

# 第6世代 IGBT モジュール「V シリーズ PIM」

仲野 逸人 (なかの はやと)

小野澤 勇一 (おのざわ ゆういち)

井川 修 (いかわ おさむ)

## 1 まえがき

近年、電力制御や電力変換用途に代表されるパワーエレクトロニクス関連技術は、ますます適用範囲を拡大し、社会に大きく貢献を果たしている。最近の電力変換技術における一般的な要求として、システムの小型化、軽量化、高効率化などが挙げられる。したがって、電力変換システムの中核部品の一つであるパワー半導体デバイスは、これらの要求に対して、低損失、高機能、高出力などの高性能化を達成することが重要である。

システムの小型化を可能にした最も有効な手段の一つに、IGBT PIM (Insulated Gate Bipolar Transistor Power Integrated Module) の適用が挙げられる。PIM は、インバータ回路、ブレーキ回路、整流用ダイオードに対応するパワー半導体チップが、一つのパッケージに統合集約されたパワー半導体モジュールであり、サイズメリット、組立の効率化、経済性などが評価され、その需要は年々拡大している。

具体的には、電氣的・熱的な最適バランスを達成しつつ、いかにパワー半導体チップを小さくするかが課題である。IGBT チップは PIM に使われるパワー半導体チップの中でも最重要部品であり、PIM 内部において最も広いシリコン面積を占め、最も高温になる部品である。そのため、パッケージの放熱設計は特に重要である。したがって、高性能 PIM を実現するためには、高性能チップの開発と、高放熱パッケージ技術の確立を同時に実施する必要がある。

PIM に要求される他の重要特性として、低ノイズ放射が挙げられる。IGBT の発生損失は、オン損失とスイッチング損失に区別することができる。オン損失は、ドライブの駆動条件にほとんど影響されることはなく、IGBT のオン電圧に強く依存する。一方で、スイッチング損失は IGBT のスイッチング特性に大きく依存し、スイッチング損失を小さくするためには  $V_{on}-E_{off}$  のトレードオフをシフトさせればよい。しかし、スイッチング時間が短くなると放射ノイズが大きくなり、全体のシステムに影響を与えてしまう。したがって、第6世代 IGBT モジュール「V シ

リーズ」は、放射ノイズを抑えるためゲート抵抗によるターンオン制御が容易である必要がある。

## 2 第6世代 IGBT チップの設計思想

### 2.1 高性能化

図1に耐圧クラス1,200V IGBT のチップ断面構造の移り変わりを示す。第5世代 IGBT から適用されたフィールドストップ (FS) 構造により、IGBT の薄型化が加速し素子性能は飛躍的に向上した。IGBT は薄型化を進めるほど低損失化が可能であり、現在の半導体プロセス技術を用いれば、今後さらに薄型化を進めることは可能である。

ターンオフ振動は、“空乏層のリーチスルー”が原因で発生することは以前から知られており、FS 構造による薄型化において、デバイス厚を制約する一因になっている。FS-IGBT であっても、ターンオフ振動が観測される電圧は安全動作領域 (SOA) の外にあることが望ましい。

ターンオフ振動が起こる限界電圧 (以下、振動開始電圧という) と素子耐圧は相反する関係にある。すなわち、IGBT の n ドリフト層に高抵抗シリコンを用いれば、薄型化を進めても高い素子耐圧を得ることができる。しかし、振動開始電圧は下がるため、実際には使いにくい素子になる。第6世代 IGBT は、このトレードオフ関係をいかに向上させるかを開発の重点項目とした。

図2は、IGBT 厚さと必要な“理想係数”の関係を示したものである。理想係数とは、デバイス厚さとシリコンの抵抗値から理論的に求められる耐圧値と、実際の素子耐圧の比率を表したものであり IGBT の重要な設計パラメータの一つである。図中、“ターンオフ振動しない領域”と示される領域が、素子耐圧を確保でき、かつターンオフ振動問題が発生しない領域である。この範囲でデバイスは設計されなければならない。例えば140 $\mu\text{m}$ 厚の IGBT であれば、理想係数は70%でデバイス設計ができるため、耐圧は出にくい反面、特性のよい構造が適用できる。しかしながら、120 $\mu\text{m}$ 厚の IGBT は86%以上の理想係数が必要になり、デバイス設計に特別な考慮を要する。



