

パワーモジュールの 電力損失低減と小型化技術

加柴良裕* マジウムダール ゴーラブ***
小野山 歩**
林 建一**

Improvement in Total Loss of Power Devices and Miniaturization of Transfer-molded Power Modules
Yoshihiro Kashiba, Ayumu Onoyama, Kenichi Hayashi, Gourab Majumdar

要 旨

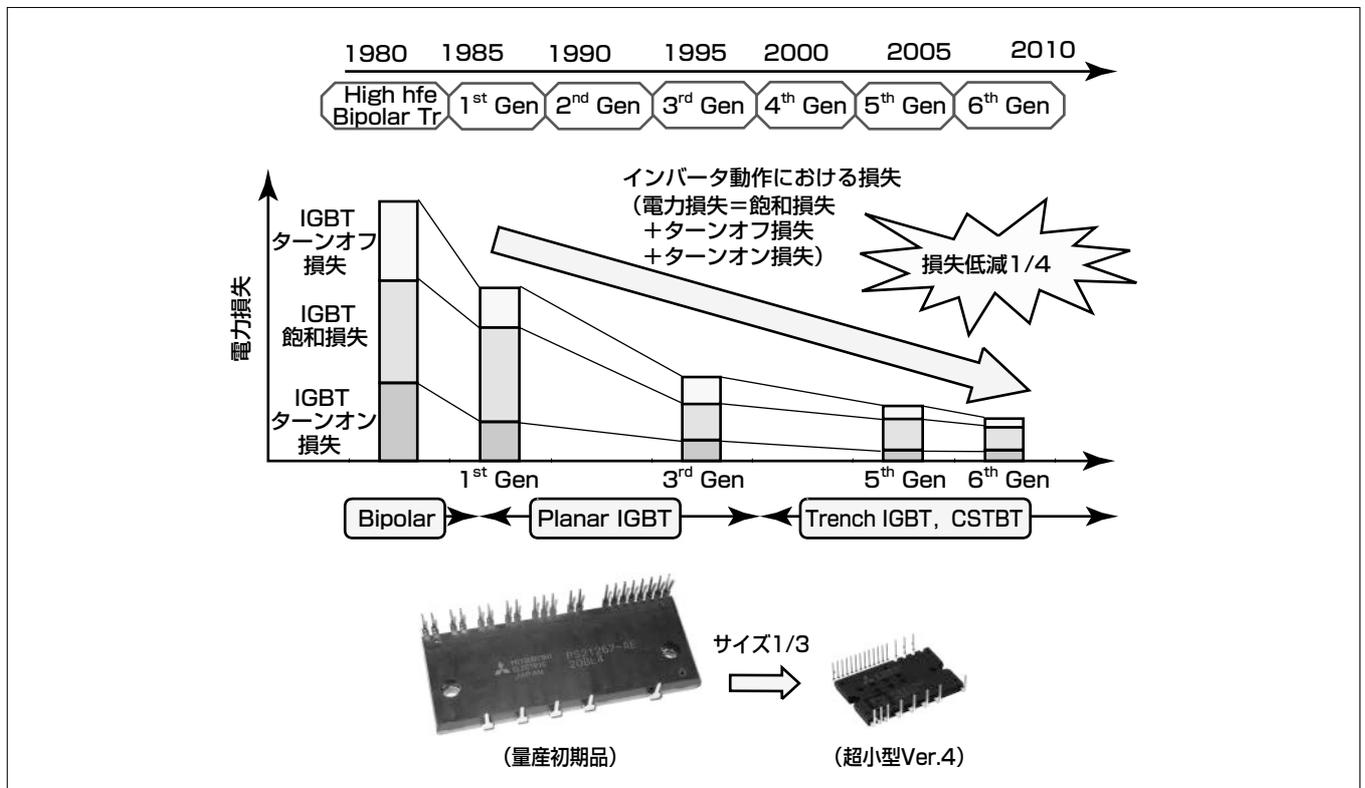
地球温暖化による環境対策の高まりとともに、モータを効率良く駆動するために必要なインバータが広く浸透してきている。このインバータは、家電製品から、産業用機器、自動車・電鉄用機器までの各分野で、省エネルギーのためには不可欠な技術となっている。また、インバータ機器には高効率化や小型化が要求されており、低電力損失かつ小型のパワーモジュールが必要となる。

