

高速 IGBT モジュール

High-speed IGBT Modules

堀江 峻太 Shunta Horie

小川 省吾 Shogo Ogawa

高久 拓 Taku Takaku

特集

近年、MRI や X 線などの医療用電源、溶接機やプラズマカッタ用電源といった市場が拡大している。これらの機器のスイッチング周波数は 20 ～ 50 kHz の領域である。このような高スイッチング周波数領域での使用に適した高速 IGBT モジュールの開発を行った。IGBT チップの裏面 p 層の濃度コントロール、表面セルピッチ間隔の短縮、FWD チップのトレードオフの最適化によりスイッチング損失の低減を実現した。また、モジュールの放熱特性を改善したパッケージを採用することにより、チップの温度上昇を抑え、高速スイッチングを可能にした。

The market for power supplies, used in medical applications such as MRI and X-ray equipment and in welding and plasma cutting equipment, has expanded in recent years. The switching frequency of these devices is in the range of 20 to 50 kHz. High-speed IGBT modules have been developed for use at this high switching frequency. Lower switching loss has been achieved by controlling the doping level of the p-layer on the rear face of the IGBT chip, shrinking the cell pitch interval on the front face, and optimizing the trade-off relation of the FWD chip. Also, the use of a package that provides improved heat dissipating characteristics helps to suppress the temperature rise of the chip and enables high-speed switching.

① まえがき

近年、電気機器の省エネルギー対策の重要性が増しており、パワーエレクトロニクスを用いた電力変換装置の利用分野がますます拡大している。さらに、機器の高効率化のために新たな回路方式も提案され、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールに対するニーズはますます多様化している。これまで機器の性能向上に寄与するために低ノイズ、低損失な IGBT モジュールの開発が行われており、今後もよりいっそうの特性改善への期待が高まっている⁽¹⁾。一方で IGBT の特性もシリコン限界に近づいており、装置の高効率化を実現するためにはアプリケーションと一体となった製品設計が必要となってきた。今後大幅な市場の伸びが予測される MRI (Magnetic Resonance Imaging) や X 線などの医療用電源、溶接機やプラズマカッタ、誘導加熱装置などの高周波動作に対応した高速 IGBT モジュールを開発した。これらの機器は装置の小型化・高効率化を実現するために 20 ～ 50 kHz のスイッチング周波数で^{(2),(3)}使用されている。モータドライブ用の汎用インバータなどのスイッチング周波数 (数 kHz ～ 20 kHz) に比べて非常に高い周波数の領域である。したがって、スイッチング損失をいかに減らすかが重要となる。

そこで高速 IGBT モジュールは、装置の動作条件に合わせて IGBT の出力特性とスイッチング損失のトレードオフを最適化することにより、機器での発生損失が最小となるように設計した。

本稿では、今回開発した高速 IGBT モジュールの特徴とその技術について紹介する。

② 製品系列

図 1 に製品の外観を示す。開発した高速 IGBT モジュールの製品系列を表 1 に示す。図 2 に示すハーフブリッジ回路用の 2 個組モジュールとチョップパ用のモジュールを系列化した。電圧定格は、市場要求の高い 1,200 V である。電流定格は 2 個組モジュールが 100 A, 150 A, 200 A であり、チョップパ用モジュールが 200 A, 300 A, 400 A である。図 1 に示すように、パッケージはターゲット市場において広く使用されている標準パッケージを採用した。表 2 に高速 IGBT と通常タイプとの特性比較を示す。高速 IGBT の方が、IGBT, FWD (Free Wheeling Diode) とともに飽和電圧が高くなっているが、スイッチング損失が 40 ～ 50% に低減している。

図 3 に高速 IGBT の適用例として溶接機の回路を示す。このような回路においては、インバータ部に使用する 2 個組モジュールと、PFC (Power Factor Correction) 部に使用するチョップパモジュールが必要となる。この回路は

