

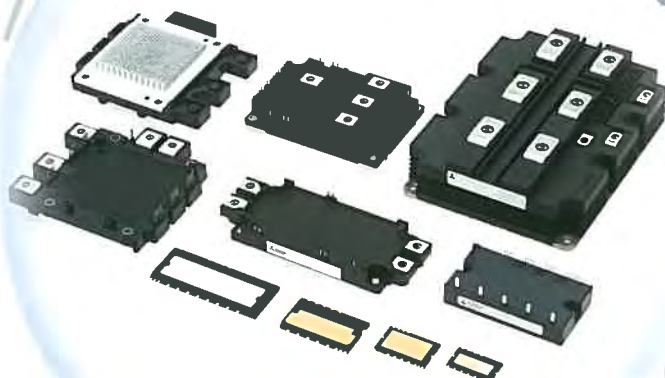
三菱電機技報

3

2018

Vol.92 No.3

パワーデバイス



目 次

特集「パワーデバイス」

2025年に向けて拡大するパワーデバイス市場 …… **巻頭言** 1
池山智也

パワーモジュールの最新動向と展望 …… **巻頭論文** 2
ゴラブ マジュムダール・山田順治

民生用RC-IGBTチップ技術 …… 7
高橋徹雄・吉田拓弥

高温動作パッケージ構造 …… 11
中原賢太・境 紀和・西川和康・山口義弘・内田清宏

エポキシ樹脂封止パッケージ技術 …… 15
原田啓行・井本裕児・近藤 聡・梶 勇輔・藤野純司

3.3kVフルSiCパワーモジュール …… 19
根岸 哲・津田 亮・長谷川 滋・井浦真一・山口博史

SLC技術と新PC-TIMによる熱ストレス低減 …… 23
増田晃一・大坪義貴・柳田智宏

産業用第7世代IGBTのCIBタイプ …… 27
大原孝太・江草 稔・小田敬雅

第7世代IPM“G1シリーズ”のラインアップ拡充 …… 31
青木伸親・米山 玲・塚本英樹

超小型フルSiC“DIPIPM” …… 35
渡部毅代登・古橋壮之・酒井伸次・谷岡寿一

車載用超小型“DIPIPM” …… 39
秦 浩公・池田直輝

自動車用三菱パワーモジュールの開発動向 …… 43
猪ノ口誠一郎

“DIPIPM+”によるインバータ設計最適化 …… 47
市村 徹

パワーデバイスの品質と信頼性を支える分析評価技術 …… 51
榎田豊次・阿部 剛・伊藤隆啓

Power Device

Power Device Market Expanding towards 2025
Tomoya Ikeyama

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology
Gourab Majumdar, Junji Yamada

RC-IGBT Chip Technology for White-goods Application
Tetsuo Takahashi, Takuya Yoshida

Package Structure for High Temperature Operation
Kenta Nakahara, Norikazu Sakai, Kazuyasu Nishikawa, Yoshihiro Yamaguchi, Kiyohiro Uchida

Packaging Technologies by Epoxy Resin Sealing
Hiroyuki Harada, Yuji Imoto, Satoshi Kondo, Yusuke Kaji, Junji Fujino

3.3kV Full SiC Power Module
Tetsu Negishi, Ryo Tsuda, Shigeru Hasegawa, Shinichi Iura, Hiroshi Yamaguchi

Relaxing Thermal Stress by SLC Technology and New PC-TIM
Koichi Masuda, Yoshitaka Otsubo, Tomohiro Hieda

CIB Type of 7th Generation IGBT Module for Industrial Use
Kota Ohara, Minoru Egusa, Takamasa Oda

Expanded Lineup of 7th Generation IPM “G1-Series”
Nobuchika Aoki, Rei Yoneyama, Hideki Tsukamoto

Super-mini Full SiC “DIPIPM”
Kiyoto Watabe, Masayuki Furuhashi, Shinji Sakai, Toshikazu Tanioka

Super Mini “DIPIPM” for Automobile
Hiroyuki Hata, Naoki Ikeda

Development Trend of Mitsubishi Power Module for Automobile
Seiichiro Inokuchi

Optimized Inverter Design by “DIPIPM+”
Toru Ichimura

Analysis and Evaluation Technologies for Quality and Reliability of Power Device
Toyotsugu Enokida, Takeshi Abe, Takahiro Ito

関連拠点紹介 …… 55

特許と新案

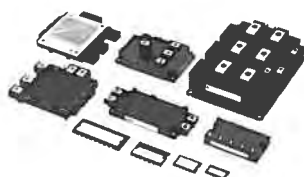
「電力用半導体装置」

「半導体製造装置および半導体製造方法」 …… 57

「パワーデバイス」 …… 58

スポットライト

3.3kVフルSiCパワーモジュール



表紙：パワーデバイス

三菱電機は、産業、家電、電力、電鉄、自動車、新エネルギー等、幅広いパワーエレクトロニクス製品に向けたパワーデバイスを提供している。内蔵される半導体チップは主力のSi(シリコン)に加え次世代チップであるSiC(シリコンカーバイド)のラインアップも充実している。

さらに、それら半導体チップを搭載するパッケージにも樹脂系の絶縁材や硬質樹脂封止、放熱フィン一体型形状など、最先端の技術を採用し、幅広い顧客からの要望に対応できる製品群を充実させている。表紙の写真は代表製品である。

巻／頭／言

2025年に向けて拡大するパワーデバイス市場

Power Device Market Expanding towards 2025

池山智也

Tomoya Ikeyama



環境規制、省エネルギー化の影響を受けてパワーデバイス市場は堅調に拡大を続けている。1999年のパワーデバイスの世界市場規模は57億ドルであったが、2015年は2倍以上となる148億ドルまで拡大しており、1999年から2015年までの年平均成長率は6.2%になる(矢野経済研究所推計)。これはWSTS(世界半導体市場統計)の世界半導体市場の年平均成長率(5.2%)を上回っており、パワーデバイス市場の牽引(けんいん)役が新規交代しながら高い成長率を維持してきたことがうかがえる。

最初にパワーデバイスを牽引してきたのがディスクリートのMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)である。携帯電話やパソコン、薄型テレビ、デジタル家電などの民生機器が需要の中心であり、2005年のパワーデバイスの世界市場に占めるMOSFETの割合は60%を超える。また、当時のメーカーシェアトップ10の中で8社がディスクリートの売上げが中心の企業であった。しかし、2008年のリーマンショックの影響によって搭載機器の低価格化が進み、MOSFETへのコストダウン要求が強くなった。特にパソコンや薄型テレビはその傾向が顕著であり、低コストを武器に中国などの新興パワーデバイスメーカーが台頭し、日系パワーデバイスメーカーの優位性は徐々に低下していった。

このような状況下で新しい牽引役を担ったのがパワーモジュールである。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールとIPM(Intelligent Power Module)が白物家電、太陽光・風力発電、サーボモータ、汎用インバータ、UPS(無停電電源装置)、電鉄などで使われており、2015年の市場全体に占めるパワーモジュールの割合は26%まで上昇している(2005年は10%前後)。メーカーシェアにも変動が起きており、パワーモジュールの売上比率の高いメーカーのシェアが拡大し、三菱電機は世界シェア2位に躍進している。今後についても産業用ロボットや工作機械、半導体製造装置などが堅調に推移し、サーボモータ向けIPMは伸長する。UPS向けIGBTモジュールはIoT市場の

拡大によって大規模データセンターの設備投資が活発化しており、特に北米やインド、中国市場での数量増が期待できる。白物家電も中国だけでなくインドや東南アジアが普及の中心となり、インバータエアコンや冷蔵庫向け小型IPMの需要が拡大する。このためパワーモジュールの世界市場規模は2015年の37億ドルから2020年には58億ドルに達し、出荷数量は1億2,500万個から2億1,000万個に拡大する。

さらに、2020年以降にクルマの電動化が急速に進展することが予想されるために、自動車向けパワーモジュールが新しい牽引役として注目される。これまで自動車についてはモータによる制御箇所が増加し、クルマ1台当たり搭載されるパワーデバイスの数は年々増加傾向にあった。現状はディスクリートのダイオードやMOSFETが中心であり、2015年の車載用パワーデバイスの世界市場規模は34億ドルであるが、2025年には世界的な低燃費・排ガス規制の影響を受けて96億ドルに成長すると予測される。既に欧州では厳しくなる燃費規制に対応するために車両の電動化が本格化しつつあり、中国でも2019年からNEV法(ニュー・エネルギー・ヴィークル規制法)実施を予定している。これらの影響から48VシステムやPHV(Plug-in Hybrid Vehicle)／EV(Electric Vehicle)の車種展開が世界の自動車メーカーで活発化し、それに伴って車載向けMOSFET、IGBTモジュールの需要が増加すると予想される。特にPHV／EVで搭載されているインバータ用IGBTモジュールについては日本のパワーデバイスメーカーがこれまでリードしており、耐環境性能向上や高放熱、小型化で必要とされるIGBTチップ、様々なモジュールの周辺技術を持っている。また、実用化が期待されているSiC(シリコンカーバイド)についても日本メーカーが着実に技術力を向上させている。このため、更なる新しいアプリケーションへの展開と堅調な拡大が見込まれるパワーデバイス市場で、日本のパワーデバイスメーカーの果たす役割は大きいと言える。

巻頭論文

パワーモジュールの 最新動向と展望



ゴラブ マジュームダール*



山田順治**

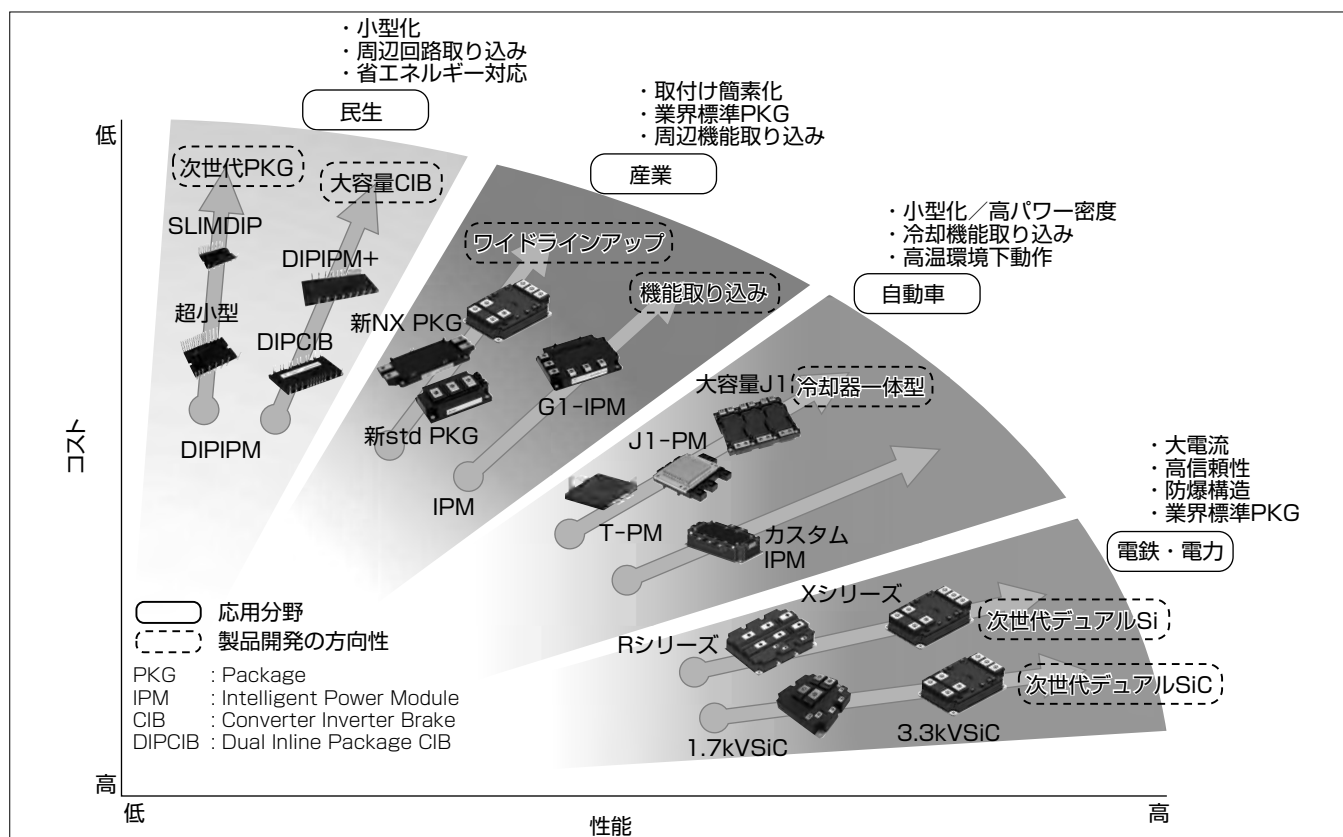
Latest Trend and Prospect of Power Module Technology

Gourab Majumdar, Junji Yamada

要 旨

地球温暖化対策として二酸化炭素の総排出量が規制され、化石燃料を燃焼している内燃機関や火力発電所そのものの転換が必要となってきた。ガソリン車から電気自動車へ、火力発電から再生可能エネルギー発電へ、産業の動力源が電気によるモータ駆動に移り変わってくると、電気を創る・送る・蓄める・使うにかかわる全ての工程で使用されるパワーエレクトロニクス(パワエレ)機器で更なる変換効率の改善が必要となってくる。パワーモジュールはこの機器の性能を左右する重要なキーデバイスとしてこれまで以上に、多様化する機器の要求に応える必要がある。三菱電機はシリコン(Si)半導体に加え、次世代半導体のシリコンカーバイド(SiC)素子をラインアップすることでより高いスイッチング周波数での駆動を可能にし、更に高い耐電圧素子の

の開発を進めることで市場からの電気的特性の要求に応えている。一方でパワーモジュールの耐環境性や寿命の向上には、チップを支えるパッケージ技術が重要になってくる。当社は樹脂ケースをシリコングル封止する従来タイプのパッケージに加え、モールドパッケージや樹脂封止パッケージを展開している。また、セラミック絶縁基板に加えて樹脂系の絶縁材の展開を図るなど、多様化する市場要求に応える要素技術を確立してきた。さらに、ユーザー要求の多様化に応える技術として、ユーザー側の設計や組立ての負荷軽減のための高機能技術やEMC(ElectroMagnetic Compatibility)の改善にも取り組んでいる。これらの要素技術を応用分野ごとに選択したバランス設計でコスト低減を図りながら、高性能、小型・軽量化を進めていく。



パワーモジュール製品の普及・拡大に向けた多様な製品群の開発トレンド

定格耐電圧が数百Vから数千V、定格電流が数Aから数千Aの大きな容量域をカバーするパワーモジュールは、民生、産業、自動車及び電鉄・電力などの応用機器に使用されている。応用分野の拡大に伴って、パワーモジュールへの要求が多様化しているが、高性能化技術と低コスト化技術を基盤技術として継続的に改良するとともに、用途に応じた技術の取捨選択を行って製品化を進めていく。

1. ま え が き

現在のパワーモジュールの主流はSi素材のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)で、絶え間ない性能向上によって、数Aから数千Aまでの電流量と、数百Vから数千Vまでの定格電圧を実現するに至っている。しかしながら、パワエレ機器の用途拡大と効率改善の必要性から、パワーモジュールに要求されるスペックも、低損失化、小型・軽量化、高密度化、長寿命化など多様化してきた。当社ではこれらの要求に応えるため、シリコン素材の第7世代チップ、SiCチップを中心とした最新チップ技術とモールドパッケージなどの最新パッケージ技術をバランス良く採用することで、用途に最適化したパワーモジュールを市場に提供している。

本稿では、バランス設計を推進している当社パワーモジュールの最新動向と展望について述べる。

2. パワーモジュール技術の最新動向

2.1 パワーチップ技術

現在、パワーモジュールに搭載される半導体チップの主流はSiベースのIGBTとダイオードである。当社は、2002年頃に電荷蓄積形トレンチゲートバイポーラトランジスタ“CSTBT”を第5世代IGBTとして市場に提供開始した。その後チップ表面加工の微細化技術によるゲート構造の最適化や、極薄ウェーハ技術による n^- 層厚さの最適化、さらにはチップ裏面のパターニング技術などを採用し、性能向上を行いながら常に最適な特性のチップを市場に提供してきた。最新の第7世代チップは一代前目の第6世代チップに対して約10%の特性改善を図りながら、ゲート抵抗による dv/dt 制御性を改善し、EMI(Electro Magnetic Interference)ノイズの低減やサージ電圧制御といった、ユーザーが使いやすい特性を目指してきた。

一方で、IGBTと逆並列に使用される還流ダイオード(Free Wheeling Diode : FWD)の順方向電圧(V_F)と逆回復損失(E_{rr})のトレードオフ改善も図っている。図1に従来品と最新の第7世代ダイオードの断面構造比較を示す。

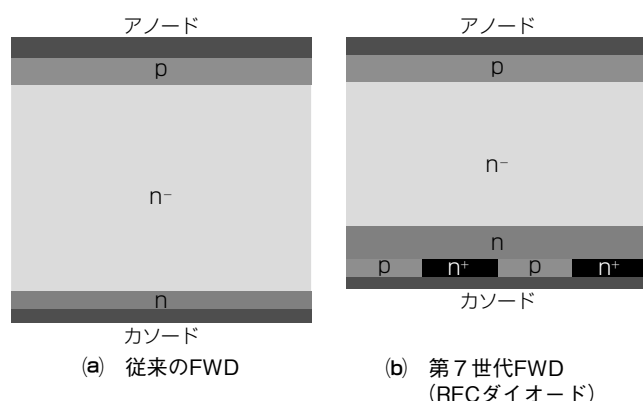


図1. 従来品とRFCダイオードの断面構造

第7世代ダイオードはRFC(Relaxed Field of Cathode)と呼ばれる特殊な裏面構造を持つ。一般的にダイオードチップの特性改善を目的に n^- 層厚を薄くする手法が用いられるが、 n^- 層を薄くすると逆回復時にリングングが発生しやすくなって薄厚化に限界があった。RFCダイオードは、部分的に設けたp層が逆回復時に適切な量のホールを n^- 層に注入することで、裏面近傍でのキャリアの急しゅんな消滅を抑制し、特に低電流時に発生しやすい逆回復時の電圧波形のリングングを抑制する。これによって第7世代ダイオードはリングングを抑制しながら特性改善を図っている。

更なる特性改善を求めて、WBG(Wide Band Gap)半導体のSiCを材料としたパワー半導体チップの開発を進めている。SiCはSiと比較して絶縁破壊電界が約10倍の大きな値を持つことが、パワーデバイスに用いた場合に本質的に有利に働く。これによってSiCを用いることで、Siでは実現困難な高耐圧領域まで、損失の低いユニポーラ形のトランジスタとダイオードを実現できる。SiCでは特にスイッチング動作時の損失の低減が顕著であり、Siを用いたバイポーラ形と比較し、1/10程度までスイッチング損失の低減が可能である。SiCによって高速動作、高周波動作を可能にするパワーチップを実現でき、様々なパワエレ機器の小型化・高性能化などに寄与する。

SiCを用いたトランジスタとして、耐圧600Vから3.3kVのMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)の開発に取り組んでおり、順次、製品への適用を進めている。現在、第2世代品として、MOSチャネル部の注入、JFET(Junction Field Effect Transistor)部の構造の改良を行ったMOSFETを開発中であり、更なる低損失化を進めている。

将来技術として、還流ダイオードに用いるSBD(Schottky Barrier Diode)をMOSFETに内蔵したSBD内蔵MOSFETの開発を進めている。図2にSBD内蔵MOSFETのMOSセル部の断面構造図を示す。MOSセルの内部にショット

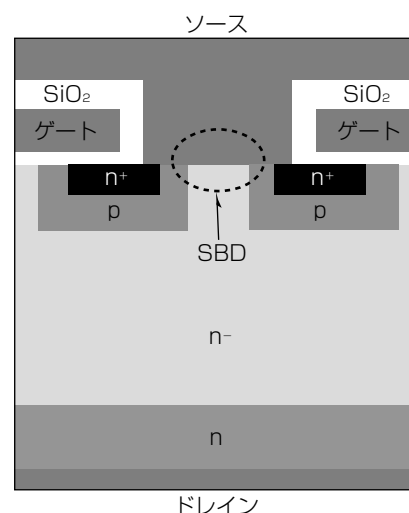


図2. SBD内蔵MOSFETの断面構造

キー電極を形成し、ソースからドレインへの逆方向の電流を、内蔵したSBDに通電できる構造を作り込んでいる。

SBDを内蔵することのメリットは、通常MOSFETに並列に接続される還流ダイオードを省略できることに加え、MOSFETのボディダイオードへの通電を抑制できることにもある。MOSFETのボディダイオードに通電した場合、バイポーラ動作によって生成したホール、電子が再結合することで結晶欠陥が拡張し、オン抵抗が増加するものが存在する。SBD内蔵MOSFETでは、ホールが注入されないため、結晶欠陥は拡張しないので劣化は生じない。実使用時の通電条件に応じて内蔵SBDの構造を適切に設計することによって、ボディダイオードの通電劣化を気にせず、安心して使えるMOSFETを実現できる。

2.2 パッケージ技術

SiベースのIGBTモジュールの $T_j(\max)=175^{\circ}\text{C}$ が一般的になり、さらにSiCチップによる高 T_j 化を見据えて、 $T_j>200^{\circ}\text{C}$ 達成のためのパッケージの各要素技術を述べる。

2.2.1 チップ接合技術

環境規制で鉛(Pb)の使用が規制されたことで、現在はスズ(Sn)合金材料のはんだが主に使用されている。 $T_j>200^{\circ}\text{C}$ 達成のための次世代チップ接合としてナノ銀パウダーに代表される微細金属パウダーによる金属焼結結合の採用が開始されている。一般的に金属焼結結合にはチップと絶縁基板とに挟まれた金属粉を高温・高圧にすることで結合させるためチップへのストレスが問題となる。当社ではチップへのストレス緩和策を講じるとともに、低圧力でも結合可能な金属焼結結合の開発を進めている。

2.2.2 ワイヤ配線技術

現在、パワーモジュールのワイヤ配線にはアルミニウム(Al)又はその合金ワイヤが使用されている。モジュールの小型化や $T_j>200^{\circ}\text{C}$ 達成のための次世代ワイヤ配線技術として一般的には銅(Cu)ワイヤの使用が提案されている。しかし、銅ワイヤをチップに接合させるにはチップ表面に銅やニッケル(Ni)など堅い金属を使用する必要がある。当社では、銅ワイヤをしのぐ通電能力と、寿命向上などを目的に銅リードを使用したDLB(Direct Lead Bonding)構造を一部のパワーモジュールに採用している。

2.2.3 放熱技術

パワーモジュールは一般的に放熱グリースなどを塗布してヒートシンクに搭載されるが、更なる冷却効率改善とパワーモジュールの長寿命化要求に応えるためパワーモジュールと放熱フィンを一体化した製品を量産化している。この構造では、絶縁基板下のはんだ層と放熱グリースの層を削減でき、放熱効果を向上させて高電力密度実装を実現している。

2.2.4 封止材料

一般的なパワーモジュールに封止材として使用される

シリコンゲルは高温環境では不安定になることがある。 $T_j>200^{\circ}\text{C}$ 達成のために、当社ではシリコンゲル封止に代わる、ダイレクトポッティング(DP)樹脂封止技術を確立した。DP樹脂は高温環境だけでなく、シリコンゲルが凝固する -50°C 以下の環境にも耐えることができる。さらに低気圧環境や腐食性ガスの浸入耐量など高い耐環境性も持ち合わせている。最新の自動車応用や産業応用のパワーモジュールには樹脂封止パッケージを主に採用しており、今後は更に大型の電鉄・電力応用のパワーモジュールへも展開していく。

3. 市場別の製品技術と展望

3.1 民生応用製品

民生用パワーモジュールの最大市場であるエアコン市場からは、国内の省エネルギー性能競争を目的とした高級エアコン用途とアジア市場を中心としたコスト優先の普及エアコン用途の両面の要求がある。当社は、高い変換効率が要求される高級エアコン用に、IGBTに比べて低電流動作時の損失を低減できるSJ(Super Junction)-MOSFETと低温暖房時など定格動作にも対応できるようにIGBTを並列接続したSJ-MOSFET内蔵DIIPMを量産化してきた。さらに、エアコンの省エネルギー指標であるAPF(年間エネルギー消費効率)で国内最高レベルの性能をもたらす技術として、SiC-MOSFETを内蔵したフルSiC DIIPMを製品化している。定格電圧600V、電流容量15Aの従来のSi IGBT搭載DIIPMとSiC MOSFET搭載DIIPMの損失比較を図3に示す。

一方、システムコスト低減が必要な普及エアコン用には、“SLIMDIPシリーズ”を量産化済みである。第7世代IGBT技術を活用したRC-IGBT(Reverse-Conducting IGBT: IGBTとFWDを同一チップ上に構成)を採用することで、従来の性能・機能を損なうことなく当社超小型DIIPMに対してパッケージ体積を30%小型化した(図4)⁽⁵⁾。

3.2 産業応用製品

産業用モジュールは、従来のケースタイプのモジュール

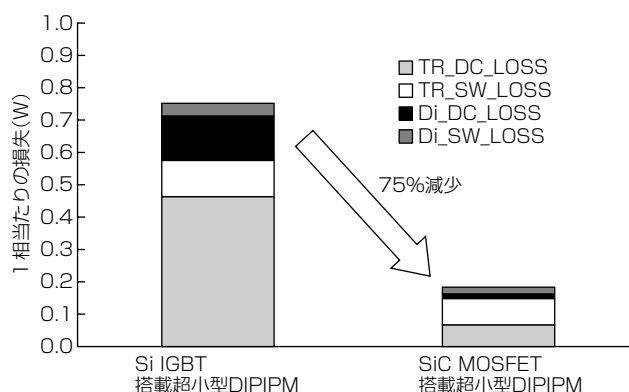


図3. DIIPMの損失比較

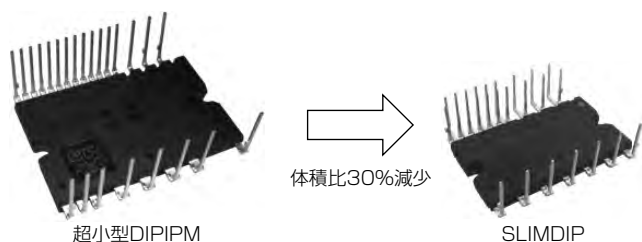


図4. 超小型DIIPMとSLIMDIP

を中心に製品展開を行っているが、近年、応用分野の広がりや分野別のモジュールへの要求が多様化し始めている。そこで当社では小容量産業機器向けに民生応用向けのDIIPMで培った技術を利用したトランスファーモールド外形の“DIIPM+シリーズ”を製品化した⁽⁶⁾。この製品はインバータシステムに必要となる三相コンバータ、インバータ、ブレーキ回路及びゲート駆動IC、各種保護回路を内蔵したオールインワンタイプのDIIPMである。各種機能を内蔵することによる小型化だけでなく、最適な端子配置によってパターン設計がしやすく基板サイズの削減も行うことでインバータシステムをコンパクトに構成でき、システムコスト低減が可能となる。図5にDIIPM+の代表的な配線接続例を示す。

中・大容量領域では、リーマンショック以降、BCP (Business Continuity Plan)対策として複数社購買が可能なパッケージ互換性が重要視されている。この市場要求に応えながら“使いやすさ”をキーワードに封止構造、絶縁構造を刷新し、SLC(SoLid Cover)技術を採用した第7世代IGBT モジュール“NXシリーズ”を開発した。SLC技術とは封止材として従来使用していたシリコンゲルをエポキシ系樹脂に変更し、構成部材の熱膨張率を均一化することで、温度変化に伴うパワーモジュールの反(そ)り量を抑制する技術である。このSLC技術と樹脂絶縁銅ベース板を組み合わせることで大幅な温度サイクルの長寿命化を実現した。図6に従来構造とSLC構造の比較を示す。また、図7に従来構造とSLC構造との温度サイクル(条件：-40~125℃：各1時間保持)耐量比較を示す。

さらに、温度変化に伴うパワーモジュールの反り量の变化が小さいため、ポンピングアウト現象(ヒートシンクに塗布された放熱グリースが外部に押し出される現象)の軽減にも効果がある。図8に温度変化でのベース板の形状変化比較を示す。

IPM(Intelligent Power Module)でも同様にSLC技術を採用した“G1シリーズ”を開発した。新たに駆動速度切替え機能を搭載し、ノイズ源となり得る低電流領域では駆動速度を抑え、効率(=発生損失)に影響する中・大電流領域では高速駆動させることで、今まで背反事項であったノイズ低減と損失低減の両立でユーザーの使いやすさを追求した。

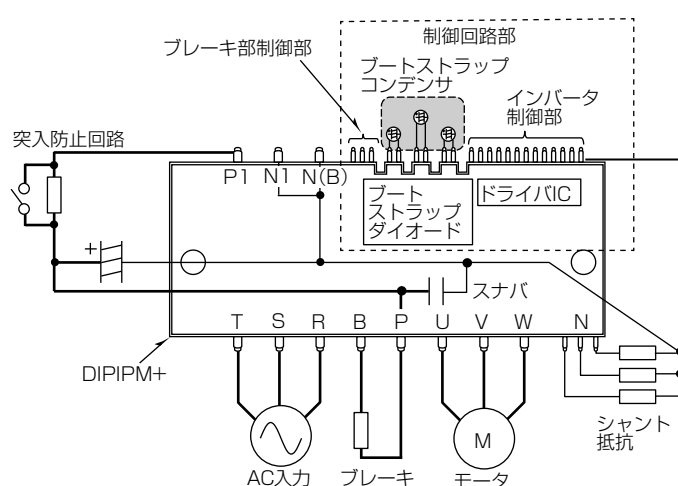


図5. DIIPM+使用時の配線接続例

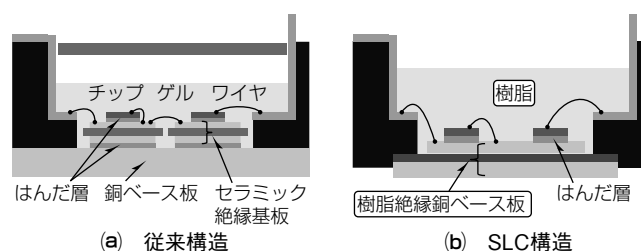


図6. 内部構造の比較

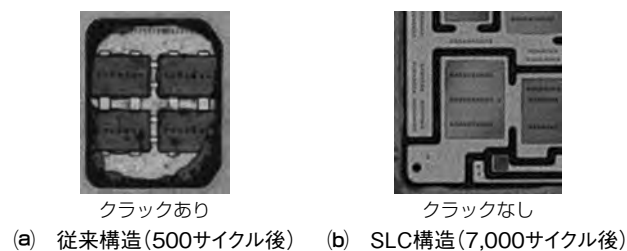


図7. 温度サイクル耐量比較

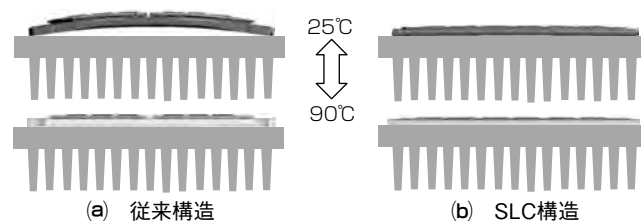


図8. ベース板の形状変化比較

3.3 自動車応用製品

自動車市場へは当初はケースタイプと呼ばれるパッケージ形状のIPMが主流であったが、移動体の宿命でもある小さく・軽く・力強くとの市場要求からパワーモジュールの小型化・高パワー密度化を進めてきた。小型化要求に対してトランスファーモールド技術を採用した長寿命のパワーモジュール“T-PMシリーズ”を市場に提案した。さらに小型化に加えて高パワー密度化に応えるため、アルミニウム放熱フィンをパワーモジュールのベース板と一体化

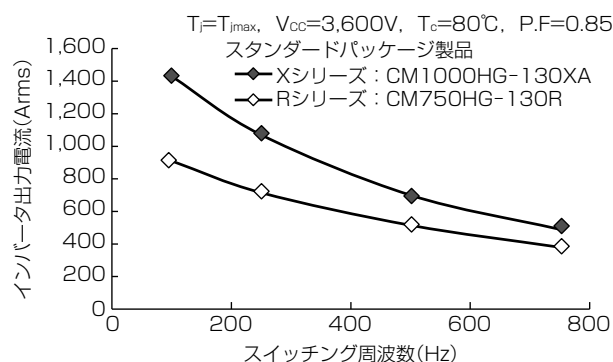


図9. インバータ出力電流比較



図10. 3.3kV LV100タイプ

した“J1シリーズ”を製品化した。J1シリーズには専用の水冷ジャケットやコントロール基板、スナバコンデンサなどを準備し、ユーザーの設計サポートも充実させている。市場からの更なる出力向上要求に応えるため、出力電流を拡大させた“大容量J1シリーズ”も追加してラインアップし、さらにSiCチップ化も含めてパワーモジュールの小型化・高パワー密度化を進めていく。

3.4 電鉄・電力応用製品

高耐電圧製品として、これまで3.3kV/1,500Aや6.5kV/750Aの“Rシリーズ”をラインアップして大容量システムに展開してきた。電鉄市場及び洋上風力発電や国際連携直流送電市場からの要求である、更なる大容量化、パッケージの互換性、並列使用の容易性に応えるため、当社では、従来パッケージと互換性を持った“Xシリーズ・スタンダードタイプ”と並列接続が容易となる“Xシリーズ・LV100タイプ”を開発した。第7世代IGBTチップ技術とRFCダイオードを採用し、定格電流を従来比で20～30%増加させた。また、LNFLR(Linearly-Narrowed Field Limiting Ring)技術によってチップの導通領域を拡大させて熱抵抗の大幅低減も実現した。さらに、動作温度 T_{jop} を125℃から150℃に拡大したことでインバータ出力電流

