

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01311
研究課題名（和文）Development of reliable SiC MOSFET power modules

研究課題名（英文）Development of reliable SiC MOSFET power modules

研究代表者
舟木 剛（Funaki, Tsuyoshi）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20263220
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主な目的は、信頼性の高いSiC MOSFETパワーモジュールを開発することにある。すなわち電氣的ストレスおよび熱的ストレスに対して、パワー半導体デバイスおよびこれを実装したパワーモジュールの特性変化を評価するとともに、これを低減する実装方式について検討した。連続通電およびパワーサイクル試験結果から特性変化のシミュレーションモデルを構築した。これをもとに計算機シミュレーションを援用したパラメトリック実試験を行い、パワーモジュールの特性変化の推定精度向上をはかった。これをもとにパワーモジュールの寿命モデルを用いた、冷却システムや運転条件に対する信頼性推定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
カーボンニュートラルにむけ更なる省エネルギー化が社会的に求められている。電力変換における損失低減を実現するためにSiCデバイスを用いたパワーモジュールが不可欠であるが、複数のSiCデバイスが搭載されるパワーモジュールではSiCデバイスの電気特性の分散やストレスに対する特性劣化に対する信頼性の評価が課題であった。本研究で開発した実験に基づく特性変化のモデル化により、SiCデバイスを用いたパワーモジュールの信頼性を担保するために必要な、使用状態による劣化予測を可能とした。本技術をさらに発展させればパワーモジュールの余寿命予測にもつながることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The main objective of this study is to develop reliable power modules with SiC MOSFETs. Specifically, this study evaluates the characteristic variations and changes of power semiconductor devices and the power modules incorporating them under electrical and thermal stress. This study develops and examines implementation methods to reduce these stresses. A simulation model for characteristic changes was constructed based on the results of continuous energization and power cycle tests. Based on this, a parametric experimental test utilizing computer simulation was conducted to improve the accuracy of estimating characteristic changes in the power modules. Based on this, reliability estimation for cooling systems and operating conditions was performed using a life model of the power module.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーモジュール SiC MOSFET マルチチップ 信頼性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

省エネ・創エネに用いられている電力変換回路の性能向上のため、従来の Si に代わりワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが注目されている。特にシリコンカーバイド (SiC) を用いたパワーデバイスは近年、著しい進歩を遂げ、幅広いパワーエレクトロニクスアプリケーションに採用されている。更なる SiC パワーデバイスの発展には、これを複数用いた SiC パワーモジュールの長期的な信頼性が重要であり、従来の Si パワーモジュールを置き換えるための鍵となる。SiC パワーモジュールに対して複数の信頼性試験方法が提案されているが、SiC MOSFET には電氣的または熱的ストレスに対する電気特性の変化の問題があり、信頼性評価結果の妥当性に対する懸念があった。これは特に、MOSFET の電気特性を利用して機械的劣化を検出するパワーサイクル試験 (PCT) において、接合温度推定の誤差を引き起こす可能性に起因するものである。PCT は、パワーモジュールパッケージの信頼性評価試験の中で最も重要かつ厳しい評価項目である。このため試験結果の妥当性を担保するための評価結果が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、SiC パワーモジュールの PCT における SiC MOSFET の電気特性の変化を評価することで PCT の妥当性を担保することにある。これにより、信頼性の高い SiC MOSFET パワーモジュールの開発を可能とする。すなわち電気的特性の変化を予測するため実験を行い、数値解析による寿命予測に資するモデル開発を目指す。

3. 研究の方法

PCT を行うためのパワーモジュールの自己加熱には二つの方法がある。一つは、負のゲートバイアス電圧で SiC MOSFET のボディダイオードに大電流を流す方法で、もう一つは、正のゲートバイアス電圧でチャネルに大電流を流す方法である。本研究では上記の方法を参考にし、SiC MOSFET に対して大きな順方向通電電流および逆方向通電電流を連続的に印加し、自己加熱方法の違いによる電気特性変化への影響を評価する。

