

マルチレベル電力変換器用 1,700 V RB-IGBT

1,700 V Reverse-Blocking IGBTs for Multi-Level Power Converters

魯 鴻飛 LU Hongfei

荻野 正明 OGINO Masaaki

中澤 治雄 NAKAZAWA Haruo

変換効率の高い電力変換器の適用が広がっている。無停電電源装置や太陽光発電用パワーコンディショナなどでも、従来の2レベル変換方式から、より高効率なマルチレベル方式へ移行しつつある。富士電機では、マルチレベル変換回路に双方向スイッチとして使用される1,700 V RB-IGBTを他社に先駆けて開発した。熱拡散とV溝のエッチングを組み合わせるハイブリッド分離層方式を採用し、1,700 V デバイスへ適用した。高圧インバータの代表的なスイッチング周波数（～500 Hz）で中間素子がRB-IGBTの場合、導通損失の低減により、3レベルインバータの電力損失は18%減少した。

In a general trend to use highly efficient power converters, we are also observing a shift from conventional two-level converters toward multilevel converters of higher efficiency, in such applications as uninterruptible power supply (UPS) units and power conditioning system (PCS) units for solar power generation. Ahead of any other company, Fuji Electric has developed 1,700 V reverse-blocking insulated gate bipolar transistors (RB-IGBTs), used as bidirectional switches in multilevel converter circuits. For the 1,700 V device, we employed a hybrid isolation process that combines thermal diffusion and V-groove etching. When RB-IGBTs were used as neutral point clamping devices at a typical switching frequency for high-power inverters (up to 500 Hz), the decrease in conduction loss resulted in a reduction of energy loss by 18% in three-level inverters.

1 まえがき

近年、低炭素社会の実現に向けた意識が高まり、パワーエレクトロニクス分野において、変換効率の高い電力変換器の適用が広がっている。無停電電源装置（UPS）や太陽光発電用パワーコンディショナ（PCS）などのアプリケーションでも、従来の2レベル変換方式から、より高効率なマルチレベル方式に移行し、3レベル中間点クランプ（NPC：Neutral-Point-Clamped）またはアドバンスド NPC（A-NPC）方式のコンバータへの置き換えが進んでいる⁽¹⁾。RB-IGBT（Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor：逆阻止 IGBT）を A-NPC 回路へ適用することにより、さらなる高効率化が可能である。

本稿では、風力発電や車両分野などの大容量分野のマルチレベル電力変換器に適用するために開発した1,700 V 耐圧のRB-IGBTデバイスと、そのプロセス技術について述べる。さらに、A-NPC 3レベル回路を例に、RB-IGBTを適用することによるメリットを説明する⁽²⁾。

2 開発の背景

NPC方式では、使用する半導体素子の数が多く、制御が複雑になるなどの課題がある。また、A-NPC3レベル方式では、中間素子をIGBTとFWD（Free Wheeling Diode）との直列接続（以下、逆直素子という）で構成し、パワーコンバータの入出力を容量結合の中間点と接続する方式で変換効率を向上させている（図1(a)）。そして、その中間素子をRB-IGBTで置き換えることにより、さらなる部品点数削減によるオン抵抗の低減によって変換効率が向上する^{(3),(4)}（図1(b)）。

当初、RB-IGBTはマトリックスコンバータ向けに開発

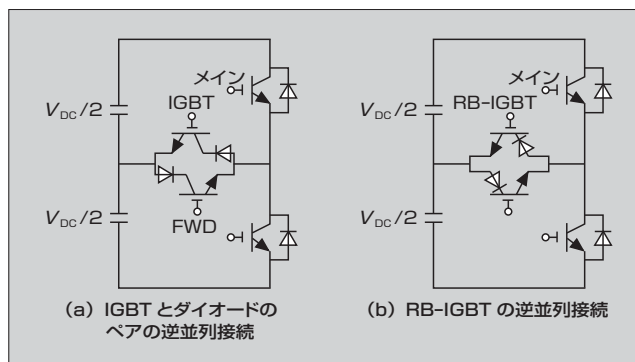


図1 A-NPC 3レベルインバータの回路構成

^{(5),(6)}し、製品化したものである。これをベースに、A-NPC 3レベル方式コンバータへ適用するために、チップを貫通する分離層形成技術の完成度を高め、1,200 V 耐圧クラスまでのRB-IGBTを開発してきた⁽⁷⁾。さらに、風力発電や車両分野などの大容量分野に適用していくためには、より高い耐圧のデバイスが必要である⁽⁸⁾。

