

車載用 RC-IGBT

RC-IGBT for Automotive Applications

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

野口 晴司 NOGUCHI, Seiji

向井 弘治 MUKAI, Koji

地球温暖化防止などの環境保護の観点から、CO₂ 排出量を低減するためにハイブリッド車や電気自動車の普及が進んでいる。これらの自動車では、燃費向上のために車載半導体素子の低損失化およびインバータの小型化が求められている。富士電機は、これに応じて IGBT と FWD を 1 チップ化した RC-IGBT の製品化を進めている。今回、車載用 RC-IGBT において、トレンチゲート間隔の最適化、フィールドストップ層の最適化、ライフタイム制御の最適化の改良を行った。これにより、従来の車載用 RC-IGBT を適用した場合に比べてインバータ動作時の発生損失を約 20% 低減した。

The number of hybrid electric vehicles and electric vehicles in use on the road has been increasing as a measure to reduce CO₂ emissions in order to protect the environment from phenomena such as global warming. In order to improve fuel efficiency for these types of vehicles, they need to reduce loss in mounted semiconductor devices, while also decreasing the size of the inverter. To meet these needs, Fuji Electric has been working to develop an RC-IGBT that integrates an IGBT and FWD into one chip. Moreover, we have optimized trench gate spacing, a field stop layer and lifetime control for the RC-IGBT for automotive applications. As a result, the inverter achieves an about 20% reduction in generated loss during the operation compared to using conventional RC-IGBTs for automotive applications.

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の双方を利用するハイブリッド車 (HEV)、さらにはモータのみで駆動する電気自動車 (EV) の普及が進んでいる。

富士電機は、HEV や EV の燃費向上のための車載半導体素子の低損失化およびインバータの小型化の要求に応えるため、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD (Free Wheeling Diode) を 1 チップ化した 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既に実用化されているが、車載用の大容量のチップでは低損失化のための技術的ハードルが高く、実用化がなかなか困難であった。⁽¹⁾ 富士電機はこの技術的ハードルを乗り越え、マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT にて低損失のチップを開発した。⁽²⁾⁽³⁾

今回、マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT (従来型 RC-IGBT) を改良し、より低損失化した車載用 RC-IGBT (改良型 RC-IGBT) を開発した。改良型 RC-IGBT は、フルハイブリッドやマイルドハイブリッドなどモータの各駆動方法に対応することができる。

2 課題と対策

図 1 に RC-IGBT の概略構造を示す。HEV 向けの 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⁽⁴⁾ をベースとし、ストライプ状に IGBT ユニットと FWD ユニートを交互に配置した構造である。IGBT ユニットと FWD ユニットの大きさは、相互干渉し

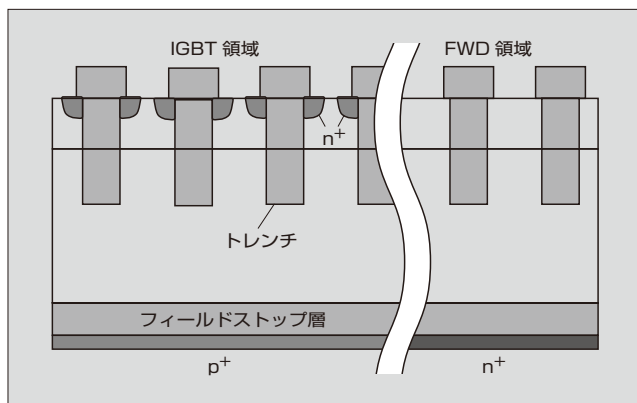


図 1 RC-IGBT の概略構造

よる特性への悪影響が出ない範囲で決定している。図 2 に、HEV 向けインバータにおける発生損失の構成例を示す。発生損失は電流をオン・オフさせる際に発生するスイッチング損失 (P_{on} , P_{off} , P_{rr}) および IGBT と FWD の定常損失 (P_{sat} , P_f) によって決まる。HEV の燃費を低減するためには、定常損失の低減が必須である。そこで、改良型 RC-IGBT では定常損失の低減を主目的とした設計を行っ

