

民生用RC-IGBTチップ技術

高橋徹雄*
吉田拓弥**

RC-IGBT Chip Technology for White-goods Application

Tetsuo Takahashi, Takuya Yoshida

要旨

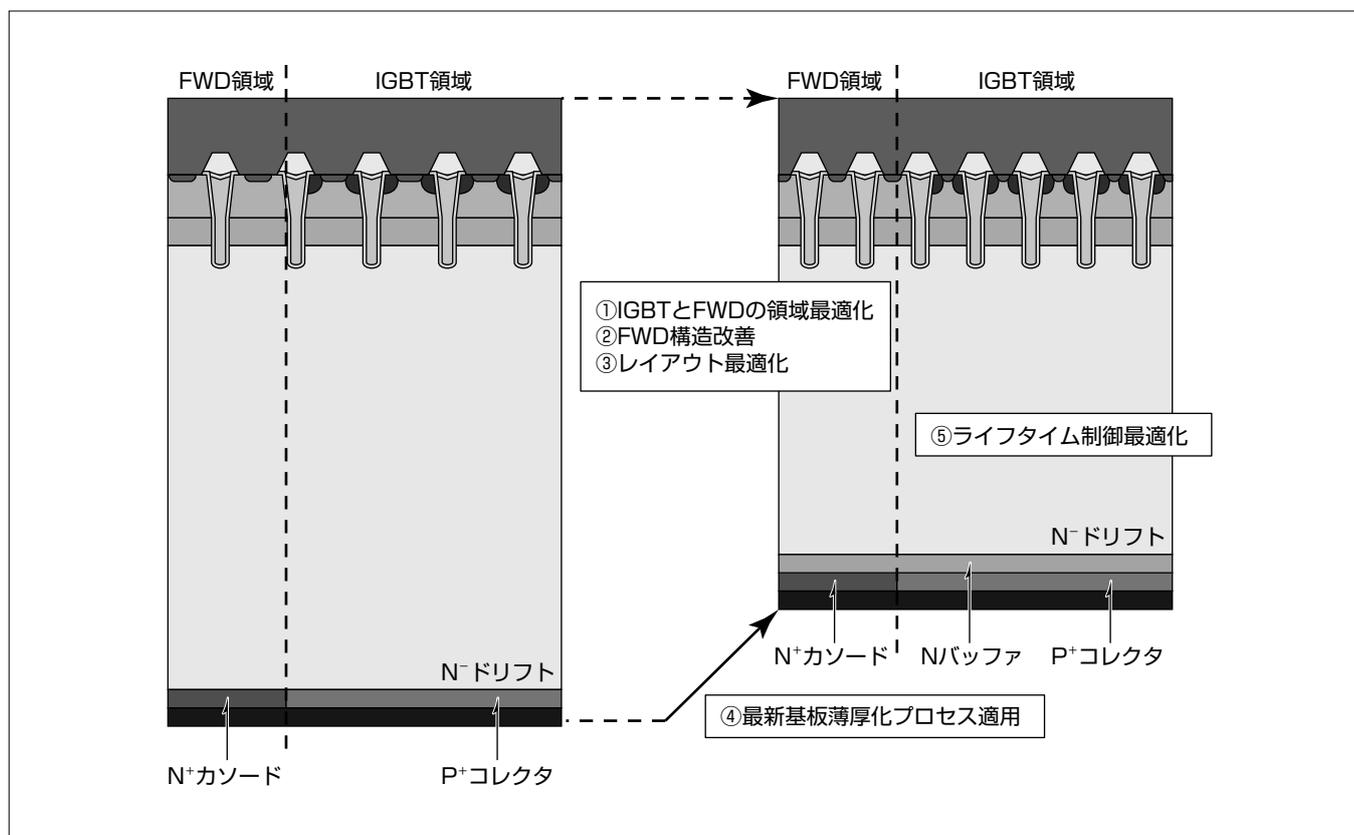
世界的な地球環境保護への意識の高まりから、省エネルギー化のキーとなるパワーデバイスの低損失化が、自動車向け、産業向け用途等、様々な分野で急速に進んでいる。

エアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電に使用される民生用パワーデバイスにも同様に低損失化が求められており、加えて小型化に対しても強い要求がある。

