

内蔵ダイオードを用いたパワーサイクル試験 ～新デバイス SiC による試験検討～

信頼性第2チーム 小柴悠資

はじめに

パワーサイクル試験とは、JEITA ED4701/600に [半導体デバイスの環境および耐久性試験方法 (個別半導体特有の試験)] に規定された試験方法であり、半導体パワーデバイスに電氣的ストレスをオン、オフの状態でも周期的に加えた場合の温度変化に対する耐久性を評価する方法である。これまでは、パワーサイクル試験で温度を測定するために、熱電対がよく用いられていた。

しかし、当社では、当初から熱電対の応答性、周囲温度やパッケージの状態による熱抵抗の変動を考慮し、より正確にチップ内部の温度を測定する方法として、チップ内部にあるダイオード (以後、内蔵ダイオード) の温度特性を用いて T_j を測定してきた (以後、 T_j を測定し、既定の温度差 ΔT_j になるように電流や電圧を制御してパワーサイクル試験を実施することを T_j 制御とする)。SiC が近年 Si に代わる新しい材料として注目されており、すでに製品化も進んでいる。

今回は、SiC 特有の問題点、およびその対策について述べ、SiC の内蔵ダイオードを用いてパワーサイクル試験が実施可能か検証した。

内蔵ダイオードによる T_j 制御を行う場合は、内蔵ダイオードの温度特性を調べる必要がある。内蔵ダイオードの温度特性は測定とシミュレーションを行い、測定した各サンプルの内蔵ダイオードの V_F 値に対して、直線性、およびシミュレーションから算出した V_F 値との整合性を調べた。

今回は、IGBT、MOSFET、SiC MOSFET の代表サンプルとして、RGCL60TS60D (以後、IGBT) R6046FNZ1 (以後 MOSFET)、SCT2080KE (以後 SiC MOSFET) の3種類を用意した。各サンプルはいずれも市場に供給されているデバイスで、データシートや SPICE モデルも簡単に入手することが出来る。内蔵ダイオードの V_F 値を測定する条件は、 $I_F=10\text{mA}$ 、 $V_g=0$ 、 -5V で測定回路を図1、測定値とシミュレーション (SIMetrix) から算出した V_F 値を図2に示す。 $V_g=0\text{V}$ は従来の方法、 $V_g=-5\text{V}$ は各サンプルのゲート電圧の立下り時間の短縮を目的に行った。内蔵ダイオードの V_F 値を測定した結果、IGBT と MOSFET は、 $V_g=0\text{V}$ と -5V で同程度の V_F 値が得られたのに対して、SiC MOSFET は V_g によって異なる V_F 値が得られた。また、シミュレーションを行った結果、SiC MOSFET は $V_g=-5\text{V}$ の時、内蔵ダイオードの V_F 値が実測値とシミュレーション値の間で大きく乖離した。その他のサンプルの全条件および、SiC MOSFET で $V_g=0\text{V}$ の時、測定した内蔵ダイオードの V_F 値は、シミュレーションから算出した V_F 値とほとんど変わらず、整合性が取れた。

上記の結果から、SPICE モデルは全ての特性を網羅しているとは限らない。また SiC

MOSFET の場合、内蔵ダイオードは、 V_g によって V_F 値が変化するため、温度特性取得時とパワーサイクル試験で T_j を測定するときの V_g を同じ値にする必要がある。測定した各サンプルの内蔵ダイオードの温度特性に直線近似を行い、導出された一次方程式から温度係数を算出した。