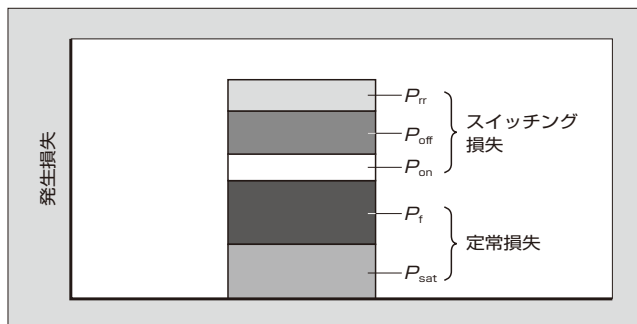


図 2 インバータの発生損失の例

た。損失を低減すると素子の発熱を抑制できるため、素子を小さくして IGBT モジュールやインバータが小型化できる。改良型 RC-IGBT は、次に示す改良を行った。

(1) IE 効果の利用による導通損失の低減

IGBT では、IE (Injection Enhanced: 電子注入促進) 効果と呼ばれる現象により、ドリフト層中に少数キャリア (n チャンネル IGBT の場合はホール) を蓄積することで飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を低減し、導通損失を低減できることが知られている。IE 効果をもよほす効果的な方法の一つは、素子表面に形成するトレンチゲートの間隔を微細化することである。改良型 RC-IGBT では、従来型 RC-IGBT に対してトレンチゲートの間隔を最適化するなど、IE 効果をもよほす改良を行った。

(2) 薄ウェーハ化による導通損失の低減

チップ厚は薄いほど飽和電圧および順電圧を抑制して定常損失を低減できるため、できるだけ薄い方が望ましい。しかしながら、チップ厚を薄くすると IGBT および FWD のスイッチングオフ動作時に発振現象が生じやすくなるため、従来型 RC-IGBT では十分な薄ウェーハ化ができていなかった。改良型 RC-IGBT では、FS 層を最適化することで、IGBT、FWD ともに発振を抑制できるようになり、薄ウェーハ化が可能となって導通損失の低減を実現した。また、FS 層の最適化により高温でのコレクター-エミッタ間漏れ電流 I_{CES} の低減も同時に可能となった。

(3) ライフタイム制御による導通損失とスイッチング損失の低減

ライフタイム制御を最適化する改良を加え、IGBT の導通損失および FWD のスイッチング損失を低減した。また、高温における I_{CES} が低減して高温特性の改善にもつながった。

3 損失特性

3.1 電気的特性

RC-IGBT は IGBT と FWD を 1 チップ化したものであり、本節では RC-IGBT の IGBT 特性と FWD 特性について述べる。

(1) IGBT 特性

図 3 に IGBT の飽和電圧出力特性を示す。改良型 RC-IGBT では、2 章で述べた工夫により従来型 RC-IGBT よりも飽和電圧が低い。

図 4 に IGBT のターンオフ特性を示す。改良型 RC-IGBT の波形は、従来型 RC-IGBT の波形に比べてターンオフ時のテール電流が小さく、ターンオフ時間も短いので、ターンオフ損失が低減していることが分かる。これは、改良型 RC-IGBT では飽和電圧を低下させて、コレクタ部の不純物濃度を最適化した結果である。また、ターンオフ時の発振現象についても、コレクタ部や FS 層などを最適化することにより抑制している。

