

mSiC™ MOSFET テクノロジー: 優れた性能と信頼性

[Kevin Dykyj](#) (Microchip 社 デジタルマーケティング シニアスペシャリスト)

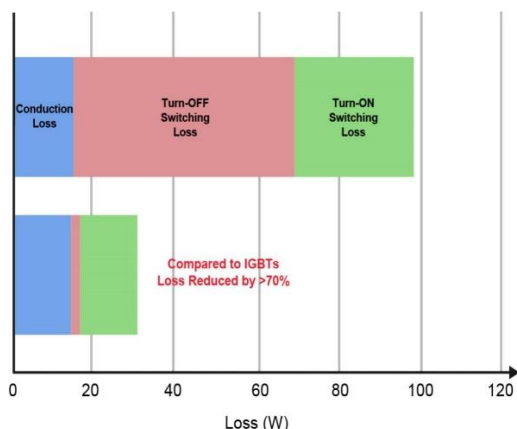
SiC(シリコン カーバイド)MOSFET はパワー エレクトロニクスにおける大きな進歩であり、より高効率、省面積、高信頼なシステムを設計するのに役立つ技術です。SiC MOSFET は従来のシリコンデバイスに代わり、スイッチング損失と導通損失を低減しながら、より高いスイッチング周波数での動作を可能にします。

最良のソリューションの選択: SiC(シリコン カーバイド)MOSFET が IGBT より優れている点

SiC(シリコン カーバイド)MOSFET(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)はパワー エレクトロニクスにおける大きな進歩であり、より高効率、省面積、高信頼なシステムを設計するのに役立つテクノロジーです。SiC MOSFET は従来のシリコンデバイスに代わり、スイッチング損失と導通損失を低減しながら、より高いスイッチング周波数での動作を可能にします。これらの利点によって部品のサイズと数が小さくて済むため、システム全体のサイズ、重量、コストを削減するのに役立ちます。SiC MOSFET は効率的で柔軟性があり信頼性の高い高電圧アプリケーションを実現します。

SiC MOSFET はより高温での動作、より高速なスイッチング、より高い降伏電圧に対応しているため、より高効率でコンパクトなパワー エレクトロニクス システムを実現できます。SiC MOSFET は ON 抵抗が非常に低いため、動作中の電力損失が少なくなります。堅牢性と熱暴走耐性が向上した SiC は高電力アプリケーションに適しています。Microchip 社の [mSiC™ MOSFET](#) には 700 V、1200 V、1700 V、3300 V (3.3 kV) の SiC MOSFET が含まれています。

IGBT vs. SiC MOSFET Switching Losses (At 30 kHz)

