

アドバンスト NPC 変換器用 RB-IGBT

特集

RB-IGBT for Advanced NPC 3-Level Power Converters

中澤 治雄 Haruo Nakazawa

脇本 博樹 Hiroki Wakimoto

荻野 正明 Masaaki Ogino

アドバンスト NPC (A-NPC : Advanced Neutral-Point-Clamped) 変換器に適用する 1,200 V RB-IGBT (Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor) を開発した。RB-IGBT は、深い p⁺ 分離層を必要とするが、新しいハイブリッド型分離層形成プロセスを考案して、容易に製作できるようにした。IGBT とダイオードを組み合わせる従来の方法に比べて、損失を大幅に低減することができる。この RB-IGBT を用いた A-NPC インバータの発生損失は、従来の 2 レベルインバータよりも 31%、NPC インバータよりも 15% 低減できる。電力変換効率は 98.57% である。

Fuji Electric has developed a new 1,200 V RB-IGBT (reverse blocking insulated gate bipolar transistor) and used it to form bi-directional switches in A-NPC (advanced neutral-point-clamped) 3-level modules. The new chip features a hybrid through-silicon isolation structure combining wafer front-side boron deep diffusion with back-side V-groove etching. The new RB-IGBT delivers significantly lower loss compared to the conventional combination of diode and IGBT. Use of 1,200 V RB-IGBTs as bidirectional switches and 1,700 V IGBTs and FWDs as main switches achieves power conversion efficiency as high as 98.57%. Power loss in A-NPC inverters has been reduced by 31% compared to 2-level inverters, and by 15% compared to conventional NPC 3-level inverters.

1 まえがき

近年、CO₂ 排出量の低減に対するさまざまな取組みが世界規模で行われている。パワーエレクトロニクス分野において、電力の変換効率を高くすることは、発電時の CO₂ 排出抑制や再生可能エネルギーの有効活用につながる。

変換効率を高める最も効果的な方法の一つとして、マルチレベルインバータがあり、いくつかの NPC (Neutral-Point-Clamped) インバータが実用化されている。近年、ダイオードによる中性点クランプを持つ代表的な NPC3 レベルインバータ⁽¹⁾が AC ドライブ用インバータや無停電電源装置 (UPS) などに使われ始め、スイッチング損失の低減やフィルタサイズの小型化に効果を挙げている。しかし、この NPC インバータは使用する半導体素子が多く、制御が複雑であるなどの課題がある。

これらの課題を解決するために、RB-IGBT (Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor)^(3~5) を中間点クランプに使用し、双方向スイッチとして活用するアドバンスト NPC (A-NPC) インバータ^(6~8) を考案した。RB-IGBT は、逆耐圧を持つ RB-IGBT を逆並列に接続することにより低

損失の双方向スイッチを構成することができる。

本稿では、A-NPC 変換器およびそれに適用される 1,200 V RB-IGBT の電気的特性について述べる。

2 RB-IGBT の概要

双方向スイッチの形成手段として、最も典型的なものには、図 1 に示すような二つの方法がある。図 1 (a) は、従来型の二つの IGBT と、二つのダイオードから構成する方法である。通常の IGBT は、逆バイアスが印加された際に電圧を支える pn 接合がダイシング面に接しているため、逆バイアスを印加するとダイシングによって生じた高密度結晶欠陥により大量のキャリアが発生し耐圧が確保できない。そのため、ダイオードを直列に接続する必要があり、オン電圧の増加を伴ってしまう。一方で、図 1 (b) に示すように、

