

3.3kVフルSiCパワーモジュール

3.3kV Full SiC Power Module

Tetsu Negishi, Ryo Tsuda, Shigeru Hasegawa, Shinichi Iura, Hiroshi Yamaguchi

要 旨

Si(シリコン)ベースのIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)がパワーモジュールとして鉄道車両主回路システムに最初に適用されてから約20年が経過した。現在まで、鉄道車両主回路システムの性能は、半導体チップやパッケージ技術を改良することによって改善されてきた。しかし、パワーモジュール用のSiデバイスは物理的限界に近づいているため、Siベースのパワーモジュールの大きな改善は難しくなっている。三菱電機では、更なる性能改善が見込まれるSiC(シリコンカーバイド)を用いたパワーモジュールを世界に先駆けて(注1)開発・実用化してきた。

スイッチング素子と逆並列に接続される還流ダイオードをSiC化したフルSiCとし、鉄道用途向けに適した高信頼性設計技術及び耐環境性設計技術を開発・適用するこ

とによって、世界で初めて(注2)世界標準パッケージ適用フルSiCの鉄道向け低損失・高耐圧パワーモジュールを開発した。フルSiC化によって、従来のSiパワーモジュールに比べ、スイッチング損失を約80%低減した。フルSiCモジュールの適用によって、鉄道車両主回路システムのスイッチング損失低減・軽量化・回生ブレーキ効率向上などを実現し、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力を低減した。また、世界標準パッケージ適用によって並列接続が容易となり、多様な鉄道車両用電力変換装置の構成・容量に対応し、装置設計の効率化に寄与する。

(注1) 2013年3月26日現在、当社調べ
(注2) 2017年5月11日現在、当社調べ

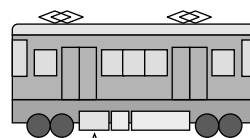
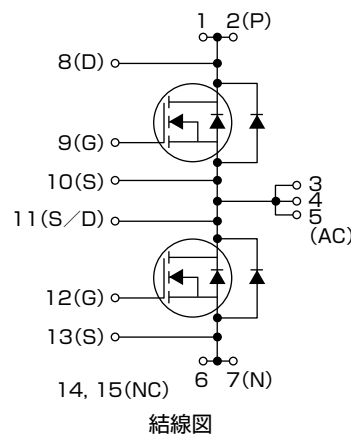


フルSiC-LV100パッケージ

形名	定格電圧	定格電流
FMF750DC-66A	3.3kV	750A

素子として：

- ・SiC-MOSとSiC-SBDの適用によって低損失・高出力化(スイッチング損失：従来Siタイプ比約80%低減)
- ・標準外形パッケージによって多様な電力変換装置の構成・容量に対応可能(2素子並列接続によって3.3kV/1,500A)



- 鉄道車両主回路システムとして：
- ・低消費電力化(従来比約30%低減)
 - ・小型化による床下機器構成の自由度向上

MOS : Metal-Oxide Semiconductor, SBD : Schottky Barrier Diode

3.3kVフルSiCパワーモジュール

世界で初めてフルSiCの鉄道用途向け低損失・高耐圧パワーモジュールを開発した。鉄道用途向けに適した高信頼性設計技術及び耐環境性設計技術を開発・適用した。フルSiC化によって、従来のSiパワーモジュールに比べてスイッチング損失を約80%低減した。また、世界標準パッケージ適用によって並列接続が容易となり、多様な鉄道車両用電力変換装置の構成・容量に対応し、装置設計の効率化に寄与する。

1. ま え が き

低炭素社会の実現に向けた省エネルギー化と更に豊かな生活を実現するための高性能化が求められており、省エネルギーで利便性の高い移動輸送手段である鉄道の重要性が高まっている。鉄道車両用主回路システムなどに使用される絶縁型パワーモジュールは小型、低損失であることに加えて、民生、一般産業用等と比べてより高い信頼性が要求されている。この要求を満たすため、当社は従来のSi製品の性能向上を進めるとともに、更なる性能改善が見込まれるSiCによるMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)とSBDを用いて、鉄道車両の駆動システムにふさわしい性能を備えた3.3kVフルSiCパワーモジュールを世界で初めて開発した。

本稿では、開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールについて、従来のSiベースのパワーモジュールとの損失性能比較とともに、信頼性性能について述べる。

2. 3.3kVフルSiCモジュールの特長

2.1 パッケージ

開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールのパッケージは世界標準パッケージを適用した。特長は次のとおりである。

