

マジュムダール ゴーラブ* 西村隆司*

パワーモジュールの最新技術動向

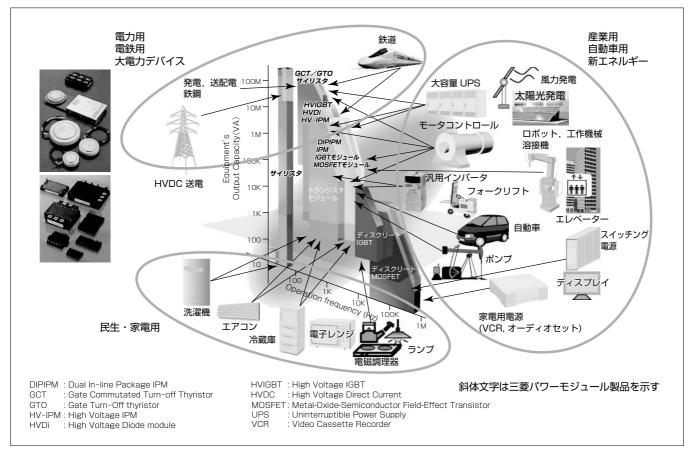
New Technical Trend of Power Modules

Gourab Majumdar, Takashi Nishimura

要旨

世界的な人口の急増,新興国の経済発展に伴い,エネル ギー需要は増加の一途をたどっている。エネルギー源の一 つである化石燃料については,将来の枯渇,供給不安定及 び価格高騰のリスクが依然として残っている。そこで、新 エネルギーと言われる風力・太陽光等の再生可能エネルギ ーに注目が集まっている。一方, エネルギーの効率的な運 用も重要になっている。これらのエネルギーは電力として 供給・消費されるのが最適の手段となっており幅広く利用 されている。これら電力エネルギーの有効利用については、 パワーエレクトロニクス (PE) 技術の発展が必要不可欠で ある(1)。

三菱電機では、パワーエレクトロニクスの装置だけでな く、装置の核となるパワーデバイスを市場に供給している。 特に複数素子を1パッケージに組み込んだIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール ⁽²⁾ 及び最適な保 護・駆動機能を含む周辺回路を取り込んだインテリジェン トパワーモジュール⁽³⁾ (Intelligent Power Module: IPM) の性能向上を進めている。これらパワーモジュールは, IGBTやダイオードの構造・プロセス設計だけでなく, 高 温化・高信頼性を追及したパッケージ技術も併せて重要な 技術要素を基に成り立っている。最近になり、IGBTやダ イオードの素材をSiからパワーデバイスにより適したSiC (Silicon Carbide) ウェーハを使用したMOSFET・SBD (Schottky Barrier Diode)の開発を進めており、損失の大 幅な低減・モジュールの小型化等パワーエレクトロニクス 機器の大幅な進化に寄与するものとして注目を集めている。

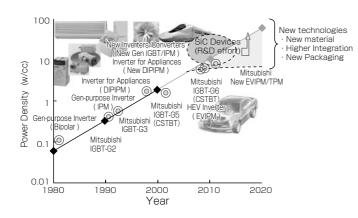


パワーデバイスの応用分野

パワーデバイスは、身の回りの身近な製品から産業分野まで様々な製品に使用されている。我々の日常生活には欠かせない存在でありその適 用範囲は、年々拡大している。

1. まえがき

昨今, 社会インフラを支えるエネルギー活用について注 目が集まってきている。パワーエレクトロニクス(PE)技 術及びパワーデバイスは、エネルギーを電力に変えて利用 するため中心的な役割を持つ存在である。我々は、エネル ギーを電力に変えて、その電力を様々な電気機器に用いて 豊かな社会を作り出している。エネルギーから電力を得る 電力変換機器や電力を用いた電気機器(パワーエレクトロ ニクス機器) は数十ワットから数十メガワットまでの幅広 い装置が存在しており、それぞれの容量に適したパワーデ バイスが開発されている。要旨の図に示すように大容量帯 では、GCT (Gate Commutated Turn-off Thyristor) 及び HVIGBT (High Voltage IGBT), 中容量帯ではIGBTモジ ユールやIPMが使用されており、最も小容量である家電製 品にはDIPIPM(Dual In-line Package IPM)が使用されて いる。このように幅広いアプリケーションに適した様々な パワーデバイスを当社は今日まで提供してきている。図1



