

パワーモジュールの最新動向と展望

Latest Trend and Prospect of Power Module Technology



岩上 徹*
Toru Iwagami



野口宏一郎†
Koichiro Noguchi

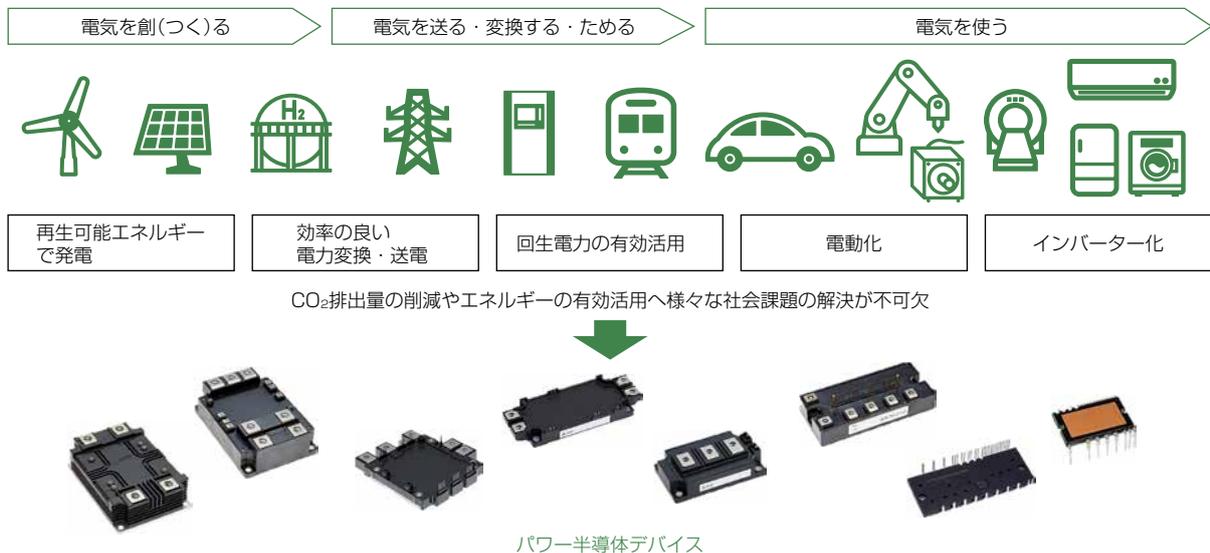
*パワーデバイス製作所長 †同製作所 商品戦略部長(工博)

要 旨

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、再生可能エネルギーの拡大と、あらゆる分野での省エネルギー化が急務になっている。その実現のため、パワーエレクトロニクスに関連する技術開発が注目されている。三菱電機の主力製品の一つであるパワー半導体は、電力システム、電鉄、自動車、家電など、あらゆる分野での適用が広がっている。用途の多様化と高性能化によって、パワー半導体の改善には幅広い技術と高度な設計技術が必要になっている。

1. ま え が き

電気エネルギーを効率的に利用し、創エネルギー・省エネルギーに貢献するパワーエレクトロニクス技術の応用範囲は多岐にわたる(図1)。このキーパーツとして拡大を続けるパワーデバイスは、数Aから数千Aまでの定格電流、また数百Vから数千Vまでの定格電圧と、様々な種類の製品が開発されてきた。パワーデバイスの代表素子であるSi(シリコン)パワー半導体のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)は、現在は第7世代まで進化が進んでおり、高効率化・小型化・軽量化・長寿命化など進化に合わせて様々な市場ニーズに対応してきた⁽¹⁾。今後も、Siパワー半導体の進化は継続が予想されるが、近年では更なる高効率化のためにSiC(シリコンカーバイド)パワー半導体の適用が急速に拡大する見込みであり、このSiCパワー半導体自体の性能改善やSiCパワー半導体の性能を引き出すパッケージ技術の進展も見込まれている。



GX : Green Transformation

図1-GXの実現に向けた当社のパワー半導体デバイス

本稿では、パワーモジュールが適用される分野ごとに、性能・小型・軽量・コストを最適なバランスで設計した当社パワーモジュールの技術とそれぞれの用途別の製品の展望について述べる。

