

高速GaNトランジスタの 正確な測定



Suvankar Biswas, David Reusch, Michael de Rooi, Efficient Power Conversion 米国カリフォルニア州エルセグンド; Tom Neville, 米テクトロニクス, 米国オレゴン州ビーバートン

GaNトランジスタが提供するスイッチング速度の高速化には、優れた測定技術と、高速波形の重要な詳細を把握するための優れた技術が必要です。このアプリケーション・ノートでは、高性能GaNトランジスタを正確に評価するために、ユーザーの要求と測定技術に対して、測定機器をどのように活用するかについて焦点を当てています。接地基準でない波形で使う広い帯域幅の差動プローブも評価しています。EPCのeGaN® FETの幅広いファミリーの測定の技術と要件を示すために、(i) 高速、スイッチング周波数10 MHz、ハーフブリッジ基板に基づく65 VのeGaN FETであるEPC8009 (図1のQ1とQ2)、および、(ii) 低速、スイッチング周波数500 kHz、上側スイッチ (Q1) として100 VのeGaN FETであるEPC2045を使い、下側スイッチ (Q2) として100 VのEPC2022を使うハーフブリッジのデモ・ボードEPC9080を使っています。両方の基板は、図1のバック (降圧型) ・コンバータとして動作するように構成されています。

測定に及ぼす帯域幅の影響

結合されたスコープとプローブのシステムで利用可能な最高の帯域幅は、(1) によって与えられます:

$$BW_{-3dB} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{BW_{-3dB, Scope}^2} + \frac{1}{BW_{-3dB, Probe}^2}}} \quad (1)$$

ここで、 BW_{-3dB} 、 $BW_{-3dB, Scope}$ 、および $BW_{-3dB, Probe}$ は、それぞれシステム、スコープ、およびプローブに対応する帯域幅 (Hz) です。このアプリケーション・

ノートでは、2 GHzのオシロスコープ (米テクトロニクスのMSO 5204) を使っています。パッシブ・プローブ (テクトロニクスのTPP1000) の最高帯域幅は1 GHzです。スコープの帯域幅とプローブの帯域幅との間で値が低い方が、システムの帯域幅に大きく影響します。この例では、システム全体の帯域幅は、約1 GHzと計算されます。

プリント回路基板設計のレイアウトを評価する場合、標準的な測定には、立ち上がり時間と降下時間、ピークのオーバーシュート、アンダーシュート、予想されるスイッチ・ノードの立ち上がりエッジの

リング周波数があり、これは、リング周波数の式を使って、以下のように見積もられます:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{Loop} C_{o2}}} \quad (2)$$

式 (2) において、 L_{Loop} は、高周波ループ・インダクタンスで、高周波デカップリング・コンデンサ、eGaN FET (Q1とQ2)、および部品のプリント回路基板接続で構成されます。 $C_{o2} = C_{oss} + C_{par}$ なので、Q2のブロッキング電圧における下側FET (Q2) の出力容量 C_{oss} と、スイッチ・ノードにおける寄生容量とプローブの容量 C_{par} が含まれます。 L_{Loop} は、このアプリケーション・ノートで検討されているデモ・ボードに対して、約200~300 pHと見積もられました [2]。テスト電圧範囲でEPC8009の C_{oss} は30 pF [3]、 C_{par} は、デモ・ボードでは約10 pFです。これは、リング周波数 f_{r1} では、約1.6 GHzに換算されます。大容量のEPC2045とEPC2022ベースの設計では、リング周波数 f_{r2} は、約0.44 GHzと見積もられます。

(1) から分かるように、私たちが利用可能なシステム帯域幅の最大値は、EPC8009ベースの設計のリング周波数を下回っています。ここで、EPC8009などの高速GaNトランジスタ、およびEPC2045やEPC2022などの比較的低速スイッチングのGaNトランジスタの場合、システム帯域幅の選択がスイッチ・ノード波形の捕捉にどのように影響するかを観察します。これが、どのように機能するかを理解するには、以下の図2にプロットしたシステムの周波数応答、与えられた測定システムのさまざまな帯域幅、および、このアプリケーション・ノートで検討されている2つの設計のリング周波数を考慮します。

