

# 新型パッケージを採用した産業用 RC-IGBT モジュール

## RC-IGBT Module with New Compact Package for Industrial Use

高橋 美咲 TAKAHASHI, Misaki

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

堀尾 真史 HORIO, Masafumi

富士電機は、IGBT と還流ダイオード FWD を一体化した産業用 RC-IGBT（逆導通 IGBT）を開発し、低熱抵抗と高信頼性を両立した新型パッケージと組み合わせることにより、IGBT モジュールの大幅な小型化とパワー密度向上を達成した。RC-IGBT は、従来の IGBT+FWD と同等の低損失化を実現し、熱抵抗の 30% 低減を達成した。RC-IGBT と新型パッケージを組み合わせた新型モジュールは、従来モジュールの 42% の設置面積で、ほぼ同等のインバータ損失と、大幅な IGBT 接合温度の低減を可能にする。また、同じ IGBT 接合温度で比較した場合には、58% 大きい出力電流で動作が可能である。

Fuji Electric has developed an reverse conducting IGBT (RC-IGBT) for industrial use and it integrates an IGBT and freewheeling diode (FWD). We have combined it with a new package that achieves both low thermal resistance and high reliability to successfully realize a significant miniaturization of the IGBT module and power density improvement. The RC-IGBT has reduced power loss to a level equivalent to that of the conventional IGBT+FWD and achieved a reduction in thermal resistance of 30%. The new module, combining the RC-IGBT and new package, which has a footprint 42% that of the conventional module, realizes an almost equivalent inverter loss and a significant reduction in the IGBT junction temperature. A comparison based on the same IGBT junction temperature shows that it operates with a 58% larger output current.

### 1 まえがき

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化を防止する観点から、エネルギー効率の改善と CO<sub>2</sub> の削減が求められている。その重要なアイテムの一つとして、インバータの需要が拡大している。インバータに用いるパワー半導体として、産業用、民生用、自動車用および再生可能エネルギーなどの広い分野で、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールが用いられている。

富士電機の IGBT モジュールは、1988 年に製品化して以来、多くの技術革新により大幅な小型化を達成し、インバータの小型化とコストダウンに貢献してきた。しかし、IGBT モジュールのさらなる小型化は、パワー密度が高まることによる動作温度の上昇と信頼性の低下を招く危険性がある。高い信頼性を保ったまま小型モジュールを実現するためには、IGBT チップおよびパッケージの技術革新が必要である。

富士電機では、IGBT と還流ダイオード FWD (Free Wheeling Diode) を一体化した産業用 RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT<sup>(1)~(4)</sup>) を開発し、低熱抵抗と高信頼性を両立した新型パッケージと組み合わせることにより、高い信頼性を持つ小型モジュールを実現した。<sup>(5)~(8)</sup>

### 2 RC-IGBT と新型パッケージの特徴

#### 2.1 RC-IGBT の特徴

##### (1) 適用回路の部品点数低減と装置の小型化

図 1(a)に、PWM (Pulse Width Modulation) 制御方式インバータの主回路である、ハーフブリッジインバータ回路を示す。従来の IGBT はコレクターエミッタ方向にのみ通電するスイッチングデバイスであり、逆方向の電流を

