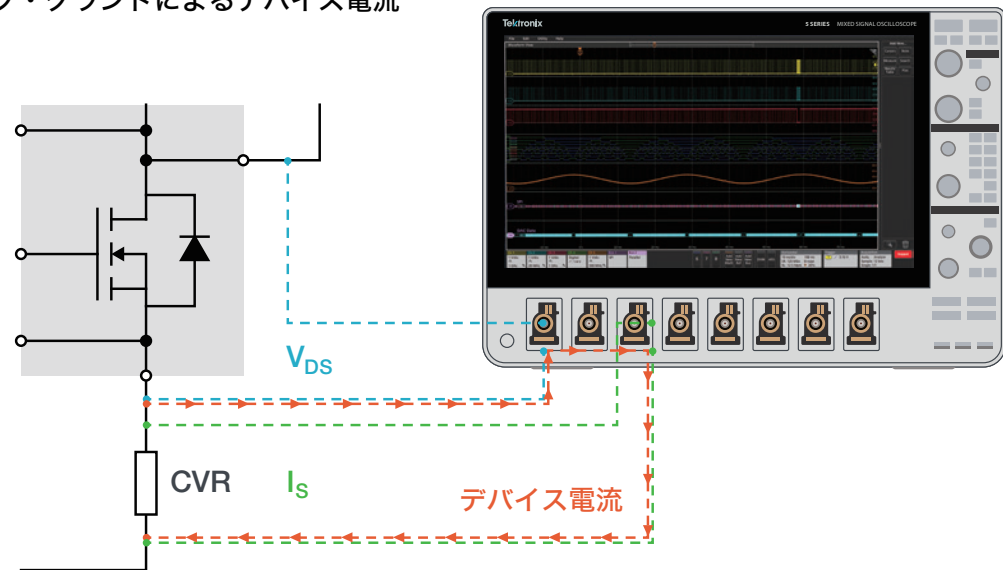


図6. 異なる電圧レベルの基準点に2本のグランド基準のプローブ（受動プローブ）のグランドを接続すると、デバイスの電流はCVRをバイパスしてグランド・リードとオシロスコープに流れる。間違った測定の原因にもなり、計測器の損傷にもなる。

電流測定

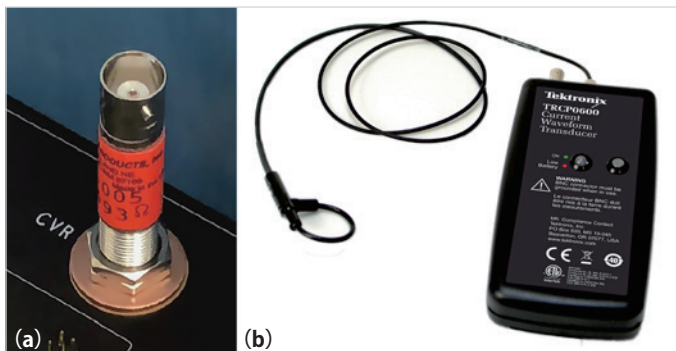


図7. プローブの例。(a) CVR (T & M Research SSDN-005, 400MHz). 写真提供 : © Wolfspeed. 複製許可済み (b) ロゴスキー電流プローブ (TRCP0600型電流波形トランスデューサ、30MHz).

パワー・エレクトロニクス・システムの電流測定では、CVR (Current Viewing Resistor) と、ロゴスキー・コイルの2種類の測定方法があります (図7a、7b)。ロゴスキー・コイルは回路に簡単に追加でき、回路を切断しないため、最も一般的な測定方法です。しかし、周波数帯域に限界があり、SiCでの使用には適していません。一方、CVRは非常に高い周波数帯域があり、電流を正確に測定できます。しかし、トランジスタと直列にコンポーネントを挿入する必要があるため、プリント基板のレイアウトに注意が必要であり、CVRを入れることで回路の寄生インダクタンスが増えます。

