

## 新型パワーモジュール用第6世代IGBTと薄ウェーハダイオード

高橋徹雄\* 藤井亮一\*\*  
吉浦康博\*  
本田成人\*

The 6th Generation IGBT & Thin Wafer Diode for New Power Module

Tetsuo Takahashi, Yasuhiro Yoshiura, Shigeto Honda, Ryoichi Fujii

### 要旨

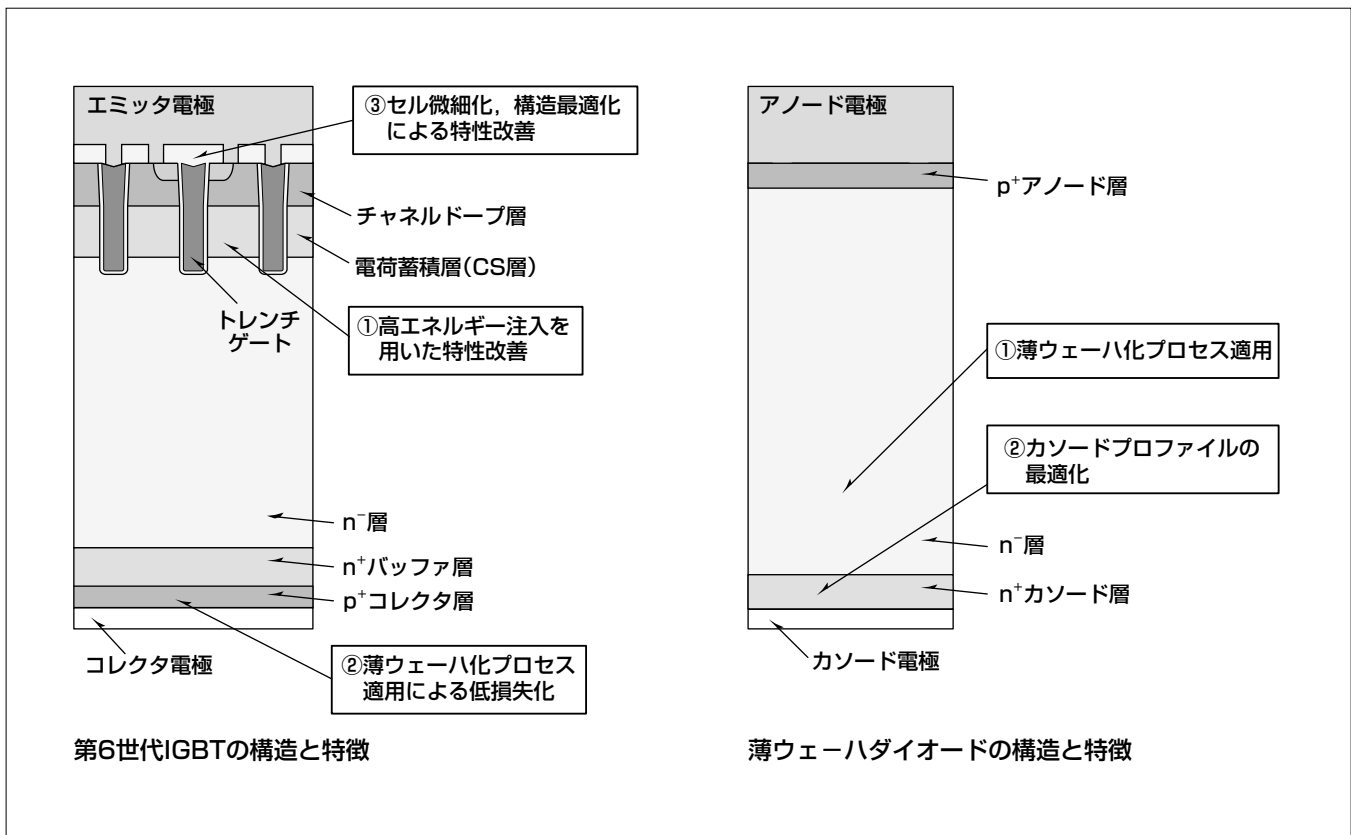
近年、パワーデバイスの用途は、産業、民生、電鉄、電力などに加え、昨今の環境問題への取組みなどによって、自動車用、新エネルギー用など様々な分野に広がり、その規模も拡大している。同時に、環境や電子機器の動作への悪影響を防止する法規制に対応するため、低損失化、低ノイズ化、高耐量化、高信頼性化など、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) やダイオードに求められる性能は年々厳しくなっている。