三菱電機では民生用のパワーデバイスとしてDIPIPMを製品化しており、2013年には“超小型DIPIPM Ver. 6”を展開し、アジア市場を中心に多くのインバータ機器に採用されてきた。2015年には欧米の低容量市場をターゲットに、さらにパッケージサイズを30%低減させた“SLIMDIPシリーズ”の製品をリリースしている。

このSLIMDIPシリーズにはパッケージの小型化のため、三菱電機の第2世代RC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用している。RC-IGBTはIGBTとFWD(Free Wheeling Diode)を一つのチップ上に形成したもので、従来のIGBTとFWDを独立に配置していた構造に対し、フレーム上に占めるチップ面積を大幅に低減することができる。

第2世代RC-IGBTでは三菱電機独自のIGBTの基板薄厚化技術の適用に加え、FWD特性の改善構造と熱抵抗低減を考慮したレイアウト設計によって、前世代に対して約1/3の損失、チップサイズで約1/2を実現した。



第2世代RC-IGBTの構造と特長

第2世代RC-IGBTは三菱電機の7世代薄厚IGBTをベースにした構造であり、用途に合わせて、①IGBTとFWDの領域を最適化するとともに、②FWD構造を改善し、③IGBTとFWDのレイアウトを見直すことでFWD部分の損失特性改善と放熱性を改善している。さらに、④最新の基板薄厚化技術の適用と、⑤ライフタイム制御の最適化を行うことで、総合的な損失特性の改善とコストのバランスの改善を図っている。

1. ま え が き

今日、パワーデバイスは産業用機器、電気自動車、及び、エアコン、冷蔵庫などの民生用機器など様々な機器に用いられており、省エネルギー化の流れからさらに裾野に広がりを見せている。現在の主力パワーデバイスの多くにはIGBTとFWDが搭載されており、数A~数千A、数百Vから数千Vまで様々な電流・電圧定格を実現し、さらに高性能化が進んでいる。

この高性能化の流れの一つの方向に、IGBTとFWDを一つの構造に統合したRC-IGBTがある。

RC-IGBTは電流の流れる向きが異なるIGBTとFWDの両方の性能を同時に満たす必要があり、技術上のハードルが高いデバイスであるが、反面、チップサイズを低減できるので、最新のパワーモジュールの小型化・省エネルギー化のキーデバイスとなっている。

本稿では、三菱電機の最新の技術を用いて大幅に特性を改善した民生用の第2世代RC-IGBTについて述べる⁽¹⁾。

2. 民生用RC-IGBTの構造と技術

2.1 RC-IGBTの基本構造

RC-IGBTは先に述べたとおり、IGBTとFWDを一つのチップ上に形成した構造を持つ。IGBTの領域では、表面にMOS(Metal Oxide Semiconductor)ゲート構造が形成され、裏面部分にp型のコレクタ層が形成されている。FWDの領域では表面部分にp型のアノード層が、裏面部分にn+カソード層が形成されている。この二つの領域が動作のタイミングによってIGBT又はFWDの動作を行うことで、従来は2チップ必要であった機能を1チップで実現している。

反面、技術的なハードルとしてIGBTとFWDの特性を別々に設計・最適化することが難しく、個別の性能をそれぞれ追求するとコストが急激に増大する。

次節では、性能向上とコスト増大抑制を両立させるために民生用RC-IGBTに適用した技術について述べる。

2.2 RC-IGBTの構造と技術

表1に最新の第2世代RC-IGBTに適用した技術を示す。

2.2.1 FWD領域面積比率の最適化

第一の技術項目のFWD領域の面積比率は、IGBTとFWDのそれぞれの動作時の損失に影響する最も重要なパラメー

適用技術	目的
FWD領域面積比率の最適化	低損失化
FWD構造の見直し	V _F -リカバリーのトレードオフを改善
IGBTとFWDのレイアウト改善	FWD放熱最適化
ウェーハ厚みの薄厚化	7世代プロセスを用い損失を改善
ライフタイム制御なしの製造方法(アプリケーションによって選択)	特性ばらつき改善とコスト削減

タの一つである。図1は一例として順電圧降下(V_F)と逆回復電流(I_{rr})のFWD面積比率依存性を示したものである。

図1のとおりV_FとI_{rr}はトレードオフ関係にあり、同時に低減できないことを示しており、この他にも複数の特性がトレードオフの関係になっている。このため、アプリケーションに合わせて総合的な損失が最小になるような面積比率の最適化が必要であり、FWD比率を低めに設定している。

