

# パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーに貢献するパワー半導体デバイスの進展

多留谷政良\*

Recent Advances in Power Semiconductor Device for Energy-saving Power Electronics

Masayoshi Tarutani

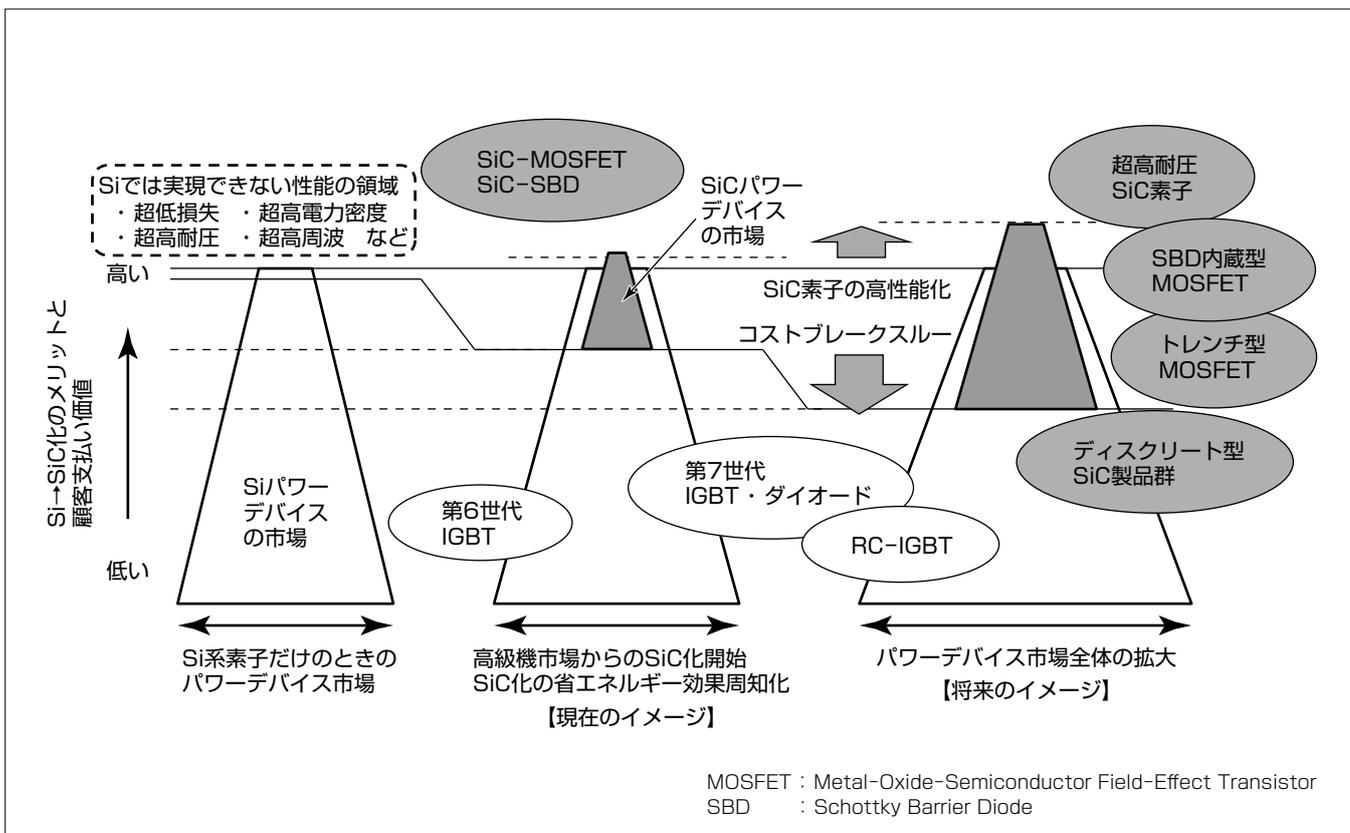
## 要旨

パワーエレクトロニクス(PE)技術は、機器の省エネルギーや創エネルギー(太陽光発電や風力発電、地熱発電などのCO<sub>2</sub>を排出しない電気エネルギーの創造)をより高効率化し、持続可能な社会づくりや環境負荷低減に貢献できる重要技術である。

三菱電機では民生から産業、自動車、電鉄・電力までの製品用途に最適に設計したチップとモジュールパッケージ技術を組み合わせ、百W級から数MW級までのパワーモジュールを製造し、多様なPE製品に応用してきた。その心臓部がパワー半導体デバイスである。現在まで目覚ましい進化を遂げたSi(シリコン)-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)やダイオードがその主力であり、これ