三菱電機は、これらの要求にこたえるため、プレーナ型IGBT (第3世代)、トレンチ型IGBT (第4世代)、電荷蓄積型IGBT (CSTBT) (第5世代)などを開発してきた。

今回、更なる特性向上とコストダウンを目指し、新型パ

ワーモジュール用として第6世代IGBTと薄ウェーハダイオードを開発した。第6世代のIGBTは、①高エネルギー注入技術を用いた特性の安定化、②薄ウェーハ化プロセスを適用した特性改善、③微細化プロセスを用いた特性改善と最適化によって性能指数FOM (Figure Of Merit)で31%の改善を実現した。薄ウェーハダイオードは、①薄ウェーハ化プロセスを適用した特性改善、②カソードのプロファイルの最適化によって順方向電圧降下 $V_F$ を改善し、FOMで38%の改善を実現した。

この新型パワーモジュール用第6世代IGBTと薄ウェーハダイオードの開発をベースにして、様々な製品向けの新チップを順次開発していく。



### 6世代IGBTと薄ウェーハダイオードの構造と特徴

6世代IGBTは、①高エネルギー (MeV) 注入によるCS層形成技術、②薄ウェーハ化プロセスを用いたLPT (Light Punch-Through) 構造の適用、③微細化プロセスとセル構造最適化を用いていることが特徴である。また、薄ウェーハダイオードは従来の拡散ウェーハの問題であった基板厚みとカソードプロファイルの問題を、①薄ウェーハ化プロセス適用、②n<sup>+</sup>カソードプロファイルの最適化によって $V_F$ を低減させている。

## 1. ま え が き

パワーデバイス、地球環境保護をキーワードに従来のインバータ、サーボをはじめとする産業用機器、エアコン、冷蔵庫などの民生用機器に加え、ハイブリット自動車、電気自動車、風力発電及び太陽光発電などの分野にも使われており、ますます重要性が高まっている。

現在の主力パワーデバイスはIGBTとFWD (Free Wheeling Diode)であり、これらの性能改善がパワーエレクトロニクス発展の鍵(かぎ)を握っていると言っても過言ではない。当社は、これらのデバイスの性能を継続して改善してきた。1980年代後半からプロセスの微細化の推進やCSTBTなどの低損失IGBT導入などの改善を続け、2007年までに、性能指数FOMで10倍の改善を図っている。

本稿では、更なる性能改善を進めた第6世代IGBTと薄ウェーハダイオードの開発について述べる。

## 2. 第6世代IGBT

### 2.1 IGBTの性能向上

1987年に第1世代IGBTが発表されて以来、IGBTは常にその特性の改善を続けている。図1にIGBTのFOMの伸展を示す。

性能指数FOMは、チップサイズを決める主要素のコレクタ電流密度 $J_c$  (A/cm<sup>2</sup>)、定常損失を決めるコレクターエミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$  (V)、ターンオフ損失 $E_{off}$  (mJ/p/A)の値を用いて式(1)で示されるもので、素子の特性を定量的に示す値である。

$$FOM = \frac{J_c}{V_{CE(sat)} \times E_{off}} \dots \dots \dots (1)$$

第1世代IGBTはプレーナ型IGBTであり、世代が進むに従い微細化することで特性の向上を図ってきた。第4世代

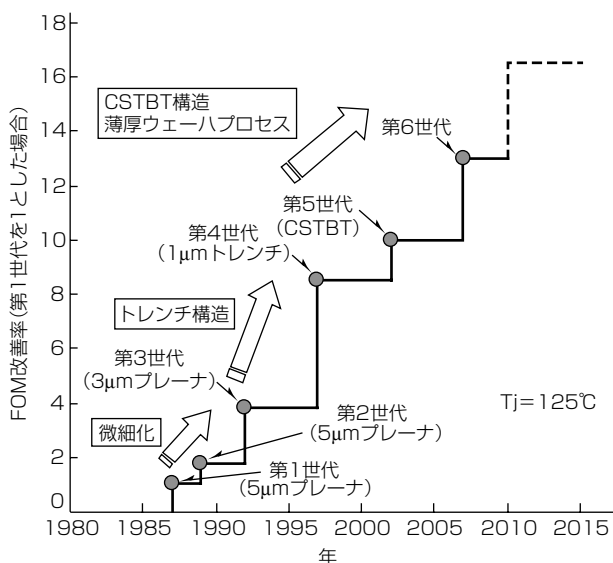


図1. IGBTの性能指数FOMの推移

になるとプレーナ型からトレンチ型へと構造が変わり、特性が大幅に向上した。第5世代になると電荷蓄積型IGBT (CSTBT)という新型IGBT構造と、薄ウェーハ化のプロセス適用によって特性を改善した。