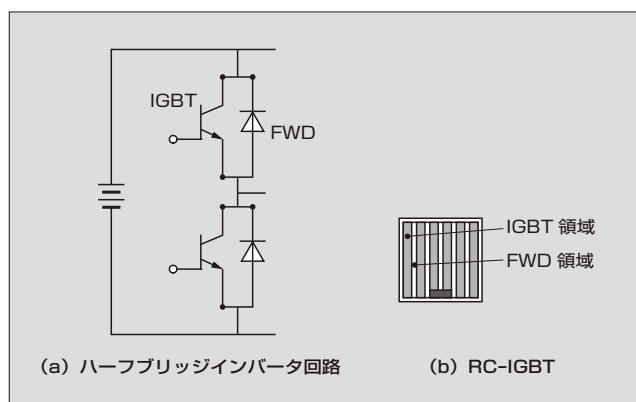


図 1 ハーフブリッジインバータ回路と RC-IGBT

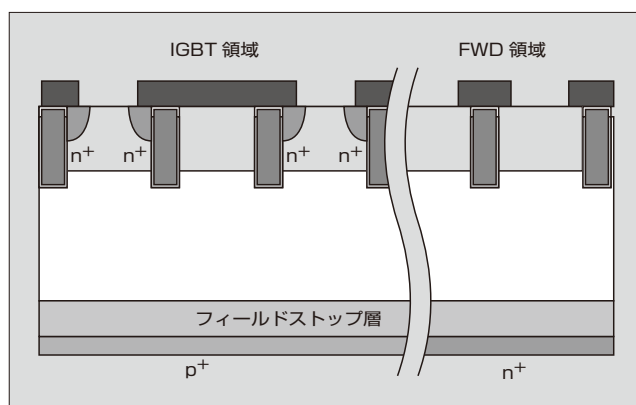


図 2 RC-IGBT の断面図

流すために FWD を必要としていた。今回開発した RC-IGBT は、図 1(b)に示すように FWD を内蔵することで逆方向の電流を流すことができる IGBT 素子であり、適用回路の部品点数の低減と、装置の小型化を可能にする。

RC-IGBT は、図 2 に示すようにトレンチゲートー薄

ウェーハ型の IGBT であり、富士電機の最新製品である第 6 世代 IGBT 「V シリーズ」に基づいている。製造プロセスは従来の IGBT とほぼ同じであり、裏面の p 層 /n 層を形成するための工程と、ライフタイム制御工程を備える。

(2) 出力特性とスイッチング波形

RC-IGBT の出力特性を図 3 に示す。RC-IGBT は、1 チップで順方向 (IGBT) と逆方向 (FWD) の両方に電流を出力することができる。ライフタイム制御量が異なる三つの RC-IGBT を用意し、A、B、C として出力特性を比較した。制御量が小さい A の方が、IGBT 動作と FWD 動作ともに動作抵抗が小さくなる。

RC-IGBT のターンオフ波形を図 4 に、ターンオン波形を図 5 に、逆回復波形を図 6 に示す。従来はスイッチング素子として IGBT、還流素子として FWD を用いているのに対し、RC-IGBT ではスイッチング素子、還流素子ともに RC-IGBT だけでスイッチングを行っている。RC-IGBT (B) は従来の IGBT+FWD とほぼ同等のスイッチング波形であり、RC-IGBT 同士の組み合わせにより従来

