CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 - TO263-7 (D²PAK) パッケージ

本書について

適用範囲と目的

このアプリケーションノートでは、産業用電源アプリケーション向けの TO263-7 パッケージの新世代 CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 トレンチを紹介します。本書の目的は、この新しい製品ファミリーの特長を説明することです。また、最高の性能と信頼性を備えたシステムの設計に役立つ、重要なアプリケーショントピックを取り上げます。

対象者

本書の対象者は、電子システムの設計エンジニア、技術者、および開発者です。

目次

目次

本書について 1
目次 2
1 はじめに 3
1.1 対象アプリケーション 3
1.2 テクノロジーの特長と利点 3
1.3 .XT 相互接合技術 4
2 動作時の最大ジャンクション温度の拡張 5
3 デバイスの選択 6
4 CoolSiC™ MOSFET 1200V G2 のスイッチング動作 9
4.1 CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 のゲート抵抗の選択 10
5 ボディダイオードの逆回復特性 12
5.1 デッドタイムの短縮によるさらなるメリット 13
6 ユニポーラゲート駆動と寄生ターンオンの堅牢性 15
6.1 MOSFET の推奨駆動条件 16
7 異なる動作条件下での損失の比較 17
7.1 ハードスイッチングトポロジー: AC-DC アクティブフロントエンド 17
7.2 ソフトスイッチングトポロジー: LLC 18
8 SiC MOSFET 回路の PCB レイアウト 19
参考資料 20
改訂履歴 21
免責事項 22

1 はじめに

1.1 対象アプリケーション

パワーエレクトロニクスでは、シリコンカーバイド (SiC) MOSFET が次のようなアプリケーションで重要な役割を果たします。

- 蓄電システム
- EV 充電ソリューション
- 高周波スイッチモード電源
- モータードライブ
- 太陽光発電用インバーター

あらゆる産業グレードのアプリケーションにおいて、SiC MOSFET の効率と性能は、高電力需要を満たし、信頼性を確保するのに役立ちます。高温耐性、低オン抵抗、低スイッチング損失などの優れた特性 (シリコンベースのパワースイッチと比較して)により、要求の厳しい環境に最適です。

1.2 テクノロジーの特長と利点

インフィニオンの CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 は、最新のゲート酸化膜プロセスによる垂直トレンチセル構造を採用しています。この設計により、オン抵抗が低減され、電界制御が最適化されるため、スイッチング速度が向上し、損失が低減されます。G2 SiC テクノロジーにより、デバイスの熱抵抗が低減するため、高効率な電源回路を実現可能です。

CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 は、コンパクトな設計、長寿命、厳しい環境下での信頼性を提供します。熱抵抗が低減されるため、冷却の労力を軽減できます。これにより、より多くの高周波アプリケーションが可能になります。さらに、G2 製品は、以前の技術 (インフィニオンの CoolSiC™ G1) を組み込んだあらゆるシステムと完全に互換性があります。

CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 の主な特長は、以下のとおりです。

- 高温での動作が可能
- 高耐圧
- 高速スイッチング
- 低オン抵抗
- 高い熱伝導率
- アバランシェおよび短絡耐量

これらの特長により、CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 は、多様なアプリケーションにおいて電力変換回路の効率を向上させるのに適した選択肢となっています。Figure 1 に、インフィニオンの 2 つの CoolSiC™ ファミリーの重要な MOSFET 性能指数の比較を示します。これらの性能指数パラメータは、スイッチング速度の高速化、システムデッドタイムの短縮、スイッチング損失の低減など、アプリケーションに関連する利点に変換できます。

1 はじめに

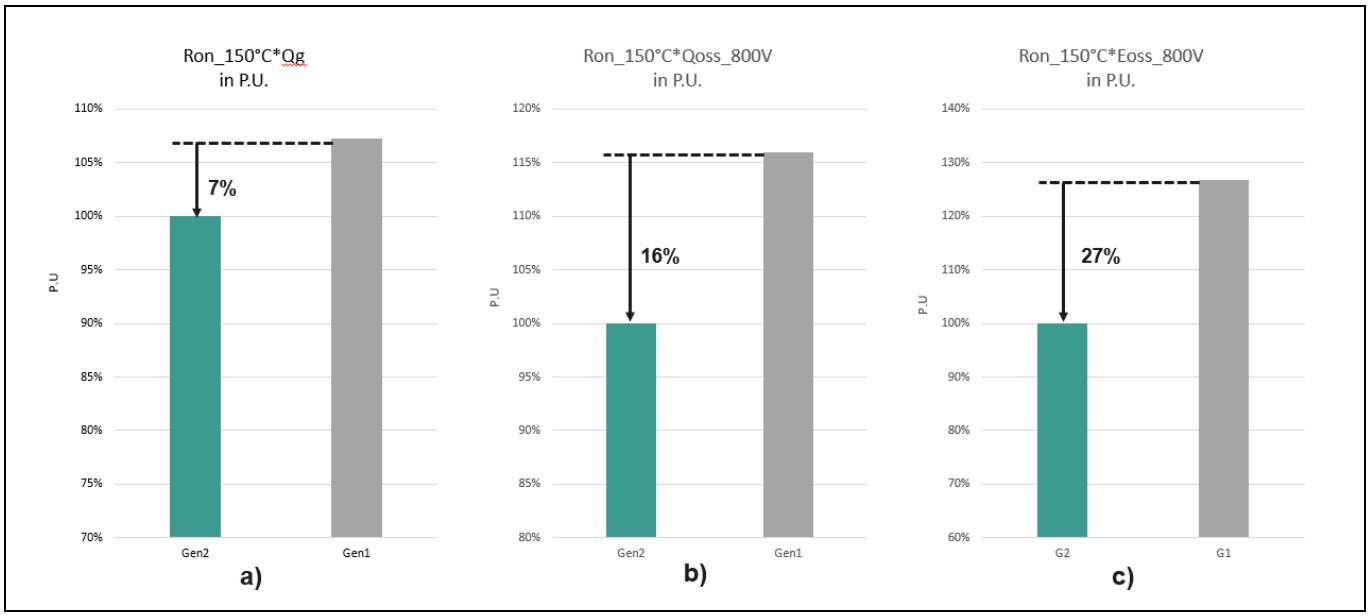


Figure 1　SiC MOSFET の性能指数 (a) 150°C でのオン抵抗 * 総ゲート電荷 (b) 150°C でのオン抵抗 * 出力容量電荷 (c) 150°C でのオン抵抗 * 出力容量エネルギー

G2 の技術改善により、D2PAK CoolSiC™ファミリーのポートフォリオは、最小の G1 $R_{ds(on)}$値 30mΩ から 8mΩ G2 デバイスまで、さらに拡張できます。SiC MOSFET RDSon クラスが低いほど電力処理能力が向上し、電子システムでより高い電力密度を実現できます。高い電力レベルを処理できるため、部品点数の削減、コンパクトなシステム設計、より良い熱マネジメントを実現できます。これらのデバイスは、高電圧アプリケーション向けに高レベルの集積化とサポートが可能なため、電力密度、効率、およびスペースを優先するアプリケーションにとって不可欠です。

1.3　.XT 相互接合技術

インフィニオンの.XT チップ相互接続技術は、設計上の課題を解決し、一貫した熱性能を備えた小型フォームファクターを実現します。.XT 技術を搭載した新しい CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 は、ダイ取り付けプロセスの改善により、ジャンクション - ケース間の熱抵抗が 12%向上しています。その結果、より大きな出力電流を駆動でき、また、デバイスの長寿命化へとつながります。また、.XT 技術で用いる拡散はんだ付けにより、はんだボイドの発生確率を最小化し、はんだ層の厚さを低減します。参考資料[1]では、D²PAK のさまざまな PCB 設定の詳細な比較について説明しています。

2 動作時の最大ジャンクション温度の拡張

SiC MOSFET は、従来のシリコンベースの MOSFET より高い温度で動作できることが知られています。具体的な温度定格は SiC MOSFET のテクノロジーやメーカーによって異なりますが、多くの SiC MOSFET は、最大 175 °C のジャンクション温度で確実に動作するように設計されています。インフィニオンの CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 は、最大 200°C、累積 100 時間の動作が可能です。このデバイス仕様は、過負荷条件下での信頼性を高め、エンジニアのシステム設計の自由度を高めるために導入されました。

