

第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールの系列化

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

山野 彰生 YAMANO, Akio

高崎 愛子 TAKASAKI, Aiko

市川 裕章 ICHIKAWA, Hiroaki

IGBT モジュールの小型化、低損失化、高信頼性化といった市場要求に応えるため、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT（逆導通 IGBT）を開発し、定格電圧 1,200 V 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールの系列化を進め、「Dual XT」を開発した。第6世代「Vシリーズ」産業用 IGBT モジュール「Dual XT」の最大定格電流 600 A に対し、定格電流を 1,000 A に拡大した。同一パッケージを用いた従来製品と比較して、実動作時のチップの接合温度や接合温度上昇を大幅に改善した。電力変換装置のさらなる出力アップや高寿命化が期待できる。

In order to meet the market demand of the smaller size, lower power dissipation and higher reliability for IGBT modules, Fuji Electric has developed a reverse conduction insulated gate bipolar transistor (RC-IGBT) that integrates an IGBT and a FWD on a single chip. We have also developed the “Dual XT” to expand the line-up of the 7th-generation “X Series” RC-IGBT module for industrial applications that has a rated voltage of 1,200 V. While the “Dual XT” 6th-generation “V Series” IGBT module for industrial applications had a maximum rated current of 600 A, the new module has an expanded rated current of 1,000 A. Compared with the conventional product, which uses the same package, the new product greatly improves the junction temperature and junction temperature rise of the chip during actual operation. This module will contribute to further increase of the output and extension of service life of the power converters.

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 モジュールを高パワー密度化するためには、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、IGBT モジュールの低損失化・高信頼性化による高パワー密度化を実現した^{(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^{(3),(4)}、発生損失を低減しつつチップ数およびトータルチップ面積を低減した。このチップ技術およびパッケージ技術を組み合わせた定格電圧 1,200 V 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT（Xシリーズ RC-IGBT）モジュールによりさらなる高パワー密度化を実現した。現在、Xシリーズ RC-IGBT モジュールの系列化を進めており、今回、RC-IGBT を搭載した「Dual XT」を開発した。

② 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールの特徴

図1に Xシリーズ RC-IGBT の概略図と等価回路を示す。電力変換装置として広く用いられているインバータでは、IGBT と FWD の二つのチップを逆並列に接続する必要がある。これに対して RC-IGBT では、一つのチップに IGBT と FWD を作りこんでいる。

Xシリーズ RC-IGBT では、Xシリーズのチップ技術により、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、コレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を大幅に低減した。また、最先端の薄ウェーハ加工技術を適用することで、飽和電圧とスイッチング損失とのトレードオフ関係を改善した。一般的に薄ウェーハを用いることで、ターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されるが、Xシリーズ RC-IGBT では各構造を最適化することで、振動や耐圧低下を抑制した。

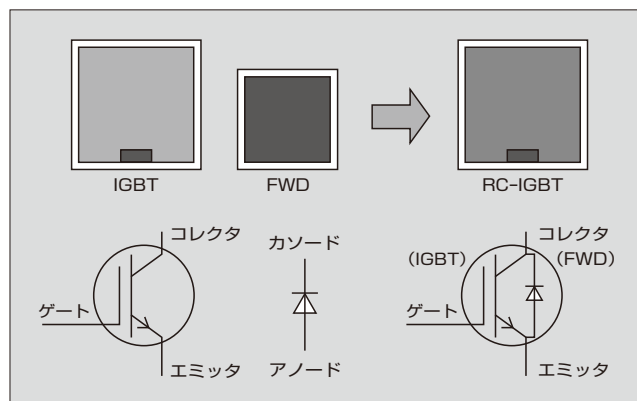


図1 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT の概略図と等価回路

さらに、Xシリーズのパッケージ技術の一つである高放熱絶縁基板を採用し熱抵抗を大幅に低減した。また、ワイヤボンディングの最適化および高強度はんだや高耐熱シリコンゲルの採用により、175℃連続動作を保証するとともに高信頼性も確保した。

これらの技術を採用することで、従来と同一パッケージサイズで、IGBTとFWDの二つのチップを組み合わせた場合よりも高い定格電流を実現した。⁽⁵⁾

3 製品ラインアップ

図2に新たに系列化したXシリーズRC-IGBTモジュールDual XTの外観を、表1にそのラインアップを、表2にその特徴を示す。第6世代「Vシリーズ」産業用IGBT(VシリーズIGBT)モジュールDual XTの最大定格電流の600Aに対し、第7世代のXシリーズRC-IGBTモジュールでは1,000Aまで拡大した。