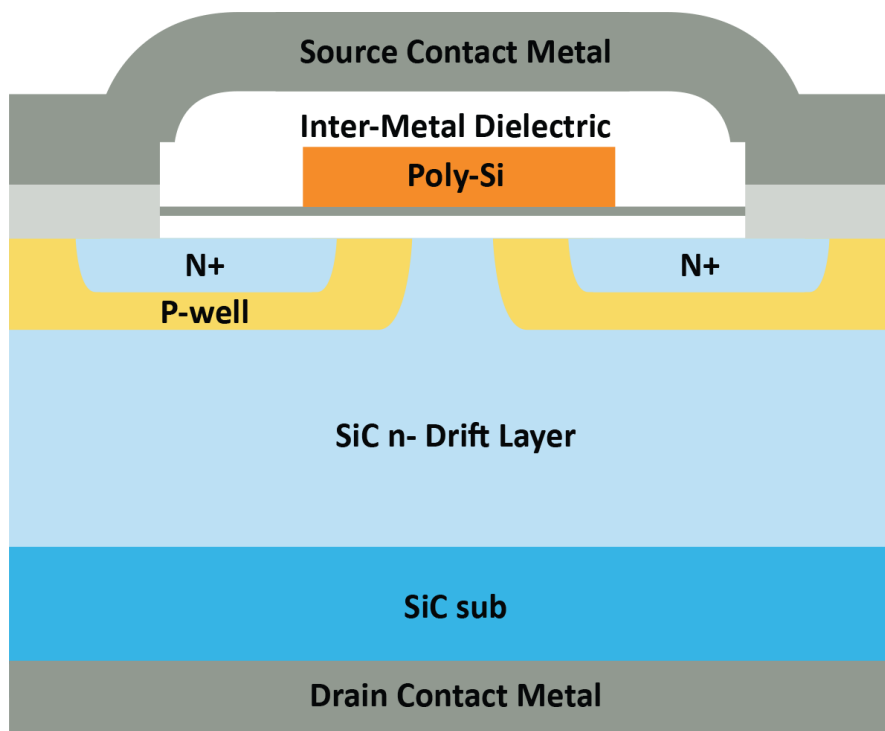


シリコンに対する SiC の利点を以下にまとめます。

- 高い動作温度
- 高い降伏電圧
- 低い ON 抵抗
- 高速なスイッチング

特性	効果	利点
絶縁耐力(MV/cm)	低い ON 抵抗	高効率
電子飽和速度(cm/s)	高速なスイッチング	小型化
バンドギャップ エネルギー(EV)	高い許容接合部温度	冷却性の向上
熱伝導率(W/m.K)	高い電力密度	電流出力が大きい
正温度係数	自己調整	並列化が容易

mSiC MOSFET の構造



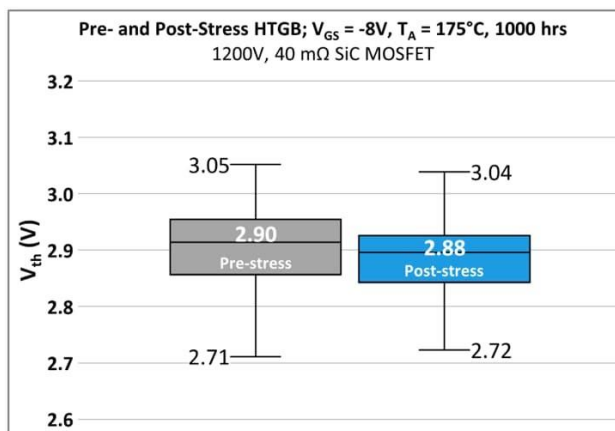
SiC MOSFET では、ソース、ドレイン、ゲートの電極は半導体として機能する SiC ドリフト層によって分離されています。ゲート電極に電圧が印加されると、電界が生じ、ソース電極とドレイン電極間の電流の流れを制御します。

ゲート酸化膜の安定性

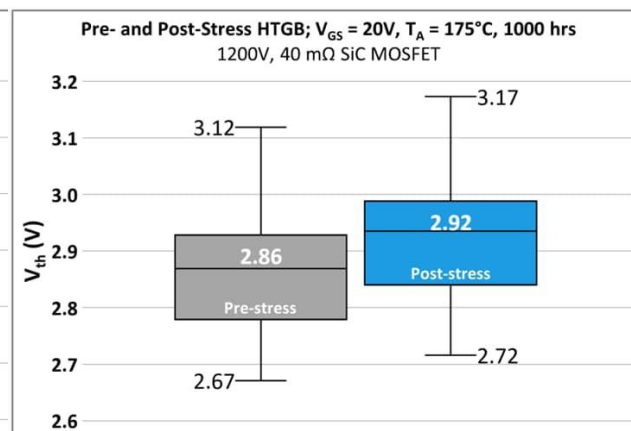
第三者機関によるテストの結果、負と正のゲートバイアス電圧下で 1000 時間の加速ストレスを加えた後も mSiC MOSFET のしきい値電圧にほとんど変化がない事が示されました。これらは量産グレードの 1200 V、40 mΩ デバイスについて統計的に導き出されたデータです。しきい値電圧が変化した場合、デバイスの性能(ON 抵抗等)に顕著な変化が生じ、時間の経過と共にシステムの不安定な挙動や障害の原因となる可能性があります。しきい値電圧が非常に安定していて変化しない場合、電力変換システムは設計された耐用年数以上の期間にわたり通常通りの信頼性の高い動作を続けるという確信が得られます。

酸化膜の強度を検証するには、単発の UIS(非クランプ誘導性スイッチング)に加え、RUIS(反復 UIS)テストも必要になります。Microchip 社では 10 万ヒットと TDDDB(経時絶縁破壊)ポストテストを採用しています。