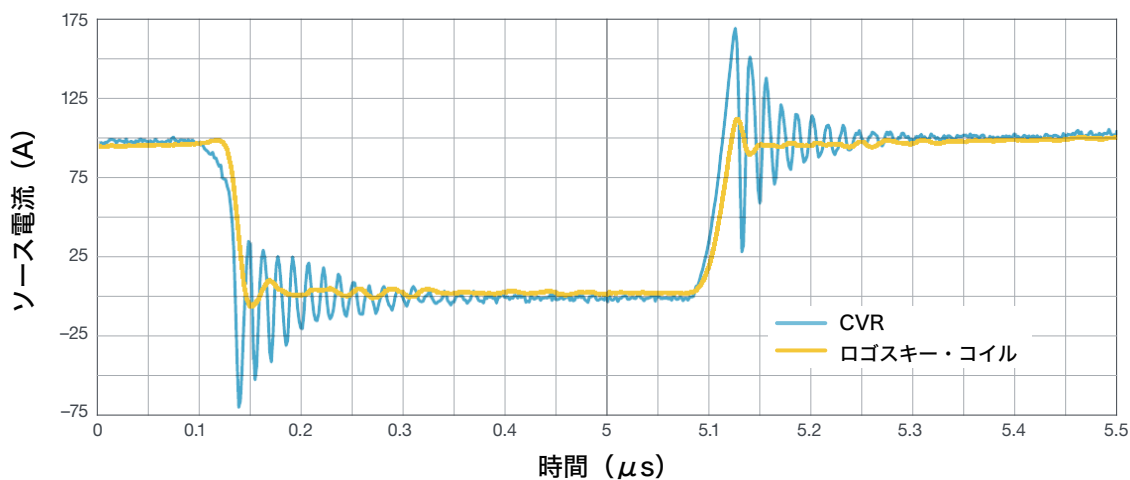


図8. CVRとログスキー電流プローブ、CAB016M12FM3 ($T_J = 25^\circ\text{C}$ 、 $R_G = 6.8$ 、 $V_{os} = 600\text{V}$ 、 $I_S = 100\text{A}$)

図8は、一般的なSiCハード・スイッチング・イベントにおける、ログスキー・コイルとCVRを比較しています。ログスキー・コイルは実質的に帯域が低いので、結果として波形のリングングが抑えられています。さらに重要なことは、最初のオーバーシュートが抑制され、 di/dt の測定が変わってしまっていることです。

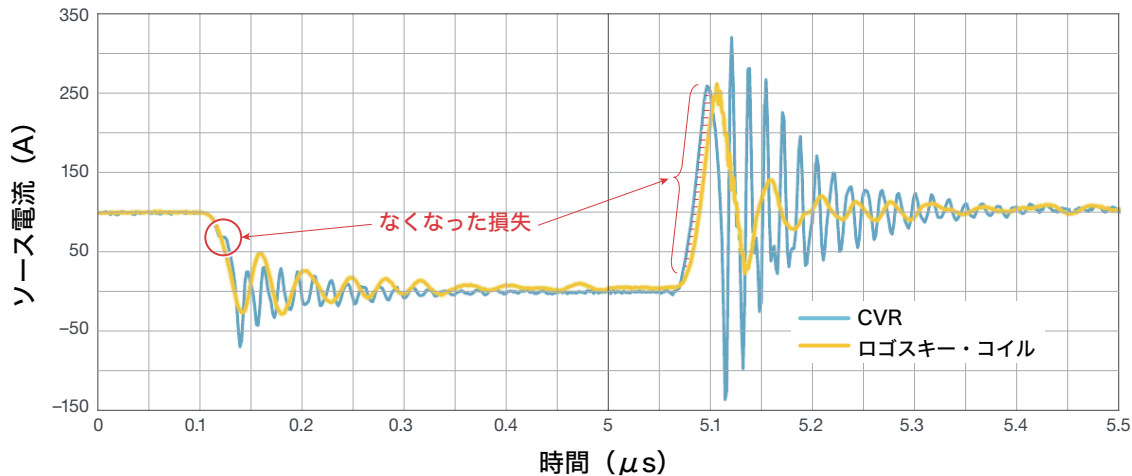


図9. CVRとログスキー電流プローブ、CAB011M12FM3 ($T_J = 150^\circ\text{C}$ 、 $R_G = 1\Omega$ 、 $V_{DS} = 600\text{V}$ 、 $I_S = 100\text{A}$)

