

# 第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール

## 7th-Generation “X Series” IGBT Module

川畑 潤也 KAWABATA, Junya

百瀬 文彦 MOMOSE, Fumihiko

小野澤 勇一 ONOZAWA, Yuichi

IGBT モジュールの市場において、近年、小型化、低損失化、高信頼性が強く求められている。これらの要求に応えるため、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを開発した。IGBT・FWD チップの大幅な損失低減および高放熱・高耐熱・高信頼性パッケージの開発により、約36%のフットプリント低減、約10%の電力損失低減、長期信頼性を実現した。また、高温動作時の特性や耐量を向上させたことで、連続動作の最大温度を従来の150℃から175℃に向上させた。これにより、出力電流の大幅な増加が可能となり、電力変換装置のさらなる小型化と高パワー密度化を実現した。

In recent years, the IGBT module market has been seeing increasing demand for compact modules with low loss and high reliability. In order to meet these demands, we have developed the 7th-Generation “X Series” IGBT Module. By significantly reducing the loss of IGBT and FWD chips and developing a package characterized by its high heat dissipation, high heat resistance and high reliability, we have reduced the module’s footprint by approximately 36% and power loss by approximately 10% and achieved long-term reliability. Furthermore, by enhancing its withstanding and characteristics during high-temperature operation, we increased the maximum temperature for continuous operation to 175℃, from the conventional temperature of 150℃. These enhancements have enabled the module to significantly increase output current, and this further increase the power density and miniaturizes the size of power converters.

### ① まえがき

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化防止の観点から、エネルギー効率の改善とCO<sub>2</sub>排出量の削減が求められている。そのため、さまざまな分野にパワー半導体を用いた電力変換装置の適用が広がっており、その市場は急速に拡大している。パワー半導体としては、産業、民生、自動車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) モジュールが主に用いられている。IGBT モジュールは市場に登場して以来、多くの技術革新によって大幅な小型化や低損失化が行われてきており、これにより電力変換装置の小型化（コストダウン）と高効率化に貢献してきた。しかし、IGBT モジュールの小型化はパワー密度の上昇によるチップ接合温度  $T_j$  の上昇と、それに伴う信頼性の低下を招いてしまう。このため、今後ともIGBT モジュールの小型化を進めるためには、IGBT とFWDのチップ特性の向上のみならず、パッケージ技術の革新による放熱性と信頼性の向上が不可欠である。

富士電機ではIGBT モジュールのさらなる小型化、低損失化、高信頼性化を実現するために、新たに第7世代のチップ技術およびパッケージ技術を適用した第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを開発した。XシリーズIGBT モジュールでは小型化のみならず、チップ特性とパッケージの長期信頼性を向上することにより、 $T_j$  が175℃での連続動作を実現した。そのため、最大で150℃連続動作であった従来の第6世代「Vシリーズ」IGBT モジュールと比較して、さらに高い出力電流での動作が可能となった。

### ② 第7世代チップ技術

XシリーズIGBT モジュールではIGBT およびFWD (Free Wheeling Diode) の損失を大幅に低減することで、低損失化とチップサイズの小型化を同時に達成した。さらには、高温動作時に懸念されるさまざまな耐量についても、十分な耐量を確保することで  $T_j=175℃$  の連続動作を実現した。

#### 2.1 第7世代IGBTのチップ技術

IGBTの断面構造を図1に示す。第7世代IGBTの基本構造は、第6世代IGBTと同様に表面構造はトレンチゲート構造であり、裏面にフィールドストップ (FS) 層を適用した薄ウェーハIGBTを採用した。第6世代IGBTと比較して、ドリフト層の厚さを薄くすることでオン電圧 (コレクター-エミッタ間電圧) の低減を達成している。ま

