特集論文

4.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュール ^{長谷川 滋* 中山 靖**} 森下和博* 林田幸昌***

1.7kV Hybrid SiC Power Module with Large Current Capacity Shigeru Hasegawa, Kazuhiro Morishita, Yoshinori Matsuno, Yasushi Nakayama, Yukimasa Hayashida

要 旨

近年,エネルギーを効率的に利用する観点から,電鉄, 電力,産業市場における電力変換装置に用いられるパワー 半導体モジュールに対して,電力の低損失化,小型化,高 性能化の要求が高まっている。従来この分野では,シリコ ン(Si)のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイ オードを搭載したHVIGBT (High Voltage IGBT)モジュー ルが広く使用されているが,新たな半導体材料としてシリ コンカーバイド(SiC)が注目されている。Siと比較しSiCは 絶縁破壊電界強度がSiの約10倍で,オン電圧の低減が可能 であり,従来の高耐圧応用ではオン電圧が大きいため適用 できなかったショットキーバリアダイオード(SBD)の使 用が可能となる。SBDはユニポーラデバイスで,従来のSi ダイオードでの逆回復動作がなく,ダイオードのターンオ フ損失の大幅な低減が可能となるほか,IGBTのターンオ ン損失も低減する。

今回, 三菱電機は, SiC-SBDと第6世代Si-IGBTを搭載した最大動作温度150℃の1.7kV/1.2kAデュアルの大容量ハイブリッドSiCモジュールを開発した。このモジュールを鉄道車両用インバータ装置に適用した場合,都市部通勤路線の走行パターンによるインバータ損失試算では,当社従来比で約30%の損失低減が可能となる。今回開発したハイブリッドSiCモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置が,当社で世界に先駆けて^(注1)製品化されている。 (注1) 2011年10月3日現在,当社調べ



1.7kV/1.2kAデュアルハイブリッドSiCモジュールの鉄道車両用インバータへの適用

絶縁基板1枚には、新規に開発したSi-IGBTが4チップとSiC-SBDが8チップ搭載され、絶縁基板2枚で1.2kA回路が構成されている。モジュール1台は、1.2kAが2回路のデュアル構成となっている。このハイブリッドSiCモジュールを鉄道車両推進制御用インバータ装置に適用した。

1. まえがき

近年エネルギーを効率的に利用する観点から,電鉄,電 力等の産業市場における電力変換装置に用いられるパワー 半導体モジュールに対して,電力の低損失化,小型化,高 性能化の要求が高まっている。従来この分野では,Siの IGBTとダイオードを搭載したHVIGBTモジュールが広く 使用されているが,新たな半導体材料として,低損失で高 温動作が可能なSiCが注目されている。

今回当社は、新たに開発したSiCのSBDとSi-IGBTを搭載した1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュールを開発したので、これについて述べる。

2. 1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュールの構造

2.1 SiC-SBDとSi-IGBTチップ

Siと比較しSiCは高温動作が可能で,さらに,絶縁破壊 電界強度がSiの約10倍でチップ厚さを薄くすることができ, オン電圧の低減が可能である。これによって,従来の高耐 圧応用ではオン電圧が大きく,採用できなかったSBDの 使用が可能となる。SBDはユニポーラデバイスで,従来 のSiダイオードでの逆回復動作が存在せず,ダイオードの ターンオフ損失の大幅な低減が可能となるほか,ダイオー ドの逆回復電荷がないためIGBTのターンオン損失も低減 する。

図1に1.7kV耐圧のSiC-SBDの外観を示す。チップサイズは6.58×6.58(mm)で、耐圧を保持する終端構造は、シミュレーションによって均一な電界分布が得られるように設計したフィールドリミッティングリング構造を適用し、室温で1.9kV以上の逆耐圧を得ている。

さらに、Si-IGBTも、従来のSi量産品"Nシリーズ"に採 用の第5世代IGBTに対し、裏面構造と表面パターンを最 適化した第6世代IGBTを新規に開発し(図2),ターンオ フ損失の低減も実現した。

2.2 モジュール構造

図3に今回開発した1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジ ユールの外観を示す。図4に示すモジュール回路図のとお



図1. SiC-SBDチップ



り、モジュール1台の中に定格電流1.2kAの回路が2個搭載されているデュアル構成となってる。パッケージのベース板サイズや取付けねじ位置,電極配置等のアウトラインは,既存の同一定格のSi製量産品Nシリーズと同一となっており,互換性を持たせている。

図5にモジュールの内部構造を示す。モジュール1台は、 図6に示す絶縁基板4枚から構成されている。片側1.2kA の回路は、2枚の絶縁基板からなり、SiC-SBDチップが 16個、Si-IGBTチップが8個で構成されている。既存の 同一定格のSi量産品と比較し、Si-IGBTチップの大きさと 搭載個数は同一だが、SiC-SBDチップは現状のSiCウェー ハでの大面積チップの良品取れ率が低いため、サイズが小 さく搭載個数が多くなっている。生産効率を考えた場合、 SiCウェーハの改善が望まれる。

当社の既存の同一定格のSi量産品Nシリーズの最大動作 温度は125℃だが、今回開発したハイブリッドSiCモジュ ールは、新しいチップや高耐熱ゲルを採用するとともに、 放熱に適したチップ配置とすることによって、最大動作温 度150℃を可能としている。また、SiC-SBDチップサイズ は小さく、並列数は多くなっているが、チップ配置やワイ ヤ配線、電極構造の最適化によって、1.2kAデュアルの大 容量の電流通電やスイッチング動作を可能としている。