らを一体化したRC(Reverse Conducting)-IGBTの適用も進んでいる。デバイスに加えて、製品の耐久性や耐環境性などを決めるモジュール技術についても改善を重ね、信頼性の高い製品を創出してきた。

また、PE機器の更なる高性能化や小型化に向けては、SiC(シリコンカーバイド)デバイスの適用範囲拡大に高い期待と関心が寄せられている。最新デバイスを、価格面や実装形態などの面で、より使いやすくするように改善を続け、それぞれの応用用途に最適なデバイスとモジュール製品を開発・提供することで、持続的社會での環境の維持向上にますます貢献していく。



## 当社のSi・SiCパワーデバイスの進展

PE技術は、高効率化し、持続可能な社会づくりや環境負荷低減に貢献できる重要技術である。パワーデバイス市場の拡大を牽引(けんいん)するのは、技術の成熟期にあるSiパワーデバイスと技術飛躍期にあるSiCパワーデバイスである。技術革新による高性能化や製造技術の高度化による低コスト化、製品自体の使いやすさなどが向上することで市場が拡大する。SiCはその顧客支払価値を高めることで適用範囲が拡大していく。

## 1. ま え が き

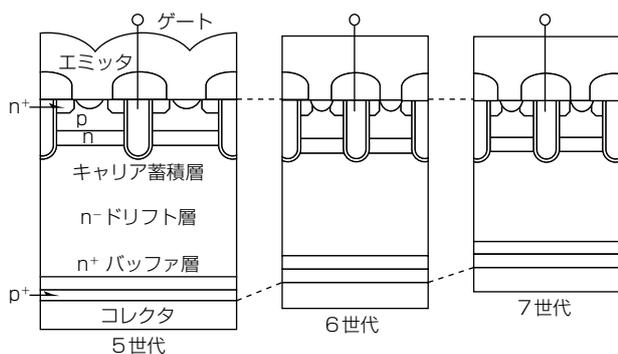
これまで、Si-IGBTを中心としたパワーデバイスは、飛躍的な性能向上を果たし、数Aから数千Aまでの電流量、数百Vから数千Vまでの定格電圧を持つパワーモジュールとして、様々な分野で実用化されPE機器の省エネルギー化に大きく貢献してきた。例えば、高耐久性を持つ車載用の6世代IGBT、民生用途で最初に実用化された7世代IGBT、高い電圧域までの分野に展開を見せる7世代IGBTとダイオード、7世代のプロセス技術をフル活用した高性能RC-IGBTのなどである<sup>(1)(2)(3)</sup>。デバイスの高性能化とともに、最適に設計されたパッケージや実装技術が製品としてのパフォーマンスを最大限に引き出す鍵となる。これらを高い水準で両立させて総合的な性能面で優れた魅力ある製品を提供できるのが、当社の強みである。今後は、Siでは実現できない超高性能が必要となる用途や、高級から中級クラスの製品群の一部に、SiCパワーデバイスの適用が進み、パワーデバイス全体としての市場拡大が期待されている。

本稿では、これまでに三菱電機技術などに掲載されてきた論文を基に、Siパワーデバイス技術を振り返るとともに、SiC化の進展の方向性について述べる。

## 2. Siのパワーデバイス技術の進展

### 2.1 Si-IGBT

現在のパワーモジュールの主力チップはSi-IGBTとSiダイオードである。Si-IGBTは、1980年代半ばの実用化以降、**図1**に示すように最新の7世代素子まで技術的に飛躍的な進化を遂げ、低損失化が図られてきた<sup>(1)(2)</sup>。Si-IGBTの構造の進化には、トレンチ構造とその微細化、キャリア蓄積層構造適用によるコレクタ-エミッタ間飽和電圧(VCEsat)の低減、接合信頼性や様々な接合方式に対応できるための表面電極平坦(へいたん)化やメタライズ形成技術、薄ウェーハ技術や極薄ウェーハ技術を適用しての薄板化、各素子に最適に調整した裏面構造の採用などがある。最近の7世代素子でも、アクティブなゲートの配列な



CSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)構造を採用し、薄ウェーハ化と構造最適化によって次世代進化を遂げてきた