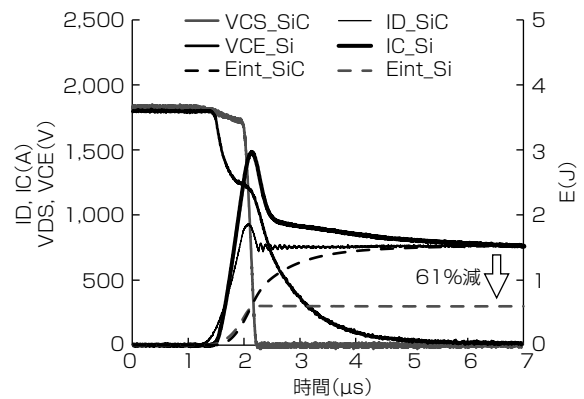
- (1) 端子配列の最適化によって並列接続が容易となり、鉄道車両用電力変換装置設計の効率化に貢献
- (2) 内部インダクタンス低減によってスイッチング速度を向上させ、電力損失を低減
- (3) AC主電極3端子化によって大電流定格に対応して鉄道車両用電力変換装置の高出力化に貢献
- (4) 他社製品との互換性を確保

2.2 スwitching特性

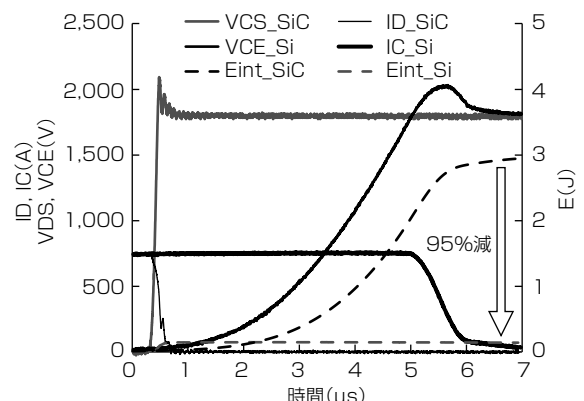
SiC-MOSFETとSiC-SBDの組合せを用いることによって、従来のSiのモジュールに比べ、劇的なスイッチング損失低減をもたらすことができる。開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールのスイッチング損失を、従来のSiベースのIGBTを用いたパワーモジュールに対してオン時61%低減、オフ時95%低減し、合計で約80%低減した(図1)。

鉄道車両用主回路システムに対し、3.3kVフルSiCパワーモジュールを適用して最適化することによって、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。

しかし、SiCを用いたモジュールを実際に鉄道車両で用いるためには、この損失低減を実現させることは当然のことながら、さらに様々な動作特性や信頼性を確保する必要がある。当社はそれらの課題に対して対策を講じた設計をすることによって課題を解決し、鉄道車両への実用化を実現した。ここでは、その中でも重要な高絶縁安定性、酸化膜寿命及び耐環境性能について述べる。



(a) オン時



(b) オフ時

VCE=VDS=1,800V, IC=ID=750A, Tjope_Si=150°C, Tjope_SiC=175°C

図1. 3.3kVフルSiCパワーモジュールと従来Siベースパワーモジュールのスイッチング波形

3. 信頼性

3.1 高絶縁安定性

SiCはその物理特性から、高温での動作が期待される。高温かつ高電圧の条件下で素子耐圧を確保するためには、リーク電流の抑制が必要となる。特にSBDの高温でのリーク電流抑制が必要で、接合や酸化膜などのチップ構造の改良とそれを得るためのプロセス改良によってSBDの高温でのリーク電流を抑制した(図2)。

開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールは175°Cでも3.3kV時のリーク電流が0.7mA程度であり、高温高電圧でのリーク電流抑制がなされている。

さらに、長期的な安定性を検証するために、HTRB(High Temperature Reverse Bias)や宇宙線耐量試験などの長期耐電圧試験を実施した。いずれもSiと同等以上の信頼性を得ることができた。例としてHTRBの試験結果を図3に示す。

1,000時間後でもドレイン電流値の変動は数%であり、3.3kVフルSiCパワーモジュールが高温下でも安定している。これらの結果は3.3kVフルSiCパワーモジュールが十分実使用に耐える信頼性を持っていることを示している。

3.2 酸化膜寿命

SiCはチャネル抵抗が高いため、オン抵抗の低減と低温飽和電流のトレードオフ設計が重要である。そのため、必要な通電特性を得るためには、酸化膜をSiより薄くしてしきい値電圧を下げる必要がある。しかし、酸化膜が薄くなると酸化膜にかかる電界は高くなるため、酸化膜寿命が低下する問題が発生する。当社のSiC-MOSFETはそれらの弱点を補うために、酸化膜やゲート構造の改良とそれを得るためのプロセスの改良によって、酸化膜寿命を向上させた。酸化膜寿命試験の一つであるHTGB(High Temperature Gate Bias)での3.3kVフルSiCパワーモジュールの試験結果を図4に示す。