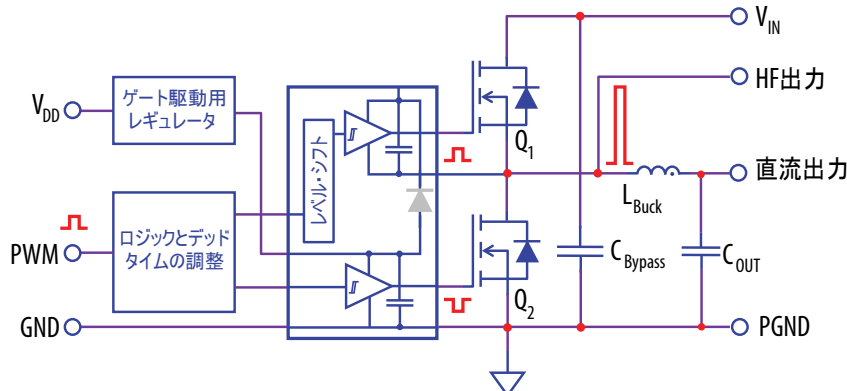


図1: このアプリケーション・ノートで使われているeGaN FETテスト基板の概略図。

ロールオフ領域 f_r が深くなるほど、その特定のプローブの波形捕捉精度は低くなります。この場合、測定システムは、低域通過フィルタのように動作し、高周波成分を減衰させます。これを図3に示します。ここで、この波形は、図2に示す周波数応答で使われた色に対応しています。波形の違いは、帯域幅測定が異なることから明らかです。図3では、捕捉された波形の立ち上がり時間が大きく変化することも観察されています。これは、次式に従って、システムの帯域幅と、立ち上がり時間との関係によるものです [1] :

$$t_{rise(10\% - 90\%)} \approx \frac{0.35}{BW_{-3dB}} \quad (3)^{[1]}$$

図3で捕捉された最速の立ち上がり時間は約0.4 nsです。これは、約1 GHzのシステム帯域幅に相当します。同じプローブと、帯域幅500 MHzのデジタル・フィルタを搭載したオシロスコープを使うと、測定された立ち上がり時間は0.8 nsです。明らかに、測定された信号の立ち上がり時間は、システムの帯域幅によって制限されています。測定された立ち上がり時間は、計算されたシステムの立ち上がり時間と等しいため、入力信号は、測定システムの立ち上がり時間よりも高速です。したがって、この入力信号の立ち上がり時間は、0.4 nsよりも、はるかに小さい可能性があります。

図4に示すように、測定されたリングング周波数 f_{r1} は1.176 GHzです。この測定は、最高帯域幅1 GHzのプローブを使って実施しました。図3に示したより低い帯域幅の場合は、リングング周波数測定の精度をさらに低下させます。ピーク電圧のオーバーシュートを見ると、測定の帯域幅が低いほど、スイッチング・デバイスに加わるピーク電圧が過小評価されることも明らかです。タイミングに依存するデッドタイム測定では、システム帯域幅も重要です。図3に示すように、500 MHzと1 GHzの帯域幅では、スイッチング波形がより明確に降下し、デッドタイムは、測定からより明確に定義できます。より低い帯域幅では、波形の降下を明確に定義することが難しくなります。表1は、最高速のEPC8009ベースの基板に対して、システム帯域幅が厳しい測定を行う能力に及ぼす影響を示しています。

もう1つのテスト・ケースは、より小さいオン抵抗とより大きい容量のeGaN FETによって、リングング周波数とスイッチング速度がはるかに低いデモ・ボードEPC9080で示されています [4]。対応する波形が図5です。438 MHzのリングング周

¹ 値の0.35は、ガウス周波数応答を持つオシロスコープの値です。周波数応答プロファイルが異なるオシロスコープでは、この値が異なることがあり、0.35~0.45の範囲で変化する可能性があります。