仲野 逸人

パワー半導体の設計開発に従事。  
現在、富士電機デバイステクノロ  
ジー株式会社半導体事業本部産業  
事業部技術部。



小野澤 勇一

パワー半導体の設計開発に従事。  
現在、富士電機デバイステクノロ  
ジー株式会社半導体事業本部産業  
事業部技術部。



井川 修

パワー半導体の設計開発に従事。  
現在、富士電機デバイステクノロ  
ジー株式会社半導体事業本部産業  
事業部技術部マネージャー。電気  
化学会会員。

図1 1,200 V IGBT の各世代チップ断面構造

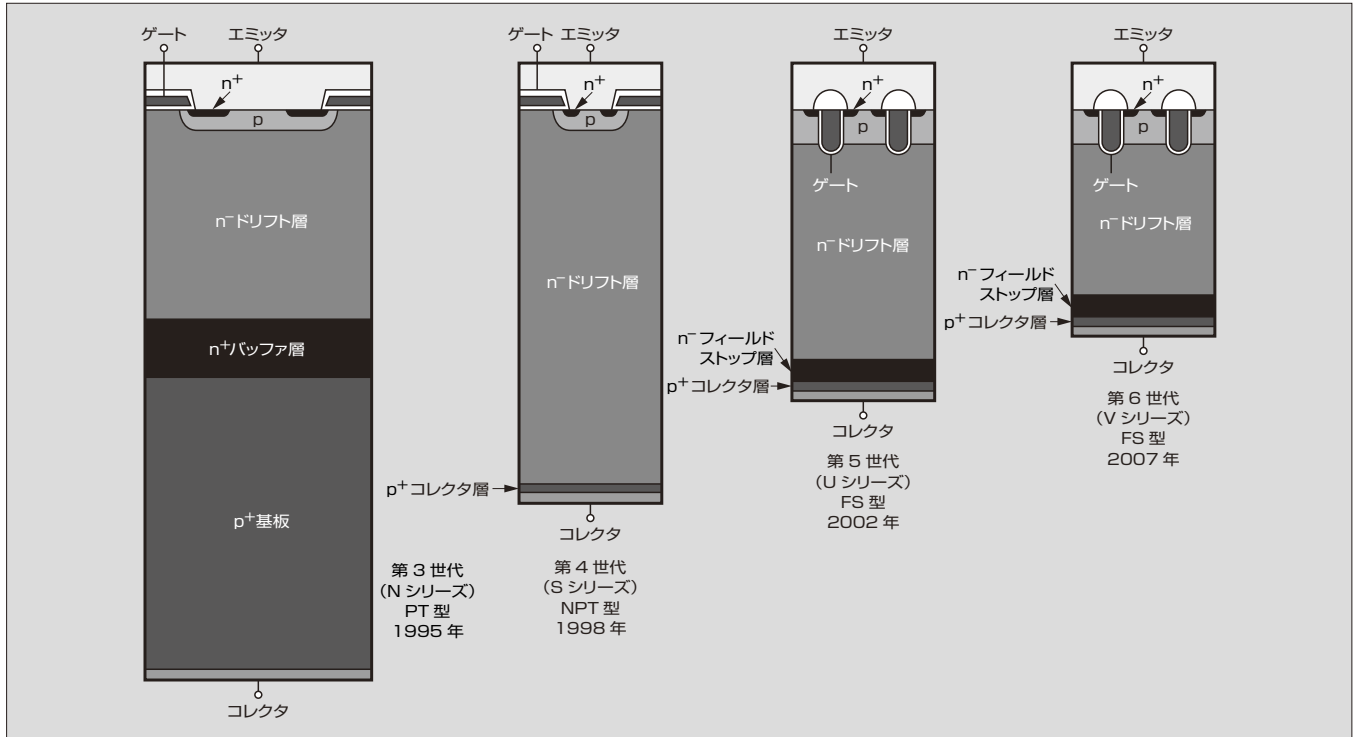
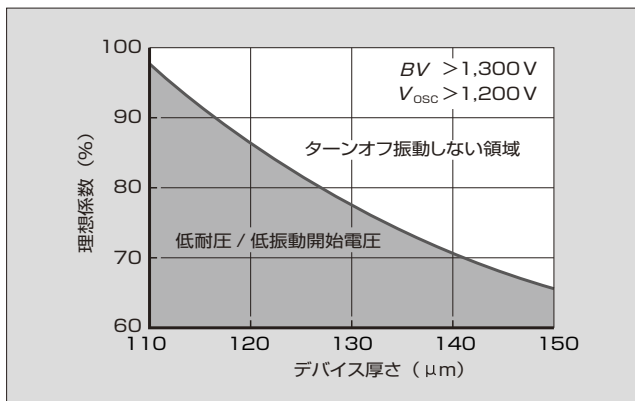