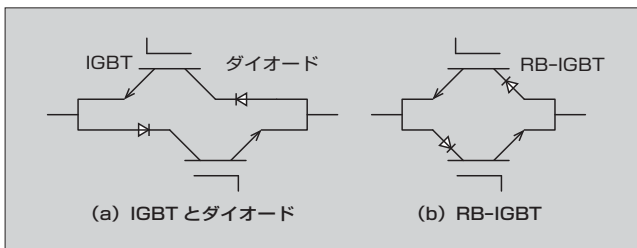


図 1 双方向スイッチの構成

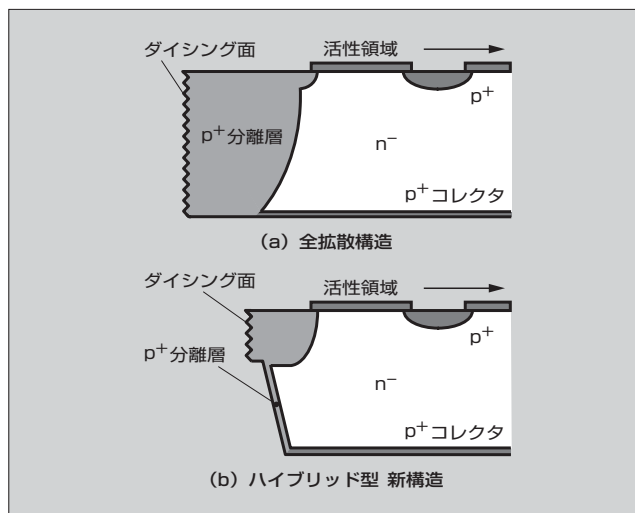


図 2 RB-IGBT の断面構造

〈注〉 3 レベルインバータ技術 (353 ページ「解説 1」参照)

RB-IGBT を用いて双方向スイッチを形成する場合は、ダイオードが不要となり、劇的なオン電圧削減、トータル素子数の削減が実現できる。

RB-IGBT は、図 2 (a)に示すように、スクライプ領域においてダイシング面を覆うような深い p⁺ 分離層を形成することによって、逆バイアス印加時に空乏層がダイシング面に達するのを阻止することで逆方向耐圧を確保している。

しかし、この熱拡散による分離層形成方法は、高温で非常に長時間の熱拡散処理が必要である。また、RB-IGBT を高耐圧化しようとした場合、深い分離拡散層形成は、横方向拡散による分離拡散層の横幅増大によるチップサイズの増大も顕著になってくる。そこで、図 2 (b)に示すように、新しいハイブリッド型の分離層構造を考案した。図 3 に、製作プロセスフローを示す。分離層はデバイス表面からのボロンの深い拡散と裏面側からの V 溝エッチングの組合せにより形成される。V 溝側壁の分離層と裏面のコレクタ

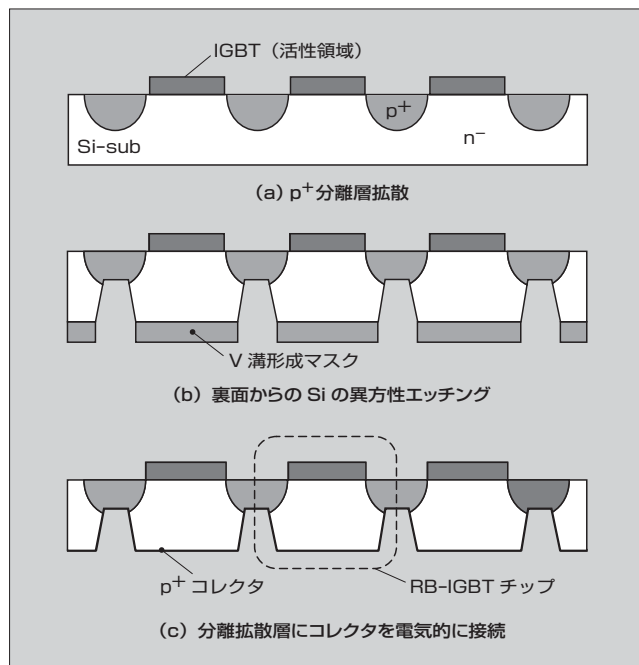


図 3 ハイブリッド型 RB-IGBT の製作プロセスフロー

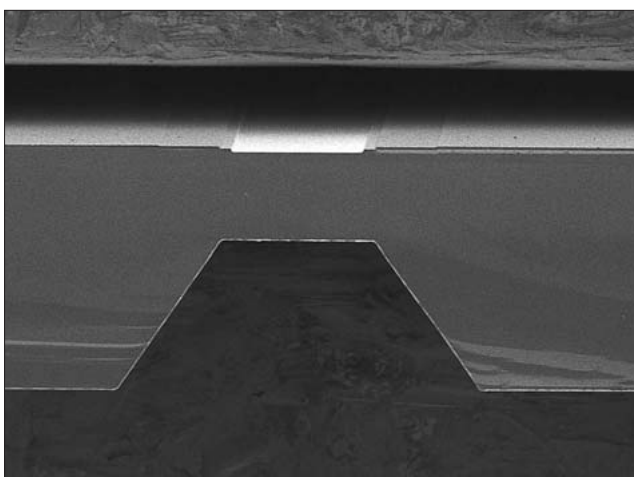


図 4 異方性エッチングにより形成した V 溝構造

層は、イオン注入と活性化により形成し、デバイス表面側のボロン拡散層と接続され、p⁺ 分離層を形成する。

図 4 に、異方性エッチングにより形成した V 溝構造を示す。良好な形状の V 溝が形成できている。新しいハイブリッド型の分離層形成プロセスにより、安定した分離層形成が可能になり、従来の分離層拡散プロセスよりも熱拡散のリードタイムを大幅に低減した。

