

xEV 向けライフタイム制御レス低損失 RC-IGBT の開発*

Development of a low loss RC-IGBT without lifetime control for xEV

大河原 淳
Jun OKAWARA

志賀 智英
Tomofusa SHIGA

We developed a new 1200-V reverse conducting insulated gate bipolar transistor with a structure called Schottky and multi-layered anode (a unique carrier injection control approach without lifetime-control) for TOYOTA's 5th generation hybrid electric vehicle and plug-in hybrid electric vehicle systems. The developed devices reduced total losses (conduction and switching losses) by 10% compared to the conventional product. It also reduced the number of parts for the power module and contributed to its 25% size reduction, ultimately contributing to the downsizing of 13% of the power control unit.

Key words :

electrification, xEV, power semiconductor devices, RC-IGBT, downsizing, high-frequency operation, diode recovery loss, lifetime-control-less, injection control, staggered trench

1. 序論

近年、自動車業界では持続可能な未来のモビリティ社会の実現に向けて、大きな技術革新の波が押し寄せている。そのひとつが動力（パワートレイン）の電動化である。そのため、各自動車メーカーは、ハイブリッド車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）、プラグインハイブリッド車（PHEV：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、バッテリー式電気自動車（BEV：Battery Electric Vehicle）など、さまざまなタイプの電動車（以下、xEV）を開発している。これらのクルマはすべて、パワー・コントロール・ユニット（Power Control Unit：以下、PCU）によって制御されるモーターを動

力源としている。PCU には、DC 電源を AC に変換するインバータが搭載されている。インバータの中核部品はパワーモジュールである。Fig. 1 に xEV のユニット構成を示す。パワーモジュールには、複数のパワー（電力用）半導体デバイス（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（Insulated Gate Bipolar Transistor：以下、IGBT）やダイオード）が搭載されている。Fig. 2 は、パワー半導体デバイスが xEV の電力損失の約 20% を占めていることを示している。従って、パワー半導体デバイスの損失を低減することで、より高い PCU 効率を達成することができる。更に、PCU のコスト・サイズ・重量を低減するために、よりコンパクトなパワーモジュールが求められている。

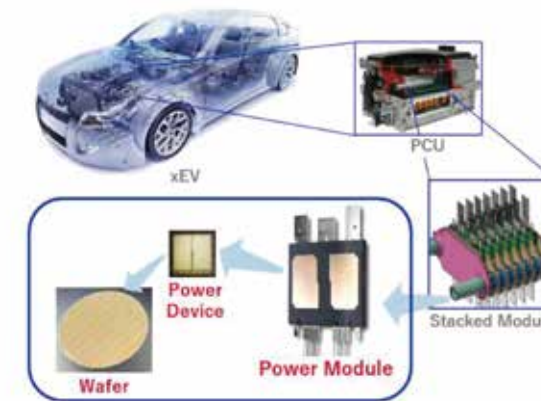


Fig. 1 Configuration of units for xEV

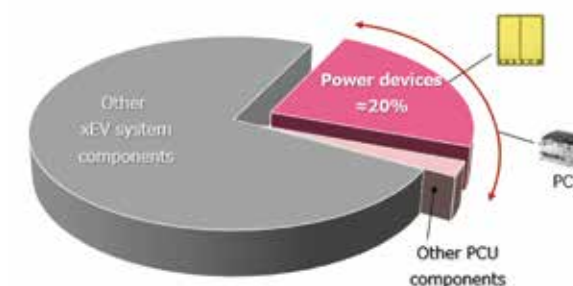


Fig. 2 Breakdown of electrical power losses of xEV

我々はトヨタ自動車の「第5世代ハイブリッドシステム」向けに、同第4世代 HEV/PHEV 向けの IGBT をベースとした、高周波動作対応かつ低損失な逆導通 IGBT（IGBT とダイオードを一体化したデバイス、Reverse Conducting IGBT：以下、RC-IGBT）を開発し、xEV 用のシステムに要求される PCU の製品競争力向上に貢献した。