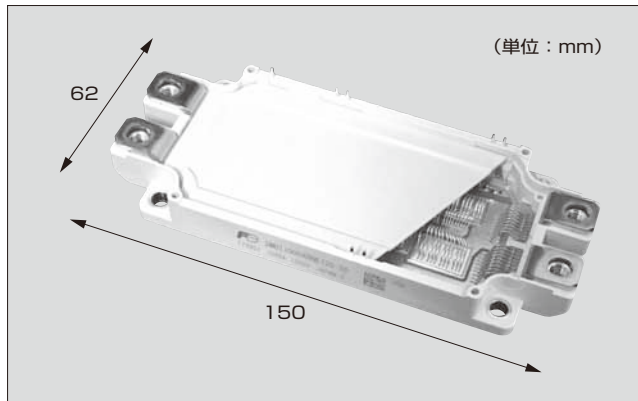


図2 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」

表1 「Dual XT」のラインアップ

定格電圧 1,200V	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

表2 「Dual XT」の特徴

定格電圧	1,200V		
代表型式	2MBI600VN-120-50	2MBI800XNE120-50	2MBI1000XRNE120-50
シリーズ名	第6世代Vシリーズ IGBTモジュール	第7世代Xシリーズ IGBTモジュール	第7世代Xシリーズ RC-IGBTモジュール
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
熱抵抗: $R_{th(j-c)}$ (a.u.)	1/1.5 (IGBT/FWD)	0.85/1.1 (IGBT/FWD)	0.55/0.55 (IGBT/FWD)

4 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」の特性

図3に、XシリーズRC-IGBTモジュールの出力特性を示す。XシリーズRC-IGBTはワンチップで順方向(IGBT)と逆方向(FWD)の両方向に電流を出力することができる。RC-IGBTではゲートに電圧を印加しIGBTを通電した際、IGBTの伝導度変調が起こりにくくなる場合がある。特に、飽和電圧が低い領域においてはスナップバック現象が起こり得る^{(6),(7)}。これに対し、XシリーズRC-IGBTでは、チップの各構造を最適化することでスナップバック現象を解消した。

図4に、XシリーズRC-IGBTモジュールのターンオフ波形を示す。VシリーズIGBTモジュールと比較して、ターンオフ時のサージ電圧を約100V低減した。また、電圧振動やリーチスルー波形といった異常波形は観測されない。

図5に、XシリーズRC-IGBTモジュールのIGBTトロードオフ特性を示す。図中の点線は構造パラメータ制御により、トロードオフを調整したものである。同じスイッチング損失の場合、XシリーズRC-IGBTモジュールは、VシリーズIGBTモジュールと比較して飽和電圧を0.9V低減した。

図6に、XシリーズRC-IGBTモジュールの電力損失、接合温度 T_{vj} およびジャンクション-ケース間温度上昇 ΔT_{vj-c} を示す。Xシリーズのチップ技術とRC-IGBTの技術を組み合わせることで最大定格電流を拡大し、Vシ

