

## 超小型・高信頼性 All-SiC モジュール

Ultra-Compact, High-Reliability All-SiC Module

仲野 逸人 NAKANO Hayato

日向 裕一郎 HINATA Yuichiro

堀尾 真史 HORIO Masafumi

SiC デバイスは、高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現する優れたデバイス特性を持っている。富士電機の All-SiC モジュールは、半導体素子接合と樹脂封止構造が特徴である。従来製品と比較して、フットプリントは 50% 小型化し、インダクタンスは 75% 低減し、スイッチング損失は約 35% 低減した。また、大容量化においてモジュールを 4 台並列接続した場合でも、スイッチングが可能であることを実証した。パワーサイクルだけでなく高温高湿の状態においても従来製品以上の信頼性を確認した。

SiC devices have excellent characteristics that realize high blocking voltage, low power dissipation, high-frequency operation and high-temperature operation. Fuji Electric's all-SiC modules feature direct bonding layout for semiconductors and a plastic molding structure. Compared with the conventional product, All-SiC modules have achieved a reduction of 50% in footprint, 75% in inductance and approximately 35% in switching loss. Moreover, for using high power drives, switching was demonstrated to be available even if four modules are connected in parallel. All-SiC modules were verified to have higher reliability in high temperature and humidity, in addition to power cycling, than the conventional products.

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス分野においてパワーモジュールは、高効率の電力変換技術として中核的な役割を担っている。近年注目を浴びている太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー分野をはじめ、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の車載分野など、さまざまな分野で使用されている。

しかしながら、現在のパワー半導体の主力である Si デバイスは性能の限界に近づきつつあることから、SiC (炭化けい素)、GaN (窒化ガリウム) などのワイドバンドギャップ半導体の製品開発が活発に行われている<sup>(1)</sup>。中でも SiC デバイスは、高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現する優れたデバイス物性を持っている。

本稿では、SiC デバイスの SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を搭載した All-SiC モジュールについて述べる。

## 2 All-SiC モジュールの特徴

All-SiC モジュール向けに開発した新構造と、Si モジュール用の従来構造における断面の比較を図 1 に示す。新構造では、半導体素子 (パワーチップ) の表面接合においてパワー基板によって接続を行い、AMB 基板<sup>(注)</sup>に厚銅基板を使用することで放熱性能を向上している。構成材の線膨張係数を最適化し、モジュール内部の発生応力を低減した樹脂封止構造とすることで高信頼性を達成している。図

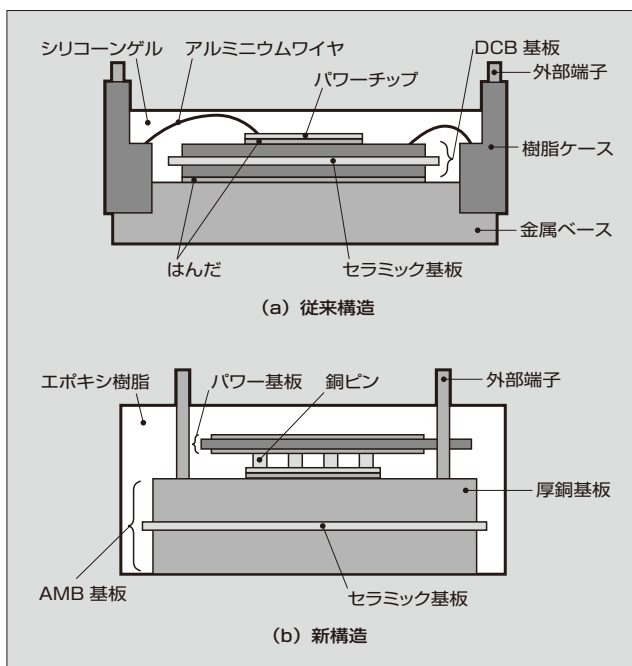


図 1 従来構造と新構造の断面図

2 に、1,200 V/100 A 定格の All-SiC モジュールと、それと同定格の Si モジュールの外観を示す。表 1 に、両者についてフットプリントサイズとインダクタンスを比較し、新構造による低減効果を示す。All-SiC モジュールは Si モジュールに比べてフットプリントサイズが 50% 小型化し、インダクタンスが 75% 低減した。All-SiC モジュールに適用した新構造により、SiC デバイスの特徴を最大限引き出すことができる。