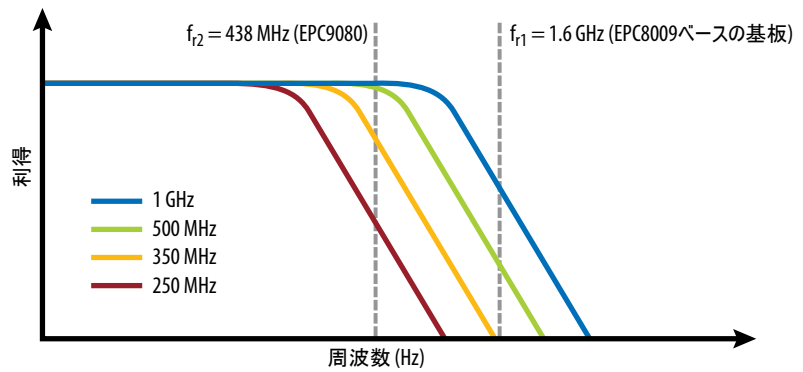


図2: システムの周波数応答 (スケール通りに描かれていません)。

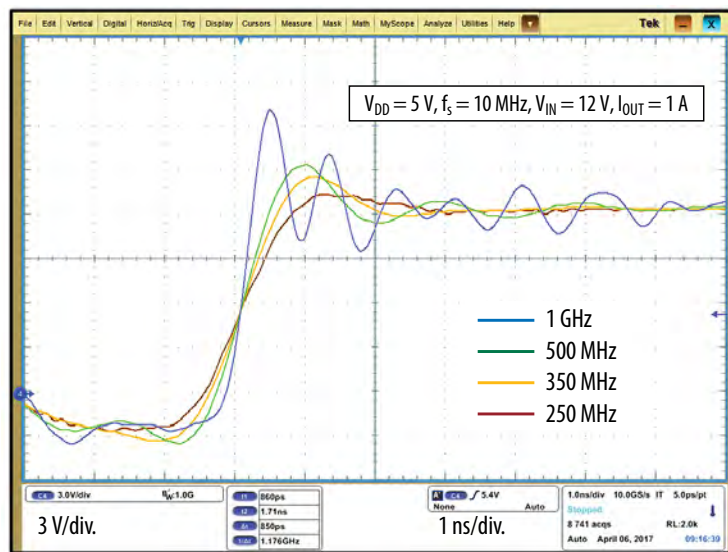


図3: 捕捉された波形 (EPC8009ベースの基板) に対するプローブ/システムの帯域幅の影響。

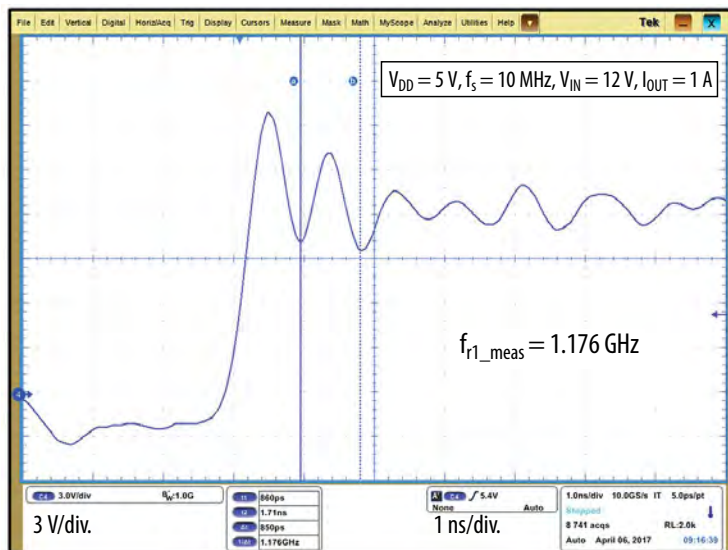


図4: リングング周波数測定 (EPC8009ベースの基板)。

波数 (f_2) と 1 GHz (青色) プローブで測定したその振幅が有効です。 f_2 がシステムの -3dB 周波数よりも低いからです。 1 GHz (青色) と 500 MHz (緑色) の波形は、詳細のすべてを正確に捕捉します。しかし、システム帯域幅が 350 MHz (オレンジ色) と 250 MHz (茶色) の場合、 f_2 はシステム帯域幅を上回ります。この結果、リングング波形の形状は捕捉されますが、リングングの減衰が明らかなので、オーバーシュートは過小評価されています。異なるシステム帯域幅によって測定された立ち上がり時間は約 3 ns です。使用した最も低い帯域幅は 250 MHz であり、式 (2) によれば 1.6 ns の立ち上がり時間に相当し、すべての場合に、立ち上がり時間を正確に捕捉することができます。この議論を表 2 に要約します。