3 素子構造とプロセス

図2(a)に素子の終端構造の模式図を、図2(b)に分離層の断面の走査型電子顕微鏡（SEM）像を示す。チップ表面は、フィールドリミットリングの終端構造とプレーナゲートのセルで構成されている。コレクタ接合で逆阻止能力を持たせるために、その接合は外周部でチップを貫通するp+分離層で終端し、活性部の縦方向も電圧印加された際の空乏層が素子の表面に到達しないノンパンチスルー構造としている。

1,700 V RB-IGBTのチップ厚さは300 μm に近く、これまで報告された熱拡散による接合の最大深さ（200 μm ）

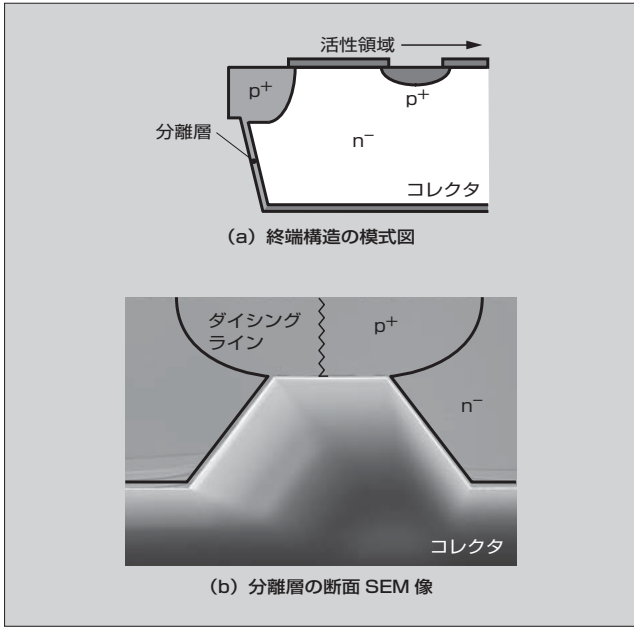


図2 素子の終端構造と分離層

を超え、熱拡散だけでの分離層形成は困難である。また、横拡散による分離層表面積が増大してしまう。これらの問題を解決するため、熱拡散とV溝エッチングを組み合わせるハイブリッド分離方式を採用した。図3にその概略プロセスフローを示す。

まず、表面セル構造を形成する前に、p+分離層をウェーハの表面側から形成する(図3(a))。表面構造を形成した後、ウェーハを薄くする工程において分離層形成領域に裏面からのV溝エッチングを行う(図3(b))。次に、裏面側から、p形イオンを注入してV溝の表面とコレクタのp層を形成する。このp層が表面の拡散層と接続し、分離