〈注〉AMB 基板:セラミック基板に厚銅基板を AMB (Active Metal Brazing) 法で接合した放熱用絶縁基板である。

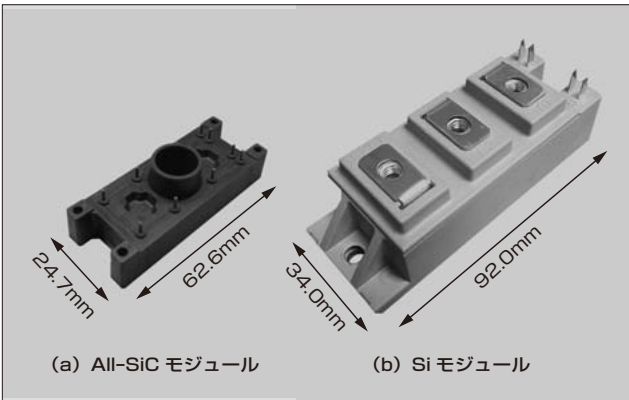


図2 All-SiC モジュールと Si モジュール

表1 All-SiC モジュールの Si モジュールに対する比較

パッケージ構造特性	低減率 (従来構造と新構造の比較)
フットプリント	50%
PN間インダクタンス	75%
ゲートインダクタンス	75%

### ③ All-SiC モジュール搭載の太陽光 PCS

#### 3.1 All-SiC モジュール搭載の効果

開発を進めている All-SiC モジュールは、超小型であるだけでなく高速スイッチングといった特徴がある。All-SiC モジュールによって回路を高周波化すると付随するリアクトルなどの周波数特性を持つ部品のサイズを小さくできることから、システム全体として小型化のメリットがある。太陽光発電向けパワーコンディショナ (太陽光 PCS) においても、これらの特長を生かすことで小型化を実現している。

特に高周波動作の場合、All-SiC モジュールは発生損失が小さく、従来の Si モジュールのように並列数を増やす必要がない。図 3 に Si デバイスと SiC デバイスの発生損失のスイッチング周波数依存性を示す。同じ構造の 2 in 1

