

過負荷対応SiCモジュール

Overload-tolerant SiC Module

谷澤 秀和*
Hidekazu Tanisawa

概要 総合科学技術・イノベーション会議主導で進められたSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代パワーエレクトロニクス/SiC次世代パワーエレクトロニクスの統合的研究開発」の中で、SiCパワーデバイスを用いた電力変換器設計技術及び、高温実装技術の開発を行った⁽¹⁾。サンケン電気を含む同じ技術課題を有する民間企業と産業技術総合研究所がインホイールモータを想定したSiCパワーモジュールを開発した。本稿ではその成果の中から重要となる過渡熱評価技術及び、実装技術を紹介する。また、更に作製したモジュールの過負荷耐量向上に関して測定結果を示す。

1. まえがき⁽¹⁾

近年パワー半導体業界ではワイドバンドギャップ半導体と自動車の電動化に注目が集まっている。

SiCパワーデバイスはワイドバンドギャップパワーデバイスのひとつであり、ユニポーラデバイス的高速スイッチング特性と、低い導通損失の特性を持ち、これを用いた電力変換器は高効率化による省エネ及び冷却システムの簡素化による高出力電力密度が実現できる。また、Siパワーデバイスと比較して高温動作が可能であり、例えば250℃以上での動作が報告されている⁽²⁾。この特徴を生かすとさらに冷却系簡略化による変換器の高出力密度化に有効である。

近年環境への配慮から自動車はモータを使用したハイブリッド自動車やEVなど電動化が進んでいる。この時メインモータを動かすパワーモジュールには高効率、高パワー密度が求められる。また、人の乗るスペースを大きくしたいなどの要望からモータをタイヤのホイール内に搭載したインホイールモータが検討されている⁽³⁾。

その際、通常動作でない例えば縁石乗り上げなど短時間過負荷時の発熱をどう対応するかが課題の一つとなる。このような短時間発熱を定常冷却能力で処理をできるように設計するとインバータが大きくなりインホイール内への搭載が困難になる懸念が生じる。そのため我々

は、短時間過発熱を過渡熱抵抗特性の設計で対処し、パワーモジュールの小型化を維持したまま解決することを目的とした。

本論文は研究成果の中から、すでに論文発表もしくはNEDO最終成果報告書に公開済みの内容をダイジェストで紹介する。特にキーとなる過渡熱解析技術、AIバンブフリップチップの信頼性向上及び配線基板搭載による過渡熱抵抗改善効果を示し、更に能力を上げた最終モジュール品の短時間過負荷評価結果を示す。

2. SiC-MOSFETの過渡熱抵抗解析技術⁽⁴⁾⁽⁵⁾

短時間過負荷時の温度上昇を精密に設計するためには、過渡熱抵抗の解析が重要となる。我々はMentor Graphics社のT3Sterを使用し過渡熱測定及びそこから構造関数を導き出し、モジュール設計を行っている。その測定において温度モニターとなるSiC-MOSFETのボディダイオードの特性解析についてポイントを示す。

図1に開発したワイヤーボンディングタイプのSiCパワーモジュールを示す。本モジュールは2in1タイプである⁽²⁾。このモジュールの過渡熱抵抗を評価するために図2の様な回路でSiC-MOSFETのボディダイオードに通電し、発熱と温度測定を担わせている⁽⁵⁾。