図1. Si-IGBTの構造の進展

ど用途に応じて細やかな構造の最適化を図ることで、使いやすさを更に向上させている。

### 2.2 Siダイオード

パワーモジュール内でIGBTチップと逆並列に接続される還流用FWD(Free Wheeling Diode)でも、最新の7世代素子では順電圧(VF)と逆回復損失(Erec)のトレードオフ関係を改善するために、極薄ウェーハ技術と裏面パターニング技術を活用して形成するRFC(Relaxed Field of Cathode)構造が適用されている<sup>(2)</sup>。**図2**のとおり、RFC構造はカソード側(裏面)にp型とn型の領域を作り分け、ウェーハ厚やデバイスの使用条件に応じて、p層の濃度やレイアウトを調整することで、逆回復動作時のn-層中の電荷量を制御している。従来のチップでは、極薄ウェーハ化すると電圧のsnap-offや発振が見られるが、RFC構造では電圧のsnap-offを抑えることができ、従来型ダイオードと同等の破壊耐量を保持したまま、低損失化を実現している。

### 2.3 RC-IGBT

IGBTとダイオードを1つのチップに統合したRC-IGBTも2006年から製造しているが、最新の第7世代プロセス技術(極薄ウェーハ技術と裏面パターニング技術)を適用することで、飛躍的な極薄化と性能改善を実現した(**図3**)<sup>(3)</sup>。電気特性では、飽和電圧(VCEsat)は従来のRC-IGBTに対して同一チップサイズ比較の場合、50%低減できた。また、ダイオード領域のサイズとレイアウトについても最適化設計を行うことで、素子の放熱性を確保しつつリカバリ電流を最小化するように工夫している。今後の適用範

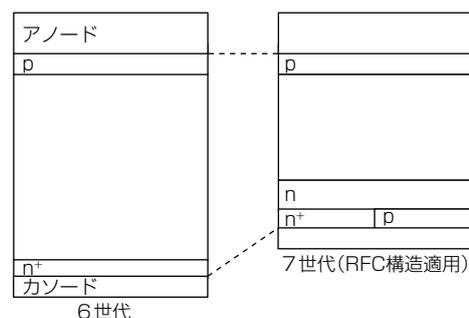


図2. Siダイオードの構造の進展

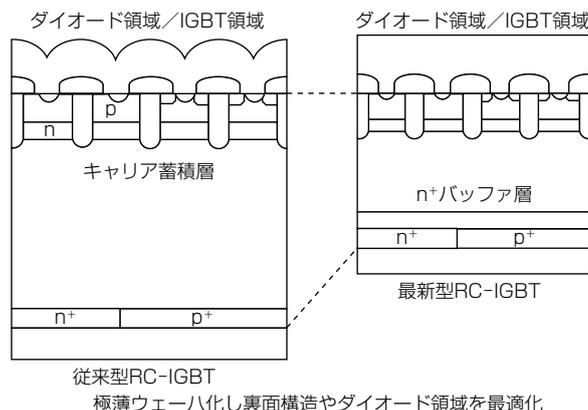


図3. RC-IGBTの構造の進展

囲の拡大を見越し、更なる研究を加速中である。

### 3. 現在のSiパワーデバイスの応用事例

#### 3.1 6世代と7世代素子の適用事例(車載対応製品)

地球環境保護意識の高まりを受け、EV(Electric Vehicle)・HEV(Hybrid Electric Vehicle)市場が拡大している。国によっては、今後も厳しい排ガス規制をすることや、エコカーとしての認定基準を一層厳しく制限する計画も発表されている。したがって、車載用パワーデバイスへの注目度や期待はますます高まっており、PE技術の競争の中心となっていく。自動車には人を安全に輸送するという命題があり、一段高い安全性が要求される。自動運転の開発の事例と同じく、自動車のモータ駆動に用いるパワー半導体には非常に高い信頼性や耐久性が必要とされる。これを作り出していくのが、デバイス技術と同じく重要なパッケージ技術とこれらを融合する接合部分の技術である。

当社では、1997年に自動車用パワー半導体モジュールを量産開始し、様々なEV・HEVに搭載されている。図4は、EVやHEV用モータのインバータ駆動に用いる自動車用パワー半導体モジュール“JシリーズT-PM”の小型パッケージの外観を示す。構成部品の高集積化で従来製品よりも小型化(実装面積で約36%縮小、製品質量で約42%低減)を実現しており、インバータの小型・軽量化に貢献している。このモデルに搭載されているIGBTは、CSTBT構造を採用した第6世代IGBTで、トランスファーモールド構造パッケージ内部の構成部品の高集積化を実現している。また、当社独自のDLB(Direct Lead Bonding)構造の採用で、配線抵抗と配線インダクタンスを低減しており、高性能と高信頼性を両立させている。