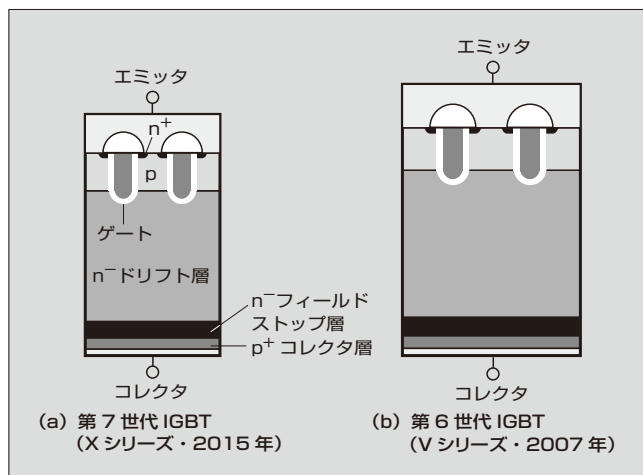


図1 IGBTの断面構造

た、表面のトレンチゲート構造を微細化・最適化することで、導通時のpチャネルからのホールの引抜きを抑制し、表面側のキャリア濃度を高めることでIE (Injection Enhanced) 効果を増強し、オン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を大幅に改善した。一般的に、ドリフト層を薄くした場合はターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されるが、FS層を最適化することによって電圧振動を抑制し、十分な耐圧を確保した。

第7世代IGBTの出力特性を図2に示す。第6世代IGBTの定格電流密度で比較した場合、 $T_j=150^\circ\text{C}$ においてオン電圧を約0.5V低減している。また、 $175^\circ\text{C}$ における動作時でも、第6世代IGBTの $150^\circ\text{C}$ と比較して約0.45V低いオン電圧を実現している。

一般的に、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ることはよく知られている。第7世代IGBTのオン電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を図3に示す。第7世代IGBTは、前述のとおりオン電圧の大幅な低減に加えて、ドリフト層の薄化によってターンオフ時のテール電流を大幅に低減することで、ターンオフ損失を10%低減した。この結果、第6世代IGBTと比べて、

ターンオフ損失とオン電圧のトレードオフ特性を大幅に改善した。

## 2.2 第7世代FWDのチップ技術

第7世代FWDは、ドリフト層の厚みを低減することで順方向電圧を低減するとともに、図4に示すように、ローカルライフタイムコントロールの最適化により、第6世代FWDと比較してより滑らかな逆回復波形を実現した。さらに、逆回復ピーク電流およびテール電流の低減によって、逆回復損失を大幅に低減した。図5に逆回復損失と順方向電圧のトレードオフ特性を示す。第6世代FWDと同一の順方向電圧で比較して、約30%の逆回復損失低減を達成した。

また、一般的に、ドリフト層を薄くすると逆回復時に空乏層が裏面に到達しやすくなるため<sup>(2)</sup>、逆回復サージ電圧と逆回復時の電圧振動が課題となる。第7世代FWDでは、裏面構造を最適化することによって逆回復動作時の空乏層の伸長を抑制し、空乏層が裏面に到達するのを防ぐことで、逆回復電圧振動および逆回復サージ電圧を第6世代FWDと同等以下に抑制した。