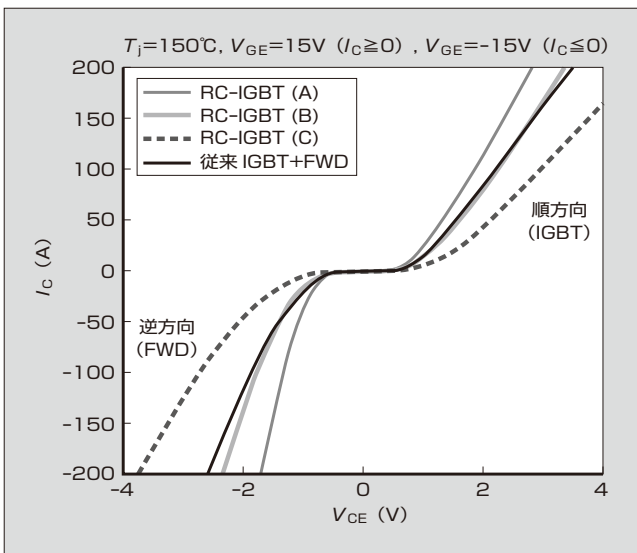


図 3 RC-IGBT の出力特性

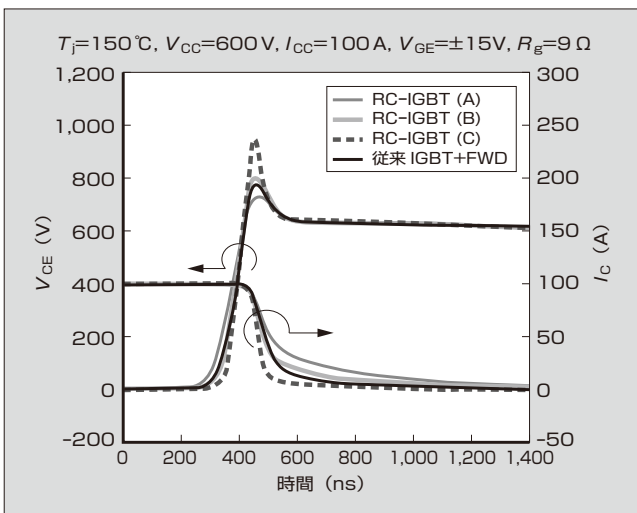


図 4 RC-IGBT のターンオフ波形

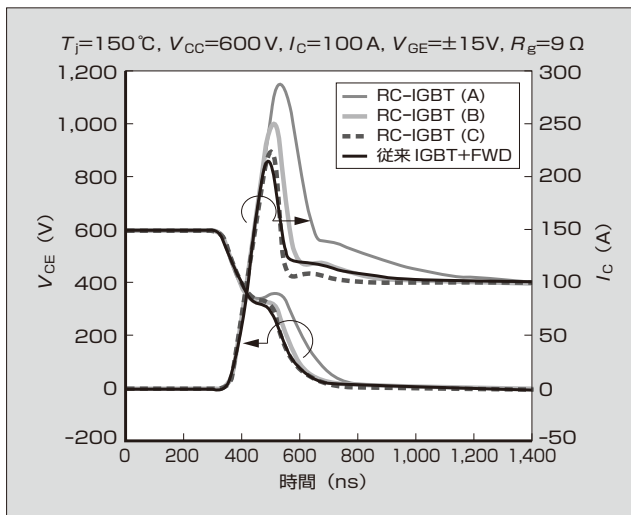


図 5 RC-IGBT のターンオン波形

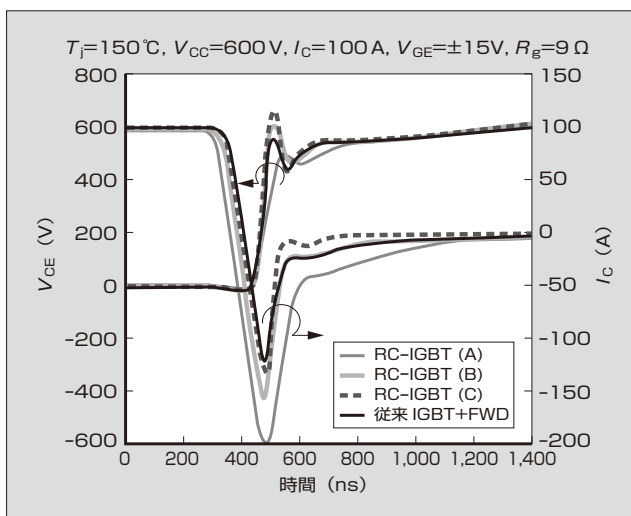


図 6 RC-IGBT の逆回復波形

と同様のスイッチング動作が可能である。また、ライフタイム制御量が大きい C が、ターンオフ時の IGBT テール電流ならびに逆回復時の FWD 逆回復電流が小さくなっている。RC-IGBT の IGBT 損失トレードオフを図 7 に、FWD 損失トレードオフを図 8 に示す。RC-IGBT は、従来の IGBT および FWD と同等の損失トレードオフ特性を持っており、またライフタイム制御量により、低導通損失の A から低スイッチング損失の C までトレードオフの調整が可能である。