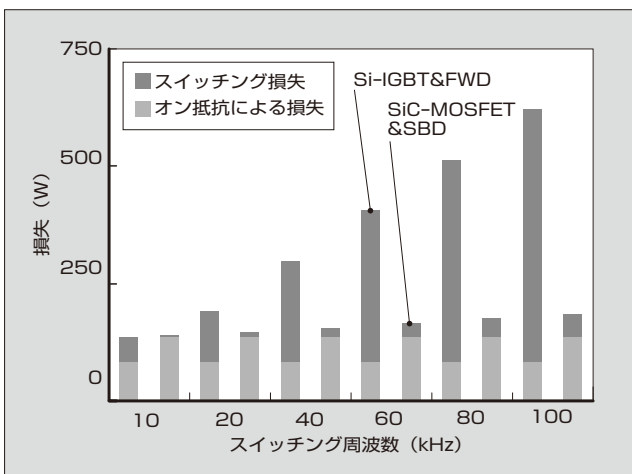


図3 Si デバイスと SiC デバイスの発生損失のスイッチング周波数依存性

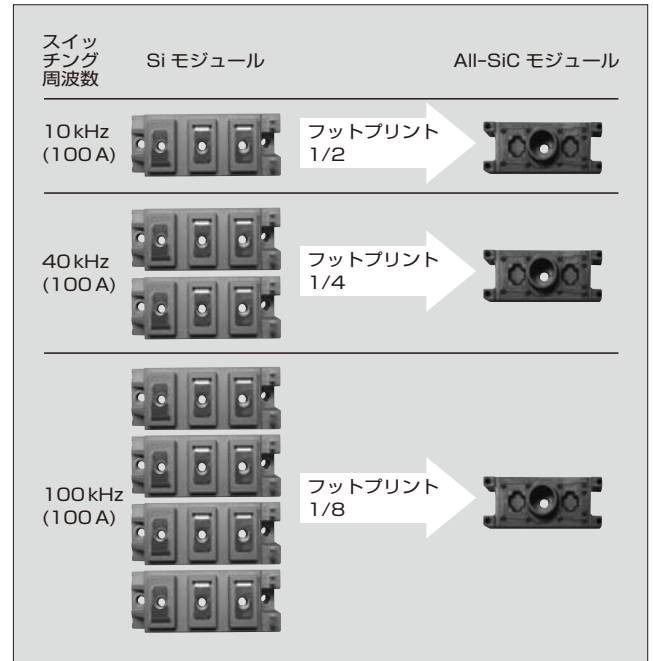


図4 高周波用途における All-SiC モジュールの効果

モジュールに、Si デバイスと SiC デバイスをそれぞれ搭載した場合の発生損失について、スイッチング周波数ごとに試算した結果である。Si デバイスで構成されたモジュールは、スイッチング周波数が上昇するとスイッチング損失が増加する。一方、SiC デバイスで構成されたモジュールは、スイッチング周波数が上昇してもスイッチング損失の増加が少ないので、トータル損失が低い。

図 4 に、高周波用途における All-SiC モジュールの効果を示す。発生損失を同等とした場合の Si モジュールおよび All-SiC モジュールのそれぞれの数を比較したものである。例えば、スイッチング周波数 10 kHz では Si モジュールと All-SiC モジュールは同程度の損失である。この場合、All-SiC モジュールのフットプリントは Si モジュールの 1/2 である。スイッチング周波数が 40 kHz の場合、Si モジュールの損失は、All-SiC の 2 倍であるため Si モジュール 2 個と All-SiC モジュール 1 個がほぼ同等の損失になり、フットプリントが 1/4 になる。スイッチング周波数 100 kHz の場合は、効果はさらに大きくなり、フットプリントは 1/8 になる。

#### 3.2 スwitching 評価

従来構造のモジュールに All-SiC モジュールと同一のデバイスを搭載し、従来構造と新構造におけるスイッチング特性の比較を行った。スイッチング特性の評価条件は、 $V_{ds}$  が 600 V、 $I_d$  が 100 A、 $V_g$  が +15/-5 V、 $R_g$  が 6.8  $\Omega$ 、 $T_j$  が 200  $^{\circ}\text{C}$  である。

図 5 に、従来構造と新構造のターンオフ時に発生するサージ電圧の温度依存性を示す。新構造は、従来構造よりもサージ電圧が約 50 V 低減した。どちらの構造も SiC デバイスを搭載しているため、室温と 200  $^{\circ}\text{C}$  でのサージ電圧の差は 10 V 程度と非常に小さい。

