

マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT

RC-IGBT for Mild Hybrid Electric Vehicles

野口 晴司 NOGUCHI, Seiji

安達 新一郎 ADACHI, Shinichiro

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

環境意識の高まりを背景に、ハイブリッド車や電気自動車が注目されており、中でも1台のモーターで駆動と発電を行うマイルドハイブリッド車の比率が増加すると予想されている。富士電機では、マイルドハイブリッド車用のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの低損失化・小型化のために、IGBTとFWD (Free Wheeling Diode) を1チップ化した650V耐圧のRC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT) を開発した。RC-IGBTにより、従来のIGBT・FWDを超える低損失化とパッケージサイズの小型化を実現した。

Hybrid electric vehicles and electric vehicles are attracting attention as people's environmental awareness is growing. Above all, mild hybrid electric vehicles, in which one motor is responsible for both driving and power generation, is expected to account for a higher proportion of vehicles. To reduce the loss and size of Insulated-gate bipolar transistor (IGBT) modules for mild hybrid electric vehicles, Fuji Electric has developed a reverse-conducting IGBT (RC-IGBT) that has a withstand voltage of 650 V, which integrates an IGBT and freewheeling diode (FWD) into one chip. The RC-IGBT has realized a lower loss and reduced package size that surpass the conventional IGBTs and FWDs.

① まえがき

地球温暖化の防止などの環境保護に対する意識が世界的に高まる中、CO₂排出量を低減するためにエンジンとモーターの双方を利用するハイブリッド車 (HEV)、さらにはモーターのみで駆動する電気自動車 (EV) の普及が進んでいる。

ハイブリッド車においては、特にマイルドハイブリッド車が注目されている。マイルドハイブリッド車は、1台のモーターで駆動と発電を行うものである。2台のモーターで駆動と発電を別々に行うフルハイブリッド車に比べて、構造がシンプルであることとガソリン車との価格差が抑制できることから、今後、世界的には、マイルドハイブリッド車の比率が増加すると予測されている。

富士電機では、マイルドハイブリッド車向けのインバータに搭載されるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの開発を進めている。燃費向上のために車載用モジュールの低損失化に加え、小型化の要求に応えるため、IGBTとFWD (Free Wheeling Diode) を1チップ化した650V耐圧のRC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通IGBT) を開発した。RC-IGBTは家電向けの小容量チップでは実用化されているが、車載用として要求される大容量チップでは、これまで低損失化のための技術的ハードルが高く困難であった⁽¹⁾。本稿では、マイルドハイブリッド車用RC-IGBTおよびモジュールへの適用時の効果について述べる。

② RC-IGBT 設計

マイルドハイブリッド車用の650V耐圧のRC-IGBTは、富士電機で量産しているフィールドストップ (FS)

型IGBT⁽²⁾をベースに開発したものであり、ストライプ状に交互にIGBT領域とFWD領域を配置した構造としている。図1にRC-IGBTの概略構造を示す。

マイルドハイブリッド車用のIGBTモジュールの電流容量はモーター容量によって異なるものの、電源電圧 V_{CC} は300~400V、キャリア周波数 f_{sw} は5~10kHzの範囲で動作することが一般的である。図2に、マイルドハイブリッド車用RC-IGBTをモジュールに適用した場合のインバータ動作時の発生損失を示す。

スイッチング損失 (P_{on} , P_{off} , P_{rr}) が高くなるスイッチング周波数が高い動作条件 (10kHz) においても、IGBTおよびFWDの定常損失 (P_{sat} , P_f) が支配的であることが分かる。定常損失を低減するために、IGBT領域のトレ