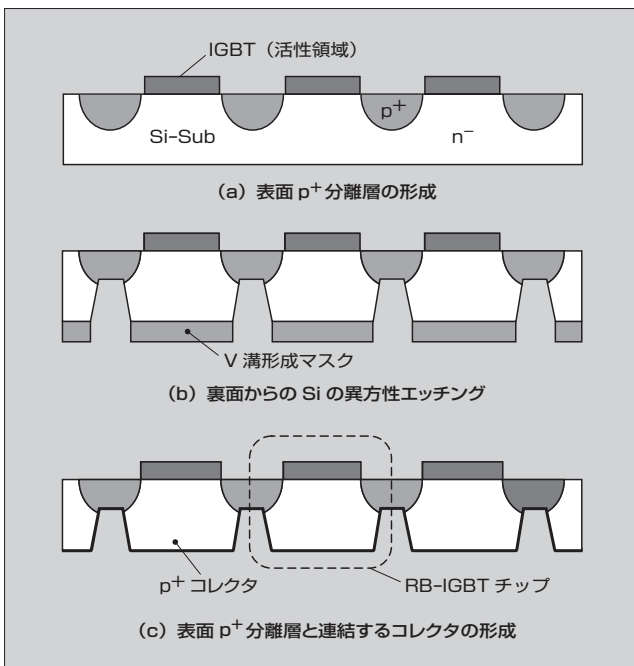


図3 ハイブリッド分離層を持ったRB-IGBTの概略プロセスフロー

層構造が形成される。最後に、裏面電極を形成する(図3(c))。

4 素子の電気特性

4.1 静特性

図4に、50A定格電流 I_0 チップの電圧阻止状態のI-V特性を示す。回路の動作モードに合わせ、順方向($V_{CE} > 0V$)の曲線はIGBTモードの特性、逆方向($V_{CE} < 0V$)の曲線はダイオードモードの特性を示した。いずれも十分な耐圧マージンを持っている。

図5に、RB-IGBT、従来の「Uシリーズ」IGBT(U-IGBT)とFWDからなる逆直素子のオン状態のI-V特性を示す。125℃、定格電流で、RB-IGBTの導通電圧 V_{on} は1.9V低くなっている。

4.2 スイッチング特性

(1) スイッチング損失

RB-IGBTのターンオフ、ターンオン、逆回復損失(E_{off}, E_{on}, E_{rr})と V_{on} の関係を図6に示す。バス電圧 V_{DC} は