このように、改良型 RC-IGBT では、ターンオフ損失を低減しても低飽和電圧が維持できるという特長を生かす

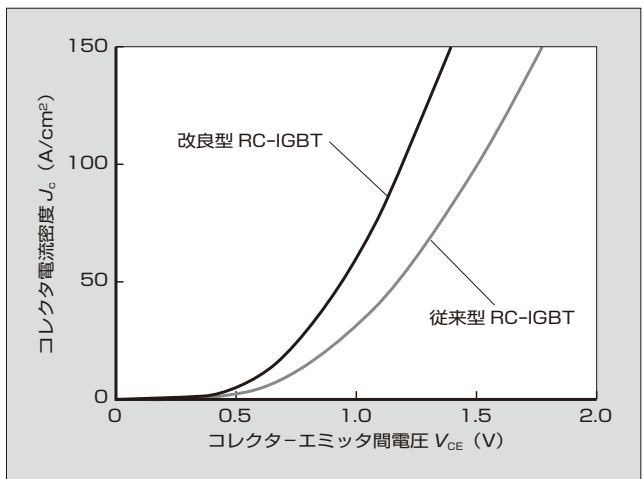


図 3 IGBT の飽和電圧出力特性

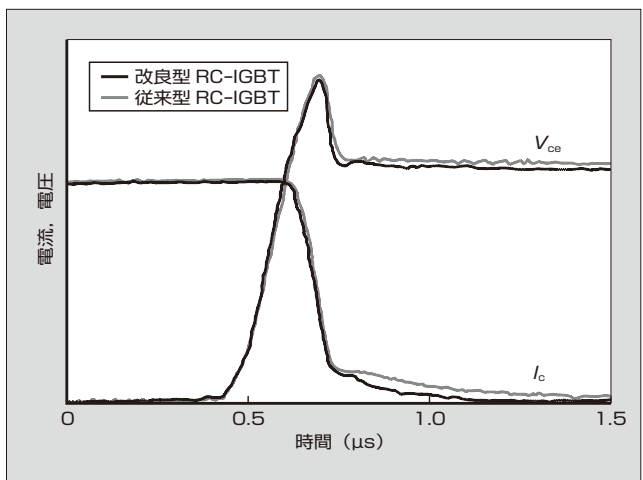


図 4 IGBT のターンオフ特性

ことにより、トレードオフ特性が大きく改善した (図 5)。ターンオフ損失については従来型の損失を 1 として規格化した数値としている。

図 6 にケース (パッケージ) 温度 $T_c=150^\circ\text{C}$ の高温条件下での I_{CES} 特性を示す。FS 層の最適化およびライフタイム制御の最適化の結果、改良型 RC-IGBT は従来型 RC-

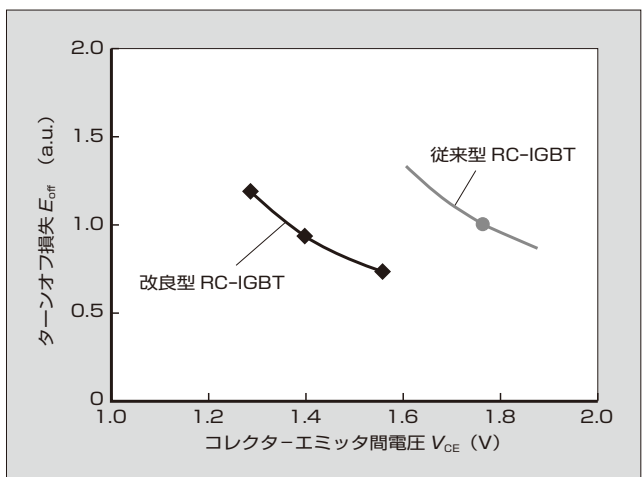


図 5 IGBT のトレードオフ特性

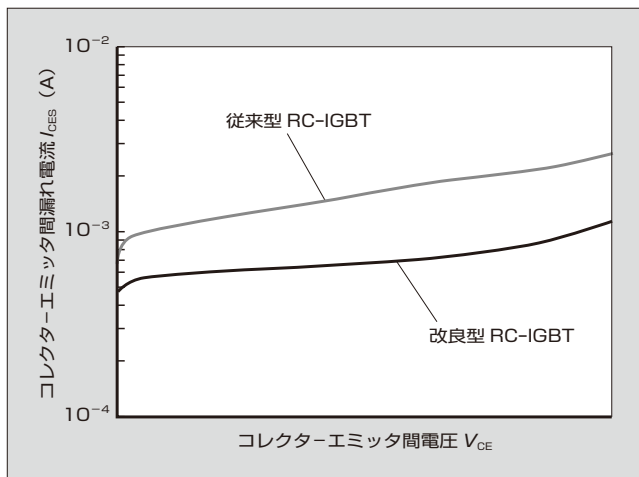


図6 I_{CES} 特性 ($T_c=150^\circ\text{C}$)