CSBT : Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor
EVIPM : IPM for EV and/or HEV applications

TPM : Transfer-molded Power Module

HEV Inverter: Inverter systems for Hybrid Electric Vehicle

Equipment's Power Density = Pout (w) / Volume (cc)

図1.パワー密度の向上

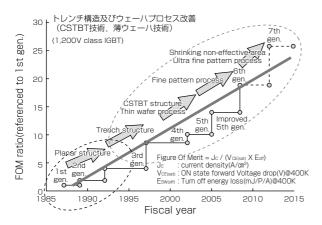


図2. IGBTのFOM改善

にIGBTモジュールの世代の進化に伴った装置の高密度化 推移を示す。

最新世代である第6世代IGBTモジュールでは装置のパワー密度が約7w/ccのレベルまで高密度化が進んでいる。図2には高性能化のキーとなる、IGBTのFOM(Figure of Merit)改善の推移を示す。更なるファインパターン技術を適用した第7世代IGBTの開発が進んでいる。

今後、Si系素子での特性改善とともにSiCを適用することで大幅な特性改善による更なる装置の高密度化が期待できる。また、チップの高性能化だけでなく、搭載パッケージでも高温化対応や高信頼性化技術の適用が求められる。

2. パワーチップの技術動向

図3に示すように、パワーデバイスの核となる、IGBT はプレーナ構造から始まり現在はトレンチ構造を適用している。さらに、縦方向の構造について、キャリア蓄積層 (Carrier Stored層)を導入することでキャリアの注入がより促進されるなどの特性の改善を進めている(4)。

図4にはウェーハ口径と薄ウェーハのトレンドを示す。ウェーハ材料は、第4世代まではエピタキシャルウェーハを使用していたが、第5世代以降は薄ウェーハ化のためにFZ(Floating Zone)ウェーハを用いて裏面コレクタ部をウェーハプロセスで形成している。ウェーハ口径も200mmを採用することで、ウェーハプロセスで最新装置の適用が可能となり微細加工の進展を図ることができる。現在開発中の第7世代IGBTでは更なるウェーハ構造の最適化に向けた加工技術を開発するとともに表面構造の更なる微細化及びキャリア蓄積層の最適化によって特性改善を進めている。薄ウェーハ化に向けた要素技術は、ウェーハを薄くする加工技術だけでなく、薄ウェーハの搬送・薄ウェーハのチッププロセス適用(反り・割れ対策など)・薄ウェーハのテスト技術が必要とされる。

ウェーハを薄くすることによる性能向上の効果を図5に示す。600V系IGBTでは厚さを1/2にすることでトレードオフ特性が35%向上する。

一方、ダイオードについては薄ウェーハ化に併せて適用を考えている裏面パターンニングを施したRFC⁽⁵⁾ (Relaxed Field of Cathode) 技術でキャリア濃度分布の適正化を実現させている。この構造の適用によって、ウェーハ厚を薄くしてもソフトリカバリー特性を確保することができる。

3. パワーモジュールの製品動向

図6は、パワーモジュールの機能の進化を示している。 IPMは更なるシステム化に向かって進んでいくことが考え られる。

図7には、パワーモジュールの最新パッケージ群を示す。 ケースタイプは大容量化、中小容量は従来のケースタイプ

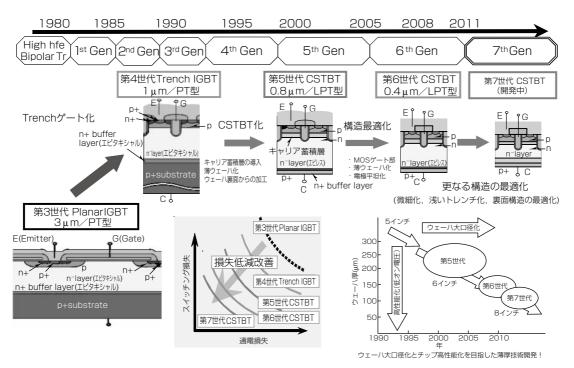


図3. IGBTチップ構造の変遷

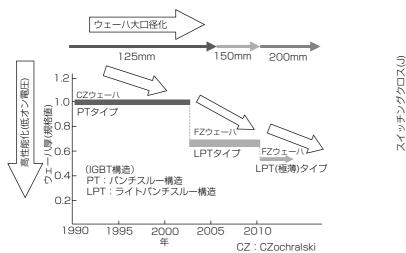


図4. 薄ウェーハ化のトレンド

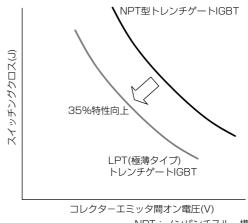
に加えトランスファモールド化が進んでいる。

今後、パッケージの高密度化・高温化・高信頼性に応え る技術としてトランスファモールド化が推進される。図8 にトランスファモールド化によるパワーサイクル耐量改善 につながる要因としてワイヤへの応力が軽減されているこ とを示す。