をRシリーズに比べて50%増加(@200Hz動作時)させることができた。図9に同じパッケージサイズの6.5kV XシリーズとRシリーズのインバータ出力電流比較を示す。

一方、LV100タイプはスタンダードタイプと同じ第7世代チップを採用することで損失低減を図り、2 in 1のハーフブリッジ構造とすることでパッケージ内部インダクタンスを低減した。また、主端子及び補助端子配置を最適化することによって並列接続を容易にした。図10に3.3kV LV100タイプの製品を示す。今回開発した3.3kV/600A製品は、業界最大^(注1)のパワー密度によってインバータの高出力・小型化を実現した。並列接続することで多様な容量のインバータ構成が可能になる。

(注1) 2017年12月1日現在、当社調べ

4. む す び

当社はSi素材の第7世代チップ、SiCチップを中心とした最新チップ技術とモールドや樹脂封止などの最新パッケージ技術を組み合わせることで、パワーエレクトロニクス市場のどのような要求にも対応できるバランス設計を進めている。タイムリーに製品を市場に展開することで、低炭素社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) パワーデバイス, 三菱電機技報, **90**, No.5 (2016)
- (2) 人と社会を支えるパワーエレクトロニクス, 三菱電機技報, **91**, No.7 (2017)
- (3) Hino, S., et al.: Demonstration of SiC-MOSFET Embedding Schottky Barrier Diode for Inactivation of Parasitic Body Diode, Materials Science Forum, **897**, 477~482 (2017)
- (4) Ohara, K., et al.: A New IGBT Module with insulated Metal Baseplate(IMB) and 7th Generation Chips, PCIM Europe 2015, 1145~1148 (2015)
- (5) Shibata, S., et al.: New Transfer-Molded SLIMDIP for white goods using thin RC-IGBT with a CSTBTM structure, PCIM Europe 2015, 1149~1154 (2015)
- (6) Yamaguchi, K., et al.: A New Version Transfer Mold-Type DIPIPMs with built-in Converter and Brake function, PCIM Asia 2015, 272~276 (2015)

民生用RC-IGBTチップ技術

高橋徹雄*

吉田拓弥**

RC-IGBT Chip Technology for White-goods Application

Tetsuo Takahashi, Takuya Yoshida

要 旨

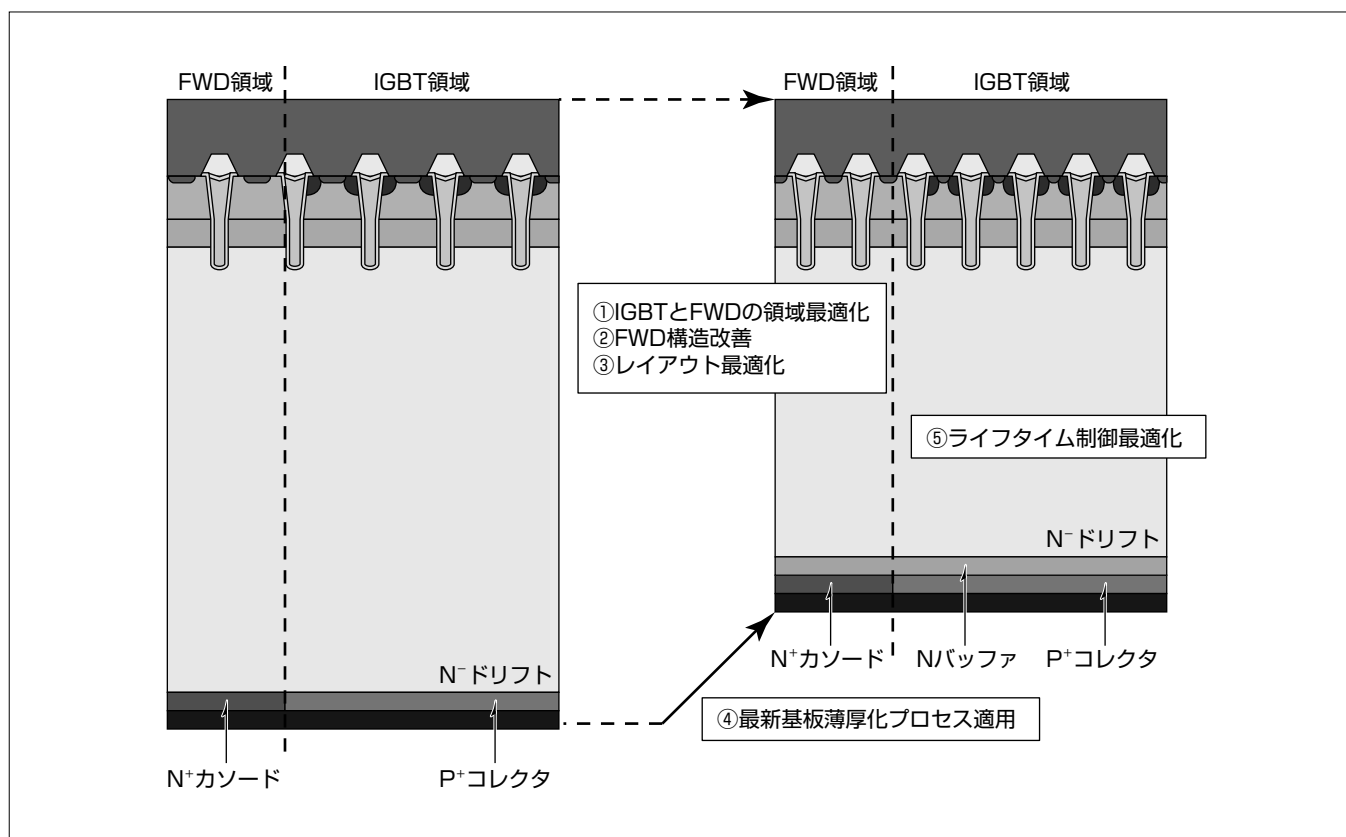
世界的な地球環境保護への意識の高まりから、省エネルギー化のキーとなるパワーデバイスの低損失化が、自動車向け、産業向け用途等、様々な分野で急速に進んでいる。

エアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電に使用される民生用パワーデバイスにも同様に低損失化が求められており、加えて小型化に対しても強い要求がある。

三菱電機では民生用のパワーデバイスとしてDIPIPMを製品化しており、2013年には“超小型DIPIPM Ver. 6”を展開し、アジア市場を中心に多くのインバータ機器に採用されてきた。2015年には欧米の低容量市場をターゲットに、さらにパッケージサイズを30%低減させた“SLIMDIPシリーズ”の製品をリリースしている。

このSLIMDIPシリーズにはパッケージの小型化のため、三菱電機の第2世代RC-IGBT(Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用している。RC-IGBTはIGBTとFWD(Free Wheeling Diode)を一つのチップ上に形成したもので、従来のIGBTとFWDを独立に配置していた構造に対し、フレーム上に占めるチップ面積を大幅に低減することができる。

第2世代RC-IGBTでは三菱電機独自のIGBTの基板薄厚化技術の適用に加え、FWD特性の改善構造と熱抵抗低減を考慮したレイアウト設計によって、前世代に対して約1/3の損失、チップサイズで約1/2を実現した。



第2世代RC-IGBTの構造と特長

第2世代RC-IGBTは三菱電機の7世代薄厚IGBTをベースにした構造であり、用途に合わせて、①IGBTとFWDの領域を最適化するとともに、②FWD構造を改善し、③IGBTとFWDのレイアウトを見直すことでFWD部分の損失特性改善と放熱性を改善している。さらに、④最新の基板薄厚化技術の適用と、⑤ライフタイム制御の最適化を行うことで、総合的な損失特性の改善とコストのバランスの改善を図っている。

1. ま え が き

今日、パワーデバイスは産業用機器、電気自動車、及び、エアコン、冷蔵庫などの民生用機器など様々な機器に用いられており、省エネルギー化の流れからさらに裾野に広がりを見せている。現在の主力パワーデバイスの多くにはIGBTとFWDが搭載されており、数A～数千A、数百Vから数千Vまで様々な電流・電圧定格を実現し、さらに高性能化が進んでいる。

この高性能化の流れの一つの方向に、IGBTとFWDを一つの構造に統合したRC-IGBTがある。

RC-IGBTは電流の流れる向きが異なるIGBTとFWDの両方の性能を同時に満たす必要があり、技術上のハードルが高いデバイスであるが、反面、チップサイズを低減できるので、最新のパワーモジュールの小型化・省エネルギー化のキーデバイスとなっている。

本稿では、三菱電機の最新の技術を用いて大幅に特性を改善した民生用の第2世代RC-IGBTについて述べる⁽¹⁾。

2. 民生用RC-IGBTの構造と技術

2.1 RC-IGBTの基本構造

RC-IGBTは先に述べたとおり、IGBTとFWDを一つのチップ上に形成した構造を持つ。IGBTの領域では、表面にMOS(Metal Oxide Semiconductor)ゲート構造が形成され、裏面部分にp型のコレクタ層が形成されている。FWDの領域では表面部分にp型のアノード層が、裏面部分にn⁺カソード層が形成されている。この二つの領域が動作のタイミングによってIGBT又はFWDの動作を行うことで、従来は2チップ必要であった機能を1チップで実現している。

反面、技術的なハードルとしてIGBTとFWDの特性を別々に設計・最適化することが難しく、個別の性能をそれぞれ追求するとコストが急激に増大する。

次節では、性能向上とコスト増大抑制を両立させるために民生用RC-IGBTに適用した技術について述べる。

2.2 RC-IGBTの構造と技術

表1に最新の第2世代RC-IGBTに適用した技術を示す。

2.2.1 FWD領域面積比率の最適化

第一の技術項目のFWD領域の面積比率は、IGBTとFWDのそれぞれの動作時の損失に影響する最も重要なパラメー

タの一つである。図1は一例として順電圧降下(V_F)と逆回復電流(I_{rr})のFWD面積比率依存性を示したものである。

図1のとおり V_F と I_{rr} はトレードオフ関係にあり、同時に低減できないことを示しており、この他にも複数の特性がトレードオフの関係になっている。このため、アプリケーションに合わせて総合的な損失が最小になるような面積比率の最適化が必要であり、FWD比率を低めに設定している。

2.2.2 FWD構造の見直し

一般にFWD構造は先に述べたように順電圧降下特性と逆回復(リカバリー)特性を考慮して最適化する必要がある。第2世代RC-IGBTでは構造的にはアノード接合部分で高濃度部分の影響を避けるとともに、一部に電流集中しないようにして逆回復電流を増加させない工夫を行っている。さらに、順電圧降下が急激に増大することを避ける工夫もしており、FWDの特性を向上させている。

2.2.3 IGBTとFWDのレイアウト改善

動作時のチップの温度上昇が大きいと、放熱性やパワーサイクルなどの耐量の面から使用できる電流・電圧範囲が狭くなる。このため、できる限りチップの内部で熱を分散させるレイアウトを適用した。図2はIGBTとFWDのレイアウトのイメージ図である。面積比率が比較的小さく、

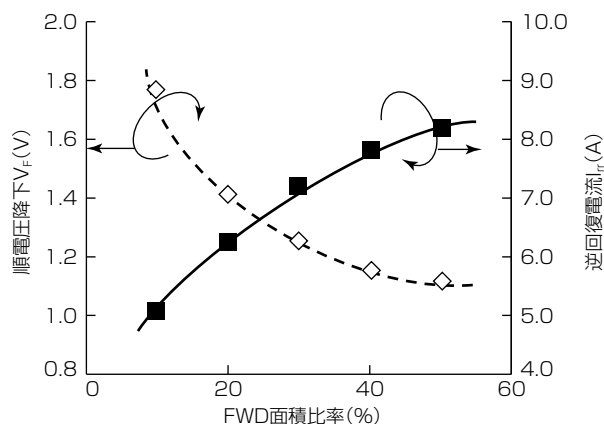


図1. V_F と I_{rr} のFWD面積比率依存性

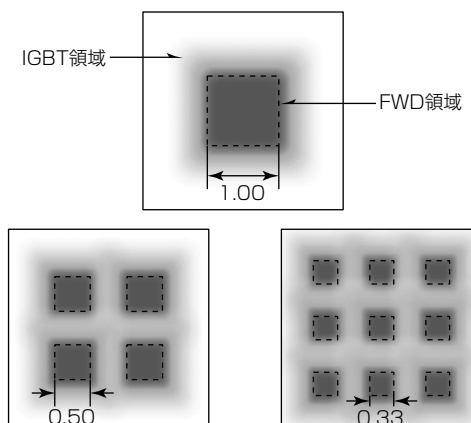


図2. IGBTとFWDのレイアウトイメージ図

表1. 第2世代RC-IGBTの適用技術

適用技術	目的
FWD領域面積比率の最適化	低損失化
FWD構造の見直し	V_F -リカバリーのトレードオフを改善
IGBTとFWDのレイアウト改善	FWD放熱最適化
ウェーハ厚みの薄厚化	7世代プロセスを用い損失を改善
ライフタイム制御なしの製造方法 (アプリケーションによって選択)	特性ばらつき改善とコスト削減

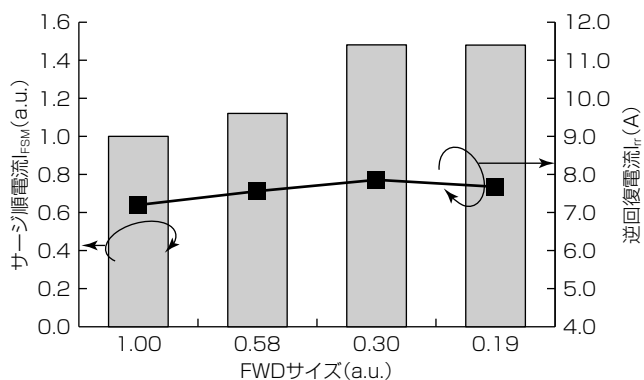


図3. I_{rr} と I_{FSM} のレイアウト依存性

電流集中するFWD領域を細かく分割する設計にすることで、周辺のIGBT部分に熱が分散されやすくなり、FWDの局所的な温度上昇を緩和することができる。

ただし、FWDの領域を細かくすることで逆にFWDのI-V特性のスナップバック発生など悪化する特性も存在するため、最終的にバランスを取ったレイアウト設計をしている。図3はFWD面積比率を等しくした構造で、FWDのサイズと逆回復電流(I_{rr})とサージ順電流(I_{FSM})の依存性を表したものである。図3からサイズを最適化することで損失に影響する I_{rr} には大きな影響を与えずに、FWDの通電能力の指標である I_{FSM} を大幅に改善できることが分かる。

FWD領域の最適な分割によって、第2世代のRC-IGBTではFWDの放熱性が大きく改善している。

2.2.4 ウェーハ厚みの薄厚化

ウェーハ厚みの薄厚化によって素子の総合的な損失を最小化する。三菱電機ではウェーハを極薄に加工する7世代IGBTプロセスを用いた“CSTBT⁽²⁾”を民生用の超小型DIPIPM Ver. 6に適用しており、民生用RC-IGBTにもこの技術を適用している。これによって、大幅に特性を改善している。

2.2.5 ライフタイム制御なしの製造方法

ライフタイム制御を行わない製造方法を適用できるようにし、コスト削減とばらつき低減を図った。総合的な特性改善によってキャリア周波数の広い範囲でライフタイム制御なしの構造を適用しており、高速寄りの部分をライフタイム制御ありの構造を投入することで、様々な民生用途に対応している。

3. 民生用RC-IGBTの特性

3.1 チップ特性

次に、先に述べた新構造を適用した第2世代600V RC-IGBTの特性について述べる。第2世代RC-IGBTは前世代の構造に対して、大幅に特性を改善している。

図4は同一電流密度で比較したIGBT動作時のコレクター-エミッタ間飽和電圧(V_{CEsat})とターンオフ損失(E_{off})のトレードオフ特性について示したものである。三菱電機

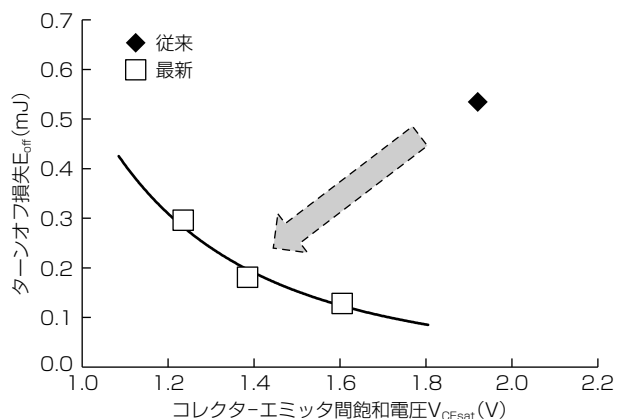


図4. V_{CEsat} - E_{off} トレードオフ(電流密度固定)

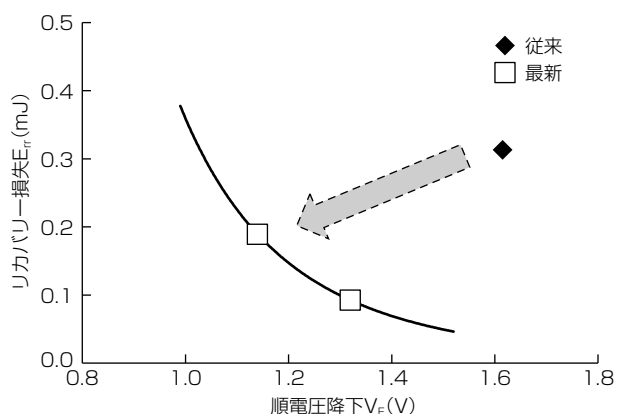


図5. V_F - E_{rr} トレードオフ(電流密度固定)

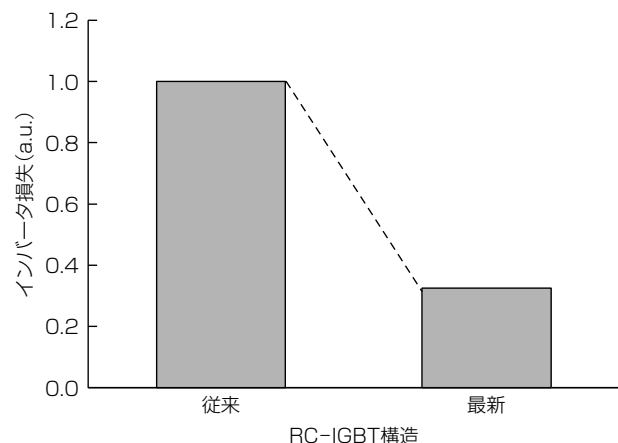


図6. インバータ損失比較(有効面積で規格化)

の前世代RC-IGBT⁽³⁾と比較して、 V_{CEsat} は0.54V、 E_{off} は0.35mJ低減することに成功している。

図5は同一電流密度で比較したFWD動作時の順電圧降下(V_F)と、リカバリー損失(E_{rr})のトレードオフ関係について示したものである。FWD特性に関しては、 V_F は0.48V低下、 E_{rr} は0.12mJ低減している。

図6は総合的な損失低減の指標として、チップの有効面積で規格化した製品のインバータ損失($T_j=125^\circ\text{C}$, $f_c=5\text{kHz}$)を比較した図である。従来の構造と比較して、最新の構造では約1/3に低減している。

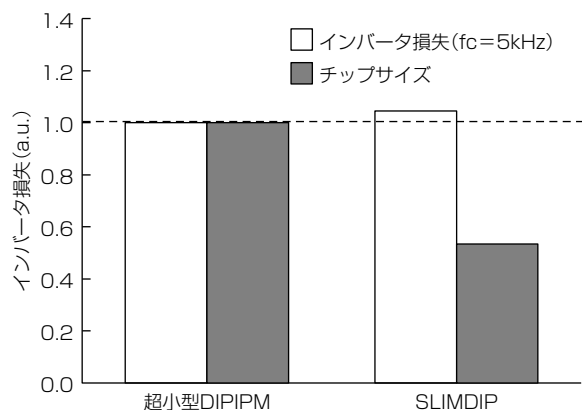
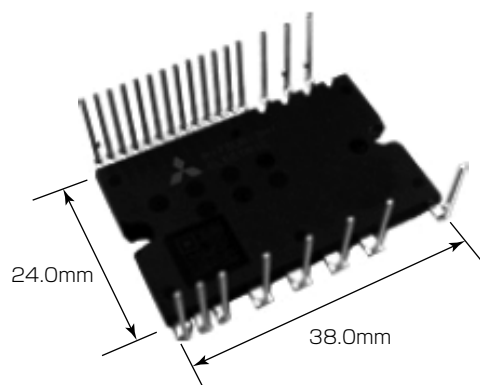
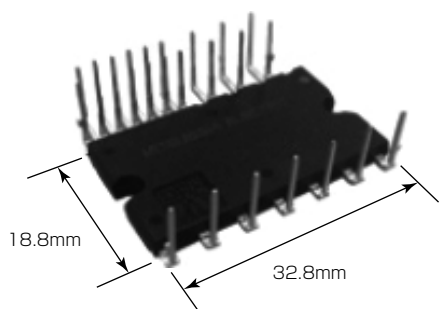
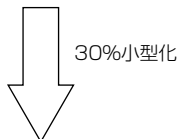


図7. DIIPMの損失とチップ面積比率比較



(a) 超小型DIIPM



(b) SLIMDIP

図8. 超小型DIIPMとSLIMDIPの外形比較

3.2 製品特性

先に述べたとおり、第2世代RC-IGBTでは特性を大幅に改善しており、これを搭載した“SLIMDIPシリーズ”でもモジュールサイズの大幅なシュリンクを実現している⁽⁴⁾。

図7はIGBTとFWDを別々に搭載した超小型DIIPMと同電流定格のSLIMDIPそれぞれのインバータ損失比 ($T_j = 125^\circ\text{C}$, $f_c = 5\text{ kHz}$)と、搭載されているチップが占める面積比を示す。SLIMDIPシリーズは低～中速域では超小型DIIPMシリーズの製品と同程度のインバータ損失を実現しているが、モジュール内でチップが占める領域は超小型DIIPMに比較して、約半分にまで縮小している。これによって、パワーモジュールとしては約30%の小型化を実現している(図8)。

4. む す び

三菱電機で民生用途として開発した600V RC-IGBTは、前世代に比べて損失で約1/3、チップサイズで約1/2へのシュリンクを実現し、これによってパッケージを30%小型化したSLIMDIPの製品化を実現した。

現在、この技術を耐圧クラスや用途の異なる製品に適用することを検討するとともに、さらに特性を改善させた第3世代RC-IGBTを開発中である。

これらの技術開発と製品化によって、パワーエレクトロニクスの発展と省エネルギー社会の実現に貢献する。

参 考 文 献

- (1) Yoshida, T., et al.: The second-generation 600V RC-IGBT with optimized FWD, IEEE. ISPSD, 159~162 (2016)
- (2) 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)
- (3) 高橋英樹, ほか: モータ制御用RC-IGBT, 三菱電機技報, **81**, No.5, 313~316 (2007)
- (4) 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)

高温動作パッケージ構造

中原賢太* 山口義弘*
境 紀和* 内田清宏*
西川和康*

Package Structure for High Temperature Operation

Kenta Nakahara, Norikazu Sakai, Kazuyasu Nishikawa, Yoshihiro Yamaguchi, Kiyohiro Uchida

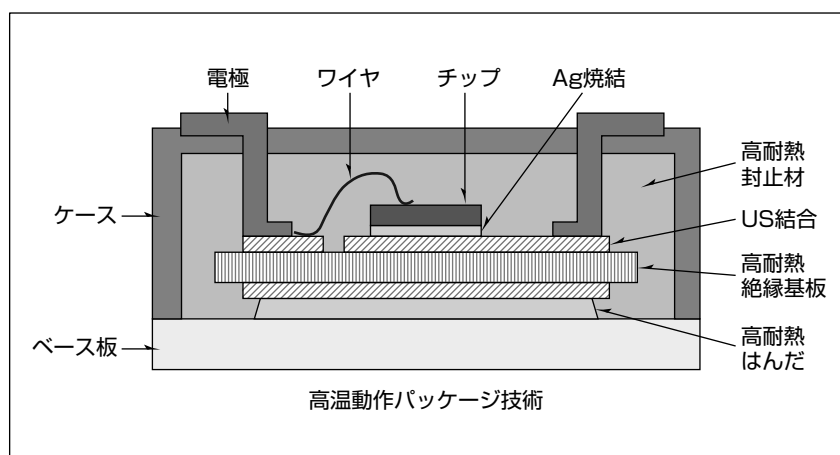
要 旨

近年、環境保護と省エネルギー社会の実現に向け、電気エネルギーを効率よく変換するパワーエレクトロニクスは民生、産業、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電など様々な分野へと適用範囲が拡大している。その中でも主要部品であるパワーモジュールに対して、小型化と高パワー密度が要求されており、それらを実現するため、高温動作が可能となるパッケージ材料、及び構造開発が必要となっている。

三菱電機では、チップの動作温度(T_{jop})が 175°C 以上対応とする製品を開発するため、材料、構造及びその要素技術開発によって高耐熱化をすることで、パッケージの高品質・高信頼性を実現した。

高温動作対応とするパッケージ要素技術として、Ag(銀)焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US(超音波)接合技術があり、これらの技術の評価・検討として、 $-40\sim 175^{\circ}\text{C}$ の温度変化を与える温度サイクルでの信頼性試験を行うことで、品質や寿命を確認した。その結果、600サイクル後でも材料や接合部に亀裂なども見られず良好な状態であり、高温動作対応が可能であると実証できた。

また高温動作対応の技術をInfineon社製品とパッケージの互換性がある新規パッケージに適用して製品化を進めている。



高温動作対応新規パッケージ
(Infineon社製品互換パッケージ)

高温動作対応パワーモジュール

高温動作対応パワーモジュールに適用している断面構造とパッケージ外観を示す。従来のパワーモジュールに対して使用している部材の耐熱性向上やプロセスの改善を行うことで高温度サイクルでの品質の向上と寿命改善を実施した。その結果チップの動作温度(T_{jop})が 175°C 以上に対応する製品の開発が可能となった。

1. ま え が き

近年、環境保護と省エネルギー社会の実現に向け、電気エネルギーを効率よく変換するパワーエレクトロニクスは民生、産業、電鉄、自動車、太陽光発電、風力発電など様々な分野へ適用範囲が拡大している。パワーモジュールは中でも電流制御を行う重要な役割を持つため、動作時の損失低減・パッケージの小型化・高パワー密度などが要求されている。そのため、SiC(シリコンカーバイド)は次世代のパワーデバイスとして期待され、従来のSi(シリコン)に対して高速動作が可能かつ低損失という特長があり、特性を飛躍的に向上させることができる。またSiCは高温動作が可能のため、パッケージを小型化することで、パワーモジュールと搭載するユニットの小型化が可能になる⁽¹⁾⁽²⁾。

パワーモジュールの高温動作には、チップだけでなく、接合・配線・封止等の各パッケージ材料の選定とパッケージ技術の開発が必要であり、信頼性の向上と寿命の改善が課題となっている。

当社ではパッケージ開発の中で、接合材・封止材等の各部材の耐熱性向上やプロセスの開発によって、特に温度サイクルに対する接合部の信頼性、接合寿命の向上を行うことで、高品質・高信頼性を実現させた。そしてそれらの技術を適用して、チップの動作温度(T_{jop})が 175°C 以上に対応可能とする高温動作対応パッケージの開発を行った。

2. 高温動作パッケージ構造

今回新しく開発したパワーモジュールのパッケージ外観を図1に、主要構造の模式図を図2に示す。 175°C 以上での高温動作を想定した新規パッケージの構造として、ベース板上に高耐熱絶縁基板が高耐熱はんだで接合され、絶縁基板上にはチップがAg焼結技術によって接合されている。チップ上面電極と絶縁基板上の基板パターン間はAl(アルミニウム)等のワイヤで配線接続され、外部と電氣的接続を行う電極が絶縁基板上の基板パターンにUS接合されている。ベース板には全体を覆うケースが勘合され、内部に



図1. 新規パッケージ

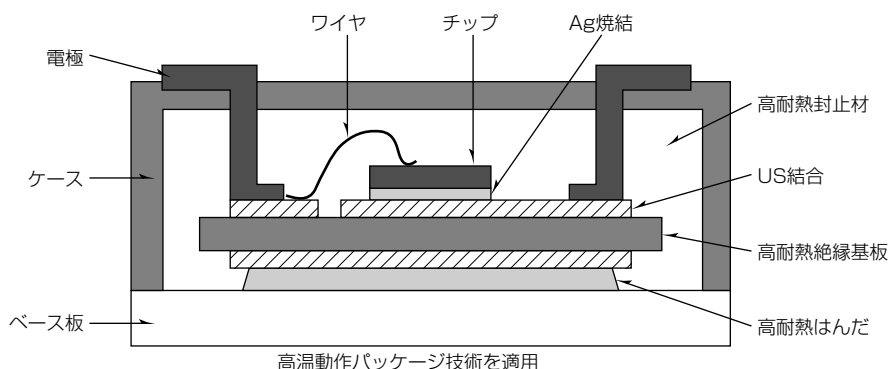


図2. 新規パッケージの主要構造

は高耐熱封止材⁽³⁾を充填している。

3章以降、高温動作に向けたパッケージ要素技術としてAg焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US接合技術について述べる。

3. パッケージ要素技術

3.1 Ag焼結接合技術

チップの高温動作を想定した場合、チップ下の接合に対して、はんだ材料では物性的限界があるため、新たな接合材料と材料に合わせたプロセスが必要となる。当社は、金属粒子による焼結接合に着目し、Ag粒子を用いた焼結接合プロセスを開発することで高耐熱・高品質化を実施した⁽³⁾。Ag焼結接合プロセスでは複数チップの搭載と一括接合を可能としている。そこで新規パッケージは従来パッケージに対して、チップをシュリンクし、図3に示すような 4×3 のチップ配列で一括接合による高密度化を検討した。図4にAg焼結による一括接合後のSAT(Scanning Acoustic Tomograph)画像と図5に接合断面画像を示す。SAT画像及び断面画像の結果から接合部からはボイドや亀裂等も見られず、良好な接合状態を得られた。結果として新規パッケージでは、Ag焼結によるチップの高密度化と高品質な接合が実現できた。

3.2 高耐熱絶縁基板

従来はAlN(窒化アルミニウム)セラミックを用いた絶縁基板を使用していたが、高温動作によってAlNセラミックに亀裂が発生することで、絶縁の確保ができなくなってしまう。そこで新規材料として Si_3N_4 (窒化ケイ素)セラミックを適用した高耐熱絶縁基板を検討した。高耐熱性の評価としてAlN絶縁基板と Si_3N_4 絶縁基板を $-40 \sim 175^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 215\text{K}$)の温度変化を与える温度サイクル試験で、セラミック部分や基板パターンとの接合部への亀裂進展を確認したところ、AlN絶縁基板ではセラミック部へ亀裂が進展しているのに対し、 Si_3N_4 絶縁基板では600サイクル後でも亀裂の発生はなく、絶縁特性にも異常は見られなかった(図6)。あわせて、FEM(Finite Element Method)解析で両者の破壊限界値を調査したところ、 Si_3N_4 絶縁基板はAlN絶縁

基板に対して2倍近くの裕度を持つことが確認でき、高耐熱・高信頼性を実現できた。

3.3 高耐熱はんだ材料

絶縁基板とベース板を接合するはんだ材料はチップの発熱に対してベース板への放熱性を維持するため、接合部に

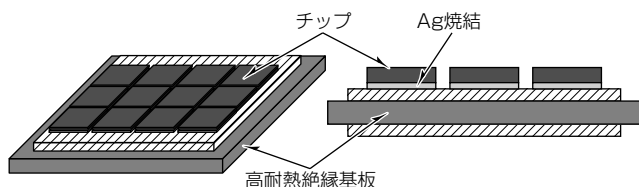


図3. Ag焼結による一括接合

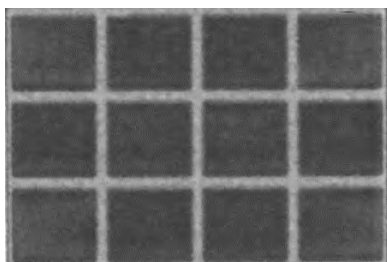


図4. 一括接合後のSAT画像

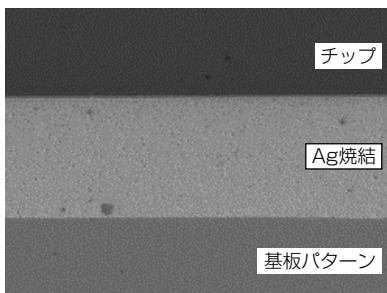
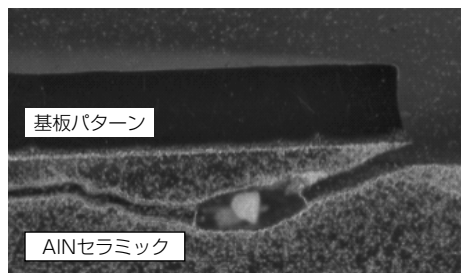
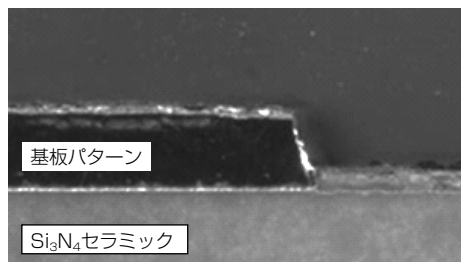