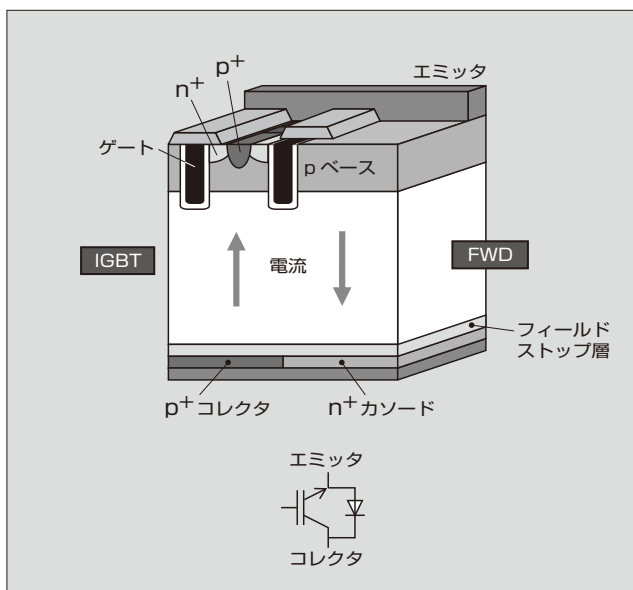


図1 RC-IGBTの概略構造

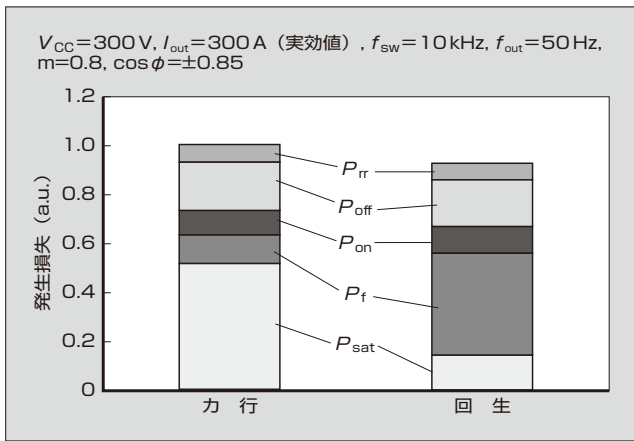


図2 インバータ動作時の IGBT モジュールの発生損失

ンチピッチなどデバイス表面のデザインを工夫することで、定常損失を決めるパラメータであるコレクター-エミッタ間飽和電圧を最小限に抑えている⁽³⁾。また、チップは厚いほど耐圧を確保しやすく製造も容易であるが、飽和電圧および順電圧が増加して定常損失が悪化するため、できるだけ薄い方が望ましい。そこで富士電機では、早期から薄いウェーハに加工する技術に積極的に取り組んできた。

今回、最先端の薄ウェーハ加工技術を開発することで、従来は不可能だった 650V 耐圧に必要な厚さまでウェーハを薄くし、低損失化を実現した。また、薄いウェーハの裏面へのパターニング技術と不純物層の形成技術も開発し、IGBT のコレクタ p 型層と FWD のカソード n 型層を同一チップの裏面に形成した。IGBT と FWD のスイッチング損失は、定常損失とトレードオフの関係にある。そのため、キャリアライフタイム制御を行ってトレードオフの最適化を行った。

3 損失特性

3.1 電気的特性

本節では、従来 IGBT・FWD と活性面積が同じ RC-IGBT の電気特性を示す。

(1) IGBT 特性

図3に、RC-IGBT と従来 IGBT の飽和電圧出力特性を示す。RC-IGBT では、薄ウェーハ化および表面構造の最適化により従来 IGBT よりも低い飽和電圧を実現している。また、IGBT 領域に隣接する FWD 領域の裏面カソードである n 型層へ電子が流入することにより、IGBT コレクタである p 型層からのホール注入が抑制されて伝導度変調が起りにくくなる。そのため、低飽和電圧領域において電流-飽和電圧曲線にスナップバック^(注)が起こることが報告されている。スナップバックが発生すると飽和電圧が増加し、損失悪化につながる。この対策として、IGBT と FWD の各領域の構造を最適化して伝導度変調を起こしや