4. 研究成果

図 1 は PCT に用いた印加電流と温度プロファイルである。PCT において一定の負バイアスのゲート電圧を印加した状態でボディダイオードを通して電流を流すことで自己加熱させるための回路接続を図 2(a) に示す。一方図 2(b) は、PCT においてチャネルを通して加熱電流を流すための回路接続である。このため、パワーデバイスの順方向導通を流すための正のゲートバイアス電圧を印加している。これらの回路接続によってパワーモジュールパッケージの長期的な信頼性を正確に評価するための SiC MOSFET の電気的特性の変化を評価する。

図 3 はタイプが異なる SiC MOSFET の連続電流通電試験における経過時間に対するゲートしきい値電圧の変化である。負のゲートバイアス電圧を印加した状態で SiC MOSFET のボディダイオードに大電流を通電すると、ゲートしきい値電圧が変化することが明らかになった。図 4 は、連続電流通電試験の経過時間に対する SiC MOSFET のオン抵抗の変化である。連続通電により SiC MOSFET のオン抵抗は経過時間と共に低下した。以上のように、負のゲートバイアス電圧でボディダイオードに大電流を流すと、ゲートしきい値電圧、オン抵抗、およびボディダイオードの立ち上がり電圧が大きく変化することが明らかになった。これらの特性変化は指数関数近似によりモデル化可能であることを示した。また電気特性の変化の程度は SiC MOSFET のタイプによって異なることが観察された。負のゲートバイアス電圧の影響は、PCT において SiC MOSFET のボディダイオードの自己加熱を使用する際の信頼性評価に対して影響する。ボディダイオードの通電に対して、チャネルを通して大電流を順方向導通させる自己加熱を用いる場合、ボディダイオードを含む SiC MOSFET の電気特性に大きな変化は生じないことを明らかにした。すなわちチャネルの通電電流をもちいた試験方法は、PCT における長期的な信頼性をより正確に評価することが出来ることを明らかにした。