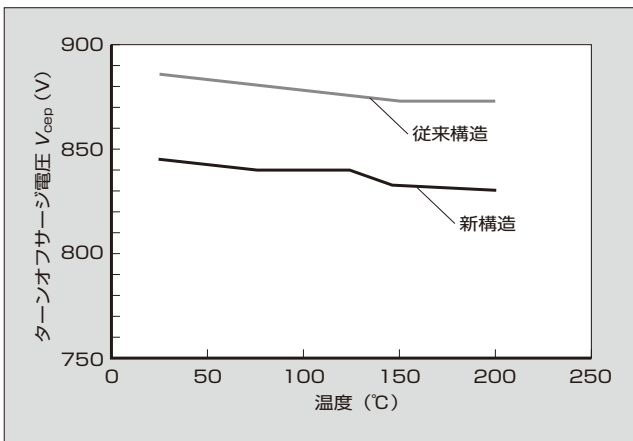


図5 ターンオフ時のサージ電圧の温度依存性

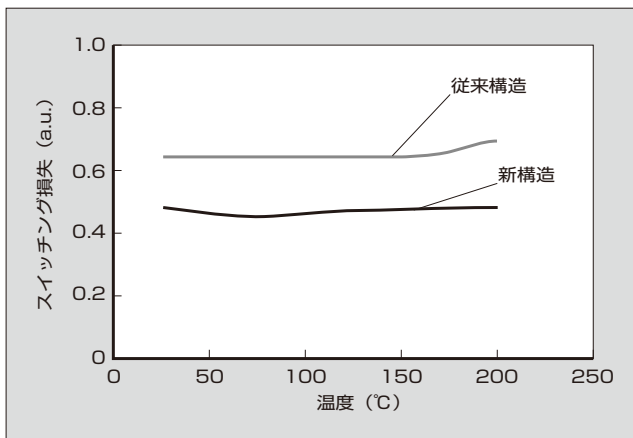


図6 スイッチング損失の温度依存性

また、図6に従来構造と新構造のスイッチング損失の温度依存性を示す。スイッチング損失は、ターンオン損失、ターンオフ損失および逆回復損失の合計である。評価条件は、ターンオフ時のサージ電圧の評価と同じである。どちらの構造もSiCデバイスを搭載しているため、温度依存性が小さい。新構造のスイッチング損失は低インダクタンス性の効果により、従来構造よりも約35%低くなった。

### 3.3 連続動作

All-SiC モジュールを太陽光 PCS のインバータ部に組み込んだ。図7にインバータ部の回路構成を示す。従来の2レベル制御よりもシステムの小型化や高効率化ができる3レベル制御を採用し、中間素子には周波数が20kHzの双方向スイッチング素子を適用している。図8に示すとおり、太陽光 PCS の効率は最大で約99%を達成した。太陽光 PCS 効率とは、ソーラーパネルで発電された電力を所望の電圧に変換する際の効率である。また、モジュールサイズが小さくなったことから、太陽光 PCS の筐体(きょうたい) 体積を従来の約75%に小型化することができた。

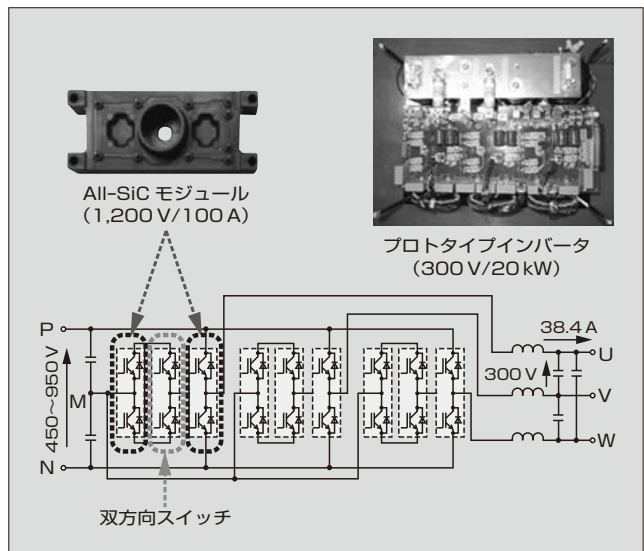


図7 太陽光 PCS のインバータ部の回路構成

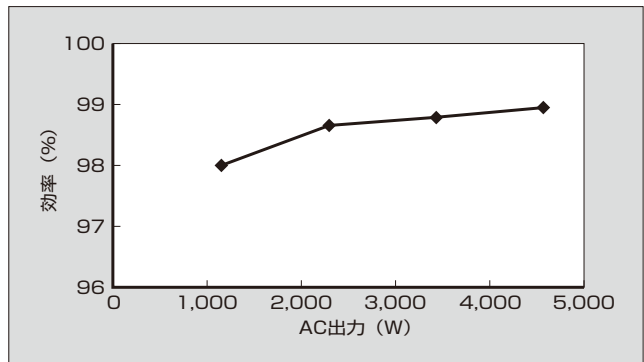


図8 太陽光 PCS の効率

## 4 All-SiC モジュールの大容量化

All-SiC モジュールの今後の製品戦略として、大容量化が挙げられる。チップサイズを大きくすることで大容量化が図れるが、SiC 基板の欠陥密度が依然高く、チップ面積を大きくすると歩留りが低下するという問題がある。そこで、チップを大型化せずにチップを並列に接続することで1モジュール当たりの出力を上げている。いっそうの大容量化を行うためには、チップを並列に接続したモジュールをさらに並列に接続する。その際、モジュールを接続するブスバーなども考慮して低インダクタンスにする設計が重要である。