図2 オシレーションフリーFS-IGBTにおける理想係数

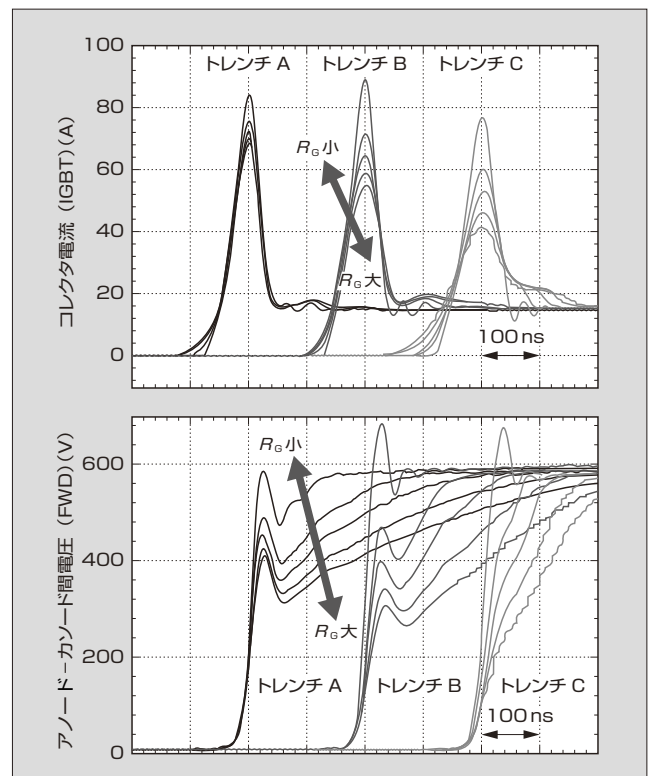


2.2  $dv/dt$  制御性の向上

スイッチング時の  $dv/dt$  抑制, 特に FWD のソフトリカバリー特性は, 低ノイズ放射, システムの安定動作などに重要であることは広く知られている。かつて, IGBT の主要構造であったプレーナゲート構造においては, ゲート構造が簡単であったために, 構造に基づいた特性予測が比較的容易であった。一方で, トレンチゲート構造は, さまざまな特性を満足するためにより複雑で, 組合せバリエーション, レイアウトも多様であり, 特性予測, 特にスイッチング特性予測が困難な一面もある。そこで, 放射ノイズ低減のために IGBT の  $dv/dt$  を制御しやすくする必要がある。

図3は, 異なるゲート構造で作成したトレンチFS-IGBTのターンオン特性のゲート抵抗依存性を示している。この特性は, 一般的に  $dv/dt$  が高い低電流領域で取得した。

図3 異なるトレンチゲート構造 IGBT における低電流  $dv/dt$  の  $R_g$  依存性



IGBT のゲート構造の差を見るために, すべて同じ FWD を用いている。この結果から, トレンチ A の構造は, ゲート抵抗 ( $R_g$ ) によるターンオン  $di/dt$ ,  $dv/dt$  の変化が少なく, ゲート抵抗によるターンオン特性の制御性に乏しいことが分かる。一方で, トレンチ C はゲート抵抗により