この進化版として実用化されたのが、最新の自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”である(図5)<sup>(4)</sup>。J1シリーズでは、第7世代のIGBTとダイオードを各6素子搭載し、冷却フィンとも一体化した直接冷却構造を適用している。最新素子の適用によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧を従来製品と比べて約15%低減している。また、冷却フィン一体型の直接冷却構造を採用することで、従来のJシリーズT-PMで必要であった放熱グリースが不要となり、放熱性能を約40%改善している。モジュールとしての熱抵抗を改善した結果、デバイスの通電能力を更に向上させることに成功している。搭載スペースの面では、従来のJシリーズT-PMを3台並べて配置するよりも、J1シリーズ1台を配置する方がコンパクトとなるほか、アルミ製の放熱フィン、モジュールの軽量化に大きく貢献している。

どちらの製品でも、製品の寿命を十分に高める必要がある、モジュール部品の形状や材質の選定・組合せ、実装条件の最適化など高度な技術が適用されている。また、DLB構造部でチップと上部電極を接続する部分は、はん

だ付けが用いられるが、動作時に発熱する素子に最も近い異種材料接合部分であり、ここにも数多くのノウハウと特許技術を採用しており、チップ側への発生応力やひずみのあるレベル以下に抑えることで、長寿命性能を実現している。

#### 3.2 RC-IGBTの適用事例(民生対応製品)

当社は業界に先駆けてDIIPM(Dual-In-line Package Intelligent Power Module)を製品化し、市場要求の変化に対応した製品を次々と開発・量産化してきた。2010年に空調機器業界に新たな省エネルギー基準として導入されたAPF(Annual Performance Factor: 通年エネルギー消費効率)に対しても、2013年に当社独自の第7世代IGBTを内蔵した超小型DIIPM“Ver. 6シリーズ”を製品化し、通電能力の拡大及び低電流域(定格電流の10分の1程度)の飽和電圧を15%低減することで、インバータシステムの小型化、省エネルギー化に貢献してきた。さらに、新興国市場でもインバータ化が進む中、システムコスト低減が課題となっている。この市場対応として、小型化、低コスト化を実現できる製品として“SLIMDIPシリーズ”を開発した<sup>(5)</sup>。超小型DIIPM Ver. 6シリーズには、7世代IGBTを搭載して豊富な電流容量やリード形状での多彩なラインアップがある。一方SLIMDIPシリーズでは、IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTを採用することで、従来の性能・機能を損なうことなくチップ搭載の占有面積

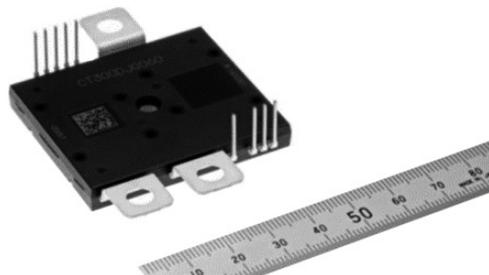


図4. 第6世代IGBTを搭載したJシリーズT-PM“CT300DJG060”