図5. Ag焼結接合の断面画像



(a) AIN絶縁基板



(b) Si₃N₄絶縁基板

図6. 温度サイクル試験後の絶縁基板断面

亀裂がない状態を保つ必要がある。従来までは製造面で取扱いのしやすい低融点のPb(鉛)入りはんだが用いられていたが、新たに高耐久・高耐熱のRoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electronic equipment)はんだ材料の選定を検討した。高耐熱はんだは接合対象である絶縁基板とベース板の機械的物性に対して、表1に示す配合元素をベースに強度と延性のバランスを取るため、さらに追加で複数の元素を添加し、接合寿命の改善を図った。選定したはんだ材料で3.2節のSi₃N₄絶縁基板とベース板を接合して-40~175℃(ΔT=215K)の温度変化を与える温度サイクル試験を行い、はんだ接合部への亀裂有無を確認したところ、600サイクルでも接合部に亀裂発生は見られず、高耐熱はんだとして適用できることが確認できた(図7)。

3.4 電極US接合技術

外部と電氣的接続をしている電極ははんだを用いて絶縁基板上の基板パターンと接合して通電を行っていた。しかしパワー密度の増加とともに電極の抵抗成分による発熱が増加し、電極と基板パターンの接合部の温度も上昇することから、高温サイクルでの接合寿命を確保する必要がある。当社では電極と基板パターンの接合にUS(超音波)接合技術を用いることで接合寿命の改善を行った。US接合では超音波エネルギーとともに加圧することで、接合面に形成された自然酸化膜等の不純物を取り除き、表面に清浄な金属を露出させ、塑性変形による固相接合を行っている。US接合による配線を行うことによって従来の接合で電極と基板パターンの間に存在したはんだを取り除き、直接接合させることで接合強度の高い状態を得ることができた。

また高パワー密度にするため、電極の厚みを厚くする必要があるが、接合箇所の電極厚みが増すと接合面に発生する応力が大きくなり寿命低下の要因となる。そこで当社では接合箇所での電極の厚みを部分的に薄くすることで、US接合時の接合性改善と温度サイクルでの接合部の応力

表1. 高耐熱はんだ材料の主配合元素と効果

配合元素	融点	効果
Sn(スズ)	231.9℃	—
Sb(アンチモン)	630.5℃	機械的強度向上
Cu(銅)	1,083.0℃	クリープ性向上

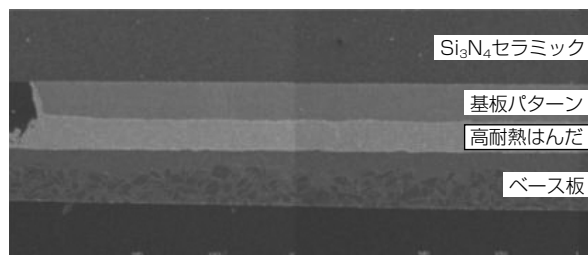


図7. 温度サイクル試験後のはんだ接合層断面

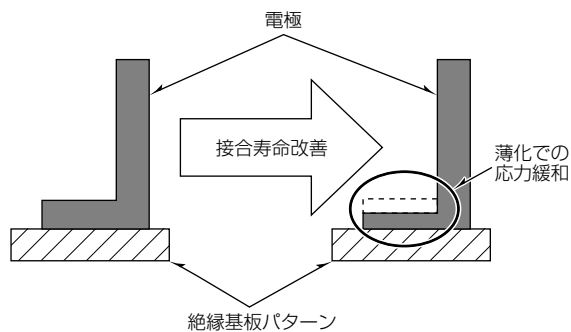


図8. 接合部薄化による接合寿命向上

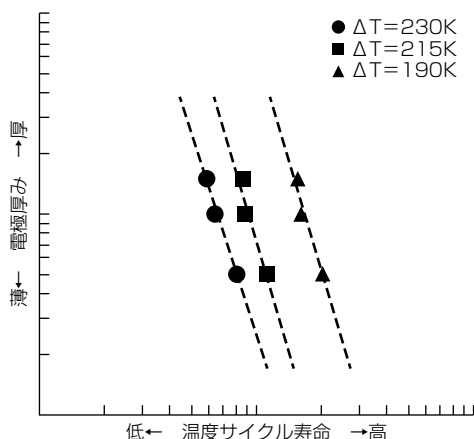


図9. 電極厚みと温度サイクル寿命の関係

低減を行うことで品質の向上を図った(図8)。図9に示す評価結果のグラフから判断できるとおり、接合部の電極厚みを薄くすることで応力が低減し、高温度サイクルに対する電極と絶縁基板の接合寿命改善を確認できた。

4. む す び

パワーモジュールの高温動作を実現させるために、パッケージ要素技術の開発を継続している。高温動作を可能と

表2. 従来パッケージと新規パッケージの違い

要素技術	従来パッケージ	新規パッケージ
チップ下DB	はんだ	Ag焼結
絶縁基板	AlNセラミック	Si ₃ N ₄ セラミック
基板下DB	鉛入りはんだ	高耐熱はんだ
電極-絶縁基板接合	はんだ	US(超音波)
封止 ⁽³⁾	従来封止材	高耐熱封止材

DB : Die Bond

するため、従来パッケージから新規パッケージへ変更・適用した技術を表2に示しており、これらの技術をInfineon社製品とパッケージの互換性がある次世代パッケージに適用して、製品化を進めている。今回はAg焼結接合、高耐熱絶縁基板、高耐熱はんだ材料、電極US接合に関する技術について述べたが、これらのほかにも高温動作対応のパワーモジュールの製品化実現には、革新的なパッケージ設計、材料及び製造プロセス開発が重要であると考えられる。

今後、当社で長年蓄積してきた、パワーモジュールのパッケージ要素技術及び量産技術を踏まえ、次世代の高温動作かつ高品質となるパワーモジュールの開発を加速させ、製品化の推進に引き続き取り組み、環境保護及び省エネルギー社会の実現に向けて貢献していく。

参 考 文 献

- (1) マジウムダール ゴーラプ, ほか: パワーモジュールの最新技術動向, 三菱電機技報, 86, No.5, 262~266 (2012)
- (2) 長谷川 滋, ほか: 1.7kV大容量ハイブリッドSiCモジュール, 三菱電機技報, 86, No.5, 287~290 (2012)
- (3) 日野泰成, ほか: 高耐熱パワー半導体モジュールパッケージング要素技術, 三菱電機技報, 88, No.5, 313~316 (2014)

エポキシ樹脂封止パッケージ技術

原田啓行* 梶 勇輔**
 井本裕児* 藤野純司***
 近藤 聡*

Packaging Technologies by Epoxy Resin Sealing

Hiroyuki Harada, Yuji Imoto, Satoshi Kondo, Yusuke Kaji, Junji Fujino

要 旨

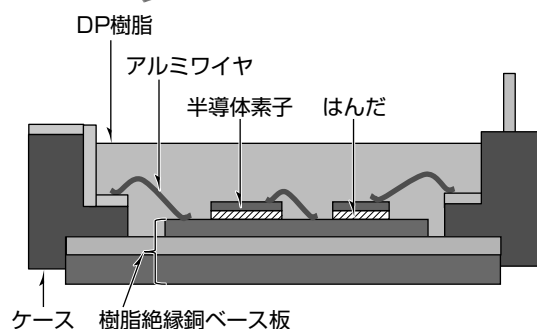
近年、世界中で環境負荷低減や低炭素社会への貢献が求められており、産業機器や電鉄、自動車の開発の進展とともに、それらに搭載されるパワーモジュールの開発が加速している。そこで、三菱電機ではパワーモジュールの安定な動作性能と高い信頼性を確保するため、耐熱性及び絶縁性を含めたパッケージング技術の開発を進めてきた。

液状エポキシ樹脂で封止するダイレクトポッティング樹脂(DP樹脂)封止は、シリコングル封止と比較して高い透湿耐性を持ち、半導体素子下部のはんだ材料の熱サイクルに伴う劣化を抑制することが期待されるため、過酷な使

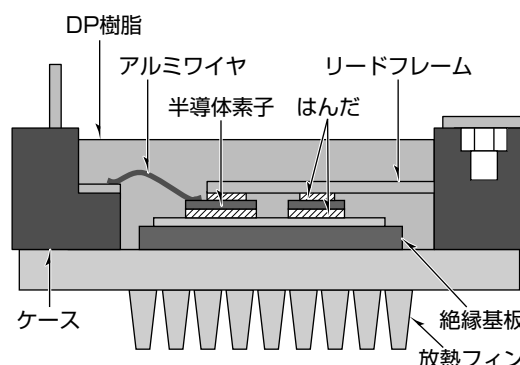
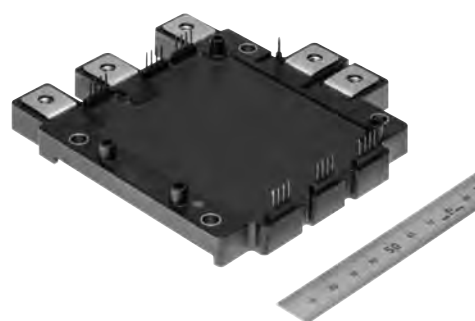
用環境下でも高信頼性を実現できるものと期待される。

一方、DP樹脂封止では、樹脂粘度、弾性率が高い特徴を持つために、狭ギャップ領域へのボイドレス封止、各種部材との線膨張率差で生じる応力起因の剥離や、モジュール反(そ)りへの影響を考慮する必要があるため、最適な樹脂の材料設計と封止プロセスが重要となる。

開発したエポキシ樹脂封止パッケージ技術を、産業用第7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュール“TシリーズNXタイプ”と自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”に適用した。



産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプ



自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズ

エポキシ樹脂封止パッケージ技術適用のパワーモジュール

産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプと、自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズのパッケージ外観及び断面模式図を示す。開発したパッケージでは、高信頼化を実現するためにダイレクトポッティング樹脂封止を採用した。

1. ま え が き

近年、世界中で環境負荷低減や低炭素社会への貢献が求められており、産業機器や電鉄、自動車の開発の進展とともに、それらに搭載されるパワーモジュールの開発が加速している。そこで、当社ではパワーモジュールの安定な動作性能、高い信頼性を確保するため、耐熱性や絶縁性を含めたパッケージング技術の開発を進めてきた。

本稿では、産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプと自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズで適用したエポキシ樹脂封止パッケージ技術について述べる。

2. 構造の特徴

2.1 パッケージ構造の特徴

産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプのパッケージと自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズのパッケージ外観を図1に示す。

図2に示すように、産業用TシリーズNXタイプでは、従来構造で適用されてきた銅ベース板とセラミック絶縁基板にシリコンゲル封止を組み合わせた構造から、高い放熱性と絶縁性を兼ね備えた樹脂絶縁銅ベース板に、エポキシ樹脂からなるDP樹脂を封止したことを特徴とする。また、構成部材の線膨張率を考慮したDP樹脂を採用することで、各部材との線膨張率のミスマッチを低減し、熱サイクルに伴う樹脂の剥離耐性を向上させた⁽¹⁾。

また、自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズの断面模式図を図3に示すが、J1シリーズでは、セラミック絶縁基板と放熱フィンとを一体化した構造を適用すること

で冷却性能を向上させ、銅フレームを半導体素子に直接はんだ接合するDLB(Direct Lead Bonding)構造の適用によって、通電能力向上、配線抵抗低減、インダクタンス低減を図った。さらに、封止樹脂にDP樹脂を適用したことで、DLB構造を持ったトランスファーモールド型パワーモジュールT-PM(Transfer-molded Power Module)と同様に信頼性の高いモジュール構造を実現するとともに、2in 1回路を3個並べた三相インバータ回路構成を1パッケージ化した6in 1構造化を実現した⁽²⁾。

2.2 樹脂封止技術の特徴

パワーモジュールは、使用用途に応じて、パッケージ構造や構成部材が異なり、パッケージの性能に応じた適切な樹脂

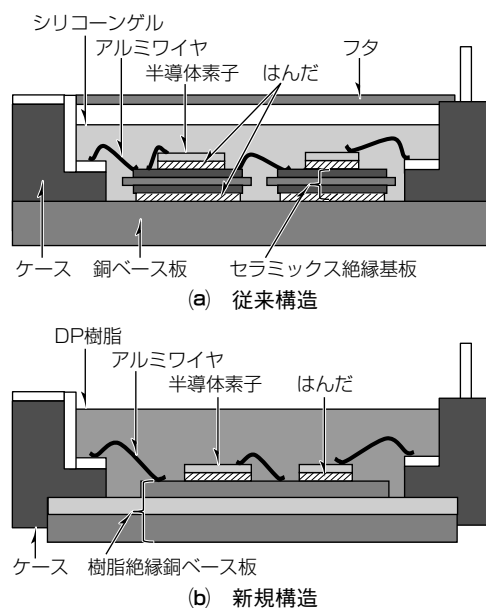


図2. TシリーズNXタイプの断面模式図

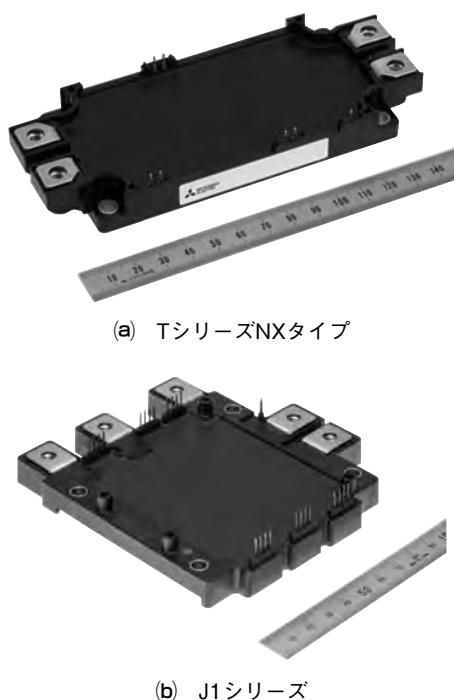


図1. パワーモジュールのパッケージ

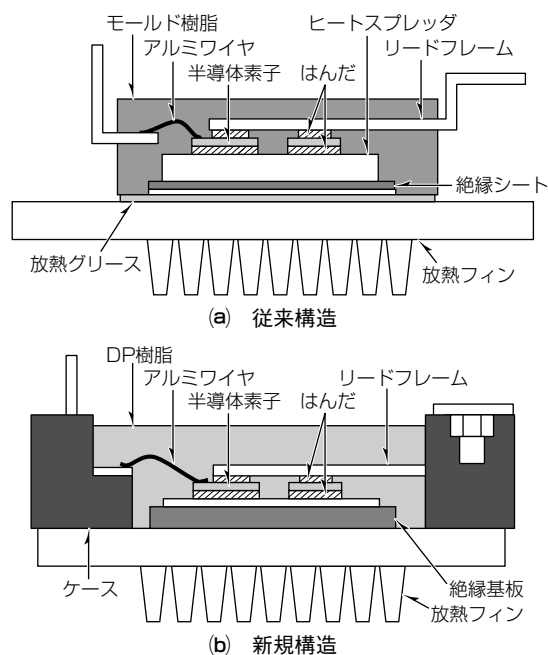


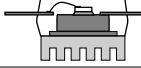


図3. J1シリーズの断面模式図

表 1. 樹脂封止技術の比較

	ケース型モジュール		トランスファー成形
	シリコンゲル封止	DP樹脂封止	モールド樹脂封止
構造			
信頼性	○	◎	◎
大型パッケージ化	○	○	△
線膨張率	高	低	低
弾性率	低	高	高

封止が要求される。樹脂封止は、トランスファー成形で用いられる個体エポキシ樹脂からなるモールド樹脂封止、一般的なケース型モジュールへの封止で用いるシリコンゲル封止、それに加え、液状エポキシ樹脂からなるDP樹脂封止の3種に分類され、樹脂封止技術ごとに異なる特徴を持つ(表1)。

モールド樹脂封止では、トランスファー成形によって封止され高い信頼性を持つが、成形金型が必要であるため、モジュール構造変更に伴う自由度は少なく、大型モジュールへの封止に対しては、金型サイズに制限があるため、生産性が低下することが課題である。

シリコンゲル封止は、耐熱性、絶縁性に優れており、低粘度材料であるため注入性も良好であるが、今後のパワーモジュール開発では、更なる高耐熱化、高信頼性化が要求されている。

これら封止技術への課題に対し、液状エポキシ樹脂で封止するDP樹脂封止は、成形金型が不要であり、シリコンゲルと比較して高い透湿耐性を持ち、半導体素子下部のはんだ材料の熱サイクルに伴う劣化を抑制することが期待されるため、過酷な使用環境下でも高い信頼性を実現できるものと期待される。一方、DP樹脂封止では、樹脂粘度、弾性率が高い特徴を持つために、狭ギャップ領域へのボイドレス封止、各種部材との線膨張率差で生じる応力起因の剥離や、モジュール反りへの影響を考慮する必要があるため、最適な樹脂の材料設計と封止プロセスが重要となる。DP樹脂封止での樹脂材料設計と封止プロセスの詳細については、3章で述べる。

3. 樹脂封止パッケージ技術

3.1 DP樹脂材料設計

DP樹脂は、主にエポキシ樹脂、セラミックスフィラー、及び難燃剤等の各種添加剤で構成されており、各モジュールに最適の樹脂特性を持つ材料を開発した。

自動車用J1シリーズでは、モジュール構造にセラミックス絶縁基板を持つため、セラミックスの低い線膨張率に合わせた低線膨張率のDP樹脂を選定する必要がある。樹脂の線膨張率に関しては、図4に示すように、樹脂中のフィラー充填量を変更することで調整できるが、フィラー充填量増加に伴って樹脂粘度は増加し、流動性が低下する

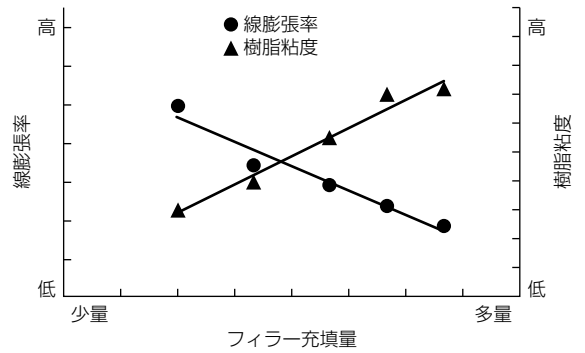


図4. フィラー充填量に対する線膨張率と樹脂粘度の関係

ことが課題であった。樹脂の流動性は、基礎評価によってモジュール内の狭ギャップ領域でもボイドレスな樹脂封止が可能な流動限界粘度を算出することで、流動性良好なフィラー充填量領域を見極め、要求された樹脂特性を持つDP樹脂を開発した。

3.2 DP樹脂封止プロセス技術

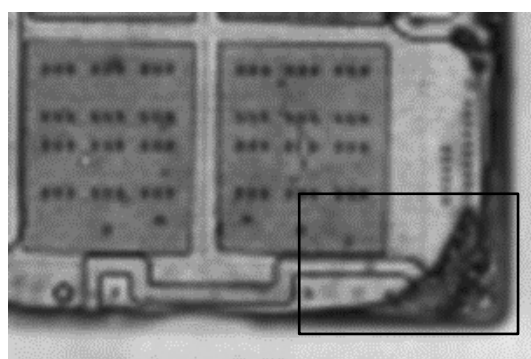
ボイドレスな樹脂封止を実現するためには、樹脂特性を理解した最適な注入プロセスが必要となる。近年、パワーモジュールの小型・高密度化やDLB構造等の適用によって、モジュール内部では、1mm以下の狭ギャップ領域が増加する傾向にあり、樹脂注入プロセスの最適化に対する要求が高まる傾向にある。注入プロセスに関しては、評価から得られた最適条件で樹脂注入を実施することによって、ボイドレスで品質の高い樹脂封止を実現した。

3.3 信頼性試験

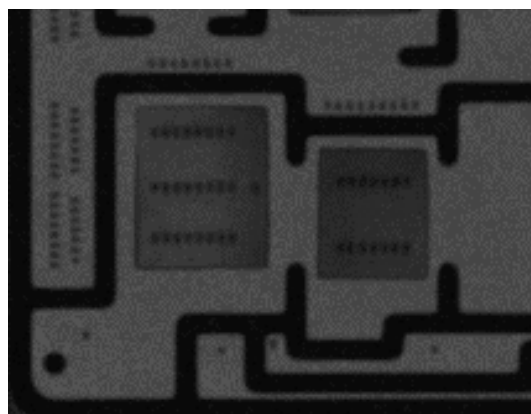
従来のセラミックス絶縁基板へのシリコンゲル封止構造と、樹脂絶縁銅ベース板へのDP樹脂封止構造である産業用TシリーズNXタイプでの温度サイクル試験(-40~125℃)600サイクル後のSAT(Scanning Acoustic Tomograph)画像を図5に示す。また、各封止構造の断面模式図を図6に示す⁽³⁾。

シリコンゲル封止構造では、温度サイクル試験の経過とともに、セラミックス絶縁基板下部のはんだ層端部からクラックが僅かに伸展するのに対し、DP樹脂封止構造では、一体型絶縁基板の適用によってベース板との接合にはんだ接合層を持っていないため、温度サイクル試験後も各種部材での劣化は確認されなかった。加えて、各構造ともに半導体素子下部のはんだ接合層に関しては、温度サイクル試験による劣化は確認されなかった。

シリコンゲル封止構造では、半導体素子に対してセラミックス絶縁基板の線膨張率が比較的近い値であるため、はんだ接合層への応力が高くない。一方、DP樹脂封止構造では、半導体素子と樹脂絶縁銅ベース板の線膨張率差が大きいと、はんだ接合層へかかる応力は大きいことが分かっているが、高弾性かつ高接着なDP樹脂がはんだ接合層を覆うことで、はんだ接合層に発生する応力を緩和した



(a) シリコンゲル封止構造



(b) DP樹脂封止構造

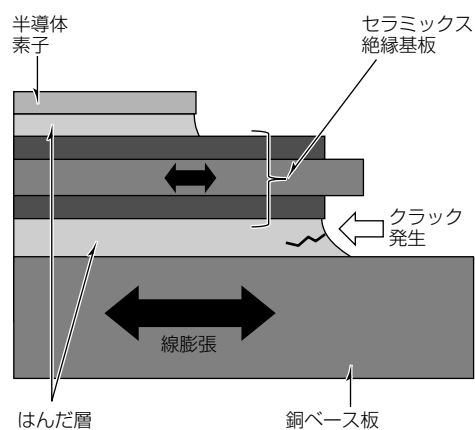
図5. 温度サイクル試験後のSAT観察像

ものと推測される。

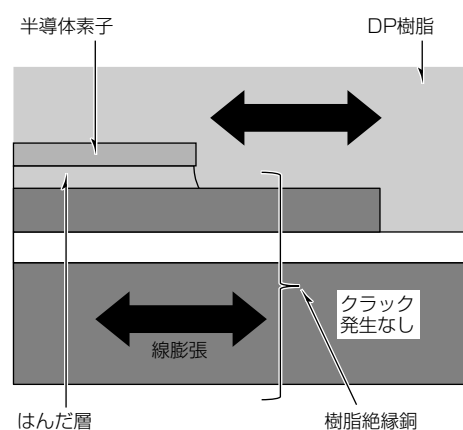
また、パワーサイクル試験に関しても、従来構造と同等以上のパワーサイクル寿命結果が得られており、DP樹脂封止による樹脂封止技術の信頼性が高いことが示された。

4. む す び

当社の産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズNXタイプと自動車用パワー半導体モジュールJ1シリーズでは、従来のケース型モジュールで主流であったシリコンゲル封止から、エポキシ樹脂によるDP樹脂封止を採用することで、パワーモジュールの高信頼性を実現した。今後も、材料及び製造プロセスを含めた封止技術の高性能化によって、次世代パワーモジュールの開発を加速し、省エネルギー化社会への貢献を目指していく。



(a) シリコンゲル封止構造



(b) DP樹脂封止構造

図6. 各封止構造の断面模式図⁽¹⁾

参 考 文 献

- (1) 浅田晋助, ほか: 産業用高信頼性パッケージ技術, 三菱電機技報, **90**, No.5, 291~294 (2016)
- (2) 吉松直樹, ほか: 自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”のパッケージ技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 317~320 (2014)
- (3) Kaji, Y., et al.: Novel IGBT Modules with Epoxy Resin Encapsulation and Insulating Metal Baseplate, Proceedings of the 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 475~478 (2016)

3.3kVフルSiCパワーモジュール

根岸 哲* 井浦真一*
津田 亮* 山口博史*
長谷川 滋*

3.3kV Full SiC Power Module

Tetsu Negishi, Ryo Tsuda, Shigeru Hasegawa, Shinichi Iura, Hiroshi Yamaguchi

要 旨

Si(シリコン)ベースのIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)がパワーモジュールとして鉄道車両用主回路システムに最初に適用されてから約20年が経過した。現在まで、鉄道車両用主回路システムの性能は、半導体チップやパッケージ技術を改良することによって改善されてきた。しかし、パワーモジュール用のSiデバイスは物理的限界に近づいているため、Siベースのパワーモジュールの大きな改善は難しくなっている。三菱電機では、更なる性能改善が見込まれるSiC(シリコンカーバイド)を用いたパワーモジュールを世界に先駆けて(注1)開発・実用化してきた。

スイッチング素子と逆並列に接続される還流ダイオードをSiC化したフルSiCとし、鉄道用途向けに適した高信頼性設計技術及び耐環境性設計技術を開発・適用するこ

とによって、世界で初めて(注2)世界標準パッケージ適用フルSiCの鉄道向け低損失・高耐圧パワーモジュールを開発した。フルSiC化によって、従来のSiパワーモジュールに比べ、スイッチング損失を約80%低減した。フルSiCモジュールの適用によって、鉄道車両用主回路システムのスイッチング損失低減・軽量化・回生ブレーキ効率向上などを実現し、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力を低減した。また、世界標準パッケージ適用によって並列接続が容易となり、多様な鉄道車両用電力変換装置の構成・容量に対応し、装置設計の効率化に寄与する。

(注1) 2013年3月26日現在、当社調べ

(注2) 2017年5月11日現在、当社調べ

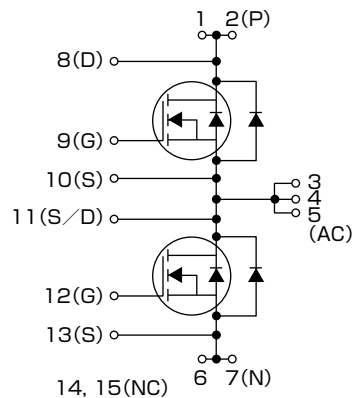


フルSiC-LV100パッケージ

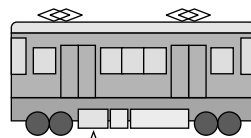
形名	定格電圧	定格電流
FMF750DC-66A	3.3kV	750A

素子として：

- ・SiC-MOSとSiC-SBDの適用によって低損失・高出力化(スイッチング損失：従来Siタイプ比約80%低減)
- ・標準外形パッケージによって多様な電力変換装置の構成・容量に対応可能(2素子並列接続によって3.3kV/1,500A)



結線図



鉄道車両用主回路システムとして：
・低消費電力化(従来比約30%低減)
・小型化による床下機器構成の自由度向上

MOS : Metal-Oxide Semiconductor, SBD : Schottky Barrier Diode

3.3kVフルSiCパワーモジュール

世界で初めてフルSiCの鉄道用途向け低損失・高耐圧パワーモジュールを開発した。鉄道用途向けに適した高信頼性設計技術及び耐環境性設計技術を開発・適用した。フルSiC化によって、従来のSiパワーモジュールに比べてスイッチング損失を約80%低減した。また、世界標準パッケージ適用によって並列接続が容易となり、多様な鉄道車両用電力変換装置の構成・容量に対応し、装置設計の効率化に寄与する。

1. ま え が き

低炭素社会の実現に向けた省エネルギー化と更に豊かな生活を実現するための高性能化が求められており、省エネルギーで利便性の高い移動輸送手段である鉄道の重要性が高まっている。鉄道車両用主回路システムなどに使用される絶縁型パワーモジュールは小型、低損失であることに加えて、民生、一般産業用等比べてより高い信頼性が要求されている。この要求を満たすため、当社は従来のSi製品の性能向上を進めるとともに、更なる性能改善が見込まれるSiCによるMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)とSBDを用いて、鉄道車両の駆動システムにふさわしい性能を備えた3.3kVフルSiCパワーモジュールを世界で初めて開発した。

本稿では、開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールについて、従来のSiベースのパワーモジュールとの損失性能比較とともに、信頼性性能について述べる。

2. 3.3kVフルSiCモジュールの特長

2.1 パッケージ

開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールのパッケージは世界標準パッケージを適用した。特長は次のとおりである。

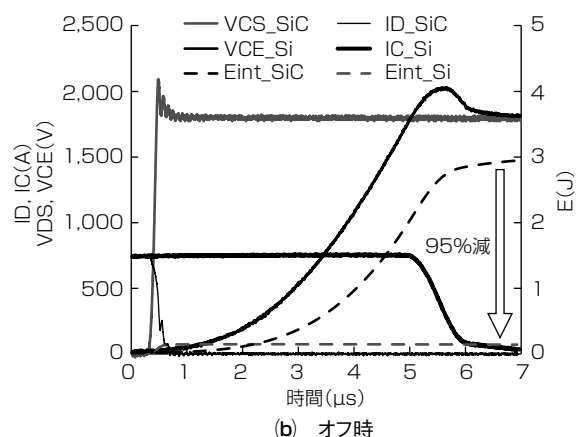
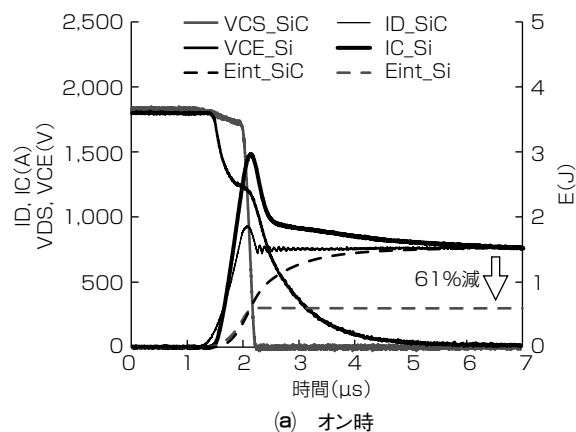
- (1) 端子配列の最適化によって並列接続が容易となり、鉄道車両用電力変換装置設計の効率化に貢献
- (2) 内部インダクタンス低減によってスイッチング速度を向上させ、電力損失を低減
- (3) AC主電極3端子化によって大電流定格に対応して鉄道車両用電力変換装置の高出力化に貢献
- (4) 他社製品との互換性を確保

2.2 スwitching特性

SiC-MOSFETとSiC-SBDの組合せを用いることによって、従来のSiのモジュールに比べ、劇的なスイッチング損失低減をもたらすことができる。開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールのスイッチング損失を、従来のSiベースのIGBTを用いたパワーモジュールに対してオン時61%低減、オフ時95%低減し、合計で約80%低減した(図1)。

鉄道車両用主回路システムに対し、3.3kVフルSiCパワーモジュールを適用して最適化することによって、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。

しかし、SiCを用いたモジュールを実際に鉄道車両で用いるためには、この損失低減を実現させることは当然のことながら、さらに様々な動作特性や信頼性を確保する必要がある。当社はそれらの課題に対して対策を講じた設計をすることによって課題を解決し、鉄道車両への実用化を実現した。ここでは、その中でも重要な高絶縁安定性、酸化膜寿命及び耐環境性能について述べる。



VCE=VDS=1,800V, IC=ID=750A, Tjope_Si=150℃, Tjope_SiC=175℃

図1. 3.3kVフルSiCパワーモジュールと従来Siベースパワーモジュールのスイッチング波形

3. 信 頼 性

3.1 高絶縁安定性

SiCはその物理特性から、高温での動作が期待される。高温かつ高電圧の条件下で素子耐圧を確保するためには、リーク電流の抑制が必要となる。特にSBDの高温でのリーク電流抑制が必要で、接合や酸化膜などのチップ構造の改良とそれを得るためのプロセス改良によってSBDの高温でのリーク電流を抑制した(図2)。

開発した3.3kVフルSiCパワーモジュールは175℃でも3.3kV時のリーク電流が0.7mA程度であり、高温高電圧でのリーク電流抑制がなされている。

さらに、長期的な安定性を検証するために、HTRB(High Temperature Reverse Bias)や宇宙線耐量試験などの長期耐電圧試験を実施した。いずれもSiと同等以上の信頼性を得ることができた。例としてHTRBの試験結果を図3に示す。

1,000時間後でもドレイン電流値の変動は数%であり、3.3kVフルSiCパワーモジュールが高温下でも安定している。これらの結果は3.3kVフルSiCパワーモジュールが十分実使用に耐える信頼性を持っていることを示している。

3.2 酸化膜寿命

SiCはチャネル抵抗が高いため、オン抵抗の低減と低温飽和電流のトレードオフ設計が重要である。そのため、必要な通電特性を得るためには、酸化膜をSiより薄くしてしきい値電圧を下げる必要がある。しかし、酸化膜が薄くなると酸化膜にかかる電界は高くなるため、酸化膜寿命が低下する問題が発生する。当社のSiC-MOSFETはそれらの弱点を補うために、酸化膜やゲート構造の改良とそれを得るためのプロセスの改良によって、酸化膜寿命を向上させた。酸化膜寿命試験の一つであるHTGB(High Temperature Gate Bias)での3.3kVフルSiCパワーモジュールの試験結果を図4に示す。