③ 1,200 V RB-IGBT の電気特性

新しいハイブリッド型分離層形成プロセスにより形成した 1,200 V RB-IGBT の電気的特性を示す。

図 5 に、1,200 V RB-IGBT において得られる双方向耐圧特性を示す。1,200 V を超える十分な耐圧が得られている。

図 6 に、1,200 V RB-IGBT の V-I 特性 ($V_{GE}=+15V$, $T_J=125^\circ C$) を示す。第 6 世代品の IGBT とダイオードを直列に接続した場合の V-I 特性も併記する。IGBT とダイオードの直列接続の場合の $V_{CE(sat)}=3.9V$ ($I_c=50A$) に対して、RB-IGBT では 3.0 V まで低減することができた。

図 7 に、オン電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレー

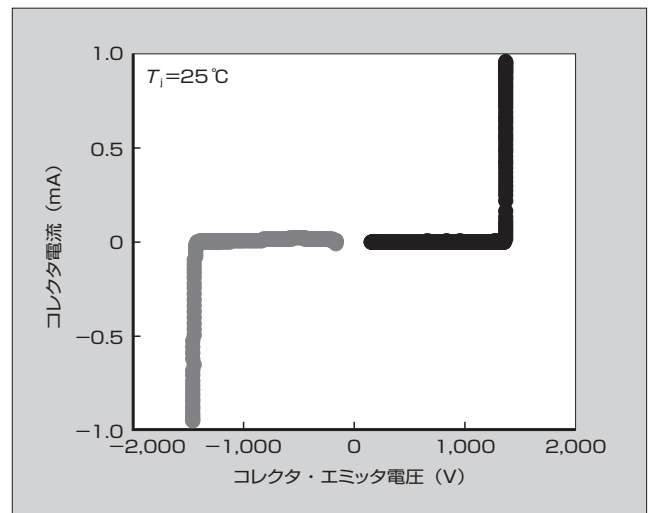


図 5 1,200 V RB-IGBT の双方向耐圧特性

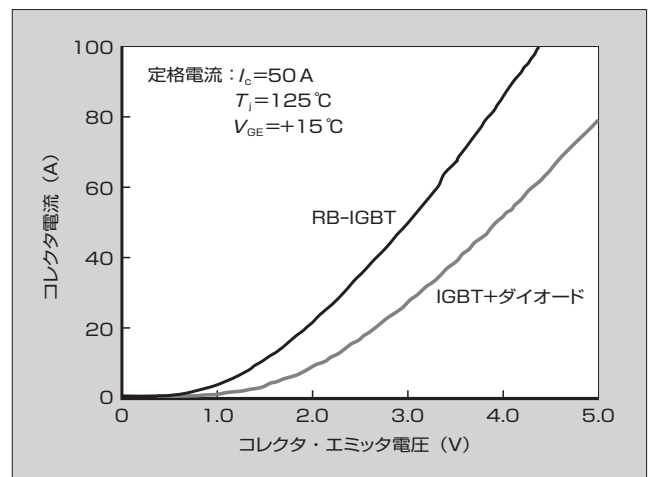


図 6 1,200 V RB-IGBT の V-I 特性

ドオフ特性を示す。バス電圧 600 V で測定した結果である。RB-IGBT では、従来の IGBT とダイオードを組み合わせた特性よりも良好な結果が得られている。

4 アドバンスト NPC 用モジュール

図 8 に、A-NPC 用 3 レベルモジュールの外観と等価回路を示す。パッケージサイズは、W110×D80×H30 (mm) である。4 in1 パッケージである A-NPC 用 IGBT モジュールは、メインスイッチである T1, T2 が 1,700 V/200 A、双方向スイッチの T3, T4 が 600 V/200 A で構成されている。