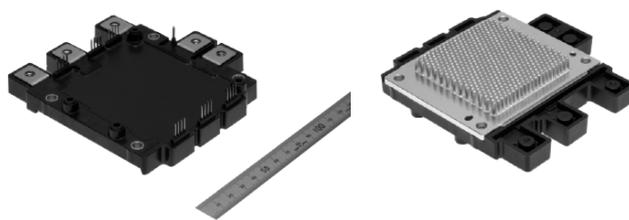


図5. 第7世代IGBTとダイオードを搭載したJ1シリーズ

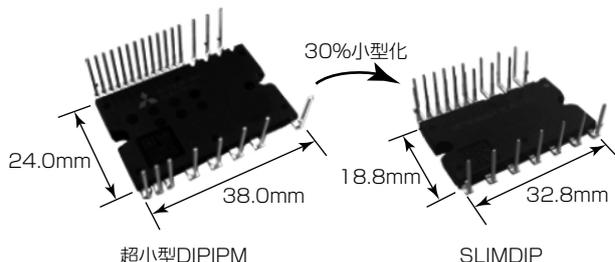


図6. 第7世代IGBT搭載の超小型DIIPMとRC-IGBT搭載のSLIMDIP

を削減し、パッケージ体積を30%小型化した。また、実装面についても生産性が向上している。図6に、従来の超小型DIPIPMとSLIMDIPの外観を示す。

#### 4. パワーデバイスのSiC化

##### 4.1 民生対応製品での事例

高級機種への適用については、更なる高性能化・低消費電力化が競争軸になってくる。そこで、IGBTに比べて低電流動作時の損失を小さくできるSJ(Super Junction)-MOSFETと、急冷などの過負荷動作にも対応できるようにIGBTと並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIPIPMを開発・製品化している。更なる高性能化を実現するため、高級機種製品向けをターゲットとしたパワー半導体モジュール“超小型フルSiC DIPIPM”では、当社独自の絶縁膜生成技術によって、高しきい値電圧と低オン抵抗を両立させたSiC MOSFETを搭載することで、当社従来製品(超小型DIPIPM Ver. 6)から電力損失を70%低減して業界トップクラスの低消費電力を実現した<sup>(6)</sup>。また、超小型フルSiC DIPIPMはゲート負バイアス回路を不要とすることで、当社従来製品と外形サイズ・ピン配列の互換性を確保し、インバータシステムの設計簡素化に寄与する。定格電圧600V、電流量15Aの従来のDIPIPMとSJ-MOSFET内蔵DIPIPM、フルSiC DIPIPMの損失比較を図7に示す。SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIPIPMは、高性能SJ-MOSFET内蔵DIPIPMと比べても50%以上の大幅な損失低減を実現している。高級機向けの素子のイメージがあるが、長時間にわたって連続してPE機器を使用するような環境や施設では、この低損失性能は十分に価値があるものと考えられるため、顧客支払価値の高い製品の好例と言える。

##### 4.2 これからのSiCデバイスの進展

これまで、SiパワーデバイスはPE機器の省エネルギー化に十分貢献してきた。現在は、第7世代技術のIGBT、ダイオード、RC-IGBTを活用した製品の拡大が進んでおり、高性能でより使いやすくコスト面でも魅力ある製品群を送り出し、普及が拡大中である。小型化・低コスト化という方向性でのラインアップ拡充によって、より多くの顧客に活用されると期待している。省エネルギーに適したPE機器の使用拡大を促すことで、気候変動及びその影響の軽減という環境的側面での社会貢献を果たし、持続可能な社会づくりに役立つはずである。

一方、Siデバイスでは実現できない領域の超低損失SiCデバイスへの期待も高まっている。今後、SiCの利用が更に広がるかは、顧客支払価値に見合った性能・コストの製品を生み出せるかにかかっている。SiCの製造に関する全般の製造技術の革新によって、コストブレイクスルーが実現できれば、中級機のレンジの機器まで適用が広がると期待している。また、この特集号の論文“省電力化を推進

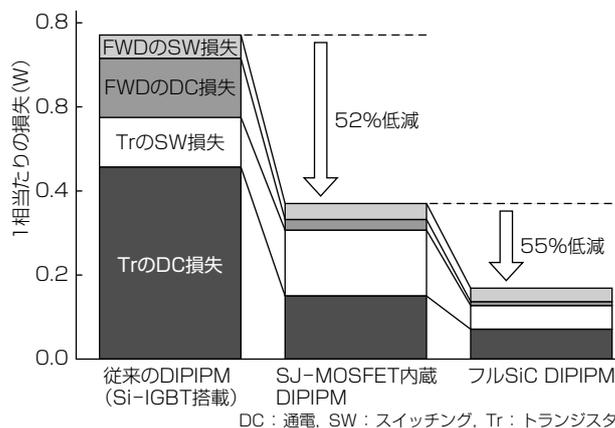


図7. SiとSiC素子を搭載したDIPIPMの性能比較

するSiC-MOSFET技術”で述べられている最先端SiCデバイス技術によって、搭載するチップ数の削減やチップの小型化ができれば、ブレイクスルーにつながる。一方で、ディスクリート製品のように単価が低いゾーンのラインアップ拡大も、PE機器のSiC化の進展の鍵になる。

#### 5. むすび

PE機器の省エネルギー化について、近年のSiパワーデバイスの技術動向と適用事例、SiC化の事例と今後の適用拡大の方向性について述べた。なお、SiCの性能を生かし切る技術として、パッケージの更なる進化も必要となる。当社は、たるまざる努力と“Changes for the Better”の精神に基づく製品開発を推し進め、よりよい製品を創出し、より多くの顧客に使ってもらうことで、未来のために貢献していく。

本稿の内容の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究成果である。

#### 参考文献

- (1) 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)
- (2) 上馬場龍, ほか: 産業用第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, **90**, No.5, 287~290 (2016)
- (3) Yoshida, T., et al.: The second-generation 600V RC-IGBT with optimized FWD, ISPSD2016, 159~162 (2016)
- (4) 石原三紀夫, ほか: 次世代自動車用パワー半導体モジュール“J 1 シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 321~324 (2014)
- (5) 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)
- (6) 古橋壯之, ほか: 超小型DIPIPM用SiC-MOSFET, 三菱電機技報, **91**, No.7, 377~380 (2017)