正と負のゲートバイアス電圧下での 1000 時間の加速 HTGB(高温ゲートバイアス) ストレスの前後において電圧しきい値(V_{th})の計測値を観察しても、しきい値電圧にほとんど変化は見られません。しきい値電圧が変化した場合、デバイス性能(ON 抵抗等)に顕著な変化が生じ、システムの挙動が不安定になり、最終的にシステムの障害の原因となる可能性があります。



- ストレス: $V_{GS} = -8V$

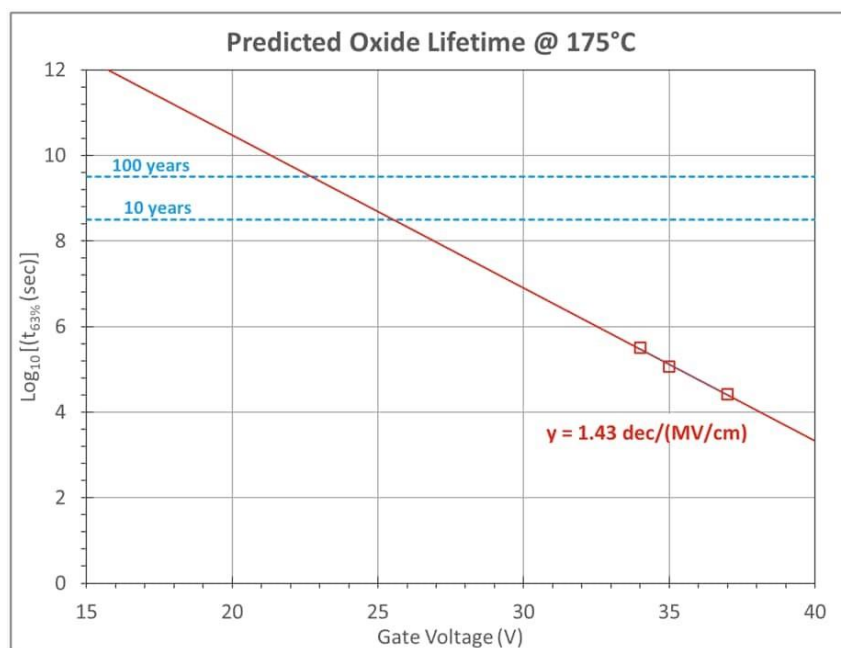


- ストレス: $V_{GS} = 20V$

- 1000 時間($T_A = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- 変化: -0.02 V
- 1000 時間($T_A = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- 変化: $+0.06\text{ V}$

ゲート酸化膜の寿命

ゲート酸化膜の寿命は、デバイスが耐えられる最大動作電圧を決定します。ゲート酸化膜はゲート電極を半導体サブストレートと隔てる絶縁層です。ゲート電極に高電圧が印加されると、ゲート酸化膜が破壊される事があります。これによってデバイスを流れる電流が急激に増加し、デバイスが損傷する、または破壊される可能性があります。



量産グレードの 1200 V、40 mΩ SiC MOSFET のデータ

酸化膜の強度を検証するには、単発の UIS テストに加え、RUIS テストも必要になります。Microchip 社では 10 万ヒットと TDDb ポストテストを採用しています。

量産グレードの mSiC MOSFET を使い、酸化膜破壊の加速、高温、高電界を印加し、ワイブル分布で各種故障モードを観察しました。各故障モードの活性化エネルギーを計算し、酸化膜の寿命を予測でき