〈注〉スナップバック：電流と飽和電圧が途中で減少した後に増加に転じる現象をいう。

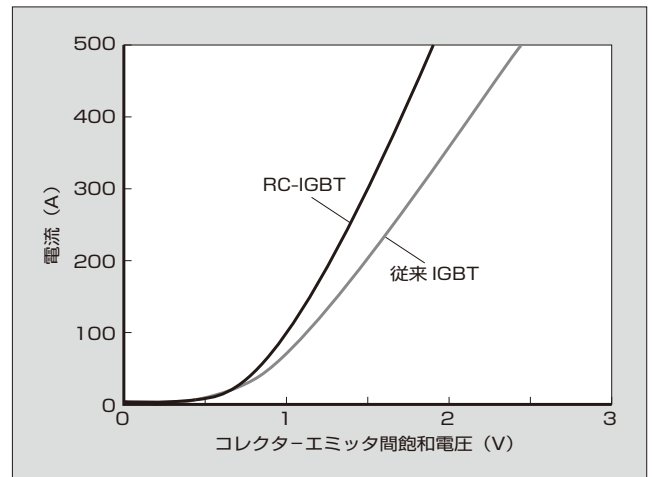


図3 IGBT の飽和電圧出力特性

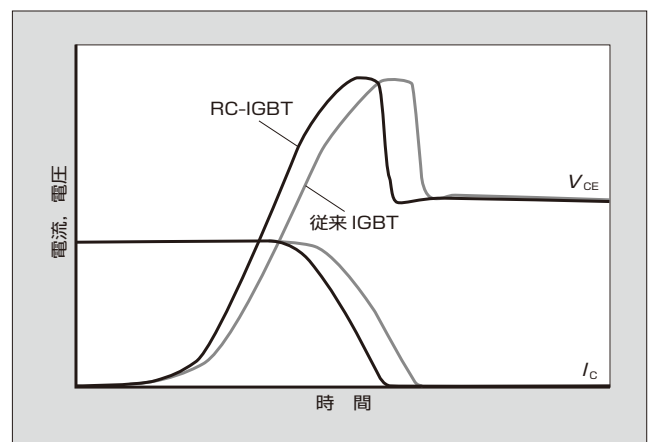


図4 IGBT のターンオフ特性

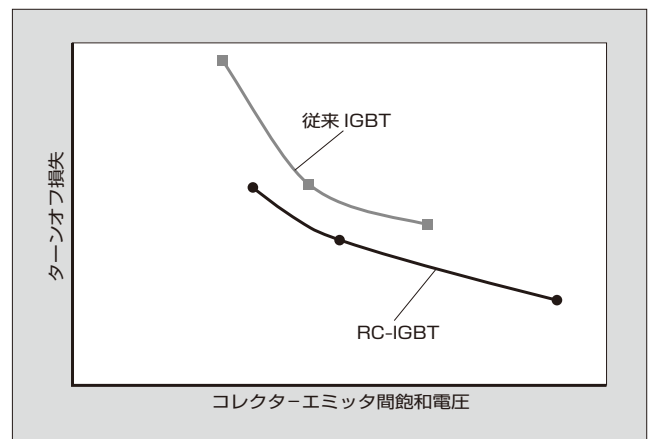


図5 IGBT のトレードオフ特性

すくし、スナップバックを抑制するようにした。

図4に、RC-IGBT と従来 IGBT のターンオフ特性を示す。RC-IGBT の方が従来 IGBT に比べてターンオフ時の dv/dt が大きく、キャリアの排出速度が速いことが分かる。これは RC-IGBT では裏面のコレクタ p 型層とカソード n 型層が短絡されていることにより、ターンオフ時に電子がコレクタ p 型層に加えて、隣接する FWD 領域の裏面にあるカソード n 型層からも排出されるためである。この結