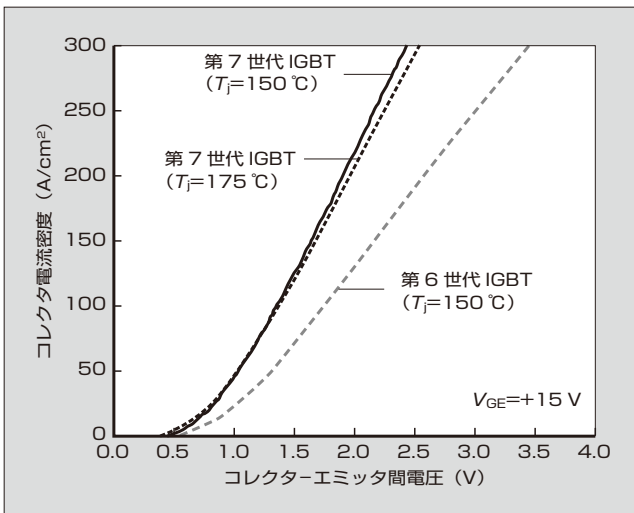


図2 第7世代IGBTの出力特性

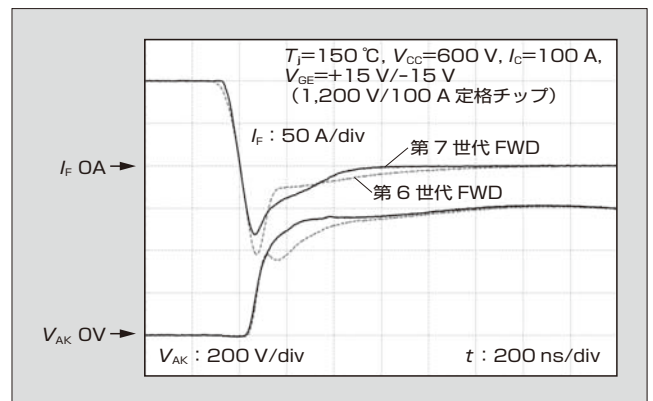


図4 第7世代FWDの逆回復波形

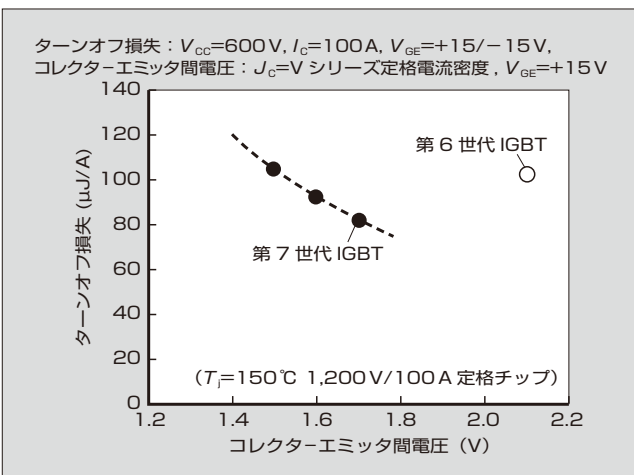


図3 第7世代IGBTのトレードオフ特性

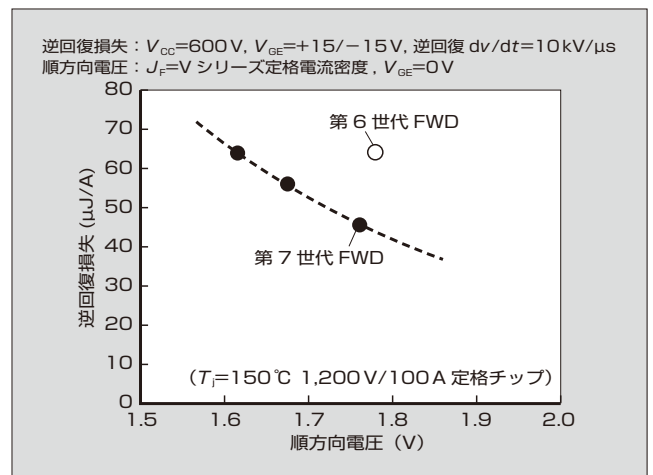


図5 逆回復損失と順方向電圧のトレードオフ特性

3 第7世代パッケージ技術

IGBT モジュールの小型化を達成するためには IGBT および FWD の小型化が必要であるが、チップの小型化、すなわちパワー密度の上昇は、チップ温度の上昇とそれによる信頼性の低下が課題となる。そのため、Xシリーズ IGBT モジュールでは、高放熱パッケージの開発によりチップ温度の上昇を抑制するとともに、高信頼性・高耐熱パッケージの開発により 175℃ 連続動作を実現した。