HTGBのしきい値変動率が数%以下であり、鉄道車両で一般的に想定される30年以上の酸化膜寿命を持っていることを意味している。

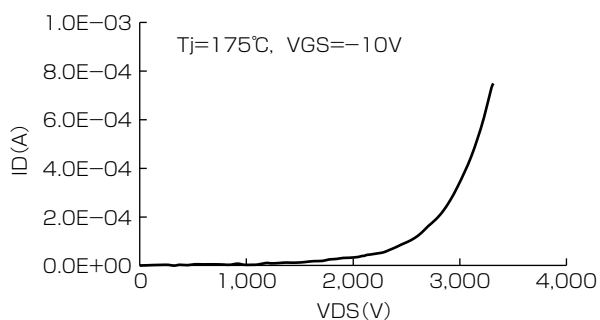


図2. リーク電流

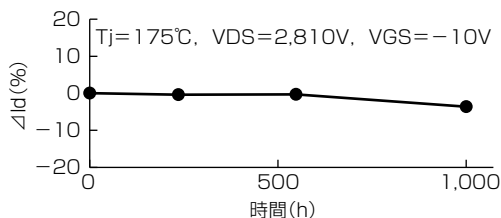


図3. HTRBの試験結果

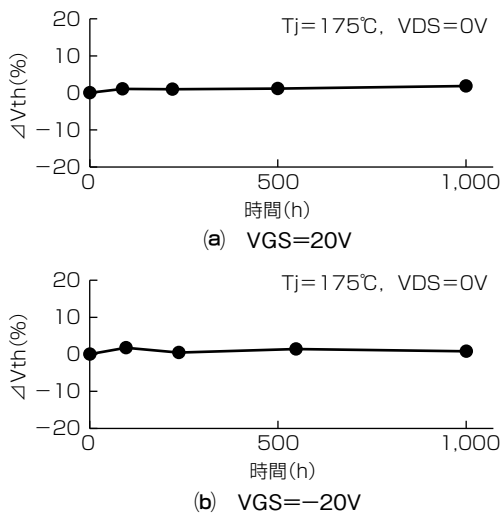


図4. HTGBの試験結果

しかしながら、SiCの製造プロセスはいまだ発展途上であり、更なる改善が必要となる。今でもSiCでは基板やエピ工程、さらにチッププロセスに起因する酸化膜形成異常などの異常発生確率がSiより高い状態であり、鉄道車両での実用化のためには、その問題を含んだチップを流出させないことが必要となる。そこで当社は不良チップを含んだモジュールをフィールドに流出させないために、異常を検出して製造プロセス工程内で除去するスクリーニング技術を開発した。それによって、当社はフィールドで適用できる3.3kVフルSiCパワーモジュールの提供を可能にしている。

3.3 耐環境性能

鉄道車両で実使用するためには、外部環境の変化に耐え得る高信頼性のパワーデバイスである必要がある。その外部環境の変化で注意すべきポイントは、主に温度、湿度、電圧が挙げられる。その中で、温度変化によるストレス耐性を表す指標の一つにパワーサイクル寿命がある。パワーサイクル寿命とは、モジュールの正常動作ができなくなるまでの通電サイクル数である。通電サイクル時にはチップなどの通電箇所の温度が上下し、その温度変化と構成部材間の線膨張係数差から部材間接合界面に熱応力が発生する。その発生応力によって部材のクラックや界面剥離が発生し、モジュールの正常動作ができなくなる。そのため、特に高温や大電流条件下でのパワーサイクル寿命の向上には、チップ接合部、すなわちチップ上部のワイヤの設計とチップ下部の絶縁基板との接合部の設計が重要となる。

そこで当社は、ワイヤ材料の適正化とともにチップへのボンディング位置や本数、長さなどを最適化し、ワイヤ発熱を抑える設計とした。また、チップ下部の接合には、Siの従来品で使われているはんだ接合からAg(銀)焼結接合へ変更することによって、耐熱性と強度の向上によるクラック・剥離抑制を行うとともに、熱伝導率を向上させた。

3.3kVフルSiCパワーモジュールのTjmax=175°Cでのパワーサイクル試験の結果を図5に示す。

図5の実線は従来のSiベースのパワーモジュールの

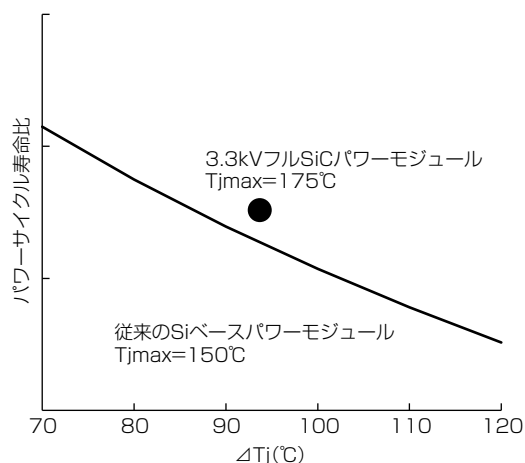


図5. パワーサイクル試験の結果

Tjmax = 150℃でのパワーサイクル寿命を示しており、丸点が3.3kVフルSiCパワーモジュールのTjmax = 175℃でのパワーサイクル寿命を示している。SiCモジュールの寿命サイクルはSiのTjmax = 150℃よりも高温のTjmax = 175℃であるにも関わらず従来のSiモジュールと同等以上となっている。この結果は、同一温度条件下での3.3kVフルSiCパワーモジュールのパワーサイクル寿命がSiベースのパワーモジュールに対して約1.5倍超であることを意味している。

次に、湿度に対する耐性を検証するため、THB(Temperature Humidity Bias)や結露試験を実施した。SiCは高破壊電界強度材料なので、ガードリング幅をシュリンクできる利点を持ち、ガードリング幅のシュリンクはチップサイズ縮小となるので、モジュールコスト低減に効果的となる。しかし、ガードリング幅シュリンクによるガードリング部の高電界化は、チップのパッシベーションなどのチップ表面材料にとっては絶縁性能などでより厳しくなり、信頼性が低下することが課題となっている。当社は、チップのパッシベーションなどのチップ表面材料と構造設計を最適化したことに加え、絶縁封止材や配線構造などパワーモジュールの材料構成から見直すことによって、その課題を解決した。

図6にTHBの試験結果を示す。

高温高湿環境下での高圧印加でも1,000時間超の間リークが発生していない。また、結露試験でも問題がないことを確認した。これらの結果は、3.3kVフルSiCパワーモジュールが鉄道車両用としての耐湿性を持っていることを示している。

また、実動作電圧に対する耐性を検証するため、インバータ動作を模擬した連続スイッチング試験を実施した。3.3kVフルSiCパワーモジュールは図1で示すスイッチング波形のとおりdv/dtがSiベースのパワーモジュールに比べて高く、スイッチング速度が速くなっている。この高いdv/dtは局所的な温度上昇や酸化膜への負荷増加などの懸念があり、それによる信頼性の低下が問題となる可能性がある。当社は、これに対して酸化膜やゲート構造の改良とそれを得るためのプロセスの改良を含めた設計を行っている。図7に3.3kVフルSiCパワーモジュールの長期連続スイッチング試験の結果を示す。

1,500時間連続スイッチング試験を行い、スイッチング試験開始前と1,500時間連続スイッチング試験後の特性を

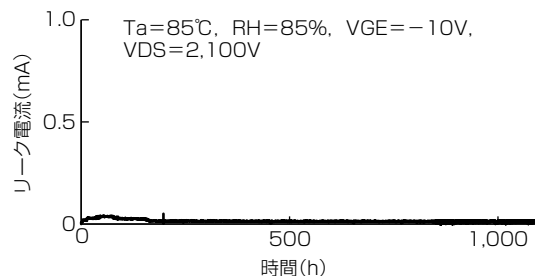


図6. THBの試験結果

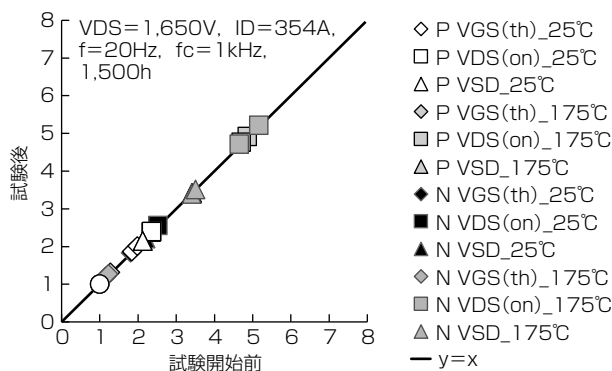


図7. 長期連続スイッチング試験の結果

比較した。連続スイッチング試験の前後で3.3kVフルSiCパワーモジュールの特性値は $y=x$ の線上にあり、大きな特性変動は生じていない。この結果は、3.3kVフルSiCパワーモジュールが高いdv/dtでの実動作スイッチングの長期信頼性を持つことを示している。

これらの耐環境性検証結果は、当社のモジュールが実使用に耐える耐環境性能の信頼性を持っていることを示している。

4. む す び

将来のパワーデバイスとして期待されるSiCのMOSFETとSBDを用いた3.3kVフルSiCパワーモジュールを鉄道車両の駆動システム用として世界で初めて開発した。鉄道車両用主回路システムに対して、3.3kVフルSiCパワーモジュールを適用し主回路システムを最適化することによって、従来のSiベースのパワーモジュールを用いた主回路システムに対して約30%の消費電力低減を実現した。

この3.3kVフルSiCパワーモジュールによって、当社は低炭素社会の実現と豊かな生活の両立に貢献する。

SLC技術と新PC-TIMによる 熱ストレス低減

増田晃一*
大坪義貴*
稗田智宏*

Relaxing Thermal Stress by SLC Technology and New PC-TIM

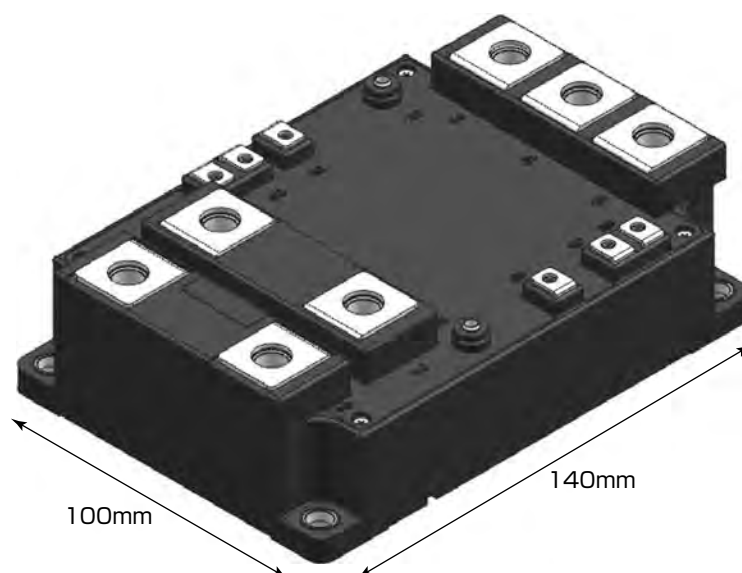
Koichi Masuda, Yoshitaka Otsubo, Tomohiro Hieda

要 旨

近年、汎用インバータ、モータドライブ、風力発電、太陽光発電といった産業用途のパワーエレクトロニクスの応用機器で小型化が進んでいる。これらの機器に用いられるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイオードを搭載したパワーモジュールに対しても大容量化や小型化が求められており、モジュールの高電力密度化と低損失化が必要となっている。第7世代パワーモジュールではこれらの要求を実現するため、パワーチップ技術として第7世代IGBTやRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオード、さらにパッケージ技術として樹脂絶縁銅ベース板を用いたSLC(SoLid Cover)技術や厚銅セラミック基板を使用したTMS(Thick Metal Substrate)技術を採用してきた。

今回、第7世代パワーモジュール技術の大容量パッケージへの展開として、三菱電機で開発を行っている産業用LV100のパッケージにSLC技術を用いることで従来の銅ベース板と絶縁基板を使用した構造に対して熱ストレスの低減を行った。また、新しい高熱伝導のPC-TIM(Phase Change Thermal Interface Material)を組み合わせることで更なる性能向上が可能になった。産業用LV100及び新しいPC-TIMの特長は次のとおりである。

- ①SLC技術による大容量化とパワーチップ搭載面積増加
- ②温度変化に対するベース板反り形状変化の抑制
- ③高熱伝導率と高耐熱性のPC-TIM
- ④SLC技術と新しいPC-TIMによる熱抵抗の低減



産業用LV100

パッケージ構造としてSLC技術を、チップ技術として第7世代IGBT及びRFCダイオードを採用した次世代デュアルモジュールである。外形サイズは100(W)×140(D)(mm)、ラインアップは1,200V系、1,700V系いずれも800~1,200Aで製品展開予定である。同一外形サイズでアルミベース一体型基板構造であるMCB(Metal Casting direct Bonding)技術を用いた高絶縁製品を1,700V系、3,300V系でラインアップの予定である。

1. ま え が き

汎用インバータ、モータドライブ、風力発電、太陽光発電といった産業用途のパワーエレクトロニクスの応用機器で小型化が進んでいる。これらの機器に搭載されるパワーモジュールに対しても大容量化や小型化が求められており、モジュールの高電力密度化と低損失化が必要となっている。当社はこれらの要求を実現するため第7世代の産業用IGBTモジュールとして、樹脂絶縁銅ベース板を採用したSLC技術を用いた“NXシリーズ”や厚銅セラミック基板を採用したTMS技術を用いた“stdシリーズ”を展開してきた⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、第7世代パワーモジュール技術の大容量パッケージへの展開として、SLC技術を用いて大容量モジュールである産業用LV100(100(W)×140(D)(mm))の開発を行っている。

本稿では、モジュールの大容量化と高電流密度化の課題である放熱性の改善手法として、SLC技術と新しい高熱伝導のPC-TIMの有用性について述べる。

2. SLC技術

図1にSLC技術の構造と従来技術である銅ベース板+絶縁基板構造(以下“従来構造”という。)の比較を示す。また、表1に大容量のモジュールでのSLC技術の特長を示す。

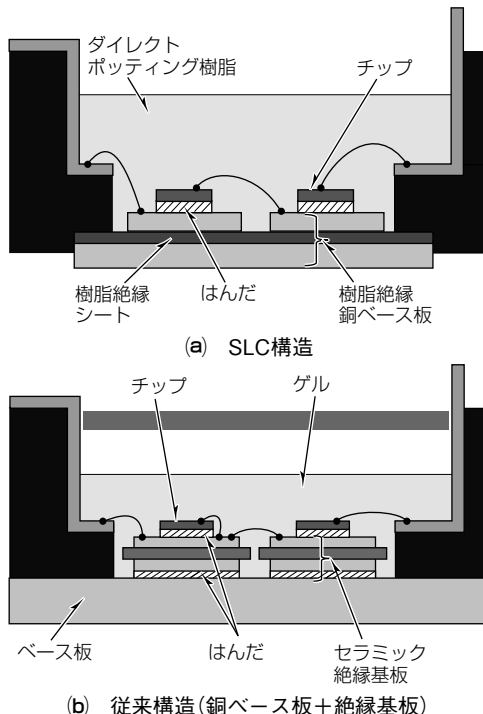


図1. 構造の比較

表1. SLC技術の特長

項目	長所
一体型基板	チップ搭載面積拡大
構成材料の線膨張係数の最適化	材料間の線膨張係数の差による熱ストレスを低減
高熱伝導の樹脂絶縁材料	熱抵抗の低減

す。産業用LV100ではSLC技術を採用することで従来構造に対してより大容量・高電力密度化が可能になった。

従来構造を用いたパワーモジュールでは定格電流1,000Aを超えるような場合、セラミック基板のクラックを防止するため絶縁基板を複数枚に分割する必要があった。それに対してSLC技術を用いた場合、絶縁基板を分割せずに1枚化できるため基板上の金属パターン面積を拡大できる。図2に示すように産業用LV100の外形サイズでは、従来構造に対して約20%パターン面積を拡大した。また、基板を分割せずに一枚化することによって端子接合部の面積を集約化することで金属パターン面内のチップ搭載部の面積比率を更に拡大可能になった。チップ搭載面積の拡大によって従来構造に対して熱抵抗を低減し、モジュールの出力を上げることができる。

また、SLC技術では構成材料の線膨張係数の最適化を行っている。従来構造にあったセラミック基板と基板下はんだをなくし、線膨張係数が近い材料でモジュールを構成することによってヒートサイクル耐量を改善している⁽³⁾。図3に温度変化に対するベース板平坦(へいたん)度の測定結果を示す。LV100のようなベース板面積が大きいモジュールでもSLC技術を用いることで、温度変化に対するベース板の変位量を抑制できる。ベース板変位量を抑えることによって従来構造に対してポンピングアウト耐性の改善やシリコングリースやPC-TIMなどの放熱材の薄厚化が可能になる。

さらに樹脂絶縁シートの熱伝導率を第7世代1,200V系NXシリーズに用いられている従来のシート材から改善した。表2に示すようにシート材の熱伝導率の向上によって、シート厚みを厚くすることで絶縁耐電圧を従来の2,500Vから4,000Vに向上させながらも熱抵抗を6%低減した⁽⁴⁾。絶縁耐電圧4,000Vを実現できたことによって、SLC技術の1,700V系パワーモジュールへの適用が可能になった。なお、この高熱伝導のシート材は第7世代1,700V系NXシリーズから適用している。

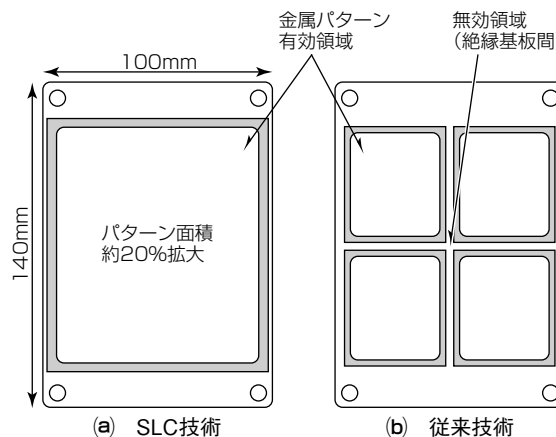


図2. パターン面積の比較

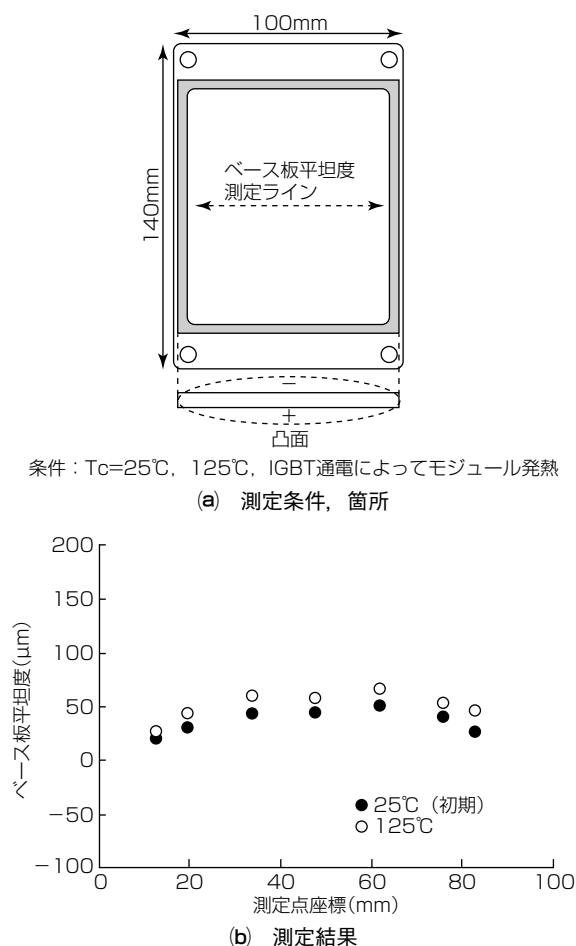


図3. ベース板平坦度測定結果

表2. SLC技術の特長

適用製品	樹脂絶縁シート	絶縁耐電圧	熱抵抗R _{thj-c} 比 ^(注1)
第7世代1,200V系NXシリーズほか	従来仕様	2,500V	1.00
第7世代1,700V系NXシリーズ，産業用LV100ほか	高熱伝導仕様	4,000V	0.94

(注1) 同一チップサイズ条件でのジャンクション-ケース間の熱抵抗比

3. 高熱伝導・高耐熱仕様のPC-TIM

熱ストレスを低減するにはパワーモジュールの放熱性能改善とともにベース板とヒートシンク間の接触熱抵抗を低減することが重要である。当社では第7世代NXシリーズ，stdシリーズからPC-TIMの塗布対応を行っており，熱伝導率及び耐熱性を更に改善したPC-TIMの採用を検討している。表3に従来仕様と採用検討中の高熱伝導・高耐熱仕様のPC-TIMの比較を示す。高熱伝導・高耐熱仕様のPC-TIMでは熱伝導率を4.0W/(m・K)に向上させ，150℃温度条件下でも使用可能になっている。図4にPC-TIMの濡れ広がり性の評価結果を示す。PC-TIMの熱伝導率と濡れ広がり性はフィラーの含有量によって性能のトレードオフ関係にあり(図5)，熱伝導率を向上させると濡れ広がり性低下が懸念される。しかし新しいPC-TIMでは構成材料，フィラー径を最適化することで濡れ

表3. PC-TIMの比較

PC-TIMの仕様	熱伝導率(W/(m・K))	最大使用温度(℃)
従来仕様	3.4	125
高熱伝導・高耐熱仕様	4.0	150

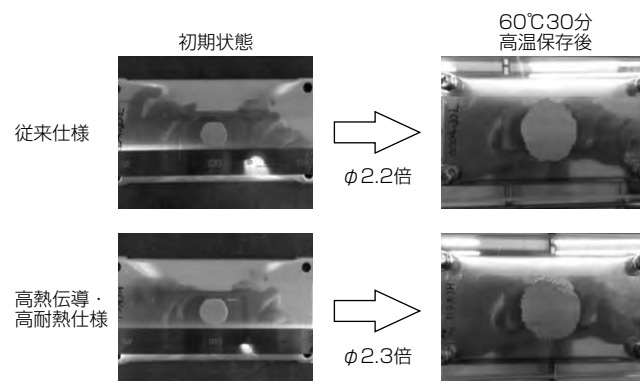


図4. 濡れ広がり性の評価結果

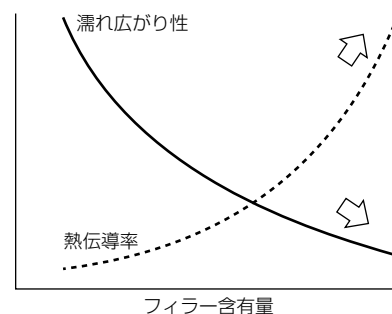


図5. PC-TIMトレードオフのイメージ図

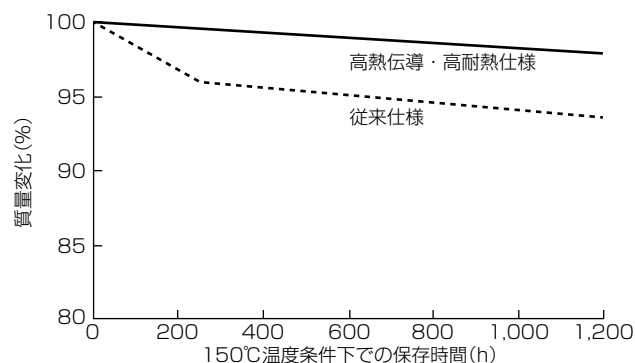


図6. PC-TIMの質量変化率

広がり性を損なうことなく熱伝導率を改善した。

また，図6に150℃の高温保存試験でのPC-TIMの質量変化率を示す。高熱伝導・高耐熱仕様では熱分解温度を高くすることによって高温時の質量変化率を低減した。この改善によって150℃温度条件下でも使用可能である。

4. 熱抵抗の低減

前述のSLC技術と高熱伝導・高耐熱のPC-TIMを組み合わせることで熱抵抗の低減が可能になる。表4に放熱性能確認のために行った定常熱解析のモデル条件を示す。解

表4. 定常熱解析のモデル条件

モデル	構造	放熱材 ^(注2)	外形サイズ
新技術	SLC構造	PC-TIM 4.0W/(m・K) 50μm	100×140(mm)
従来技術	従来構造 (銅ベース板+薄 Al ₂ O ₃ 絶縁基板)	シリコングリース 0.9W/(m・K) 100μm	

(注2) 放熱材厚は各構造の推奨厚み

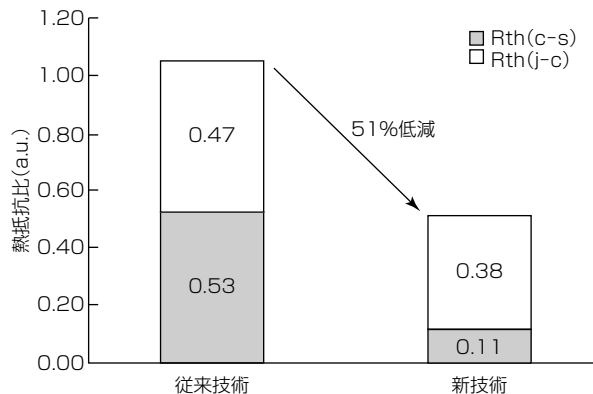


図7. 熱抵抗シミュレーション結果

析モデルは産業用LV100の外形サイズを採用し、比較素子として、モジュール構造はAl₂O₃(アルミナ)絶縁基板、放熱材はシリコングリースを用いたモデルでも解析を行った。また、SLC構造での放熱材厚は、温度変化に対するベース板変位量を従来構造より低減できるため50μmとした。図7に定常熱解析によって算出した熱抵抗の比較を示す。解析結果から、従来技術のモデルに対して新技術のモデルでは熱抵抗が約半減した。この結果から、SLC技術と高熱伝導・高耐熱のPC-TIMによる放熱性向上を確認した。

5. む す び

第7世代パワーモジュール技術の大容量パッケージへの展開として、SLC技術と熱伝導率を向上させるPC-TIMを用いることによって熱ストレスを低減した。SLC技術の採用によってチップ搭載面積を拡大するとともに温度変化に対するベース板の反り形状変化を抑制した。またPC-TIMでは構成材料の最適化によって、接触熱抵抗の低減と150℃条件下での使用が可能になった。さらにこれらの技術を組み合わせることによって、従来技術に対して熱抵抗を低減してモジュールの放熱性の向上が可能であることを確認した。

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) 宮澤雅臣，ほか：産業用第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”，三菱電機技報，**90**，No.5，295～298（2016）
- (3) 浅田晋助，ほか：産業用高信頼性パッケージ技術，三菱電機技報，**90**，No.5，291～294（2016）
- (4) Takahashi, T., et al.: A 1700V-IGBT module and IPM with new insulated metal baseplate(IMB) featuring enhancing isolation properties and thermal conductivity, PCIM, 342～347（2016）

産業用第7世代IGBTのCIBタイプ

大原孝太*
江草 稔**
小田敬雅***

CIB Type of 7th Generation IGBT Module for Industrial Use

Kota Ohara, Minoru Egusa, Takamasa Oda

要 旨

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは産業分野でモータ制御などに広く使用されている。近年では、太陽光や風力を始めとする再生可能エネルギーを利用した発電の電力変換用としてIGBTモジュールの需要が増加しており、今後ますます役割は大きくなると予想される。これらの幅広い産業用途のニーズに応えるために産業用第7世代IGBTモジュールを開発しているが、今回新たに中・小容量帯をメインとするCIBタイプ(Converter + Inverter + Brake素子を内蔵)のラインアップを拡充した。

パッケージは、絶縁部と銅ベース部が一体化された樹脂絶縁銅ベース板とダイレクトボッティング(DP)樹脂充填を組み合わせたSLC(SoLid Cover)技術を適用した“NXパッケージタイプ”を採用している(以下“NX-CIBタイプ”という)。

NX-CIBタイプでは、従来の“CIB-Mパッケージ”に加えて新たに小型の“CIB-Sパッケージ”を追加し、50~150A(650Vクラス)、35~150A(1,200Vクラス)をラインアップした。また、特性の異なる“Tシリーズ”と“T1シリーズ”の二つのラインアップを開発しており、ピンタイプは“はんだピンタイプ”と“プレスフィットピンタイプ”をそろえることで、更に多様なユーザーニーズに対応できる(45品種、2018年3月現在)。なお、全品種に対してPC-TIM(Phase Change Thermal Interface Material)塗布のオプションを準備している。これを選択することで、ユーザー側の放熱グリースを塗布する作業が不要となり、組立て工程の簡素化が実現できる。



CM***MXUA***T*



CM***MXUB***T*



CM***MXUC***T*



CM***MXUD***T*

形名	パッケージタイプ	外形寸法(mm)	タイプ	主電極ピン本数	他社互換製品
CM***MXUA***T*	CIB-S	45.0×107.5	A	1	EconoPIM2 ^(注1)
CM***MXUB***T*	CIB-S	45.0×107.5	B	2	EconoPIM2
CM***MXUC***T*	CIB-M	62.0×122.0	C	2	EconoPIM3
CM***MXUD***T*	CIB-M	62.0×122.0	D	3	EconoPIM3

(注1) EconoPIMは、Infineon Technologies AGの登録商標である。

第7世代IGBTモジュールのCIBタイプ(はんだピンタイプ)

NX-CIBでは、2種類のパッケージタイプ(Sパッケージ、Mパッケージ)がある。さらに、Sパッケージには主電極ピン本数が1本のAタイプ、2本のBタイプ、Mパッケージには主電極ピン本数が2本のCタイプ、3本のDタイプがあり、電流容量に応じて各パッケージタイプを使い分けてラインアップ化している。

1. ま え が き

三菱電機産業用IGBTモジュールは、低損失性、高信頼性を特長として、これまでインバータ、サーボアンプ、風力・太陽光発電、UPS(Uninterruptible Power System)などの産業用市場の幅広い応用機器製品で採用されてきた。近年、エネルギー利用の効率化や機器の長寿命化のため、更なる低消費電力と高信頼性の要求が高まっている。これらのニーズに応えるため、第7世代IGBTモジュールを開発しており、今回NX-CIBタイプのラインアップを拡充した。

本稿では、NX-CIBタイプの性能と特長について述べる。

2. NX-CIBタイプの性能

2.1 TシリーズとT1シリーズの特性

今回、NX-CIBタイプは多様なユーザーニーズに対応できるように、特性の異なるTシリーズとT1シリーズをラインアップ化している。図1に、インバータ動作時の発生損失を競合他社(A社)と比較計算した結果を示す。TシリーズはA社の最新シリーズと同等、T1シリーズはA社の旧シリーズと同等以上の損失を持つ製品仕様となっている。

2.2 高信頼性

システムの起動・停止によってIGBTモジュールのケース温度(T_c)は大きく変化する。モジュールは複数の素材から構成されているので、線膨張係数の差によってそれぞれの境には強い応力がかかって疲労を起こす。これを模擬した試験がサーマルサイクル試験であり、通電を繰り返すことで T_c を変化させて製品の寿命を評価する。6世代NX構造及び7世代NX構造を図2に示す。6世代NX構造では、銅やセラミックに比べはんだが脆(もろ)いため、絶縁基板下のはんだ層にクラックが発生することが製品寿命を決める一つの要因となっていた。今回、7世代NX構造

では絶縁部と銅ベース部を一体化した構造を採用しており、基板下のはんだ層を排除している。図3に、サーマルサイクル試験で同一サイクル後のSAT(Scanning Acoustic Tomograph)画像を示す。6世代NX構造では、セラミック絶縁基板下にクラック発生が観察されるのに対して、7世代NX構造では樹脂層にも異常は見られない。最終的に、7世代NX構造のサーマルサイクル試験はチップ下のはんだ層で寿命が決まるため、パワーサイクル寿命と同一の破壊モードとなっている。そのため、ユーザー側でサーマルサイクル寿命を考慮する必要がなくなる。