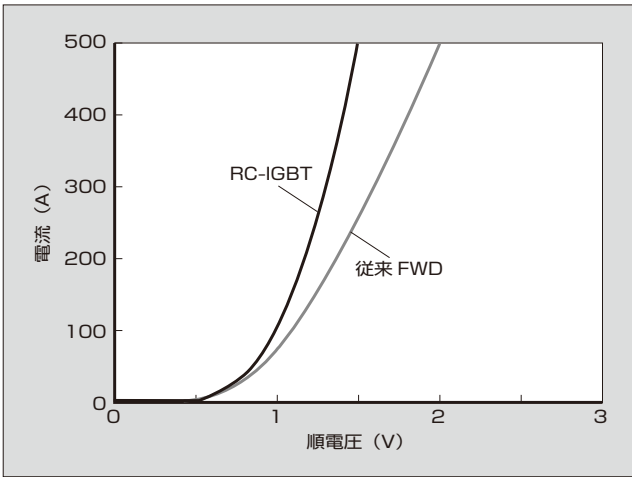


図6 順方向出力特性

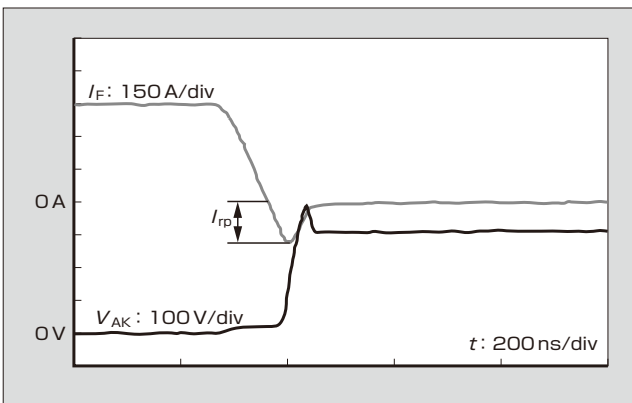


図7 RC-IGBT 逆回復動作時のスイッチング波形

果、RC-IGBTの方が従来IGBTに比べてターンオフ損失が低減されるというメリットがある。RC-IGBTでは、定常損失を改善する方向（低飽和電圧化）に調整しても、従来IGBTよりもターンオフ損失を抑制することができ、トレードオフ特性を大きく改善することができた（図5）。

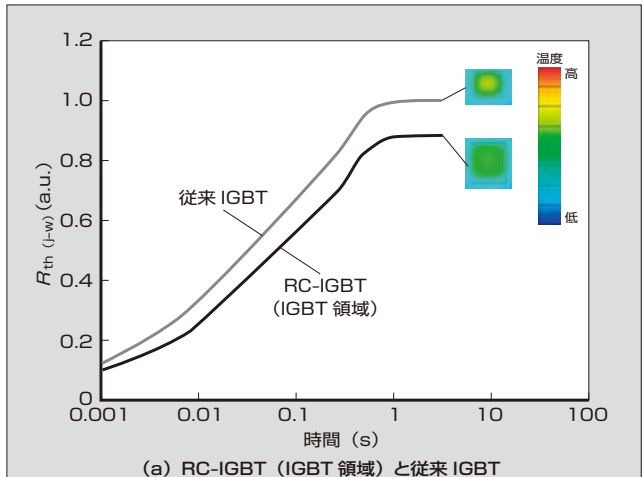
(2) FWD 特性

図6に、RC-IGBTと従来FWDの順方向出力特性を示す。IGBTの定常損失と同様に、RC-IGBTでは薄ウェーハ化および表面構造の最適化の効果により従来FWDに比べて順電圧降下を低減させた。

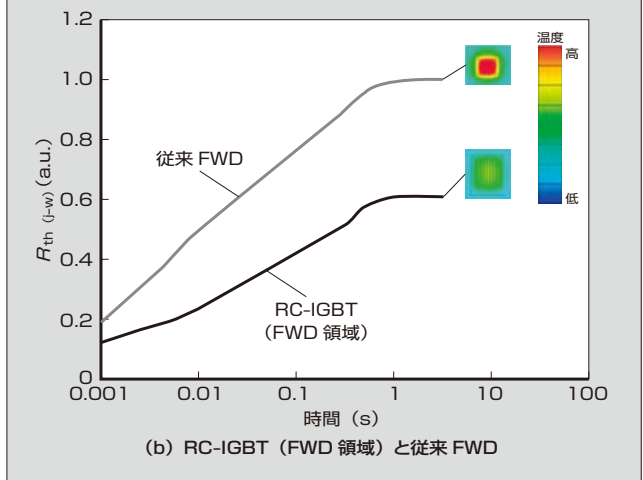
図7に、RC-IGBT逆回復動作時のスイッチング波形を示す。RC-IGBTでは、FWD定常動作時に電子がFWD領域に加えIGBT領域にも拡散するため、逆回復動作時に従来FWDに比べて逆回復電流 I_{rr} が大きくなり、逆回復損失 E_{rr} が大きくなるという問題があったが、ライフタイム制御技術により、 I_{rr} を低減している。

