

第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール

7th-Generation “X Series” RC-IGBT Module for Industrial Applications

山野 彰生 YAMANO, Akio

高橋 美咲 TAKAHASHI, Misaki

市川 裕章 ICHIKAWA, Hiroaki

近年、IGBT モジュールには、小型化、低損失化、高信頼性が強く求められている。これに応えて、富士電機は、IGBT と還流ダイオード FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT : 逆導通 IGBT) を適用し、産業用 RC-IGBT モジュールを開発した。さらに、第7世代「Xシリーズ」の技術を適用して最適化することにより、損失と熱抵抗の大幅な低減および高信頼性化を行った。これらの技術革新により、従来の IGBT と FWD の組合せでは困難であった定格電流の拡大、高パワー密度化および小型化を達成した。

In recent years, IGBT modules have been increasingly required to be smaller in size while exhibiting lower loss and higher reliability. To meet the requirements, Fuji Electric has developed an industrial-use reverse conducting IGBT (RC-IGBT) module by using an RC-IGBT that integrates an IGBT and a free wheeling diode (FWD) on a single chip. Furthermore, the module greatly reduces loss and thermal resistance and enhances reliability through optimization based on our 7th-generation “X Series” technology. These technology innovations have achieved enhancements such as expansion of rated current, increased power density and miniaturization, all of which were impossible through the combination of conventional IGBT and FWD.

1 まえがき

近年、地球温暖化の防止や安全・安心で持続可能な社会を実現するために、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギーに貢献できるパワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術への期待が高まっている。中でも、産業、民生、自動車、再生可能エネルギーなどの幅広い分野で用いられる電力変換装置のキーデバイスとして、パワー半導体の需要が拡大している。

富士電機は、1988年にパワー半導体の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを製品化して以来、多くの技術革新によって IGBT モジュールの小型化、低損失化、高信頼性化を行い、電力変換装置の小型化や低コスト化、高性能化に貢献してきた。しかし、IGBT モジュールをさらに小型化しようとするするとパワー密度が増大し、IGBT や還流ダイオード FWD (Free Wheeling Diode) の動作温度の上昇による信頼性の低下を招く危険性がある。このため、高い信頼性を保ち、かつ IGBT モジュールを小型化するためには、チップおよびパッケージの技術革新が不可欠である。

富士電機では、チップおよびパッケージの技術革新を行い、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを製品化した^{(1),(2)}。さらに、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT : 逆導通 IGBT) を開発し、これを搭載した第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールを開発した。第7世代 X シリーズのチップ技術を適用し、チップ構造を最適化することで、X シリーズ IGBT と X シリーズ FWD の組合せと同等の発生損失でありながら、チップ数およびトータルチップ面積を低減した。さらに、第7世代 X シリーズのパッケージ技術と RC-IGBT を組み合わせることで、熱抵抗の低減と

高信頼性化を行った。これらの技術革新により、従来の IGBT と FWD の組合せでは困難であった、IGBT モジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を達成した。

2 特徴

2.1 「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT の特徴

従来の IGBT は、ゲートに電圧を印加することでコレクタからエミッタ方向にのみ通電する。電力変換装置として広く用いられているインバータの負荷として使用されるインダクタは、自己誘導作用により電流変化を妨げる方向に誘導起電力を発生する。その結果、IGBT をオフにしても同じ方向に電流が流れようとするため、逆方向に電流を流すためには FWD を IGBT と逆並列に接続する必要があった。これに対して、「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT (X シリーズ RC-IGBT) は、RC-IGBT を用いることにより一つの素子で実現している (図1)。