SiC MOSFET が短い過負荷条件に耐えられるかどうかは、さまざまなアプリケーションにおいて重要な考慮事項です。産業用モータドライブでは、突然の負荷の変化、追加のトルク要求、さらには電源の変動によって過負荷状態が発生する可能性があり、接合部温度マージンの増加が役立つ場合があります。また、過負荷状態が発生するもう 1 つのアプリケーション例として、ソーラーインバーターが挙げられます。グリッド接続アプリケーションでは、グリッド電圧の変動が電力コンバーターの動作に影響を与える可能性があります。電圧低下はコンバーターの出力電力に影響を及ぼし、一時的に電力損失を増加させたり、深刻な場合にはシステムをグリッドから完全に切断したりする可能性があります。電気自動車の充電アプリケーションでは、充電器の電圧変動が重要です。入力電圧が低下すると、電流が一時的に増加し、電源デバイスにさらなるストレスがかかります。

Figure 2 に、高い温度制限により 8 mΩ デバイスの許容電力損失が拡大した例を示します。灰色の曲線は、175 ℃のケース温度によって制限される一般的な半導体電力を表しています。比較すると、CoolSiC™ G2 の緑色の曲線は、同じ動作点で 29%多くの電流が有効になることを示しています。

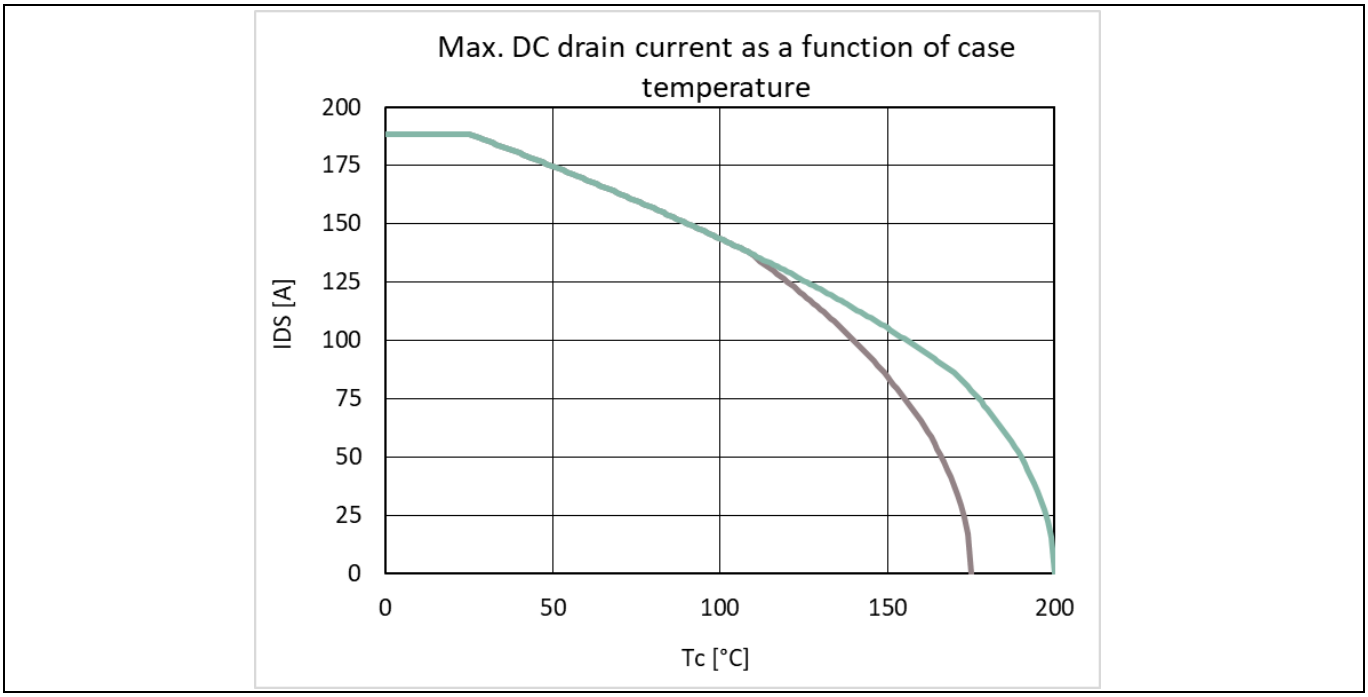


Figure 2 デバイス(IMBG120R008M2H) の最大 DC ドレイン電流のケース温度特性

前述したように、CoolSiC™ MOSFET G2 は、最大 200 ℃、累積 100 時間の動作が可能です。

3 デバイスの選択

あらゆるアプリケーションに対して、最適な性能、信頼性、効率を確保するために適した MOSFET を選択する際には、さまざまな要因を考慮する必要があります。ここでは、新しい電源システムに適した G2 デバイスを選択するためのガイドラインと、既存の G1 デバイスを置き換えるためのガイドラインを示します。

CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 ポートフォリオでは、デバイスの型番の命名法は変わりません。Figure 3 に、CoolSiC™製品の命名法を示します。特定のタイプのデバイスを選択する簡単な方法は、デバイスのテクノロジーまたは世代を定義するパッケージコードと製品シリーズコードを確認することです。これら 2 つのパラメーターを選択した後、ポートフォリオ内の電圧クラス、$R_{ds(on)}$クラス、または電流定格を選択することで詳細を調べることができます。

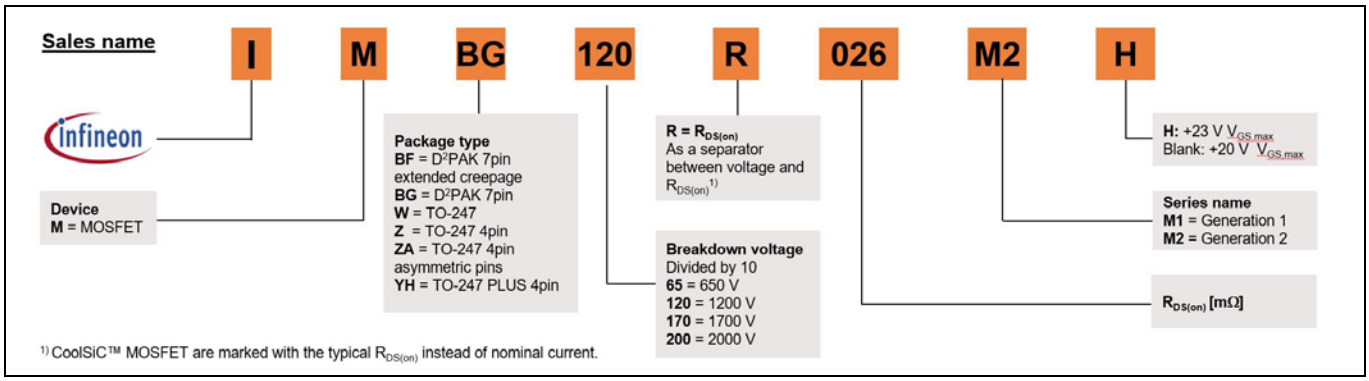


Figure 3 CoolSiC™製品の命名法

Note: この例では自動車部品番号は取り上げていません。詳細については、インフィニオンのパワーMOSFET の製品 Web ページを確認してください。

特定の電圧および電流定格、スイッチング周波数条件、および熱システムを備えた特定のアプリケーション用に MOSFET を選択するには、常に一定のトレードオフの最適化が必要です。

MOSFET を選択するための最初の決定要因は、システムの動作電圧です。今日では、いくつかの電圧クラスが業界標準になっています。したがって、この点で適切な決定を下すのは非常に簡単で、システムの最大電圧によって決まります。一般的な経験則としては、デバイスの最大定格電圧と動作時のバス電圧の間に 30 %のマージンを許容することです (例: 1200 V SiC MOSFET は通常、最大 900 V のバス電圧で使用されます)。特定の $R_{ds(on)}$ クラスの選択は、より複雑なプロセスです。実際、Rds(on)値は、導通損失に影響を与える重要なパラメータです。インフィニオンの CoolSiC™ファミリーの場合、前の世代の製品名と比較すると、G1 と G2 の間で Rds(on)値が異なることがわかります。これは、製品名には通常 25°C でのオン抵抗値が含まれており、この値は技術の改善により G2 デバイスではわずかに異なるためです。Figure 4 に、接合部温度の関数としての IMBG120R026M2H G2 と IMBG120R030M1H G1 のオン抵抗を示します。曲線は、それぞれ+15 V (破線) および+18 V (実線) のゲート電圧での動作を示しています。