図 1 製品の外観

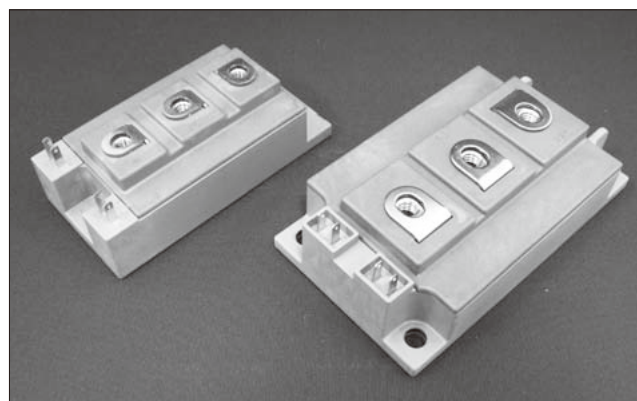


表 1 高速 IGBT モジュールの製品系列

型 式	電圧定格	電流定格	内部回路	パッケージ寸法
2MBI100HB-120-50	1,200 V	100 A	2 個組	45 mm×92 mm
2MBI150HH-120-50		150 A		
2MBI200HH-120-50		200 A		
1MBI200HH-120L-50		200 A	チョッパ	62 mm×108 mm
1MBI300HH-120L-50		300 A		
1MBI400HH-120L-50		400 A		

図 2 内部等価回路

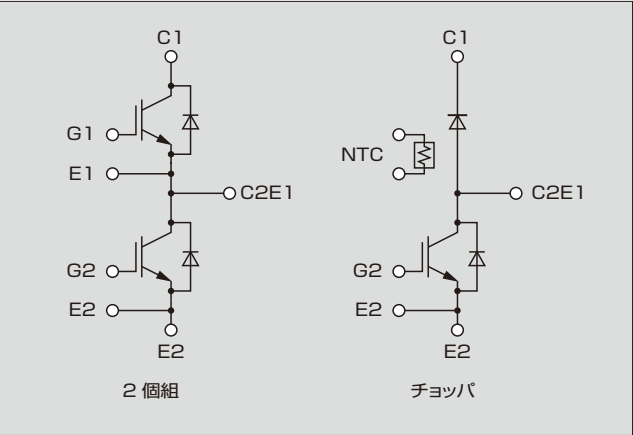
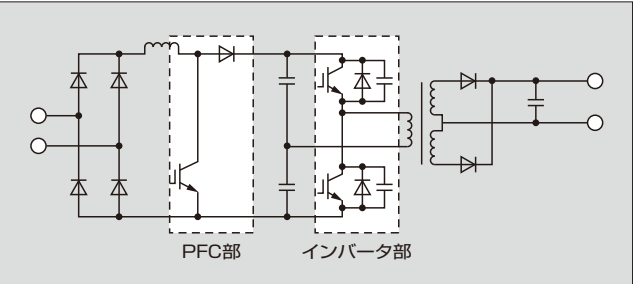


表 2 高速 IGBT, FWD の特性比較 (チョッパモジュール)

	IGBT		FWD	
	$V_{CE(sat)}$ (V)	E_{off} (mJ)	V_F (V)	E_{rr} (mJ)
高速 IGBT	4	9.2	4.34	5.89
通常タイプ (U4-IGBT)	2.1	20.2	1.8	16

定格：200 A/1,200 V、接合部温度：125℃
ゲート電圧：±15 V、コレクタ電流：200 A、DC バス電圧：600 V、
ゲート抵抗：標準

図 3 溶接機の回路



ハーフブリッジ回路となっており、インバータ部 IGBT のコレクタ電流 I_C とコレクターエミッタ間電圧 V_{CE} の波形は図 4 のようになる。 T はスイッチング周期、 T_F は FWD 導通時間である。図 4 から分かりますとおり、 I_C が流れ始めるときに V_{CE} はすでに 0 になっているため、ハーフブリッジ部の IGBT ではターンオン損失はほとんど発生しない。FWD 通電時間も IGBT に比べはるかに小さく、導通損失