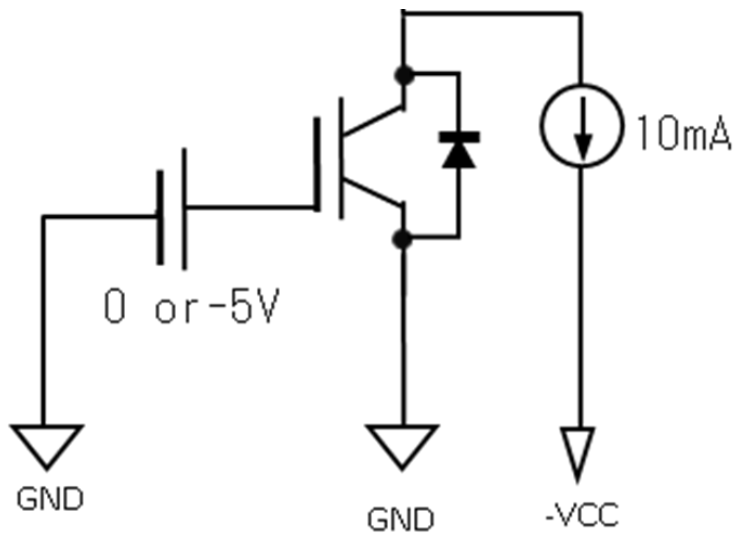


図 1 温度特性取得に用いた測定回路

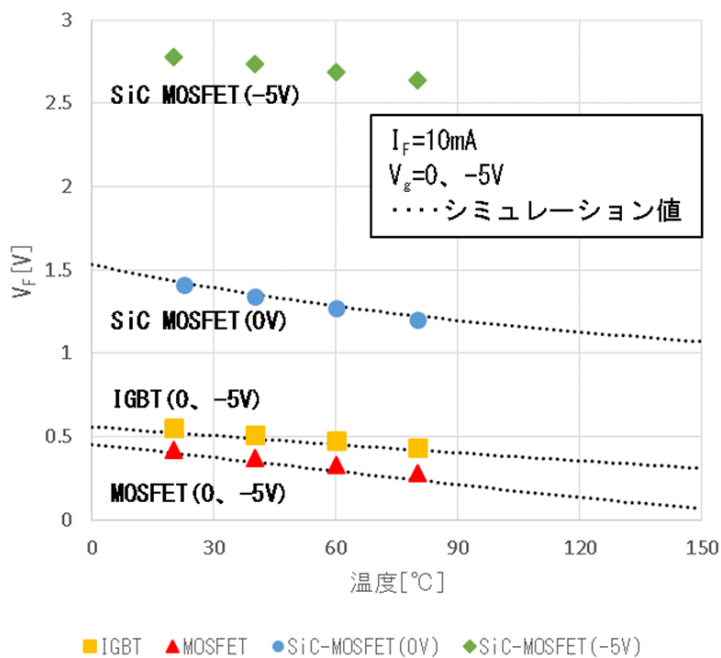


図 2 各デバイスの内蔵ダイオードの温度特性

内蔵ダイオードの V_F の過渡特性と温度測定タイミング

内蔵ダイオードを用いて T_j 制御する場合は、MOSFET や IGBT に通電している時に内蔵ダイオードに対して逆バイアスがかかるため、正確な T_j が測定出来ない。実際に内蔵ダイオードを用いて T_j 制御するときは、MOSFET や IGBT への ON 動作直前および、オフ動作開始直後の 2 点の温度を測定している。

パワーサイクル試験は、オフ動作開始直後から次のオン動作まで、時間の経過とともに T_j は低下する。測定タイミングが遅ければ、 T_{jpeak} を正確に測定することが出来ないため、内蔵ダイオードの V_F の過渡特性を調べ、温度測定タイミングが最短で正確に測定可能な時間を検討した（温度測定時条件は、図 1 と同様）。

今回使用するパワーサイクル試験機の構成を図 3 に示す。内蔵ダイオードの V_F の過渡特性は、各サンプルにスイッチングのみを行い ($I_C, I_D=0A$)、調べた。 I_C または $I_D=0A$ の時、サンプルは発熱しないため、チップ内部の温度は変化しない。そのため、内蔵ダイオードの V_F 値はスイッチング前後で同じ値となり、正確な T_j の測定が安定的に可能となるまでの時間を最短時間とした。

代表波形として IGBT の OFF 時波形を図 4 に示す。内蔵ダイオードの V_F 値がスイッチング後に安定していくのが分かる。IGBT の場合の最短時間は約 $50 \mu sec$ だった。

その他の結果は図 5 に示す。点線はスイッチング前の各サンプルの V_F 値を示している。IGBT、MOSFET の内蔵ダイオードの V_F 値は V_g に関わらず $50 \mu sec$ 前後で安定するのに対して、SiC MOSFET は、 $V_g=0V$ の時、内蔵ダイオードの V_F 値が $50 \mu sec$ 経過後も低下し続ける。完全にスイッチング前の V_F 値になるまでには $5sec$ 以上かかり、パワーサイクル試験実施時、 T_{jpeak} を正確に測定できないため、 T_j 制御には不適格である。 $V_g=-5V$ にした場合、SiC MOSFET の V_F 値はその他のデバイスと同様に $50 \mu sec$ 前後でスイッチング前の V_F 値と同様となり、安定する。

以上から、SiC MOSFET の内蔵ダイオードを用いてパワーサイクル試験の T_{jpeak} を正確に測定する場合は、従来のように測定時の V_g を $0V$ にするのではなく必要に応じてマイナスに振る必要がある。