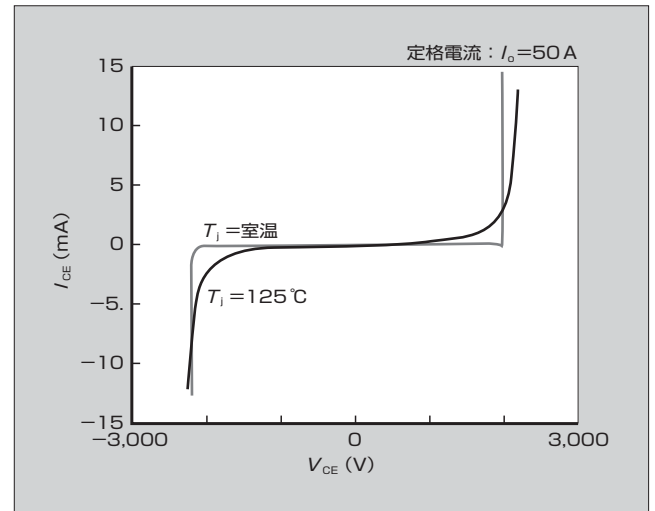


図4 オフ状態の双方向I-V特性

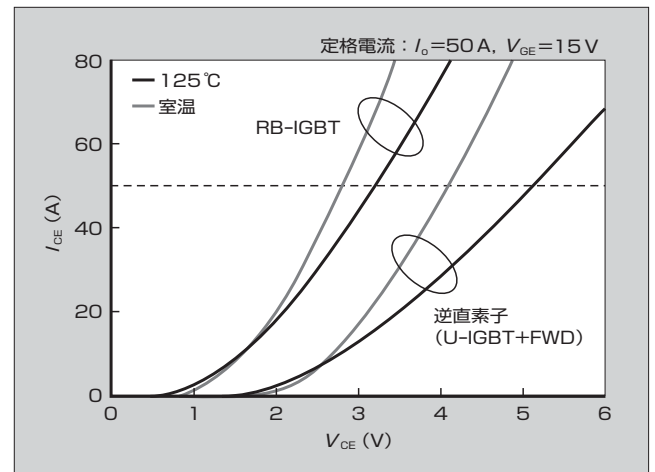


図5 RB-IGBTと逆直素子のオンI-V特性

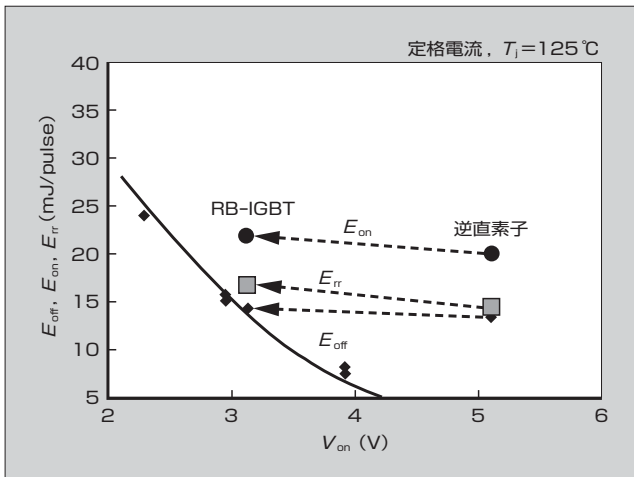


図6 RB-IGBTと逆直素子のスイッチング損失とオン電圧

850Vにした。逆直素子に比べ、RB-IGBTの E_{on} 、 E_{rr} はわずかに増加するが、 E_{off} は同等レベルにある。代表的なターンオフ波形を図7に、特性一覧を表1に示す。強い耐量を保ちながら低 V_{on} を達成している。

(2) ダイオードの逆回復特性

RB-IGBTは逆阻止耐圧を担うだけでなく、メイン素子の転流ダイオードとしても動作する(図1)。特に、EMIノイズの発生を抑えるため逆回復時のソフトネスが求められる。定格電流では、メイン素子の3.3kV U-IGBTのターンオン di/dt が1.2kA/ μ sまでは逆回復波

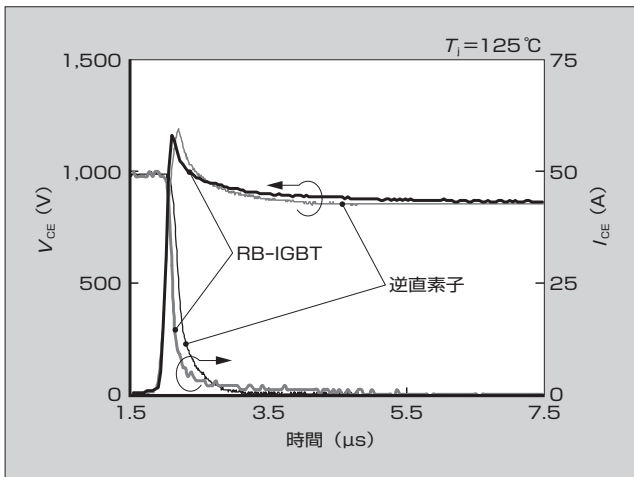


図7 RB-IGBTと逆直素子のターンオフ波形

表1 RB-IGBTと逆直素子の特性 ($T_j=125^\circ\text{C}$)

項目		RB-IGBT	逆直素子
基本特性	V_{ON} (V)	3.2	5.1
	E_{off} (mJ/pulse) F	14.3	14.5
	E_{on} (mJ/pulse)	22.0	20.1
	E_{rr} (mJ/pulse)	16.8	14.5
耐量	RBSOA	$7 \times I_o$	
	SCSOA (μ s)	17.3	
	逆回復耐量 (kW/cm^2)	>197	