(3) 熱抵抗  $R_{th(j-c)}$  の低減

表 1 に、RC-IGBT のチップ面積と熱抵抗  $R_{th(j-c)}$  を示す。活性面積を、従来の IGBT および FWD (定格 100 A) の合計と同等にした場合、従来は IGBT および FWD は別々のチップであったのに対し、RC-IGBT は一つのチップ内で共通のエッジ構造となるため、チップ面積では従来と比較して 9% 低減する。また、RC-IGBT は図 1 に示したように、IGBT 領域と FWD 領域がストライプ状に並び、この間隔が数百  $\mu\text{m}$  程度と狭いため、IGBT 動作時にも FWD 領域を含めたチップ全体から放熱される。すなわち、

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

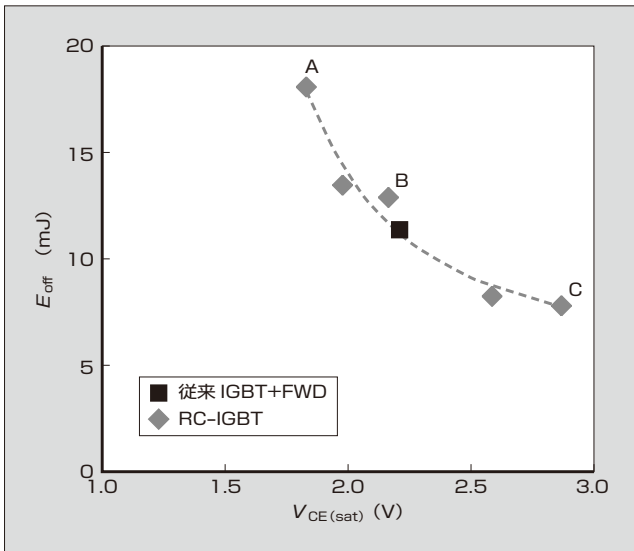


図7 RC-IGBT の IGBT 損失トレードオフ

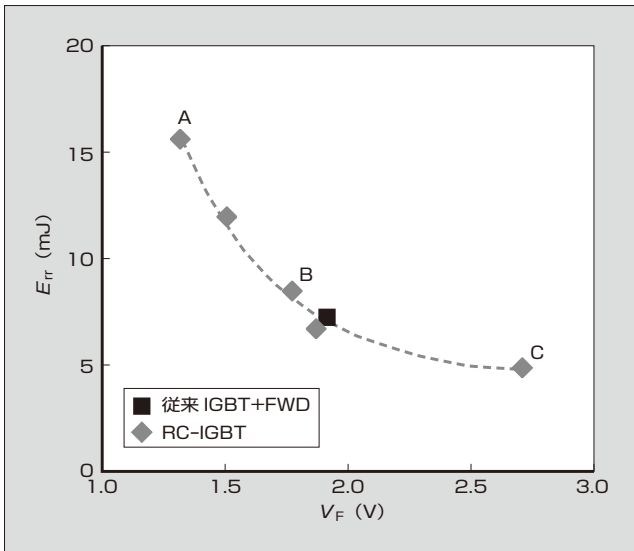


図8 RC-IGBT の FWD 損失トレードオフ

表1 RC-IGBT のチップ面積と熱抵抗

チップ	従来 IGBT+FWD	RC-IGBT
定格	1,200V 100A	1,200V
活性面積 (a.u.)	IGBT : 0.64, FWD : 0.36 (合計 : 1.00)	1.00
チップ面積 (a.u.)	IGBT : 0.62, FWD : 0.38 (合計 : 1.00)	0.91
熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ (K/W)	IGBT : 0.24, FWD : 0.36	IGBT : 0.17 FWD : 0.18

IGBT と FWD がそれぞれ別のチップである従来と比較して放熱面積が拡大するので、IGBT 動作時に 30%、FWD 動作時に 59% の  $R_{th(j-c)}$  を低減した。