測定技術

このアプリケーション・ノートの第 2 部では、忠実度高く、正確な波形を発生させるためのプロービング技術のうまい方法、および測定点の選択の重要性を実証します。

1. 入力容量が小さいプローブを使って、できるだけ短く接地してください

パッシブ・プローブ (テクトロニクスの TPP1000) は、2 種類のプローブ接地ソリューションが使われています。すなわち、ワニ口のクリップとばねクリップです [5] (図 6 参照)。

ユーザーが一点接地を実現でき、接地リードの範囲内で多くのテスト点をプローブできるので、長い接地リードが便利です。しかし、いずれの線材も分布インダクタンスがあります。この分布インダクタンスは、信号周波数が高くなるにつれて、交流電流の流れを阻害するので、交流信号に反応します。この接地リード線のインダクタンスは、プローブの入力容量と相互作用し、特定の周波数でリングングを引き起こします (式 2 を参照)。このリングングは、やむを得ないものであり、振幅が減衰する正弦波として見られるかもしれませんが。接地リードの長さが長くなると、そのインダクタンスが増加し、測定信号は、より低い周波数でリングングを生じます。

プローブの入力容量と接地リードの長さの影響を最小化することが重要です。TPP1000 の 3.9 pF の入力容量は、約 9.5 pF の入力容量がある他のパッシブ・プローブよりも、大幅に小さくなっています。表 3 は、入力容量と接地リード長がリングング周波数にどのように影響するかを示しています。

| システム帯域幅 | 250 MHz | 350 MHz | 500 MHz | 1 GHz |
|----------|---------|---------|---------|-------|
| デッドタイム | × | × | ✓ | ✓ |
| リングング周波数 | × | × | × | × |
| オーバーシュート | × | × | × | × |
| 立ち上がり時間 | × | × | × | × |

表 1: 測定可能なパラメータ (EPC8009 ベースの基板)。

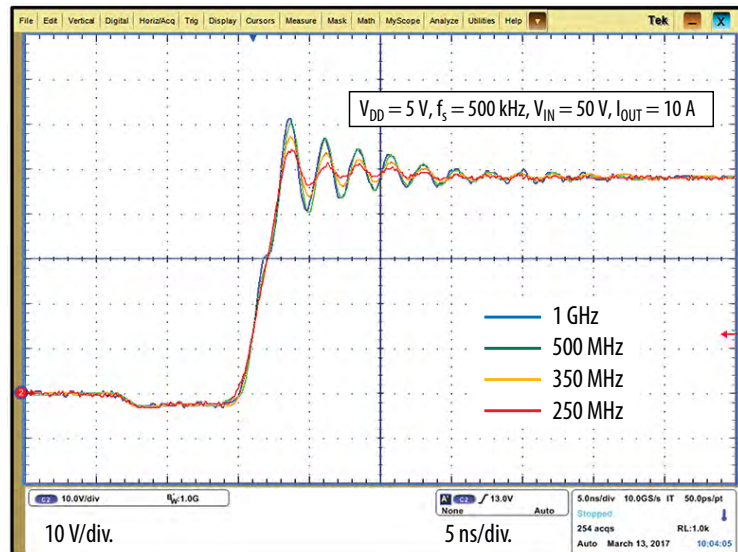


図 5: 捕捉波形に対するプローブ/システムの帯域幅の影響 (EPC9080)。

| プローブの帯域幅 | 250 MHz | 350 MHz | 500 MHz | 1 GHz |
|----------|---------|---------|---------|-------|
| デッドタイム | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| リングング周波数 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| オーバーシュート | × | × | ✓ | ✓ |
| 立ち上がり時間 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