図3.1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュールの外観







図5. モジュールの内部構造

図6. 絶縁基板

3. 1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュールの特性

3.1 静特性

1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュールのIGBT部のオ ン特性の実測値を図7に、ダイオード部のオン特性を図8 に示す。IGBTとSiC-SBDともに、接合温度25℃より 150℃の方がオン電圧が高く、多並列チップを搭載する大 容量モジュールで電流バランスにとり有利となっている。 3.2 スイッチング特性

図9にダイオードの動作温度150℃での定格ターンオフ 波形を示す。従来のSiダイオードはバイポーラデバイスで、 逆回復電流があったが、SBDの場合逆回復電荷がなく、 オフ時のコンデンサの充放電現象が見られるだけで、従来 のダイオードのリカバリー損失に相当するダイオードのタ ーンオフ損失は、従来が125℃で0.22J/Pであるのに対し 150℃で0.01J/Pと95%以上低減している。

図10に動作温度150℃でのIGBTの定格ターンオン波形



図9.ダイオードのターンオフ波形

を示す。先に述べたとおりSiC-SBDはユニポーラデバイ スで、従来のSiダイオードにあった逆回復電荷がなく、 IGBTのターンオン損失も大幅に減少している。従来Si素 子が125℃動作で0.40J/Pに対し、ハイブリッドモジュール は150℃動作で0.18J/Pと55%程度低減している。

図11にIGBTのターンオフ波形を示す。新規IGBTチッ プの採用によって、従来素子は125℃の定格電流でのオン 電圧(V_{CE(sat})2.60Vでターンオフ損失0.37J/Pであったのに 対し、ハイブリッドモジュールは150℃動作でオン電圧 2.30Vで、オン電圧が0.3V低減しているにもかかわらず、 ターンオフ損失は0.34J/Pと同等以下となっている。IGBT のオン電圧とターンオフ損失はトレードオフの関係にあり、 今回開発したIGBTチップはターンオフ損失が従来のIGBT と同等の場合、V_{CE(sat})は約20%低減している。

今回開発したハイブリッドSiCモジュールの主要特性実 測値の比較を表1に示す。同一電流定格の従来のSi量産品 と比較すると,顕著な損失低減が達成されている。



図10. IGBTのターンオン波形



図11. IGBTのターンオフ波形

表1. 主要特性比較

項目	従来Si品(Tj=125℃) (Si-IGBT, Diode)	開発品(Tj=150℃) (Si-IGBT, SiC-SBD)
IGBTオン電圧	2.60V	2.30V
IGBTターンオン損失	0.40J/P	0.18J/P
IGBTターンオフ損失	0.37J/P	0.34J/P
ダイオードオン電圧	2.30V	2.30V
ダイオードオフ損失	0.22J/P	0.01J/P

1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュール・長谷川・森下・松野・中山・林田



図12. 遮断耐量波形



図13. 短絡耐量波形

3.3 スイッチング耐量

今回最大動作温度を150℃としているが,新規開発のチ ップセットの採用とパッケージ内部構造の最適化によって, 高温でも十分な遮断耐量や短絡耐量を保持している。

図12は動作温度150℃での遮断試験の一例で,定格電流の3倍以上である4.100Aも問題なく遮断可能である。

図13は同じく動作温度150℃での短絡試験の一例を示し、 標準のゲート電圧15Vに対し、短絡電流がより大きく耐量 的に厳しい18Vのゲート電圧でも10µsの短絡耐量を保持し ている。

3.4 インバータ損失

ハイブリッドSiCモジュールを鉄道車両の電動機駆動用 インバータに適用した場合,都市部通勤路線の走行パター ンによるインバータ損失試算によると,従来のSiパワーモ ジュール適用のインバータと比較して,発生損失は約30% 低減することが可能となる(図14)。



4. む す び

当社は、SiC-SBD搭載の1.7kV/1.2kAデュアルの大容 量ハイブリッドSiCモジュールを開発した。パッケージア ウトラインは従来のSi量産品Nシリーズと互換とし、新た に開発したSi-IGBTとSiC-SBDチップを搭載するととも に、パッケージ内部構造も見直し、最大動作温度150℃の 1.7kV/1.2kAデュアルの大容量ハイブリッドSiCモジュー ルを実現した。

従来のSiモジュールに対し,ダイオードのターンオフ損 失は95%以上低減し,IGBTのターンオン損失は55%の損 失低減を実現した。また,IGBTのオン電圧も,同一ター ンオフ損失の場合で約20%の低減を実現した。鉄道車両用 インバータに適用した場合,実際の都市部通勤電車の走行 パターンによるインバータ損失試算では,従来のSiモジュ ール適用のインバータに対し約30%の損失低減が可能とな る。

当社で、今回開発したハイブリッドSiCモジュールを適 用した鉄道車両用インバータ装置が、世界に先駆けて製品 化されている。今後も本格的なハイブリッドSiCモジュー ルの適用に向けた開発を進め、社会インフラの省エネルギ ー化に貢献していく。

参考文献

 (1) 中山 靖, ほか:SiC-SBD適用インバータによる鉄道
 車両用電動機駆動評価,電気学会全国大会講演論文集, No.4, 139 (2010)