*デバイス事業本部 技術本部 プロセス技術統括部
先行技術開発部 先行開発課

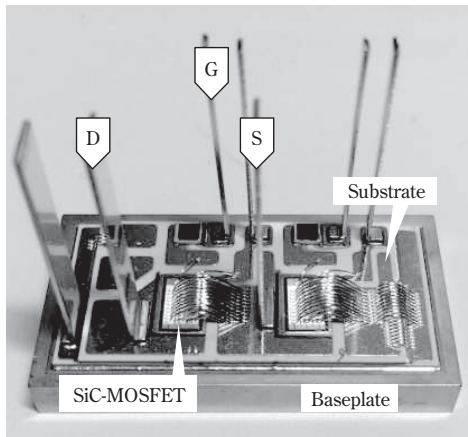


図1 ワイヤボンディングタイプモジュール

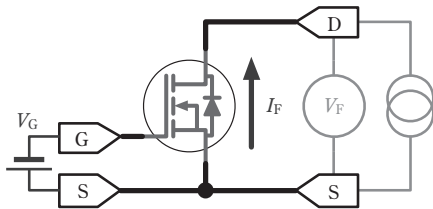


図2 過渡熱測定回路

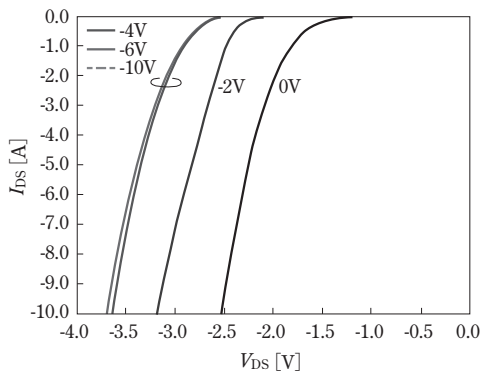


図3 SiC-MOS ボディダイオード順方向特性 ($V_{GS} = 0 \sim -10V$)

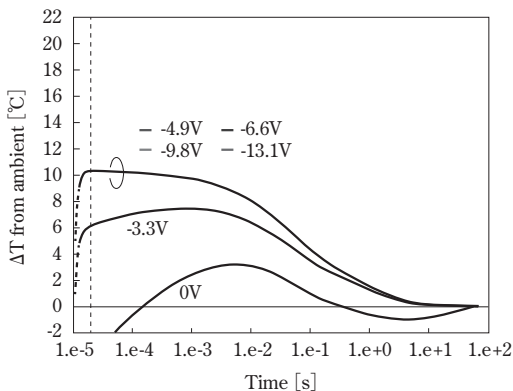


図4 SiCモジュールの温度変化 ($V_{GS} = 0 \sim -13.1V$)

しかし、多くのSiC-MOSFETの場合単純にG-Sショートにしても、SiC-MOSFETに微小な電流がながれてしまい、ボディダイオードの通電温度特性を測定しようとしても正しい結果が得られない。図3にSiC-MOSFETの V_{GS} を0～-10Vまで変化させたときの、ボディダイオードの $I-V$ カーブを示す⁽⁵⁾。 V_{GS} の大きさによって $I-V$ 特性が異なる。より低い V_{GS} の場合 $I-V$ 特性が変化していない。このようにSiC-MOSFETはSi-MOSFETとは違う $I-V$ カーブの変化が存在する。

図4に図3と同じチップを実装したサンプルのT3sterによる温度測定結果を示す⁽⁵⁾。図4を見てわかるように、図3の $I-V$ 特性が変化する領域の V_{GS} を印可して測定した結果は冷却過渡現象を観察しているにも関わらず、温度が上下するなど正しい温度測定ができていない。一方 V_{GS} が-4.9V以下の場合、単調減少となり、冷却過渡温度を適切に測定できている。このようにSiC-MOSFETのボディダイオードで過渡熱抵抗を測定する際、使用するチップに合わせた V_{GS} の設定が重要である。

3. Alバンプフリップチップ技術⁽⁶⁾⁽⁷⁾

過去のプロジェクトにてAlバンプフリップチップ実装技術を開発した⁽⁷⁾。しかし、従来のAlバンプはチップ部への接合面積が小さかった。今回、この接合面積の改善を行った。図5にAlバンプフリップチップ後、シエア試験にてチップを除去し、チップと接合していた面を観察した結果を示す⁽⁶⁾。白い点線線はチップへの接合箇所である。改良によりチップ接合面積が大きくなっていることが分かる。また、接合していない面を大幅に減らすことができた。このバンプにて参考文献⁽⁷⁾と同様にサンプルを作製し温度サイクル試験をかけた。そのときのシエア強度測定結果を図6に示す⁽¹⁾。シエア強度が向上している。

図7にこの改良したAlバンプでチップと配線基板を接合したSiCモジュールを示す⁽⁶⁾。配線基板はSiCパワーデバイス過渡発熱時の熱を熱容量で吸収する狙いがあり、過渡温度低減効果が期待できる。図1及び、図7の構造でT3sterによる過渡熱測定を行い構造関数を算出した結果が図8である⁽⁶⁾。