図9は、より大きなスイッチング条件におけるプローブを比較しています。この比較では、2つの重要なポイントがあります。まず、ターンオフにおいて、ログスキー・コイルは電流波形の形状を正しく取込めず、わずかな二部分が取込めないことでスイッチング損失が明らかに少なくなります。さらに、ターンオン時に di/dt が小さくなることで、予測されるスイッチング損失も小さくなります。ログスキー・コイルの低い周波数帯域による累積された効果により、スイッチング損失は少なく見積もられることになります。

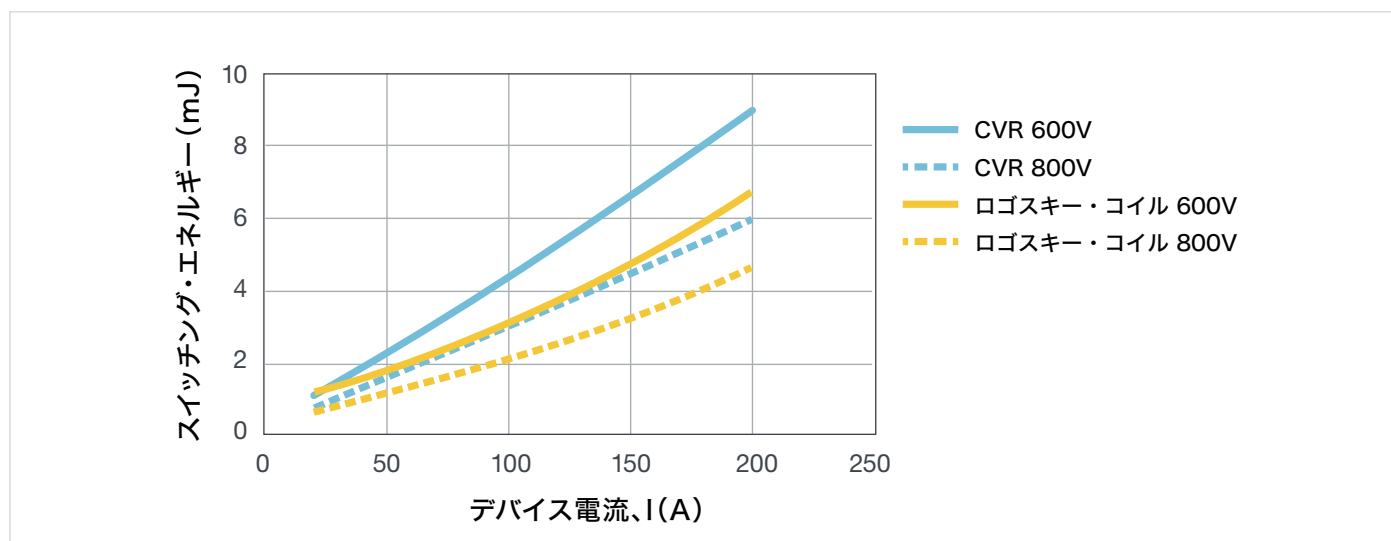


図10. 差動プローブ (CAB011M12FM3、 $T_J=150^{\circ}\text{C}$ 、 $R_G=1\Omega$) を使用した、スイッチング損失 ($E_{\text{off}}+E_{\text{on}}$) の推定

図10は、Wolfspeed WolfPACK™ CAB011M12FM3によるドレイン電流のスイッチング損失を直接比較したものです。先に説明したように、ロゴスキー・コイルは回路のスイッチング損失を低く見積もるため、回路損失は楽観的な印象になります。この違いはプローブの周波数帯域の限界に関連するため、トランジスタのエッジ・レートによって決まり、より大きなゲート抵抗になります。IGBTなどの遅いスイッチング技術では、この方法の違いは無視できます。

プローブのデスキュー

十分な周波数帯域、ノイズ除去性能を持ったプローブを使用するだけでなく、電圧信号と電流信号の遅延を合わせるための時間的なデスキューが必要になります。電圧プローブと電流プローブにわずか1~2nsの時間的なズレがあるだけで、 E_{on} 、 E_{off} の測定では30%以上の誤差になることがあります。SiCシステムなどの高速なスイッチング・トランジェントでは、正しくデスキューすることが非常に重要です。