IGBT に対して 30% 以下に低減している。

(2) FWD 特性

図7にFWDの順方向特性を示す。改良型RC-IGBTでは、従来型RC-IGBTに対して薄ウェーハ化の効果により、順方向電圧の降下を低減させた。

図8に逆回復動作時のスイッチング波形を示す。改良型

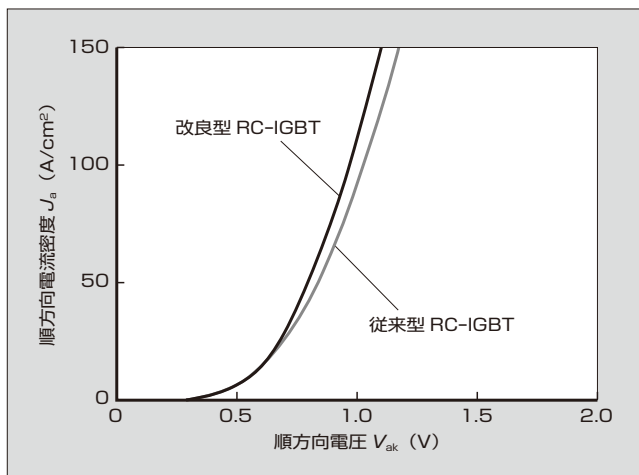


図7 FWDの順方向特性

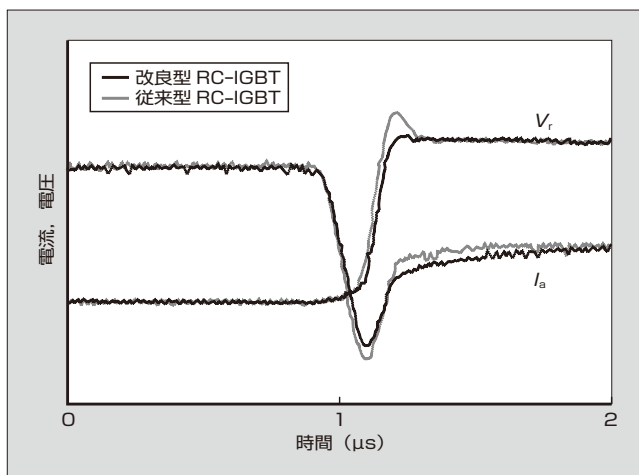
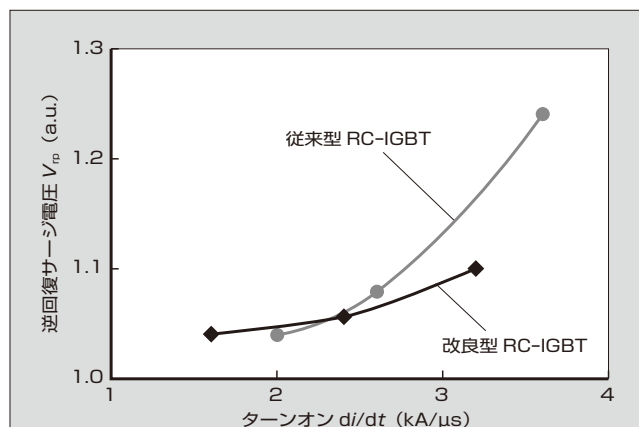


図8 逆回復動作時のスイッチング波形

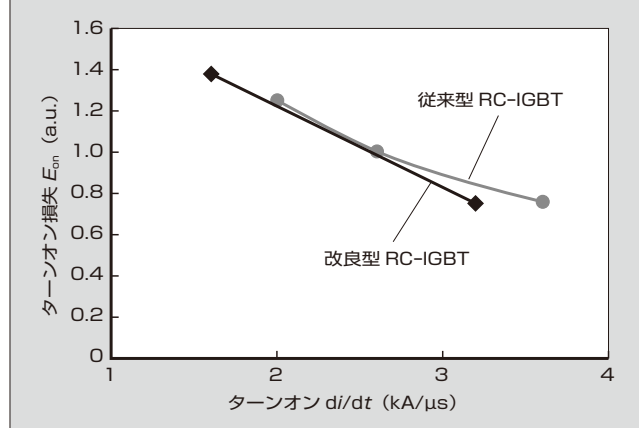
RC-IGBTでは、薄ウェーハ化してもソフトリカバリー特性となって逆回復サージ電圧が低減できるように、FS層の最適化およびライフタイム制御の最適化を行っている。