3 デバイスの選択

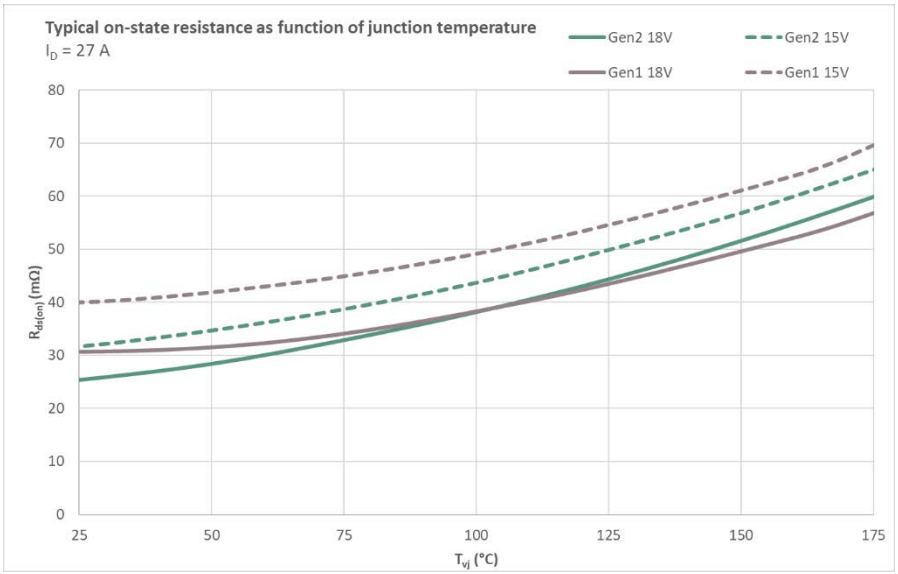


Figure 4　G2 (IMBG120R026M2H) および G1 (IMBG120R030M1H) デバイスのゲート電圧+15 V および +18 V におけるオン抵抗 - ジャンクション温度特性

CoolSiC™ Gen2 は、垂直セル内のチャネル領域が改善されています。全オン抵抗に対するチャネル抵抗の割合は著しく小さく、ドリフト層の割合がより大きくなっています[2]。このため、オン特性はわずかに強い正の温度係数の性質を持っています。CoolSiC™ G2 データシートでは、150 ℃での最大 $R_{ds(on)}$が保証されており、これは市場では唯一のものです。この値は、最悪のシナリオを考慮する際の設計パラメータとして使用できます。

SiC MOSFET の標準的なゲート-ソース間駆動電圧は+18 V です。Gen1 デバイスを新しい Gen2 デバイスに置き換える際には、両方のデバイスのオン抵抗特性を比較することが重要です (Figure 4)。デバイスは、通常は高負荷動作である最悪のケースの動作ポイントの熱条件に従って選択する必要があります。そうすることで、より正確なマッチング選択を行うことができます。さらに、Gen2 デバイスの $R_{DS,on}$ 温度依存性が高いため、低負荷動作が大幅に改善されます。以下の章の 1 つでは、選択されたアプリケーションでのデバイス損失の全体的な分布について説明し、Gen2 デバイスの利点を強調します。

保証された短絡耐量は、CoolSiC™ テクノロジーのもう 1 つの重要な機能であり、これによりインフィニオン SiC MOSFET をモーター駆動アプリケーションで安全に使用できます。この機能は通常、デバイスを+15 V のゲート-ソース電圧で駆動することで向上します。Figure 4 の破線は、このような条件で駆動した場合、G2 デバイスは常に導通損失が大幅に低いことを示しています (例えば、動作温度が 100 ℃の場合、G2 デバイスの $R_{ds(on)}$ は G1 デバイスと比較して 15 %低くなります)。その結果、CoolSiC™ テクノロジーは、モーター駆動アプリケーション、さらに一般的には+15 V の V_{GS} での駆動を必要とするすべてのアプリケーションで、さらに魅力的なパフォーマンスを提供します。

導通損失に加えて、常に高いスイッチング周波数で動作する傾向があるため、スイッチング損失の寄与は、SiC MOSFET を選択する際のもう 1 つの重要な側面です。MOSFET のゲート電荷と容量値は、必要なスイッチング周波数のデバイスを選択するのに役立ちます。G2 MOSFET では、寄生容量が前世代に比べて低くなります。これにより、スイッチング過渡が高速化され、結果として G2 は G1 よりもスイッチング損失が低くなり、より高いスイッチング周波数での動作とゲート ドライバ損失の低減が可能になります。CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 製品のスイッチング動作については、第 4 章で詳しく説明します。

最後に、最適な SiC MOSFET 製品を選択する際には、熱特性を考慮する必要があります。この意味では、デバイスの熱抵抗値が小さいほど、特定の最適化戦略に応じて、消費電力が高くなったり、動作温度が低くなったりします。G2 デバイスのチップ/パッケージ インターフェースが改善されたため、R_{th} は

3 デバイスの選択

以前の SiC MOSFET 世代よりも 12%向上し、ケース上の同じデバイスジャンクション温度上昇に対して 12 %高い電力を消費できます。

4 CoolSiC™ MOSFET 1200V G2 のスイッチング動作

SiC MOSFET のスイッチング動作を理解することは、さまざまなアプリケーションでコンバーターの設計を最適化するために不可欠です。SiC MOSFET の特長の 1 つは、材料の高い電子移動度に起因する高速スイッチング速度です。この特性により、オン状態とオフ状態間の迅速な遷移が可能になり、スイッチング損失が低減し、全体的な効率が向上します。

CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 テクノロジーは、デバイスの容量特性を改善しています。Table 1 に示すように、入力容量および出力容量がそれぞれ 13 %および 19 %と大幅に削減されています。負荷が比較的小さい条件で動作する場合、G2 デバイスでは出力容量の改善がさらに顕著になります。入力容量値によって、必要なゲート駆動電力が決まります。したがって、インフィニオンの CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 電源スイッチを使用することで、システムはゲート ドライバ損失を低減し、駆動回路を最適化できます。

Table 1　G2 および G1 デバイスの寄生容量

		値	
パラメーター	記号	IMBG120R026M2H	IMBG120R030M1H
入力容量	C_{iss}	1990 pF	2290 pF
出力容量	C_{oss}	85 pF	105 pF
帰還容量	C_{rss}	7.4 pF	11 pF

スイッチング損失の低減は、高出力エレクトロニクス設計の重要な目標です。G2 では、前世代と比較してスイッチング損失を低減できます。SiC MOSFET のスイッチング動作は、動作温度, デバイスに流れる電流, スイッチに適用されるゲート抵抗など、いくつかの要因によって異なります。Figure 5 に、それぞれ G2 と G1 を代表して、IMBG120R026M2H と IMB120R030M1H の温度依存性を示します。150 °C での両デバイスのターンオンおよびターンオフ エネルギー曲線を比較すると、G2 デバイスのスイッチング動作がそれぞれ 7 %および 23 %優れていることがわかります。