表 2: 測定可能なパラメータ (EPC9080)。



図 6: 異なるプロービング方法。

ハーフブリッジのデモ・ボードEPC9080は、測定手法に関するこのセクションの題材として使われます。図7にこの基板で使われているさまざまなテスト点の構成図を、図8に実際のプリント回路基板の写真を示します。スイッチ・ノードの波形は、図9に示すように、2点で測定されます。すなわち、FETのスイッチ・ノードに近い「近接点」と、プリント回路基板の周辺部にあるピン・ヘッダーである「遠隔点」です。

プロービング点とプロービング方法の各組み合わせで測定したスイッチ・ノードの波形 (V_{SW}) を図9に示します。

図9の測定波形は、プロービング方法が測定点の選択に取って代わることをはっきりと示しています。わずかな減衰はありますが、赤色と黒色の波形は、ほぼ同じです。この波形の形状は、測定点の選択に関係なく、ワニ口クリップを使うと、きわめて不正確になります。ばねクリップの方法は、パワー・デバイスに最も近い測定点（「近接点」）で使うことを推奨します。

2. 接地基準でない高周波測定には絶縁測定システムを使います

差動測定は、2つのテスト点の間の任意の測定を表しますが、接地を基準としないテスト点を含む測定を実施するとき、最も一般的に使われます。差動測定で一般的に使われる方法には、以下があります。

- (a) 2本のシングルエンド・プローブとオシロスコープの演算を使ってこの差を測定し、
- (b) 広い帯域幅で高電圧の差動プローブを使用し、
- (c) 絶縁された測定ソリューションを使います [6]。

まず、オシロスコープの演算関数の使用方法を検討します。関心のある2つのテスト点の電圧は、2本の接地基準のプローブを使って測定します。次に、2つの電圧波形の間の差を示す演算波形を生成することができます。この差の演算波形は、擬似的な差動測定です。特性は制限されていますが、この手法は、小さい同相信号の低周波測定に適していることがあります。適切な動作のためには、両方の入力と同じスケール・ファクタに設定する必要があり、2本のプローブは、同じモデルで、ほぼ一致していなければなりません。プローブ間の減衰/利得、伝播遅延、中高周波数応答のいかなる不一致も、測定精度を低下させることになります。同相信号除去比 (CMRR) は、高い周波数では非常に低く、大きな同相信号は、スコープ入力をオーバードライブするでしょう。

| プローブ | プローブの入力容量 | 接地のソリューション | 接地ソリューションのインダクタンス | リンギング周波数 |
|-----------------|-----------|-------------|-------------------|----------|
| 標準的なパッシブ・プローブ | 9.5 pF | 6インチの接地リード | 150 nH | 133 MHz |
| テクトロニクスのTPP1000 | 3.9 pF | 6インチの接地リード | 150 nH | 208 MHz |
| 標準的なパッシブ・プローブ | 9.5 pF | 1/2インチの接地ばね | 10 nH | 516 MHz |
| テクトロニクスのTPP1000 | 3.9 pF | 1/2インチの接地ばね | 10 nH | 806 MHz |

