

# 第2世代SiC-MOSFETモジュール

2nd Generation SiC-MOSFET Module

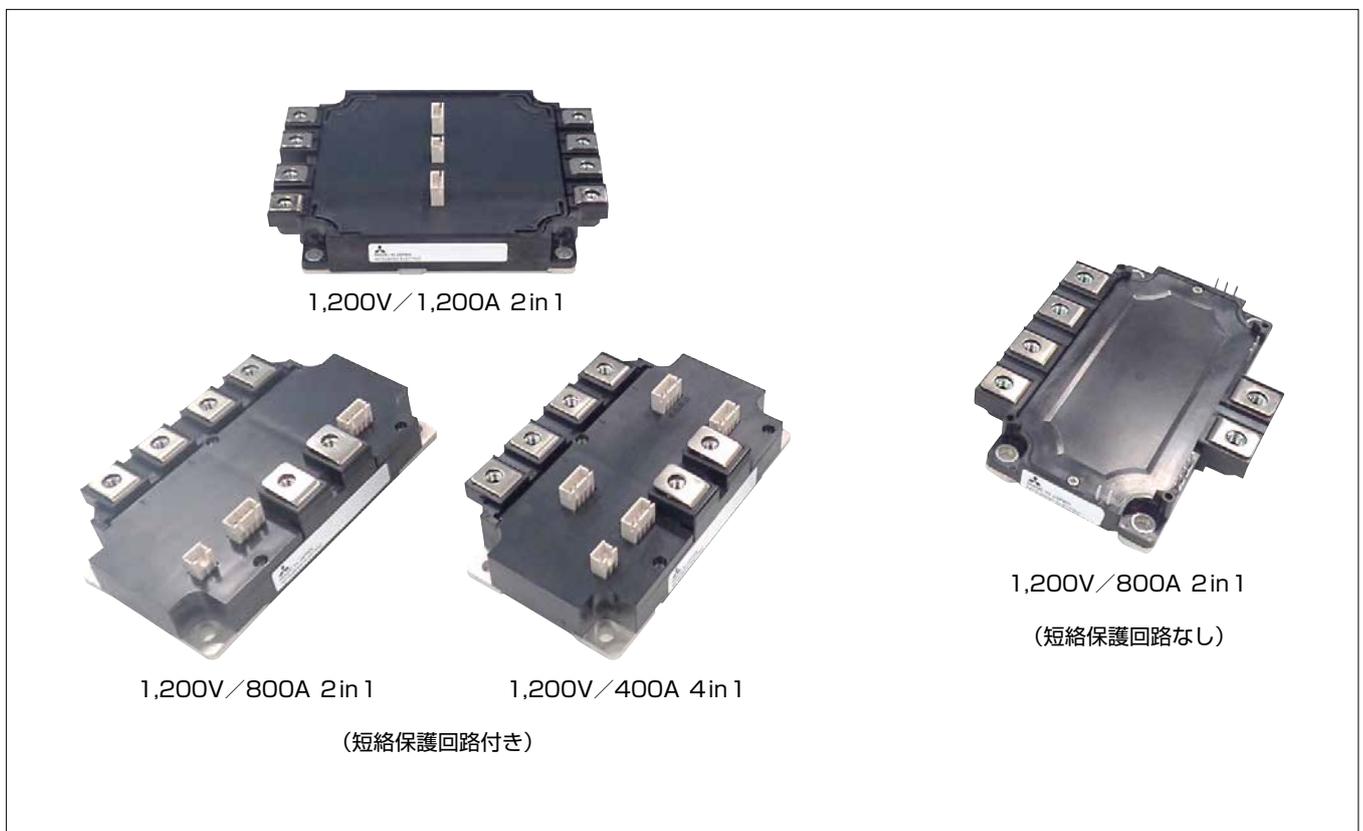
## 要旨

電力変換システムの省エネルギー及び小型化が重要性を増す中、従来のSi(シリコン)に比べ優れた材料特性を持つSiC(シリコンカーバイド)は、今後の更なる展開が期待できる半導体材料である。三菱電機はこれまで培ってきたSiCデバイス技術を使い、2010年にモジュール製品への応用に着手した。2014年にはSiCモジュールとして第1世代となるMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)モジュール、及びSi-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)を組み合わせたハイブリッドモジュールなど、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーに貢献する製品をリリースし、鉄道用補助電源、空調機器、太陽光発電用パワーコンディショナ、無停電電源(UPS)、医療用X