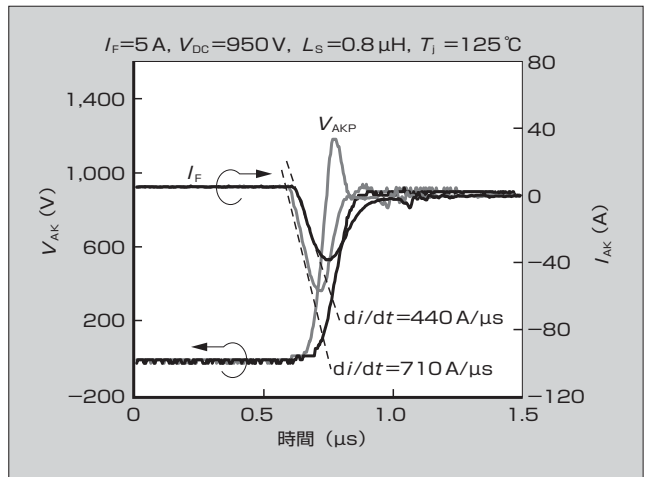


図8 二つの条件のメインIGBTターンオン di/dt

形に電圧の跳ね上がりはほとんど見られない。小電流では、跳ね上がりが顕著となる。

図8に、二つの条件のメインIGBTのターンオン di/dt (710A/ μ sおよび440A/ μ s)に対応する逆回復波形を示す。電流のスルーレート di/dt が440A/ μ s以下であれば、ダイオードの跳ね上がり電圧は生じなくなる。

4.3 スイッチング耐量

(1) IGBTの耐量

図9に、代表的な逆バイアス安全動作領域(RBSOA)の波形を示す。定格の7倍まで電流を流しても安全に遮断できる。図10に代表的な短絡安全動作領域(SCSOA)波形を示す。素子は非破壊である。図10のゲート信号のオン期間から分かる短絡耐量は、17 μ s以上にもなる。開発したRB-IGBTは、アプリケーション側が求める耐性を十分に備えている。

(2) ダイオード逆回復耐量

図11に、2倍の定格電流条件での非破壊大電流逆回復波形を示す。この図から求めたエネルギー密度は、197kW/ cm^2 になる。ダイオードは、これを超えるエネルギー耐量を持つことが分かる。