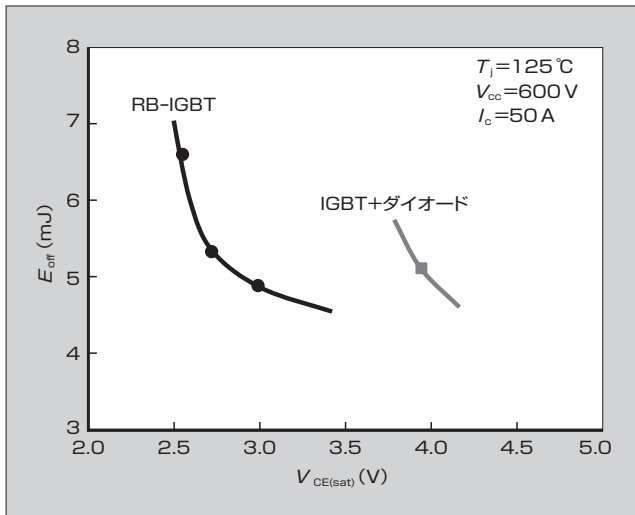


図 7 1,200 V RB-IGBT の $V_{CE(sat)}$ - E_{off} のトレードオフ特性

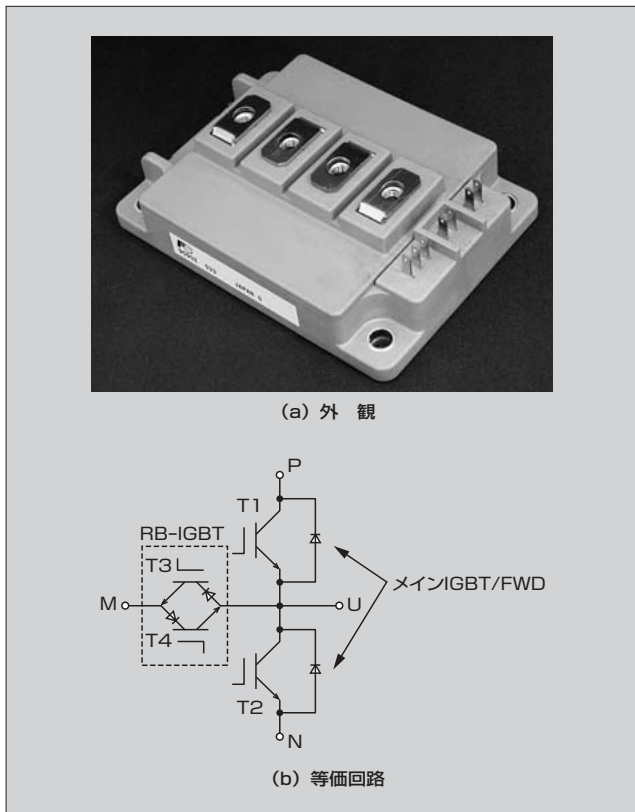


図 8 A-NPC IGBT モジュール

T1, T2 は通常の 2 in1 モジュールと同じ回路構成であり、中間電位には T3, T4 が逆並列に接続された RB-IGBT を双方向スイッチとしている。

回路インダクタンスは、デバイスのターンオフ時に発生するサージ電圧に直接影響を及ぼす。従来の 2 in1 モジュールと 1 in1 モジュールで本製品と同じ回路構成にすると、各モジュールを接続するためのプスパーとパッケージ内部のインダクタンスの合計値が 100 nH 以上と大きいため、ターンオフ時のサージ電圧が大きいという問題があった。そこで、モジュール内部のインダクタンスを低減させるため、三次元 CAD シミュレーションを活用し、端子形状とレイアウトの最適化を行った。

図 9 に、初期設計と最適化後のモジュール内部での各端子間インダクタンスの比較を示す。初期設計では主電流の電流経路は同じ高さ（平面上）になっていたが、最適化後では主電流は逆方向にオーバーラップするように端子形状を改善し、負の相互インダクタンス効果により、内部インダクタンスを 19～45% 低減できた。これらの施策により、サージ電圧を 20% 低減することができた。