2.2.2 FWD構造の見直し

一般にFWD構造は先に述べたように順電圧降下特性と逆回復(リカバリー)特性を考慮して最適化する必要がある。第2世代RC-IGBTでは構造的にはアノード接合部分で高濃度部分の影響を避けるとともに、一部に電流集中しないようにして逆回復電流を増加させない工夫を行っている。さらに、順電圧降下が急激に増大することを避ける工夫もしており、FWDの特性を向上させている。

2.2.3 IGBTとFWDのレイアウト改善

動作時のチップの温度上昇が大きいと、放熱性やパワーサイクルなどの耐量の面から使用できる電流・電圧範囲が狭くなる。このため、できる限りチップの内部で熱を分散させるレイアウトを適用した。図2はIGBTとFWDのレイアウトのイメージ図である。面積比率が比較的小さく、

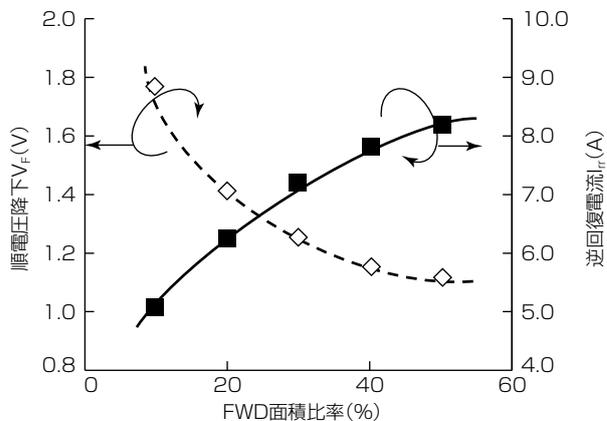


図1. V_FとI_{rr}のFWD面積比率依存性

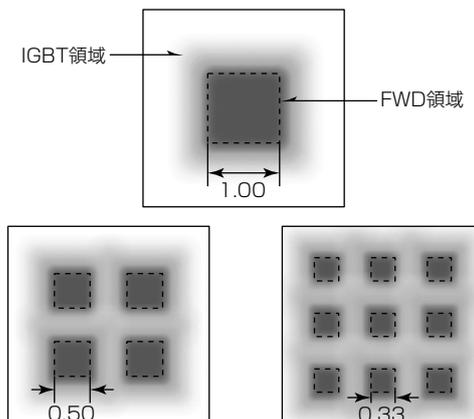


図2. IGBTとFWDのレイアウトイメージ図

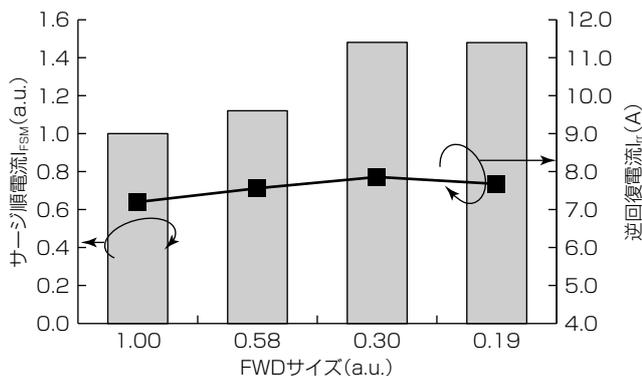


図3. I_{rr} と I_{FSM} のレイアウト依存性

電流集中するFWD領域を細かく分割する設計にすることで、周辺のIGBT部分に熱が分散されやすくなり、FWDの局所的な温度上昇を緩和することができる。

ただし、FWDの領域を細かくすることで逆にFWDのI-V特性のスナップバック発生など悪化する特性も存在するため、最終的にバランスを取ったレイアウト設計をしている。図3はFWD面積比率を等しくした構造で、FWDのサイズと逆回復電流(I_{rr})とサージ順電流(I_{FSM})の依存性を表したものである。図3からサイズを最適化することで損失に影響する I_{rr} には大きな影響を与えずに、FWDの通電能力の指標である I_{FSM} を大幅に改善できることが分かる。