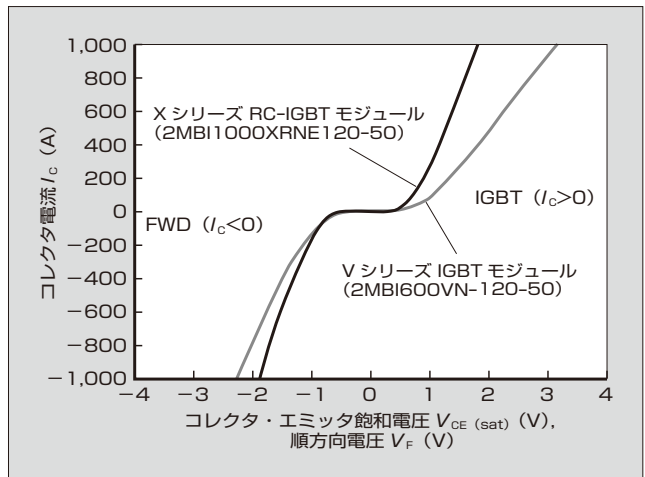


図3 出力特性

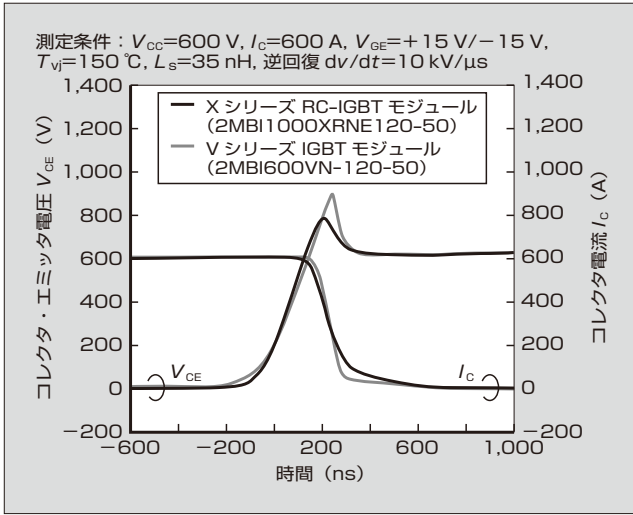


図4 ターンオフ波形

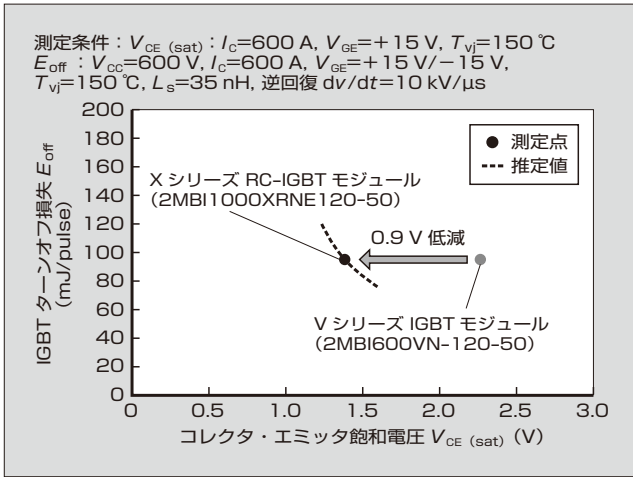


図5 IGBTトレードオフ特性

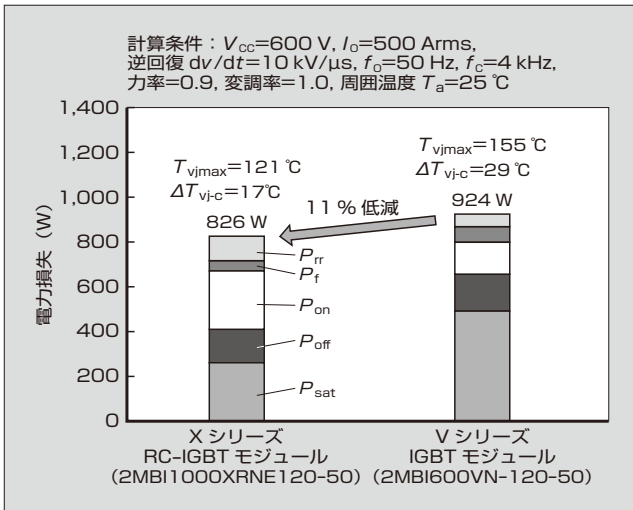


図6 電力損失および接合温度

シリーズ IGBT モジュールと比較して同一条件にて電力損失を11%低減した。さらに、Xシリーズのパッケージ技術とRC-IGBTの技術を組み合わせることで熱抵抗を大幅に低減し、最大接合温度 T_{vjmax} を $34\text{ }^\circ\text{C}$ 、 ΔT_{vj-c} を41%低減

した。

図7に、低周波動作時の T_{vj} の時間変動を示す。XシリーズRC-IGBTモジュールでは発生損失と熱抵抗の低減により、 T_{vjmax} を大幅に低減した。さらにRC-IGBTは同一チップ内でIGBTとFWDに通電されるため温度リップルが小さくなる。

したがって、XシリーズRC-IGBTモジュールでは、VシリーズIGBTモジュールと比較して接合温度上昇 ΔT_{vj} も大幅に低減した。これにより、アルミニウムワイヤ接合部およびシリコンチップ下はんだ接合部への熱ストレスを緩和することができる。図8に、 ΔT_{vj} パワーサイクル耐量と、今回の低周波動作時の温度上昇計算結果を示す。XシリーズRC-IGBTモジュールでは、 ΔT_{vj} の大幅低減により、低周波動作時の ΔT_{vj} パワーサイクル耐量が劇的に向上した。これにより、従来と同等のパワーサイクル耐量の場合では高出力化が、同等の出力の場合では高信頼性化が期待できる。