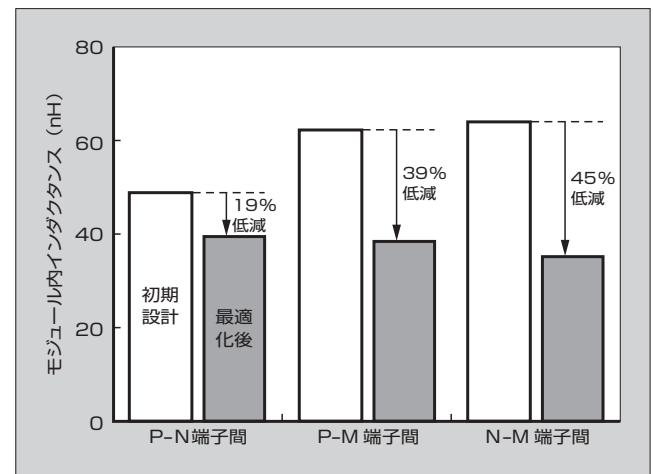


図 9 各端子間インダクタンスの比較

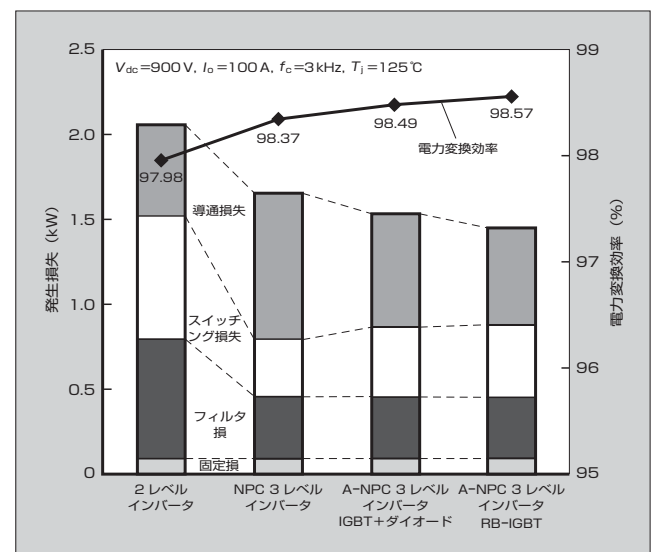


図 10 発生損失と電力変換効率

図 10 に、従来の 2 レベルインバータ、NPC インバータ、A-NPC インバータを同じ条件で運転したときの、発生損失と電力変換効率を示す。従来の 2 レベルインバータは第 6 世代 1,700 V 「V シリーズ」のデータを、NPC インバータは第 6 世代 1,200 V 「V シリーズ」のデータをそれぞれ用いた。NPC インバータモジュールの内部インダクタンスは、A-NPC インバータと同じと仮定した。インバータの運転条件は、キャリア周波数 3 kHz、DC 電圧 900 V、出力電流 100 A とした。

この結果、RB-IGBT を用いた A-NPC インバータの電力変換効率は 98.57% で、発生損失は従来の 2 レベルインバータよりも 31%、NPC3 レベルインバータよりも 15% 低減できる。また、A-NPC において、双方向スイッチとして IGBT とダイオードを直列に接続した場合と比較して、5.5% の損失低減が達成できた。

5 あとがき

RB-IGBT と、それを適用したアドバンスト NPC 3 レベルモジュールについて紹介した。RB-IGBT は素子のスクライプ領域において p⁺ 分離層を形成することによって逆方向耐圧を持つが、この p⁺ 分離層の形成方法を改善することにより、600 ~ 1,700 V 耐圧クラスの RB-IGBT を安定して製造することができるようになった。この RB-IGBT は、IGBT とダイオードを組み合わせた場合に比べて損失を大幅に低減することができ、A-NPC3 レベル変換器に適用することにより高い電力変換効率を実現した。

RB-IGBT は、無停電電源装置 (UPS)、PCS (Power Conditioning System)、マトリックスコンバータなどのアプリケーションへの適用が期待できる。今後も、電力変換分野への幅広い展開を目指して開発を進めていく所存である。

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) "IGBT Power Modules for 3-level UPS Inverters". <http://www.semikron.com/>, July 2008.
- (3) Takei, M. et al. "The Reverse Blocking IGBT for Matrix

Converter with Ultra Thin Wafer Technology", ISPSD '03 proceedings, 2003, p.156-159.

- (4) Naito, T. et al. "1,200 V Reverse Blocking IGBT with Low Loss for Matrix Converter", ISPSD '04 proceedings, 2004, p.125-128.
- (5) Tokuda, N. et al. "An ultra-small isolation area for 600 V class Reverse Blocking IGBT with Deep Trench Isolation process (TI-RB-IGBT)", ISPSD '04 proceedings, 2004, p.129-132.
- (6) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using Advances Three-level Topology", PCIM '10 Europe, Proceedings, 2010, p.550-555.
- (7) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters", IPEC '10 proceedings, 2010, p.523-527.
- (8) Wakimoto, H. et al. "600 V Reverse Blocking IGBTs with Low On-state Voltage", PCIM '11 Europe, Proceedings, 2011, p.317-322.
- (9) Nakazawa, H. et al. "Hybrid Isolation Process with Deep Diffusion and V-Groove for Reverse Blocking IGBTs", ISPSD '11 proceedings, 2011, p.116-119.



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、応用物理学会会員。



脇本 博樹

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電子デバイス研究所 Si デバイス開発センター。電気学会会員。



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 Si デバイス開発センター。





*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。