### 2.2 第6世代IGBTの構造の特徴

第6世代IGBTでは、①高エネルギー注入技術を用いた不純物プロファイル形成による特性安定化、②薄ウェーハ化プロセスを適用した特性改善、③微細化プロセスとセル構造最適化による特性改善などの技術を適用している。

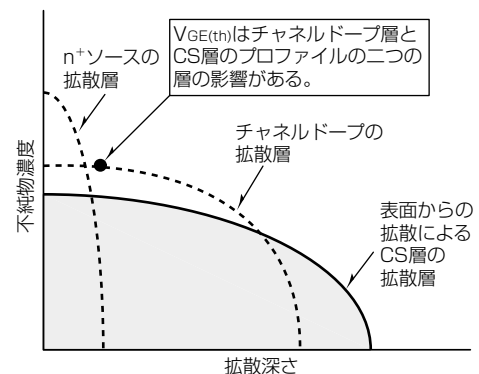
表1に、1,200Vクラスの第5世代IGBTと第6世代IGBTの構造比較を示す。

第6世代IGBTでは、IGBT特性の重要なパラメータであるゲート-エミッタ間しきい値電圧 $V_{GE(th)}$ のばらつき低減のため、電荷蓄積層 (CS層)と呼ばれる領域を、不純物を高電界で加速して注入する高エネルギー注入技術を用いて形成している。

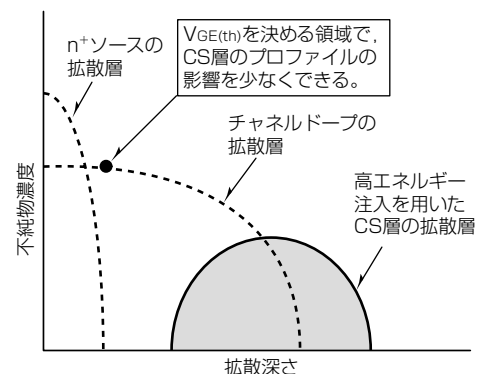
図2に高エネルギー注入技術による不純物プロファイル形成の概要を示す。IGBTは表面にMOS (Metal Oxide Semiconductor)を形成し、オン/オフを実現しており、

表1. 5世代IGBTと6世代IGBTの構造比較

項目	構造	5世代	6世代
不純物プロファイル		標準	レトログレード
薄ウェーハプロセス		適用	適用
トレンチピッチ		ワイドピッチ	狭ピッチ
セル構造		標準	セル構造を最適化



(a) 5世代IGBTの不純物プロファイル



(b) 6世代IGBTの不純物プロファイル

図2. 高エネルギー注入技術による不純物プロファイル形成

$V_{GE(th)}$ は主にMOSのゲート酸化膜厚とチャネルドープ層濃度で決まっている。第5世代以降のIGBTはn-ドリフト層の導電率変調時のキャリア分布を最適化するためにCS層を追加形成している。第5世代IGBTはCS層を表面から熱拡散しており、 $V_{GE(th)}$ を決めるポイントの不純物濃度がチャネルドープ層の拡散と、CS層の拡散の二つの拡散で決まっていた。第6世代IGBTでは、この $V_{GE(th)}$ のばらつきにつながる問題を極限まで下げることが目的として、CS層を形成する不純物を高エネルギーで打ち込む注入技術を採用した。これによって、CS層の効果を保持しつつ、 $V_{GE(th)}$ の安定化を実現している。

また、第5世代IGBTに適用した薄ウェーハ化プロセスを更に進めて、 $V_{CE(sat)} - E_{off}$ のトレードオフを改善している。セル構造については、トレンチピッチを含むセル構造自体を見直してEMI(Electro Magnetic Interference)ノイズ低減対策、ゲート容量の最適化等を行っている。

### 2.3 第6世代IGBTの電気特性

図3に、1,200Vクラス第6世代IGBTのコレクタ電流密度 $J_c$ と、ゲートエミッタ間電圧 $V_{GE}$ 特性を示す。先に述べた高エネルギー注入技術適用によって、 $V_{GE(th)}$ がCS層注入量の影響をほとんど受けないことがわかる。