設計エンジニアは、電流依存性も考慮し、適切な熱管理戦略を実装して、G2 MOSFET の全体的なスイッチング性能を活用する必要があります。

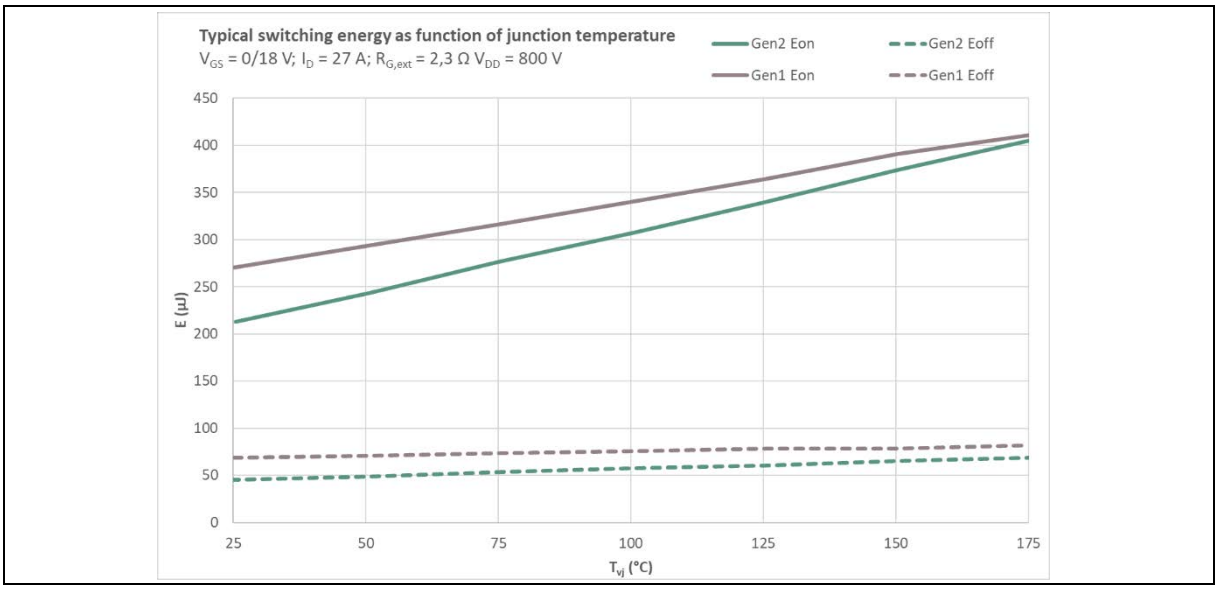


Figure 5　G2 (IMBG120R026M2H) および G1 (IMBG120R030M1H) デバイスにおけるスイッチング損失 - ジャンクション温度特性

4 CoolSiC™ MOSFET 1200V G2 のスイッチング動作

4.1 CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 のゲート抵抗の選択

接続されるゲート抵抗は、SiC MOSFET のスイッチング動作とその全体的な性能に大きく影響します。ゲート抵抗は、トランジスタの ON 状態と OFF 状態の間の遷移を最適化するためにエンジニアが調整できる重要なパラメータです。

ゲート抵抗が低いほど、ゲート容量の充放電が速くなり、スイッチングが速くなります。これにより、スイッチング損失を低減し、全体的な効率を向上できます。ゲート抵抗を小さくすることで、ON 状態と OFF 状態の間の遷移を急峻に切り替え、スイッチング時の消費電力を最小限に抑えられます。

反対に、ゲート抵抗が高くなると駆動回路の時定数が増加するため、スイッチング プロセスが遅くなります。これにより、電圧オーバーシュートやリンギングのリスクは軽減される可能性がありますが、ゲート抵抗が高すぎると、スイッチング速度と効率が低下する可能性があります。ゲート抵抗が高くなると、スイッチング遷移が緩和され、電磁干渉 (EMI) が低減し、電圧スパイクが緩和される可能性があります。

Figure 6 に、MOSFET G2、IMBG120R026M2H と、それぞれの G1 IMBG120R030M1H デバイスの、さまざまなゲート抵抗値でのエネルギー損失を示します。前述の理由と、CoolSiC™ MOSFET の速度をフルに活用するために、最大 25 Ω のゲート抵抗値でシステムを設計することを推奨します。具体的なゲート抵抗値は、デバイスの $R_{ds(on)}$クラスによって異なります。Figure 6 に、 MOSFET の技術に関係なく、ゲート抵抗値が 25 Ω を超えると、スイッチングサイクルあたり 1 mJ 近くのターンオンエネルギー損失が発生し、スイッチング周波数 1 kHz あたり約 1 W のスイッチング損失が発生することを示します。

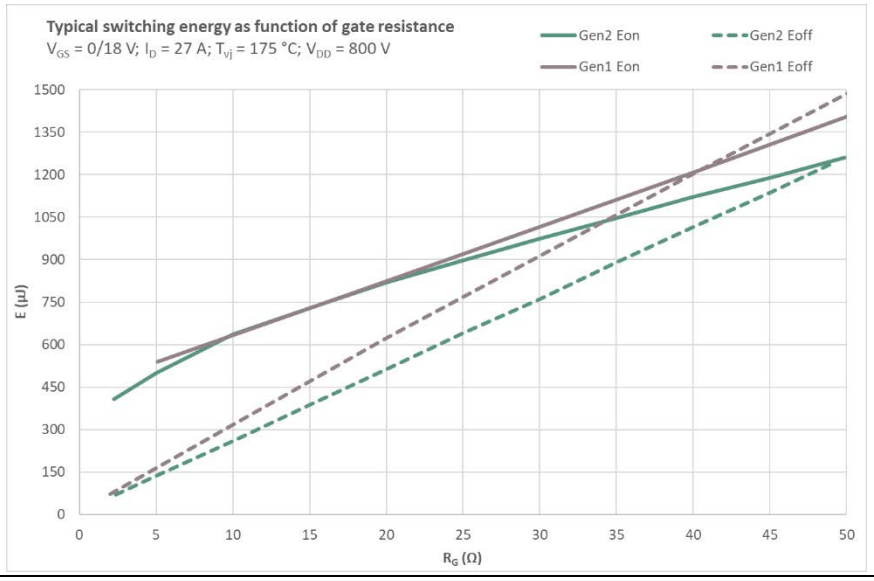


Figure 6 G2 (IMBG120R026M2H) および G1 (IMBG120R030M1H) デバイスにおけるスイッチング損失の外部ゲート抵抗依存性

十分に低い R_G を選択すると、CoolSiC™ G2 テクノロジーは前世代に比べて優位性を発揮します。例えば、外部ゲート抵抗が 5 Ω の場合、G2 のスイッチング損失は対応する G1 デバイスよりも約 7%低くなります。電気単位では、スイッチング周波数が 60 kHz の場合、Figure 6 と同じ条件で、G2 スイッチのスイッチング損失は G1 デバイスと比較して 2.5 W 減少します。

前述のように、適切なゲート抵抗の実際の選択には、スイッチング速度, 損失, 堅牢性の間でのトレードオフが伴います。最適な SiC MOSFET 性能を実現するために、エンジニアはアプリケーション固有の要件を慎重に分析し、それに応じてゲート抵抗を調整する必要があります。ただし、ゲート回路を変更せ

4 CoolSiC™ MOSFET 1200V G2 のスイッチング動作

ずに、G1 デバイスを対応する G2 MOSFET[1]にプラグアンドプレイで簡単に交換できるため、消費電力とシステム効率および寿命が向上します。

結論として、G2 MOSFET のスイッチング損失が低いという利点は、次世代のパワーエレクトロニクス システムにとって不可欠な要素です。

[1] 選択基準は、100°Cにおける R_{DSon} のマッチングに基づきます。

5 ボディダイオードの逆回復特性

SiC MOSFET ベースの高周波コンバーターは、デバイス固有のフリーホイール ボディ ダイオードを使用して、MOSFET がオフ状態のときにソースからドレイン端子への電流伝導を可能にします。このような状態は、通常、ハーフブリッジ設定のデッドタイム期間で発生します。SiC ボディ ダイオードは通常、順方向電圧が高く、それに伴うバイポーラ逆回復電荷により、導通損失とスイッチング損失が増加します。この章では、CoolSiC™ Gen2 のボディ ダイオードのスイッチング動作の実験結果を示し、損失を最小限に抑えるための推奨駆動戦略について説明します。

SiC MOSFET ボディ ダイオードの逆回復現象は、SiC MOSFET ではよく知られた側面であり、その影響は多くの出版物で十分に分析されています。MOSFET チャネルがオフになった直後に、ボディ ダイオードは逆方向に短時間伝導します [2], [5]。この逆回復効果により、望ましくない電力損失が増加します。これらの損失を軽減するには、デバイス メーカー側でボディ ダイオードの特性を慎重に最適化する必要があります。一方、電源設計エンジニアは、特にスイッチングが非常に高速なアプリケーションや厳しい効率要件があるアプリケーションでは、システムの効率的で信頼性の高い動作を確保するために、逆回復時間とダイオードの特性を考慮する必要があります。

Figure 7 に、G2 (IMBG120R026M2H)デバイスと G1 (IMBG120R030M1H) デバイスのボディ ダイオードの逆回復電流波形を示します。測定は、ダイオードの性能がより重要になる高温条件で行われました。G2 デバイスのダイオード ピークと電流オーバーシュートの持続時間は、前世代と同等であることがわかります。波形の全体的な形状は、G2 ダイオードの柔らかさが G1 と同等であり、高い di/dt 電流スパイクがないことを示しています。高速電流過渡現象は電圧オーバーシュートを引き起こし、デバイスや回路内の他のコンポーネントにストレスを与える可能性があります。