デスキューの前には、必ずオートゼロを実行し、必要に応じてプローブを校正することで、オフセット誤差またはスケールリング・エラーを防ぐことができます。

V_{DS} 、 V_{GS} のための電圧プローブは、両方のプローブをファンクション・ジェネレータに対称に接続することでデスキューします。ファンクション・ジェネレータから矩形波を出力し、信号の立上り／立下りエッジの両方が揃っていることを確認します。

V_{DS} 、 I_{D} のためのプローブでスイッチング損失を正しく測定するには、いくつかの方法でデスキューする必要があります。どの方法でも重要なことは、図11に示すようなテスト回路フィクスチャを使用することです。このテスト回路は非常に純粋な抵抗であるため、電圧波形と電流波形が一致します。次にこのテスト回路で電流プローブをデスキューすることで、電圧プローブの応答とのマッチングがとれます。

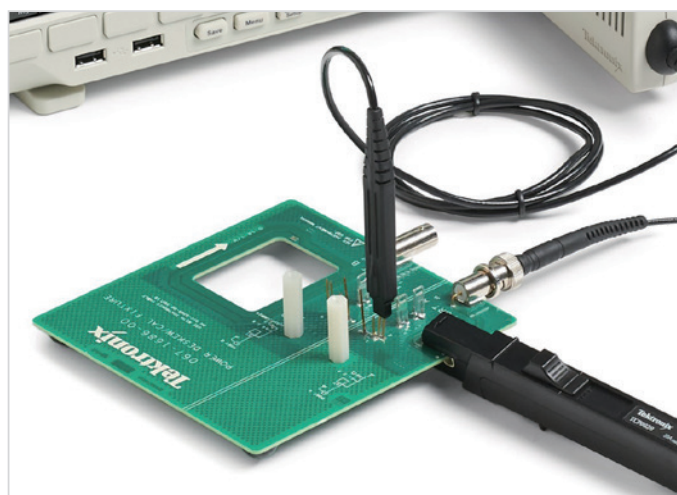


図11. パワー測定のためのデスキュー／キャリブレーション・フィクスチャ (部品番号: 067-1686-xx)。この接続により、電圧プローブと電流プローブ間のタイミングを簡単に補正できる。

SiCの回路レベルにおける プローブ接続テクニック

ゲート測定では、パワー変換モジュールからクリーンな信号を取込むために、接続に関して十分な注意が必要です。高い電圧におけるグラウンドのない測定であるため、接続が非常に重要になります。

接続には主に2種類あり、一つがMMCXであり、モジュラ・タイプのプレファブ形式でデバイスと接続します。もう一つがスクエア・ピンであり、さまざまなPC基板実装に適用できます。この2種類の接続を以下で詳細に説明します。

MMCXスタイルのセンサ・チップ・ケーブル (高性能、最大250Vのアプリケーション)

テスト・ポイントの近くにMMCXコネクタを入れることで、IsoVu Gen2測定システムにおける最高の性能を引き出すことができます。図12、13に、2種類のアプリケーションを示します。MMCXコネクタは業界標準のコネクタであり、数多くの電子部品メーカから入手可能です。このコネクタには優れた信号忠実性があります。ソリッド・メタルの本体、金メッキのコネクタにより、十分にシールドされた信号パスが可能になります。接合するMMCXインタフェースはスナップオン・タイプの接続であり、安定したハンズフリー接続が可能です。しっかりとした力で勘合するため、高電圧のアプリケーションでも安全かつ安定した接続が可能です。下図のようにMMCXコネクタはさまざまな状況で利用でき、またMMCXコネクタの実装用に基板が設定されていないような場合であっても、後付けでMMCXコネクタをはんだ付けして測定ポイントを設けることができます。はんだ付けに関する情報については、当社Webサイト (jp.tek.com/isolated-measurement-systems) をご参照ください。