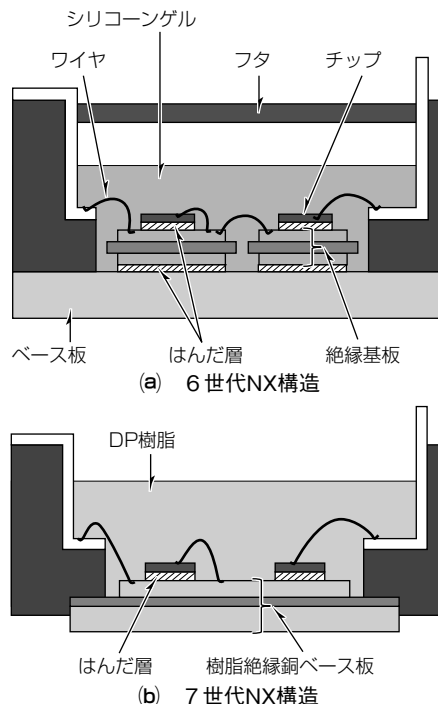


図2. 6世代NXと7世代NX構造の比較⁽¹⁾

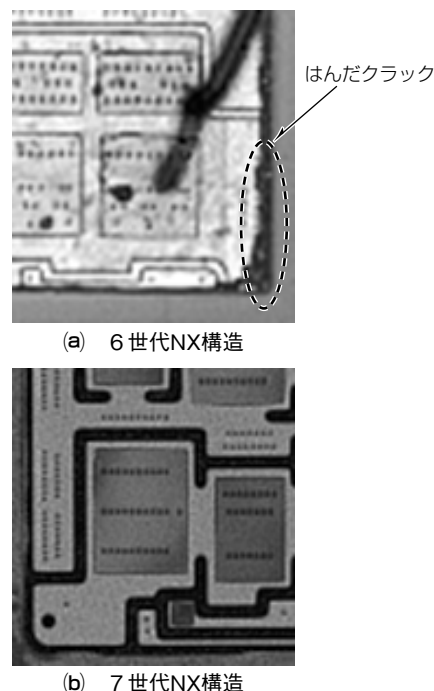


図3. サーマルサイクル後のSAT画像

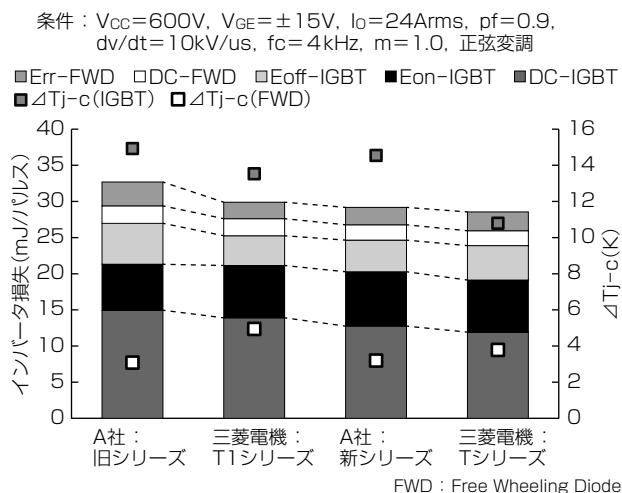


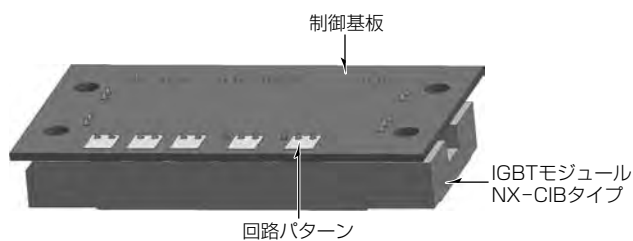
図1. 1,200V/50A素子でのトータル損失

3. NX-CIBタイプの特長

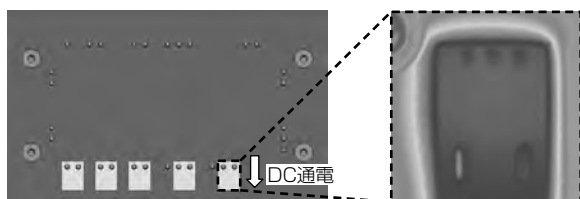
3.1 制御基板上の回路パターン発熱抑制

NX-CIBタイプは、制御基板に接続する端子が全てピンタイプで構成されており、制御基板上の回路パターン（以下“制御基板パターン”という。）とはんだ接続又は、プレスフィット接続している。ピンタイプは、ねじタイプより高い電流密度となるため端子の発熱が高くなり、接続している制御基板パターンの温度も高くなる。近年の市場動向として、大電流化の動きもあり、NX-CIBタイプでは制御基板パターンの発熱がたびたび問題視されることがある。そこで、制御基板パターンの発熱を競合他社品と比較して評価を実施した。評価方法を図4、評価結果を図5に示す。

図5から、電流値が高くなるほど各社の温度差が顕著化されている。この要因として、7世代NX構造ではパワーチップとAlワイヤで接続している端子電極部が連結して



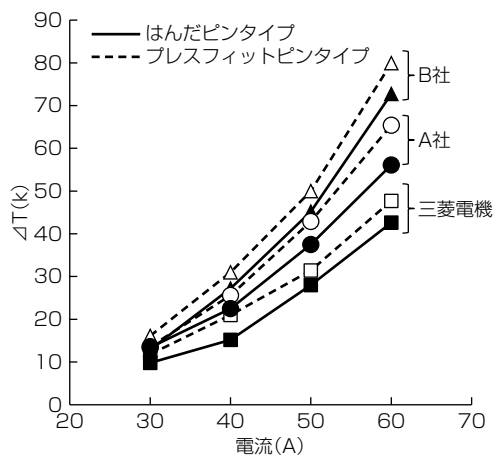
(a) 制御基板パターンの発熱評価モデル(イメージ図)



<測定条件>		<通電条件>	
・制御基板	: t=1.6mm	・雰囲気温度	: 常温(25℃)
・回路パターン厚	: 70μm(銅)	・通電時間	: 10分
・CIB-Sパッケージ		・冷却方式	: 空冷

(b) 制御基板パターンの発熱評価サーモビューア画像

図4. 制御基板パターンの発熱評価方法



* 通電時間10分後の最大温度をプロット
* 測定条件・環境によって発熱温度は異なる

図5. 制御基板パターンの発熱評価結果

いる形状(ピン連結型)を設けており、競合他社より低い電流密度を実現していることで、競合他社より制御基板パターンを発熱抑制ができていると考察している。図6にピン端子の構造比較を示す。

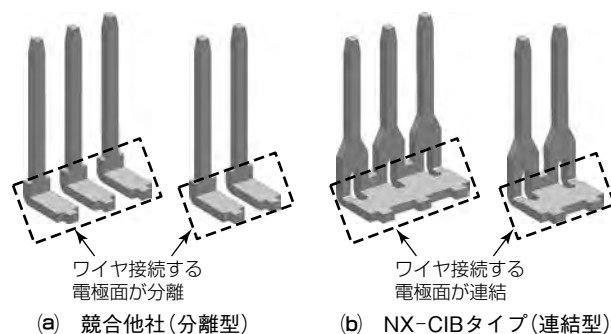


図6. ピン端子の構造比較

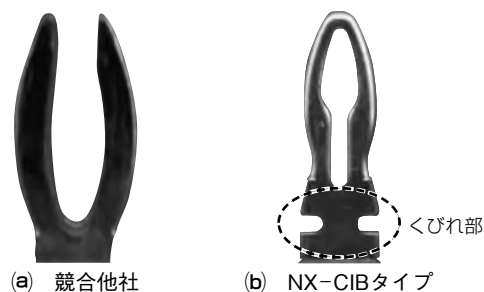
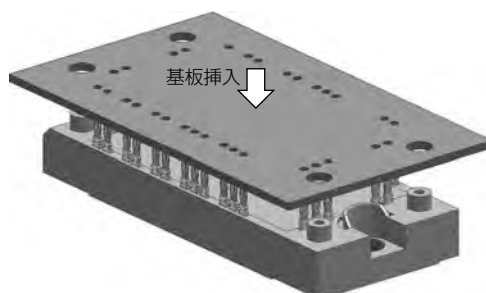


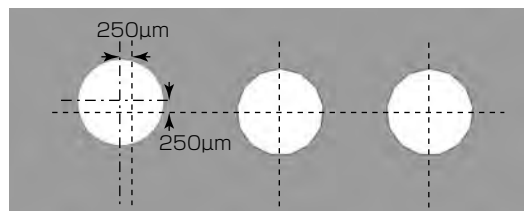
図7. プレスフィットピンの形状比較

表1. プレスフィットピン挿入力・抜去力評価

	競合他社	NX-CIBタイプ
挿入力	74~93N/pin	60N/pin(Typ.)
抜去力	45~49N/pin	52N/pin(Typ.)



(a) 評価モデルのイメージ図



基板材料	FR-4
基板厚み	1.6mm
銅厚	25μm
スルーホール直径	φ2.2+0.09/-0.06mm
表面仕上げ	無電解スズ

(b) 制御基板スルーホール部の拡大図

図8. 温度サイクル試験の評価内容

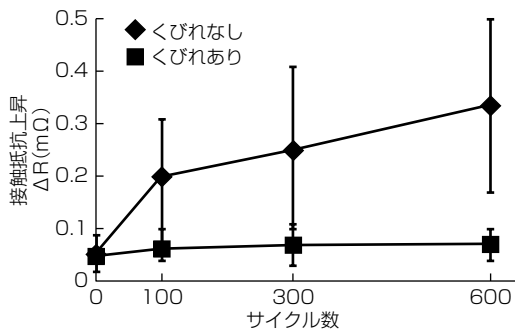
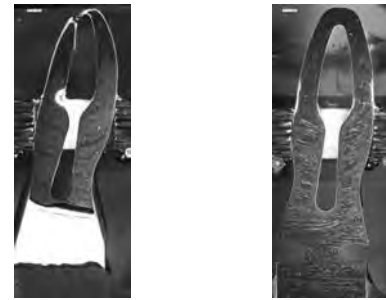


図9. 温度サイクル試験の評価結果⁽²⁾



(a) くびれなし (b) くびれあり

図10. 温度サイクル試験後のスルーホール部断面図

表2. NX-CIBタイプ製品ラインアップ(PC-TIM塗布のオプションを準備)

定格	Tシリーズ		T1シリーズ	
	CIB-Sパッケージ	CIB-Mパッケージ	CIB-Sパッケージ	CIB-Mパッケージ
650V	50A	CM50MXUB-13T CM50MXUBP-13T	-	CM50MXUB-13T1 CM50MXUBP-13T1
	75A	CM75MXUB-13T CM75MXUBP-13T	CM75MXUDP-13T	CM75MXUB-13T1 CM75MXUBP-13T1
	100A	CM100MXUB-13T CM100MXUBP-13T	CM100MXUD-13T CM100MXUDP-13T	CM100MXUB-13T1 CM100MXUBP-13T1
	150A	-	CM150MXUD-13T CM150MXUDP-13T	CM150MXUB-13T1 CM150MXUBP-13T1
1,200V	35A	CM35MXUA-24T CM35MXUAP-24T	-	CM35MXUA-24T1 CM35MXUAP-24T1
	50A	CM50MXUA-24T CM50MXUAP-24T	-	CM50MXUA-24T1 CM50MXUAP-24T1
	75A	CM75MXUB-24T CM75MXUBP-24T	CM75MXUC-24T CM75MXUCP-24T	CM75MXUB-24T1 CM75MXUBP-24T1
	100A	-	CM100MXUC-24T CM100MXUCP-24T	CM100MXUB-24T1 CM100MXUBP-24T1
	150A	-	CM150MXUD-24T CM150MXUDP-24T	CM150MXUB-24T1 CM150MXUBP-24T1

3.2 プレスフィットピン

NX-CIBタイプでは、三菱電機で新規開発したニードルアイ形状のプレスフィットピンを採用している(図7)。ニードルアイ構造によって、競合他社より挿入力が小さく、抜去力が大きくなっている。表1に競合他社との挿入力・抜去力の比較評価結果を示す。三菱電機プレスフィットピンは挿入しやすく、抜けにくい構造となっている。また、三菱電機プレスフィットピンでは胴体部にくびれ構造を設けており、制御基板の温度上昇の要因となる接触熱抵抗の増加を抑制できるため、スルーホール位置の公差を競合他社の±0.05mmから±0.1mmまで高めることが可能になった。

さらに、くびれ構造はプレスフィット接続部への負荷を軽減している。評価として、負荷の高い制御基板が位置ずれした状態で温度サイクル試験(−40〜85℃、各1時間)を実施して接触熱抵抗を比較した。図8に評価内容、図9に評価結果、図10に温度サイクル試験後のスルーホール部の断面観察結果を示す。くびれなしの場合はプレスフィット部が塑性変形して接触部が極端に少なくなっているのに対し、くびれありの場合はくびれ部が優先的に塑性変形することでプレスフィット部の異常な塑性変形を抑制できている。結果としてスルーホールの両壁面に対して十分な接触面積を維持できていることを確認できた。そのため、温

度サイクル試験後の接触熱抵抗の上昇を抑制し、高い信頼性の確保が可能になった。

3.3 製品ラインアップ

NX-CIBタイプは多様なユーザーニーズに対応できるように、幅広いラインアップをそろえている。表2に製品ラインアップを示す。

4. む す び

NX-CIBタイプは、サーマルサイクル寿命を考慮する必要がなく、最新プレスフィット技術を適用することによって高い信頼性を実現している。特性の異なるTシリーズとT1シリーズで幅広いラインアップをそろえており、今後市場に展開することで、様々な産業用途のニーズに役立てていく。

参 考 文 献

- (1) 宮澤雅臣, ほか: 産業用第7世代IGBTモジュールの“Tシリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 295~298 (2016)
- (2) 江草 稔, ほか: パワーモジュールに適用するためのプレスフィット接続技術の開発, 第24回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム, 85~90 (2018)

第7世代IPM“G1シリーズ”の ラインアップ拡充

青木伸親*
米山 玲*
塚本英樹**

Expanded Lineup of 7th Generation IPM "G1 - Series"

Nobuchika Aoki, Rei Yoneyama, Hideki Tsukamoto

要 旨

地球環境保全の目的から世界中で省エネルギー化への取り組みが盛んに行われている。省エネルギー化への取り組みのキーパーツとして、大電力の電力変換を担うパワー半導体は必要不可欠である。このパワー半導体には“高効率”、“小型”、“高信頼性”が市場ニーズとして求められている。近年、中国・アジア地域での工場自動化が急成長しており、特に駆動回路と保護回路を一つのモジュール内に搭載したインテリジェントパワーモジュール(IPM)は製品の扱いやすさから多くのユーザーに使用されている。IPMはサーボやインバータ、新エネルギー分野など用途が多岐にわたるため、ユーザーによって使用環境・実装方法に対する要求は様々である。

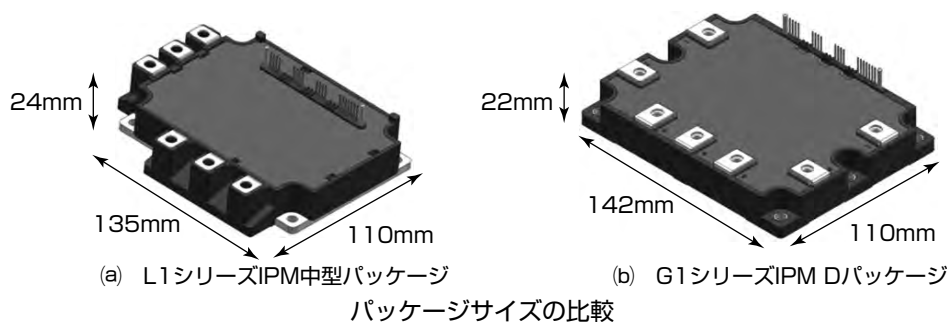
7世代IPM“G1シリーズ”は製品定格に応じて3タイプ

のパッケージを展開していたが、今回、高出力・高放熱といった市場のニーズに応えるため、“Dパッケージ”を新規に開発し、ラインアップを拡充した。G1シリーズDパッケージは次の特長を持ったパワーモジュールである。

- (1) 低損失の7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とダイオードを採用し、大容量化した。
- (2) モジュールサイズを従来品である“L1シリーズ”相当とし、より高出力用途を希望するユーザーに対応して、パッケージの放熱性能を向上させた。
- (3) G1シリーズ“Aパッケージ”、“Bパッケージ”と主端子の高さをそろえ、また、P-N端子をモジュール左右から出すことで、ユーザーでの設計自由度を向上させた。

	25A	50A	75A	100A	150A	200A	300A	450A
L1シリーズ 600V定格		L1-小型pkg				L1-中型pkg		
G1シリーズ 650V定格		G1-Apkg					G1-Cpkg	
		G1-Bpkg					G1-Dpkg	
L1シリーズ G1シリーズ 1,200V定格		L1-小型pkg				L1-中型pkg		
		G1-Apkg					650V/450Aの 製品を先行開発	
		G1-Bpkg						
					G1-Cpkg			
					G1-Dpkg			

製品ラインアップ(G1/L1シリーズ)



7世代IPM“G1シリーズ”のラインアップ拡充

G1シリーズIPMでは、定格電圧650V品で450A、定格電圧1,200V品で200Aまで製品ラインアップを拡充した。今回、高出力用途を希望するユーザー向けに、放熱性能に特化したDパッケージ(Dpkg)をラインアップした。また、Dpkgではパッケージサイズを110×142×22(mm)とし、G1シリーズIPMの中では最大のパッケージサイズとした。これはL1シリーズIPM中型パッケージ(L1-中型pkg)と同程度のパッケージサイズだが、L1シリーズよりも高出力で使用できる。

近年、中国、アジア地域での工場の自動化が急成長している。工場の自動化にはサーボやインバータといった電力変換を必要とするパワー半導体が欠かせない。特に駆動回路と保護回路を一つのモジュール内に搭載したインテリジェントパワーモジュール(IPM)は製品の扱いやすさ、高信頼性から多くのユーザーに使用されている。IPMの用途はサーボやインバータだけではなく、太陽光発電や風力発電といった新エネルギー分野など多岐にわたるため、ユーザーによって使用環境・実装方法に対する要求は様々である⁽¹⁾。“高効率”、“小型”、“高信頼性”への要求が年々増加しており、高出力で高い放熱性能を兼ね備えたパワーモジュールが必要とされている。このような市場のニーズに対応するため、7世代IPM(G1シリーズIPM)を開発した。今回、G1シリーズIPMにDパッケージを追加し、ラインアップを拡充した。

パワーモジュールは近年小型化やラインアップの充実化が求められている。特にユーザーで一つの筐体(きょうたい)の中にパワーモジュールを複数実装することも多く、筐体の小型化を実現するためにパワーモジュールの狭幅・小型化・容量拡大の要求が強い。G1シリーズIPMは従来製品であるL1シリーズIPMからこれらの要求を実現した製品である。G1シリーズIPMとL1シリーズIPMの製品ラインアップを図1に示す。G1シリーズIPMは製品定格に応じてAパッケージ(Apkg), Bパッケージ(Bpkg), Cパッケージ(Cpkg), 今回述べるDパッケージ(Dpkg)の4タイプを展開している。L1シリーズIPMは定格電圧600V品では300Aまで、定格電圧1,200V品では150Aまでのラインアップであったが、G1シリーズIPMでは定格電圧650V品で450A、定格電圧1,200V品で200Aまで製品ラインアップを拡充した。

G1シリーズIPMは7世代IGBT“CSTBT”とダイオードを採用し、従来品であるL1シリーズから低損失化を実現した。

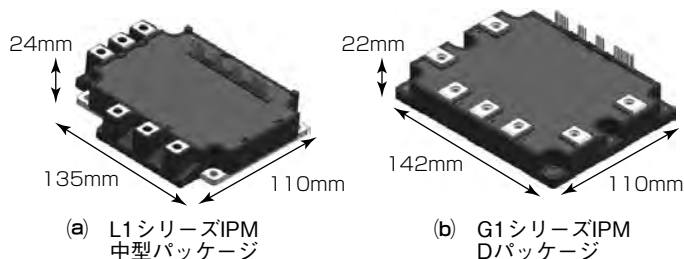
	25A	50A	75A	100A	150A	200A	300A	450A
L1シリーズ 600V定格 G1シリーズ 650V定格		L1-小型pkg			L1-中型pkg			
		G1-Apkg						
		G1-Bpkg						
						G1-Cpkg		
						G1-Dpkg		
L1シリーズ G1シリーズ 1,200V定格		L1-小型pkg			L1-中型pkg			
		G1-Apkg						
		G1-Bpkg						
				G1-Cpkg			650V／450Aの 製品を先行開発	
				G1-Dpkg				

また、G1シリーズIPMは同定格のL1シリーズIPMからパッケージサイズ比で実装面積をBpkgで25%、Cpkgで31%を削減し、インバータ機器などの小型化と軽量化に貢献している。

G1シリーズIPMでは各パッケージで定格を重複させることでユーザーは用途に応じてパワーモジュールを使い分けることができる。例えば、従来のL1シリーズ小型パッケージ(L1-小型pkg)定格の内、100A以下ではユーザーの用途によって、G1シリーズApkgとBpkgの二つのパッケージから選択可能である。また、200AではG1シリーズBpkgとCpkgから選択可能とした。これによって、ユーザー側でシステム設計の際にパッケージの共通化などの自由度が広がった。今回述べるG1シリーズDpkgはCpkgと重なる定格ラインアップでパッケージを追加した。L1シリーズから最大定格を拡充する中で、Cpkgは小型化に特化したパッケージであったが、高出力用途を希望するユーザーに向けに、放熱性能に特化したDpkgをラインアップした。今回、G1-Dpkgの中でも最大定格である650V/450Aの製品を先行して開発を行った。

一般的にパワーモジュールはシステムの起動、停止動作を繰り返すことでケース温度が変化する。この際、熱ストレスが構成部材にかかり、部材間の線膨張係数の違いによって接合材であるはんだ層の劣化が進行する。7世代IPM(G1シリーズIPM)では樹脂絶縁銅ベース板を採用することで、絶縁層と放熱ベース板を一体化し、絶縁基板下のはんだを使わない構造(はんだレス構造)としている。また、封止材にエポキシ系樹脂を用いたダイレクトポッティング構造を採用した。G1シリーズIPMでは絶縁基板下のはんだレス構造とすることで、絶縁基板下のはんだ劣化に起因するサーマルサイクル耐量を向上させ、モジュールの高信頼性化を達成した⁽²⁾。今回ラインアップに追加したG1シリーズDpkgでもこれらの構造を採用している。

また、Dpkgではパッケージサイズを110×142×22(mm)とし、G1シリーズIPMの中では最大のパッケージとした(図2)。これは従来品であるL1シリーズIPM中型パッケージ(L1-中型pkg)と同等程度のパッケージサイズだが、L1シリーズIPMよりも高出力で使用できる。



2.3 電気的特性・搭載機能

G1シリーズIPMではEMI(放射)ノイズ低減のため、低ノイズIGBT駆動回路を搭載している。低ノイズIGBT駆動回路の原理を図3に示す。G1シリーズは低電流領域のスイッチング速度を遅くすることでEMIノイズの発生を低減し、大電流領域(定格電流)ではスイッチング速度を早く設定し、発生損失を低減するスイッチング速度切替え機能がある。スイッチング速度切替えはチップ内に内蔵された素子を使用することでIGBTに流れる電流をリアルタイムに制御ICで検出し、あるしきい値以上でスイッチング速度が自動的に切り替わる仕様になっている。この切替えポイントはユーザー側の特性を最大限に引き出すように設計を最適化している。G1シリーズIPMとL1シリーズIPMを用いて発生損失シミュレーションを実施した結果を図4に示す。G1シリーズIPMの発生損失は定常運転モードを想

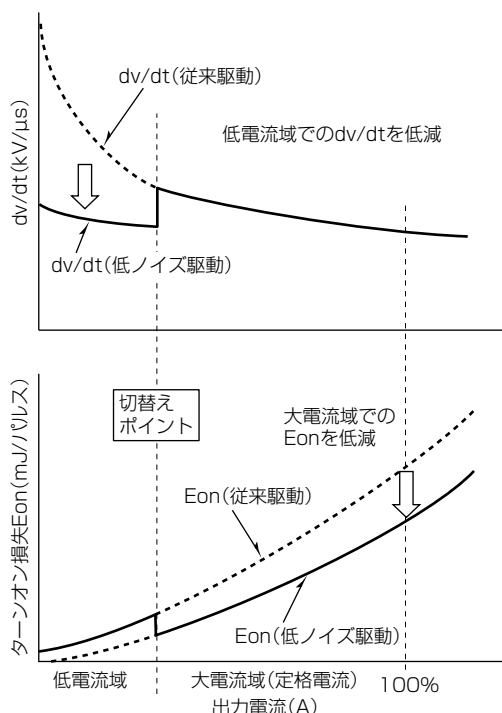


図3. 低ノイズIGBT駆動回路の原理

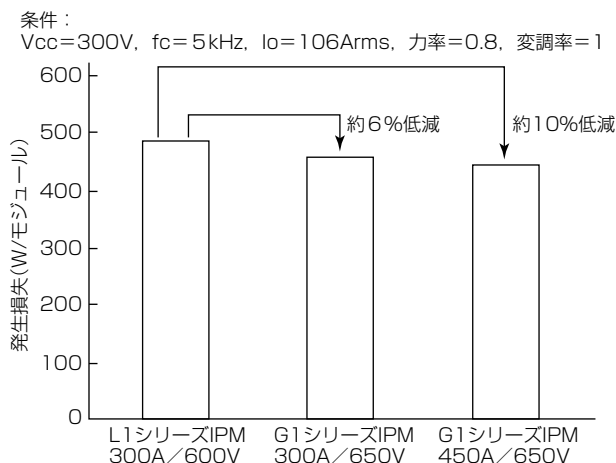


図4. 定常運転モードでの発生損失シミュレーションの比較

定した場合、L1シリーズよりも同定格品(300A/650V)で約6%、最大定格品(450A/650V)で約10%低減する。

また、G1シリーズIPMではエラー信号を発生させるとともに、保護機能(加熱保護(OT)、制御電源電圧低下保護(UV)、短絡保護(SC))がある。今回、G1シリーズIPMではエラー信号に各種保護動作の識別機能を追加した。各保護機能に対応したエラー信号時間を設定しており、保護機能が働いた際に規定のエラー信号時間がユーザーへ出力される。ユーザーでエラー出力を検知することでどのような異常が発生しているかを把握することが可能になった。

3. G1シリーズ Dpkgの特長

3.1 放熱性能の向上

G1シリーズDpkgでは放熱性能を向上させるため、放熱に寄与する樹脂絶縁銅ベース板サイズを101×117(mm)とし、G1シリーズの中では最大放熱面積となっている。放熱面積拡大に加え、7世代のIGBTとダイオードを採用したことでの発生損失低減効果、各チップの熱干渉を考慮したチップ配置による発熱抑制効果によってチップ温度が上昇しにくい設計としている。L1シリーズの最大定格品(300A/600V)とG1シリーズDpkgの最大定格品(450A/650V)での発熱シミュレーションの比較結果を図5に示す。同一の電流出力条件で比較した場合、G1シリーズDpkgのチップ温度はL1シリーズと比べて約10%低減することを確認した。

3.2 ユーザー設計自由度の向上

アプリケーションによっては一つのユニットで複数のモータを駆動する場合があるが、出力容量に応じて異なるパッケージのモジュールを複数使用することになる。この際、モジュールのパッケージ高さが異なるとユニットのシステム設計が複雑になる。それに対して、今回は高出力用途向けのDpkgのパッケージ高さを小・中出力向けのApkg、Bpkgとそろえて22mmにしたことで、高・中・小出力に対応した各パッケージを容易に組み合わせて使用できる。また、同一平面のヒートシンクにモジュールを配置した場合、制御基板の高さを統一化(1枚化)することができる。これによって基板間を接続するコネクタやハーネ

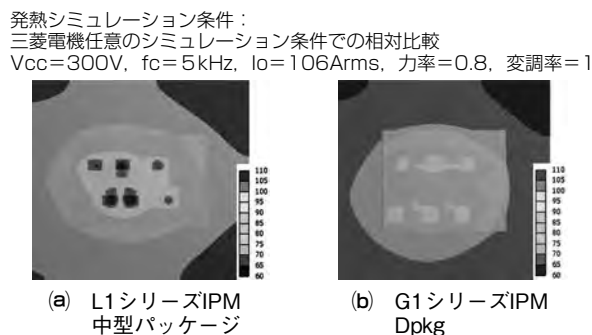


図5. 発熱シミュレーションの比較結果

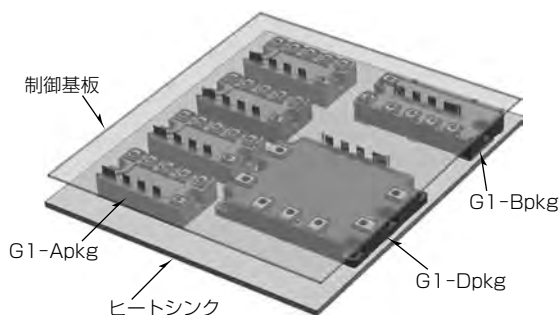


図6. パッケージ高さの統一による同一平面での基板共通化例

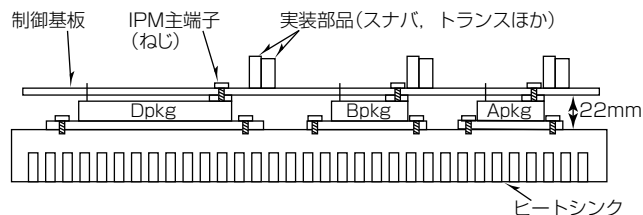


図7. ヒートシンクと制御基板への実装例

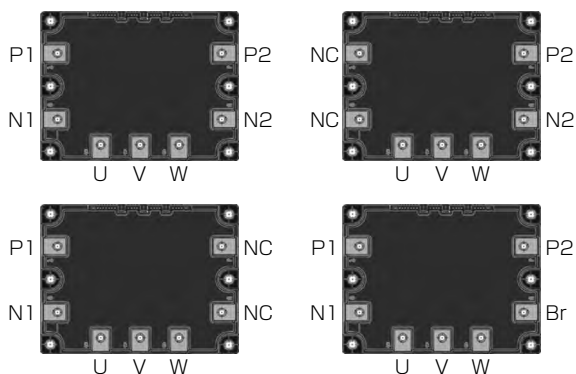


図8. G1シリーズDpkgの主端子配置

スの削減など、ユニット設計の容易化、部品点数の削減などを可能にした(図6、図7)。

また、L1シリーズIPMのパッケージはP-N電極は1箇所固定されていたが、DpkgはP-N電極を2箇所設けることでユーザーの設計自由度を向上させた。図8にDpkgの主端子配置のラインアップを示す。P-N端子をモジュール両側からP1-N1、P2-N2と配置した場合、図9のように平行平板配線と反対側の主端子にスナバコンデンサ(スナバC)を配置することができ、パワーモジュールに発生するサージ電圧の抑制効果が高めることができる。一方、P-N端子を左側だけ、又は右側だけというように限定して使用することも可能である。この場合、ユーザーはユニット側でのモジュールレイアウトを図10(a)、(b)のようにすることができ、設計の自由度が広がる。

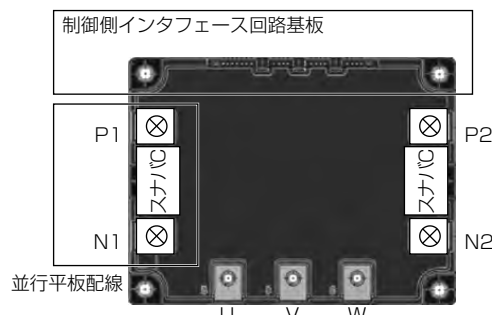
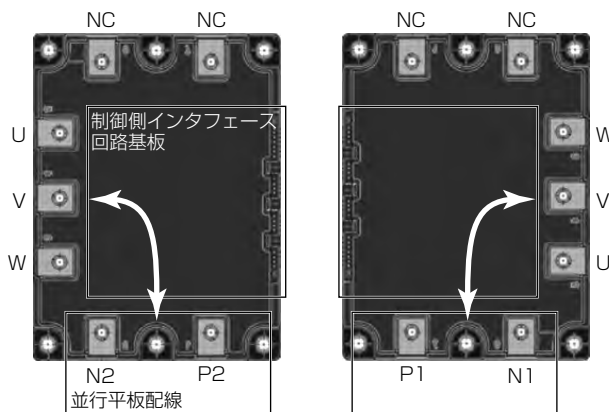


図9. G1シリーズのDpkg配線例 1



(a) P2-N2を主端子とした場合 (b) P1-N1を主端子とした場合

図10. G1シリーズDpkgの配線例 2

4. む す び

G1シリーズIPMのDパッケージの特長を中心に述べた。このIPMは従来品であるL1シリーズIPMから製品定格を拡大するとともに、放熱性能の向上、電極レイアウト自由度の向上、パッケージ高さの統一化を盛り込んだ。G1シリーズはDパッケージを追加することでパッケージ選択肢を拡大し、出力容量別ラインアップを充実化して、多様化する市場要求に対応した製品になったと考える。今後は多様なアプリケーションを想定し、Dパッケージを活用して電源回生コンバータ等に応用することを検討中である。

参 考 文 献

- (1) 魚田紫織, ほか: 新大容量 2 in 1 “V1シリーズ”, 三菱電機技報, 84, No.4, 248~250 (2010)
- (2) 木村義孝, ほか: 産業用第7世代IPM“G1シリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 299~302 (2016)

超小型フルSiC“DIIPM”