線CT(Computed Tomography)／MRI(Magnetic Resonance Imaging)など幅広い産業分野で応用されている。

それらに替わる製品として、パワーエレクトロニクス機器の高周波化を高いレベルで実現する次のような特長を持った1,200V系第2世代SiC-MOSFETモジュールを開発した。

- (1) 第2世代高集積プレーナゲートMOSFETデバイス技術によって低いオン電圧を実現し、低損失化に貢献
- (2) 帰還容量特性の改善やゲートしきい値の引上げなど高速スイッチング性能を重視した設計
- (3) 従来品“第1世代MOSFETモジュール”との外形互換性を維持したまま、フィンの放熱効率を改善可能な放熱構造を採用して冷却機器の簡略化に貢献



## 第2世代SiC-MOSFETモジュール

4種類の第2世代SiC-MOSFETモジュールの外観を示す。高速スイッチングとの親和性を重視した設計と先進的な低損失SiCデバイス技術の組合せによって、パワーエレクトロニクス機器の動作高周波化を可能にする。システムのダウンサイジング及び軽量化、トータルコスト削減など、多くのメリットを引き出すポテンシャルを持っている。

## 1. ま え が き

パワーエレクトロニクス機器では、絶縁及び電力変換を目的としたトランス、非絶縁の昇圧回路を構成する直流リアクトル、高調波の抑制を目的とした交流リアクトルやフィルタ回路など、受動部品であるリアクトルの併用が多い。一般にこれらは体積と質量が大きいため、システムの多くの部分を占有し、また大容量システムになるほど顕著になっているので、パワーエレクトロニクス機器の更なる小型・軽量化及び低コスト化を阻む要因の一つになっている。この問題の解決方法として、機器の動作高周波化がある。パワーモジュールのスイッチング周波数を高くすることで、磁気飽和の問題を軽減でき、又はより小さいインダクタンス値の部品を選定できることから、リアクトル部品の簡略化が可能である。これによって機器の小型・低コスト化はもとより、従来外付けであったリアクトル部品の機器への内蔵やフィルタの高性能化など新しい付加価値の提供も可能になる。第2世代SiC-MOSFETモジュール(以下“第2世代MOSFETモジュール”という。)は、このような市場ニーズを捉え、パワーエレクトロニクス機器の高周波化を高いレベルで実現するため、低損失と高速スイッチング性能を追求した製品になっている。

## 2. チップの高性能化

### 2.1 低損失設計

第2世代MOSFETモジュールに搭載したMOSFETチップでは、ユニットセルを更に高密度化するとともに、pウェルを浅くし、JFET領域への高濃度ドーピングによって導通時の電圧降下を抑えた(図1)。さらに基板部分の厚みを従来のおよそ1/3にして、オン抵抗は1,200V/800A定格品で2.4mΩ(Tj = 150℃, Vgs = 15V)と、第1世代に

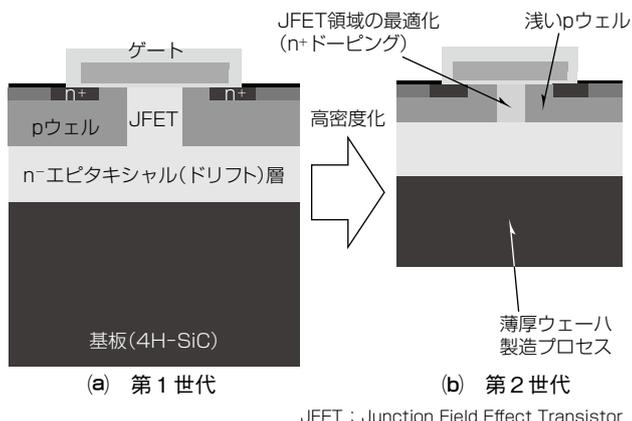


図1. MOSFETチップの断面模式図

比べて約15%改善した。また、ウェーハ径6インチの製造プロセスによって、従来の4インチ製造プロセスに対して製造効率と品質の向上を狙った。

### 2.2 高速スイッチング設計

パワーエレクトロニクス機器の高周波化に対応するために、高速スイッチングとの親和性を重視したチップ設計にした。図2に、第1世代と第2世代の特性比較を示す。JFET領域幅と濃度を最適化することで空乏層の分布を制御し、帰還容量特性を改善した。スイッチング過渡期のドレイン・ソース間電圧(数十から数百ボルト)で急激に帰還容量が小さくなるため、スイッチングスピードをより向上させた。また、ゲートしきい値電圧については、小さくすると低いオン抵抗が得られる一方で、dv/dtによる誤動作(ゲート誤オン)が発生しやすくなる。反対に大きくするとターンオンスイッチング損失が増加し、高速スイッチング性が失われるという関係がある。第2世代MOSFETではゲートしきい値電圧を2.3V(代表値)に調整することで低いオン抵抗と高速スイッチング性能を両立させた。