図 4 ハーフブリッジ回路の動作波形

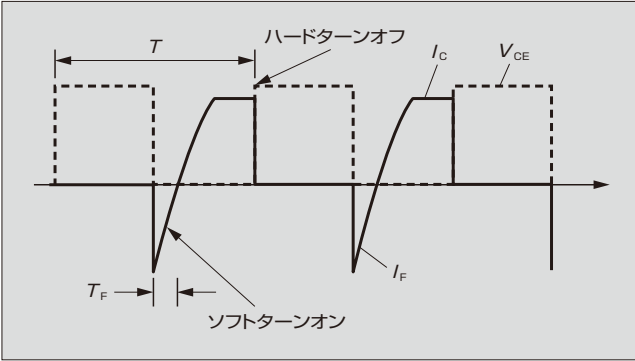


表 3 高速 IGBT モジュールの使用チップまとめ

	IGBT	FWD
2 個組	高速タイプ	通常タイプ
チョッパ	高速タイプ	高速タイプ

も無視できるほど小さい。そこで、開発製品は、インバータ部に使用する 2 個組モジュールのターンオフ損失の低減に注力し、IGBT のみ高速タイプを搭載した。PFC 部に使用するチョッパモジュールは、ハードターンオン動作となるため、FWD に対しても IGBT と同様にスイッチング損失の低減が必要となる。そのため、FWD も高速タイプを開発した。表 3 に、使用しているチップのタイプをまとめた。

3 高速 IGBT 製品設計

今回、IGBT チップ、FWD チップを新規に開発し、パッケージは通常タイプのパッケージに改善を施して低熱抵抗化を実現した。以下にその詳細を示す。

3.1 高速 IGBT チップの開発

スイッチング周波数が 20 kHz を超えるような使用領域においては、スイッチング損失をいかに減らすかが重要である。図 5 に示すように IGBT チップの飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ と IGBT チップのターンオフ損失 E_{off} はトレードオフの関係となっている。このトレードオフ上で低 E_{off} 、高 $V_{CE(sat)}$ にシフトすることにより、スイッチング損失を大幅に低減することが可能となる。今回はスイッチング周波数 20 ～

50 kHz において IGBT のトータル損失（導通損失とスイッチング損失の和）が最小になるようにチップ設計を行った。低 E_{off} 実現のため、図 6 に示すように以下の 2 点の改良を加え、損失低減を図った。