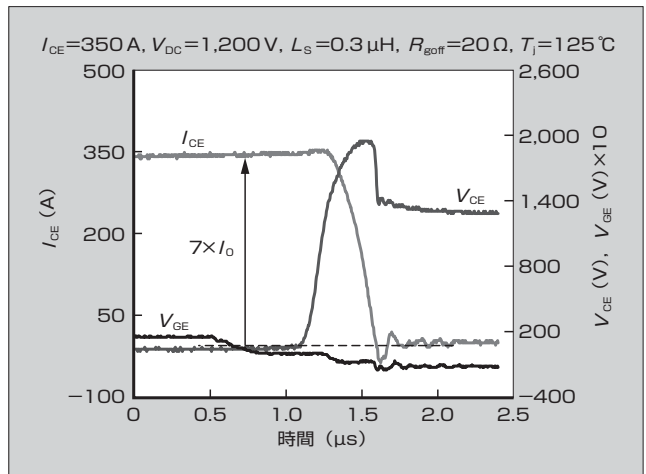


図9 代表的なRBSOA波形

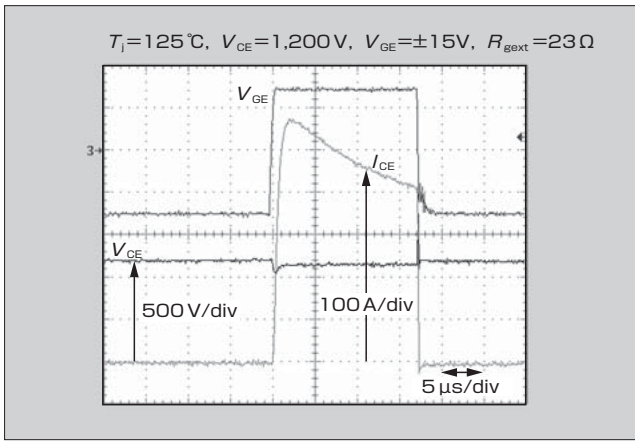


図 10 代表的な SCSOA 波形



図 12 1,700V 1,200A RB-IGBT モジュール

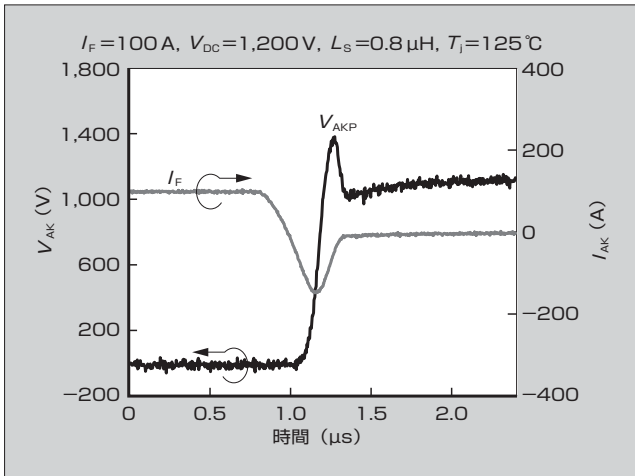


図 11 非破壊大電流逆回復波形

コレクタ接合深さは、従来の FWD のアノード深さに比べて相対的に薄く、耐量の低下につながりやすいが、ノンパンチスルードリフト領域の採用とコレクタ注入効率を最適化することにより、高い耐量を維持できた。V 溝でコレクタの形状が非平面的になるが、コレクタ形状の最適化により、逆回復の耐量にマイナスの影響を及ぼしていないことが分かる。

4.4 3 レベル A-NPC インバータ回路におけるパワー損失

既存のハイパワーモジュールのパッケージ中に、50A のチップを 24 個並列して 1,200A 中間素子モジュールを構成した (図 12)。メイン素子との関わりを調べるために、 V_{on} が 3.1V (低定常損失) と V_{on} が 3.9V (低スイッチング損失) のチップで 2 種類のモジュールを作製した。おのおの RB-IGBT (A) と RB-IGBT (B) とし、図 1(b) の 3 レベル A-NPC インバータの各動作モードにおけるスイッチング損失を測定した。メイン素子には、3.3kV U-IGBT と FWD を使用した。測定時、 T_j を 125°C、バス電圧を 900V (図 1 の $V_{DC}/2$)、全ての IGBT の外付けのゲート抵抗は 3.3Ω にした。