図2に X シリーズ RC-IGBT の断面図を示す。X シリー

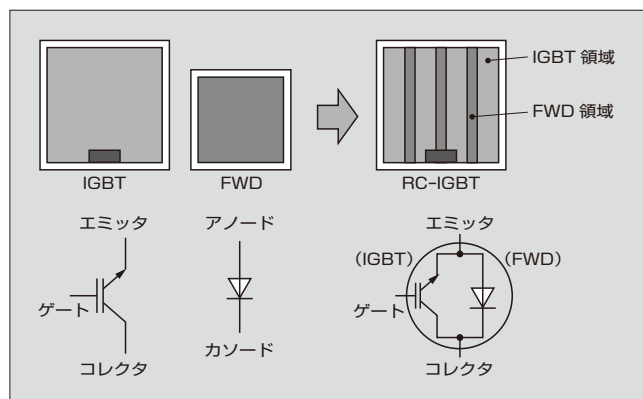


図1 「Xシリーズ」RC-IGBT の概略図と等価回路

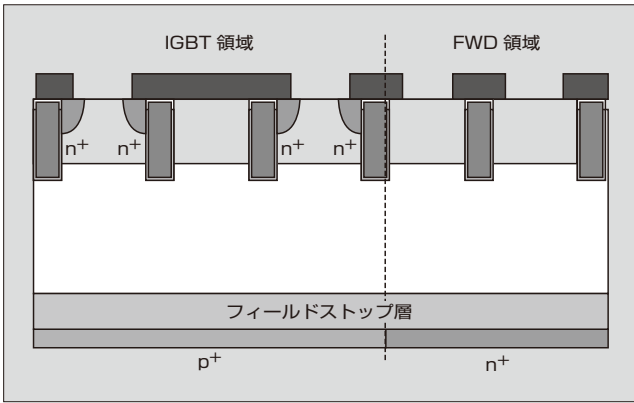


図2 「Xシリーズ」RC-IGBTの断面図

ズRC-IGBTは第7世代XシリーズIGBTのチップ技術を適用しており、表面構造にトレンチゲートを、裏面構造にフィールドストップ(FS)層を用いたIGBTである。XシリーズRC-IGBTはXシリーズIGBTと同様に、第6世代「Vシリーズ」IGBTと比較してさらなる微細化を行い、表面構造を最適化することで、導通損失に寄与するコレクタ-エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を大幅に低減している。また、最先端の薄ウェーハ加工技術を適用し、飽和電圧とターンオフ時のスイッチング損失とのトレードオフ関係を改善した。XシリーズRC-IGBTはFWD領域を内蔵するため、コレクタ側にpn接合を持つ。そのため、裏面へのパターニングおよび不純物層形成工程を追加し、IGBTのコレクタ側のp形層とFWDのカソード側のn形層を同一チップの裏面に形成した。また、ライフタイム制御を最適化することでトレードオフ関係を改善した。

2.2 電気特性

図3に1,200V XシリーズRC-IGBTの出力特性を示す。XシリーズRC-IGBTは、一つのチップで順方向(IGBT)と逆方向(FWD)の両方向に電流を出力できる。第7世代Xシリーズのチップ技術の適用により、VシリーズIGBTよりも低い飽和電圧を実現した。また、RC-IGBTでは、FWD領域のカソード層に電子が注入されることにより、IGBTのコレクタ層からのホール注入が抑制されて

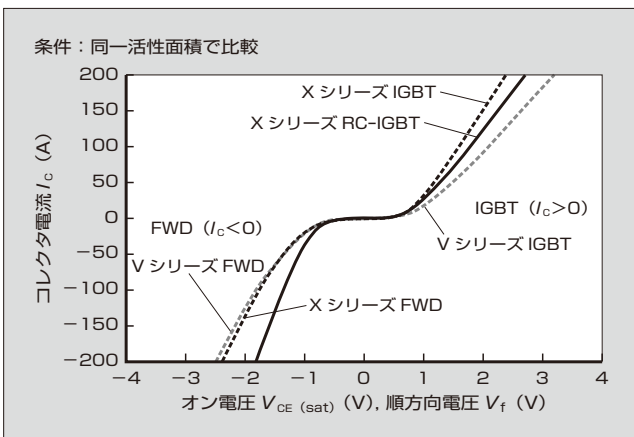


図3 「Xシリーズ」RC-IGBTの出力特性

伝導度変調が起こりにくくなる。そのため、低飽和電圧領域においてスナッチバック現象が起こることが報告されている。これに対し、XシリーズRC-IGBTはチップの各構造を最適化することによってスナッチバック現象を解決した。

Xシリーズ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。図4から、XシリーズRC-IGBTのサージ電圧は、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せや、XシリーズIGBTとX