FWD領域の最適な分割によって、第2世代のRC-IGBTではFWDの放熱性が大きく改善している。

2.2.4 ウェーハ厚みの薄厚化

ウェーハ厚みの薄厚化によって素子の総合的な損失を最小化する。三菱電機ではウェーハを極薄に加工する7世代IGBTプロセスを用いた“CSTBT⁽²⁾”を民生用の超小型DIPIPM Ver. 6に適用しており、民生用RC-IGBTにもこの技術を適用している。これによって、大幅に特性を改善している。

2.2.5 ライフタイム制御なしの製造方法

ライフタイム制御を行わない製造方法を適用できるようにし、コスト削減とばらつき低減を図った。総合的な特性改善によってキャリア周波数の広い範囲でライフタイム制御なしの構造を適用しており、高速寄りの部分をライフタイム制御ありの構造を投入することで、様々な民生用途に対応している。

3. 民生用RC-IGBTの特性

3.1 チップ特性

次に、先に述べた新構造を適用した第2世代600V RC-IGBTの特性について述べる。第2世代RC-IGBTは前世代の構造に対して、大幅に特性を改善している。

図4は同一電流密度で比較したIGBT動作時のコレクタ-エミッタ間飽和電圧(V_{CEsat})とターンオフ損失(E_{off})のトレードオフ特性について示したものである。三菱電機

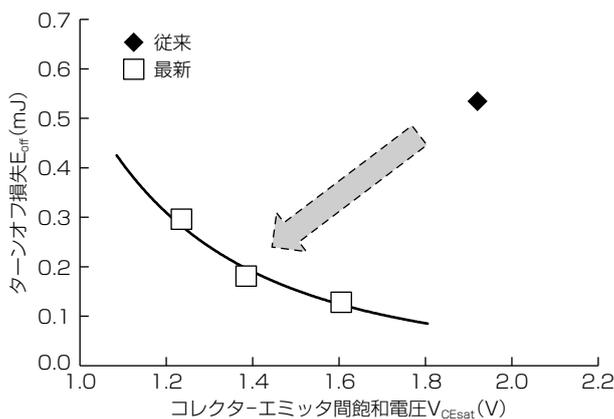


図4. V_{CEsat} - E_{off} トレードオフ(電流密度固定)

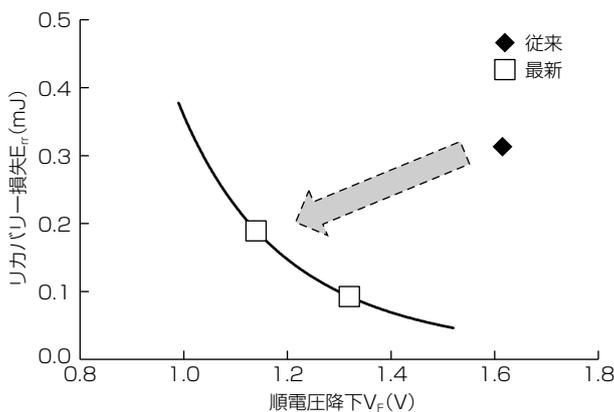


図5. V_F - E_{rr} トレードオフ(電流密度固定)

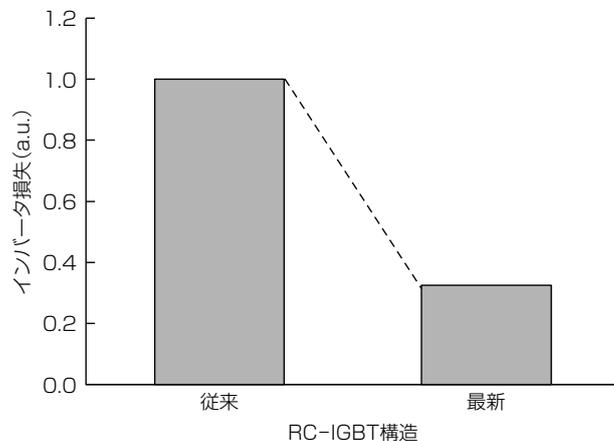


図6. インバータ損失比較(有効面積で規格化)

の前世代RC-IGBT⁽³⁾と比較して、 V_{CEsat} は0.54V、 E_{off} は0.35mJ低減することに成功している。

図5は同一電流密度で比較したFWD動作時の順電圧降下(V_F)と、リカバリー損失(E_{rr})のトレードオフ関係について示したものである。FWD特性に関しては、 V_F は0.48V低下、 E_{rr} は0.12mJ低減している。