### 2.3 特性の安定性

MOSFETのpウェルとn-ドリフト層間の接合で形成される寄生のボディダイオードが導通すると、SiC単結晶基板の基底面にあらかじめ存在する転位欠陥を起点に欠陥が次第に拡張し、オン電圧を増加させるなど特性の安定性に影響することが一般に知られている。産業応用は多様な用途があり、広い使用条件に対応するには、MOSFETとは逆並列にSBDを設け、ボディダイオードへの流入を阻止するのが最も有効である。しかしながら、SBD面積を大きくするほどボディダイオードへの流入が減少して特性の安定性が得られる一方で、コストは増加する。そこで、第2世代MOSFETではドリフト層のプロファイルを最適化し、欠陥の拡張を起りにくくした。その結果、SBD面積が第1世代に比べて20%縮小され、コストへの影響を軽減できた。

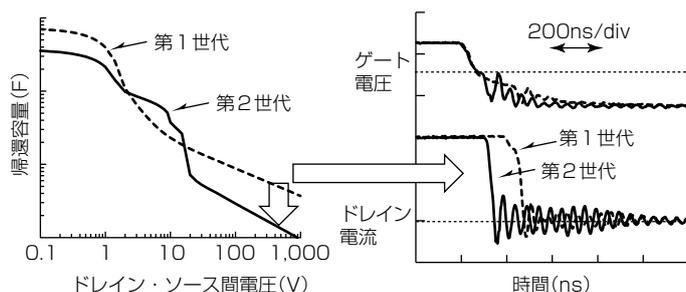


図2. 高速スイッチング性能の比較

### 3. パッケージ構造

#### 3.1 低インダクタンス設計

パワーモジュールでは、スイッチング時の高い電流変化率 $di/dt$ と回路の寄生インダクタンス $L_s$ によるスパイク状のサージ電圧や、デバイスの寄生容量と $L_s$ に起因した振動が発生する。スイッチングスピードが速いSiCデバイスはその傾向が顕著である。第2世代MOSFETモジュールでは第1世代と同様に、チップ多並列接続で低インダクタンス化が可能なパッケージを採用し、SiCデバイス的高速スイッチングに相応した仕様になっている(図3)。また第1世代品と取付け寸法や外形寸法を同等にしているので、第1世代からの置き換え使用が可能である。

#### 3.2 放熱性の改善

SiCデバイスは高電流密度化が可能であるが、モジュールの放熱性に影響する場合がある。第1世代MOSFETモジュールでは横方向への熱の広がりが比較的少なく、フィンの持つ冷却能力を十分に発揮できないという問題があった。第2世代MOSFETモジュールではまず、チップサイズの最適化及びその分散配置によって発熱体同士の熱干渉を軽減した。さらに横方向への熱の広がりに大きく寄与する銅ベース板の厚みを増加させた。

図4は、発熱の状況をシミュレーション解析したものであり、パワーチップの配置とフィン表面での熱の広がりへの対応を示している。第2世代MOSFETモジュールは熱の広がりがより広範囲にわたっており、冷却フィンをより効率的に使用できる。