- (a) 裏面 p 層の濃度制御
- (b) IGBT 表面のセルピッチ間隔の短縮

図 5 IGBT トレードオフ

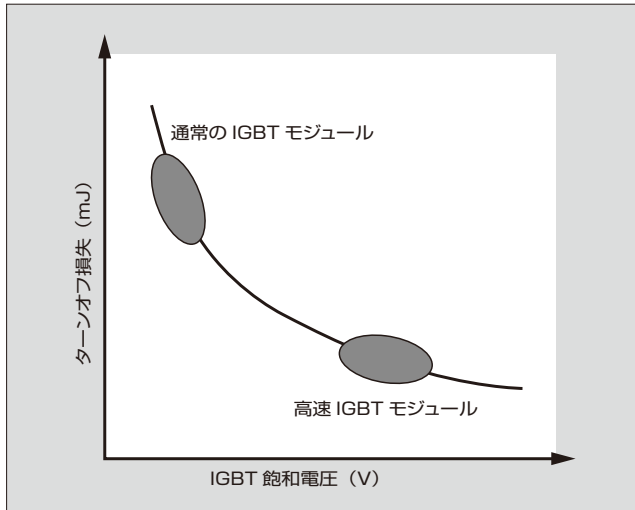


図 6 IGBT 構造の高速化

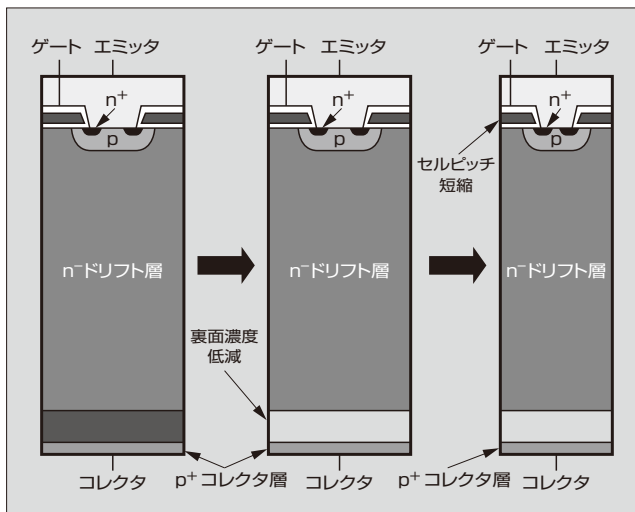


図 7 ターンオフ波形の改善

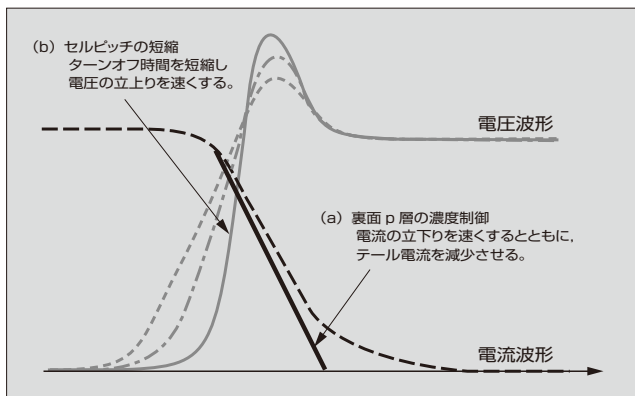


図 7 に(a), (b)の対策による I_C と V_{CE} 波形の改善の模式図を示す。(a)の対策は、ターンオフ時の残留キャリアを裏面から排出しやすくする効果がある。そのため、IGBT 電流の立下り時間が短縮するとともに、テール電流が低減できる。これによってターンオフ電流下降時の損失が低減した。(b)の対策では、IGBT の帰還容量と入力容量の比率が変わる効果がある。電圧の立上り時間を短縮し、ターンオフ電圧上昇期間の損失を低減する。以上 2 点の改善により、トータルの E_{off} が大幅に低減する。試作した高速 IGBT モジュールと、通常のモジュールとのターンオフ波形の比較を図 8 に示す。テール電流が低減されていることに加え、 V_{CE} の立上りが高速になっており、改善策の効果が現れて

図 8 ターンオフ波形の比較 (200 A/1,200 V 品)

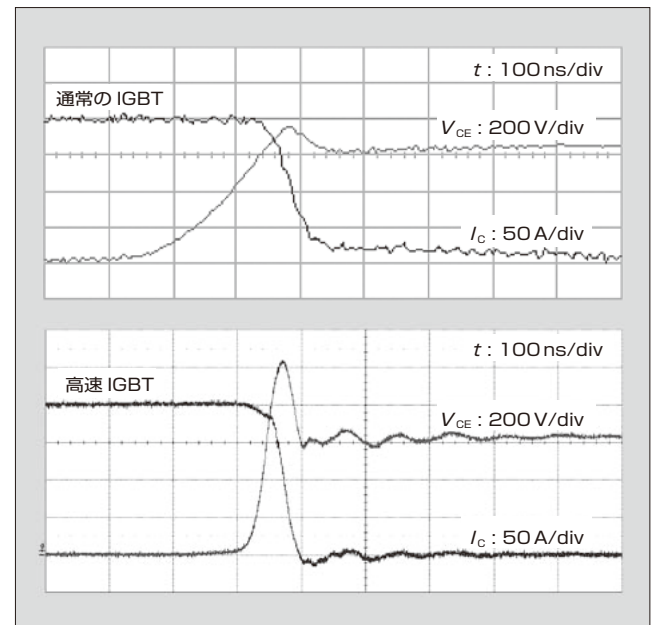
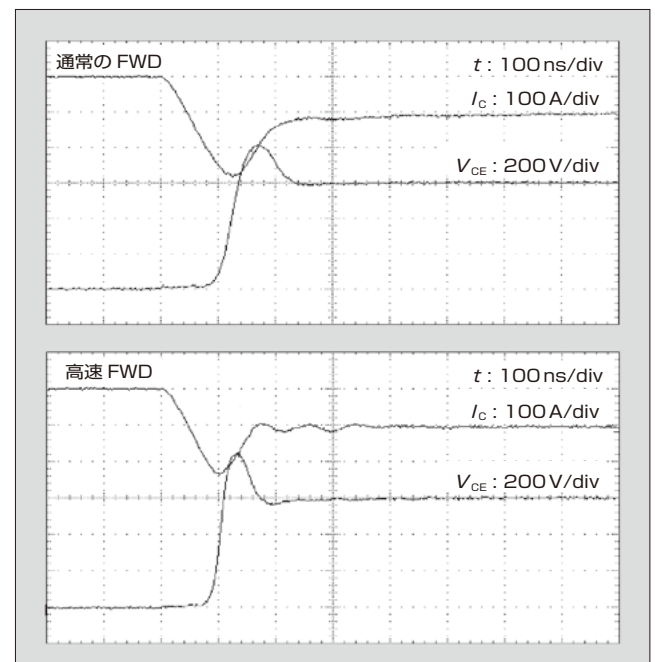