3.1 新 AlN 絶縁基板

チップの放熱性を改善するために、Xシリーズ IGBT モジュールでは、チップから放熱フィンまでの熱抵抗のうち最も大きな部分を占める絶縁基板の熱抵抗を改善した。絶縁基板の材料としては、 $Al_2O_3$  (アルミナ) や熱伝導率の高い AlN (窒化アルミニウム) などが広く使われている。熱抵抗の改善のためには AlN 絶縁基板の適用が望ましいが、一般の AlN 絶縁基板ではセラミックスの板厚が厚いため剛性が高く、ケース温度が上昇した場合に基板下のはんだに加わる熱応力が高くなり、信頼性の低下が懸念される。この対策として、はんだに発生する応力を低減させる必要がある。そこでセラミックスの板厚を薄くすることで AlN 絶縁基板の剛性を低下させ、基板下のはんだに加わる熱応力を緩和させる手法を検討した。従来は、AlN 絶縁基板を薄化すると、モジュール製品の絶縁耐量の低下、顧客による実装工程でセラミックス基板に割れが発生する懸念があるため実用化できなかった。そのため、セラミックス焼結条件の最適化による高強度化、基板回路パターン設計の工夫による熱応力の分散、沿面距離の見直しによる絶縁設計の最適化を行い、薄型化した新 AlN 絶縁基板を開発した<sup>(3)</sup>。

このように高放熱かつ高信頼性を実現した新 AlN 絶縁基板を採用することで、IGBT モジュールの長期信頼性を確保しつつ熱抵抗を大幅に低減した。図6に、新 AlN 絶縁基板を適用した IGBT モジュールのジャンクション-ケース間熱抵抗を示す。現在、一般に広く適用されてい

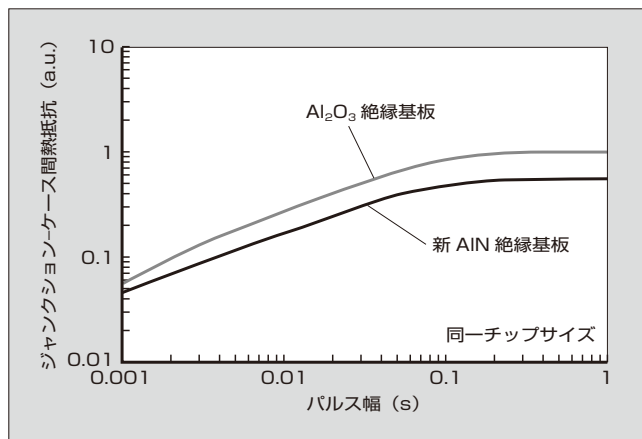


図6 ジャンクション-ケース間熱抵抗

る  $Al_2O_3$  絶縁基板に対して、熱抵抗を同一チップサイズで約 45% 低減した。この新 AlN 絶縁基板を、パワー密度やチップ温度の上昇が特に厳しくなる製品などに適用することで、IGBT モジュールの小型化による温度上昇の課題を解決した。

3.2  $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量の向上

電力変換装置の長寿命化を実現するために、IGBT モジュールの長期信頼性が強く求められている。特に、繰返しの熱ストレスに対する耐量 ( $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量) が重要な課題である。Xシリーズ IGBT モジュールでは、より高い出力電流での動作を実現するために、連続動作可能領域を従来の  $T_j=150^\circ C$  から  $175^\circ C$  に向上させた。一般に  $T_j$  が高くなると、チップ周辺の材料の劣化が加速されることにより、 $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量が低下してしまう<sup>(4)</sup>。 $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量は、チップ上のワイヤボンディング接点とチップ下のはんだが最も大きな熱応力を受けることで、製品寿命の低下に大きく影響を及ぼす。Xシリーズ IGBT モジュールでは、 $T_j=175^\circ C$  でも十分な  $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量を確保するため、ワイヤボンディングの設計を最適化し、これに加えて新たに開発した高強度のはんだを適用した。