図9にターンオン時の特性を示す。図9(a)の逆回復サージ電圧は電源電圧を1として規格化した数値である。ターンオン di/dt と逆回復サージ電圧の関係およびターンオン di/dt とターンオン損失の関係から分かるように、改良型RC-IGBTでは高速ターンオン時において逆回復サージ電圧を抑制している。ターンオン時のスイッチング速度の向上はターンオン損失の改善に効果的であり、より低いゲート抵抗で駆動することで高速スイッチング時のターンオン損失を低減した。

図10に、FWDにおける順方向電圧と逆回復損失+ターンオン損失のトレードオフ特性を示す。逆回復特性とターンオン特性は同じ過渡期間の現象であり、電圧分担比の違いで逆回復損失とターンオン損失の大きさが決まるため、縦軸は合算した損失としている。また、従来型の損失を1として規格化した数値としている。薄ウェーハ化による順方向電圧の降下に伴う損失の低減、ならびに高速スイッチング化によるターンオン損失の低減により、トレードオフ特性を改善した。



(a) ターンオン di/dt と逆回復サージ電圧



(b) ターンオン di/dt とターンオン損失

図9 ターンオン時の特性

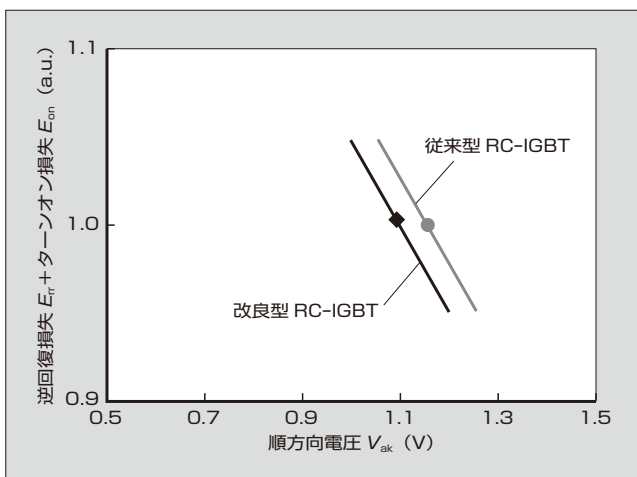


図10 FWDのトレードオフ特性

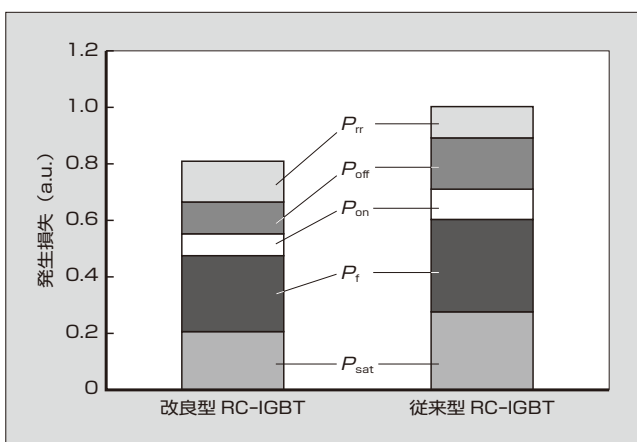


図11 インバータ動作時の発生損失

3.2 インバータ動作時の発生損失

改良型 RC-IGBT のインバータ動作時の発生損失を図11に示す。損失計算の条件として、一般的な HEV の走行モードを想定している。改良型 RC-IGBT は、従来型 RC-IGBT に比べて IGBT 特性を大幅に向上したことにより、発生損失が約 20% 低減した。発生損失の低減により素子の発熱温度が低下するため、より小さい素子を使用できるようになり、インバータの体積の低減が期待できる。

4 あとがき

本稿では、車載用 RC-IGBT について述べた。環境問題

への対応から、ハイブリッド車や電気自動車は今後も大きな発展が見込まれる。その中で、車載機器の小型化の重要性がさらに増すと考えられ、これを実現する RC-IGBT は非常に効果的であると考えられる。今後も、デバイスの改善や新材料のデバイスの開発などにより貢献していく所存である。

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) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (3) Higuchi, K. et al. “New standard 800 A/750 V IGBT Module technology for Automotive Applications”, Proceedings of PCIM Europe 2015, p.1137.
- (4) 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.



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。



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。



向井 弘治

車載用パワー半導体の開発に従事。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。博士(工学)。



*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。