図 9 逆回復波形の改善 (100 A/1,200 V 品)



いる。これにより、表 2 に示すように、 E_{off} を通常タイプ (U4 シリーズ) に対して約 1/2 に低減することができた。

3.2 高速 FWD チップの開発

PFC 回路に適用する IGBT モジュールは、ハードターンオン動作となるため、FWD チップでの逆回復損失 E_{rr} の全損失に占める割合が非常に大きくなり、FWD 特性を高速化することが必要となる。 E_{rr} と FWD の順電圧 V_F の関係も、IGBT の $E_{off}-V_{CE(sat)}$ の関係と同様にトレードオフの関係になっている。これを高周波用途に合わせ、高 V_F 、低 E_{rr} にシフトするための改善策として、ライフタイムキラーのドーピング量を最適化した。図 9 に FWD 逆回復時の波形比較を示す。表 2 に示すように、ライフタイムキラーの量を調整することで逆回復電流を低減し、通常タイプの E_{rr} に対して約 1/3 に低減することができた。

3.3 発生損失

今回開発した高速 IGBT の 2 個組モジュールとチョッパモジュールについて、通常タイプと発生損失を比較した。

図 10 2 個組モジュールの発生損失比較 (200 A/1,200 V)

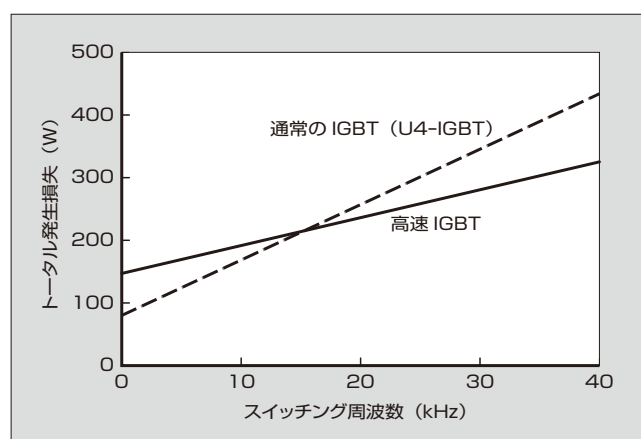


図 11 40 kHz における発生損失比較 (200 A/1,200 V)

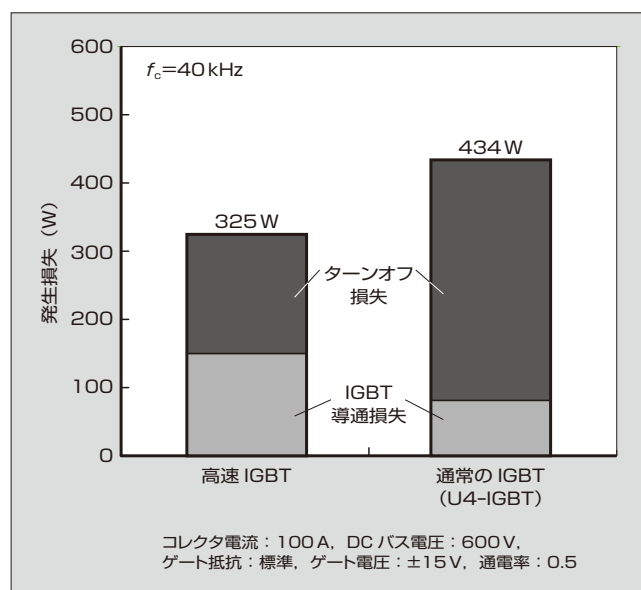


図 10、図 11 に 2 個組モジュールの U4 シリーズ (2MBI200U4H-120-50, 定格 200 A/1,200 V) と高速 IGBT (2MBI200HH-120-50, 定格 200 A/1,200 V) の発生損失比較を示す。[2] 章で述べたように、2 個組モジュールに関してターンオン損失はほとんど発生せず、また FWD での導通損失も全体損失に対して無視できるほど小さいため、ターンオフ損失と IGBT 導通損失の比較を行った。15 kHz 以上のスイッチング周波数では、高速 IGBT モジュールのトータル発生損失が低く、40 kHz では 25% 低減できた。