図7に、同一サイクル後における  $\Delta T_j$  パワーサイクル試験後のチップ下のはんだの断面観察結果を示す。従来はんだにはクラックが観察されたが、新はんだではクラックの発生が抑制されていることを確認した。図8に  $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量を示す。Xシリーズ IGBT モジュー

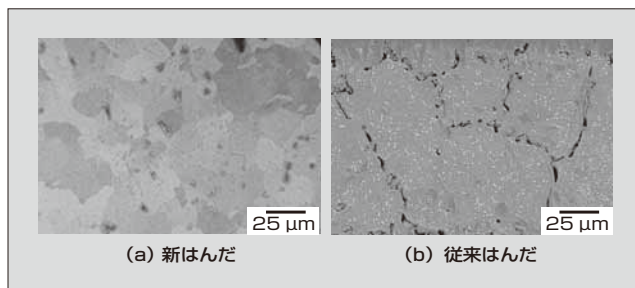


図7  $\Delta T_j$  パワーサイクル試験後のチップ下はんだ断面

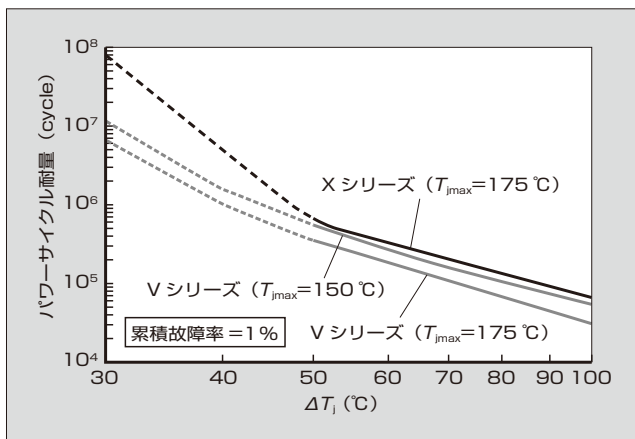


図8  $\Delta T_j$  パワーサイクル耐量

ルは、VシリーズIGBTモジュールに対して約2倍の耐量を実現した ( $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_j=50^{\circ}\text{C}$ )。これにより、 $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ 動作においても、従来と同等以上の $\Delta T_j$ パワーサイクル耐量があり長期信頼性を確保した。

### 3.3 高耐熱シリコンゲル

IGBTモジュールの長期信頼性を保証する上でもう一つ課題となるのが、高温動作におけるシリコンゲルの劣化である。一般にシリコンゲルは高温になるほど硬化しやすく、硬化したゲルはクラック（裂け）を生じる懸念がある。このクラックによってゲルの絶縁被覆が破壊されるため、絶縁性能が低下してしまう。そこで、 $175^{\circ}\text{C}$ の連続動作を実現するため、新たに高耐熱のシリコンゲルを開発した。高耐熱シリコンゲルは、材料組成を最適化することで高温下における硬化を抑制した。高温環境下における放置試験 ( $215^{\circ}\text{C}$ , 2,000時間)においても、従来シリコンゲルは硬化によってクラックが発生するのに対し、高耐熱シリコンゲルではクラックの発生がないことを確認した。