ます。テストの結果によると、175 °Cでも推奨 V_{GS} の 20 V における酸化膜の寿命は 100 年を超えています。

耐用年数全体を通して信頼性の高い動作を確保するには、ゲート酸化膜の完全性は非常に重要です。さらに、酸化膜の強度は電氣的な過渡現象に耐えるのにも役立ちます。

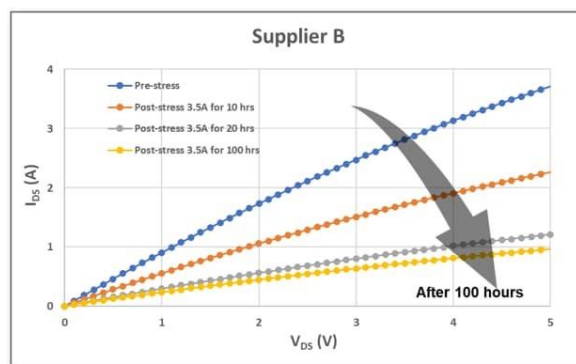
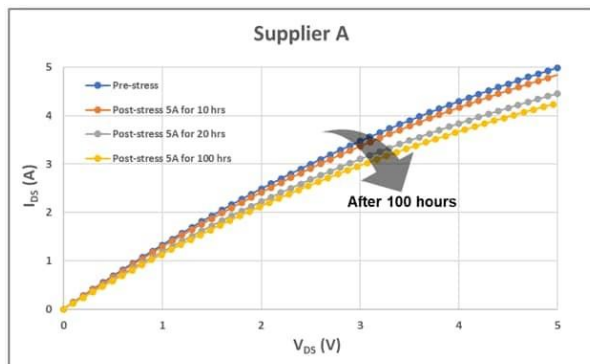
ボディダイオードの安定性

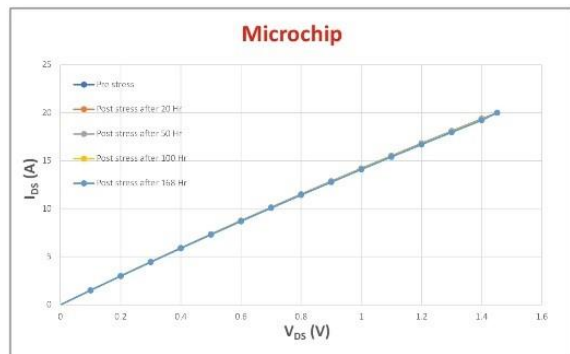
SiC MOSFET に内蔵されているボディダイオードは逆方向に電流を流すために使われます。SiC MOSFET が OFF になると、ボディダイオードは電流を導通させて電圧が過度に上昇するのを防ぎます。ボディダイオードが不安定な場合、電圧スパイクが発生し、デバイスの損傷または故障につながる可能性があります。ボディダイオードの安定性に影響を与える要因は温度、電流、電圧等の複数あります。

IGBT とは異なり、SiC MOSFET は内蔵ボディダイオードを使って逆電流を導通させる事ができます。ただし、デバイスによっては、このダイオードが時間の経過と共に劣化し、ボディダイオード両端の電圧降下が増加し、 $R_{DS(on)}$ が高まり、発熱量が大きくなり、システムの故障につながる事があります。

[オハイオ州立大学](#)の研究者は市販の複数の SiC MOSFET を調査し、一定の順方向電流ストレスを数時間加えた後のボディダイオードの I-V 曲線と MOSFET $R_{DS(on)}$ を計測しました。あるサプライヤのボディダイオードはストレス開始直後に著しい劣化を示し、別のサプライヤでは部品が使用不能になる程の劣化を示しましたが、Microchip 社の部品は変化が見られませんでした。

ボディダイオードが安定していると、逆並列ダイオードまたは還流ダイオードが不要になるため、部品点数が削減されてコスト削減にもなります。Microchip 社のテストにより、損失プロファイルが設計ウィンドウ内に収まり、車両の耐用年数を通して通常通りに動作するという確信が得られます。