Note: 測定は、746MHz 帯域幅の電流センサーを使用して実行されました。

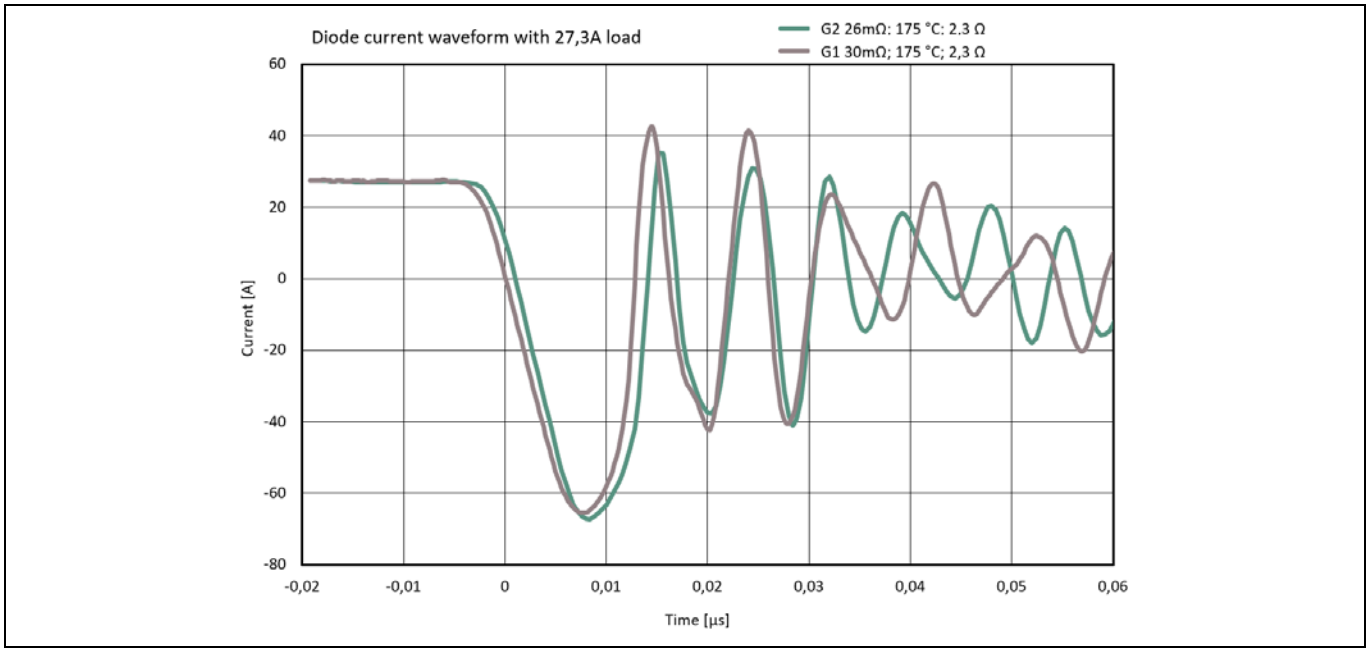


Figure 7 G2 (IMBG120R026M2H) および G1 (IMBG120R030M1H) デバイスの回復電流波形

5 ボディダイオードの逆回復特性

5.1 デッドタイムの短縮によるさらなるメリット

ボディダイオードの導通時間は、逆回復損失と相補型 SiC MOSFET のターンオン損失に大きく影響します。デッドタイムは、ダイオードによる損失の低減に加え、電力コンバーターの動的応答にも影響します。デッドタイムを最適化すると、AC-DC コンバーターまたは DC-AC コンバーターの正弦波形をより適切に再現できます。

今日の MOSFET は、数十ナノ秒 (ns) の範囲でスイッチングできます。Figure 8 に、CoolSiC™ MOSFET 1200 V G2 の推奨デッドタイム動作範囲を示します。スイッチング エネルギー曲線は、デバイスの回復損失とターンオン損失を大幅に削減できることを示しています。緑色でマークされた領域 (150〜250 ns) は、推奨されるデッドタイム制御範囲を表します。今日の駆動回路では、特に SiC スイッチを使用することで、この範囲を実現できます。推奨値を実装することにより、公称デバイス値と比較して、ターンオン損失を 20%、リカバリー損失を 40 %削減できます。デッドタイムが E_{rec} に与える影響の詳細については、[4]を参照してください。

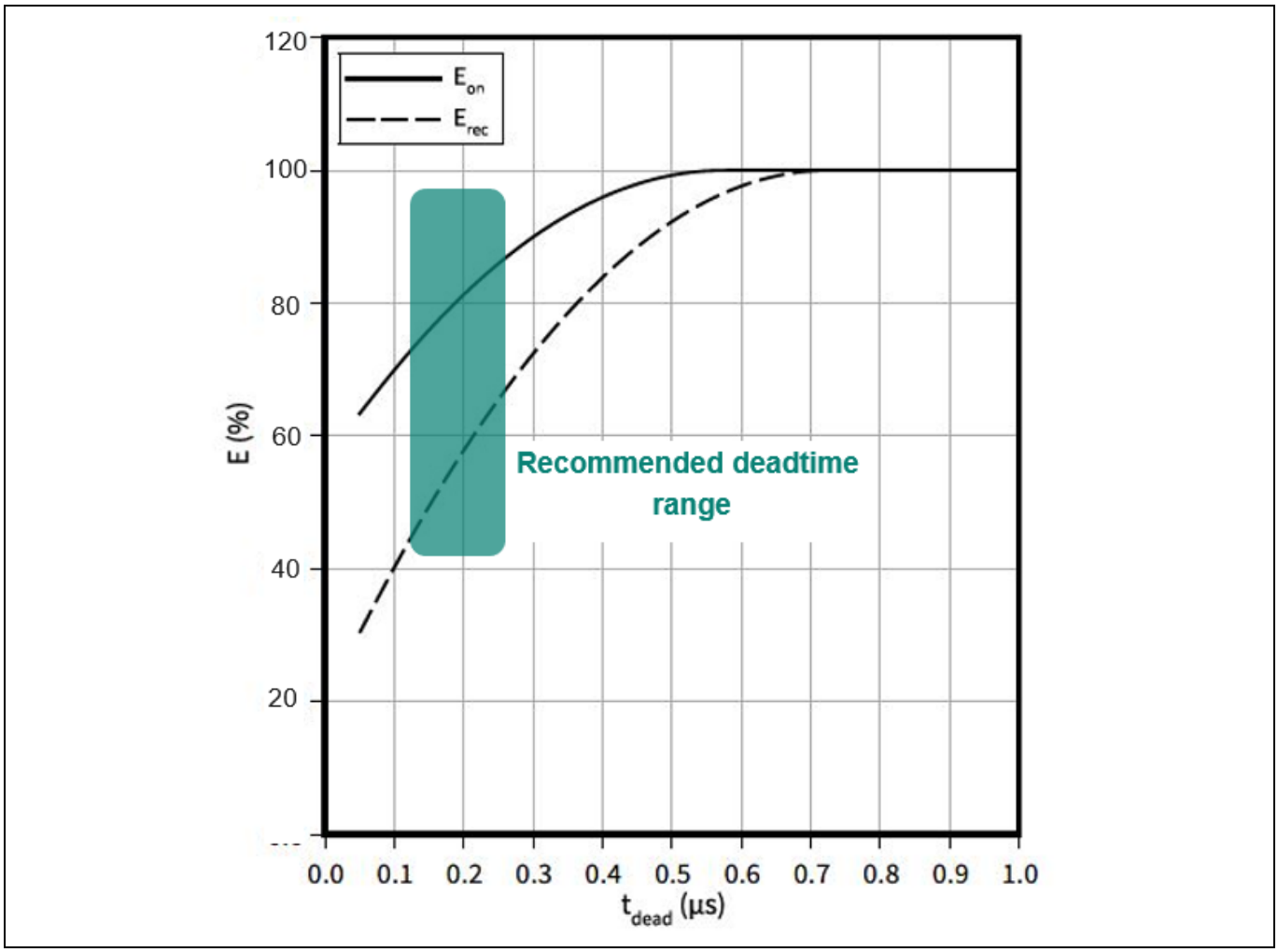


Figure 8 推奨デッドタイム範囲とそれぞれのエネルギー損失特性

SiC MOSFET を使用すると、デッドタイムをさらに短縮することが可能です。ただし、非常に短いデッドタイムを実装できるかについては、パワースイッチの速度、ゲートドライバの速度、および回路の浮遊インダクタンスや寄生容量などの寄生部品に関連する他のさまざまな要因に強く依存することに注意する必要があります。