一般的に、RC-IGBT は製造コストを削減するため、IGBT とダイオードそれぞれの領域を共通のウェーハプロセスで作製している。例えば、IGBT のしきい値電圧 ($V_{GE(th)}$) の制御やオーミックコンタクトをとる

ための高濃度ベース P 層形成プロセスは、ダイオードのアノード P 層形成にも使用される。この結果、最適化されずにキャリアが過剰に注入されるダイオードではリカバリ損失 (E_{rr}) が大きくなるため、RC-IGBT はハードスイッチング（デバイスのオン・オフを切り替える際の電圧と電流の交差（重複）が大きいスイッチング、電流をデバイス自身の電流遮断能力で強制的に切る方式）には不向きであった。ハードスイッチング条件下での RC-IGBT の使用を考慮する場合、リカバリ損失を低減するためにヘリウム（He）イオン照射などのライフタイム制御技術が広く用いられている¹⁾。しかし、これらの技術はダイオード特性に影響を与えると同時に IGBT 特性にも影響を与え、IGBT の導通損失を増加させる。このように、従来アプローチを用いた RC-IGBT では高周波動作と低損失の両立が困難である。

RC-IGBT 化の際に課題となるダイオードリカバリ損失を低減するため、我々はショットキー・アンド・マルチレイヤード・アノード（Schottky and Multi-layered Anode：ライフタイム制御を行わない独自のキャリア注入制御アプローチ、以下、SMA）構造と部分カソード N 構造をそれぞれ開発し、IGBT 特性に影響を与えることなく、ダイオードのファストリカバリを可能にした。

2. デバイス構造

Fig. 3 に従来の RC-IGBT (a) と開発した RC-IGBT (b) のデバイス構造の概観を示す。キャリア蓄積層周辺の電界を緩和して耐圧を保持するため、IGBT のゲー

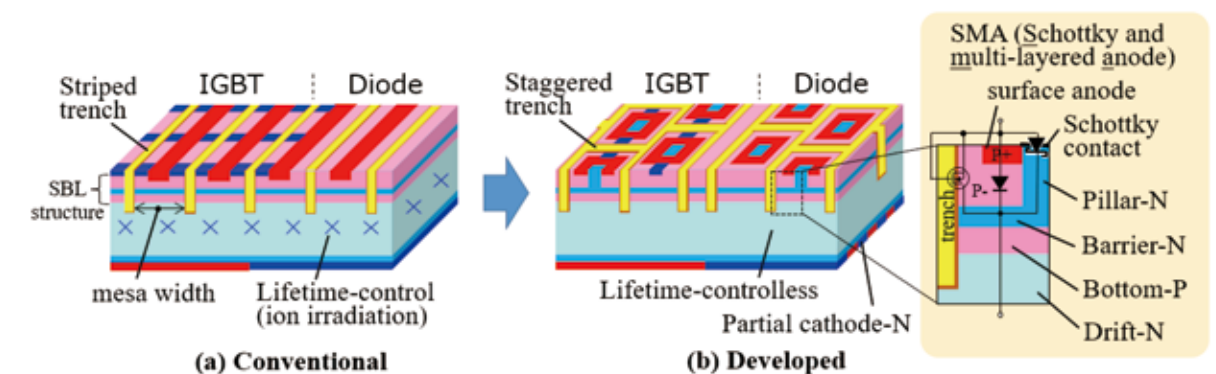


Fig. 3 Overviews of device structure of conventional RC-IGBT and developed RC-IGBT

* IEEE の了解を得て、Proceedings of ISPSD2023, pp.151-154, doi: 10.1109/ISPSD57135.2023.10147591. を和訳、一部加筆して転載
https://ieeexplore.ieee.org/document/10147591