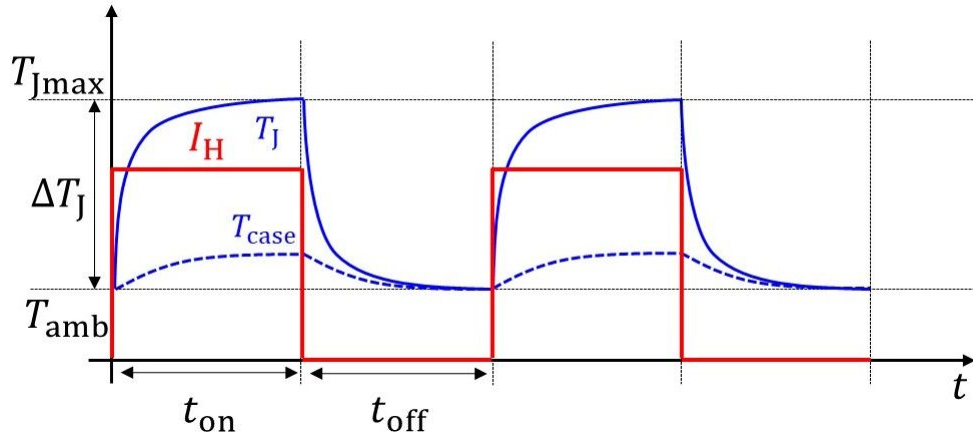


図 1: パワーサイクル試験の通電電流と温度応答のプロファイル

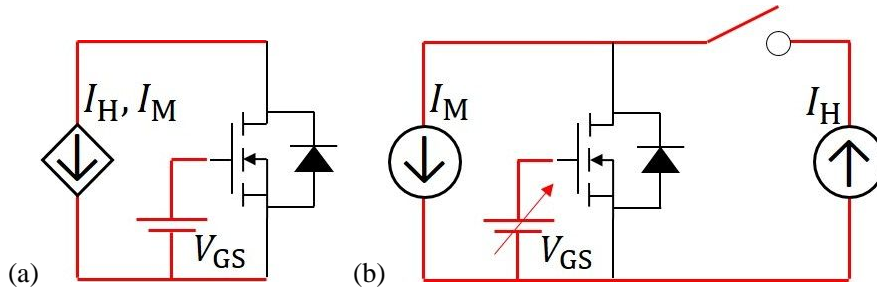


図 2: SiC パワーモジュールのパワーサイクル試験における接続図

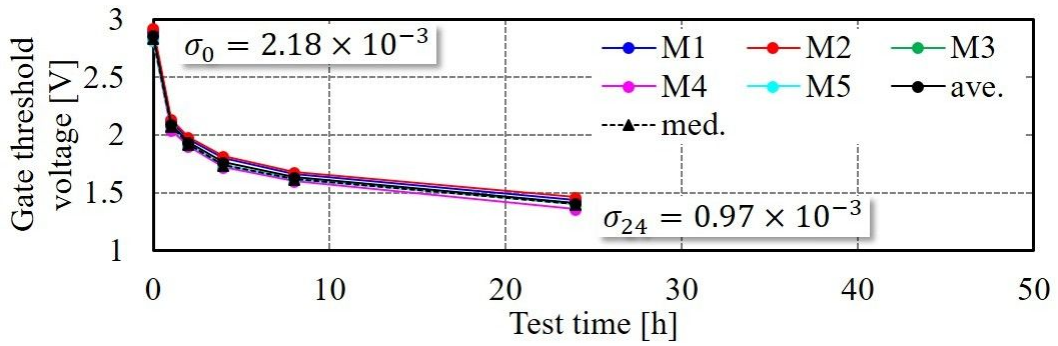


図 3: 連続通電電流時間に対するゲート閾値電圧の変化

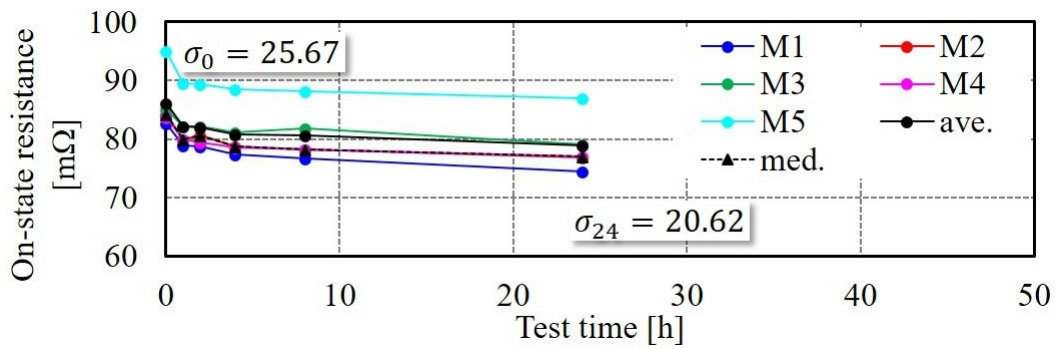


図 4: 連続通電電流時間に対するオン抵抗の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shuhei Fukunaga, and Tsuyoshi Funaki	4. 巻 1062
2. 論文標題 Identification of high resolution transient thermal network model for power module packages	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Material Science Forum	6. 最初と最後の頁 253-257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/p-90g136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shuhei Fukunaga, Alberto Castellazzi, and Tsuyoshi Funaki
2. 発表標題 Development of reliable multi-chip power modules with parallel planar- and trench-gate SiC MOSFETs
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福永 崇平, カスティラズィ アルベルト, 舟木 剛
2. 発表標題 SiCパワーモジュールの高信頼性設計 -劣化予測へ向けた実験的特性評価-
3. 学会等名 電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 優人, 福永 崇平, 舟木 剛
2. 発表標題 パワーモジュールに適用する絶縁用セラミックスの過渡熱抵抗に関する実験的検討
3. 学会等名 電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福永 崇平, 舟木 剛
2. 発表標題 SiCパワーデバイスの熱特性評価に適用する過渡熱抵抗測定システムの基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 優人, 福永 崇平, 舟木 剛
2. 発表標題 複数TIMの組み合わせによるパワーモジュールの熱抵抗低減に関する実験的検討
3. 学会等名 電気学会 全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuhei Fukunaga, Alberto Castellazzi and Tsuyoshi Funaki
2. 発表標題 Reliable design of SiC MOSFET power modules: experimental characterization for aging prediction
3. 学会等名 2022 International Power Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuhei Fukunaga, Alberto Castellazzi and Tsuyoshi Funaki
2. 発表標題 Development of reliable multi-chip power modules with parallel planar- and trench-gate SiC MOSFETs
3. 学会等名 International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	カステラッツィ アルベルト (CASTELLAZZI Alberto) (70866897)	京都先端科学大学・工学部・教授 (34303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------