図9に、インバータの連続時および過負荷時の動作パ

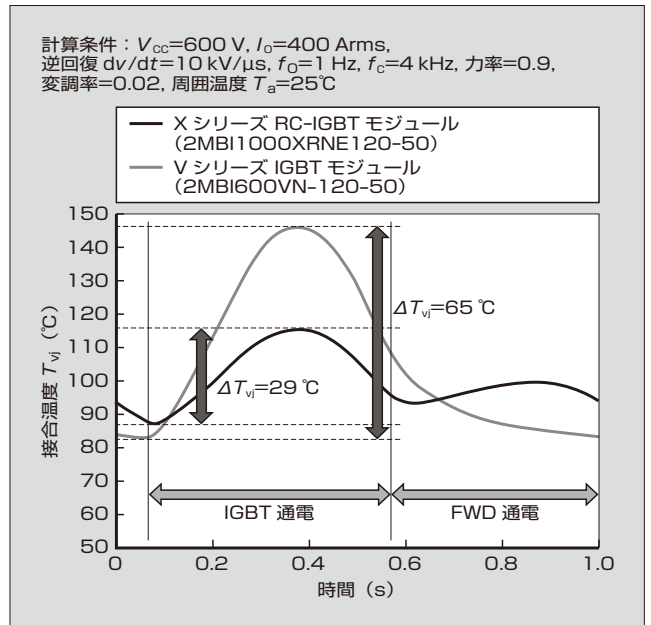


図7 低周波動作時の接合温度 T_{vj} の時間変動

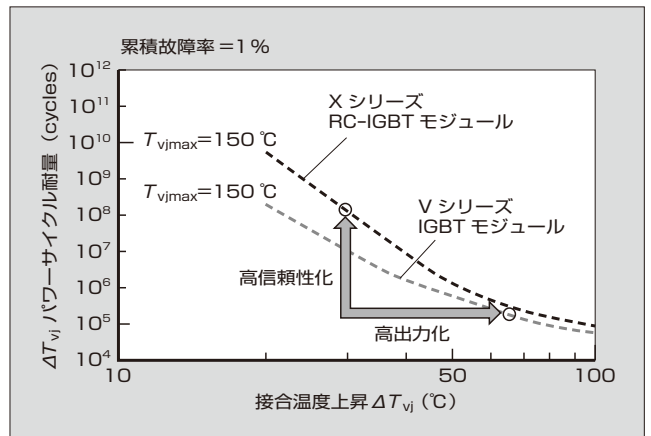


図8 ΔT_{vj} パワーサイクル耐量

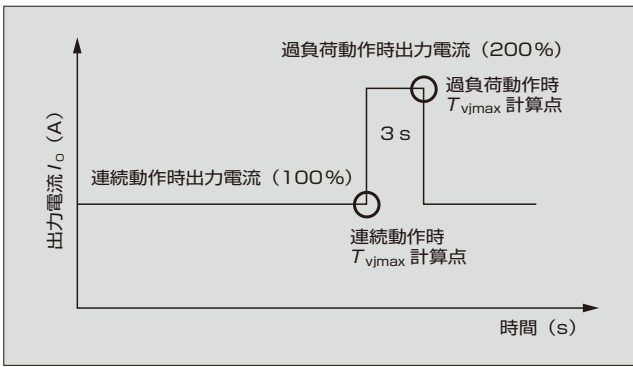


図9 インバータの連続動作および過負荷時の動作パターン

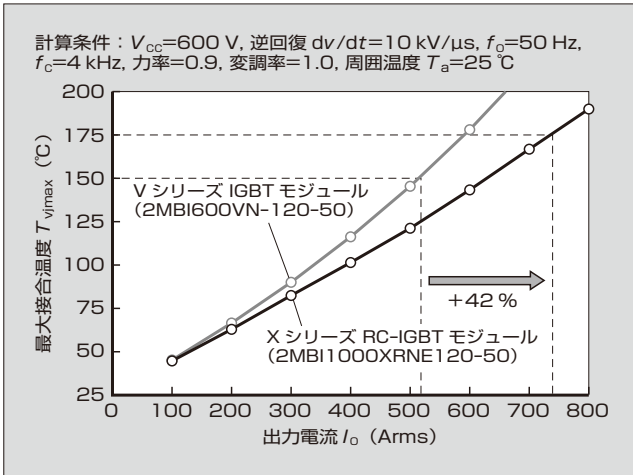


図10 連続動作時の最大接合温度

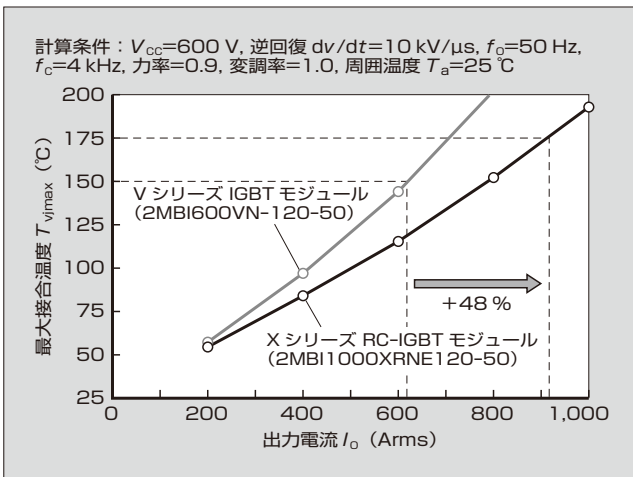


図11 過負荷動作時の最大接合温度

ターンを示す。図10に、連続動作時の出力電流を100%とした場合の出力電流 I_o と T_{vjmax} の計算結果を示す。また、図11に、過負荷動作として出力電流200%、3秒とした場合の I_o と T_{vjmax} の計算結果を示す。図12に、過負荷動作時の T_{vjmax} が150℃となるときのFEM (Finite Element Method:有限要素法)解析によるコンター図を示す。図10に示すように連続動作においては、電力損失と熱抵抗の低減、ならびに連続動作保証をVシリーズIGBTモジュールの150℃からXシリーズIGBTモジュールで

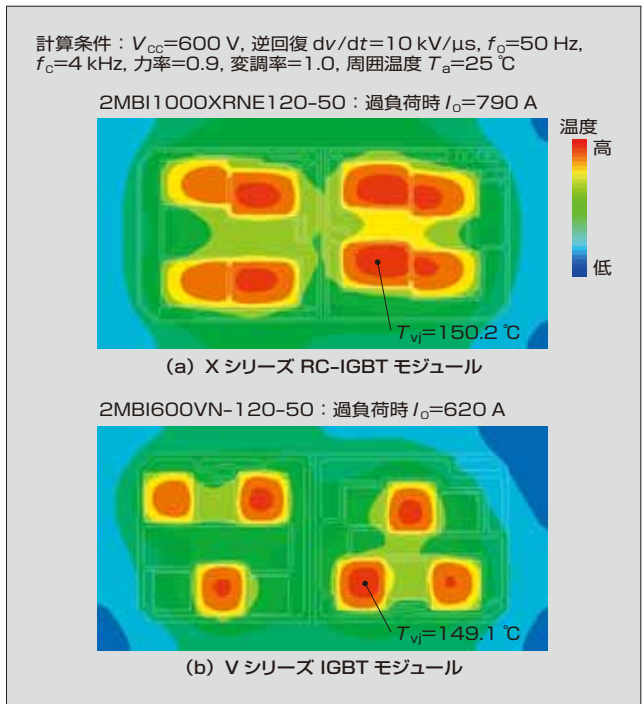


図12 過負荷動作時のFEM解析によるコンター図

175℃に上げることで、同一パッケージにおいて出力電流を42%拡大することが可能となった。図11に示すように過負荷動作においても、XシリーズRC-IGBTモジュールでは、出力電流を48%拡大した。さらに、図12に示すようにFEM解析によるコンター図より、XシリーズRC-IGBTモジュールはVシリーズIGBTモジュールと比較して、出力電流を27%拡大しても同一の接合温度150℃となることを確認した。また、チップサイズと内部レイアウトの最適化により温度分布がより均一化したことが分かる。これにより、各部材への熱ストレスが緩和され、さらなる高信頼性が期待できる。

5 あとがき

第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールの系列化について述べた。このモジュールにより、これまで実現が困難であった定格電流を達成し、電力変換装置の小型化・低コスト化によりいっそう貢献できると考える。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) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.256-260.
- (6) Takahashi, H. et al. “1200 V Reverse Conducting IGBT”, Proceeding of ISPSD 2004, p.133-136.
- (7) 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産業モジュール部。



高崎 愛子

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産業モジュール部。



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産業モジュール部。





*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。