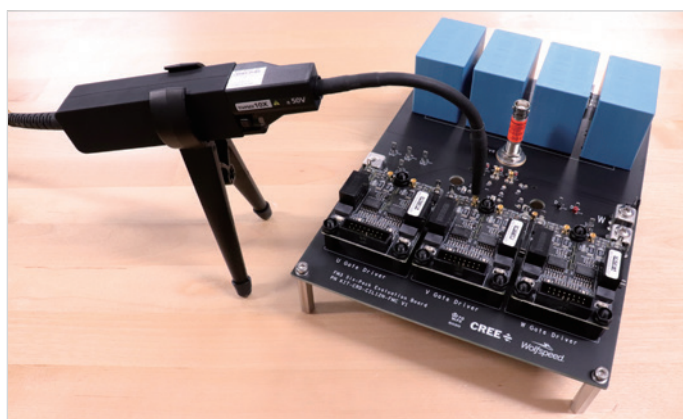


図12. MMCXコネクタの例1. 写真提供 © Wolfspeed. 複製許可済



図13. MMCXコネクタの例2. 写真提供 © Wolfspeed. 複製許可済

スクエア・ピン - MMCXアダプタ

MMCXコネクタが使用できない場合は、チップ・ケーブルを業界標準のスクエア・ピンに適用させることができます。テクトロニクスはプローブ・チップ・アダプタを用意しており、回路基板上のスクエア・ピンにセンサ・チップを接続することが可能です。ピッチによって2種類のアダプタが用意されており、MMCX - 2.54mm (0.1in) と MMCX - 1.57mm (0.062in) があります。

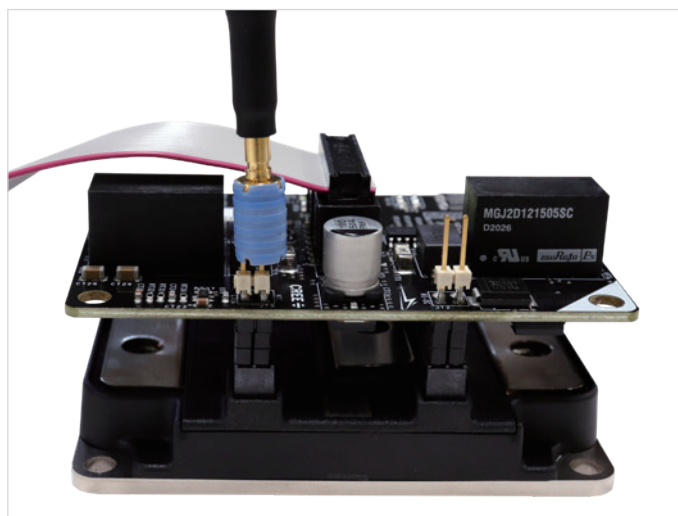


図14. MMCX - スクエア・ピン・アダプタ 写真提供 © Wolfspeed. 複製許可済

アダプタ (図14) の一方には、IsoVuチップ・ケーブルと接続するためのMMCXソケットが組込まれています。アダプタのもう一方にはセンター・ピン・ソケットがあり、アダプタの外周は4つのコモン (シールド) ソケットになっていて、これらにスクエア・ピンが刺さります。アダプタのノッチは、シールド・ソケット固定に使用できます。プローブ・チップ・アダプタが基板に最も近づいている状態で最高の電気性能が得られます。

スクエア・ピン・スタイルの センサ・チップ・ケーブル

TIVPシリーズ (IsoVu Gen2) プローブには、図15のようなスクエア・ピン・スタイルのセンサ・チップ・ケーブルも用意されており、優れた入力差動電圧性能があります。このチップ・インタフェースは接続の容易さと確実な接続が可能であり、高電圧環境でも安全に、ハンズフリーでの測定が可能になります。スクエア・ピン・スタイルのセンサ・チップ・ケーブルは、2.54mm (0.100in) ピッチで最大600Vに対応可能なものと、5.08mm (0.200in) で最大2500Vに対応可能な2種類があります。



図15. スクエア・ピン・スタイルのセンサ・チップ・ケーブル。写真提供 © Wolfspeed. 複製許可済

予定していないテスト・ポイント

テスト・ポイントは、ゲート・ドライバまたはWolfspeed KIT-CRD-CIL12N-FMC Wolfpack検証キットなどの検証基板のレイアウトの前に統合しておくのが理想的です。こうすることで、MMCXコネクタは最高の性能を発揮します。また、測定する信号がコネクタの定格電圧である300Vpk以下であれば、MMCXコネクタを推奨します。

もちろん、どのテスト・ポイントにも常に接続できるというわけではありません。図16のように、予定していなかったテスト・ポイントが発生した場合は、以下のガイドラインにしたがって最も正確に測定できるように心がけます。