波部毅代登* 谷岡寿一*
古橋壮之**
酒井伸次*

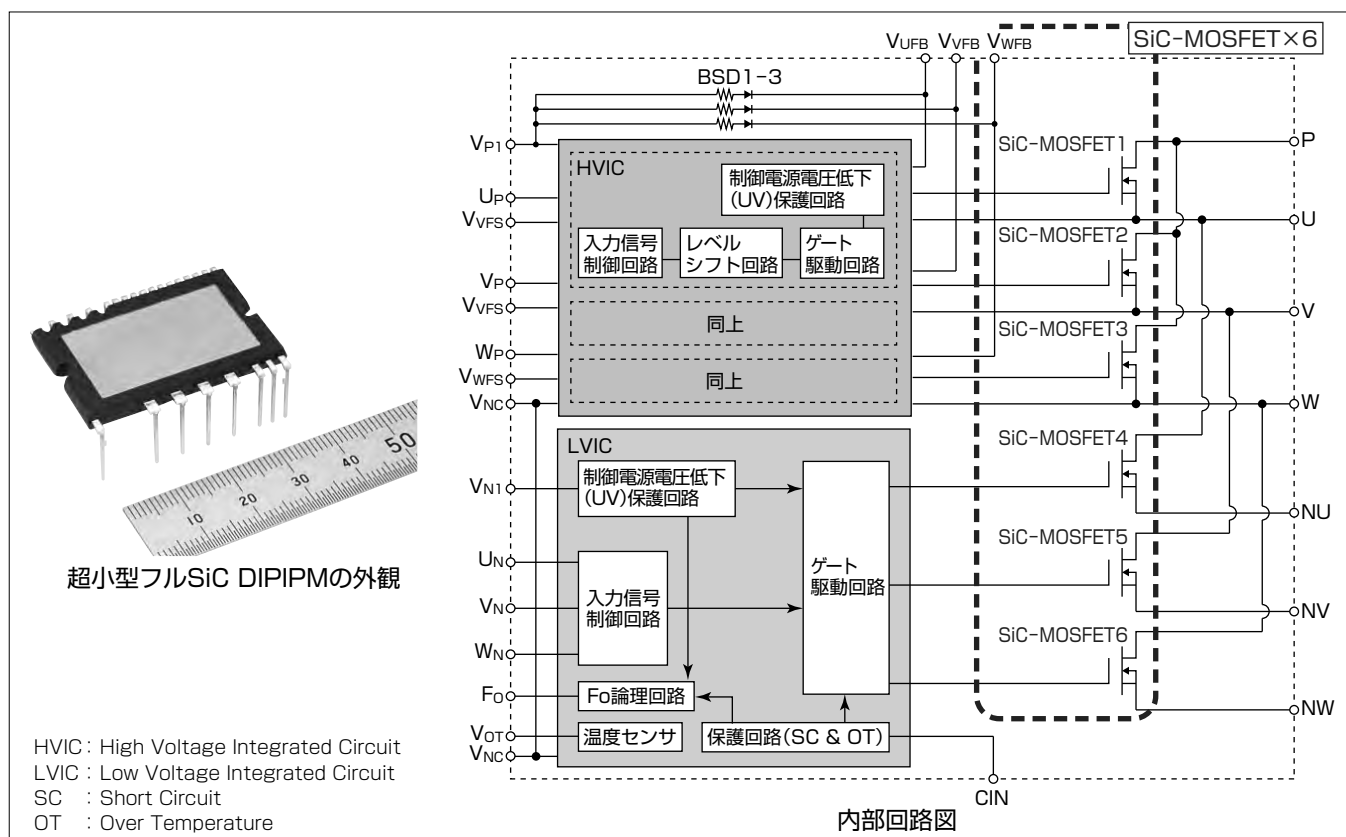
Super-mini Full SiC "DIIPM"

Kiyoto Watabe, Masayuki Furuhashi, Shinji Sakai, Toshikazu Tanioka

要 旨

三菱電機は1997年から“DIIPM”を製品化し、エアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電や産業用モータのインバータ駆動に多数採用されてきた。ここで培った技術をベースに、2010年にインバータを構成する整流素子にSiC（シリコンカーバイド）-SBD（Schottky Barrier Diode）を採用したハイブリッドDIIPMを製品化した。2016年11月に正式発効したパリ協定によって、世界各国で省エネルギー化技術がますます注目されている。そこで家電機器の更なる省エネルギー化に向けたパワー半導体モジュールの新製品として超小型フルSiC DIIPMを製品化した。

モジュールを構成するSiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）は、当社が独自開発したゲート酸化膜形成プロセスと新規セルシュリンク技術の組合せによって、低オン抵抗と高いしきい値電圧の両方を実現した。オン抵抗はゲート電圧18Vで73mΩ程度、しきい値電圧は4V以上にしてゲート負バイアス回路をなくすことで、現在主流の超小型DIIPM“Ver. 6シリーズ”と同一パッケージへの搭載を可能にし、この製品の電力損失を従来製品に比べて約74%と大幅に低減できた。



超小型フルSiC“DIIPM”の外観と内部回路図

超小型フルSiC DIIPMには当社独自の新規ゲート酸化膜形成法によって低オン抵抗と高いしきい値電圧の両立を実現したSiC MOSFETを搭載することで、パワーモジュールのゲート負バイアス回路の削減を可能にし、従来製品との互換性を確保した。SiC-MOSFETを採用することによって、従来製品に比べてスイッチング損失を74%低減できることを実証した。

1. ま え が き

当社のDIIPMはパワーチップと駆動・保護機能を持つ制御用ICチップを内蔵したトランスファーマールド構造のIPMであり、これまでもエアコン、洗濯機、冷蔵庫等の白物家電機器に適用することによって、インバータユニットの小型化と省エネルギー化に貢献してきた⁽¹⁾。地球環境保護意識の高まりから、世界的にも省エネルギー化技術が注目されている。省エネルギーでリードする日本の空調機器業界では新たな省エネルギー基準であるAPF (Annual Performance Factor: 通年エネルギー消費効率)を導入し、軽負荷時などの使用時に近いエアコンの効率向上を追求している。当社では2010年からインバータを構成する整流素子にSiC-SBDを採用したハイブリッドDIIPMを製品化した。ハイブリッドDIIPMは従来品に比べて電力損失が30%低く、当社ルームエアコンのインバータのスイッチング損失を60%低減した。今回、家電機器の更なる省エネルギー化を果たすために、DIIPMのキーパーツであるスイッチング素子をSi(シリコン)-IGBT(Insulated Gate Biopolar Transistor)からSiC-MOSFETに置き換えた超小型フルSiC DIIPMを開発した。

本稿では、超小型フルSiC DIIPMの開発について述べる。

2. フルSiC DIIPM用SiC-MOSFETの開発

SiCはSiに比べ絶縁破壊強度が約10倍大きく、熱伝導率が約3倍高いことから、次世代パワーデバイス材料として期待されて研究開発が盛んに行われている。しかし、SiC-MOSFETはオン抵抗としきい値電圧の間にトレードオフ関係があり、両立させることは難しかった。そのためSiC-MOSFET回路内で生じるノイズによる誤動作を防止する目的でパワーモジュール内にゲート負バイアス回路を設けることが一般的であった。

一方、フルSiC DIIPMの製品化に当たっては、従来の超小型DIIPMと外形サイズやピン配置の互換性を保つことが不可欠であり、プリント基板の変更コストを最小限にするためにゲート負バイアス回路の削減が必要であった。

当社ではSiC-MOSFETのオン抵抗としきい値電圧のトレードオフを改善するために、新しいゲート酸化膜の形成プロセスを開発した⁽²⁾。従来の製造方法では、キャリア移動度が $35\text{cm}^2/\text{Vs}$ でのしきい値電圧が1.3Vである一方、新プロセスでは図1に示すように同じキャリア移動度でしきい値電圧を4.0V程度に向上できる。この技術は2012年から生産中のフルSiC“DIPFC”に搭載したSiC-MOSFETに先行適用している。さらにSiC MOSFETのオン抵抗低減の新技术としてセルピッチの縮小を盛り込んだ⁽³⁾⁽⁴⁾。図2にSiC-MOSFETの断面図を示す。チャネル抵抗を低減するために、SiC-MOSFETのJFET (Junction Field Effect

Transistor)領域の縮小を行い、JFET領域にドナー不純物をイオン注入することで、セルピッチの縮小と低JFET抵抗の実現を両立させた。

図3にSiC-MOSFETのドレイン電圧-電流特性を示す。

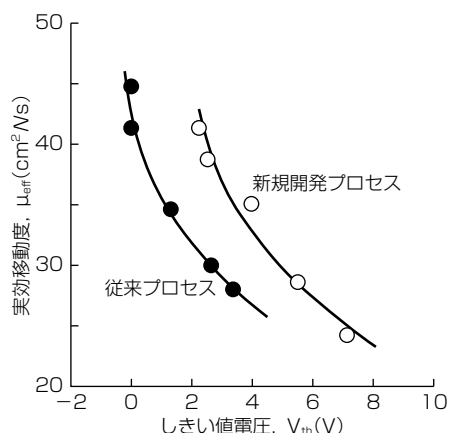


図1. しきい値電圧とチャネルでのキャリア移動度の関係

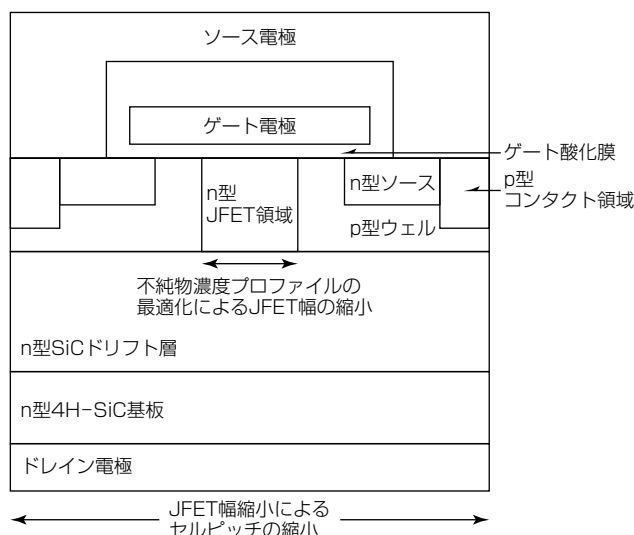


図2. SiC-MOSFETの断面図

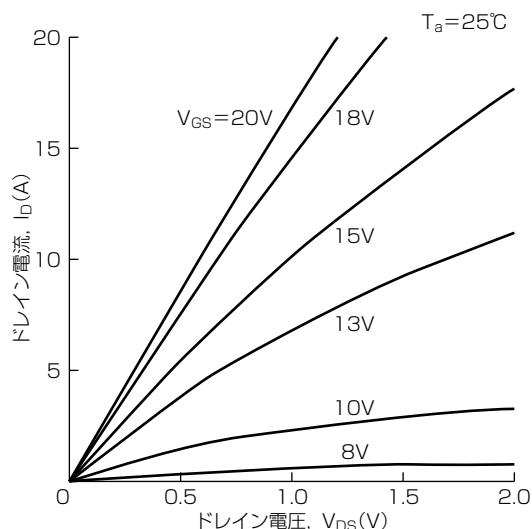


図3. SiC-MOSFETのドレイン電圧-電流特性

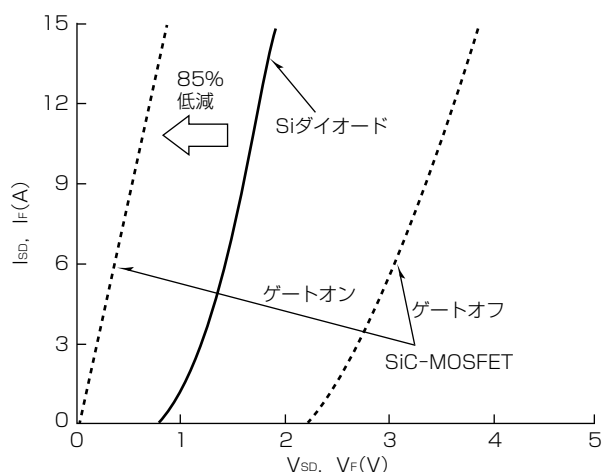


図4. 逆導通特性

ゲート-ソース間電圧が18Vのときに定格電流である15Aを得るオン抵抗は73mΩであり、高いしきい値電圧と低オン抵抗の両方を実現できた⁽⁵⁾。

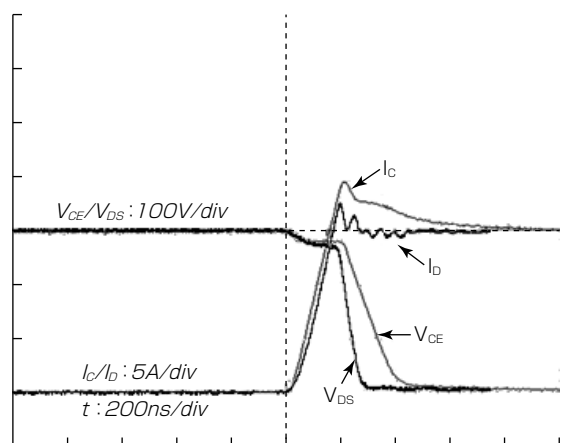
一般的なSi-IGBTと異なり、SiC-MOSFETは同期整流によって、還流電流を逆導通することができる。このため、従来Si-IGBTで不可欠であったFWD(Free Wheeling Diode)の削減が可能である。図4に示すようにSiC-MOSFETの逆導通損失はSiダイオードの逆導通損失よりも小さく、およそ85%低減する。しかし、同期整流が始まるまでの一定期間、ターンオフごとに還流電流の一部がSiC-MOSFETのボディダイオードに流れる。SiCデバイスの開発課題の一つにバイポーラ電流によって結晶内の積層欠陥が拡張するバイポーラの通電劣化があり、このボディダイオードの通電による特性劣化の防止には、エピタキシャル層内のBPD(Basal Plane Dislocation：基底面転位)密度の低減やウェーブプロセスでの熱処理履歴の最適化などの多くの工夫が必要である。

3. 超小型フルSiC DIIPM

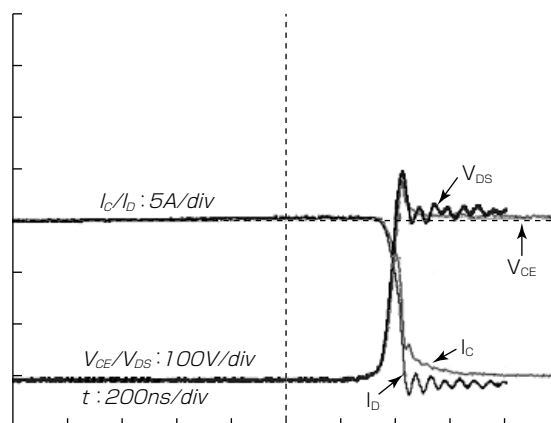
超小型フルSiC DIIPM⁽⁶⁾は、三相インバータの構成に六つのSiC-MOSFETが使用される。また高圧IC、低圧ICがSiC-MOSFETの駆動と保護を行い、BSD(Boot Strap Diode)と外付けのキャパシタによって単一電源での駆動を可能にしている。低圧ICは温度情報をアナログ電圧で出力可能で、この温度情報を基に定格値の温度上限まで製品を有効利用できる。

図5にターンオン時とターンオフ時のスイッチング特性の波形比較を示す。従来品で使用するSi-IGBTはバイポーラデバイスであるため、ターンオフ時にテール電流を生じ、スイッチング損失の増加をもたらす。一方、SiC-MOSFETはユニポーラデバイスのため、スイッチング時にテール電流は発生しない。この違いがスイッチごとの電力損失の差となる。

表1に超小型フルSiC DIIPMの電氣的製品仕様を示す。



(a) ターンオン時



(b) ターンオフ時

図5. スwitching特性の波形比較

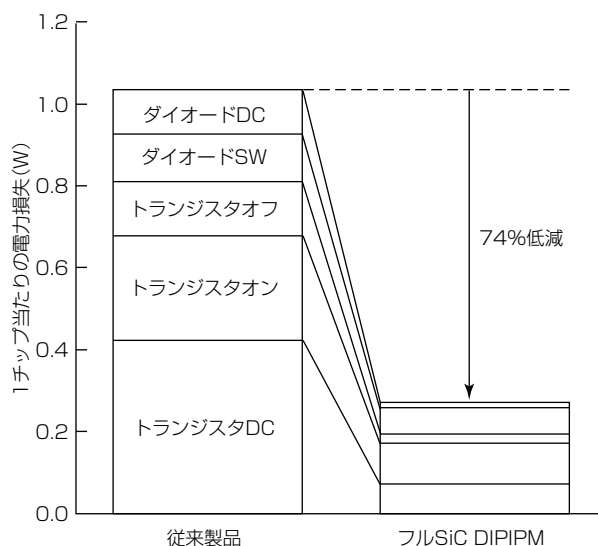


図6. 電力損失比較

このようにフルSiC DIIPMは従来製品に比べ、損失を大幅に低減できるとともに、動作周波数の向上やインバータ回路の小型化などが可能になる。図6に従来製品とフルSiC DIIPMの電力損失比較を示す。フルSiC DIIPMは50kHzまでの高速動作が可能であり、スイッチング損失は従来製品に比べ、74%低減できることを実証した⁽⁷⁾。

表 1. 超小型フルSiC DIIPMの電氣的製品仕様

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
ドレイン-ソース間オン電圧	$V_{DS(on)}$	$V_D = V_{DB} = 18V$ $I_D = 15A, V_{IN} = 5V$	$T_{CH} = 25^{\circ}C$ —	1.10	1.80	V
ソース-ドレイン間ダイオード電圧降下	$V_{SD(off)}$	$V_D = V_{DB} = 18V, -I_D = 15A, V_{IN} = 0V$	—	4.00	5.00	V
スイッチング時間	t_{on}	$V_{DD} = 300V, V_D = V_{DB} = 18V$ $I_D = 15A, T_{CH} = 125^{\circ}C$ $V_{IN} = 0 \sim 5V$ 誘導負荷	0.70	1.30	1.85	μs
	t_{rr}		—	0.10	—	
	$t_{c(on)}$		—	0.10	0.36	
	t_{off}		—	1.50	2.10	
	$t_{c(off)}$		—	0.10	0.18	
回路電流	I_D	$V_{P1} - V_{NC}, V_{N1} - V_{NC}$ の総和	$V_D = 18V, V_{IN} = 0V$	—	—	mA
			$V_D = 18V, V_{IN} = 5V$	—	—	
	I_{DB}	$V_{UFB} - U, V_{VFB} - V, V_{WFB} - W$	$V_D = V_{DB} = 18V, V_{IN} = 0V$	—	—	
			$V_D = V_{DB} = 18V, V_{IN} = 5V$	—	—	
短絡保護トリップレベル	$V_{SC(ref)}$	$V_D = 18V$	0.455	0.480	0.505	V
アナログ温度出力	V_{OT}	プルダウン抵抗 $R = 5k\Omega$	LVIC温度 = $90^{\circ}C$	2.63	2.77	V
			LVIC温度 = $25^{\circ}C$	0.88	1.13	
P側制御電源電圧低下保護	UV_{DBt}	$T_{CH} \leq 125^{\circ}C$	トリップレベル	10.0	—	V
	UV_{DBr}		リセットレベル	10.5	—	
N側制御電源電圧低下保護	UV_{Dt}		トリップレベル	10.3	—	
	UV_{Dr}		リセットレベル	10.8	—	
BSD順電圧降下	V_F	$I_F = 10mA$, 内蔵抵抗Rの電圧降下含む	0.9	1.3	1.7	V

4. む す び

今回、製品化した超小型フルSiC DIIPMの性能、特長等について述べた。DIIPMに搭載するためにSiC-MOSFETの低オン抵抗を維持しながら、しきい値電圧を高くする技術について述べた。今後もフルSiC DIIPMの製品ラインアップを拡充し、市場要求に対応した製品開発をしていくことで、家電機器を中心にフルSiC DIIPMの需要拡大と省エネルギー化に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 加藤正博, ほか: 超小型DIIPM“Ver.6シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 285~288 (2014)
- (2) Furuhashi, M., et al.: Novel gate oxide process for realization of high threshold voltage in 4H-SiC MOSFET, Materials Science Forum, **778~780**, 985~988 (2014)

- (3) 谷岡寿一, ほか: 高しきい値電圧SiC-MOSFET製造技術, 三菱電機技報, **88**, No.5, 297~300 (2014)
- (4) Ebike, Y., et al.: Characteristics of High-Threshold-Voltage Low-Loss 4H-SiC MOSFETs with Improved MOS Cell Structure, Materials Science Forum, **858**, 829~832 (2016)
- (5) 古橋壮之, ほか: 超小型DIIPM用SiC-MOSFET, 三菱電機技報, **91**, No.7, 377~380 (2017)
- (6) Wang, Y., et al.: New Transfer Mold DIIPM™ utilizing silicon carbide(SiC) MOSFET, PCIM Europe, 336~341 (2016)
- (7) 渡部毅代登, ほか: SiC搭載DIIPMの開発と展望, 応用物理学会 先進パワー半導体分科会, **4**, No.2, 79~84 (2017)

車載用超小型“DIIPM”

秦 浩公*
 池田直輝*

Super Mini "DIIPM" for Automobile

Hiroyuki Hata, Naoki Ikeda

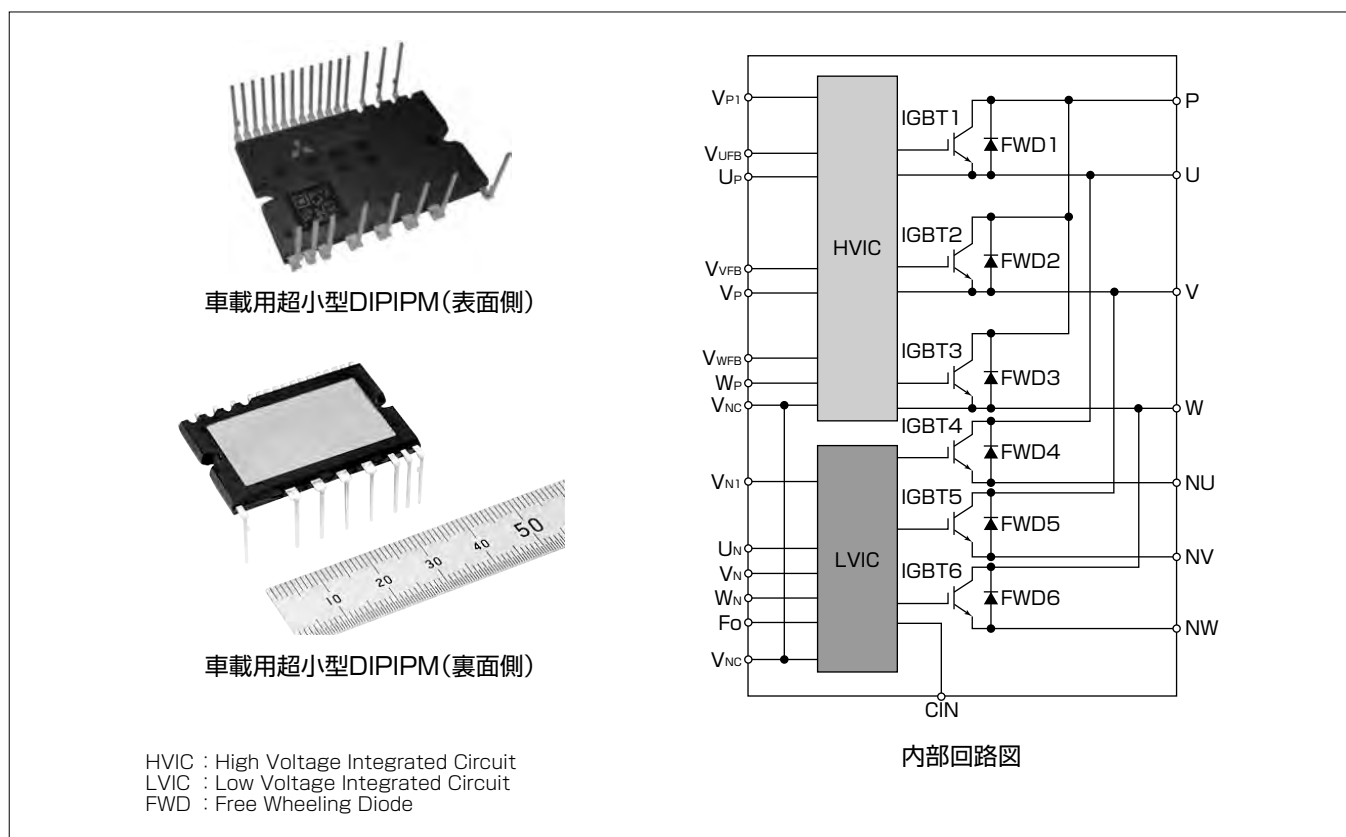
要 旨^{(1) (2)}

近年、世界的な地球環境保護への意識の高まりの中で、省エネルギー化がより一層重要視され始めた。温暖化対策の一つとして、電気自動車(Electric Vehicle：EV)、ハイブリッド車(Hybrid Electric Vehicle：HEV)等の環境対応車の普及が急速に進んでおり、ここで採用される半導体モジュールが重要部品となっている。三菱電機は1997年から“DIIPM”を製品化し、エアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電や、産業用モータのインバータ駆動に採用されてきた。ここで培った技術を駆使して、2008年から電動カーエアコン用インバータユニット向けに車載用小型DIIPMの量産を開始し、市場へ展開している。

近年のEV、HEV市場の発展は目覚ましく、電動カー

エアコン用インバータユニット向けの主要部品であるDIIPMについても、小型化、省エネルギー化及び性能改善がますます求められている。

このような市場要求に対応するため、当社では車載用超小型DIIPMを開発し、2015年2月から量産を開始した。このシリーズは、当社独自のパッケージ技術によって従来の車載用小型DIIPMに対して、体積比率を65%低減することでシステムの小型化を可能にし、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)発生損失の低減によって省エネルギー化を実現することでインバータシステム設計の自由度を向上させた。



車載用超小型“DIIPM”の外観及び内部回路図

車載用超小型DIIPMはIGBT×6素子、FWD×6素子によるインバータ回路と、それを駆動するHVICとLVICによって構成している。製品ラインアップは600V/30Aの1品種である。

1. ま え が き⁽¹⁾⁽²⁾

当社は1997年からDIIPMを製品化し、エアコン、洗濯機、冷蔵庫などの白物家電や産業用モータのインバータ駆動に多数採用されてきた。ここで培った技術を駆使して、2008年からは、車載用として小型DIIPMを製品化し、電動カーエアコン向けインバータユニットの小型化、省エネルギー化に貢献してきた。

近年、世界的に地球環境保護活動への意識が高まり、小型化、省エネルギー化がより一段と重要視されている。

このような市場要求に対応するため、従来の小型DIIPMに対して、体積比65%削減して小型化を図り、これに加えてIGBT最適化による損失低減を実現した車載用超小型DIIPMを開発した。

本稿では、車載用超小型DIIPMの概要、特長などについて述べる。

2. 車載用超小型DIIPMの概要⁽¹⁾

内部回路は三相AC出力インバータ構成のパワー回路部と制御用HVIC及びLVICから構成される。図1に内部回路図、図2に車載用超小型DIIPMの外観、表1に車載用超小型DIIPMの仕様をそれぞれ示す。

2.1 パワー回路部

IGBT(6素子)及びFWD(6素子)による三相AC出力インバータ回路を構成している。

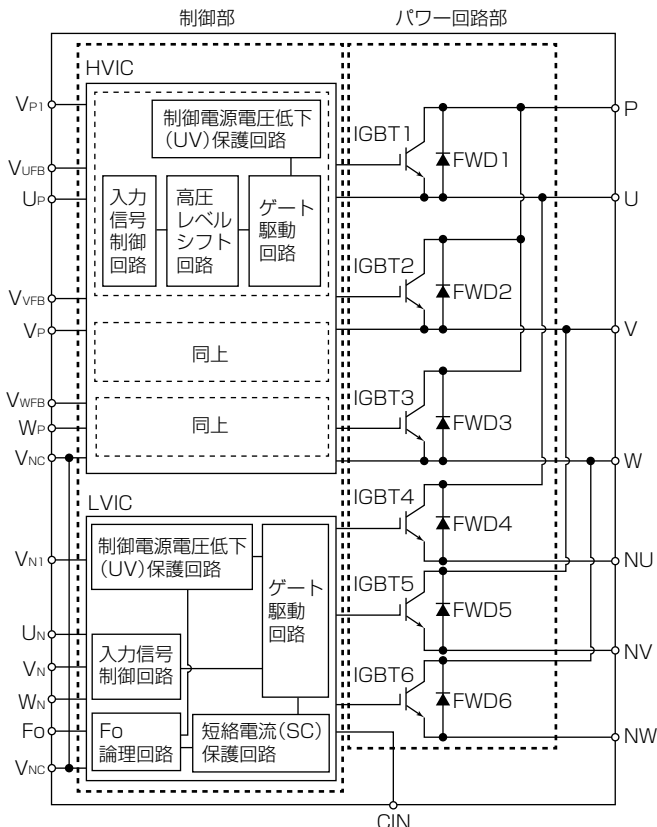


図1. 内部回路図

2.2 制 御 部

(1) HVIC(1素子)

P側IGBT用駆動回路、高圧レベルシフト回路、制御電源電圧低下保護(UV, Fo出力なし)回路を内蔵する。UV(Under Voltage)トリップレベルを超えれば当該相のIGBTゲートを遮断する。ブートストラップ回路方式の採用によって、15V単一電源駆動が可能になる。

(2) LVIC(1素子)

N側IGBT用駆動回路、制御電源電圧低下(UV)保護回路、短絡電流(SC)保護回路を内蔵する。UVトリップレベルを超えれば当該相のIGBTゲートを遮断するとともに外部へエラー信号(Fo)を出力する。

短絡電流保護回路は、外部接続シャント抵抗で過電流を検出し、SC(Short Circuit)レベルを超えれば当該相のIGBTゲートを遮断するとともに外部へエラー信号を出力する。

3. 車載用超小型DIIPMの特長⁽³⁾

3.1 小 型 化

図3に車載製品のパッケージサイズの比較を示す。システム基板の搭載スペース小容量化のためにパワーモジュールには小型化が求められる。車載用超小型DIIPMでは、従来の小型DIIPMに対して、①ICパッド部からIGBTゲートへのダイレクトワイヤボンド、②ハイサイドHVICのVS端子と出力端子の共通化を適用したことによって、パッケージ体積比の65%削減を実現した。

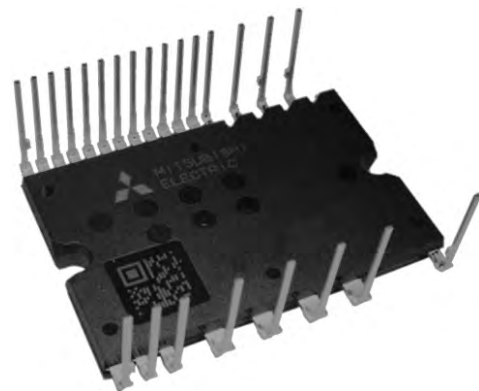


図2. 車載用超小型DIIPM(PS21997-J)

表1. 車載用超小型DIIPMの仕様

形名	PS21997-J
定格	30A/600V
外形サイズ	24.0×38.0×3.5(mm)
内蔵チップ	三相インバータを構成するIGBT, FWD, HVIC, LVICの各チップ
内蔵機能	制御電源電圧低下保護(UV)→N側保護動作時Fo出力 短絡保護(SC)(外付けシャント抵抗)→保護動作時Fo出力
その他	インバータN側分割エミッタ(3シャント)方式

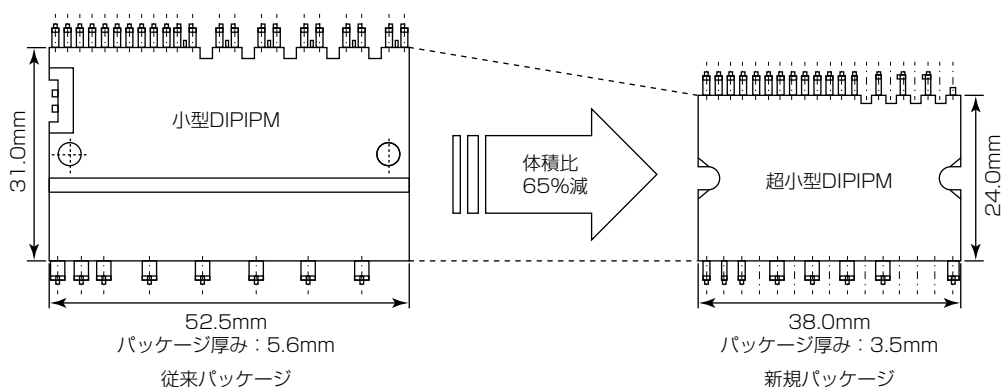


図3. パッケージサイズの比較

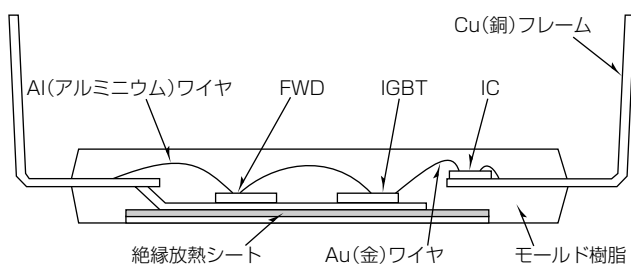


図4. 車載用超小型DIIPMの断面構造図

3.2 熱抵抗

図4に車載用超小型DIIPMの断面構造を示す。現行製品と同様に絶縁放熱シート構造を採用することによって低熱抵抗化を図っている。小型化を図りながら、IGBT熱抵抗 $R_{th(j-c)} = 2.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、FWD熱抵抗 $R_{th(j-c)} = 3.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$ を実現した。

3.3 通電能力

図5にはこの品種のターゲットとしている出力電流-IGBTチップの温度上昇特性を示す。低熱抵抗化によって小型化を実現したパッケージサイズで出力実効電流 15Arms ($T_j = 125^{\circ}\text{C}$, $f_c = 5\text{kHz}$) と 10Arms ($T_j = 125^{\circ}\text{C}$, $f_c = 15\text{kHz}$) の通電能力を実現した。