## 2.2 新型パッケージの特徴

### (1) 設置面積の低減

図9に、新型パッケージの断面図を示す。従来は、ワイヤボンディングと DCB (Direct Copper Bonding) 基

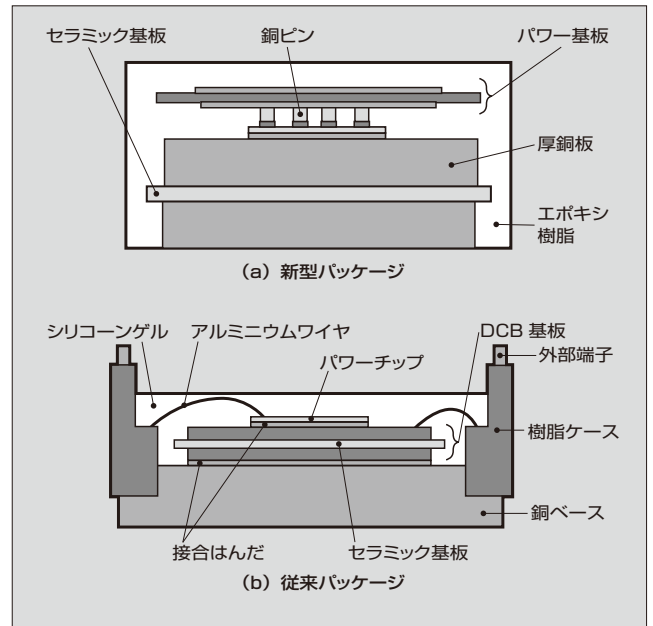


図9 新型パッケージの断面図

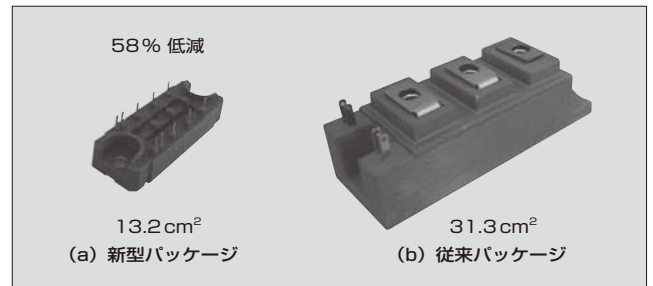


図10 新型パッケージの設置面積 (1,200V/100A)

板 (絶縁基板) 上の銅パターンによってチップと各端子間の配線を行っていたが、新型パッケージでは、ワイヤボンディングの代わりに銅ピン、DCB 基板上の銅パターン配線の代わりにチップ上部に配置されたパワー基板によって、チップと各端子間の配線を行っている。これにより、ワイヤボンディングエリアおよび銅パターンの面積を削減することができ、図10に示すように 58% もの設置面積の低減を実現した。

### (2) 熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ の低減

新型パッケージは DCB 基板の絶縁材料として、従来の  $Al_2O_3$  よりも熱伝導率の高い  $Si_3N_4$  を用い、さらに DCB 基板の両面を厚い銅ブロックとして、横方向に熱を拡散させることで実効的放熱面積を拡大した。これにより、同一チップ面積で比較して 55% の  $R_{th(j-c)}$  を低減した。

### (3) パワーサイクル寿命の向上

パワーサイクル寿命は、ボンディング接点と、チップ-DCB 基板間のはんだ層が熱サイクルによる熱応力で破壊することにより制約される。新型パッケージでは、従来のパッケージで適用していたワイヤボンディングを銅ピン構造に置き換えることで、ボンディング接点の弱点を解消した。また、従来のゲル封止に代えて、エポキシ樹脂封止を行うことで、銅ピン-チップ-DCB 基板全体を強く拘束