図4に、150A 1,200V定格の第6世代IGBTと第5世代IGBTの $E_{off}$ と $V_{CE(sat)}$ のトレードオフ相関を示す。一般的にIGBTでは $V_{CE(sat)}$ と $E_{off}$ とはトレードオフの関係にあり、こ

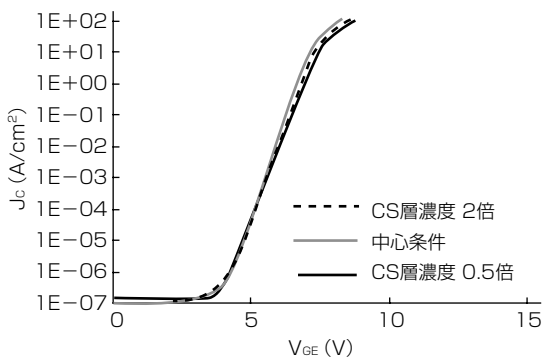


図3. 第6世代IGBTの $J_c - V_{GE}$ 特性( $T_j=25^\circ\text{C}$ )

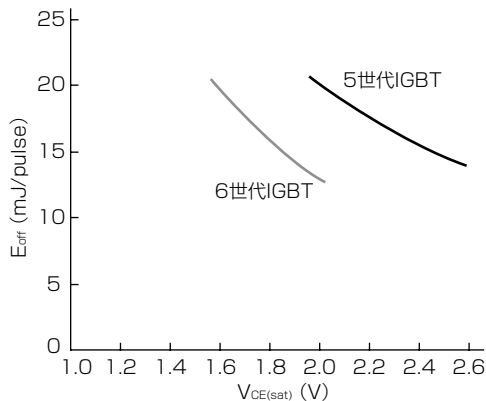


図4.  $E_{off} - V_{CE(sat)}$ のトレードオフ相関 ( $T_j=125^\circ\text{C}$ ,  $V_{cc}=600\text{V}$ ,  $I_c=150\text{A}$ )

のトレードオフ自体を改善する構造を作り出すことが求められる。今回の第6世代IGBTでは、第5世代IGBTに比べて $V_{CE(sat)}$ 比で約23%の低減を実現している。

図5に、同一チップのターンオン損失 $E_{on}$ -電圧上昇率 $dV/dt$ の依存性を示す。IGBT開発では $E_{on}$ の低減も求められるが、 $E_{on}$ を低減するためにスイッチング速度を早くとすると $dV/dt$ が大きくなる。この $dV/dt$ はEMIノイズと密接な関係があり、 $dV/dt$ が大きくなるとノイズレベルも大きくなる。このため、 $dV/dt$ と $E_{on}$ のトレードオフ関係の改善が重要となる。第6世代IGBTでは、セル構造の見直しによって、第5世代IGBTに比べて同一 $dV/dt$ で $E_{on}$ が約20%の低減を実現している。

最終的に、性能指数FOM比較で、第5世代のIGBTに比べると第6世代IGBTは31%向上している(図1)。

## 3. 薄ウェーハダイオード

### 3.1 薄ウェーハダイオードの構造の特徴

従来型ダイオードは、裏面からのn形不純物の拡散によってカソードを形成していた。このため裏面に形成されたカソード厚みが非常に厚く、順方向電圧降下 $V_F$ 低減の妨げとなっていた。薄ウェーハダイオードでは、IGBTで適用した薄ウェーハ化プロセスの適用、及びカソードプロファイルを見直すことで、 $V_F$ の大幅な改善を実現している。

### 3.2 薄ウェーハダイオードの電気特性

図6に150A 1,200V定格の従来型ダイオードと薄ウェーハダイオードの順方向電流 $I_F$ と $V_F$ の関係を示す。基板厚みが大幅に薄くなったことによって、同じ $I_F$ を流すのに必要な電圧 $V_F$ が低減され、 $I_F - V_F$ 特性が大幅に改善されている。

図7には従来型ダイオードと薄ウェーハダイオードの $V_F$ とリカバリー損失 $E_{rr}$ のトレードオフ相関を示す。一般に $V_F$ と $E_{rr}$ にはトレードオフ相関があり、このトレードオフ相関自体を改善するのがダイオード開発のポイントの一つ