HTGBのしきい値変動率が数%以下であり、鉄道車両で一般的に想定される30年以上の酸化膜寿命を持っていることを意味している。

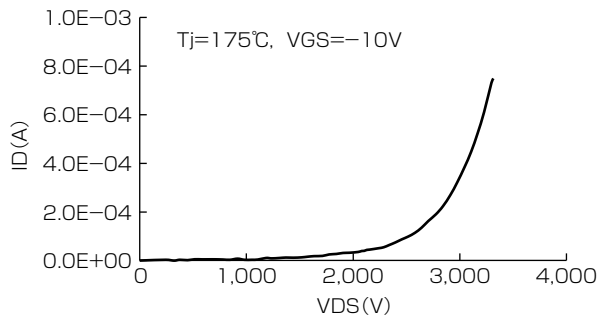


図2. リーク電流

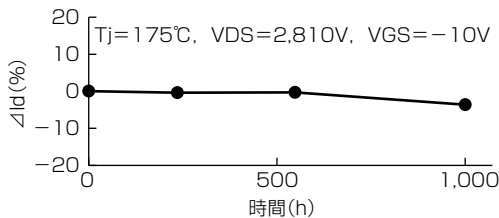
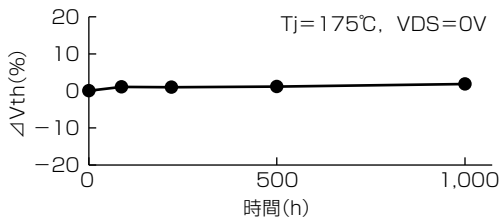
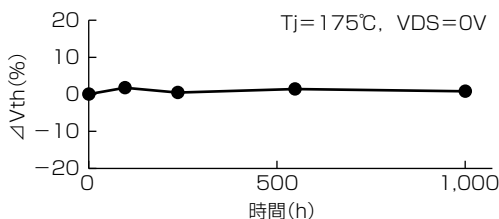


図3. HTRBの試験結果



(a) VGS=20V



(b) VGS=-20V

図4. HTGBの試験結果

しかしながら、SiCの製造プロセスはまだまだ発展途上であり、更なる改善が必要となる。今でもSiCでは基板やエピ工程、さらにチッププロセスに起因する酸化膜形成異常などの異常発生確率がSiより高い状態であり、鉄道車両での実用化のためには、その問題を含んだチップを流出させないことが必要となる。そこで当社は不良チップを含んだモジュールをフィールドに流出させないために、異常を検出して製造プロセス工程内で除去するスクリーニング技術を開発した。それによって、当社はフィールドで適用できる3.3kVフルSiCパワーモジュールの提供を可能にしている。

3.3 耐環境性能

鉄道車両で実使用するためには、外部環境の変化に耐え得る高信頼性のパワーデバイスである必要がある。その外部環境の変化で注意すべきポイントは、主に温度、湿度、電圧が挙げられる。その中で、温度変化によるストレス耐性を表す指標の一つにパワーサイクル寿命がある。パワーサイクル寿命とは、モジュールの正常動作ができなくなるまでの通電サイクル数である。通電サイクル時にはチップなどの通電箇所の温度が上下し、その温度変化と構成部材間の線膨張係数差から部材間接合界面に熱応力が発生する。その発生応力によって部材のクラックや界面剥離が発生し、モジュールの正常動作ができなくなる。そのため、特に高温や大電流条件下でのパワーサイクル寿命の向上には、チップ接合部、すなわちチップ上部のワイヤの設計とチップ下部の絶縁基板との接合部の設計が重要となる。

そこで当社は、ワイヤ材料の適正化とともにチップへのボンディング位置や本数、長さなどを最適化し、ワイヤ発熱を抑える設計とした。また、チップ下部の接合には、Siの従来品で使われているはんだ接合からAg(銀)焼結接合へ変更することによって、耐熱性と強度の向上によるクラック・剥離抑制を行うとともに、熱伝導率を向上させた。

3.3kVフルSiCパワーモジュールのTjmax = 175°Cでのパワーサイクル試験の結果を図5に示す。

図5の実線は従来のSiベースのパワーモジュールの

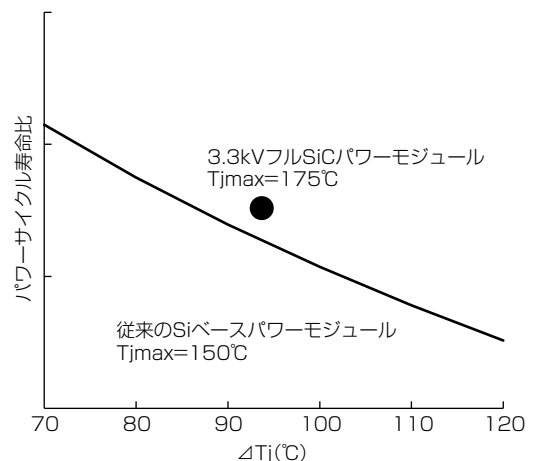


図5. パワーサイクル試験の結果

Tjmax = 150°Cでのパワーサイクル寿命を示しており、丸点が3.3kVフルSiCパワーモジュールのTjmax = 175°Cでのパワーサイクル寿命を示している。SiCモジュールの寿命サイクルはSiのTjmax = 150°Cよりも高温のTjmax = 175°Cであるにも関わらず従来のSiモジュールと同等以上となっている。この結果は、同一温度条件下での3.3kVフルSiCパワーモジュールのパワーサイクル寿命がSiベースのパワーモジュールに対して約1.5倍超であることを意味している。