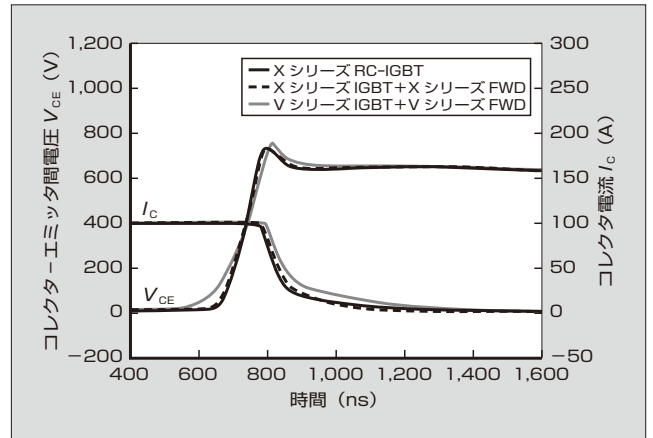


図4 「Xシリーズ」RC-IGBTのターンオフ波形

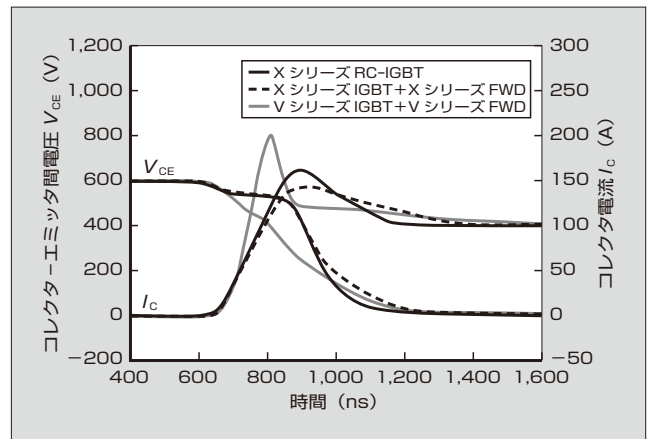


図5 「Xシリーズ」RC-IGBTのターンオン波形

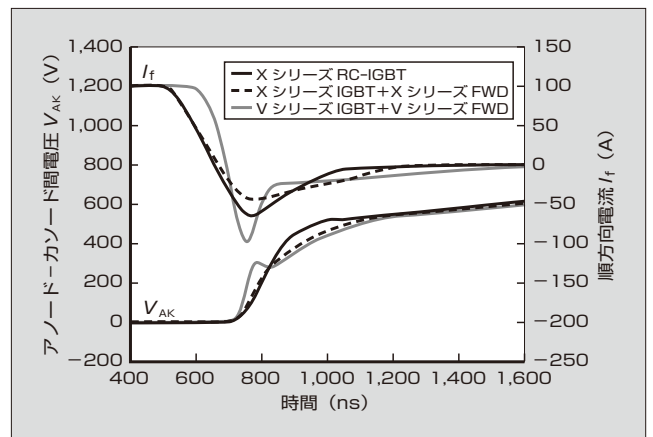


図6 「Xシリーズ」RC-IGBTの逆回復波形

シリーズFWDの組合せと同等である。また、テール電流はVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せに比べて小さく、ターンオフ損失 E_{off} は23%低減しており、異常波形は観測されない。XシリーズRC-IGBTは、特性を改善するためにVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せよりも薄ウェーハ化を行っている。薄ウェーハを用いることでターンオフ時の振動や耐圧の低下が懸念されるが、XシリーズRC-IGBTはウェーハの抵抗率と各構造を最適化することによって振動と耐圧低下を抑制した。図5と図6に示すように、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せでは急峻（きゆうしゅん）な電流波形となっているのに対し、XシリーズRC-IGBTではライフタイム制御を最適化することで、よりソフトな電流波形を実現している。逆回復電流ピーク I_{rrm} とテール電流の低減により、逆回復損失 E_{rr} は20%低減した。また、ターンオン波形と逆回復波形は、ともに異常波形は観測されない。

図7に、同一活性面積で比較したIGBTのトレードオフ特性を示す。図中のXシリーズRC-IGBTの各点は、ライフタイム制御の変更によってトレードオフの調整を行ったものである。XシリーズRC-IGBTは、同一スイッチング損失の場合、VシリーズIGBTに比べて飽和電圧を0.5V改善している。