図 13 に、キャリア周波数 f_c が 500 Hz と 1,000 Hz におけるインバータの電力損失の計算結果を示す。ただし、出力

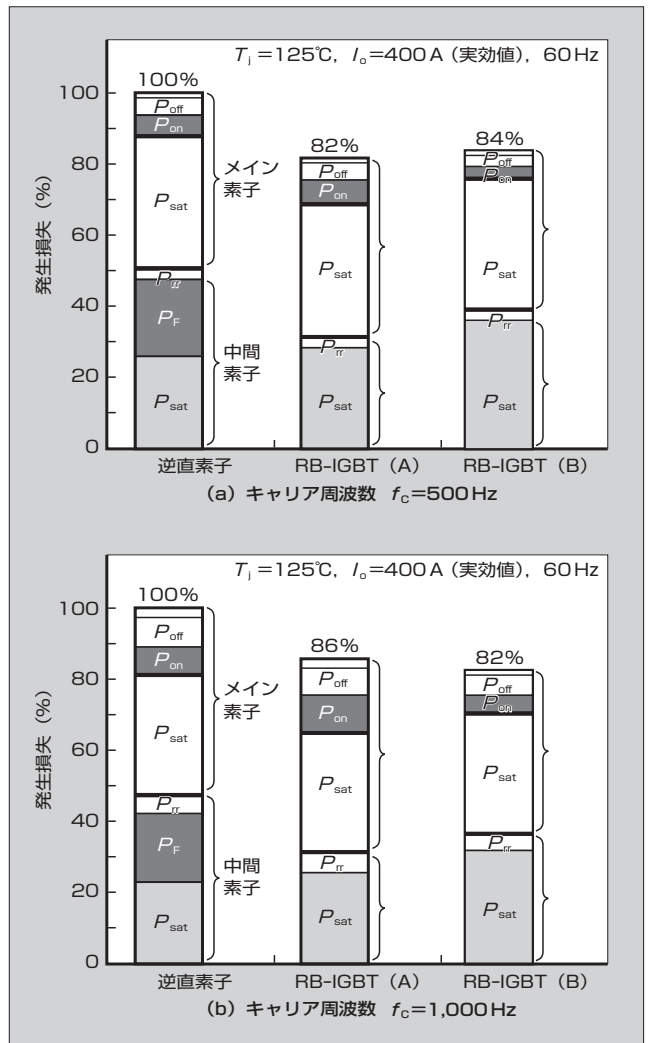


図 13 RB-IGBT、逆直素子を中間素子とする場合の 3 レベル A-NPC インバータの電力損失

電流を 400 A (実効値)、出力周波数を 60 Hz、力率を 0.8、変調比を 0.8 にした。RB-IGBT の逆回復損失 P_{rr} は、メイン IGBT のターンオン損失 P_{on} と一緒に最適化する必要がある。 f_c が 1,000 Hz の場合、RB-IGBT の V_{on} を犠牲にして P_{rr} を低くすれば、メイン IGBT の P_{on} も低減できる。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

その結果、総電力損失を低減できる。 f_c が500 Hzで、中間素子デバイスとして、RB-IGBT (A)とRB-IGBT (B)のモジュールを使用する場合、逆直素子に比べて、総電力損失はそれぞれ18%と16%削減できる。

5 あとがき

マルチレベルコンバータのアプリケーションにおける双方向スイッチとして使用される1,700 V RB-IGBTを、他社に先駆けて開発した。シリコンを貫通する分離層を形成するために、1,200 V RB-IGBTに応用した熱拡散とV溝のエッチングを組み合わせる分離層形成工程を高度化し、1,700 V RB-IGBTに対しても安定した分離層の形成を可能にした。開発した素子を用いて、十分な耐圧特性とスイッチング耐性を実証した。

50 A 定格プレーナゲートRB-IGBTのオン電圧は、同定格のU-IGBTとFWD逆直素子のオン電圧と比べ、同じターンオフスイッチング損失で、1.9 V低くなっている。ハイパワー、中電圧アプリケーション(高圧インバータ)の代表的なスイッチング周波数(～500 Hz)で、A-NPC 3レベル回路を用いて検討した結果、中間素子がRB-IGBTの場合、IGBTとFWDの逆直素子の場合に比べ、インバータのエネルギー損失は18%減少した。

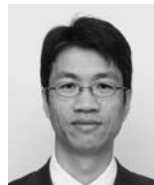
今後は、開発した1,700 V RB-IGBTをマルチレベルインバータ向けに適用し、より高周波アプリケーションへ適用するために最適化していく所存である。

参考文献

- (1) Nabae, A. et al. "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans. on Industrial Applications. 1981, vol.1 A-17, no.5, p.518-523.
- (2) Lu, H. et al. "1700 V Reverse-Blocking IGBTs with V-Groove Isolation Layer for Multi-Level Power Converters", Proc. PCIM Europe 2012, p.815-821.
- (3) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using

Advanced Three-level Topology", Proc.PCIM Europe 2010, p.550-555.

- (4) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters", Proc. Int Pow. Ele. Conf. 2010, p.523-527.
- (5) Takei, M. et al. "The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter with Ultra Thin Wafer Technology", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2003, p.156-159.
- (6) Naito, T. et al. "1,200 V Reverse Blocking IGBT with Low Loss for Matrix Converter", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2004, p.125-128.
- (7) Nakazawa, H. et al. "Hybrid Isolation Process with Deep Diffusion and V-Groove for Reverse Blocking IGBTs", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2011, p.116-119.
- (8) Wu, B., "High-power converters and AC drives", IEEE Press 2006, ISBN-100-471-74171-4.



魯 鴻飛

パワー半導体デバイスの研究・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。工学博士。IEEE 会員。



荻野 正明

パワーデバイスのプロセス開発に従事。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。



中澤 治雄

マイクロマシンの研究、パワーデバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター次世代パワエレプロジェクト部。電気学会会員、応用物理学学会会員。





*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。