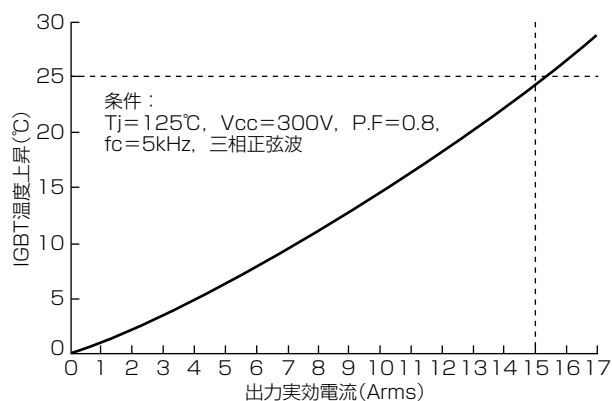
3.4 パワーサイクル寿命

車載用途では、高温で使用される頻度が高く、パワーサイクル寿命も $\Delta T_j = 120^{\circ}\text{C}$ など高温状態を想定した条件で確認している。DIIPMはパワーチップとアルミワイヤをモールド樹脂で封止しており、シリコンパワーチップとワイヤの線膨張係数差によって接合界面近傍に生じる応力を抑制している。図6にパワーサイクル寿命を示す。 $\Delta T_j = 100^{\circ}\text{C}$ で約7,000サイクルの寿命を示している(故障率1.0%代表例 $N = 3$)。

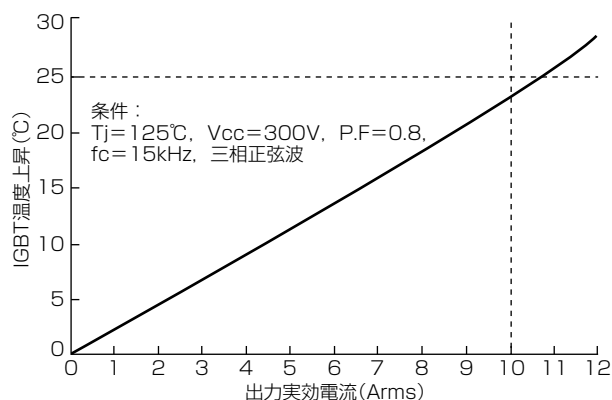
3.5 電気的特性

表2に車載用超小型DIIPM“PS21997-J”の電気的特性を示す。

また、図7にはこの品種のターゲットとしている出力電流-IGBT 1素子あたりの発生損失を示す。車載用超小型



(a) 出力電流15Armsの通電能力



(b) 出力電流10Armsの通電能力

図5. 車載用超小型DIIPMのIGBT温度上昇特性

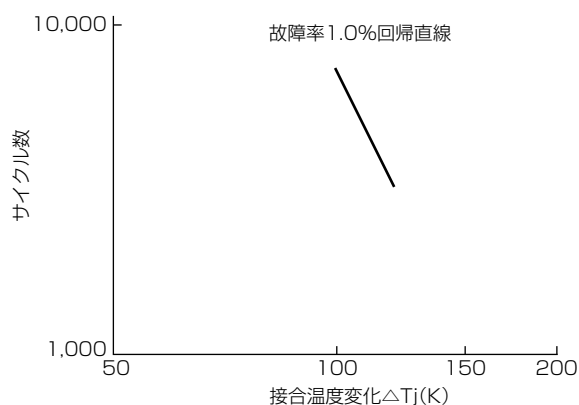


図6. パワーサイクル寿命

表 2. 車載用超小型DIIPM (PS21997-J) の電気的特性

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$V_D = V_{DB} = 15V$, $V_{IN} = 5V$, $I_C = 30A$, $T_j = 25^\circ C$	—	1.90	2.50	V
FWD順電圧降下	V_{EC}	$-I_C = 30A$, $V_{IN} = 0V$, $T_j = 25^\circ C$	—	1.70	2.20	V
スイッチング時間	t_{on}	$V_{DD} = 300V$, $V_D = V_{DB} = 15V$ $I_C = 30A$, $T_j = 25^\circ C$ $V_{IN} = 0 \sim 5V$ 誘導負荷	0.70	1.40	2.10	μs
	t_{rr}		—	0.20	—	
	$t_{c(on)}$		—	0.40	0.70	
	t_{off}		—	1.60	2.40	
	$t_{c(off)}$		—	0.20	0.70	
コレクタ・エミッタ間遮断電流	I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}$, $T_j = 25^\circ C$	—	—	1.00	mA
回路電流	I_D	$V_D = V_{DB} = 15V$, $V_{IN} = 5V$, $T_j = 25^\circ C$	$V_{P1} - V_{NC}$, $V_{N1} - V_{NC}$ の総和		2.8	mA
			$V_{UFB} - U$, $V_{VFB} - V$, $V_{WFB} - W$		0.55	
		$V_D = V_{DB} = 15V$, $V_{IN} = 0V$, $T_j = 25^\circ C$	$V_{P1} - V_{NC}$, $V_{N1} - V_{NC}$ の総和		2.8	
			$V_{UFB} - U$, $V_{VFB} - V$, $V_{WFB} - W$		0.55	
短絡電流トリップレベル	$V_{SC(ref)}$	$V_D = 15V$, $T_j = 25^\circ C$	0.43	0.48	0.53	V
制御電源電圧低下保護	UV_{DBt}	$T_j = 125^\circ C$	トリップレベル		7.0	V
	UV_{DBr}		リセットレベル		7.0	
	UV_{Dt}		トリップレベル		10.3	
	UV_{Dr}		リセットレベル		10.8	

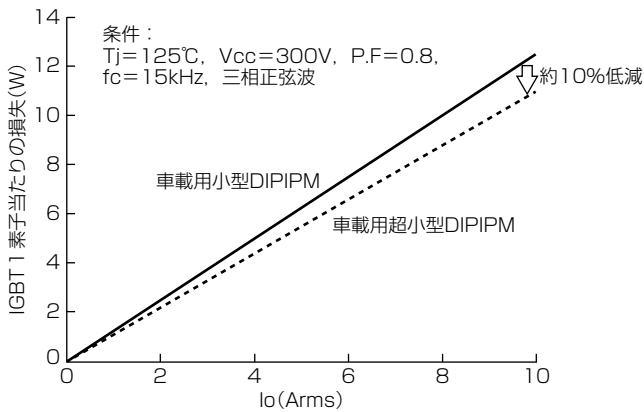


図 7. 車載用小型DIIPMと車載用超小型DIIPMの IGBT 1素子当たりの損失 (30A品)

DIIPMは、損失改善を目指してIGBT最適化を図っており、現行の小型DIIPMに対して $I_o = 10A$ rms時のIGBT 1素子あたりに発生する損失を約10%低減した。

3.6 トレーサビリティ

車載製品では、市場不具合等の品質問題が発生したときに波及性の判断が必要となる。該当する製品は、製造履歴を含めてテストデータ等の情報提示について迅速な対応が求められる。この要求に対応するため、この製品は、製品

ごとにロットNo、二次元コードを印字しており、これらの情報を基に製造日時、材料ロット及びテストデータなどへの追跡を可能にしている。

4. む す び⁽¹⁾⁽²⁾

今回開発・製品化した車載用超小型DIIPMの機能、特長等について述べた。この製品は、小型化、高性能を実現した製品であり、電動カーエアコン向けインバータの発展に寄与できるものと考ええる。今後も市場ニーズに対応した製品を開発し、車載市場の発展に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 加藤正博，ほか：超小型DIIPM“Ver.6シリーズ”，三菱電機技報，**88**，No.5，285～288 (2014)
- (2) 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“J1シリーズ”，三菱電機技報，**88**，No.5，321～324 (2014)
- (3) 吉松直樹，ほか：自動車用パワー半導体モジュール“J1シリーズ”のパッケージ技術，三菱電機技報，**88**，No.5，317～320 (2014)

自動車用三菱パワーモジュールの開発動向

猪ノ口誠一郎*

Development Trend of Mitsubishi Power Module for Automobile

Seiichiro Inokuchi

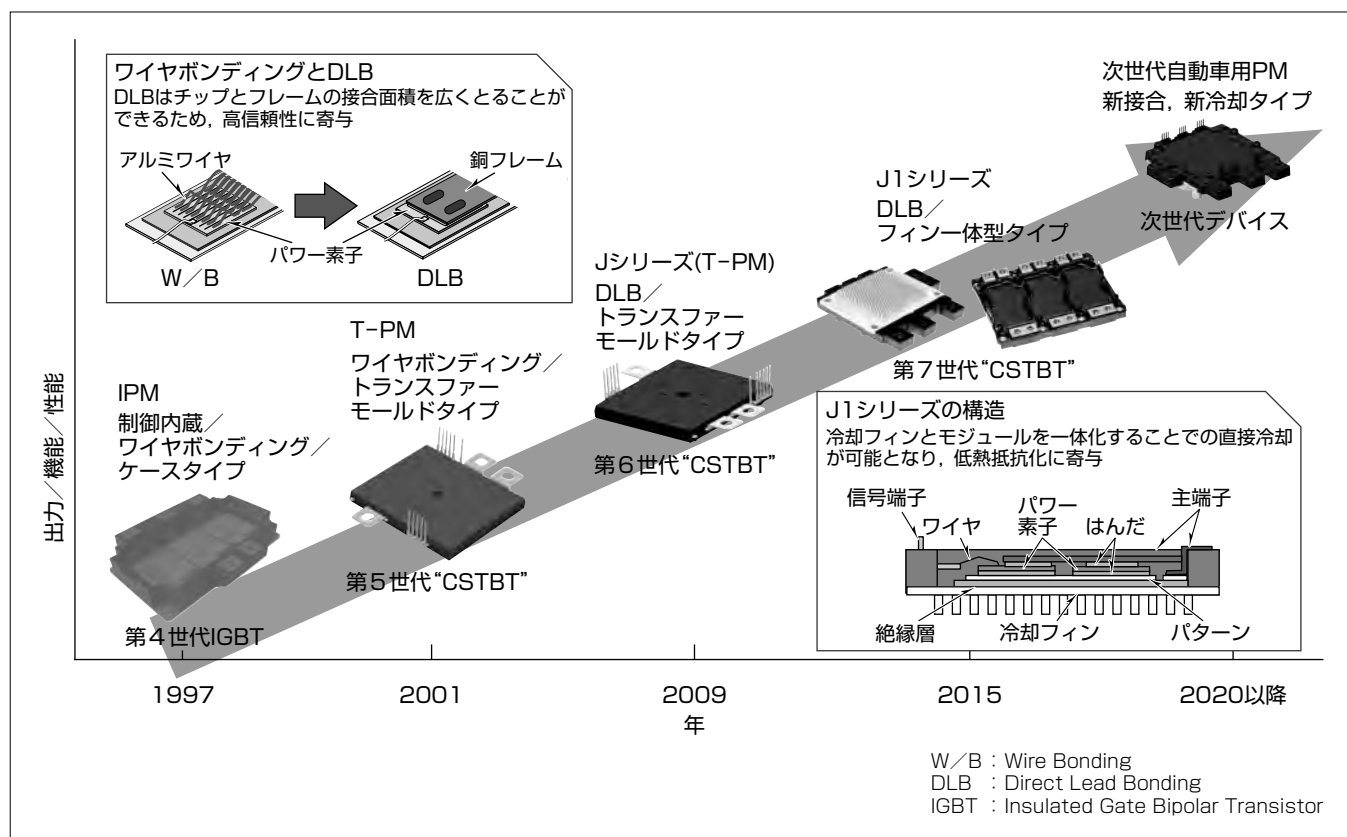
要 旨

近年、自動車排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入などによって電動化車両(xEV)が市場に浸透してきた。環境保護を担うxEVは今やスマートグリッドや自国産業活性化策など各国それぞれの視点で広がりを見せており、日本でもCO₂削減及び災害時の給電といった新たな価値として“2030年までに新車販売に占める次世代自動車の割合を5から7割とすることを目指す”と2015年6月に閣議決定されている。このように、将来的なxEVの本格化に伴い自動車のモータ駆動用インバータに用いられるパワーモジュールの広がりもこの先加速していくことが期待される。

三菱電機は1997年から制御回路を搭載した自動車用IPM(Intelligent Power Module)を製品化したことを皮切

りに、2001年に高信頼性を特長とするT-PM(Transfer-molded Power Module)を市場投入し、xEV発展に貢献してきた。また、2015年には最新世代の自動車用パワーモジュールとして“J1シリーズ”を量産化しており生産規模を順次拡大させる計画である。このJ1シリーズは小型・軽量・高性能パッケージとして自動車用途に最適なことから様々な容量帯に向けラインアップ拡充を進めている。

また、xEV本格化に備え、更なる小型・高性能モジュールの実現のため、SiC(シリコンカーバイド)デバイス技術開発や自動車向けに特化した高信頼性・低熱抵抗パッケージ開発を推進している。



自動車用三菱パワーモジュールの変遷

ケースタイプから開発が始まった自動車用パワーモジュールは、信頼性の高いトランスファーモールドタイプを経てDLB技術を確認した。さらに低熱抵抗を実現するフィン型構造を開発してJ1シリーズは世界最小クラスのパッケージサイズとした。さらに次世代に向けた開発を進めており、将来的にはSiCなど次世代デバイスを搭載した自動車用パワーモジュールを提供していく。

1. ま え が き

近年、自動車排ガス規制強化やエコカー優遇措置導入などによってxEVが市場に浸透してきた。環境保護を担うxEVは今やスマートグリッドや自国産業活性化策など各国それぞれの視点で広がりを見せており、日本でもCO₂削減及び災害時の給電といった新たな価値として“2030年までに新車販売に占める次世代自動車の割合を5から7割とすることを目指す”と2015年6月に閣議決定されている。このように将来的なxEVの本格化に伴い自動車のモータ駆動用インバータに用いられるパワーモジュールの広がりもこの先加速していくことが期待される。

当社は1997年に自動車用パワーモジュールを量産化して以来、様々な製品を世に送り出してきたが、本稿ではそれら開発の変遷と今後の開発動向について述べる。

2. 自動車用パワーモジュールの変遷

2.1 ケースタイプ⁽¹⁾

ガソリンエンジンとモータで駆動するハイブリッド自動車が1997年に量産化されて以来、当社はモータ駆動用インバータに用いられる様々なパワーモジュールを開発・製品化してきた。この自動車用パワーモジュールには小型・軽量や実装のしやすさまで様々な要求性能があるが、最たるものは温度サイクル性やパワーサイクル性など高信頼性の実現である。初期の自動車用パワーモジュールは産業用や電鉄用パワーモジュールで広く使用されているケースタイプであったが、高信頼性を単純に実現しようとするサイズ大型化を招く。このため、放熱用ベース板に低線膨張係数の金属複合材料を使用することで熱ストレス時の応力緩和を促して高信頼性を確保する技術を採用した。また、IGBTを駆動・保護する制御回路を搭載したIPMとして開発しており、これまで自動車用パワーモジュールのドライブに関するノウハウを蓄積してきた。図1に最新ケースタイプIPMであるJシリーズIPM“TYPE+B”の構成を示す。

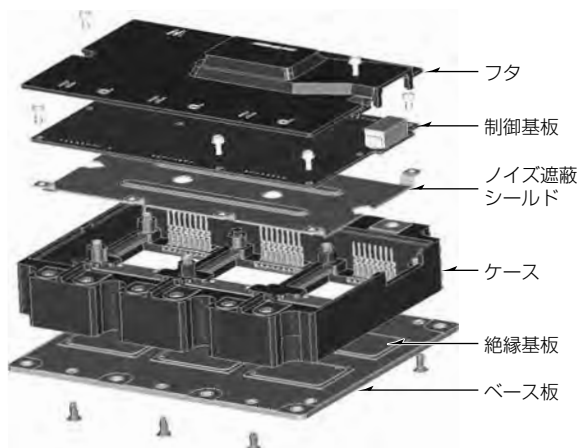


図1. JシリーズIPM TYPE+Bの構成

2.2 トランスファーモールドタイプ⁽¹⁾

xEVのれい明期を経てユーザーが拡大していくと自動車用パワーモジュールの更なる高信頼性化の声が大きくなる。T-PMはトランスファーモールド構造を採用してチップと樹脂の線膨張係数のマッチングを図ることで温度サイクル性を飛躍的に向上させている。また、モールド樹脂で封止する構造によって機械的構造と強度、絶縁性、環境耐久性を一度に確保している。さらにパワーサイクル性の向上のため、チップとの電気的接続をワイヤボンディングからDLBにすることでパワーサイクルの長寿命化のほか、配線抵抗の低減、自己インダクタンスの低減を達成した。また、T-PMにはチップ下にヒートスプレッドを配置しており、その下面にはモールド封止樹脂よりも熱伝導率の高い絶縁樹脂層を配置している。チップで発生した熱を厚いヒートスプレッドで広げた後に絶縁層を通過させる構造にすることで、低熱抵抗に加えて自動車アプリケーションで重要な過渡熱抵抗を低減できる構造にしている。また、T-PMは2 in 1 構成にしているため、ディスクリットデバイスのようにアプリケーションに応じて出力を増やすことなどフレキシブルに回路を構成できる特長を持つ(図2、図3)。

2.3 フィン一体型タイプ⁽²⁾⁽³⁾

エコカー開発がハイブリッド自動車だけでなく、xEVとして一般になされてくると、パワーモジュールに対して

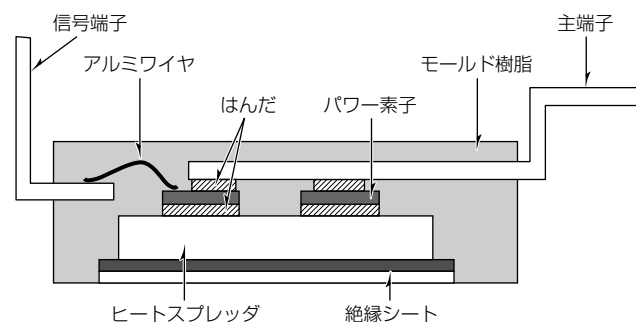


図2. JシリーズT-PMの内部構造

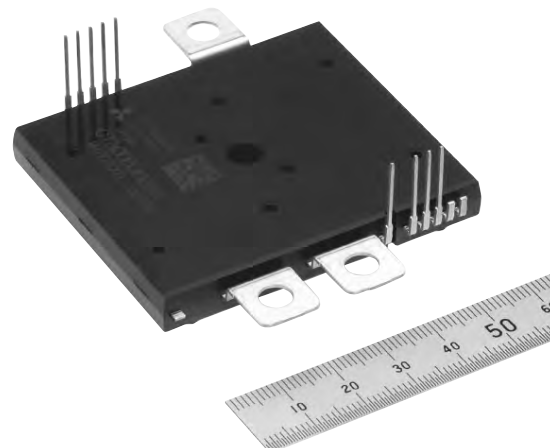


図3. JシリーズT-PM (CT300DJH060)

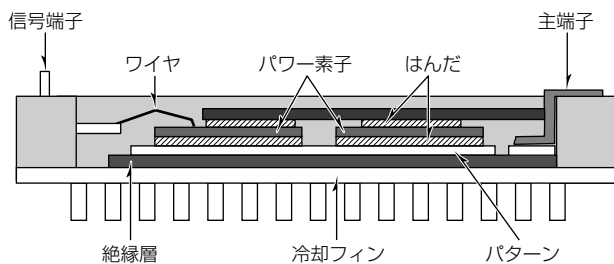


図4. J1シリーズの構造



図5. J1シリーズ(CT600CJ1A060, 裏面)



図6. 大容量J1シリーズ(CT600CJ1B120, 表面)

6 in 1 化や更なる小型化といったニーズが高くなってきた。また、さらに使用環境が厳しくなるとモジュールと冷却器間の放熱用グリースの信頼性での課題が浮き彫りになってきた。そのようなニーズや課題を独自の第7世代IGBTとダイオードを適用し、T-PMで培ったDLB構造を採用することで小型・高信頼性を実現するフィン一体型6 in 1 パワーモジュール(J1シリーズ)を開発することで解決した。アルミフィンとケースタイプモジュールを一体化することによって放熱グリース層の削減に加えて絶縁基板下はんだ層を削減することで、低熱抵抗化と小型化を達成した。この絶縁基板下はんだ層の削減によって、温度サイクル性の向上も果たしている(図4, 図5)。さらにDLB等の内部配線の最適化を進めることでJ1シリーズより出力容量をおよそ2倍としながらサイズを約1.5倍に抑えた“大容量J1シリーズ”を開発しており(図6)、これらのパッケージをベースとしたラインアップ拡充を進めている。

3. 自動車用パワーモジュールの将来技術

近い将来、Si(シリコン)パワーデバイスに取って代わるキーデバイスとしてワイドバンドギャップ半導体であるSiC(シリコンカーバイド)パワーデバイスが注目されてい

表1. SiC_J1シリーズラインアップ

形名	定格	サイズ
	(I_D/V_{DSX})	(mm)
CTF300CJ1A120	300A/1,200V	120.0×115.2

表2. SiCとSiの物性値比較

材質	バンドギャップ (eV)	熱伝導率 (W/cm・K)	絶縁破壊強度 (MV/cm)
SiC	3.3	4.9	3.0
Si	1.1	1.5	0.3

る。SiCパワーデバイスは低損失で高出力化でき、かつ高速動作や高温動作が可能なデバイスであり、自動車用途でもインバータの小型・軽量化や高周波化、冷却の簡素化など様々な効果が期待されている。現在、当社ではJ1シリーズパッケージをベースとした自動車用SiCパワーモジュールを開発している。また、SiCパワーデバイスはその製造コストが高いことが知られているが、当社はそのコストを最小限にするための低熱抵抗パッケージ技術を開発しており、自動車用パワーモジュールの将来技術としてそれぞれこの章で述べる。

3.1 SiCパワーモジュール⁽⁴⁾

SiCデバイスの特長を次に示す。SiCはSiと比較して絶縁破壊強度が10倍ほど高いためチップの厚みを薄くすることができる(表1, 表2)。抵抗値を大幅に低減することができることからDC損失の低減に寄与する。また、スイッチング素子をSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)とし、SiC-SBD(Schottky Barrier Diode)と組み合わせることでユニポーラデバイスの特長である高速スイッチングを可能にし、AC損失を低減することができる。また、ワイドバンドギャップ半導体であるため、リーク電流を抑えることができ、高温での動作を可能にする。熱伝導率が高いことも特長で、Siに比べて放熱性が良く、熱抵抗を低減することができる。

J1シリーズをベースに開発した自動車用フルSiCパワーモジュールはJ1シリーズと比較してスイッチング素子サイズをMOSFETとSBDでそれぞれ50%程度に抑えたにもかかわらず、スイッチング損失はターンオン損失を40%低減、ターンオフ損失を60%低減、DC損失は20%低減させた。その結果、同定格のSiパワーモジュールに比べ、トータル損失を70%低減できた(図7)。

3.2 冷却器一体型タイプ⁽⁵⁾

パワーモジュールの性能指標の一つに熱抵抗がある。損失の低いSiCは設計最適化のためにチップサイズを縮小すると放熱面積も縮小され、熱抵抗が悪化させてしまう。この対策としてパッケージによる熱抵抗改善が求められる。当社はこの課題の一つのアプローチとして小型軽量で高信頼性パッケージであるJ1シリーズを踏襲した冷却器一体

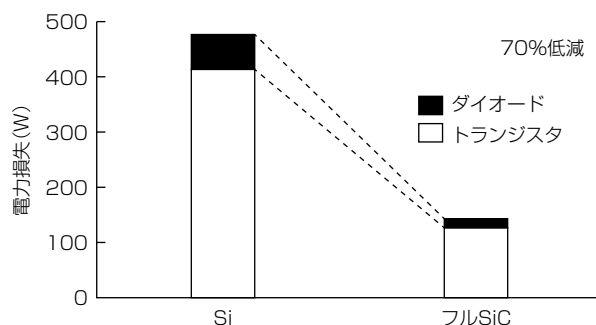
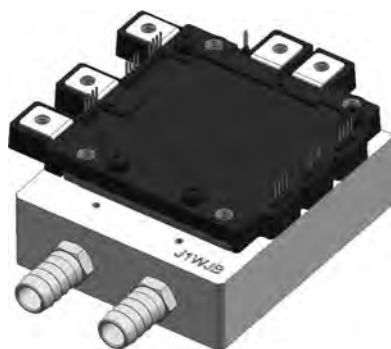


図7. SiとSiCデバイスの損失比較
(代表例, $V_{cc}=650V$, $I=200A_{rms}$, $f_c=10kHz$, $PF=0.8$, $T_j=150^{\circ}C$)



(a) J1 シリーズ+評価用ジャケット



(b) 冷却器一体型パワーモジュール

図8. 冷却器一体型タイプ

型パワーモジュールを開発している(図8)。

冷却器一体型パワーモジュールは、CAEでの解析結果を基に冷却器の最適設計を施しており、従来発生していたピン先端からジャケット底面までのギャップやフィン外

周部を流れる冷却水の流路を遮断して効果的にパワーモジュールを冷却できるものとした。この改善によって従来のパワーモジュールと評価用ジャケットの組合せに比べ、約15%の熱抵抗改善効果を得た。さらに体積50%低減、質量60%低減を達成しており、xEVインバータの高性能化に寄与できるパッケージ技術を開発した。

4. む す び

当社は、20年来のxEVの発展とともに様々な自動車用パワーモジュールを開発・製品化してきた。この間、IGBTチップやパッケージの進化は目覚ましいものがあり、その性能改善は頭打ちのようにも見える。しかし、当社は更なる損失低減、小型軽量化、信頼性向上等パワーデバイスの進化のための要素技術開発を継続して行っており、特にSiCパワーデバイス技術はその最たるものであると自負している。次世代自動車用パワーモジュールのSiCデバイス適用は容易な道のりではないが、“Changes for the Better”の精神の下、より良い製品を開発して市場に提供することで持続可能な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 猪ノ口誠一郎, ほか: 自動車用IPM/T-PM“Jシリーズ”, 三菱電機技報, **86**, No.5, 283~286 (2012)
- (2) Inokuchi, S., et al.: A New High Capacity Compact Power Modules for high power EV/HEV inverters, APEC, 468~471 (2016)
- (3) 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“J1シリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.5, 321~324 (2014)
- (4) Wada, F., et al.: 6-in-1 Silicon Carbide(SiC) MOSFET Power Module for EV/HEV inverters, PCIM Asia 2017 (2017)
- (5) Kawase, T., et al.: J1-Series modules with integrated cooler for electric and hybrid vehicles, PCIM Europe 2017 (2017)

“DIIPM+”によるインバータ設計最適化

市村 徹*

Optimized Inverter Design by "DIIPM + "

Toru Ichimura

要 旨

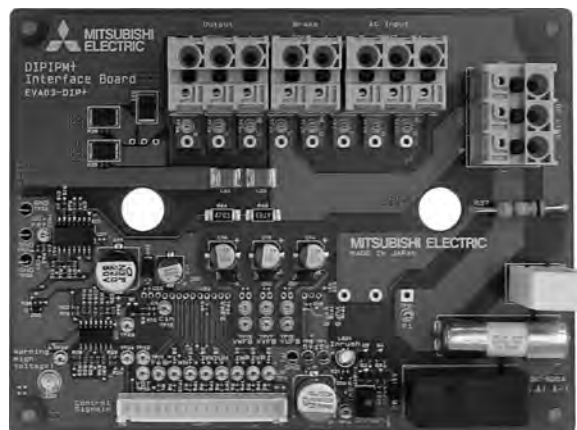
昨今、日本国内だけでなく、中国や東南アジアを始めとした新興国の発展は目覚ましく、インバータ機器の需要は拡大基調を更に強めている。この需要拡大に伴って多くの新興インバータメーカーが勃興し、既存インバータメーカーとともに絶え間なく開発が行われているため、開発に費やすことができるリソースは限られており、リソースの有効配置、開発の効率化が求められている。インバータ機器の小型化、低コスト化を実現するとともに、市場の要求に対応したインバータ機器をタイミング良く市場投入するために、インバータ機器に必須のパワー半導体デバイスの電気的特性だけでなく構造上の長所を理解し、性能を最大限に引き出す基板設計とインバータ機器設計をすることが肝要である。

三菱電機では、パワー半導体デバイスに対し、パワーチップだけを集約したIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールやパワーチップと制御回路を一体化したIPM(Intelligent Power Module)、IPMをトランスファーマーモルド構造にして小型化した“DIIPM”などのパワーモジュールによってインバータ開発者のハードウェア設計省力化に寄与してきた。

2015年5月に発売開始した“DIIPM+シリーズ”では、DIIPMに三相コンバータとブレーキ回路を一体モジュール化し、基板とのインタフェースとなる端子配列にも工夫をこらしたことで、インバータ機器の基板設計が容易になり、インバータ機器の開発効率化が図れる。



DIIPM+シリーズ
 (34.00×85.00×5.78(mm))



DIIPM+評価用インタフェース基板
 (DIIPM+は基板はんだ付け面に搭載)

“DIIPM+シリーズ”の外観及び評価用インタフェース基板

DIIPM+シリーズはコンバータ回路、ブレーキ回路、三相ブリッジインバータ回路と、インバータ回路及びブレーキ回路を駆動・保護するための専用IC、上アーム電源用BSD(Boot Strap Diode)を一体化した複合パワーモジュールであり、インバータ機器のプリント配線基板上で周辺回路とのインタフェースを容易に最適化できる端子配列となっている。

1. ま え が き

当社はコンバータ回路、ブレーキ回路、三相インバータのパワーチップを一体化した“CIBタイプ”IGBTモジュールや、三相インバータのパワーチップと制御ICを一体化してトランスファーマルディングしたDIPIPMを製品化して市場の多様な要求に応えてきた。DIPIPM+はCIBタイプIGBTモジュールのパワーチップ複合化とDIPIPMの制御複合トランスファーマルディングの両方を兼ねそろえたデバイスであり、インバータ開発者の要求である設計省力化とインバータ機器の小型化を実現できるパワーデバイスである。

性能面は既出文献⁽¹⁾に譲り、本稿ではDIPIPM+の特徴である端子配列などの構造的な特長がインバータ設計にとって有用である点について述べる。

2. DIPIPM+

2.1 内部構造

DIPIPM+の内部回路図を図1に示す。DIPIPM+の主回路はIGBTとFWD(Free Wheeling Diode)を1アームとして三相ブリッジ接続されているインバータ回路、ダイオードとIGBTを直列接続したブレーキ回路と、整流ダイオードを三相ブリッジ接続したコンバータ回路からなる。

インバータ回路とブレーキ回路のIGBTのゲート駆動のためにそれぞれICが接続されており、インバータ回路の上アーム駆動用IC(High Voltage Integrated Circuit : HVIC)は高耐圧レベルシフト回路が内蔵されており、フォトカプラ等の絶縁素子なしにMCU(Micro Control Unit)からの制御信号を受け取ることができ、制御電源電圧低下(Under Voltage : UV)保護機能も内蔵している。下アーム駆動用IC(Low Voltage IC : LVIC)にはIGBTの駆動回路に加え、UV保護、短絡電流(Short Circuit : SC)保護機能が内蔵されており、SC保護は主回路下アームエミッタ端子の外部に接続された抵抗器の過電流時電圧降下をLVICに入力することで高速に下アームIGBTを遮断する。LVICの保護機能が動作した際にはエラー(Fault out : Fo)信号を出力して外部に異常状態を発信する。

加えてLVIC上の温度センサでモジュール温度を検出しアナログ電圧情報として出力するVOT(Voltage Output of Temperature)機能を備えている。

2.2 端子配列

DIPIPM+はインバータ機器の主要回路をつかさどっているが、DIPIPM+単体ではインバータにはならない。そのため、DIPIPM+がプリント配線基板(Printed Circuit Board : PCB)上で容易に結線でき、組み立てられたインバータ機器が十分な性能を長期間にわたって安定して動作することを目的として、端子配列に工夫が施されている。

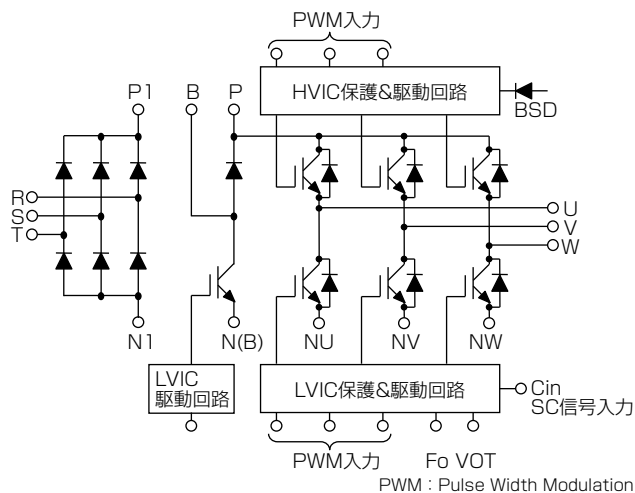


図1. DIPIPM+の内部回路図

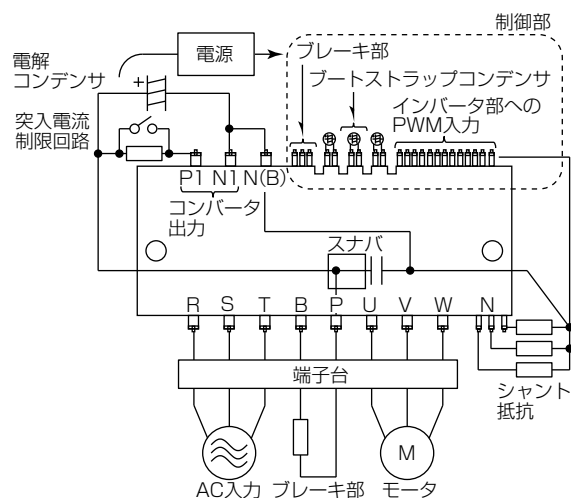


図2. DIPIPM+の外部結線

図2にDIPIPM+の外部結線図(DIPIPM+はPCBのはんだ面から挿入され、部品搭載面から透過した図)を示す。

主回路端子は多くのインバータ機器の持つターミナルの配置と最短で接続できるようにAC三相入力端子、ブレーキ端子及び三相出力端子が長辺方向の1方向に1列に並んでおり、平滑コンデンサを接続するための端子と制御入出力端子はもう1方向の長辺に1列に並んでいる。