5 ボディダイオードの逆回復特性

デッドタイムを選択する場合、システム設計者は以下の点を慎重に確認し、考慮する必要があります。

- 短いデッドタイム設定とシュートスルー発生リスクのトレードオフ
- 選択した電源スイッチとゲート ドライバを適切に組み合わせて、コンポーネントが特定のデッドタイム値をサポートできるようにする

Note: 適切な選択と利用可能なゲートドライバ IC の詳細については、インフィニオンのゲートドライバ IC の製品 Web ページを確認してください。

すでに述べたように、デッドタイムの制約は、デバイスと回路の寄生、ゲート ドライバの速度、スイッチング電流レベルなど、複数の要因に依存します。CoolSiC™ MOSFET G1 を最も適合性の高い G2 デバイスに置き換えると、スイッチング速度が速くなるため、必要なデッドタイムを 30 %削減できます。これにより、単純なプラグ アンド プレイ MOSFET の交換の場合でも、設計マージンが広がります。

6 ユニポーラゲート駆動と寄生ターンオンの堅牢性

SiC MOSFET の寄生ターンオン (PTO) は、C_{GD} とゲート駆動回路を流れる容量性電流によってデバイスが意図せず導通状態に駆動されたときに発生する可能性があります[6]。これは、回路内の寄生要素の存在に関連することがよくあります。PTO を引き起こす最も一般的な理由は、dV_{DS}/dt が非常に高いこと、MOSFET のしきい値電圧が低いこと、および不要な過渡現象を増幅する回路内の大きな寄生要素です。

SiC MOSFET は、電源回路で大電流を非常に高速に切り替えます。寄生のインダクタンスや高速なスイッチングサイクルにより、パワースイッチのゲート信号が歪みやすくなります。これにより、ゲート端子に一定の電圧「リンギング」が発生し、デバイスのゲートしきい値レベル ($V_{gs} > V_{th}$) を超え、デバイスがオン状態に駆動される可能性があります。この望ましくない動作に対処するために、通常はパッケージに専用の駆動ケルビンソース ピンが用意されています。さらに、SiC MOSFET テクノロジーは、より高いしきい値電圧で設計することができ、ドレイン-ソース間とゲート-ソース間の寄生容量比を最小限に抑えて、誘導電圧とデバイスの状態への影響を低減できます。

CoolSiC™ G2 製品のしきい値電圧は、25 ℃と 175 ℃でそれぞれ 5.1～3.2 V です。これらのしきい値電圧レベルは、制御信号のノイズに対して大きな安全限界を提供します。さらに、CoolSiC™ G2 テクノロジーの寄生容量 C_{DG} および C_{GS}GS の比率が改善されたため、ゲート信号の妨害が軽減されます。これにより、寄生ターンオンの堅牢性が向上します。Figure 9 に、デバイスのしきい値電圧 (薄緑色) と容量誘起ゲート電圧レベル (オーシャンブルー) の範囲を示します。G2 デバイスでは、C_{DG}/C_{GS} 比率が改善されたため、1 V を超えるマージンがあります。

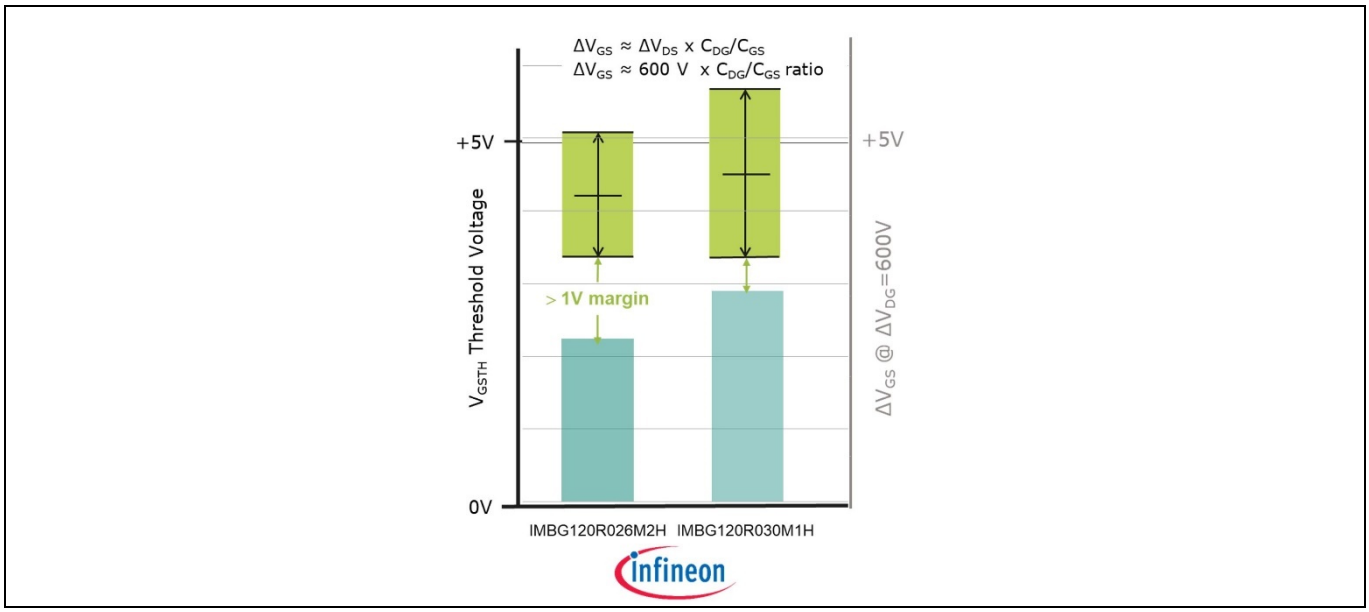


Figure 9 G2 (IMBG120R026M2H) および G1 (IMBG120R030M1H) デバイスのゲート ピンにおける閾値電圧と結果として生じる誘導電圧との間のマージン

6 ユニポーラゲート駆動と寄生ターンオンの堅牢性

6.1 MOSFET の推奨駆動条件

MOSFET パワーデバイスに関連する一般的な信頼性ルールは、オフ状態からオン状態への V_{GS} 電圧変動を最小限に抑えることです。SiC MOSFET の以前の技術では、ゲート酸化物の信頼性を最適化する方法として、ユニポーラ V_{GS} 動作の利用が推奨されていました。今日では、長年にわたる SiC MOSFET 技術の発展により、ゲート酸化物層と製造プロセスの信頼性が大幅に向上しました。その結果、今日の SiC MOSFET は、指定された制限内で負のゲート電圧に耐えられるように設計されています。これにより、特にスイッチング過渡現象が高い場合に、寄生ターンオン (PTO) に対するマージンを高めることができます。

負の電圧を使用すると、MOSFET をより安全で信頼性の高いオフ状態にしたり、ターンオフ特性を改善したりできます。エンジニアは、データシートに指定されている電圧レベルに従う必要があります。D2PAK の CoolSiC™ MOSFET G2 は、Table 2 に示すように、前世代と比較して許容される V_{GS} 範囲が大幅に拡大されています。負の過渡値と静的値は、それぞれ-10 V と-7 V まで低下する可能性があります。正の値は、過渡値と静的値でそれぞれ+23 V と+20 V まで上昇する可能性があります。過渡ゲート-ソース電圧値は、許容されるゲート オーバーシュートとアンダーシュートのレベルを表します。静的ゲート-ソース電圧は、MOSFET ゲートに適用できる DC レベルを指します。

Table 2 データシートに記載されているゲートの電気パラメータ

Gate-source voltage, max. transient voltage[2)]	V_{GS}	$t_p \le 0.5\ \mu s, D < 0.01$	-10...23	V
Gate-source voltage, max. static voltage	V_{GS}		-5...20	V