3.2 放熱特性

RC-IGBTでは、IGBTとFWDを一体化することによりチップ面積およびモジュール面積を縮小した。さらに、RC-IGBTにおいては、FWD領域からの発熱をIGBT領域の部分も介して放熱するため、従来FWDよりも大幅に熱抵抗が低い。直接水冷構造モジュールを想定し、同一活



(a) RC-IGBT (IGBT 領域) と従来 IGBT



(b) RC-IGBT (FWD 領域) と従来 FWD

図8 同一活性面積における熱抵抗

性面積におけるRC-IGBTと従来IGBT・FWDの熱抵抗を比較した（図8）。RC-IGBTのIGBT領域の熱抵抗は従来IGBTに比べて12%、FWD領域の熱抵抗はFWDに比べて40%低くなっている。

④ モジュールへの適用時の効果

本章では、RC-IGBTをマイルドハイブリッド車向けIGBTモジュールに適用した際の小型化効果について述べる。

図9に、従来IGBT・FWDと活性面積が同じRC-IGBT、および小型化RC-IGBTのインバータ動作時の損失と温度計算結果を示す。表1に、チップ活性面積とモジュール面積の比較を示す。従来IGBTに比べて、飽和電圧、順電圧、ターンオフ損失を低減したことで、RC-IGBTはインバータ動作時の電力損失を10%以上低減できる。低損失化に加え、3.2節で述べた放熱の優位性により、チップ最大温度は14℃程度低減できる。モジュールのチップサイズは動作時の最大温度で決まるため、この結果はRC-IGBTはより小さいチップサイズで同定格のインバータ動作が可能であることを意味する。25%小型化したRC-IGBTで従来IGBT・FWDと同程度の温度となっており、これにより、モジュール面積は20%低減が可能

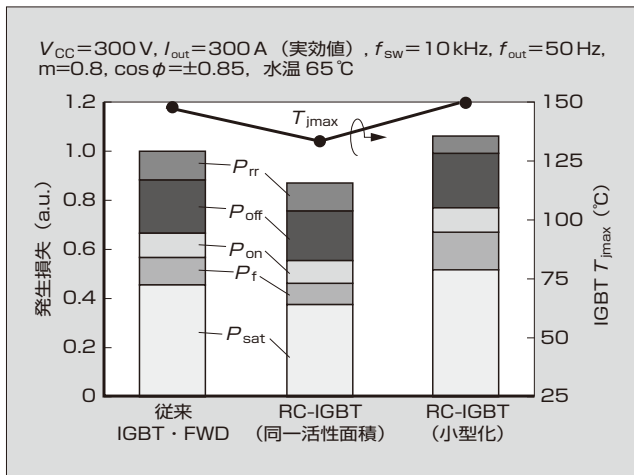


図9 RC-IGBTと従来IGBT・FWDの発生損失

表1 チップ活性面積とモジュール面積

	従来IGBT・FWD	RC-IGBT (小型化)
チップ活性面積 (a.u.)	1.00	0.75
モジュール面積 (a.u.)	1.00	0.80

である。

5 あとがき

本稿では、マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT およびモジュールへの適用時の効果について述べた。

環境問題への対応から、ハイブリッド車、電気自動車は今後も大きな発展が見込まれる。この中で、さらに車載機器の小型化の重要性が増すと考えられ、小型化を実現できる RC-IGBT は非常に有効な手段であると考えられる。今後も、デバイスの改善、新材料デバイスの開発などでこの分野へ

の貢献をさらに進めていく所存である。

参考文献

- (1) Takahashi, K. et al. "New Reverse-Conducting IGBT (1200 V) with Revolutionary Compact Package", Proceedings of ISPSD 2014. p.131-134.
- (2) Laska, T. et al. "The Field Stop IGBT (FS IGBT) — A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential", Proceedings of ISPSD 2000. p.355-358.
- (3) 百田聖自ほか. ハイブリッド車用めっきチップ. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.385-387.
- (4) M.Rahimo. et al. "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications", Proceedings of ISPSD 2009. p.283-286.



野口 晴司

IGBT チップの開発設計に従事。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モジュール技術部。



安達 新一郎

ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ事業本部輸送パワエレ事業部 EV モジュール開発部。



吉田 崇一

パワー半導体素子の開発に従事。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モジュール技術部。



*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。