インバータの心臓部であるパワーデバイスは、数kVに及ぶ耐電圧の高さと、数Aから千Aクラスまでの幅広い電流制御が必要となるため、これに対応したデバイス構造設計・プロセス技術開発を進めてきた。その結果、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)のデバイス性能としての電力損失低減に関しては、第1世代に対して第6世代は1/4まで大幅に低減している。すなわち、電力変換のた

めに無駄に放出される熱エネルギーは、デバイスの進化とともに1/4まで減少している。

また、パワーデバイスを複数搭載したDIPIPM (Dual In-line Package-Intelligent Power Module)は、三菱電機独自の高熱伝導シートを用いたトランスファーモールド構造をシリーズ展開することによって、ユーザーからの小型・低熱抵抗化の要求にこたえ、エアコン等のインバータ化推進をサポートしている。超小型Ver.4は小型Ver.3に対して40%の小型化と30%の低熱抵抗化を実現している。

これら環境負荷を低減した製品を実現するにあたっては、パワーデバイス、パワーモジュール及びインバータ実装について、構造・材料・プロセスを全体最適解に落とし込むことが重要である。



IGBT素子の電力損失低減とDIPIPMの小型化

IGBT素子の電力損失は、世代を重ねるごとにデザインルールの微細化とデバイス構造の革新を進めることで、電力損失の低減を実現してきた。DIPIPM (10・20A品)はデバイスの電力損失の低減と合わせてパッケージング技術の革新によって、そのサイズを量産初期品に対して約1/3に小型化した。これらのパワーデバイスとパワーモジュールを用いたインバータは、環境負荷低減の社会的要請に合わせ、広く浸透してきている。

*生産技術センター(工博) **同センター ***パワーデバイス製作所(工博)

1. ま え が き

近年、地球温暖化による環境問題は深刻さを増しており、社会全体の省エネルギー(CO₂削減)化がますます重要になってきている。電力エネルギーを変換・制御するパワーエレクトロニクス機器では、モータを効率良く駆動するために必要なインバータが広く浸透してきており、家電製品から、産業用機器、自動車・電鉄用機器までの各分野での省エネルギー技術として、極めて重要な技術となっている。

インバータの心臓部にあたるパワーデバイス(パワー半導体)は、数kVに及ぶ耐電圧の高さと、数Aから千Aクラスまでの幅広い電流を制御する必要があるため、ロジックICやメモリICとは異なるデバイス構造設計とプロセス技術が必要となる。また、このパワーデバイスを複数搭載するパワーモジュールは、処理するパワー密度の高まりとともに、パッケージ材料面まで遡及(そきゅう)した革新が必要となってきている。さらにはパワーモジュールを搭載するインバータ基板は、製品の特性に合わせて小型化や高効率化が要求される。したがって、これら三つのキー技術であるパワーデバイス、パワーモジュール、インバータ実装を全体最適に落とし込む技術の追求が、環境負荷を低減した製品につながっていくと考えられている。本稿では、それらの取り組みについて述べる。

2. パワーデバイスの電力損失低減技術

パワーモジュールのキーデバイスであるIGBTに対して、幅広いパワーエレクトロニクス市場から最も要求される性能は、動作時に発生する熱を減らすこと、すなわち“電力損失の低減”である。1980年代のパワーデバイスであるバイポーラトランジスタの動作時の電力損失に対して、IGBTは世代を重ねるごとに電力損失の低減を実現してきた⁽¹⁾。図1にIGBTの性能指数であるFOM(Figure Of