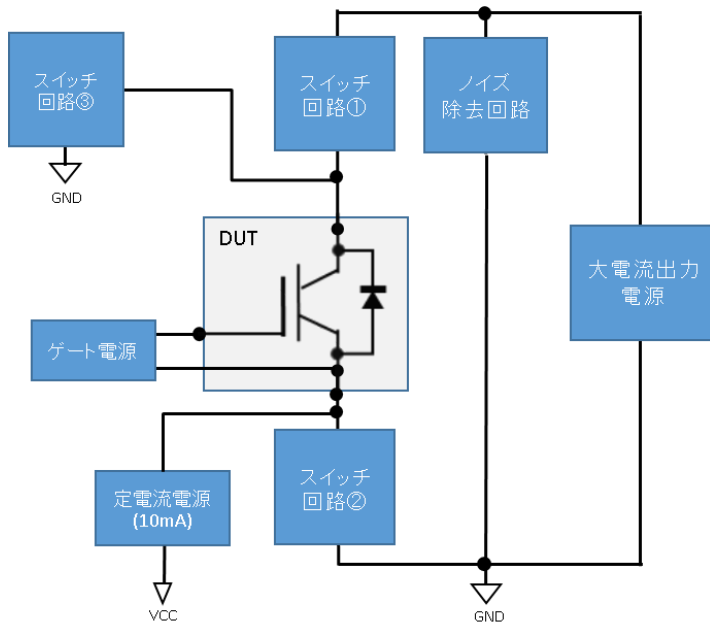


図3 パワーサイクル試験装置構成図

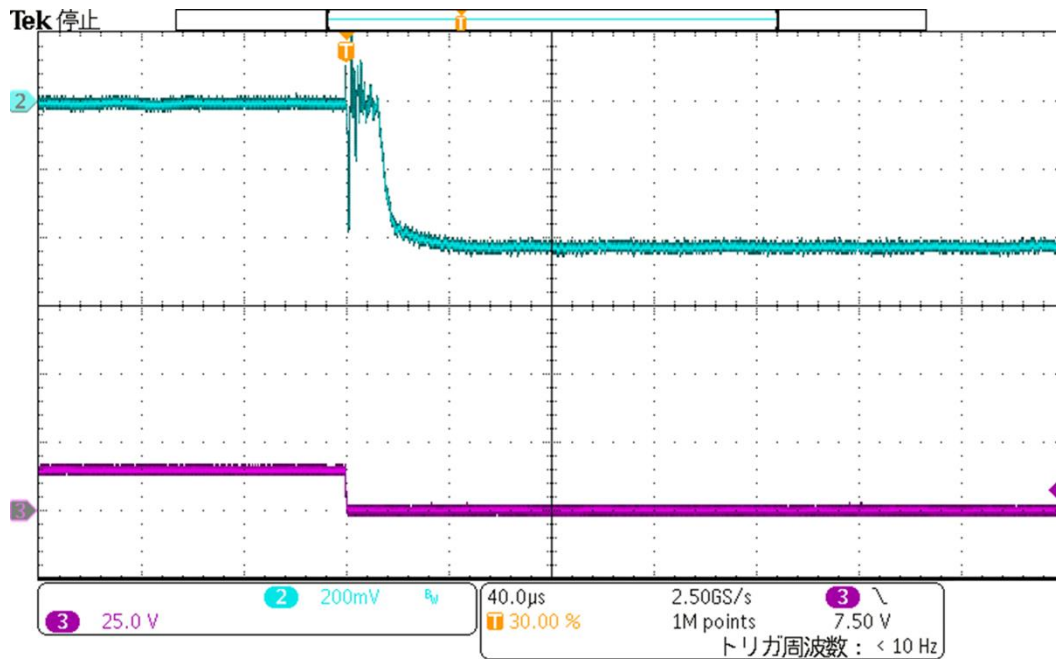


図4 内蔵ダイオードの V_F の過渡特性 [IGBT]