$di/dt$  や  $dv/dt$  が大幅に変わることが分かり、この素子はターンオン特性のゲート抵抗制御性が良好であるといえる。ハードスイッチング特性は、FWD の設計に起因するものと思われる傾向が強い。しかし、現在は FWD のソフトリカバリー化も進み、FWD 単体の特性が問題を引き起こすことは少なくなってきた。しかし、上の例のように、トレンチ IGBT においては、ゲートの構造が理由で、ハードスイッチング特性になってしまうことに注意しなければならない。

### ③ 次世代 IGBT チップの設計コンセプト

上述のような課題を解決し、かつ高破壊耐量と高信頼性を達成するため、V シリーズ IGBT は次の項目に着目し設計と最適化を実施した。

- (1) 活性部、エッジ部分ともに高い“理想係数”を確保する構造を採用した。
- (2) ターンオフ振動しない設計を確保しつつ、できるだけ IGBT の薄型化に努めた。
- (3) 150℃における負荷短絡耐量を確保するために、短絡電流を調整した。
- (4) 高速スイッチング性のためにゲート容量を低減した。
- (5) 素子の破壊耐量と長期信頼性を確保した。

図4 V シリーズ IGBT の J-V 特性

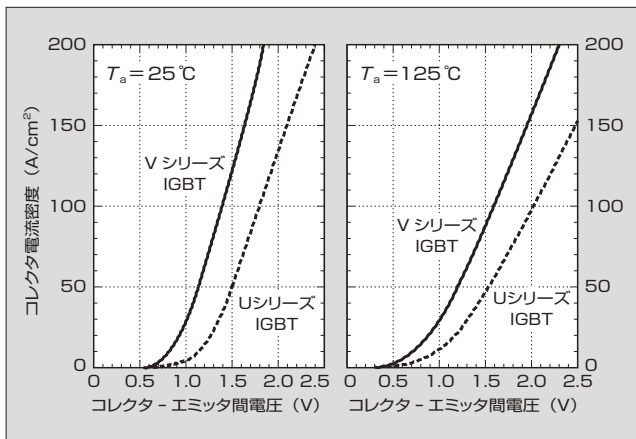
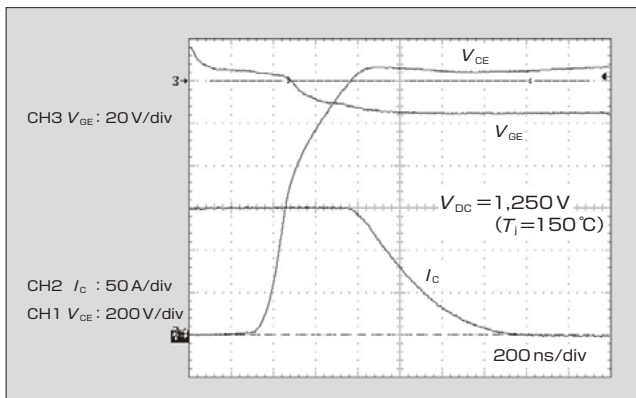


図5  $V_{DC} = 1,250V$ ,  $I_c = 150A$  条件でのターンオフ振動



## ④ 実験結果

### 4.1 出力特性

図4に1,200V 75AのVシリーズ IGBT およびUシリーズ IGBT の出力特性を示す。電流密度  $115 A/cm^2$ 、温度  $125^\circ C$  における  $V_{on}$  は、Vシリーズ IGBT が  $1.7V$ 、Uシリーズ IGBT が  $2.2V$  である。Vシリーズ IGBT ではドリフト層の薄化と表面構造の最適化により、約  $0.5V$  の  $V_{on}$  低減が実現できている。このことは、この特性をそのまま使って低損失を狙うこともできるが、チップサイズを小さくしてより低価格で小型の IGBT モジュールを実現できることも意味している。