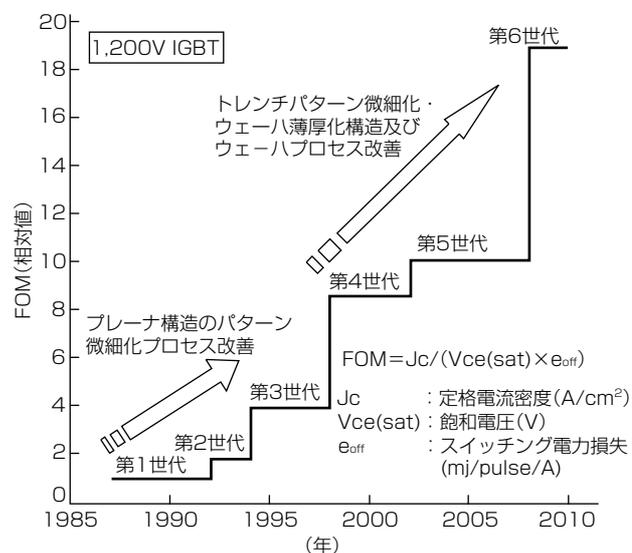


図1. デバイス構造の進化によるIGBT性能向上

Merit)の値を、第1世代を基準として各世代の改善状況とそのためのキーテクノロジーを示す。FOMはパワーデバイスに流せる定格電流密度を導通時の電圧(飽和電圧)とスイッチング時の電力損失で割ったものである。第1世代から第3世代のセル構造はプレーナ構造で、パターンの微細化が進められた。第4世代でセル構造を溝(トレンチ)を形成するトレンチ構造とし、セルサイズを大幅に縮小させた。第5世代では、濃度プロファイルを進化させたCSTBT(Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor)構造とした⁽²⁾。さらに第6世代では、トレンチ間隔の狭ピッチ化及び薄ウェーハ化を行った⁽³⁾。このような構造の改善によって、デバイス性能は大幅に向上した。

図2に、第5世代のCSTBTと第6世代のCSTBTのセル構造を示す。構造上の大きな変化点は、飽和電圧の低減を目的として、トレンチ間隔を第5世代の2/3以下に狭めていることと、薄ウェーハ化したことである。

ますます微細化が進むトレンチ構造はウェーハプロセスで形成するが、IGBTの性能を確保するためのシリコン基板の深い溝は、ドライエッチングプロセスを用いる。そのため、ドライエッチング装置でのプロセス時間が、LSIよりも非常に長くなり、異物が発塵(はつじん)しやすいプロセスになる。このドライエッチング装置の電極やチャンバの材料には、表面にアルマイト処理を施したアルミを使用している。しかし、アルマイト皮膜はドライエッチング中に熱・化学的ダメージを受け、経時劣化を起こす。また、エッチング時に発生する反応生成物がアルマイト上に堆積(たいせき)して、異物の発塵源となる。この異物を除去するには、洗浄処理を定期的に行わなければならないが、この洗浄処理でアルマイト皮膜は化学的ダメージを受け、その結果、エッチングガスに含まれるフッ素とアルミが反応し異物が発生する。このように、IGBT特有の発塵しやすいプロセスに対する対策として、アルマイト皮膜の高品質化、アルマイト部品の交換頻度見直し、洗浄プロセスの適

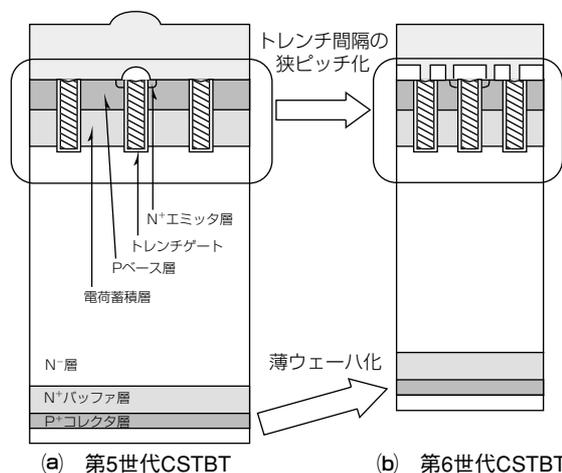


図2. 第5世代CSTBTと第6世代CSTBTのセル構造

正化などを行い、異物発塵を抑制している。

また、薄ウェーハ化は、次のプロセスで行う。

- ①ウェーハ裏面からの機械研削
- ②機械研削時に発生する結晶欠陥が高密度に存在するダメージ層の除去
- ③ウェーハ裏面にpn接合を形成するための不純物注入と活性化アニール
- ④IGBTをプリント基板やヒートスプレッドにはんだ付けするためのメタル多層膜の形成

これらのプロセスで薄ウェーハ化すると、製造プロセス起因のウェーハ厚みのばらつきが、アナログデバイス特有の電気特性ばらつきの要因となる。そこで、機械研削プロセスとダメージ層除去プロセスを組み合わせることで、加工精度を向上させている。

このように、デバイス構造の進化に対応するには、ウェーハプロセスの複雑化と高度化が必要となる。特にデバイスに欠陥をもたらすウェーハ上の異物の低減技術と、デバイスの電気特性の安定化につながるプロセスの加工精度向上技術が不可欠となる。