図 12 に、チョッパモジュールの U4 シリーズ IGBT (1MBI200U4H-120L, 定格 200 A/1,200 V) と高速 IGBT (1MBI200HH-120L-50, 定格 200 A/1,200 V) の発生損失比較を示す。

$f_c = 25$ kHz の条件において、高速 IGBT モジュールではトータル発生損失が 36% 低減できた。

3.4 パッケージ技術

電力変換装置の小型化・高密度化に伴い、IGBT モジュールの放熱特性に対する要求も厳しくなっている。特に、図 10 から分かるように、スイッチング周波数が高い領域において発生損失は通常の IGBT に比べ低減しているが、低周波領域に比べ発生損失が増加するため、より放熱設計が重要となる。そこで、今回開発した高速 IGBT モジュールでは、DCB (Direct Copper Bonding) 基板を従来のアルミナ基板から、富士電機のハイパワーモジュールにも使用している窒化けい素基板に変更することにより、モジュールの放熱特性を向上させた。表 4 に従来のアルミナ DCB 基板との特性比較を示す。熱伝導率が 4 倍になっており、同じチップサイズにおいて比較した場合のジャンクション-ケース間の熱抵抗値 $R_{th(j-c)}$ が 30% 低減している。

図 12 チョッパモジュールの発生損失比較 (200 A/1,200 V)

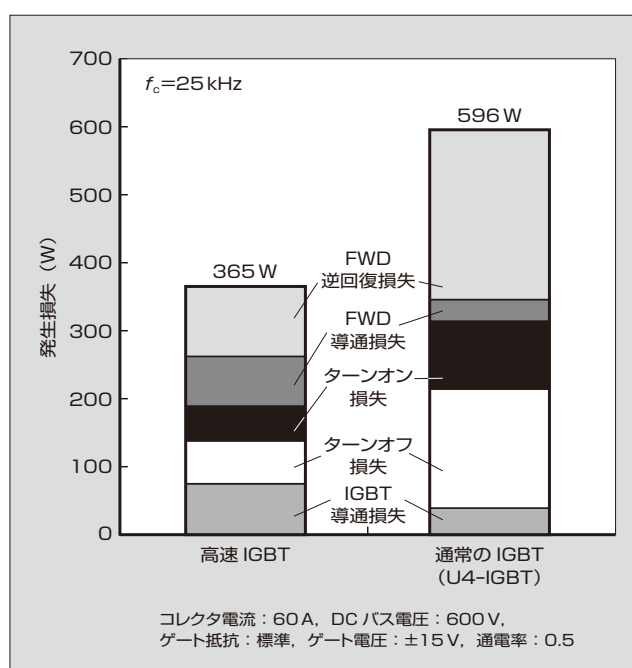


表 4 アルミナ基板と窒化けい素基板の特性比較

	アルミナ	窒化けい素
熱伝導率 $[W/(m \cdot K)]$	22	90
厚み (mm)	0.38	0.32
熱抵抗 $R_{th(j-c)} (K/W)$	0.23	0.19

る。これにより高速 IGBT モジュールでのチップの温度上昇を抑えることができた。

4 あとがき

今回、MRI や X 線などの医療用電源、溶接機やプラズマカッタ、誘導加熱装置などに最適化した高速 IGBT モジュールの特徴と、その技術について紹介した。

今後は、今回開発した高速 IGBT、FWD チップや、開発に際しての技術ノウハウを生かし、太陽光インバータや UPS（無停電電源装置）といった、今後の市場拡大がさらに大きいと期待される応用分野をターゲットとした IGBT モジュールの開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) Nakano, H. et al. The 6th generation 1,200 V Trench FS-IGBT module. PCIM China 2008.
- (2) Theron, P.C. et al. Welding power supplies using the partial series resonant converter. IECON'93. 1993, vol.2, p.1319-1324.

1324.

- (3) Takasaki, Y. et al. Development of a portable spot-welding machine. IEEE International Magnetics Conference. 2003, p.HB-06.
- (4) 西村孝司ほか. IGBTハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p. 390-394.



堀江 峻太

パワー半導体、電力変換システムの設計・開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部モジュール開発部。



小川 省吾

パワー半導体、電力変換システムの設計・開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部モジュール開発部。



高久 拓

パワー半導体、電力変換システムの設計・開発・営業技術に従事。現在、富士電機アメリカ社。博士（工学）。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。