1. 定格電圧を満たしているようであればMMCXコネクタを使用する。
2. 可能な限りICの近くにコネクタを配置する、または安全に注意しながらコンポーネントの近くに配置する。
3. 同様に、フライング・リードは短くする、または使用しないようにする。
4. 非導電性のホット・グルー、カプトン・テープまたは同等のものでコネクタを機械的に補強する。

次の例では、基板完成後に V_{GS} テスト・ポイントにスクエア・ピン・ヘッダを追加しています。テスト・ポイントは、非導電性のホット・グルーで強度を高めています。

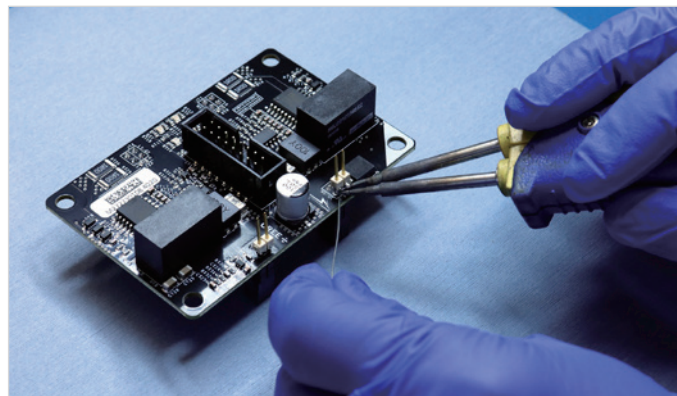


図16. V_{GS} ノードにスクエア・ピン・ヘッダをはんだ付けし、ハイサイド・ゲート・ドライバ信号を測定している例。写真提供 © Wolfspeed. 複製許可済

まとめ

ワイド・バンドギャップの半導体技術は、これからの電力変換、エネルギー効率において重要な役割を担います。SiCのスイッチは、シリコンによるものに比べて、小型、高速、高効率という特長があり、電気自動車から太陽光発電まで、さまざまなアプリケーションで使用されます。したがって、適切なツールを使用してテストすることが重要であり、設計エンジニアは最終のアプリケーションに向けて正しく設計、開発、統合することが可能になります。テクトロニクスの製品ソリューションは、重要な役割を担っています。

[IsoVu™光アイソレーション型絶縁プローブ](#)は、ゲート測定に最適なグランド接続のない差動プロービングが可能です。周波数帯域は200MHz~1GHzの機種があり、必要に応じて高電圧信号を測定する、さまざまな減衰比のプローブ・チップも用意しています。

[5シリーズMSO](#)は12ビットの高分解能オシロスコープで、大きな電圧における小さな電圧のテストに最適です。例えば、 V_{DS} の電圧があるなかでの V_{GS} 、RDS_ON、導通損失のテストでは、高い垂直軸分解能が必要です。また、チャンネル数も8チャンネルあるため、より多くの信号のタイミングを同時に観測でき、数多くの信号の性能、相関関係を最適化することが可能です。

[5-PWR](#)は、5シリーズMSOで実行可能なソフトウェアであり、自動で実行し、正確で再現性のあるパワー測定が行えます。現実の動作条件におけるスイッチング損失、導通損失、RDS_ON、磁気損失、SOAなどを測定できます。

参考文献

1. Are You Making the Big 'Power' Switch to SiC and GaN?
<https://www.tek.com/blog/are-you-making-big-powerswitch-sic-and-gan>
2. Wolfspeed Power Applications <https://www.wolfspeed.com/power/applications>
3. CPWR-AN45: Wolfspeed WolfPACK Dynamic Performance Application Note https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1971/product/741/cpwr_an45_wolfspeed_wolfpack_trade_application_note.pdf
4. SiC Power and GaN RF Solutions | Wolfspeed
<https://www.wolfspeed.com/>
5. SiC MOSFET and GaN FET Switching Power Converter Analysis Kit
<https://eepower.com/new-industry-products/sic-mosfet-and-gan-fet-switching-power-converteranalysis-kit/>

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
カナダ 1 800 833 9200
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (120) 441 046
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 6917 5000
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 12060128

2021年3月現在



jp.tek.com

テクトロニクス／ケースレイインスツルメンツ

各種お問い合わせ先：<https://jp.tek.com/contact-us>

技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡、修理・校正依頼

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2021, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。
記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2021年6月 48Z-73812-0