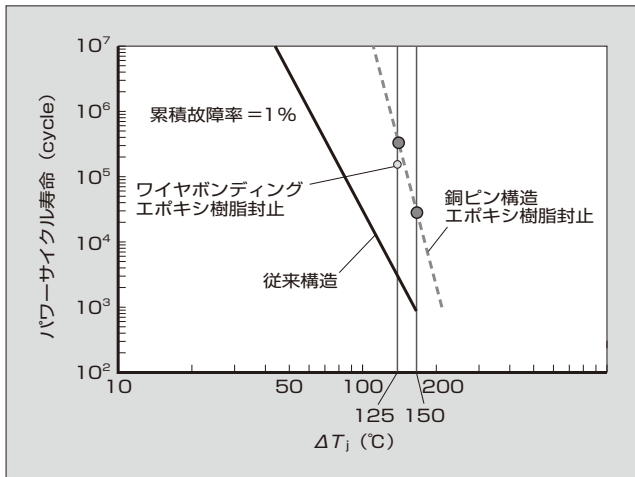


図 11 新型パッケージのパワーサイクル寿命

する。これにより、はんだ層にかかる熱応力（ひずみ）を緩和して、図 11 に示すように  $\Delta T_j=150^\circ\text{C}$  で比較した場合、20 倍以上のパワーサイクル寿命の向上を達成した。

### 3 インバータ損失と IGBT 接合温度

従来の IGBT+FWD と RC-IGBT、従来のパッケージと新型パッケージの性能を比較するために、インバータ損失と IGBT 接合温度  $T_j$  を比較した（図 12）。