#### 3.3 高信頼性(パワーサイクル寿命の向上)

要求されるモジュールの性能としてパワーサイクル寿命がある。通電時のON/OFFによる短時間の温度スイング

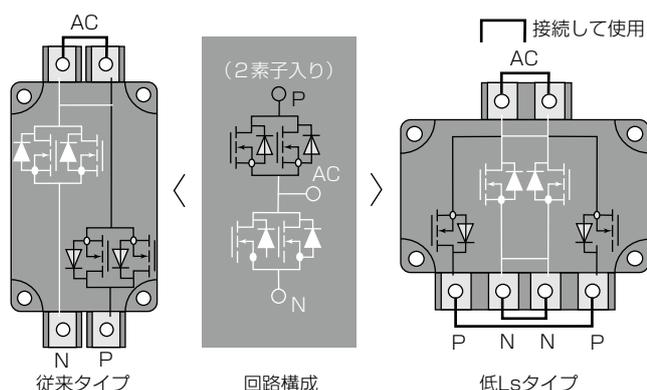


図3. 低インダクタンスパッケージ

を繰り返すことでチップと絶縁基板間の接合材に熱ストレスが発生し、構成部材間の線膨張係数やヤング率の違いによって接合材であるはんだ層の劣化(クラック)が進行する。特にSiCはSiに比べてヤング率が約4倍であり、はんだ層の劣化が顕著である。その結果、Si材料を用いたIGBTモジュールと比べてパワーサイクル寿命が短いという問題があった。ジャンクション温度の到達点が高い場合は更に厳しくなるので、SiC材料自体は優れた高温動作能力があるにもかかわらず、第1世代MOSFETモジュールでは使用可能な最大ジャンクション温度( $T_{jmax}$ )を $150^{\circ}\text{C}$ に制限せざるを得なかった。 $T_{jmax}$ を引き上げるためには、まずパワーサイクル寿命の改善が不可欠である。第2世代MOSFETモジュールではチップの厚みを第1世代に比べて1/3に薄くしているが、これはオン抵抗の低減のほか、パワーサイクル寿命の改善に貢献する。熱ストレスによるはんだ層のひずみをシミュレーション解析した結果(図5)によると、第1世代に比べて歪値が20%低減する。はんだ組成を最適化し、熱ストレス耐量より高くした接合材と組み合わせることでクラックに対する耐量を向上させ、パワーサイクル寿命を改善した。さらに、高温動作に対応した封止部材の採用や電極設計の最適化を行い、使用可能な $T_{jmax}$ を $175^{\circ}\text{C}$ にすることができた。

#### 3.4 短絡耐量への配慮

応用機器によっては上下アーム短絡動作又は負荷短絡動作に対して、一定時間破壊しないことを要求される場

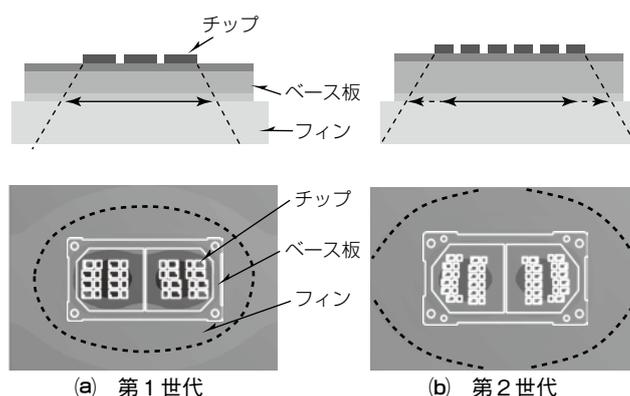


図4. フィン表面での熱の広がり

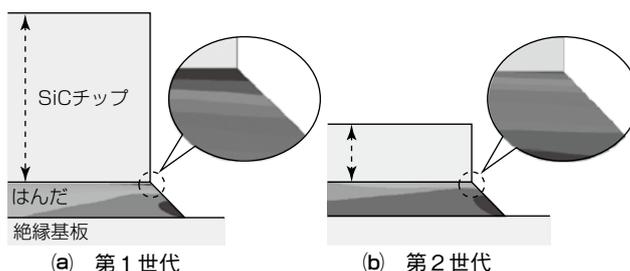


図5. 熱ストレスによるはんだ層のひずみ

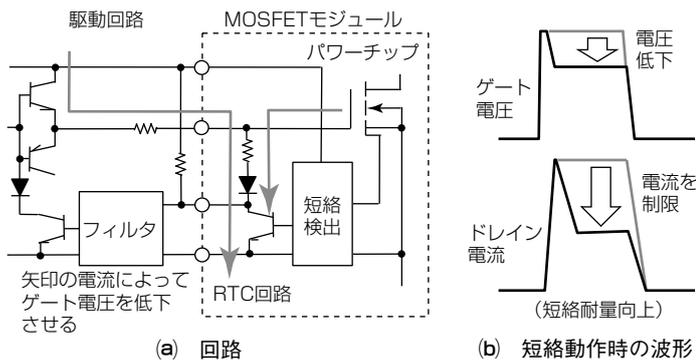


図6. 短絡検出と保護回路

合がある。MOSFETはオン抵抗特性と短絡耐量の間にある強いトレードオフ相関を持っている。第2世代MOSFETモジュールは、電流センシング機能を備えたチップと、RTC(Real Time Control)回路をモジュール内に搭載することによってこのトレードオフを解消する(図6)。大電流状態を検知すると即座にゲート電圧を低下させてドレイン電流を制限する。その結果、オン抵抗特性を損なうことなく短絡耐量を飛躍的に向上させることができる。また同時に、異常フラグ出力端子を各アームに備えており、これをモニタすることで大電流状態の検知が可能である。外部駆動回路で最終的な遮断を行って、安全に遮断できる。