表3: 計算されたプローブのリンギング周波数。

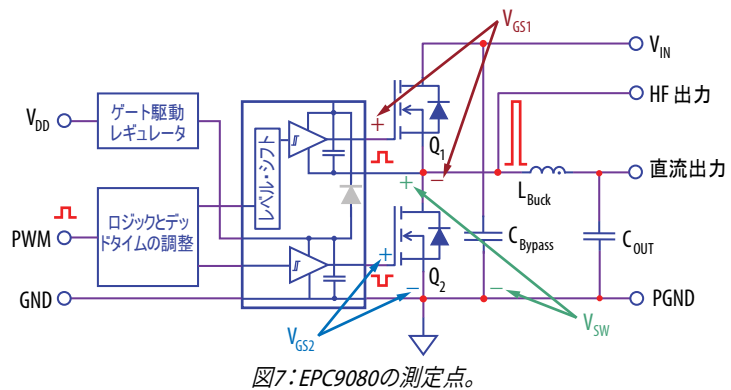


図7: EPC9080の測定点。

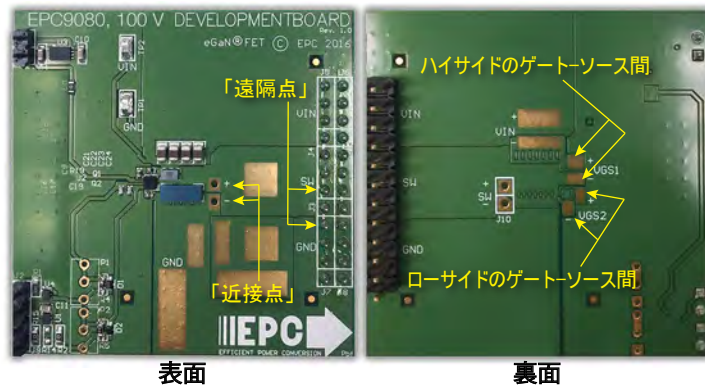


図8: 開発基板と測定点。

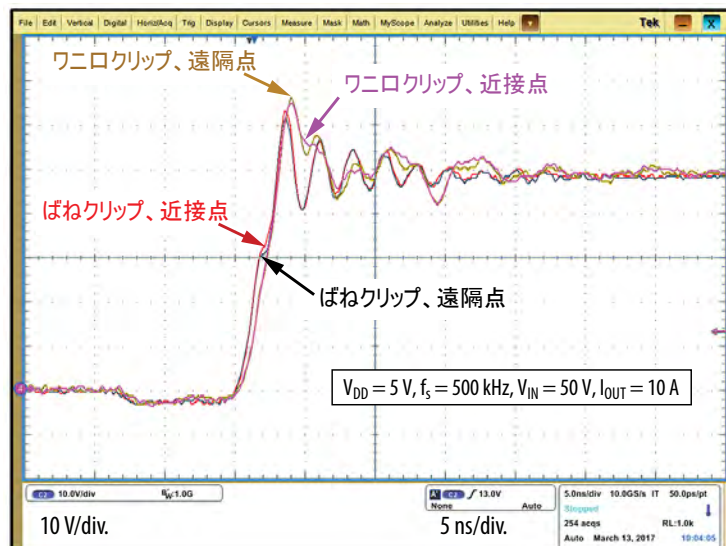


図9: プロービング手法の効果と測定点の選択。

差動測定を実施するための次の方法は、差動プローブを使います。これらのプローブは、真に差動なので、両方の入力が高インピーダンス（高抵抗で低容量）です。高電圧差動プローブのバランスの取れた低容量の入力によって、回路内の任意の点を、テスト中の回路への最小限の負荷で、安全にプローブで調べることができます。しかし、従来の差動プローブは、同相信号除去比、周波数に対する電圧ディレーティング（定格低減）、周波数応答、およびプローブの長い入力リードの制限のために、実際の信号をうまく表示できないことがあります。これらの制限は、公称同相電圧でさえ、スイッチング速度が高速なパワー・デバイスでテストする場合には、さらに顕著になります。

正確な差動測定を実施する最も好ましい方法は、テクトロニクスのIsoVu測定システムなどの高性能で絶縁された測定ソリューションです。大きな同相電圧でエッジ・レートが高速なハーフブリッジのような回路では、高い周波数でのCMRRが優れていなければ、ハイサイドのゲート-ソース間電圧などの信号を測定することは不可能です。従来の差動プローブは、数MHzまでの低い周波数では比較的良好な同相信号除去が得られますが、CMRRは数MHzを超えると大幅に低下します。テクトロニクスのIsoVuのような絶縁されたシステムは、高い周波数で高いCMRRを実現しています。「接地」と入力電源電圧との間で素早くスイッチングするスイッチ・ノード電圧の上に乗っているハイサイドの V_{GS} などの信号を評価するとき、以下の特性を備えた測定ソリューションが必要になります：

- ・ ガルバニック絶縁
- ・ 広い帯域幅：500 MHz以上
- ・ 大きな同相電圧：入力電源電圧以上
- ・ 大きな同相信号除去比：100 MHzで60 dB以上
- ・ 大きな入力インピーダンス：10 M Ω 以上 || 2 pF以下

スコープの演算手法と絶縁された測定システムとの間で結果として生じる測定の差異を図10と図11に示します。この測定された波形は、EPC9080基板のハイサイドのゲート-ソース間信号 (V_{GS1}) です (図7と図8)。