アバランシェ/反復 UIS

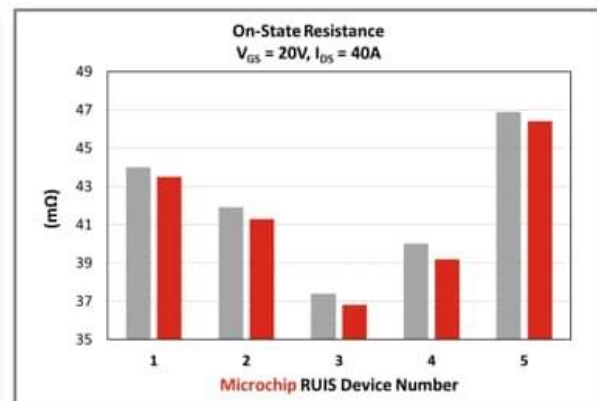
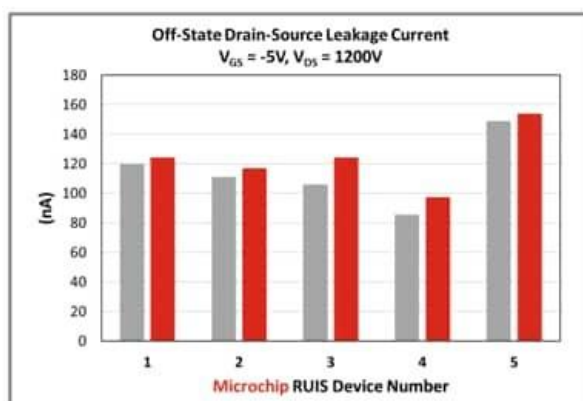
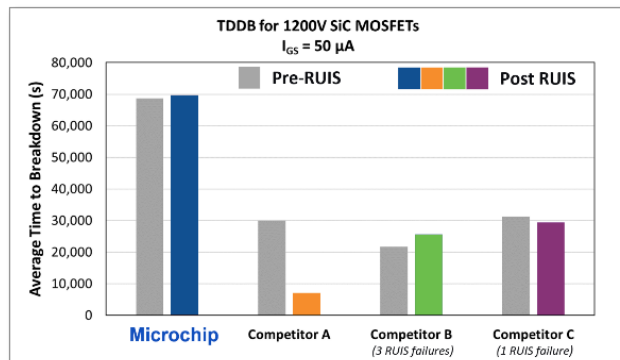
アバランシェ耐性はデバイスが損傷する事なく高電圧に耐える事を可能にするため、SiC MOSFET にとって重要な特性です。SiC MOSFET に高電圧が印加されると、その電界によって電子が原子から離れて、電子のアバランシェ(雪崩)が生じます。この電子のアバランシェによってデバイスを通る電流が急激に増加し、デバイスが損傷する、または破壊される可能性があります。

アバランシェ耐量はデバイスが降伏状態になるまでに吸収できるエネルギーの量であるアバランシェエネルギーによって計測されます。SiC 固有の特性により、通常、SiC MOSFET のアバランシェエネルギーはシリコン MOSFET の場合よりもはるかに高くなります。

負荷電流が突然 MOSFET に流れ込むと、ドレイン-ソース間電圧が実際の降伏値まで上昇するだけでなく、MOS チャンネルは導通せず、ダイエッジ周辺でアバランシェ電流が混雑します。

4 つの MOSFET のうち 3 つは RUIS に良好な耐性を示した事が観察されました。しかし、Microchip 社とそれ以外の SiC MOSFET サプライヤ 3 社の TDDB を見ると、mSiC MOSFET は非常に優秀です。各ケースについて、UIS 前の TDDB と 10 万パルス後の TDDB を計測しました。

Microchip 社のデバイスのみを見ると、RDS(on)とドレイン-ソース間リーク電流できわめて高い安定性を示しており、当社の mSiC MOSFET が実際にアバランシェに耐え、最も過酷な電氣的過負荷条件も安全に切り抜けられる事が分かります。



短絡耐性

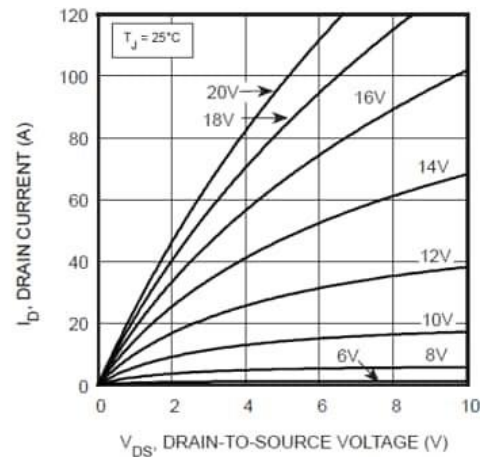
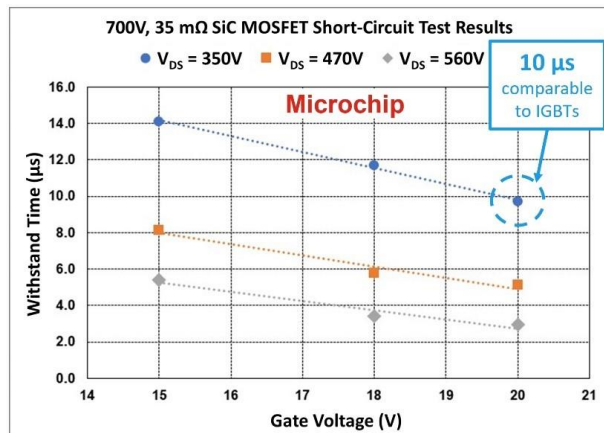
短絡耐性は、デバイスが損傷する事なく大電流に耐える事を可能にします。短絡中、デバイスを通れる電流が過度に増加し、デバイスの過熱と故障の原因となる事があります。SiC MOSFET はシリコン MOSFET よりもはるかに短絡耐性が高いため、損傷する事なく大電流に耐える事ができます。これは短絡のリスクがあるアプリケーションと EV(電気自動車)等の大きな電流が要求されるアプリケーションでは重要です。