トレンチ形成と同時にダイオード領域にはダミートレンチが設けられている。表面 MOS (Metal Oxide Semiconductor) 構造は、トヨタ第 4 世代 HEV/PHEV 向け IGBT に採用したキャリア蓄積層である、Super Body Layer (以下、SBL) 構造をベースにしている²⁾。前記 SBL 構造のバリア N (Barrier-N) 層は Injection Enhancement (IE) 効果を促進し、IGBT 動作時にドリフト N 層へ蓄積されるキャリア (正孔) 密度を向上させる。高いキャリア蓄積効果はデバイスのオン抵抗を大幅に下げ、IGBT の導通損失を低減する。また、前記バリア N 層の下部に位置するボトム P (Bottom-P) 層によって、デバイスは強電界から保護される。

SMA 構造のコンセプトは、ピラー N (Pillar-N) によって SBL のバリア N 層と表面電極をつなぐことでバリア N の電位を制御し、ダイオード動作時に表面アノード層からのキャリア (正孔) 注入量を抑制することである。表面電極にはショットキーバリアハイト (障壁高さ) や調達性を考慮し、アルミニウム・シリコン合金 (Al-Si) を採用した。前記 SMA 構造はダイオード動作時のキャリア注入量を減少させ、ライフタイム制御レスのシステムを実現する。Fig. 4 に開発したデバイスの表面構造の走査型静電容量顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscope: SCM) による断面像を示す。

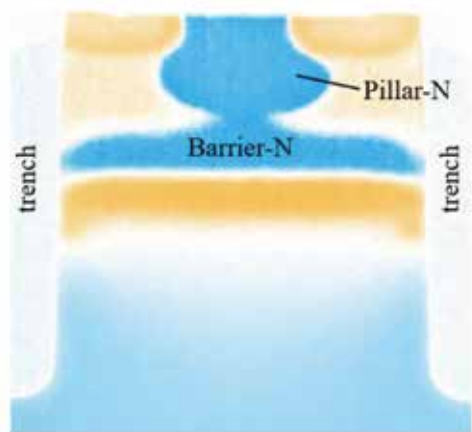


Fig. 4 Scanning capacitance microscope (SCM) cross-sectional image of the surface structure of the developed device

更に、格子トレンチ (staggered trench) 構造が表面セルの電子電流密度を増加させ、結果として IGBT の単位面積あたりのオン抵抗と導通損失の低減を実現している³⁾。格子トレンチ構造と SMA 構造の組み合わ

せにより、トレンチピッチの狭小化とは別の手法でデバイスの損失低減を達成している。換言すると、トレンチのメサ幅 (mesa width: 隣接するトレンチ間距離) を極限まで微細化することなく、デバイスの低損失化を実現している⁴⁾。

また、ドリフト N 層厚を薄板化するとともに部分カソード N 構造を採用し、裏面構造を進化させた。

これらの構造により、デバイスの低損失化と広い安全動作領域を両立させている。

3. デバイス製造方法

今回開発したデバイスの構造は、前世代の IGBT や従来の RC-IGBT と比較して、ウェーハ (製造) プロセスを大きく変更することなく、ピラー N 構造の形成工程を追加するだけで作製が可能である。

ライフタイム制御レスの設計は製造コストを削減する。IGBT とダイオードの一体化により製造工程が統合・簡素化され、工程数は前世代比で 49% 減少した。また、SMA 構造の採用によって従来技術であるライフタイム制御 (= 特殊) 工程が不要となり、イオンや電子線照射のための大がかりな設備が不要化できた。ショットキー電極に関しても、前述のとおり調達性に優れた Al-Si 合金の採用により、貴金属やレアメタルに頼らない設計を実現している。加えて、前記格子トレンチ構造の採用により微細加工ルール制約を取り除くことでファブ展開性を高めている。

以上のように、本デバイスは低コストかつ事業継続性・持続可能性まで考慮された、生産性を高める設計コンセプトおよび製造方法となっている。

4. 結果および考察

4.1 ダイオード特性

Fig. 5 は、「Conv. 1 (without lifetime control: ライフタイム制御なし)」と「Conv. 2 (lifetime-controlled: ライフタイム制御あり)」で示された 2 種類の従来 (conventional) 型、および「Developed」で示された開発 (=SMA) 構造、の計 3 種類の Test Element Group (TEG) について、ダイオードリカバリ時の電