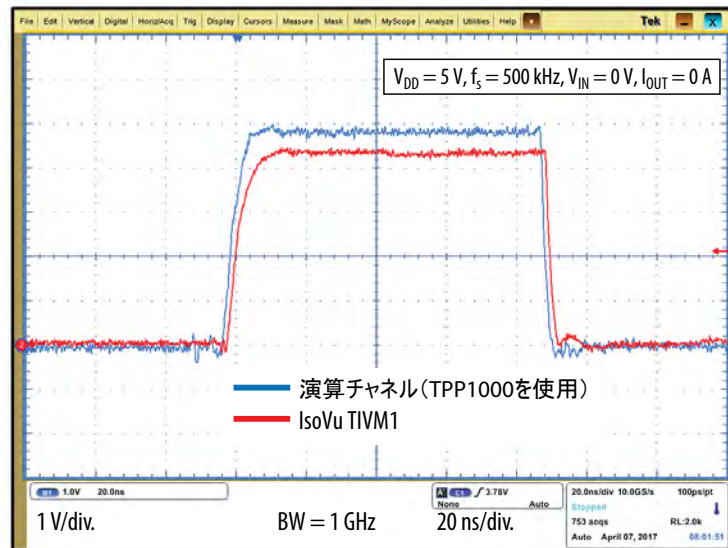


図10: ハイサイドのゲート-ソース間電圧 V_{GS1} の波形 (クリーンな環境)。

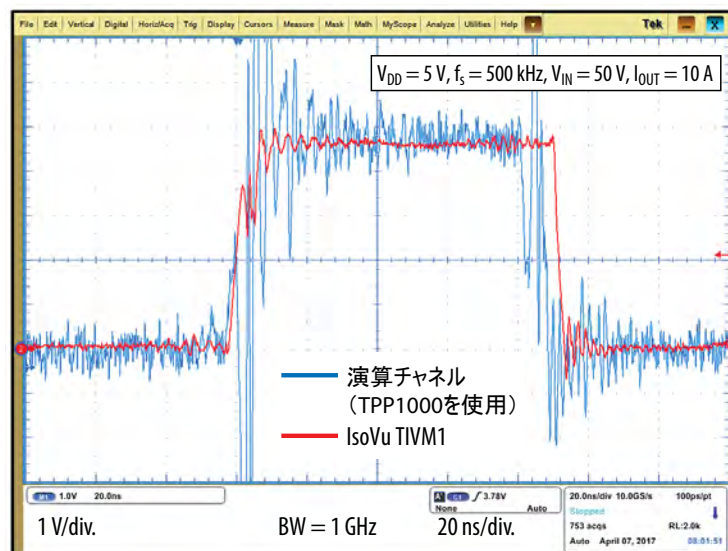


図11: ハイサイドのゲート-ソース間電圧 V_{GS1} の波形 (雑音がある環境)。

図10は、雑音の少ない環境または「クリーン」な環境（論理回路の電源電圧 $V_{dd} = 5V$ ）で駆動される論理回路だけの波形です。パッシブ・プローブに基づく演算波形は、広い帯域幅の絶縁プローブ（テクトロニクスのIsoVu [7]）で測定されたものと似ています。しかし、図11に示す電圧と電流が供給された回路では、測定の間差を拡大し、「雑音のある」環境において振幅が大きいスイッチング雑音が存在します。絶縁されたプローブで捕捉された波形は、高いCMRRによって、はるかにクリーンです [7]。

3. プローブの同相信号除去比 (CMRR) は重要ですが、しばしば見落とされる仕様です

同相信号を除去するプローブの能力は、その同相信号除去比 (CMRR) です。理想的には、差動測定システムのCMRRは無量大です。アンプのCMRRが大きいほど、同相入力電圧が差動測定に及ぼす影響は小さくなります。実際には、少なくとも80 dB (1万:1) のCMRRが利用可能な測定になります。ほとんどの差動プローブは、直流と低周波で80 dB以上のCMRRを簡単に得ることができ、部品を正確に調整することができます。測定の周波数が高くなるにつれて、このミスマッチがますます制御しにくくなるので、差動プローブのCMRRは低下します。100 MHzで、ほとんどの測定システムのCMRRの能力は20 dB以下です。表4は、絶縁された測定システム（テクトロニクスのTIVM1）のCMRR仕様と、従来の高電圧差動プローブの比較です。これらの値は、プローブのデータシートから直接引用しています。