図6は総合的な損失低減の指標として、チップの有効面積で規格化した製品のインバータ損失($T_j=125^\circ\text{C}$, $f_c=5\text{kHz}$)を比較した図である。従来の構造と比較して、最新の構造では約1/3に低減している。

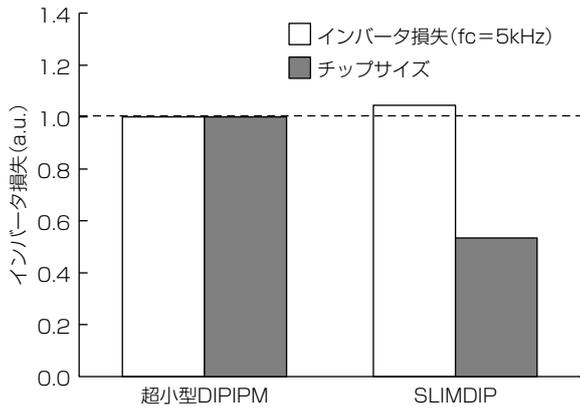
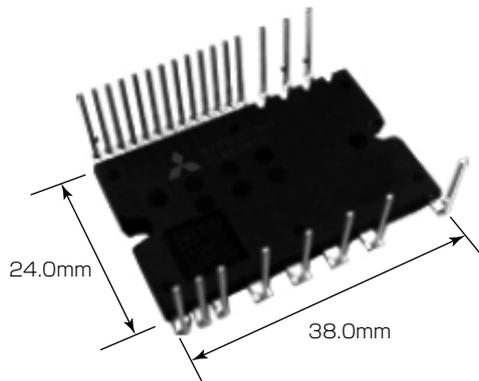
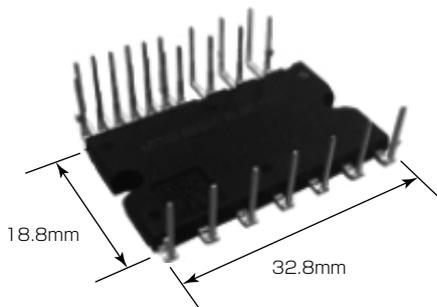
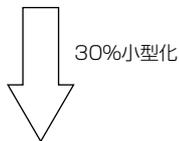


図7. DIIPMの損失とチップ面積比率比較



(a) 超小型DIIPM



(b) SLIMDIP

図8. 超小型DIIPMとSLIMDIPの外形比較

3.2 製品特性

先に述べたとおり、第2世代RC-IGBTでは特性を大幅に改善しており、これを搭載した“SLIMDIPシリーズ”でもモジュールサイズの大幅なシュリンクを実現している⁽⁴⁾。

図7はIGBTとFWDを別々に搭載した超小型DIIPMと同電流定格のSLIMDIPそれぞれのインバータ損失比 ($T_j = 125^\circ\text{C}$, $f_c = 5\text{ kHz}$)と、搭載されているチップが占める面積比を示す。SLIMDIPシリーズは低～中速域ではほぼ超小型DIIPMシリーズの製品と同程度のインバータ損失を実現しているが、モジュール内でチップが占める領域は超小型DIIPMに比較して、約半分にまで縮小している。これによって、パワーモジュールとしては約30%の小型化を実現している(図8)。

4. むすび

三菱電機で民生用途として開発した600V RC-IGBTは、前世代に比べて損失で約1/3、チップサイズで約1/2へのシュリンクを実現し、これによってパッケージを30%小型化したSLIMDIPの製品化を実現した。

現在、この技術を耐圧クラスや用途の異なる製品に適用することを検討するとともに、さらに特性を改善させた第3世代RC-IGBTを開発中である。

これらの技術開発と製品化によって、パワーエレクトロニクスの発展と省エネルギー社会の実現に貢献する。

参考文献

- (1) Yoshida, T., et al.: The second-generation 600V RC-IGBT with optimized FWD, IEEE. ISPSD, 159~162 (2016)
- (2) 鈴木健司, ほか: 高性能・高破壊耐量第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 281~284 (2014)
- (3) 高橋英樹, ほか: モータ制御用RC-IGBT, 三菱電機技報, **81**, No.5, 313~316 (2007)
- (4) 柴田祥吾, ほか: RC-IGBT搭載パワーモジュール“SLIMDIPシリーズ”, 三菱電機技報, **90**, No.5, 307~310 (2016)