流波形を比較したものである。

Fig. 5 に示す結果より、開発構造が従来型の「Conv. 1 (ライフタイム制御なし)」構造品と比べてリカバリ電流を低減できていることがわかる。また、今回開発した SMA 構造は「Conv. 2 (ライフタイム制御あり)」構造品と同等レベルまでリカバリ電流 (I_{rr}) を低減している。次に、本 TEG 構造に部分カソード N 構造を追加することで、我々は「Conv. 2 (ライフタイム制御あり)」構造品と同等レベルのハードスイッチングを実現した。

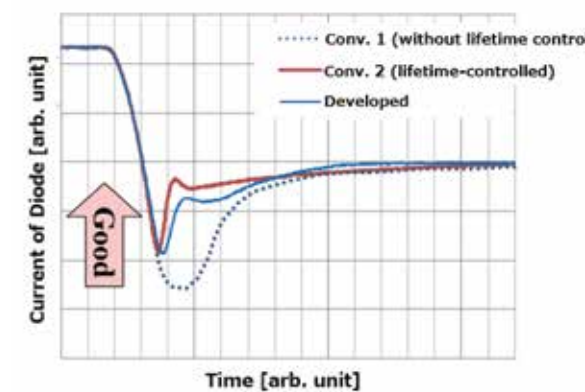


Fig. 5 Comparison of current waveforms at reverse-recovering of diode

4.2 IGBT 特性

Fig. 6 は、He イオンを照射した従来 (=Lifetime-controlled: ライフタイム制御あり) 構造と開発 (Developed = SMA: ライフタイム制御なし) 構造の 2 種類の TEG について、IGBT のオン電圧 (V_{CEsat}) 波形を比較したものである。

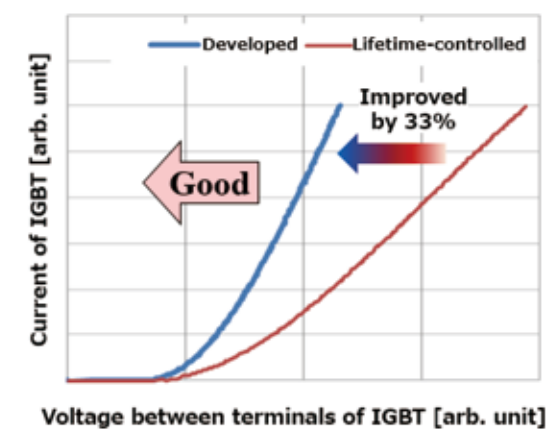


Fig. 6 Comparison of current waveforms during IGBT on-state

従来構造ではライフタイム制御により抵抗成分が加わり、IGBT の導通損失が増加する。これに対し、開発品はライフタイム制御なしの構造であるため、導通損失の増加は見られない。Fig. 7 に IGBT のトレードオフ・カーブを示す。従来 (ライフタイム制御あり) 構造と比較して、開発構造ではスイッチング損失を増加させることなく、IGBT の導通損失を 33% 低減できている。

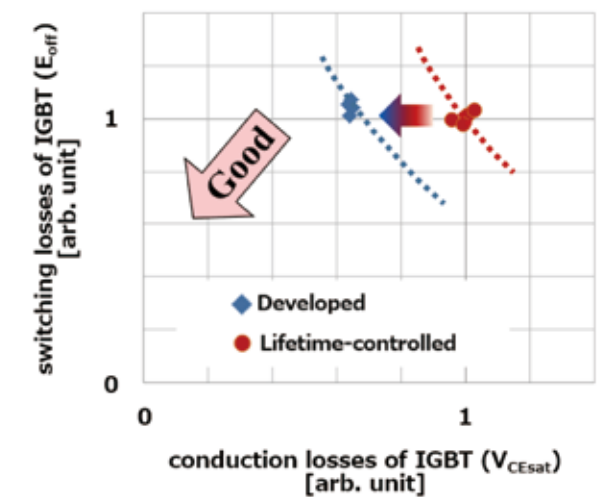


Fig. 7 V_{CEsat} - E_{off} trade-off curve of IGBT

Fig. 8 は、世代間の規格化されたコレクタ電流密度 (J_c) とオン抵抗 (R_{onA}) の変化を示す (ジャンクション温度 (T_j) = 25℃時)。格子トレンチと SBL の組み合わせ構造により、第 5 世代 (開発品) の J_c は第 3 世代デバイスの 2.2 倍、第 4 世代デバイスの 1.7 倍相当の高電流密度化を達成した。また、オン抵抗においては第 3 世代比で 38%、第 4 世代比で 11% 低減している。