ワイヤが樹脂で固着化されていることでワイヤのエッジ 部の応力分布が低減されている。また、図9に示すように チップのはんだ部への応力もモールド化することで低減さ れることが確認されている。このようにモールド化は多く のメリットを与えてくれる。

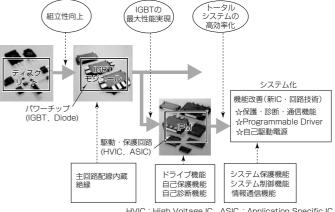
また、ボンディングワイヤを使用しないDLB(Direct Lead Bonding)技術も一部の製品に適用している。

一方, ケースタイプのモジュールは, 風力発電などの大



NPT: ノンパンチスルー構造

図5. 薄ウェーハ化による性能向上



HVIC: High Voltage IC. ASIC: Application Specific IC

図 6. パワーモジュールの高機能化

容量化に伴いNew-MPD (Mega Power Dual) に代表され るように、大型化を志向するとともに高信頼性化の実現の

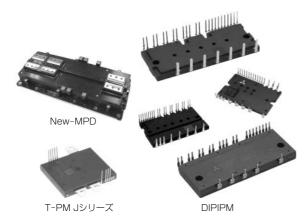


図7. パワーモジュールパッケージ

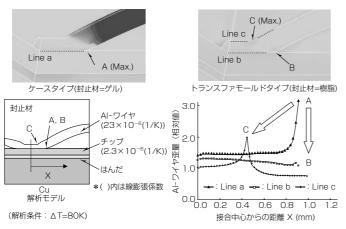


図8. トランスファモールド構造によるワイヤ応力低減効果

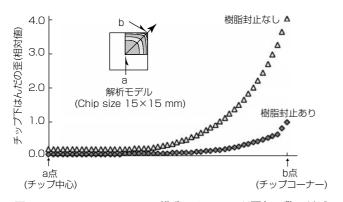


図9.トランスファモールド構造によるはんだ歪(ひず)み低減 効果(解析結果)

ための絶縁セラミックスを直接アルミニウムベースに接合 したベースを使用するなどの新規技術の導入も図っている。

機能の観点からは、IPM化によって、顧客の設計負担の軽減及び内蔵保護回路によってIGBTの特性を引き出すことができている。しかしながら、それぞれの顧客の設計自由度が少なくなる点の改善が必要であった。今後は顧客によるドライブ条件の設定ができること、動作診断・通信機能及び周辺回路の取り込みを図ることで更に使いやすい製品を目指していく。

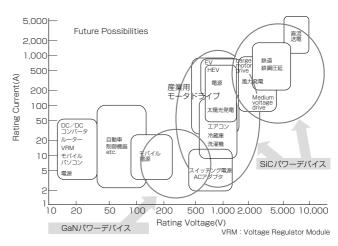


図10. SiCデバイス, GaNデバイスの応用範囲

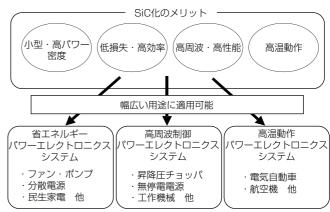


図11. SiCデバイスのメリットと適用可能システム

4. 新材料パワーデバイス

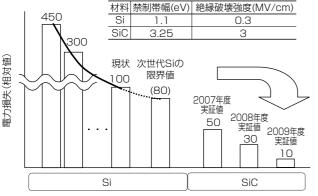
近年になり、パワーデバイスの特性を飛躍的に向上させる材料として、シリコンカーバイド(SiC)や窒化ガリウム (GaN)のようなワイドバンドギャップ材料が注目を集めている。