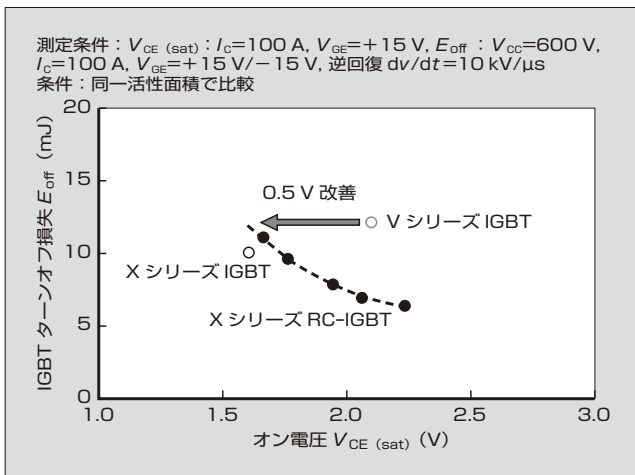


図7 「Xシリーズ」RC-IGBT (IGBT) のトレードオフ特性

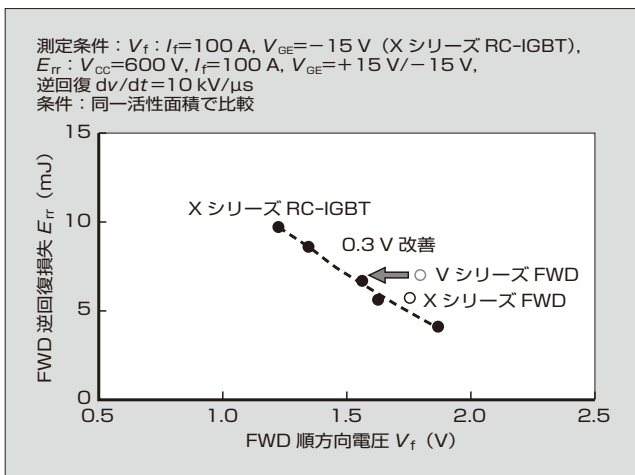


図8 「Xシリーズ」RC-IGBT (FWD) のトレードオフ特性

改善している。また、XシリーズIGBTと同等のIGBT特性が期待できる。

図8に、同一活性面積で比較したFWDのトレードオフ特性を示す。図中のXシリーズRC-IGBTの各点は、図7と同様にトレードオフの調整を行ったものである。XシリーズRC-IGBTは、同一スイッチング損失の場合、VシリーズFWDに比べて順方向電圧を0.3V改善している。また、XシリーズFWDと同等のFWD特性が期待できる。

2.3 熱特性

XシリーズRC-IGBTは、IGBTとFWDをワンチップ化したことにより、IGBT領域またはFWD領域での発生損失による発熱がチップ全体で放熱される。このため、熱抵抗の低減が期待できる。また、熱抵抗のさらなる低減のため、第7世代Xシリーズのパッケージ技術として、新たなAlN（窒化アルミニウム）絶縁基板を採用した。

AlN絶縁基板は、熱伝導率が高いため熱抵抗が低くなるが、抗折強度が低いため、絶縁基板として広く使用されているAl₂O₃（アルミナ）絶縁基板よりセラミックスを厚くすることで実用化されている。ただし、基板を厚くすると熱抵抗と信頼性が損なわれるという課題があった。そこでこれらを改善するために、AlN絶縁基板の薄型化が必要であった。従来、AlN絶縁基板を薄型化すると実装工程での基板割れや絶縁耐量の低下の懸念があり、実用化できなかった。これに対して、AlNの焼結条件の見直しによる高強度化および沿面距離の見直しによる絶縁設計の最適化を行うことにより、薄型化した新AlN絶縁基板を実現した。

図9にジャンクション-ケース間熱抵抗を示す。新AlN絶縁基板は、Al₂O₃絶縁基板に比べて同一チップサイズで熱抵抗が約45%となり、大幅に改善した。これにより、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。さらに、ワイヤボンディングの最適化および高強度はんだと高耐熱シリコーンゲルの採用により、高信頼性を確保するとともに175℃連続動作の保証を実現した。