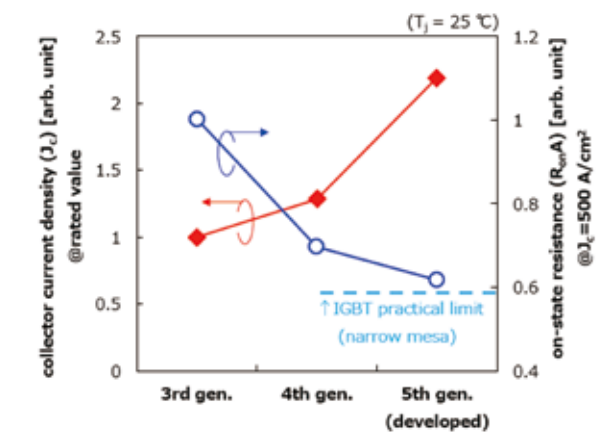


Fig. 8 Evolution of normalized collector current density (J_c) and on-state resistance (R_{onA}) between generations

これはTCAD シミュレーションで試算したシリコン IGBT の実用限界（メサ幅：0.2 μm 時）の値に迫る結果である⁵⁾。

4.3 その他

また、従来のライフタイム制御型 RC-IGBT は、高温時のリーク電流が大きくなる。しかし、今回提案する RC-IGBT では前記ライフタイム制御を行わないことでこれを抑制できている。コレクタ・エミッタ間リーク電流（ I_{CES} ; $T_j=150^\circ\text{C}$ 、コレクタ・エミッタ間電圧（ V_{CE} ）=1200V 時）を比較すると、今回開発した RC-IGBT では従来のライフタイム制御型の RC-IGBT に比べてリーク電流が72%改善（低減）し、同ばらつきも 1/10 以下に低減できた。従って、提案型の RC-IGBT では従来の RC-IGBT では困難であった高温動作対応が可能である。

開発したパワーデバイスの総損失（導通損失＋スイッチング損失）は、前世代比で 10% 改善された。これら高電力密度と低損失を達成したパワーデバイスに加えて、パッケージングと冷却技術の進歩により、システム要件を満たしながらパワーモジュールと PCU の小型化が可能になった。

IGBT とダイオードを RC-IGBT に統合し 1 チップ化することで、上位部品であるパワーモジュールの部品点数が削減され、パワーモジュールとして前世代比で 25% の低背化、PCU として前世代比で体積を 13% 削減することにそれぞれ貢献した（Fig. 9 参照）。1PCU 中のパワーデバイス実装面積という観点においては、前世代比で 60% の縮小を達成した（Fig. 10 参照：中容量 HEV 向け PCU / インバータにおける比較）。以上のように、デバイスの基材であるシリコン基板をはじめとした、材料の使用量削減に貢献している。

WLTC（Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycles）モード走行時の損失比較で前世代比 6.1% 向上しており、従来型を上回る性能・低燃費の達成に貢献できている⁶⁾。