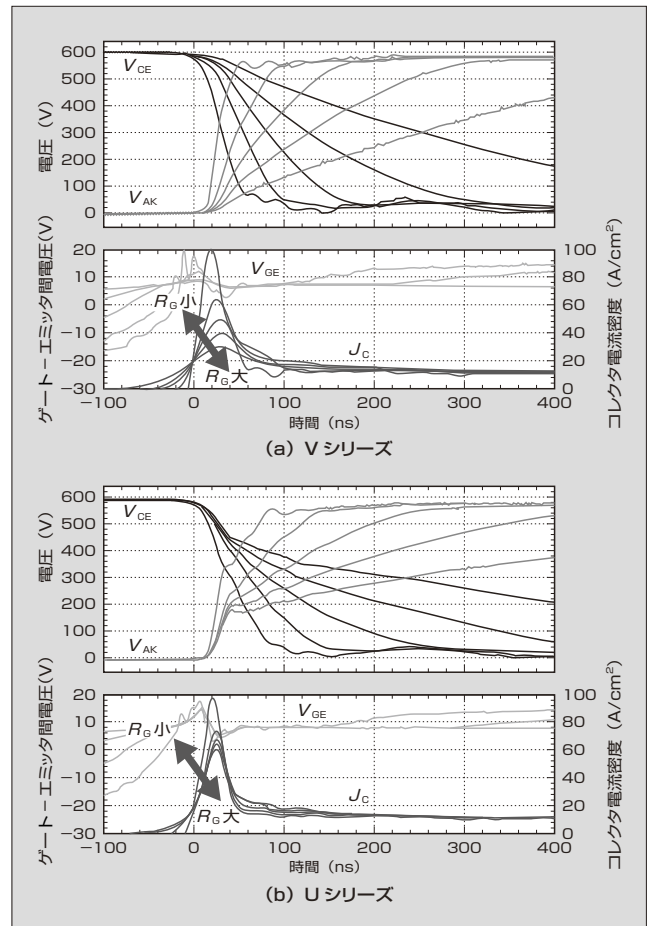
### 4.2 ターンオフ振動特性

図5は1,200V 75AのVシリーズ IGBT で、 $V_{DC} = 1,250V$ 、 $I_c = 150A$ 、 $T_j = 150^\circ C$  という非常に厳しい条件でターンオフを行ったときの波形であるが、振動は生じていないことが分かる。ターンオフに関しては、図5に示す条件以外にも電流・電圧依存性を測定したが、SOAの保証内では振動しないことを確認している。

### 4.3 ノイズとスイッチング損失のトレードオフ

図6に定格電流依存性はあるが最悪条件の低電流ターン

図6 低電流ターンオン特性の  $R_e$  依存性比較



オン試験の波形を示す。図から V シリーズ IGBT ではゲート抵抗によるターンオン  $di/dt$  の制御性が非常に高いことが分かる。先に述べたように IGBT のターンオン  $di/dt$  は FWD の  $dv_{AK}/dt$  に相当するので、このことはノイズの制御がゲート抵抗で容易に行えることを意味する。また、従来の U シリーズ IGBT に比べて同じターンオン  $di/dt$  を実現するためには小さいゲート抵抗でよいから、ターンオン損失を大幅に小さくできる。図 7 は、ゲート抵抗をパラメータにしたときの FWD の低電流（定格電流の 1/10）における  $dv_{AK}/dt_{(max)}$  と、IGBT の定格電流における  $E_{on}$  のトレードオフを表したものである。低電流における  $dv_{AK}/dt$  を  $10\text{ kV}/\mu\text{s}$  に合わせた場合、従来 U シリーズ