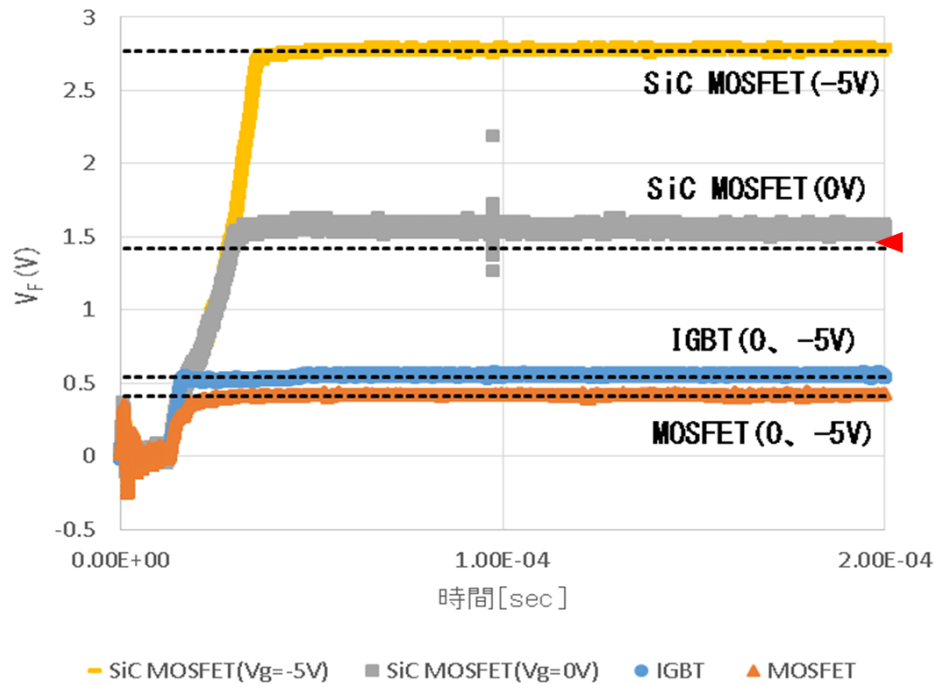


図 5 各デバイスの内蔵ダイオードの V_F の過渡特性

まとめ

最後に、代表波形として SiC MOSFET (測定時 $V_g = -5V$) の実際の試験波形を図 6 に示す。試験条件は、 T_j : $30 \leftrightarrow 130^\circ C$ ($\Delta T_j: 100^\circ C$)、ON5sec、OFF15sec。SiC MOSFET の内蔵ダイオードを用いて T_j 制御方法を行う際の注意点として、

- ① V_g によって SiC MOSFET の内蔵ダイオードの V_F 温度特性が異なる
- ② V_g によって SiC MOSFET 内蔵ダイオードの V_F の過渡特性が変化するが挙げられる。

また上記対策としては、事前に SiCMOSFET の内蔵ダイオードの V_F の過渡特性を調べ、パワーサイクル試験で T_{jpeak} を正確に測定可能な V_g を見つけ、同じ V_g で温度特性を取得すれば、SiC MOSFET の内蔵ダイオードを用いてパワーサイクル試験は実施可能であることが検証できた。ただし、今後は異なる SiC デバイスに対しても、内蔵ダイオードによる T_j 制御を用いたパワーサイクル試験が実施可能か検討する必要がある。

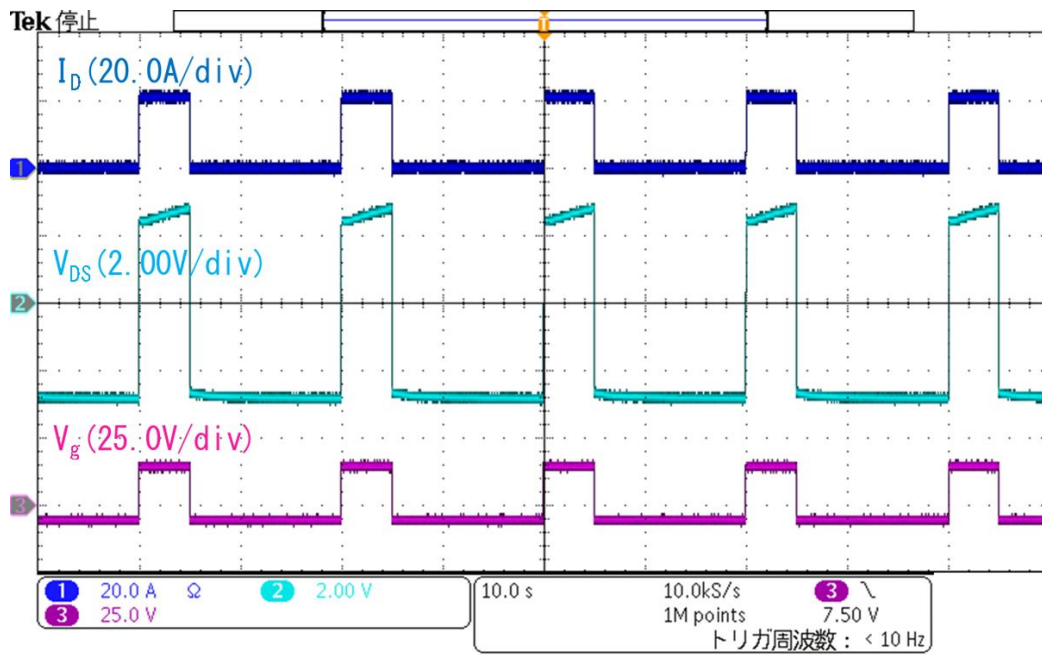


図 6 パワーサイクル試験波形 [SiC MOSFET (-5V)]