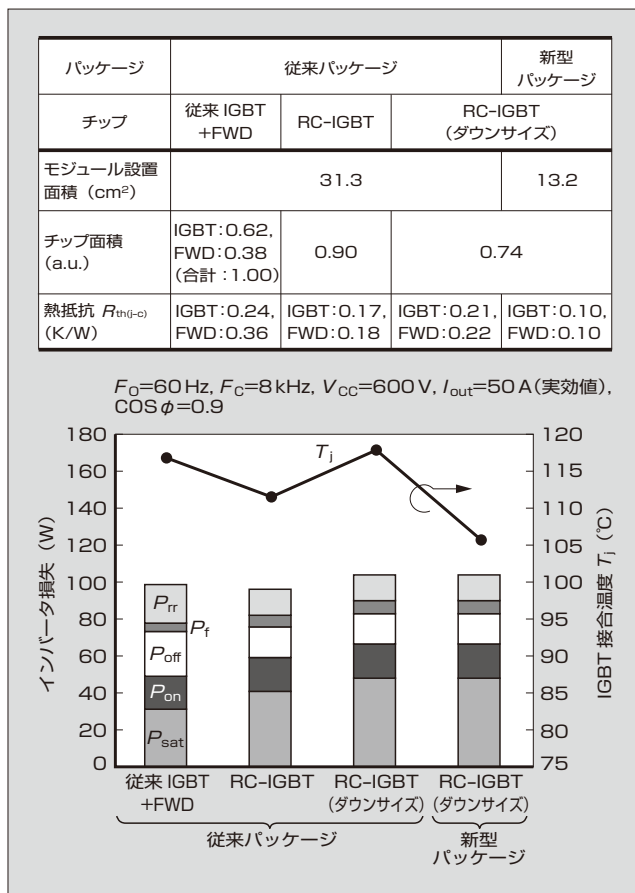


図 12 RC-IGBT のインバータ損失および IGBT 接合温度計算結果

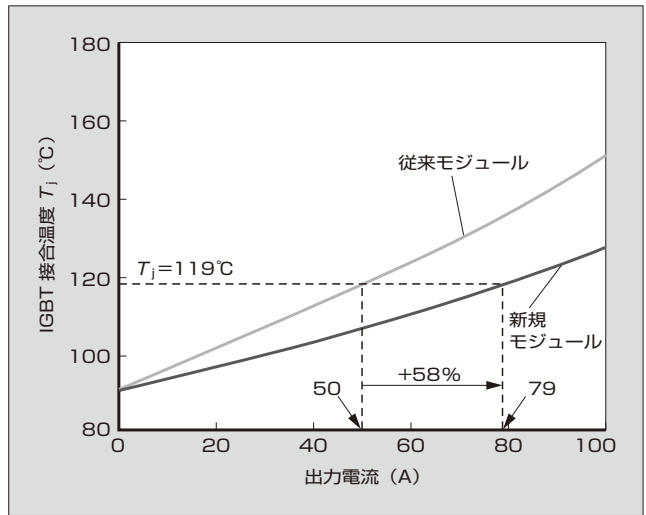


図 13 新規モジュールの  $T_j$

RC-IGBT と従来のパッケージを組み合わせた場合、RC-IGBT のインバータ損失は従来モジュールよりも 3% 低く、 $T_j$  は  $5^\circ\text{C}$  低減する。RC-IGBT は FWD 領域を含めたチップ全体から放熱されるため放熱面積が大きく、従来の IGBT よりも  $R_{th(j-c)}$  が 30% 低いため、 $T_j$  が低減できる。RC-IGBT は同一活性面積の場合、従来モジュールより  $T_j$  が低いので、その分チップ面積を縮小することができる。

チップ面積を 26% 低減した RC-IGBT は、従来モジュールとほぼ同等のインバータ損失と  $T_j$  を達成できる。すなわち、RC-IGBT は従来の IGBT+FWD に対し、同一パッケージで比較した場合に 26% のチップ面積縮小が可能であり、IGBT モジュールの小型化によりインバータ装置全体の小型化に貢献できる。

最後に、RC-IGBT と新型パッケージを組み合わせた新規モジュールについて検討を行った。RC-IGBT と新型パッケージの効果により、IGBT の  $R_{th(j-c)}$  が 62% 低減した。これにより、従来モジュールと同等のインバータ損失でありながら、 $11^\circ\text{C}$  以上の IGBT 接合温度が低下した。新規モジュールと従来モジュールの、出力電流と IGBT 接合温度の関係について図 13 に示す。 $T_j=119^\circ\text{C}$  で比較した場合、従来モジュールの  $I_{out}=50\text{A}$  (実効値) に対して、新規モジュールは  $I_{out}=79\text{A}$  (実効値) と、58% 出力電流を増大することができる。

### 4 あとがき

本稿では、ダイオード機能を一体化した RC-IGBT と、小型で低熱抵抗かつ高信頼性の新型パッケージについて述べた。これにより、インバータの小型化とコストダウンに大きく貢献することができると思う。今後も、IGBT チップおよびパッケージの技術革新を進め、省エネルギー社会の実現に貢献していく所存である。

### 参考文献

(1) Takahashi, H. et al. "1200 V Reverse Conducting IGBT".

Proceeding of ISPSD 2004. p.133-136.

- (2) Satoh, K. et al. "A New 3 A/600 V Transfer Mold IPM with RC (Reverse Conducting) -IGBT", Proceeding of PCIM Europe 2006.
- (3) H. Rüthing. et al. "600 V Reverse Conducting (RC-) IGBT for Drives Application in Ultra-Thin Wafer Technology", Proceeding of ISPSD 2007. p.89-92.
- (4) S. Voss. "Anode Design Variation in 1200-V Trench Field-stop Reverse-conducting IGBTs", Proceeding of ISPSD 2008. p.169-172.
- (5) Horio, M. et al. "New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices", Proceeding of PCIM Europe 2011.
- (6) Iizuka, Y. et al. "A Novel SiC Power Module with High Reliability", Proceeding of PCIM Europe 2012.
- (7) Ikeda, Y. et al. "Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-Density Packaging and High Reliability", Proceeding of ISPSD 2011. p.272-275.
- (8) Ikeda, Y. et al. "Ultra Compact and High Reliable SiC

MOSFET Power Module with 200°C Operating Capability", Proceeding of ISPSD 2012. p.81-84.



**高橋 美咲**

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。



**吉田 崇一**

パワー半導体素子の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。



**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。IEEE 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。