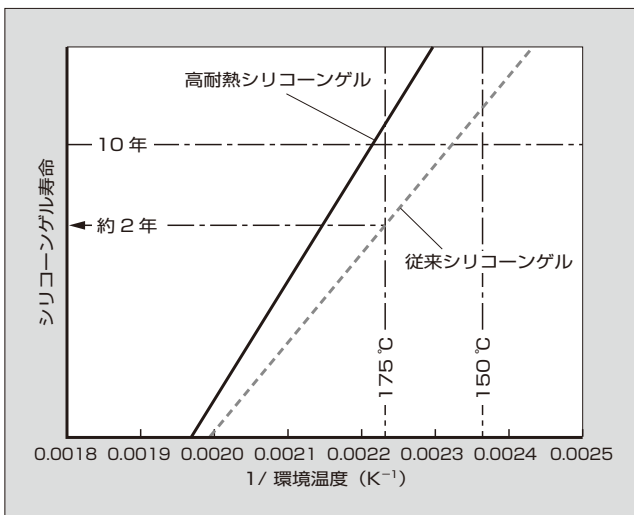


図9 環境温度とシリコンゲルの寿命の関係

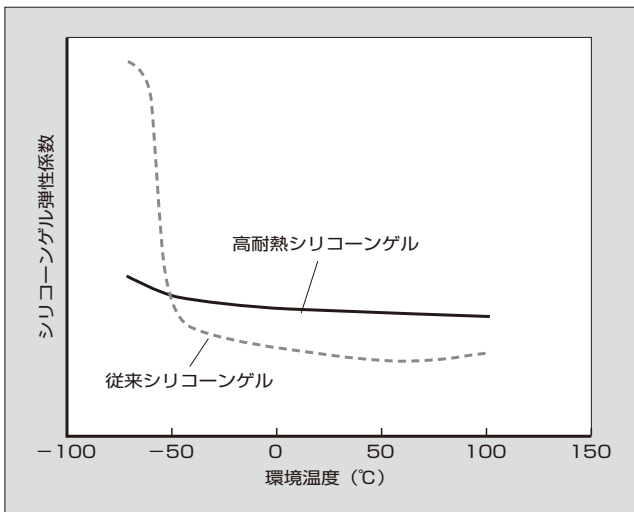


図10 環境温度とシリコンゲル弾性係数の関係

図9に、環境温度とシリコンゲルの寿命の関係を示す。 $175^{\circ}\text{C}$ における高耐熱シリコンゲルの寿命は、従来シリコンゲルに対して大幅に改善され、 $150^{\circ}\text{C}$ における従来シリコンゲルの寿命と同等の寿命となった。これにより、 $175^{\circ}\text{C}$ の連続動作においても、従来の $150^{\circ}\text{C}$ と同等の絶縁性能を確保した。

また、図10に、環境温度とシリコンゲル弾性係数の関係を示す。従来のシリコンゲルは $-50^{\circ}\text{C}$ 以下で急激に硬くなる特性があることに対し、高耐熱シリコンゲルは低温でも弾性係数の上昇は抑えられており、低温環境下での絶縁性も改善されている。この高耐熱シリコンゲルによってさまざまな環境に対応できるようになり、IGBTモジュールの適用範囲の拡大も期待できる。

## 4 IGBTモジュールの小型化

第7世代のIGBTとFWDによる大幅な損失特性の改善と、さらにはパッケージ技術の革新による放熱性・信頼性の大幅な向上により、XシリーズIGBTモジュールは従来に比べて、さらなる小型化と高パワー密度化が可能となった。例として、 $1,200\text{V}$ 定格のEP2パッケージにおいて、VシリーズIGBTモジュールの最大電流定格は $50\text{A}$ までであったが、XシリーズIGBTモジュールでは新たに $75\text{A}$ 定格が実現した。従来のVシリーズIGBTモジュールのEP3パッケージ $75\text{A}$ 定格製品からの置換えにより、フットプリントを約36%低減することが可能である。

XシリーズIGBTモジュールは、小型化、高パワー密度化だけではなく、同時に低損失化している。図11に、XシリーズIGBTモジュールEP2パッケージ $75\text{A}$ 定格製品における通常運転時の電力損失とIGBT接合温度の計算結果を示す。VシリーズIGBTモジュールEP3パッケージ $75\text{A}$ 定格製品と比較して、約10%の電力損失の低減と、約 $10^{\circ}\text{C}$ のIGBT接合温度の低減を達成している ( $f_c=8\text{kHz}$ )。