図 7 低電流  $dv/dt$  と定格電流スイッチング損失のトレードオフ

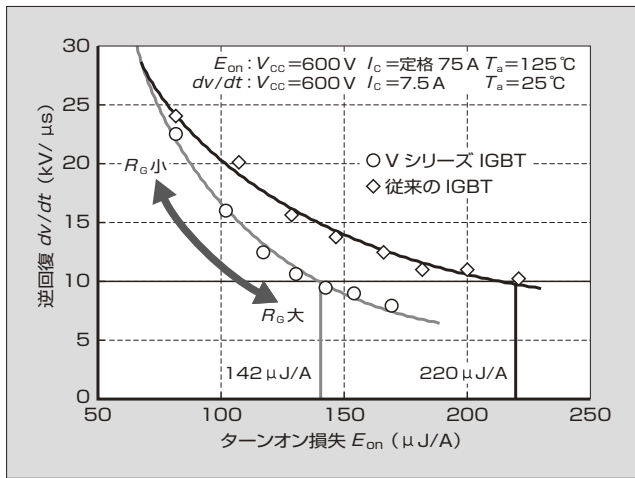
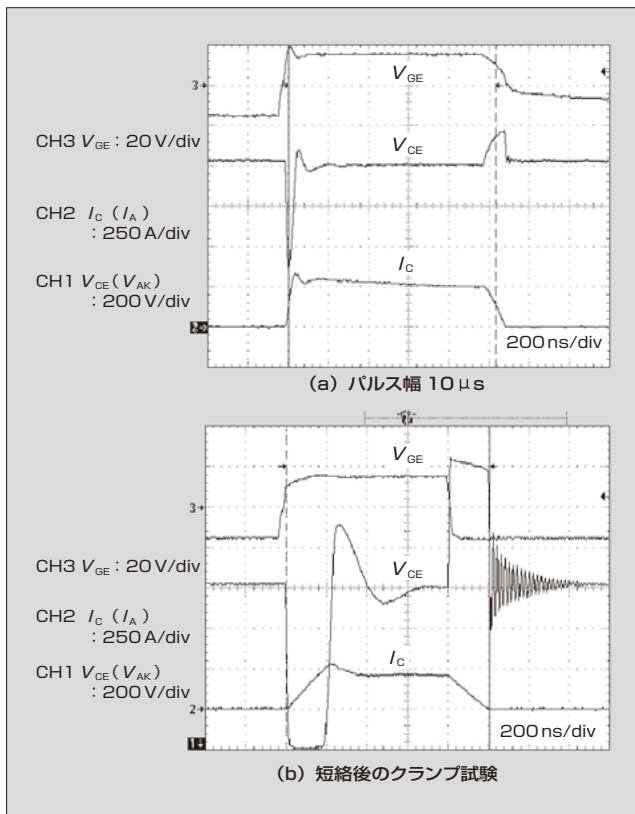


図 8 150°Cでの短絡試験



IGBT のターンオン損失が  $220\mu\text{J}/\text{A}$  であるのに対して V シリーズ IGBT は  $142\mu\text{J}/\text{A}$  であり、約 36% の損失低減を実現している。

4.4 短絡耐量

図 8 (a) に V シリーズ IGBT の短絡試験結果を示す。  $V_{DC} = 800\text{ V}$ ,  $T_j = 150^\circ\text{C}$ , ゲートパルスは  $10\mu\text{s}$ ,  $+15\text{ V}$  の条件で、破壊しないことを確認した。

また、図 8 (b) に示すように意図的に回路に大きなインダクタンスを付加し、短絡のオフ時にクラмпに入るような厳しい条件での試験も行ったが、破壊しないことを確認した。この試験結果から、V シリーズ IGBT は高い電流遮断能力と自己クラмп耐量を有していることが確認できた。

4.5 総合損失と発熱

小型化のためにチップサイズを小さくする場合、熱抵抗が増大するため、チップに発生する損失が同じなら、発熱は大きくなる。そこで V シリーズでは熱伝導率の大きいパッケージを適用することによりこの問題を回避している。図 9 は一般的なモータドライブの駆動条件における損失と  $\Delta T_j$  をシミュレーションしたものである。この図から分かるように、V シリーズのトータル損失は  $63\text{ W}$  であり、U4 シリーズの  $64\text{ W}$  とほぼ同等である。また、そのときの接合部温度とケース温度の差  $\Delta T_{j-c}$  は  $16.1^\circ\text{C}$  であり、チップがシュリンクしているにもかかわらず、従来のシリーズと同等であることが分かる。