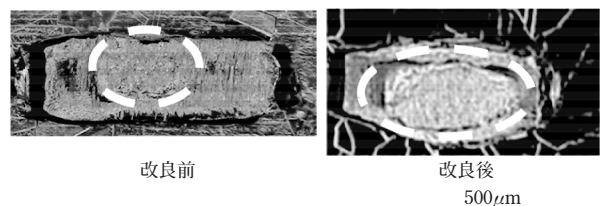


図5 改良前後のバンプ形状

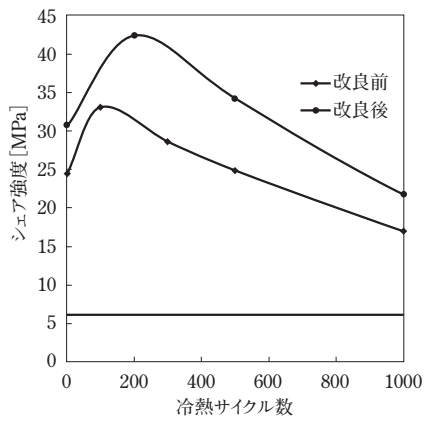


図6 改良前後でのパンプシヤア強度の違い

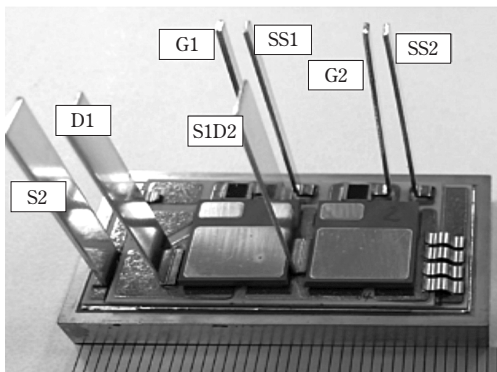


図7 配線基板タイプのモジュール

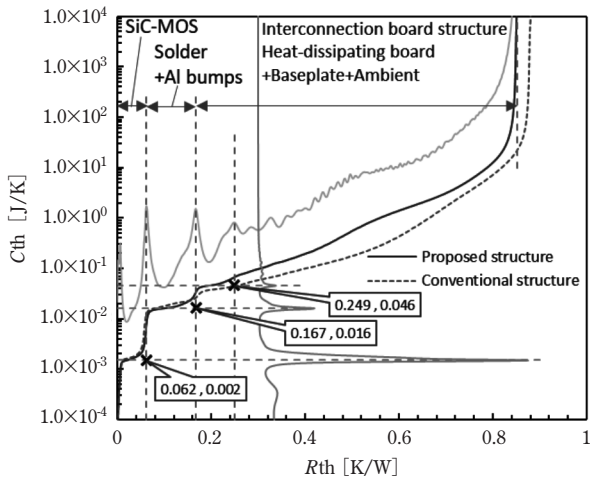


図8 ワイヤーボンディングタイプと配線基板タイプの構造関数

ワイヤーボンディングタイプの構造関数は図中の点線で示されている。配線基板タイプは黒い実線で示されている。結果を比較すると、ワイヤーボンディングタイプに比べ配線基板タイプは0.16K/W付近から熱容量が増加している。これは、Alバンプを通過し、熱が配線基板に到達し、その分の熱容量が加算される為である。この熱容量の差により、ワイヤーボンディングタイプに比較し配線基板タイプの過渡熱抵抗を最大15%低減した⁽⁶⁾。

4. 短時間過負荷対応モジュール⁽¹⁾

短時間過負荷想定としては、インホイールモータの仕様から100A—3秒印加時250℃以下とした⁽¹⁾。図9にワイヤーボンディングタイプの短時間過負荷試験結果を示す。通電時間に対して、通電電流及び、モジュール温度を示している⁽¹⁾。85A、0.5秒の通電で250℃まで上昇した。これに対し、図7からさらに改良した配線基板タイプのモジュールを開発した。ワイヤーボンディングタイプからの変更点は表1のようにになっている⁽¹⁾。このモジュールにて短時間過負荷試験を行った結果を図10に示す⁽¹⁾。

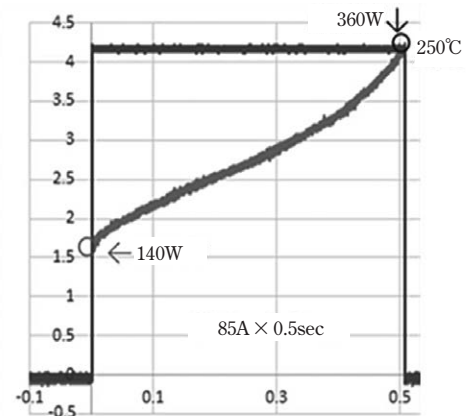


図9 ワイヤーボンディングタイプの短時間過負荷試験結果

表1 モジュール改善内容

	変更前	変更後
ベースプレート	CuW, 5mm厚	CMC, 12mm厚
放熱基板の配線厚み	100μm	300μm
チップ表面接合	ワイヤーボンディング	熱伝導性を良くした配線基板 (Alバンプフリップチップ接合)