モジュールを並列に接続し大容量化した場合のスイッチング評価を実施した。All-SiC モジュールは1,200V/100Aモジュールを4台並列に接続することにより、1,200V/400Aモジュールを構成している。評価条件は、 $V_{ds}$  が600V、 $I_d$  が400A、 $V_g$  が+15/-5V、 $R_g$  が9.7Ωである。大容量モジュールでは、出力が大きいためターンオフサージ電圧が容易に素子耐圧を超え、破壊してしまうという問題がある。開発を進めている大容量モジュールでは、All-SiC モジュールが持つ低インダクタンス性を損な

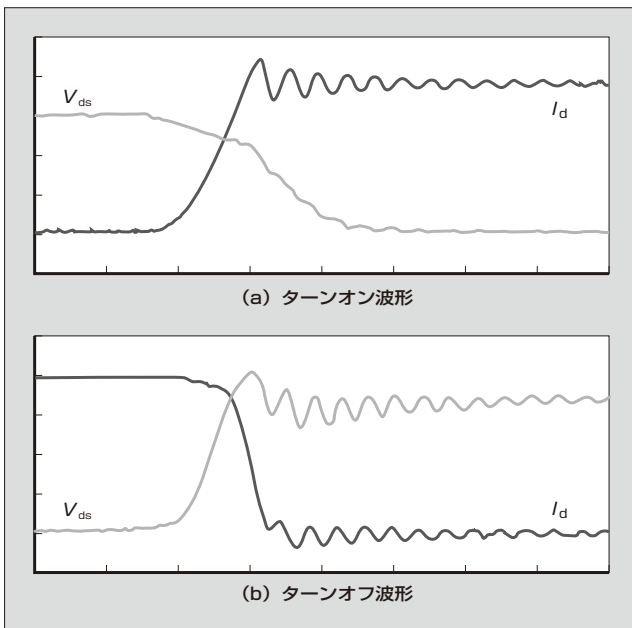


図9 大容量モジュールのスイッチング波形

わないようにブスバーでモジュールを並列に接続することで、この問題を解決している。図9に大容量モジュールのスイッチング波形を示す。ターンオン波形とターンオフ波形において、発振や過大サージ電圧などといった不具合は認められない。All-SiC モジュールを4台並列に接続した場合でも、スイッチングが可能であることを実証した。

## 5 All-SiC モジュールの信頼性

All-SiC モジュールにおいてパワーサイクル試験やヒートサイクル試験、高温高湿逆バイアス試験などを行い、従来のSiモジュール製品以上の信頼性があることを確認した。

パワーサイクル試験では、 $T_{jmax}$  が  $200^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_j=175^{\circ}\text{C}$ ) の場合、新構造は従来構造より10倍以上の<sup>(3)</sup>パワーサイクル耐量があることが分かった。

次に、高温高湿逆バイアス試験について述べる。新構造は樹脂でモールドしている構造であり、高湿環境下において樹脂が水分を吸収し、モジュール内部へ侵入する。この結果、耐圧・ゲート構造の故障が懸念されるため、高温高湿環境における信頼性の確認が不可欠である。