ワイドバンドギャップ材料は、高い絶縁破壊電界強度を持っているなどの特徴からパワーデバイスのような高耐圧のデバイスに適した材料と言える。図10、図11にSiCとGaNを使用したパワーデバイスの可能な応用範囲を示す。SiCは縦型構造が容易に実現できることから、従来のIGBTモジュールと同様に小容量のモータドライブ(家電)から鉄道までの幅広い装置に適用されていくと考える。具体的には、低オン電圧化・高速スイッチング・高温動作が可能となり、図12に示すように現行のIGBTに比べて電力損失が10%に低減される。また、電力損失の低減に伴い装置の小型化がいっそう進むことになる。

SiCデバイスは特性の大幅な向上が認められるが、その低オン抵抗のため、短絡時により多くの短絡電流が流れ、素子破壊のリスクが従来素子以上に高くなる。そこで当社が、IGBTモジュールで世界に先駆けて駆動・保護回路を内蔵したIPM構成をSiCでも実現することはデバイス特性

環境・エネルギー機器を革新するSiCパワーデバイス

- ◆大幅な低損失化、小型化(高パワー密度化)が可能
- ◆環境・エネルギー機器の圧倒的省エネルギー化が可能



2009年11月11日 三菱電機(株)広報発表資料から一部引用

図12. SiCデバイス電力損失推移

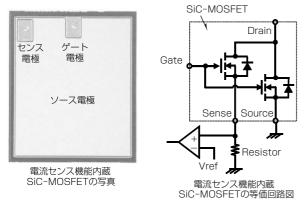


図13. 電流センス機能搭載SiC-MOSFET

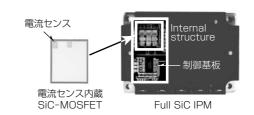
を最大限に引き出す上で有効な手段である。

図13にIPM化に必要な電流センス機能を内蔵したSiC – MOSFET (6) (7) のチップ写真と等価回路を示す。図14にはセンス機能付きのSiC - MOSFETを使用したIPMを示す。SiC - MOSFETの特性を引き出すことによって従来のIPM比で1/2のサイズを実現している。

また、高温対応が可能なパッケージ構造の開発も重要な技術となっており、接合材・封止材料の選定並びに組立て技術の革新が必要となっている。パワーデバイスは、今後、新材料を活用することで更なる進化が期待でき、エネルギーの有効活用に寄与し続けるものと考えられる。

5. む す び

エネルギーは、現在の人類の安定した生活に不可欠なものとなっている。しかしながら化石燃料は有限かつ局在していることから来る不安定性が付きまとっている。そこで、少しでもエネルギーを有効活用することが極めて重要になってきている。効率の良いエネルギー利用の観点から、パ



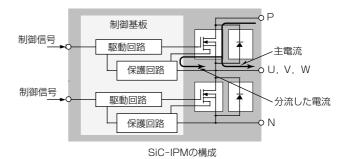


図14. SiC-MOSEFT搭載IPM

ワーエレクトロニクスに注目が集まっており、市場の拡大 とともにその装置のキーコンポーネントとなっているパワ ーデバイスも進化をしてきている。

今後、新エネルギー分野及び自動車分野での高い成長が 期待される。このように幅広い応用分野で使用されるパワ ーデバイスは、チップ・パッケージ・制御回路の集積化等、 幅広い技術を駆使することで今後の安定した社会の発展に 寄与していく。

参考文献

- (1) Kassakian, J. G., et al. (赤木泰文, ほか訳):パワーエレクトロニクス, 日刊工業新聞社 (1997)
- (2) Baliga, B.J.: Modern Power Devices, Wily-Interscience (1987)
- (3) Majumdar, G., et al.: A New Series of Smart Controlles, IEEE-IAS. 1989 Proceedings, 1356∼1362 (1989)
- (4) Takahashi, H., et al.: 600V CSTBT Having Ultra Low On-State Voltage, IEEE-ISPSD. June, 2001 Proceedings, 445~448 (2001)
- (5) Nakamura, K., et al.: Evaluation of Oscillatory Phenomena in Reverse Operation for High Voltage Diodes, Proc. ISPSD2009, 156~159 (2009)
- (6) Furukawa, A., et al.: Low on-resistance 1.2kV 4H SiC MOSFET integrated with current sensor, ISPSD2011, 288~291 (2011)
- (7) 古川彰彦, ほか:SiCパワーデバイス, 第75回半導 体・集積回路技術シンポジウム講演論文集, 47~50 (2011)