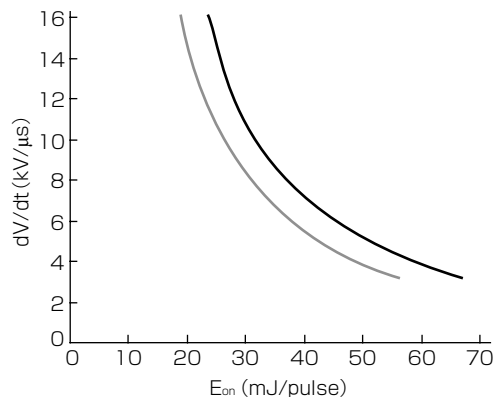


図5.  $E_{on} - dV/dt$ のトレードオフ相関 ( $T_j=125^\circ\text{C}$ ,  $V_{cc}=600\text{V}$ ,  $I_c=150\text{A}$ )

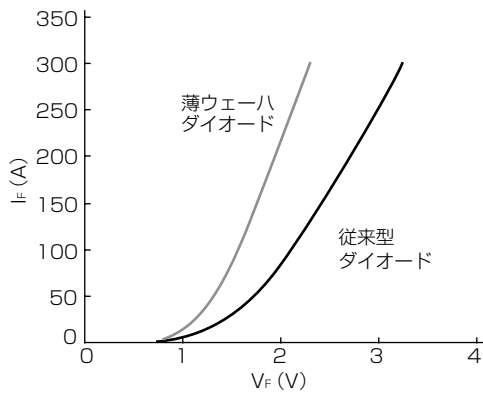


図6. 順方向の電流-電圧特性(T<sub>J</sub>=25°C)

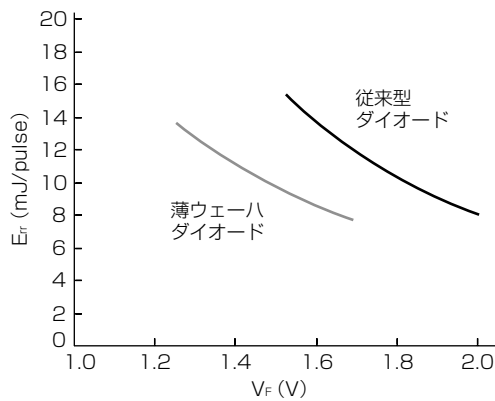


図7. V<sub>F</sub>-E<sub>rr</sub>のトレードオフ特性(T<sub>J</sub>=125°C, V<sub>cc</sub>=600V, I<sub>F</sub>=150A)

である。薄ウェーハダイオードではこのV<sub>F</sub>-E<sub>rr</sub>トレードオフ関連で、同一V<sub>F</sub>でE<sub>rr</sub>が33%と大幅な改善を実現している。

ダイオードに関する性能指数FOMを式(2)で定義して、従来型ダイオードに対する薄ウェーハダイオードの性能を比較すると38%向上している。

$$FOM = \frac{J_A}{V_F \times E_{rr}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、J<sub>A</sub>はアノード電流密度(A/cm<sup>2</sup>)、V<sub>F</sub>は125°Cでの順方向電圧降下(V)、E<sub>rr</sub>は125°Cのリカバリー損失(mJ/pulse)を示す。

#### 4. む す び

低損失、低ノイズを目指す新型パワーモジュールに向け1,200Vクラスの第6世代IGBT、及び薄ウェーハダイオードを開発し、性能指数FOMでIGBT、FWDそれぞれ31%、38%の改善を実現した。これは次世代デバイスとしての期待にこたえるものである。

この技術は1,700Vクラスへの応用も行っており、第5世代からの大幅な性能改善を確認しており、様々な製品に順次展開することを検討している。今後もSiデバイスの性能改善を継続し、パワーエレクトロニクス的发展と省エネルギー社会の実現に貢献していく。

#### 参 考 文 献

- (1) Takahashi, T., et al.: CSTBT™ (III) as the next generation IGBT, Proceedings of ISPSD 2008, 72~75 (2008)
- (2) Sato, K., et al.: New chip design technology for next generation power module, Proceedings of PCIM 2008, 673~678 (2008)
- (3) Takahashi, H., et al.: Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor(CSTBT)-A Novel Power Device for High Voltage Application, ISPSD'96, 349~352 (1996)
- (4) Nakamura, K., et al.: Advanced Wide Cell Pitch CSTBTs Having Light Punch-Through (LPT) Structures, ISPSD'02, 277~280 (2002)