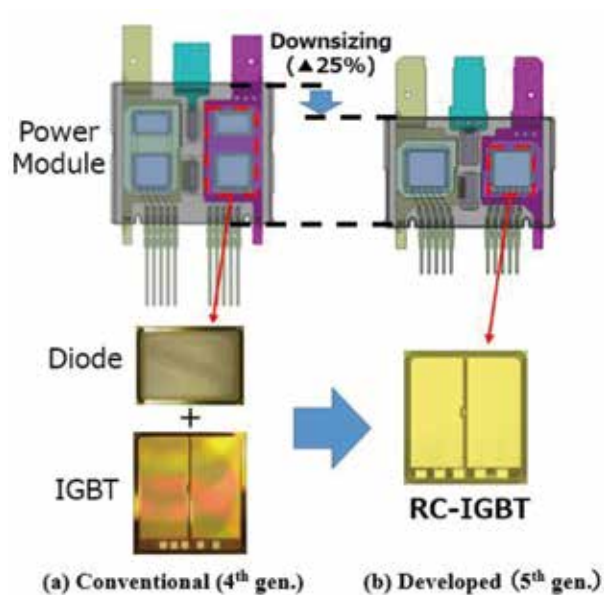


Fig. 9 Downsizing of 25% for the power module using RC-IGBT

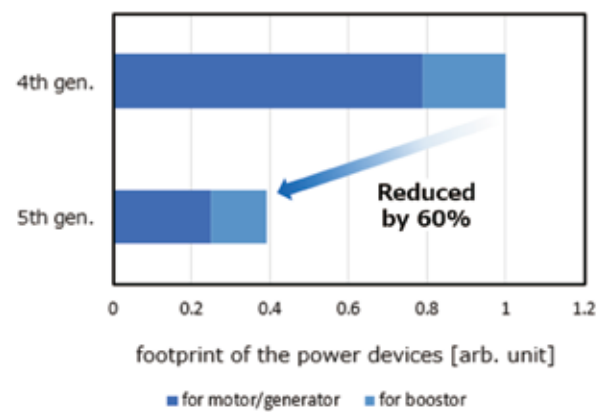


Fig. 10 Generational comparison of power device footprint in PCU/inverter for mid-performance drive

5. 結論

損失低減やダウンサイジングといった PCU の製品競争力向上のため、高周波動作に対応した低損失な RC-IGBT を開発した。今回提案するパワーデバイスが搭載された PCU は、より燃費の良い xEV の実現を可能にする。

6. 謝辞

本論文の一部は株式会社豊田中央研究所とトヨタ自動車株式会社との共同研究として実施されたものであ

る。本開発にご尽力いただいたすべての方々に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- Hideki Takahashi, Aya Yamamoto, Shinji Aono and Tadaharu Minato : “1200-V reverse conducting IGBT”, Proceedings of ISPSD2004, pp.133-136.
- Md Tasbir Rahman, Keisuke Kimura, Takeshi Fukami, Masaki Konishi, Tsuyoshi Nishiwaki, Jun Saito and Kimimori Hamada : “A novel carrier accumulating structure for 1200-V IGBTs without negative capacitance and decreasing breakdown-voltage”, Proceedings of ISPSD2018, pp.491-494.
- Satoru Machida, Yusuke Yamashita, Jun Saito and Masaru Senoo : “Grid-patterned trench insulated gate bipolar transistor

for 1.2 kV hybrid/plug-in hybrid electric vehicle silicon power devices”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.63, 02SP39(2024).

- Masakiyo Sumitomo, Junichi Asai, Hiroki Sakane, Kazuki Arakawa, Yasushi Higuchi and Masaki Matsui : “Low loss IGBT with partially narrow mesa structure (PNM-IGBT)”, Proceedings of ISPSD2012, pp.17-20.
- Akio Nakagawa, Yusuke Kawaguchi and Kazutoshi Nakamura : “Power Device Evolution Challenging to Silicon Material Limit”, Proceedings of SSDM2008, pp.732-733.
- Yuji Aono, Masaaru Nakashima, Eiji Nakagawa, Takumi Nomura, Yukiaki Yogo and Akihisa Hayashida : “Development of power control unit for a newly developed hybrid electricsystem”, Proceedings of 2022 JSAE Congress (Autumn), No.142.

著者



大河原 淳
おおかわら じゅん

パワーデバイス技術部
車載用パワーデバイスの開発に従事



志賀 智英
しが ともふさ

パワーデバイス技術部
車載用パワーデバイスの開発に従事