適切なターンオン V_{GS} を選択すると、デバイスのパフォーマンスに大きな影響を与えます。$R_{ds(on)}$ 特性は印加ゲート電圧に依存し、V_{GS} が 15 V から 18 V に増加すると大幅に減少します。CoolSiC™ MOSFET G2 の拡張された静的ゲート電圧範囲は、+18 V 駆動に最適です。CoolSiC™ G2 デバイスのゲートをより低い電圧で駆動することは、特定の場合にのみ検討する必要があります (例えば、短絡耐量を必要とするアプリケーションでは、通常 15 V が推奨されます)。

CoolSiC™ MOSFET のゲート酸化膜の信頼性は、長年のアプリケーションで実証されています。システムレベルの観点からは、ユニポーラ ゲート駆動方式とバイポーラ ゲート駆動方式のコスト差はごくわずかです。

Note: パワースイッチの長期にわたる信頼性の高い動作を保証するために、データシート[4] で指定されているゲート電圧範囲外でデバイスを動作させないでください。

7 異なる動作条件下での損失の比較

7.1 ハードスイッチングトポロジー: AC-DC アクティブフロントエンド

Figure 10 に、ハードスイッチングトポロジーにおける 1 つのスイッチの損失の内訳を示します。各損失は次のとおりです。

- 導通損失 (紫色)
- ターンオン時のスイッチング損失 (緑色)
- ターンオフ時のスイッチング損失 (黄色)
- 回復損失 (薄緑色)

ご覧のとおり、ダイオード回復損失はデバイス全体の損失のごくわずかな割合を占めています。同じ動作条件下での G2 (IMBG120R026M2H) と G1 (IMBG120R030M1H) デバイスを比較すると、G2 デバイスの方が導通損失が 0.7 W (3.5 %) 少なく、総スイッチング損失が 5.75 W (22.87 %) 少ないことがわかります。損失の低減と $R_{th,j\text{-}c}$ の改善により、全体的な動作時のジャンクション温度も 12 °C低くなっています。

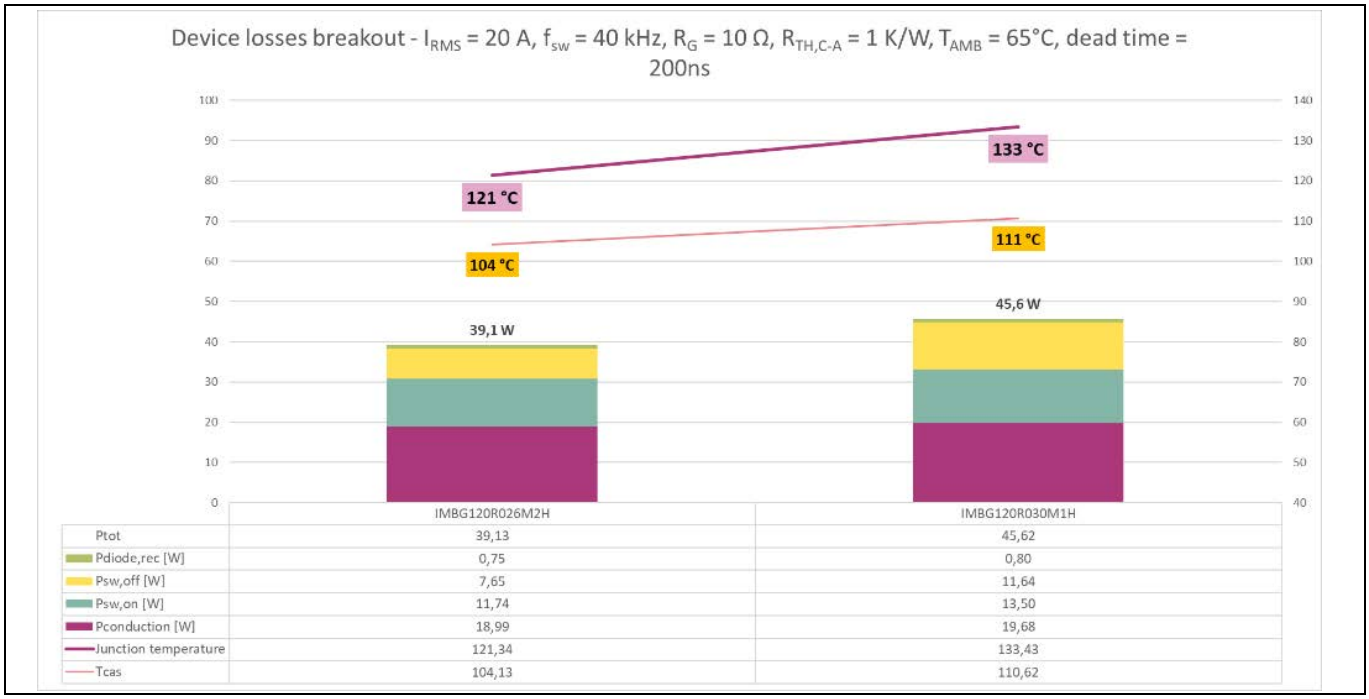
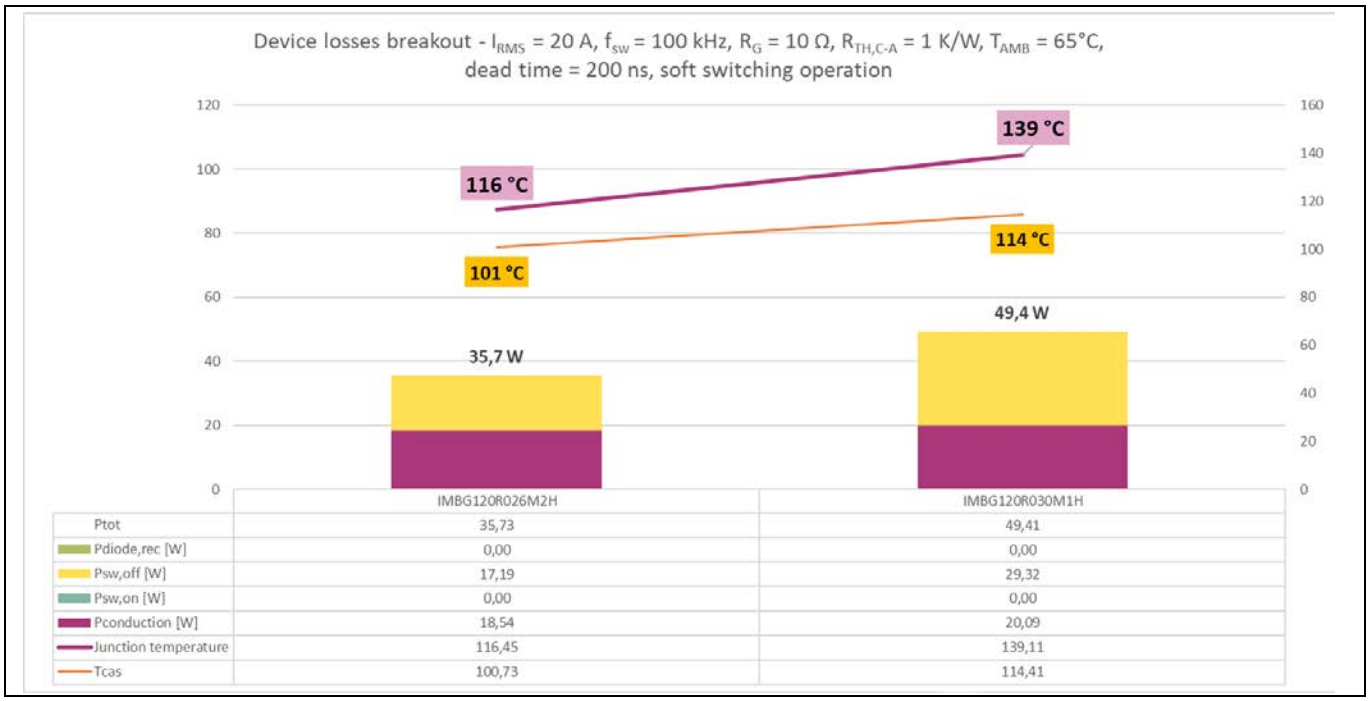


Figure 10 G2 (IMBG120R026M2H) デバイスと G1 (IMBG120R030M1H) デバイスの AC-DC トポロジーにおける 1 つのスイッチの損失内訳の比較