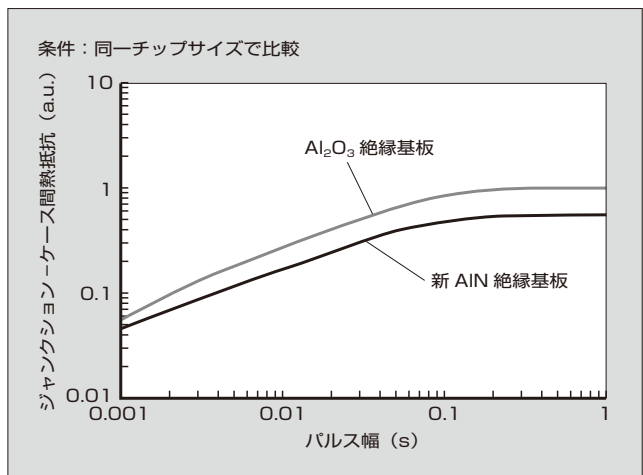


図9 ジャンクション-ケース間熱抵抗

3 高パワー密度化・小型化

表1に1,200V/100AのVシリーズIGBTモジュールとの比較を、図10に各モジュールの電力損失、接合温度 T_j および接合温度の変動 ΔT_{jc} の計算結果を示す。第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術を適用することで、従来のVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せに比べて電力損失と熱抵抗を大幅に低減し、高信頼性を確保するとともに175℃連続動作の保証を実現した。また、XシリーズRC-IGBTを用いることで、チップ数とトータルチップ面積の低減が可能になり、IGBTモジュールの小

表1 1,200V/100A IGBTモジュールの比較

項目	XシリーズRC-IGBTモジュール	VシリーズIGBTモジュール
チップ	XシリーズRC-IGBT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD
絶縁基板	新AlN絶縁基板	Al ₂ O ₃ 絶縁基板
連続動作温度 T_j (°C)	175	150

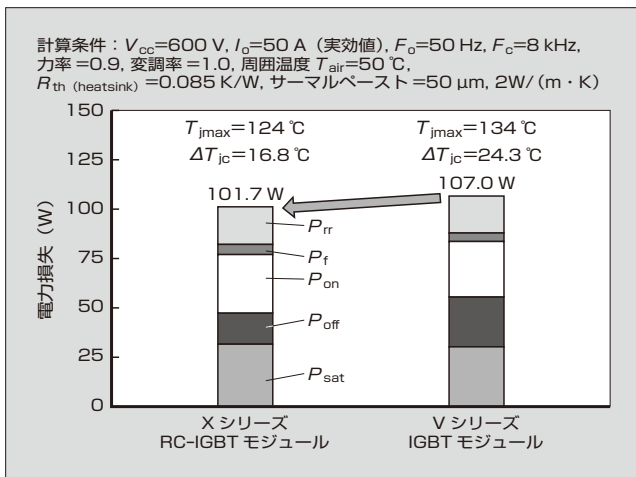


図10 1,200V/100A IGBTモジュールの電力損失および接合温度

表3 定格電圧1,200Vの「Dual XT」とPrimePACK2の特徴

項目	Dual XT			PrimePACK*2
	VシリーズIGBT + VシリーズFWD	XシリーズIGBT + XシリーズFWD	XシリーズRC-IGBT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD
外観				
モジュール設置面積 (cm ²)	93	93	93	153
チップ	VシリーズIGBT + VシリーズFWD	XシリーズIGBT + XシリーズFWD	XシリーズRC-IGBT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD
モジュール定格電流 (A)	600	800	1,000	900
絶縁基板	SiN絶縁基板	新AlN絶縁基板	新AlN絶縁基板	Al ₂ O ₃ 絶縁基板
熱抵抗 $R_{th(jc)}$ (K/W)	IGBT: 0.04 FWD: 0.06	IGBT: 0.037 FWD: 0.044	IGBT: 0.022 FWD: 0.022	IGBT: 0.03 FWD: 0.054

* PrimePACK : Infineon Technologies AGの商標または登録商標

型化が期待できる。

これらのことから、RC-IGBTのチップ技術および第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術を適用することにより、同一パッケージにおいて、従来のIGBTとFWDの組合せよりも定格電流を大きくできる。