3. パワーモジュールの小型化技術

パワーモジュールのパッケージ構造は、電流容量・電圧や使用用途によって、ケース型とトランスファーモールド型に分類できる。ここではエアコン等の家電製品のインバータ化技術に欠かせない、トランスファーモールド型のDIIPMの展開について述べる。DIIPMは図3に示す“All-Silicon-Solution”コンセプトを特長として、世界に先駆け1997年に製品化され、白物インバータ家電の普及に欠かせないキーパーツとして誕生した。

その後、図4に示すように、小型・大容量化に向けてのシリーズ展開を行っている。開発当初は10・20A用の1種類のパッケージで製品化を行ったが、現在ではVer.4シリーズとして75Aまで3種類のパッケージ形状で量産してい

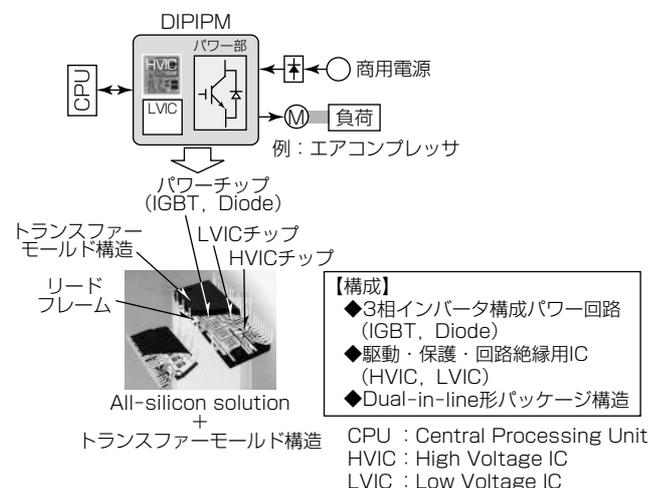


図3. DIIPMのコンセプトと特長

る⁽⁴⁾。このような展開では2章で述べたパワーデバイスの低損失化と合わせて、パッケージの放熱特性の改善が重要な役割を果たしている。

初期のDIIPMのパッケージでは、リードフレームの下に封止材料であるモールド樹脂の薄い層が形成されている。この層は、外部との絶縁を確保するとともに、熱伝導路として機能するものである。図5はこの構造の概要を示すパッケージ断面図であるが、パッケージ全体がモールド樹脂で被覆されている。このパッケージでは、発熱するパワーデバイス下のモールド樹脂層表面が、グリースを介して外付けのフィン(ヒートシンク)と熱的に接続される放熱面となっている。熱抵抗の観点から、モールド樹脂層はできるだけ薄くなるのが望ましいが、この層が薄いほどモールド樹脂の流動が抑制され、被覆が不完全になりやすい。その結果、樹脂層の厚さや樹脂の物性に制限を受け、このようなモールド樹脂で被覆された構造のパッケージでは、9割以上がモールド樹脂の熱抵抗となっており、高放熱化の妨げとなっていた。

こうした放熱構造の困難性を克服するため、新たな放熱系を持つパッケージとして、絶縁性のシート部材をフレームに貼(は)り付ける方式を開発してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これは、放熱面にモールド樹脂とは異なるシート状の材料を配置し、モールド樹脂の流動性に対する制約を回避することをねらったものである。図6に、この考え方に基づいたパッケージの概略構造を示す。高熱伝導の絶縁シートは、熱硬化性樹脂をバインダとして、高熱伝導性フィラーを高密度に充填(じゅうてん)させる方法を採用した。個別に絶縁シート



図4. DIIPM Ver.4のシリーズ展開

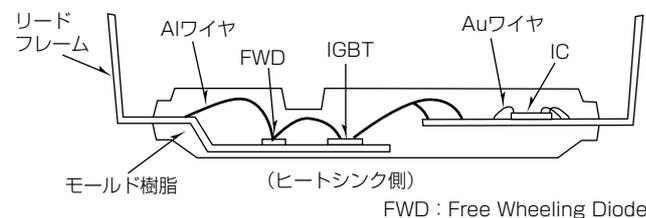


図5. 小型DIIPM Ver.3の断面構造

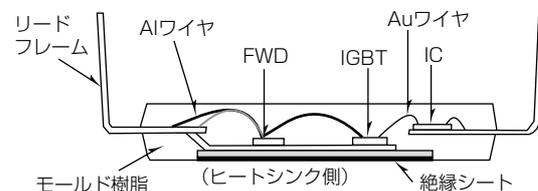


図6. DIIPM Ver.4シリーズの断面構造

を製作するため、モールド樹脂と比較してボイドの少ない、高品質の絶縁体を作りこむことができる。また、絶縁シートでは、フィラーの充填密度や材質を変更することで熱伝導率をコントロールすることが可能である。例えば、シリカやアルミナを主成分とすれば、 $2\sim 3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の熱伝導率が得られるはずであり、窒化ホウ素や窒化アルミニウムを用いれば更に高い熱伝導率が期待される。その結果、モジュールの熱抵抗値は大幅に低減できることがわかった。なお、絶縁シート中の樹脂の体積割合は、フィラーの高充填によって低くなっているが、製品使用時の熱応力は吸収可能であり、高い信頼性を持っていることが別途明らかになっている。