7.2 ソフトスイッチングトポロジー: LLC

ソフトスイッチングトポロジーでは、主な損失の寄与は導通フェーズ (紫色) とターンオフスイッチングフェーズ (黄色) によってもたらされます。Figure 11 に、単一スイッチの損失の内訳を示します。同じ動作条件下での G2 (IMBG120R026M2H) と G1 (IMBG120R030M1H) デバイスの比較では、G2 デバイスの導通損失は 2.4 W (11.3 %) 少なく、総スイッチング損失は 12.1 W (41.37 %) 少ないことがわかります。また、全体的な動作時のジャンクション温度も 2 °C低くなっています。



	IMBG120R026M2H	IMBG120R030M1H
Ptot	35,73	49,41
Pdiode,rec [W]	0,00	0,00
Psw,off [W]	17,19	29,32
Psw,on [W]	0,00	0,00
Pconduction [W]	18,54	20,09
Junction temperature	116,45	139,11
Tcas	100,73	114,41

Figure 11 G2 (IMBG120R026M2H) デバイスと G1 (IMBG120R030M1H) デバイスの DC-DC トポロジーにおける 1 つのスイッチの損失内訳の比較

8 SiC MOSFET 回路の PCB レイアウト

Figure 12 に、D²PAK の CoolSiC™ MOSFET の設計推奨事項として、サーボ ドライブの 3 相電源ボード レイアウトを示します。ボードは、絶縁金属基板上の TO-263-7 パッケージの MOSFET で構成されています。ゲート ソース トラックと電源トラックは分離されており、駆動信号へのノイズ干渉を回避します。ループ インダクタンスを減らすために、電源トラックは可能な限り短く設計されています。ゲート抵抗は、パワーMOSFET のゲート ピンに可能な限り近い場所に配置し、ゲート ドライバ IC は、信号コネクタを介して IMS ボードと相互接続される 2 番目の標準 FR-4 PCB 上にあります。

最も重要な構成ブロックは、次の指定子で強調されています。

1) HS MOSFET
2) LS MOSFET
3) 高電圧バイパス コンデンサ
4) ゲート抵抗ネットワーク
5) ゲート信号接続
6) V 相回路
7) U 相回路

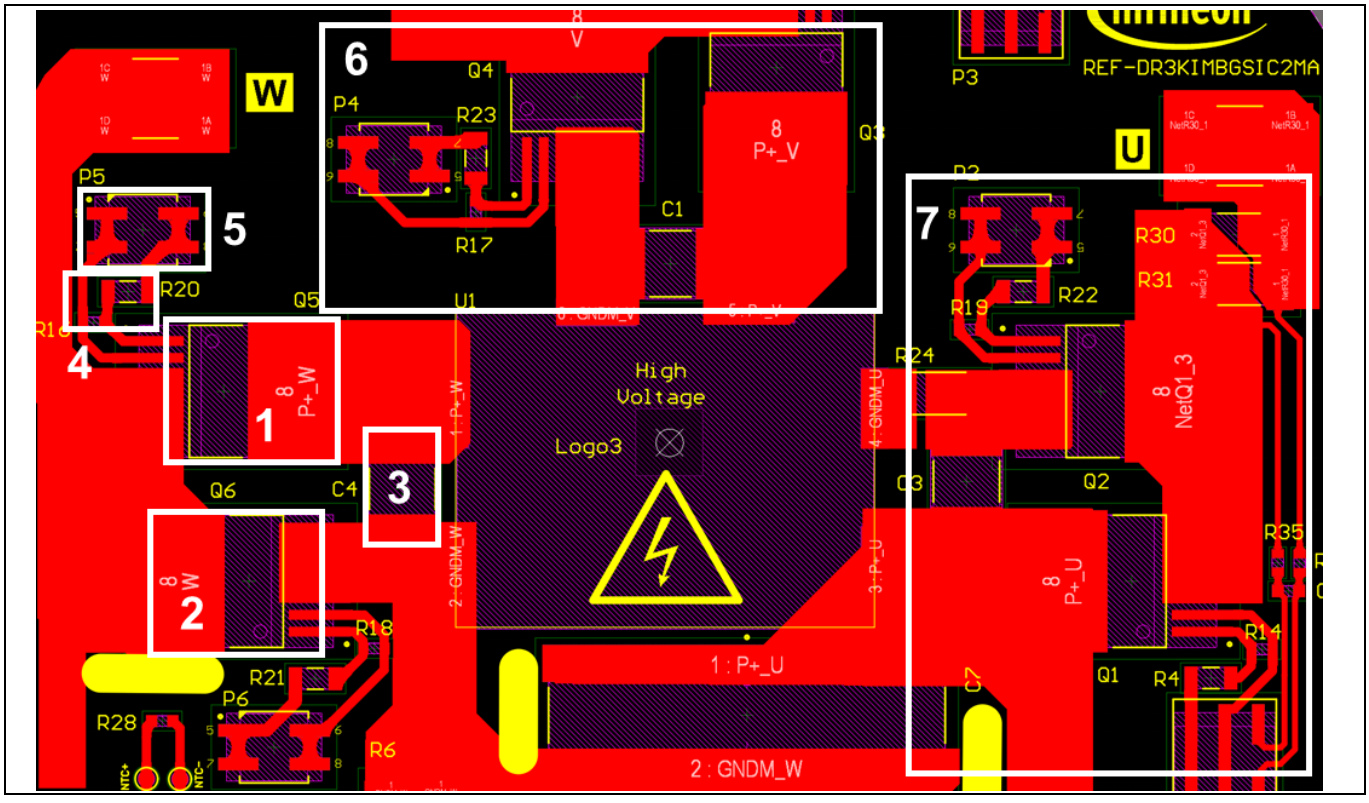


Figure 12 MOSFET (SMD)を IMS 基盤に実装したサーボドライブの電源回路 PCB レイアウト例

参考資料

[1] Infineon: Application Note Z8F80405158

1200-V G1p CoolSiC™ MOSFETs in TO263-7 package for automotive applications

https://www.infineon.com/content/dam/infineon/row/public/documents/10/42/infineon-appnote-1200-v-gen1p-coolsic-mosfets-in-to263-7-package-for-automotive-applications-applicationnotes-en.pdf

[2] Infineon: Application Note AN2017-46

CoolSiC™ 1200 V SiC MOSFET アプリケーションノート

英語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-coolsic-mosfet-1200v-sic-trench-power-device-applicationnotes-en_926ea79d-bce9-461a-9c2e-43da139122f0

日本語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-coolsic-mosfet-1200v-sic-trench-power-device-applicationnotes-ja_e7953180-5471-4e80-9172-18a7f5994c67

[3] Infineon: Application Note AN2018-09

CoolSiC™ MOSFET ゲートドライブ電圧範囲ガイドライン

英語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-guidelines-for-coolsic-mosfet-gate-drive-voltage-window_48aba517-47ff-47af-b995-aff199891430

日本語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-guidelines-for-coolsic-mosfet-gate-drive-voltage-window_885e470a-795e-423f-b998-24098b99c9f1

[4] Paul Sochor, Andreas Huerner, Michael Hell, Rudolf Elpelt: Understanding the Turn-off Behavior of SiC MOSFET Body Diodes in Fast Switching Applications; PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; ISBN:978-3-8007-5515-8

https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9472262

[5] Infineon: Application Note AN_2112_PL18_2112_024619

パワーMOSFET を使った設計

英語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-designing-with-power-mosfets-applicationnotes-en_c8cec8e5-1754-4fca-ac5b-76b1414f6b3a

日本語版: https://www.infineon.com/document-promo/infineon-designing-with-power-mosfets-applicationnotes-ja_31144ac7-42a8-4183-b11c-6c2711bbec63

[6] The parasitic turn-on behavior of discrete CoolSiC™ MOSFETs

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Bodos_Parasitic_turn-on-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626df6ee62016dfdd129330f0b

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
Rev 1.0	2024-06-13	これは英語版 AN-2024-02 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET in a TO263-7 (D²PAK) package Rev. 1.0 を翻訳した日本語版 Rev. 1.0 です。
Rev 1.1	2025-09-17	これは英語版 AN-2024-02 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET in a TO263-7 (D²PAK) package Rev. 1.1 を翻訳した日本語版 Rev. 1.1 です。

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2025-09-17
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2025 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN-2024-02_JA

重要事項

本手引書に記載された本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用の前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。
インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。