図10に高温高湿逆バイアス試験結果(漏れ電流)を示す。温度  $85^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度  $85\%$  の高温高湿環境下において逆バイアス電圧  $960\text{V}$  およびゲート電圧  $V_g$  に  $0\text{V}$  を印加し、累積  $3,000$  時間まで継続した信頼性試験の結果である。 $3,000$  時間とは、高温高湿環境負荷試験において、富士電機の基準の3倍まで確認したものである。任意時間においてサンプル ( $N=5$ ) を取り出し、逆バイアス電圧  $V_{ds}$  に  $1,200\text{V}$  を印加したときの漏れ電流  $I_{DSS}$  を評価し、特性異常の有無を確認している。 $3,000$  時間という長時間にわたって逆バイアスを印加した状態で高温高湿環境に放置しても、漏れ電流の増大は確認されず初期値と同等であるこ

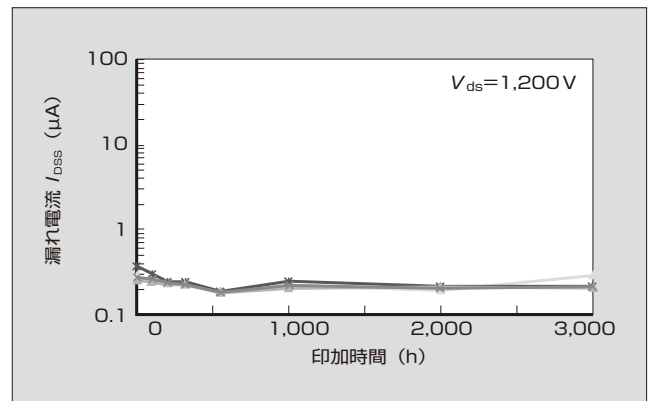


図10 高温高湿逆バイアス試験結果(漏れ電流)

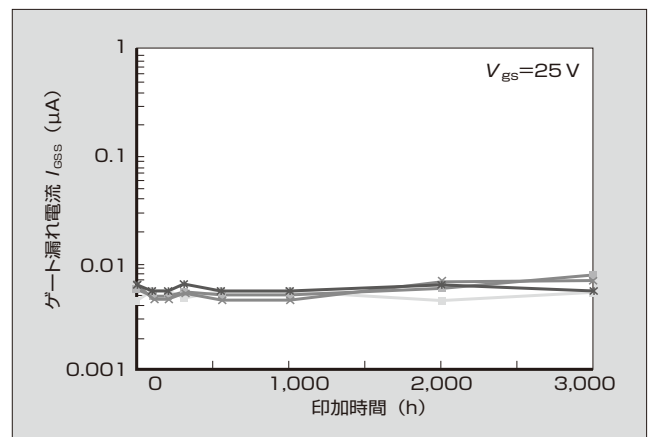


図11 高温高湿逆バイアス試験結果(ゲート漏れ電流)

とが分かる。

同様の信頼性試験におけるゲート漏れ電流  $I_{GSS}$  の推移を図11に示す。 $I_{GSS}$  の評価条件は、 $V_{gs}$  が  $+25\text{V}$  印加時のゲート漏れ電流である。 $I_{GSS}$  の評価においても顕著な増加が見られず安定していることから、高温高湿環境におけるゲート構造の劣化も認められない。結果として、All-SiCモジュールに適用される樹脂または内部構造は、高湿下において従来製品と同等以上の十分な信頼性を持っているといえる。

## 6 あとがき

高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現するSiCデバイスの特徴を最大限発揮させ、高信頼性を備えたAll-SiCモジュールの開発を進めている。このAll-SiCモジュールを適用することにより太陽光発電向けパワーコンディショナの小型化・高効率化が可能となる。特に高周波動作において、小型化の特徴を発揮できる。今後も、大容量化などを通じて他のアプリケーションへの適用範囲を広げ、SiCデバイスの性能を最大限に活用することでパワーエレクトロニクス技術の発展に貢献する所存である。

## 参考文献

- (1) Prof. B. Jayant Baliga. "The Role of Power Semiconductor

Devices in Creating a Sustainable Society”. Plenary Session  
APEC 2013.

- (2) 松本康ほか. SiCデバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.255-259.
- (3) 梨子田典弘ほか. SiCパワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.403-407.



**仲野 逸人**

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



**日向 裕一郎**

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



**堀尾 真史**

パワー半導体パッケージング構造の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。電気学会会員。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。