図 9 トータル損失とノイズピークを  $R_{\theta}$  を用いて合わせ込んだ  $\Delta T_{j-c}$  の比較

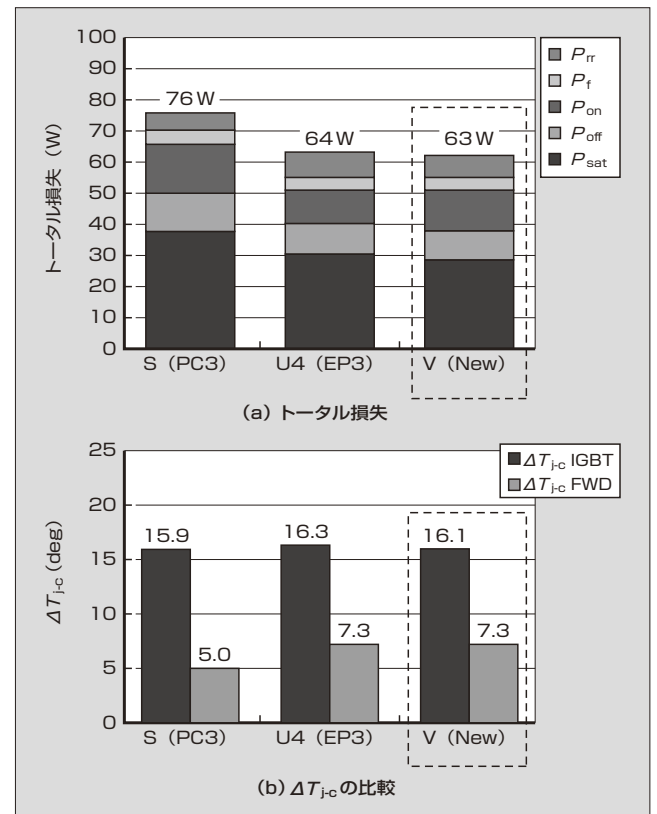
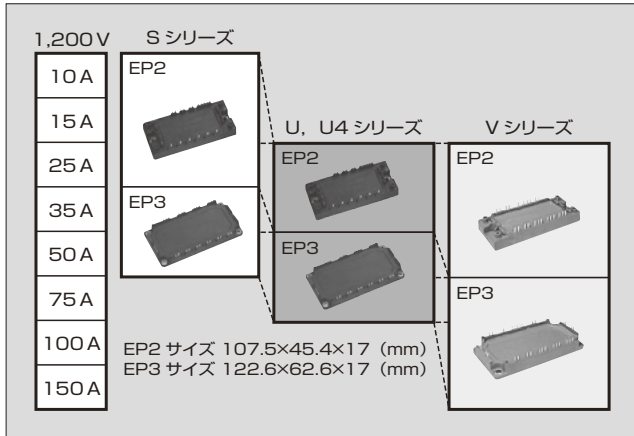


図10 富士電機の IGBT PIM の製品ラインアップ



5 製品ラインアップ

図10は、1,200V PIMの定格電流、モジュールタイプ別のラインアップを示す。Vシリーズでは、EP2パッケージにおいて1,200V 50Aまで、さらにEP3パッケージにおいては1,200V 150Aまでカバーしており、従来のSシリーズ、U4シリーズに比べて幅広いラインアップを実現し、特に1,200V 100Aおよび150AについてはVシリーズIGBT PIMで初めて実現している。

6 あとがき

本稿では第6世代 IGBT モジュール「V シリーズ PIM」について紹介した。第6世代 IGBT チップを搭載することにより、低放射ノイズで高性能、そして小型な IGBT PIM を実現することができた。この結果、EP3 のパッケージサイズで 1,200 V 150 A 定格のモジュールまでカバーすることが可能となった。富士電機では、経済的で環境に優しい V シリーズ IGBT PIM のいっそうの高性能化・高信頼化に向け努力していく所存である。

参考文献

- (1) Laska, T. et al. The Field Stop IGBT (FS IGBT) – A New Power Device Concept with a grate improvement Potential. Proc. ISPSD 2000. p.355-358.
- (2) Nemoto, M. et al. An Advanced FWD Design Concept with Superior Soft Reverse Recovery Characteristics. Proc. ISPSD 2000. p.119-122.
- (3) Otsuki, M. et al. Investigation on the short circuit capability of 1,200 V trench gate field-stop IGBTs. Proc. ISPSD 2002. p.281-284.