SiC MOSFET の短絡耐性は、デバイスが損傷する事なく耐えられる最大電流である短絡電流によって計測されます。通常、SiC MOSFET の短絡電流はシリコン MOSFET よりもはるかに大きくなります。これは SiC MOSFET が大電流による損傷に強い材料で作られているためです。

短絡耐量時間とは、ドレイン-ソース端子間で DC リンクが突然短絡した場合に MOSFET が耐えられる時間を示すものです。短絡時には MOS チャンネルが導通するため、過剰ストレスのサージはダイ全体に均一に分散されます。

量産グレードの 700 V、35 mΩ mSiC MOSFET を各種 DC 電圧とゲート電圧でテストしたところ、350 V の DC リンクにおいて、 $V_{GS} = 20 V$ で 10 μs の短絡時間を安全に耐える事ができました。560 V の

DC リンクの場合でも、700 V MOSFET は 3 μ s の短絡時間に耐える事ができ、これは制御スキームが対応するのに十分な時間です。



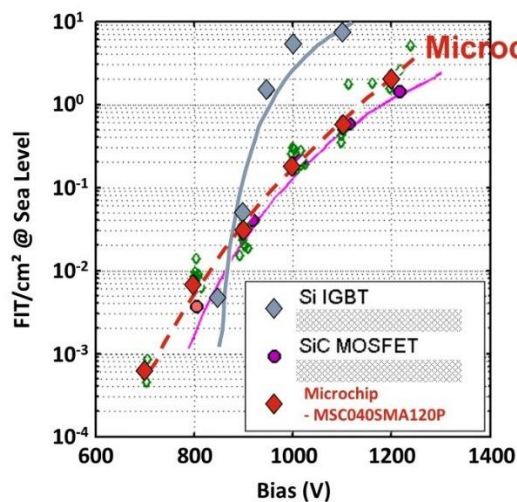
短絡は MOSFET の DC リンクのドレイン-ソース間の短絡のアプリケーション条件をエミュレートします。

セルが導通し(MOSFET が ON)、ピーク電流はダイ全体で均一に分布するように設計されています。

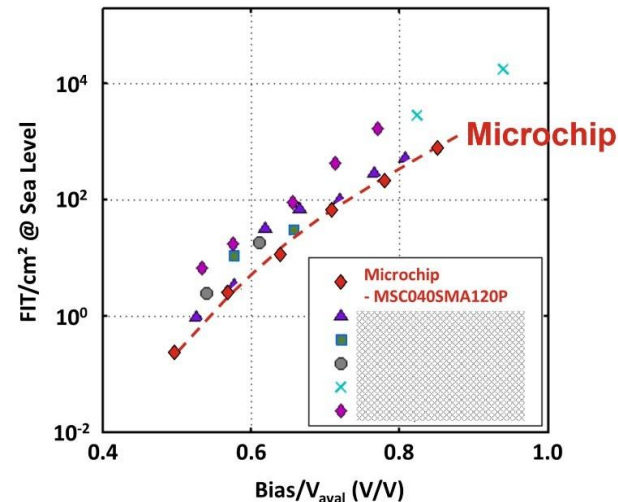
中性子耐性と FIT 率

放射線損傷に対する耐性についても SiC デバイスの方がシリコンデバイスより優れています。これは、SiC デバイスの方が電子の密度が高く、原子内の電子が放射線の影響を受けづらいためです。中性子は海拔ゼロ地点以上の標高においてシステムの性能を低下または悪化させる可能性があります。テストの結果、SiC MOSFET は定格電圧で同等のシリコン IGBT と比較して FIT (Failure In Time)率が 10 分の 1 である事が分かっています。