表2に定格電圧1,200Vの製品ラインアップとしてDual XTとPrimePACK2を、表3にその特徴を示す。定格電圧1,200VのDual XTでは、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せでは定格電流の上限は600Aであった。第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術により、XシリーズIGBTとXシリーズFWDの組合せにより定格電流を800Aまで拡大した。さらに、XシリーズRC-IGBTを用いることで、同一パッケージで定格電流が1,000Aであるモジュールを提供できる。VシリーズIGBTとVシリーズFWDを用いたPrimePACK2と比較して、Dual XTはモジュール設置面積で40%、さらにXシリーズRC-IGBTを用いることで熱抵抗 $R_{th(jc)}$ は27%低減する。これにより、従来のVシリーズIGBTとVシリーズFWDを用いたPrimePACK2の領域までカバーすることができる。

図11に、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せ、XシリーズIGBTとXシリーズFWDの組合せおよびXシリーズRC-IGBTを用いた各Dual XTにおけるインバータ動作時の出力電流 I_o とIGBT最大接合温度 T_{jmax} の計算結果を示す。また、XシリーズRC-IGBTを用いることで電力損失とジャンクション-ケース間の熱抵抗を

表2 定格電圧1,200Vの「Dual XT」とPrimePACK2の製品ラインアップ

製品名	定格電流 (A)						
	225	300	450	600	800	900	1,000
Dual XT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD						
	XシリーズIGBT + XシリーズFWD					XシリーズRC-IGBT	
PrimePACK*2				VシリーズIGBT + VシリーズFWD			

* PrimePACK : Infineon Technologies AGの商標または登録商標

〈注〉 PrimePACK : Infineon Technologies AGの商標または登録商標

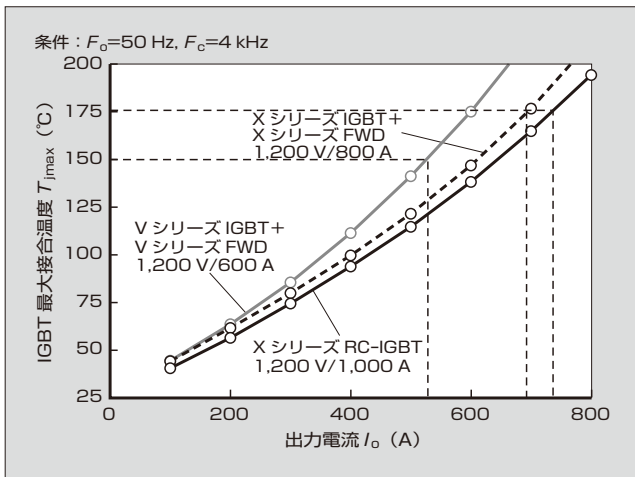


図11 「Dual XT」のIGBT最大接合温度

低減した。さらに、第7世代Xシリーズのパッケージ技術を適用することにより連続動作保証を従来の150℃から175℃に拡大した。この結果、同一パッケージにおいて従来と比較して高い電流密度が可能となり、IGBTモジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を達成した。これにより、小型化、低損失化、高信頼性化といったIGBTモジュールに求められる要求に応えることができる。

4 あとがき

本稿では、IGBTとFWDをワンチップ化したRC-IGBTを搭載することにより、いっそうの高パワー密度化と小型化を達成した第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールについて述べた。このモジュールにより電力変換装置のさらなる小型化とコストダウンを実現し、広く世の中に貢献できると考えている。今後も、IGBTモジュールの技術革新を進め、安全・安心で持続可能な社会の実現に向け貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Kawabata, J. et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems", Proceeding of PCIM Europe 2015.
- (2) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.
- (3) Takahashi, M. et al. "Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies", Proceeding of PCIM Europe 2016.
- (4) Takahashi, K. et al. "1200 V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter", Proceeding of PCIM Europe 2014.
- (5) Takahashi, H. et al. "1200 V Reverse Conducting IGBT", Proceeding of ISPSD 2004, p.133-136.
- (6) M, Rahimo. et al. "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications", Proceeding of ISPSD 2009, p.283-286.



山野 彰生

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。



高橋 美咲

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。



市川 裕章

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。





*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。