#### 4. 適用のメリット

SiC-MOSFETモジュールを使用するに当たって性能の改善とともに、コスト面も重要視される。特に、IGBTモジュールからの置き換えを考えるユーザーにとってはその費用対効果が切実な問題となる。パワーエレクトロニクス機器の高周波化を高いレベルで実現する第2世代MOSFETモジュールは、コストメリットを引き出すポテンシャルを持っている。優れた低損失性能は冷却器の簡略化を実現する。また、高密度に集積されたモジュールの小型化は、機器のダウンサイジングにつながる。さらに、高いスイッチング周波数で動作させることによって、フィルタやトランスなどのリアクトル部品の小型・軽量化が可能になる。それらは全て、機器全体の直接的コスト削減に貢献する。それだけでなく、間接的なコスト削減にも特筆すべき点がある。機器のダウンサイジングによる設置・保守メンテナンスの容易性、軽量化による輸送費の削減などが挙げられる。図7に、システム全体の直接的コスト試算結果のイメージを示す。160kWクラスの電力変換で、DC-DC部分の絶縁トランス、及び出力フィルタリアクトルを備えた電源システムを想定した。SiCウェーハ材料はSiに比べて高価であり、また結晶欠陥密度も高いため、パワー

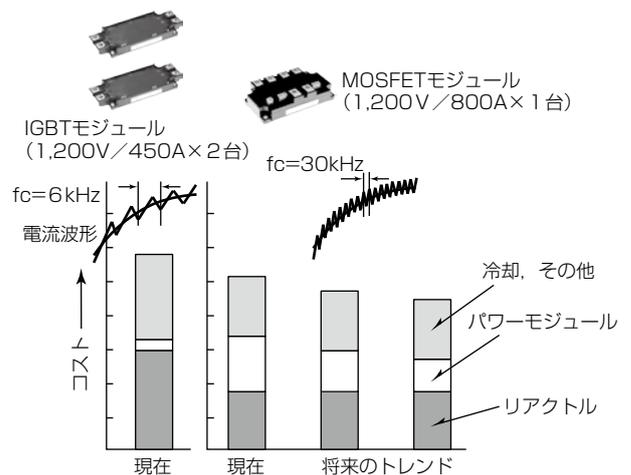


図7. システム全体コストのイメージ

モジュールの製造コストの面ではSi材料を用いたIGBTなどに比べて劣っているのが現状である。しかしながら、前述したように、リアクトルや冷却部品を含めたコストメリットはモジュール価格の増分を打ち消し、むしろシステム全体コストが下がることが考えられる。今後、SiCウェーハの高品質化及びデバイス技術の発展によってモジュールの製造コストが更に下がれば、メリットは一層拡大する。

最後に、製品ラインアップについて述べる。ユーザーの利便性を考え、それぞれのクラスの応用回路で最適と思われるパッケージ及び回路形態を選択した。1,200V/1,200A, 800A, 600Aでは、100kW前後の3相コンバータ及びインバータで使い勝手の良い2in1とした。また、1,200V/300A, 400Aでは2in1のほか、4in1も選択でき、単相の電源システムに最適である。また、電源応用ではシステム上、モジュールに短絡耐量を持たせることを重視しないケースがあることから、一部の品種で、先に述べた短絡保護回路を備えないタイプも加えた。さらに、1,200V/100A, 150A, 200Aでは、3相ハーフブリッジをワンパッケージ化した6in1にし、配線や組立ての利便性を持たせた。

#### 5. むすび

電源システム等に用いられる、高周波スイッチング動作に最適な第2世代SiC-MOSFETモジュールを開発した。今後も、多様化するユーザーからのニーズを反映した付加価値の高い製品開発を行っていく。

#### 参考文献

- (1) 宮崎裕二, ほか: 高周波用IGBTモジュール“NFMシリーズ”, 三菱電機技報, 80, No.6, 411~414 (2006)
- (2) 山口義弘, ほか: 高温動作パッケージ構造, 三菱電機技報, 92, No.3, 167~170 (2018)