複数のベンダーによる SiC 製品のテストにおいても、mSiC MOSFET は中性子の照射について競合他社の SiC 製品を大いに上回る性能を示しました。このため、EV 充電器、OBC(車載型充電器)、4000~5000 m 等の高所での動作が規定されている電源供給装置等のアプリケーションにおいて SiC は合理的な選択であると言えます。



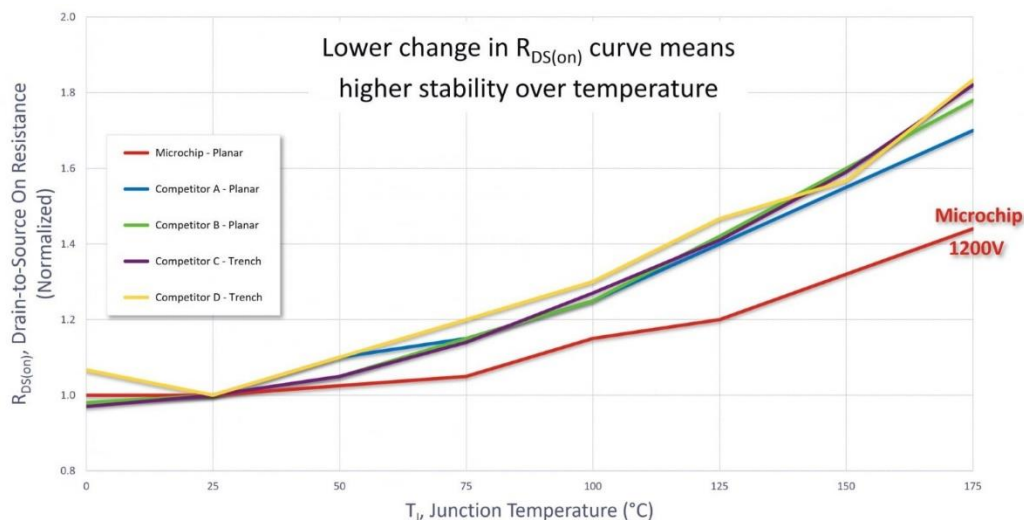
SiC MOSFET の FIT 率は定格電圧で同等のシリコン IGBT と比較すると 10 分の 1 です。



Microchip 社の SiC MOSFET は中性子の照射については競合他社の SiC 製品を大いに上回る性能を示します。

RDS(on)と接合部温度の関係

RDS(on)と接合部温度の関係は回路全体の性能に影響するため重要です。RDS(on)曲線はデバイスの性能の良さを示すため、堅牢性を示す良い指標になります。RDS(on)が高過ぎると、回路は期待通りの性能を発揮できません。



RDS(on)が低いと、デバイスは高温と高電圧に耐え、高速かつ高効率にスイッチングし、過酷な環境に耐える事ができます。また、RDS(on)が低いと回路の効率も向上します。なぜなら、RDS(on)が低いほど MOSFET で失われる電力が少なくなるためです。

アプリケーションに最も適した MOSFET を選択する上では、RDS(on)と接合部温度の関係を理解する事も重要です。MOSFET がさらされる接合部温度が既知であれば、その温度に耐える事ができ、かつ RDS(on)の低い MOSFET を選択できます。これは回路に期待通りの性能を発揮させるのに役立ちます。

温度変化に対する RDS(on)曲線の傾きが平坦であるという事は、SiC MOSFET デバイスが広い温度レンジにわたって伝導損失が安定しているという事であるため、設計者は温度管理に対してより厳しいマージンを維持できます。

SiC を使って設計を始める

SiC(シリコン カーバイド)を使って設計を始めるには、その利点とアプリケーションを理解する事が必要です。Microchip 社ではより高速かつ高効率なエネルギー ソリューションの鍵となる SiC(シリコン カーバイド)電源製品を幅広く取り揃えています。『[SiC MOSFET Design Recommendations](#)』と『[Driving mSiC MOSFETs](#)』のアプリケーション ノートをご覧ください。ご推奨します。

また、[詳細な資料](#)、[設計ツール](#)、[SiC のリファレンス デザイン](#)、技術サポート等で SiC の設計への組み込みを支援し、設計者の製品開発を支援します。