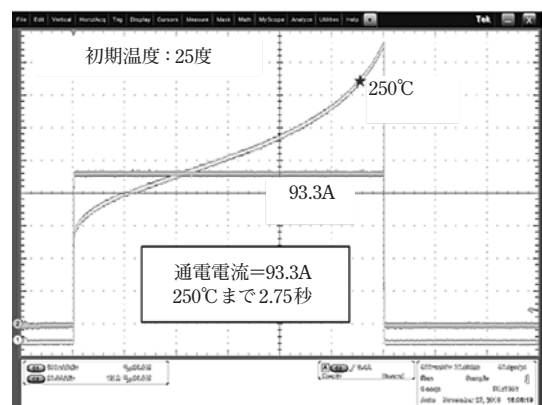


図10 短時間過負荷改善モジュールの測定結果

93.3A通電時2.75秒後に250℃となり大幅に短時間過負荷耐性を向上することができた。

5. むすび

インホイールモータを想定し、短時間過負荷に対応したモジュールを開発した。開発にあたり、過渡熱抵抗測定が重要であり、SiC-MOSの測定の際 V_{GS} の設定が重要であることを発見した。また、Alバンプフリップチップ実装の信頼性向上のためバンプ形状の改善を行い、信頼性を向上することができた。Alバンプフリップチップを使用した配線基板タイプモジュールはワイヤーボンディングタイプよりも短時間過負荷時の温度上昇を抑制できることが実証できた。更にモジュールを改善し、93.3A通電時2.75秒の条件でモジュール温度を250℃以下に抑制できることが分かった。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「次世代パワーエレクトロニクス／SiC次世代パワーエレクトロニクスの統合的研究開発」（管理法人：NEDO）によって実施されました。研究開発の現場にて御指導、御鞭撻のほど賜りました佐藤伸二博士、加藤史樹博士、宝蔵寺裕之博士（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）に深謝いたします。

参考文献

- (1) 平成26年度～平成30年度 成果 報告書, 「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)次世代パワーエレクトロニクス/SiCに関する拠点型共通基盤技術開発/SiC 次世代パワーエレクトロニクスの統合的研究開発」, 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (2) Shinji Sato, Fumiki Kato, Hidekazu Tanisawa, Kenichi Kouic, Kinuyo Watanabe, Yoshinori Murakami, Hiroshi Sato and Hiroshi Yamaguchi, “Development of High Temperature Operation SiC Power Module”, ECS Trans. 2018 volume 86, issue 12, pp. 83-90.
- (3) 平成26年度～平成30年度 成果 報告書, 「SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 次世代パワーエレクトロニクス 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発 EV モータ駆動用機電一体インバータの研究開発」, 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
- (4) Fumiki Kato, Hiroki Takahashi, Hidekazu Tanisawa, Kenichi Kouic, Shinji Sato, Yoshinori Murakami, Hiroshi Nakagawa, Hiroshi Yamaguchi, and Hiroshi Sato, “Identification of thermo-mechanical fatigue fracture location by transient thermal analysis for high-temperature operating SiC power module assembled with ZnAl eutectic solder”, HiTEC2018, May 8-10, Vol. 2018, No. HiTEC, pp. 000028-000031.
- (5) Fumiki Kato, Shinji Sato, Kenichi Kouic, Hidekazu Tanisawa, Hiroshi Hozoji, Hiroshi Yamaguchi, “Study of Gate Bias Voltage for Preventing Threshold Shift of SiC-MOSFET Body Diode during Transient Temperature Measurements”, 2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), proceedings, pp. 88-91.
- (6) Hidekazu Tanisawa, Fumiki Kato, Kenichi Kouic, Shinji Sato, Kinuyo Watanabe, Hiroki Takahashi, Yoshinori Murakami and Hiroshi Sato, “Transient thermal characteristics of high-temperature SiC power module enhanced with Al-bump technology”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 57, Number 4S.
- (7) Hidekazu Tanisawa, Kohei Hiyama, Takeshi Anzai, Hiroki Takahashi, Yoshinori Murakami, Shinji Sato, Kinuyo Watanabe, Fumiki Kato, and Hiroshi Sato, “Reliability Assessment of Flip-Chip Assembly of Al Bumps”, Journal of Microelectronics and Electronic Packaging: April 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 92-97.