このように絶縁シートを用いたVer.4構造を採用することによって、超小型Ver.4は小型Ver.3に対して40%の小型化と30%の低熱抵抗化を実現している。

なお、この技術を適用したパッケージ群はすべて、鉛フリー化にも対応している。

また、絶縁シートを用いたトランスファーモールド構造のパワーモジュールは、その小型軽量、高信頼性の特徴を生かして、家電製品だけではなく、300A級の産業用途への展開もすでに行っている⁽⁷⁾。

4. インバータ実装への適用

パワーモジュールはエアコン、冷蔵庫など家電製品をはじめ、産業用インバータや電鉄・自動車用と幅広く用いられている。特に省エネルギーの観点で、インバータ駆動が幅広く用いられている。このような状況で、製品の小型化・高信頼化に合わせて、インバータ実装とパワーモジュールの最適設計を進めている。

IH(Induction Heating)インバータでは、従来のディスクリットIGBTに替えてDIPIPMを用い、また回路方式をハーフブリッジ方式からフルブリッジ方式に変更することで、損失を30%削減するとともに、実装面積も57%削減している。図7にDIPIPMを搭載したインバータ基板を示すが、このような最適化によって、オープンの横幅を広くし、かつ中央に配置したIHクッキングヒーターを実現している⁽⁸⁾。

また、太陽光発電用のパワーコンディショナではIGBTに替えてMOSFET(Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor)を用いた階調制御方式によって、変換効率を95.5%から97.5%に向上させている。この方式では多数のMOSFETを実装するパッケージング技術に課題があったが、新たに専用パワーモジュールを開発することによって、小型・高効率の階調制御方式パワーコンディショナを実現している。

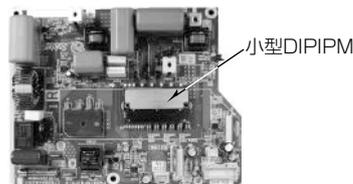


図7. DIPIPMを搭載したIHクッキングヒーター用インバータ基板

5. むすび

パワーデバイスの低損失化とパッケージング技術の革新によって、インバータ機器の高効率・小型化は飛躍的に進んできた。今後は、更なる低損失化に向けて、パワーデバイスの世代交代が進むとともに、次世代パワーデバイスとして期待されているSiCデバイスの実現によって、その流れは続いていくものと考えられる。また、これら環境負荷を大幅に低減可能な製品は、デバイスの進化に合わせたパッケージング技術やインバータ実装技術の全体的な最適設計によって、更に革新が進むものと考えられる。

参考文献

- (1) 片岡正行, ほか: 新デバイスで拓くパワーエレクトロニクス, 三菱電機技報, **81**, No.5, 308~312 (2007)
- (2) Takahashi, H., et al.: Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor(CSTBT) - A Novel Power Device for High Voltage Application -, Proc. of the 8th ISPSD (1996)
- (3) Takahashi, T., et al.: CSTBT™ (Ⅲ) as the next generation IGBT, Proc. of the 20th ISPSD (2008)
- (4) 長原輝明, ほか: DIP-IPM Ver.4シリーズ展開, 三菱電機技報, **81**, No.5, 349~352 (2007)
- (5) 佐野 耕, ほか: パワーモジュール用トランスファーモールド超小型パッケージの開発, Microjoining and Assembly Technology in Electronics, **14**, 327~330 (2008)
- (6) 菊池 巧, ほか: モールド型パワーモジュール用絶縁シート, 三菱電機技報, **81**, No.5, 365~368 (2007)
- (7) 中島 泰, ほか: リード接合を用いた大容量樹脂封止型パワーモジュール, Microjoining and Assembly Technology in Electronics, **11**, 433~436 (2005)
- (8) “トリプルリング加熱”による均一加熱を実現したビルトインIHクッキングヒーター, 三菱電機技報, **82**, No.1, 30 (2008)