前述のとおり、 $\Delta T_j$ パワーサイクル耐量の向上と、シリコンゲルの耐熱性の向上によって、XシリーズIGBT

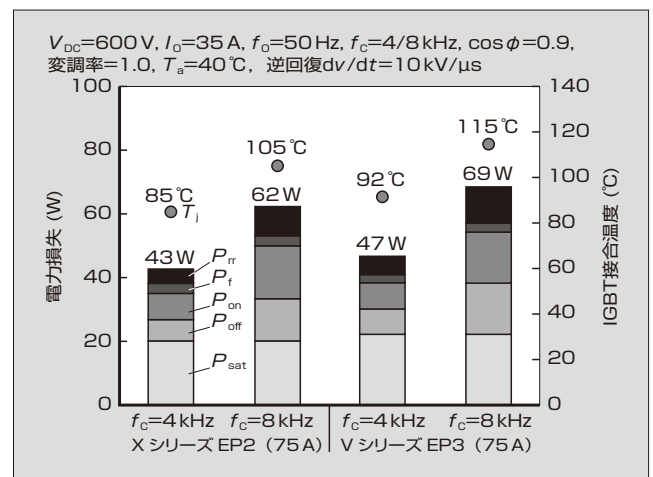


図11 通常運転時の電力損失とIGBT接合温度



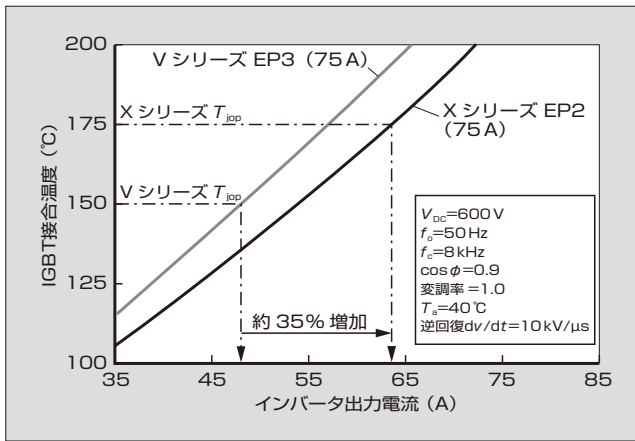


図12 インバータ出力電流とIGBT 接合温度

モジュールでは連続 175℃動作が可能となった。その結果、電力変換装置において、さらなるパワー密度の向上が可能となり、図12に示すように、VシリーズIGBTモジュールEP3パッケージ75A定格製品と比べて、約35%の出力電流の増加が可能である。

5 あとがき

第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュールでは、IGBTとFWDの大幅な損失低減と、高放熱・高信頼性パッケージの開発によって、小型化、低損失化、高信頼性を同時に達成することができた。従来製品から第7世代IGBTモジュールへの置換えにより電力変換装置の小型化、コストダウンが可能となるため、今後の電力変換装置のさらなる普及や高効率化に寄与でき、世界的なエネルギー問題の解決にも大いに貢献できる。

参考文献

(1) Kobayashi, Y. et al. "The New IGBT-PIM with the 6th generation V-IGBT chip technology", Proceeding of PCIM

Europe 2007.

(2) Onozawa, Y. et al. "Development of the 1200 V FZ-Diode with Soft Recovery Characteristics by the New Local Lifetime Control Technique". Proceeding of ISPSD 2008, p.80-83.  
 (3) Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", PCIM Europe 2015.  
 (4) Saito, T. et al. "New assembly technologies for  $T_{jmax}=175^\circ C$  continuous operation guaranty of IGBT module", Proceeding of PCIM Europe 2013, p.455-461.



川畑 潤也

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。



百瀬 文彦

半導体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。日本機械学会会員。



小野澤 勇一

パワー半導体チップの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。





\*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。