3. DIPIPM+接続回路の最適化

3.1 DIPIPM+主回路配線の最適化

DIPIPM+の主回路端子はインバータ機器の外部接続用端子台の配列に合わせて並んでいるため、PCB上の主回路配線は従来のCIBタイプIGBTモジュールを用いた結線(図3)と比較し、大幅に簡略化できる。IGBTモジュールの代わりにDIPIPMと3相ダイオードブリッジを組み合わせた結線(図4)ではIGBTモジュールと比較して配線の簡略化に対する優位性はあるが、DIPIPM+を用いた配線が最も簡略化できていることは結線に交差ができていないことから明らかである。

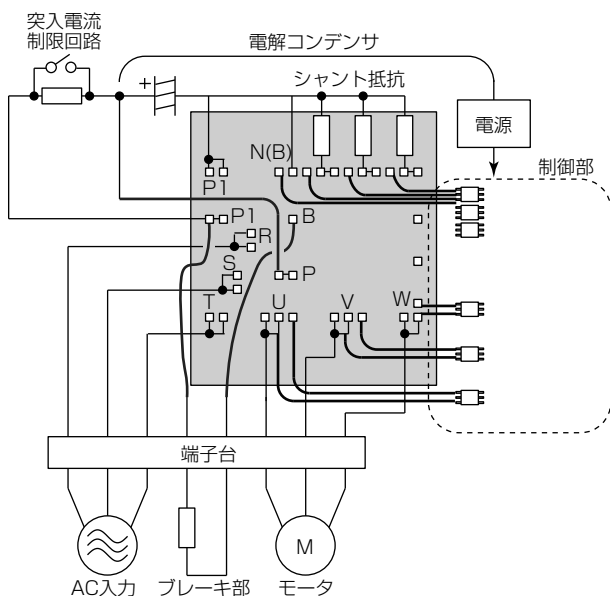


図3. CIBタイプIGBTモジュールの外部結線

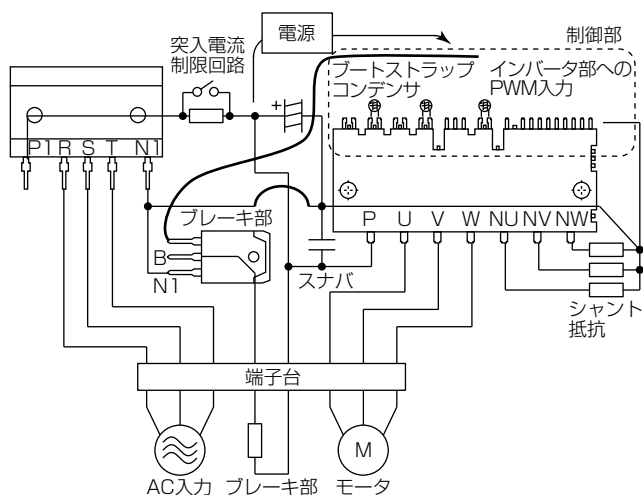


図4. DIIPMと3相ダイオードブリッジの外部結線

PCB上の主回路配線は絶縁やノイズなど多くの問題を発生させる主要因となり得るため、主回路配線の簡略化はインバータ機器の機能及び性能を維持・向上させることになる。DIIPM+の端子配列によって、主回路配線に関する優位性をまとめると次のとおりになる。

- (1) パターン配線長が削減できる
 - (2) ジャンパー線が不要となる
 - (3) 両面基板が使用可能(多層基板不要)
 - (4) 沿面距離が削減でき、デッドスペースを大幅削減
- これらによって、PCBサイズを大幅に削減できる。

3.2 DIIPM+制御回路配線の最適化

DIIPM+にはブレーキ回路の駆動及びインバータ回路の駆動・保護機能をつかさどるHVIC及びLVICが内蔵されており、低放射ノイズと低損失を実現できるように調整済みのため、設計時にゲート抵抗を調整する必要がない。これら内蔵ICから取り出される制御端子はDIIPM+の

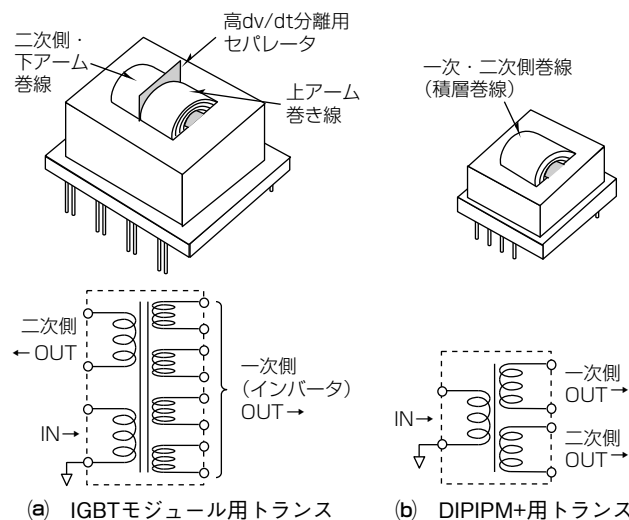


図5. IGBTモジュール用とDIIPM+用トランス比較

一辺に集積配置され、周辺回路からのノイズにさらされる小信号を扱うマイコンとの配線をコンパクトに形成し、インバータ機器の信頼性を向上させることが容易となる。

3.3 制御電源回路の最適化

インバータ回路の上アームIGBTのエミッタ電位はスイッチングごとにスイングしているため、上アーム駆動用電源はほかの制御電源と独立した電位の電源を用意する必要がある。

IGBTモジュールなどではトランス巻線を複数設けて電源とするが、トランスの出力端子間絶縁のために大型化するだけでなくIGBTのスイッチング時 dv/dt によるノイズがトランスの巻線間寄生容量を介してほかの制御電源に伝搬しないようにセパレータで分離させるなど注意して絶縁する必要がある。

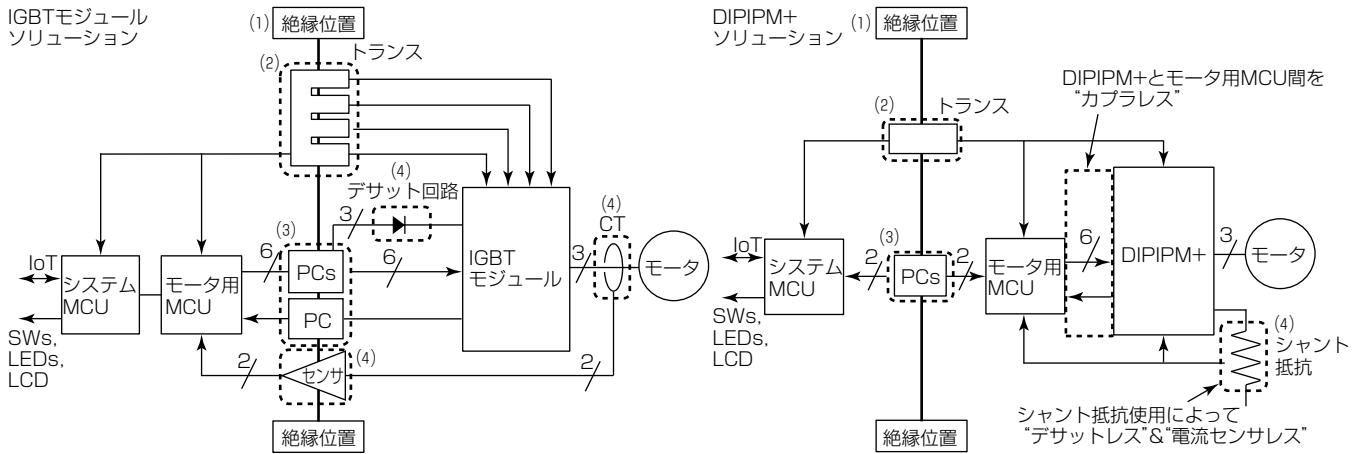
DIIPM+に使用している当社製HVICは消費電力が小さいため、上アームIGBT駆動用電源にはブートストラップ回路が使用できる。これによってトランスはインバータ回路用の15V出力1系統とMCU用1系統を用意すればよく、積層巻きなどシンプルな設計が可能となる(図5)。

さらにDIIPM+ではブートストラップ回路用の高耐圧BSDが内蔵されているため、PCB上の電源配線は単純になり、専有する面積も小さくできる。

3.4 システムコストの最適化

インバータ機器のPCB上主回路配線は通電電流に応じたパターン幅と電圧に応じた絶縁距離を確保する必要があり、配線が長くなるほどPCB面積を大きくする必要があり、基板の多層化によってPCBを小さくすることも可能だが、一般的に基板価格は層数に比例して上昇し、層間寄生容量によるノイズ伝搬が悪影響を及ぼす。

図6にIGBTモジュールを用いて構成したインバータシステムとDIIPM+を用いた場合の一例を示す。DIIPM+ソリューションではMCUとDIIPM+を非絶縁で接続す



	IGBTモジュールソリューション	DIIPM+ソリューション
(1)絶縁位置	モータ用MCUとIGBTモジュール間	システムMCUとモータ用MCU間
(2)制御電源(トランス)	15Vフローティング×4+2次側電源×1	15V×1(モータ用MCU電源は3端子レギュレータ)+2次側電源×1
(3)フォトカプラ	高速フォトカプラ×6+低速フォトカプラ×1 高CMR	1次・2次間デジタルアイソレータ(3.3V or 5V系)×1
(4)電流検出	高耐圧高速ダイオードによるデサット方式SC保護 と合わせてCTによる電流フィードバック回路	SC保護と電流検出にシャント抵抗を活用

CT : Current Transformer

図6. インバータシステム比較

ることでフォトカプラを削減し、コストを削減するだけでなく、フォトカプラをデジタルアイソレータに変更することで寿命の懸念を小さくできる。シャント抵抗の電圧降下をMCUのADに入力することで電流センサを削減でき、DIIPM+のSC保護機能を使えば、パワー素子の限界である活性領域特性を用いたデサット(Desaturation : Desat)回路を使わなくても精度良く過電流として検知・保護できる。このことはインバータシステム全体を考えた場合、モータの減磁電流に対する保護も兼ねることができるとを示し、電流検出回路のコスト削減に寄与することを示している。

さらに電源トランスの小型化、ジャンパーケーブルを含めた主回路配線の削減によってシステムコストは大幅な削減が可能となる。

4. む す び

Si(シリコン)パワー半導体の性能改善の理論的限界が近づいてきており、SiC(シリコンカーバイド)などのWBG(Wide Band Gap)半導体への期待が高まっているが、パ

ワーモジュールはパワー半導体だけではなく、モジュールとして構造を含めた最適化についてはまだ進化の余地がある。

パワーモジュールの使い勝手を向上させたIPMの更なる課題として、パワーモジュールが実装されるPCBとのインタフェースの重要性を理解し、低コスト、高信頼性のインバータシステムを合理的に構成し、パワー半導体の性能を最大限に引き出すための構造及び端子配列をDIIPM+で実現した。

要旨の図はDIIPM+評価用インタフェース基板である。この評価基板は本稿で述べたDIIPM+の進化したインタフェースを感じてもらおうとともに、インバータシステム開発の初期コストとタイムラグを最小限で評価に着手してもらおうことを目的としているので是非一度手に取ってもらいたい。

参 考 文 献

- (1) 山口公博, ほか: コンバータ・インバータ・ブレーキ内蔵のオールインワンタイプ“DIIPM+シリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 303~306 (2016)

パワーデバイスの品質と信頼性を支える 分析評価技術

榎田豊次*
阿部 剛*
伊藤隆啓**

Analysis and Evaluation Technologies for Quality and Reliability of Power Device

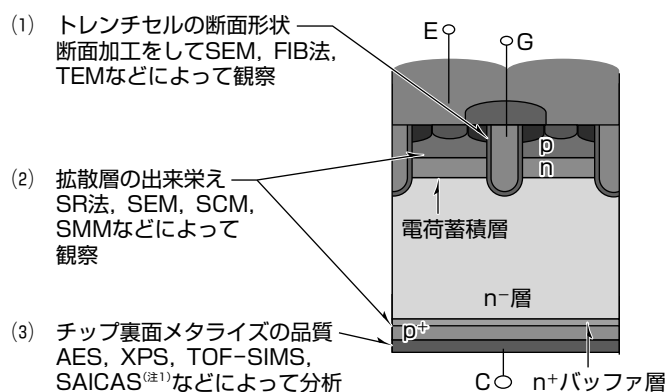
Toyotsugu Enokida, Takeshi Abe, Takahiro Ito

要 旨

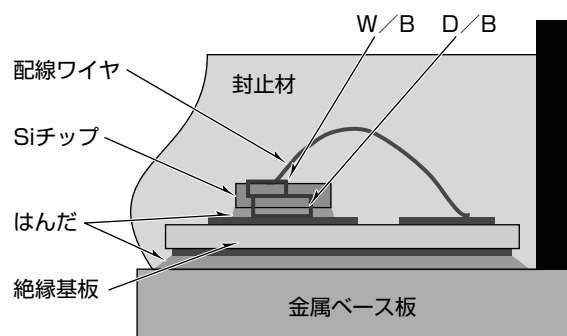
三菱電機は、風力及び太陽光発電などの長寿命が求められる高効率パワーコンディショナー、高耐圧・大電流に加えて高信頼性が求められる鉄道車両用や電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)の車載用インバータ、エアコンや冷蔵庫及び照明などの家電機器用インバータに適用されるパワーモジュールを得意として製造及び普及することによって、世界の省エネルギー化に貢献をしている。また、1990年代初頭からSi(シリコン)デバイスよりも電力損失の大幅な低減と小型化が実現できるSiC(シリコンカーバイド)デバイスの研究開発を開始し、2010年頃に実用化に成功、現在は製品ラインアップを拡充しながら、適用領域の拡大を続けている⁽¹⁾⁽²⁾。

パワーモジュールを構成する素子であるIGBT(Insulated

Gate Bipolar Transistor Module)やMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)及び環流ダイオードには、静特性や動特性などの要求仕様はもちろん、高い品質と信頼性が要求される。また、素子と端子や基板をワイヤやはんだで接合したり、汚染や水分からの保護と絶縁のために樹脂で被覆したりするため、金属間の結合状態や有機物の密着性、アウトガスなどがパワーモジュールの品質と信頼性に大きく影響を及ぼす。そのため、分析評価部門は、品質・設計・製造技術部門と連携しながら、パワーデバイスを設計開発段階から、出来栄評価、不具合品の解析、使用部材の選定評価などを行い、品質向上を支えている。



IGBTチップの評価項目と分析手法



パワーモジュールの評価項目と分析手法

SEM : Scanning Electron Microscope, FIB : Focused Ion Beam, TEM : Transmission Electron Microscope,
SR : Spreading Resistance, SCM : Scanning Capacitance Microscope, SMM : Scanning Microwave Microscope,
AES : Auger Electron Spectroscopy, XPS : X-ray Photoelectron Spectroscopy,
TOF-SIMS : Time of Flight-Secondary Ion Mass Spectrometry, SAICAS : Surface And Interfacial Cutting Analysis System,
ESBD : Electron BackScattering Diffraction, GC-MS : Gas Chromatography-Mass Spectrometry
(注1) SAICASは、大日本プラスチック(株)の登録商標である。(注2) オートグラフは、(株)島津製作所の登録商標である。

IGBTチップとパワーモジュールの評価項目と分析手法

パワーモジュールに搭載されるIGBTチップとパワーモジュール組立て工程での評価項目と分析手法の一例を示す。IGBTチップは、トレンチセルの断面形状、拡散層の出来栄、裏面メタライズの品質を確認する。パワーモジュール組立て工程では、D/B(Die Bonding)、W/B(Wire Bonding)など各接合界面の断面形状、各部材の機械強度やアウトガス成分分析を行う。

1. ま え が き

当社パワーデバイス製作所の敷地内には分析評価部門が所在し、基礎研究、設計・開発、信頼性試験、量産化の過程、また市場で発生する懸念点や詳細に検証すべき事象を迅速かつ多様な手法で解析を行うことができる。また、分析評価部門は最先端の分析技術と長年培ってきた知識によって、ウェーハプロセスとアセンブリプロセスの不良と市場故障の原因究明と対策に直結する分析・解析を提供している。例えば、半導体素子の内部構造と各種電極、素子と配線ワイヤ間の接合状態、素子と絶縁回路基板間の接合状態、半導体素子の拡散構造、パワーモジュールに使用される部材などの出来栄え評価と不良解析を行っている。

本稿では、次の事象に対する解析と対策の提案事例を述べる。

(1) 設計開発段階での分析手法と事例

①半導体素子の分析評価技術

②パワーモジュールの分析評価技術

(2) 故障(破壊)品の解析事例

2. 設計開発段階での分析手法と事例

2.1 半導体素子の分析評価技術

半導体素子の設計開発段階では、SCF(Short Cycle Feedback)評価による適正なプロセスの条件出しと出来栄えを確認しながら、プロセスフローを確立させている。例えば、IGBTチップの設計開発段階で出来栄えを確認する場合、主に次のような評価を行う。

(1) トレンチセルの断面形状評価

(2) 拡散層の出来栄え評価

(3) チップ裏面メタライズの品質評価

2.1.1 トレンチセルの断面形状評価

トレンチセルの断面形状観察は、樹脂包埋研磨後のSEM(走査型電子顕微鏡)観察、FIB(集束イオンビーム)法による断面観察などで行う。FIB法は、集束させたGa(ガリウム)イオンビームで特定領域に幅数10 μ mの穴を開けて傾斜することで、穴の側面を観察する手法であり、数 μ mのトレンチの断面構造を鮮明に観察できる。また、FIB加工技術を用いて薄片化加工を行い、TEM(透過型電子顕微鏡)で観察することで、nmのゲート酸化膜の微細形状やコンタクト界面の詳細な構造を観察できる(図1)。

断面観察手法はその試料前処理である断面加工技術と密接な関係があり、目的に応じて、観察手法を選定している。

2.1.2 拡散層の出来栄え評価

トレンチ型又はプレーナ型のIGBTチップで、拡散層の深さ方向の出来栄え評価は、へき開やFIBによる断面加工を行った後、SEMによる電位コントラスト法と化学エッチングで段差を形成させる観察方法がある。観察位置を

指定する場合は、FIBを用いる。最近では、SCM(走査型容量顕微鏡)とSMM(走査型マイクロ波顕微鏡)を使用した拡散層の観察技術を立ち上げ、拡散層の出来栄え評価技術を飛躍的に向上させた。SCMはP/N判定が可能で、SMMは信号強度が濃度に比例するため、SCMとSMMを組み合わせることで、拡散層のP/N判定と濃度勾配の観察が可能である(図2)。

2.1.3 チップ裏面メタライズの品質評価

パワーモジュールに搭載される素子の多くは、はんだによって基板と接合される。その際に、素子裏面のメタル層(バックメタル)の表面が有機物や酸化物で汚染されていると、はんだ濡れ性が悪化し、ボイドの発生など接合状態が悪くなる。それは、はんだ接合強度の低下や熱抵抗の上昇に影響を及ぼし、信頼性低下の原因となる。

そのため、プロセス開発の段階でバックメタルの膜質を確認することが重要であり、最表面の組成、各層の膜質(膜中不純物)、膜の密着性などに着目して評価を行う。バックメタルは、表面側からA層:酸化防止膜、B層:Sn(スズ)との化合物を形成する膜、C層:バリアメタル等で構成されていて、はんだ濡れ性に影響するのはA層表面に析出するB層成分酸化と有機汚染である。特に、B層成分の表面析出と酸化は、バックメタル成膜後の熱処理によるB層元素の熱拡散と酸化が原因で、表面濃度が一定水準を

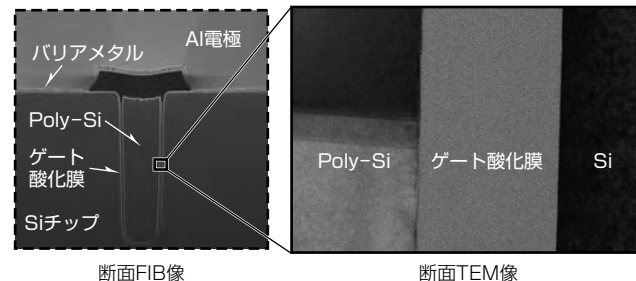


図1. トレンチセルの断面FIBと断面TEM観察事例

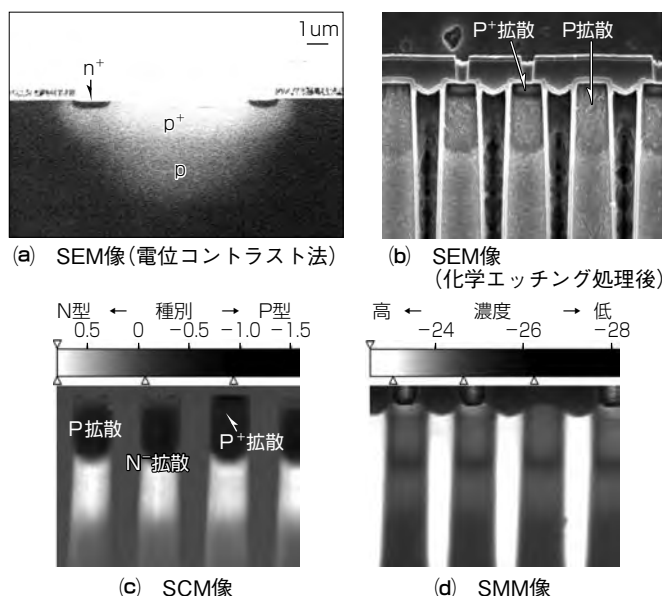


図2. 拡散層の断面観察事例

超えるとはんだボイドが発生しやすいことが分かっている。表面濃度の分析には、数nmの検出深さで分析可能なAES(オージェ電子分光)又はXPS(X線光電子分光)を用いる。

その事例として、バックメタル表面のAES分析事例を図3に示す。成分Aのほかに、成分Bと酸素(O)が検出されている。成分Aに対する成分Bの組成比(B/A比)が基準値以下になるプロセス条件を選定し、はんだ濡れ不具合を未然に防止している。

また、バックメタル表面の有機汚染、膜中と界面の成分分析にはTOF-SIMS(飛行時間型2次イオン質量分析)を活用する機会が多い。TOF-SIMSは、Bi(ビスマス)イオンを照射し、2次イオンを検出する手法であり、極最表面(情報深さ:<1nm)の有機成分や微量成分の分析に活用される。また、スパッタリングを併用し、深さ方向分析も可能であり、多層膜の酸化や有機汚染の分析に活用している。ここでは、バックメタルの膜中の僅かな酸素量や金属の酸化物成分に着目して分析し、メタル層形成時のプロセス条件の確立に寄与した事例を述べる(図4)。NG品の方がC層中の酸素の量やCO_x(Cの酸化物)量がOK品に比べて、顕著に多いことが確認された。

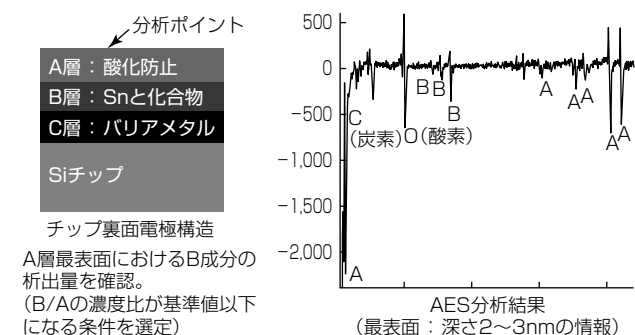


図3. バックメタル表面のAES分析事例

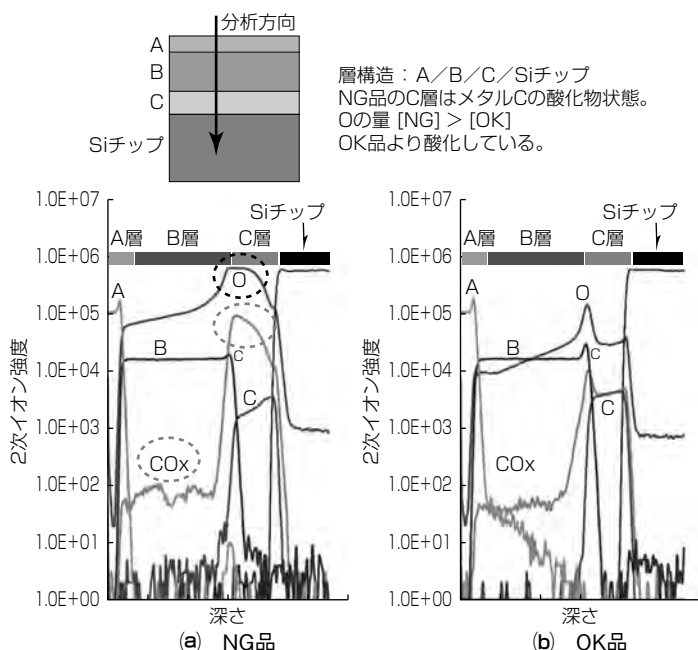


図4. バックメタル膜中のTOF-SIMS分析事例

2.2 パワーモジュールの分析評価技術

パワーモジュールの組立てプロセスでの分析手法について述べる。基本的なパワーモジュールの断面構造は、上部からチップ、セラミックス製絶縁基板、金属ベース板の構造を持っていて、それらの間にはんだで接合している。Siチップの表面電極にはAlワイヤで接合しており、シリコンゲル等で封止している構造である。ここでの着目点は、D/B(Die Bonding), W/B(Wire Bonding)など各接合界面の評価、有機材料からのアウトガス分析などである。

2.2.1 D/BとW/Bの接合界面の評価

図5に、D/B接合界面の断面模式図、断面SEM像、及びB層とIMC(Intermetallic Compound: 金属間化合物)に着目した断面TEM像を示す。Siチップ側からC層とB層の残り、さらに、SnとB層でなるIMCが鮮明に観察される。このように、最適なはんだ接合条件の選定には、IMCの形成状態などを確認することが重要である。

次に、Al(アルミニウム)ワイヤボンディング(以下“Al-W/B”)という。)の分析について述べる。Al-W/B部分の接合状態を詳細に分析することで、最適なボンディング条件の選定に寄与している。Al-W/Bの接合部を断面加工し、EBSD(電子後方散乱回折)法で観察することで、接合状態はもちろん、グレイン形状とサイズ、結晶配向等が観察できる(図6)。

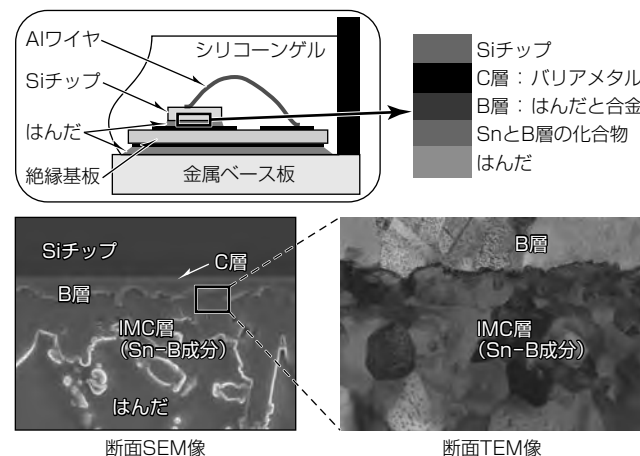


図5. D/B接合界面の断面解析事例

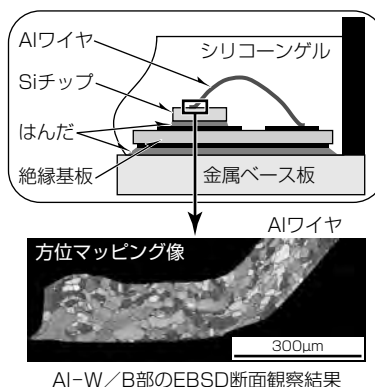
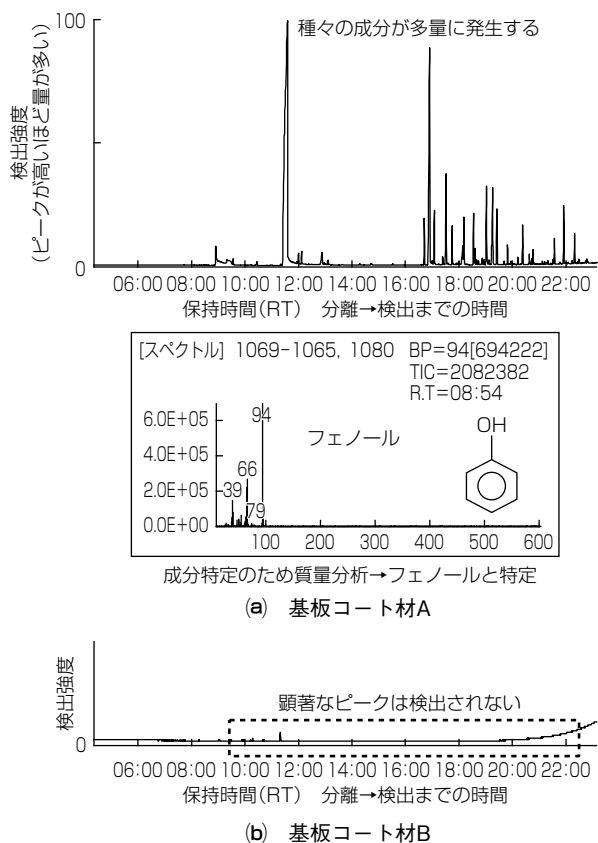


図6. Al-W/B接合界面の断面解析事例



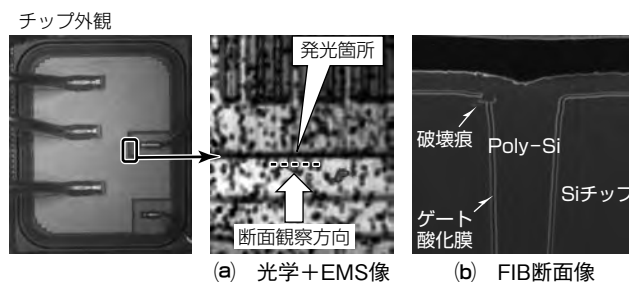
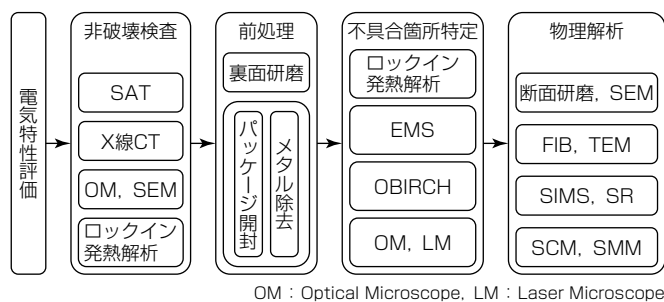
2.2.2 有機材料からのアウトガス分析

パワーモジュールには各種の有機材料が使用されていて、材料からのアウトガスによる周辺電極や接着部材などへの汚染が懸念される。シール材、有機材料などからのアウトガス分析を行い、部材認定の評価データとして活用している。基板コート材からのアウトガスの分析事例について述べる。2種類のコート材について、GC-MS(ガスクロマトグラフィ質量分析)による測定を行った結果、コート材Aは、Bに比べて、種々の有機成分が多量に検出された。検出されたピークについて、質量分析を行った結果、フェノール類が多いことも確認された(図7)。

このように、アウトガスが懸念される有機材料については、ガス発生温度と成分を事前に把握して使用することで有機汚染による不良発生リスクを軽減できる。

3. 故障(破壊)品の解析事例

開発品の信頼性試験と量産品のファイナルテストで不具合が生じた場合や顧客のアセンブリ工程又は市場稼働中に電気的特性の異常が発生した場合の基本的な解析フローを図8に示す。まず、パワーモジュール状態で、電気特性評価を実施し、不具合内容を確認する。次に、外観調査とともに、透過X線、SAT(超音波探傷)画像、ロックイン発熱解析などの非破壊検査による不具合発生位置を検出する。次に、裏面研磨やパッケージ開封で、チップを露出させ、EMS(Emission MicroScope: 発光解析)、OBIRCH



(Optical Beam Induced Resistance CHange: オバーク法光ビーム励起抵抗変化)によるチップ内の不具合箇所を特定する。その後、破壊の大きさ、不具合モード、推定原因などを考慮した上、断面研磨、FIB、TEM、SCM/SMM等の様々な物理解析手法の中から、適切な手法を選定して不具合の現象を詳細に把握する。

今回、故意に、リード端子にESD(静電気放電)を印加し、破壊させた製品の解析事例について述べる。まず、SATやX線、外観検査、発熱解析で不具合に至ったチップを特定した。次に、電気特性から表面解析を選択し、パッケージ開封後にチップ表面のEMS発光解析によってIGBTチップ内の不具合箇所を特定した。FIB断面解析を実施した結果、センス部トレンチゲートの酸化膜に破壊痕が観察された(図9)。

4. む す び

三菱電機のパワーデバイスの品質・信頼性を強力にサポートしている分析評価技術と解析事例について述べた。パワーモジュールの小型化、大容量化、高温駆動化や使用環境の過酷化に対して、高い信頼性を確保するため、今後も継続的に分析評価技術によって対応していく。

参 考 文 献

- (1) 塩田裕基, ほか: パワーモジュールの絶縁信頼性を支える絶縁評価技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 385~388 (2017)
- (2) 福本晃久, ほか: パワーモジュールの接合部での信頼性設計技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 389~392 (2017)