従来の差動プローブのCMRR能力は、直流から、わずかに数MHzまでしか有効でないため、一般的なデータシートでは、より広い帯域幅でのCMRRの値を提供できません。ユーザーは、1 MHzの仕様がアプリケーションに対して「十分高周波」であると考える罣に陥る可能性があります。しかし、繰り返し速度は速くないかもしれませんが、あなたが測定している信号の立ち上がり時間は、1桁または2桁のnsと非常に速いかもしれないことを覚えておくことが大切です。

もし測定中の差動信号に500 Vの同相電圧が加わっていた場合、どのくらいの誤差が予想されますか？ ここでもまた、それは信号の立ち上がり時間に依存します。もし従来の差動プローブを使って、直流で測定している場合、そのCMRRは、80 dBまたは1万:1です。

| プローブ | 帯域幅 | CMRR @ DC | CMRR @ 1 MHz | CMRR @ 100 MHz | CMRR @ 全帯域幅 |
|---------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| テクトロニクスのTIVM1 | 1 GHz | 120 dB (100万:1) | 120 dB (100万:1) | 120 dB (100万:1) | 80 dB (1万:1) |
| 従来の高電圧差動 | 200 MHz | 80 dB以上 (1万:1) | 50 dB (316:1) | 27 dB† (22:1) | 15 dB† (5.6:1) |

表4: 同相信号除去比の比較。

†: データシートには記載されていないので、プローブのマニュアルのCMRRのプロットから推定。

| プローブ | 帯域幅にわたって500 Vの同相電圧が加わったときの同相誤差 | | | |
|---------------|--------------------------------|-------------|-------------|--------|
| | DC | 1 MHz | 100 MHz | 全帯域幅 |
| テクトロニクスのTIVM1 | 500 μ V | 500 μ V | 500 μ V | 50 mV |
| 従来の高電圧差動 | 50 mV | 1.6 V | 22.3 V | 89.3 V |

表5: 同相信号除去比が不十分なことによる誤差。

同相の誤差は、500 Vを1万で割って、その誤差は50 mVになります。表5は、帯域幅にわたって500 Vの同相電圧が存在する場合に、どのくらいの同相誤差が生じるかを示しています。

注: 従来のプローブに対する100 MHzおよび全帯域幅での値はデータシートに記載されていないため、これらの値は、ユーザー・マニュアルの同相除去のプロットから推定しました。

結論

このアプリケーション・ノートでは、EPCのさまざまなeGaN FETベースのパワー・コンバータの測定について説明しました。帯域幅やプロービング手法の影響、広い帯域幅の絶縁プローブの適切な使用などです。より良い測定技術と手法、および、特定のアプリケーションの測定システムの要件に対する理解を深めることを組み合わせれば、回路設計者は、高性能GaNベースの設計をより最適化することができます。

参考文献:

- [1] A. Lidow, J. Strydom, M. De Rooij and D. Reusch, *GaN transistors for efficient power conversion*, Second Edition, Wiley, 2014.
- [2] D. Reusch and J. Glaser, *DC-DC Converter Handbook*, Power Conversion Publications, 2015.
- [3] EPC8009 eGaN FET datasheet. http://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC8009_datasheet.pdf
- [4] EPC2022 eGaN FET datasheet. http://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2022_datasheet.pdf
- [5] Tektronix TPP0500 and 1000 passive probe: Instruction. http://www.av.it.pt/medidas/data/Manuais%20&%20Tutoriais/60%20-%20MSO71604C/Product%20Software/Documents/pdf_files/probes/0712809.pdf
- [6] ABC of Probes: A Primer, Tektronix Inc. https://faculty.unlv.edu/eelabs/docs/guides/ABC_of_Probes.pdf
- [7] TIVM Series IsoVu Measurement System: Users Manual, Tektronix Inc.