次に、湿度に対する耐性を検証するため、THB(Temperature Humidity Bias)や結露試験を実施した。SiCは高破壊電界強度材料なので、ガードリング幅をシュリンクできる利点を持ち、ガードリング幅のシュリンクはチップサイズ縮小となるので、モジュールコスト低減に効果的となる。しかし、ガードリング幅シュリンクによるガードリング部の高電界化は、チップのパッシベーションなどのチップ表面材料にとっては絶縁性能などでより厳しくなり、信頼性が低下することが課題となっている。当社は、チップのパッシベーションなどのチップ表面材料と構造設計を最適化したことに加え、絶縁封止材や配線構造などパワーモジュールの材料構成から見直すことによって、その課題を解決した。図6にTHBの試験結果を示す。

高温高湿環境下での高圧印加でも1,000時間超の間リークが発生していない。また、結露試験でも問題がないことを確認した。これらの結果は、3.3kVフルSiCパワーモジュールが鉄道車両用としての耐湿性を持っていることを示している。

また、実動作電圧に対する耐性を検証するため、インバータ動作を模擬した連続スイッチング試験を実施した。3.3kVフルSiCパワーモジュールは図1で示すスイッチング波形のとおりdv/dtがSiベースのパワーモジュールに比べて高く、スイッチング速度が速くなっている。この高いdv/dtは局所的な温度上昇や酸化膜への負荷増加などの懸念があり、それによる信頼性の低下が問題となる可能性がある。当社は、これに対して酸化膜やゲート構造の改良とそれを得るためのプロセスの改良を含めた設計を行っている。図7に3.3kVフルSiCパワーモジュールの長期連続スイッチング試験の結果を示す。

1,500時間連続スイッチング試験を行い、スイッチング試験開始前と1,500時間連続スイッチング試験後の特性を

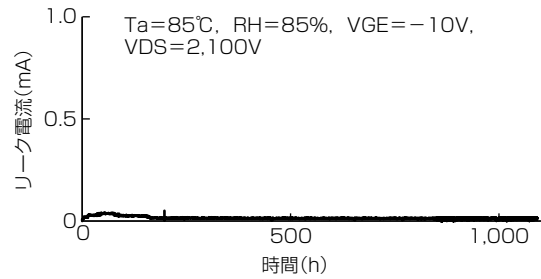


図6. THBの試験結果

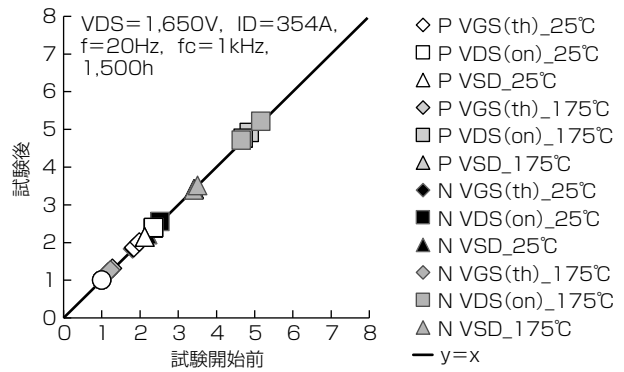


図7. 長期連続スイッチング試験の結果

比較した。連続スイッチング試験の前後で3.3kVフルSiCパワーモジュールの特性値は $y=x$ の線上にあり、大きな特性変動は生じていない。この結果は、3.3kVフルSiCパワーモジュールが高いdv/dtでの実動作スイッチングの長期信頼性を持つことを示している。

これらの耐環境性検証結果は、当社のモジュールが実用に耐える耐環境性能の信頼性を持っていることを示している。

4. む す び

将来のパワーデバイスとして期待されるSiCのMOSFETとSBDを用いた3.3kVフルSiCパワーモジュールを鉄道車両の駆動システム用として世界で初めて開発した。鉄道車両用主回路システムに対して、3.3kVフルSiCパワーモジュールを適用し主回路システムを最適化することによって、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。

この3.3kVフルSiCパワーモジュールによって、当社は低炭素社会の実現と豊かな生活の両立に貢献する。