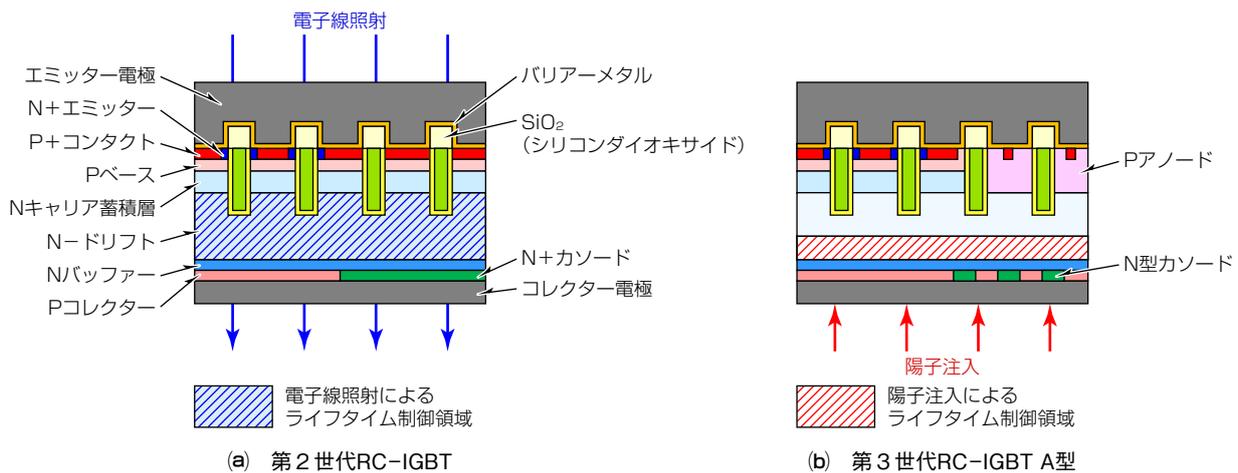
2. パワーモジュール技術の最新動向

2.1 パワーチップ技術

現在、パワーモジュールに適用される主力のパワー半導体素子は、Si-IGBTとSiダイオードであるが、近年ではIGBTと環流ダイオードをワンチップ化したRC(Reverse Conducting)-IGBTが注目されている。パワーモジュールの小型軽量化、高出力化に大きく貢献する素子として、エアコンなどの家電製品や産業用モータードライブ、電気自動車などの幅広い分野で採用が拡大している。

当社は2006年に世界で初めて^(注1)第1世代RC-IGBTを家電製品のモーター制御用パワーモジュールに搭載し製品化した。2015年には微細加工と薄ウエハー技術によって大幅に損失改善した第2世代RC-IGBTを量産開始した。現在は第3世代RC-IGBTでの性能改善に向けて、更なる薄ウエハー化による導通損失の低減に加えて、IGBTゲート容量制御やRC-IGBT特有のダイオード構造によってスイッチング損失の低減、ダイオードレイアウト最適化によって放熱性の改善を進めている(図2)。

(注1) 2023年6月23日現在、当社調べ



出典：電子デバイス/半導体電力変換合同研究会

図2- 第2世代RC-IGBTと第3世代RC-IGBTの構造比較

WBG(Wide Band Gap)半導体は、高耐圧、低損失、高速スイッチングを実現するパワーデバイスの有望な材料として注目が高まっている。その中でもSiC、GaN(ガリウムナイトライド)、Ga₂O₃(ガリウムオキシサイド)、AlN(アルミナイトライド)、ダイヤモンドは、次世代のパワー半導体になり得る材料と考えられている。近年、SiCとGaNは共に、材料品質、先進的なデバイス設計、プロセス能力で目覚ましい進歩を遂げて、現在では鉄道や電源を中心に採用が拡大している。

Siと比較して約10倍高い絶縁破壊電界強度を持つSiCパワー半導体は、同じ定格電圧だとドリフト層を約10倍薄くでき導通損失を大幅に改善できる。合わせてMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)構造を採用することでスイッチング損失の低減も可能である。信頼性に関しても従来Siパワー半導体よりも動作温度範囲を拡大できる。当社では現在、構造開発を終えた、第2世代プレーナMOSFETを各種モジュールに搭載し製品化を進めている。

近年では、更なる導通損失低減を狙ったトレンチMOSFETであるMIT²-MOS(Multiple-Ion-Implantation into Tilted Trench Side Walls)、及び3.3kV以上の耐圧域を狙ったSBD(Schottky Barrier Diode)内蔵MOSFETの開発を進めている。トレンチMOSFETの実用化には、トレンチゲートの先端部分がSi半導体素子と変わらずSi酸化膜に覆われているため、絶縁破壊耐量の確保のために高度な電界ストレスの緩和が必要になる。新構造のMIT²-MOSは、トレンチゲート底部に三つの注入層を設けることで解決した。この構造は高信頼性用途の要求に耐え得るSiCトレンチゲートMOSFETとして展開していく。

SBD内蔵MOSFETについては、高耐圧MOSFETで顕著になるMOSFETのボディダイオードへのバイポーラ電流の通電による特性劣化を抑制するために採用した構造である。

2.2 パッケージ技術

Si半導体素子を搭載したIGBTモジュールでは、最大動作温度175℃が一般的になり、またSiC半導体素子の採用によって更なる高温動作化が見込まれている。高温動作に対応する半導体素子周辺部材の進化が必要になるとともに、半導体素子からの発熱を効率良く放熱する構造・材料開発が必須であり、パワーモジュールのパッケージ技術開発が注力されている。

2.2.1 素子接合技術

環境規制で鉛(Pb)の使用が制限されたことで、近年ではスズ(Sn)合金材料のはんだが主に使用されているが、高い信頼性が要求される電鉄や車載向けのパワーモジュールの素子接合については、微細金属パウダーによる金属焼結接合が用いられることが増えてきた。一般的な金属焼結接合では、接合時の高温・高圧による半導体素子へのストレスが問題になる。当社では素子へのストレス緩和策を講じるとともに、無加圧下、低圧力下でも結合可能な金属焼結技術の開発を進めている。

2.2.2 ワイヤ配線技術

ワイヤ配線には、以前からアルミニウム(Al)又はアルミニウム合金ワイヤが使用されているが、近年、高信頼化を目的とした銅(Cu)ワイヤの採用が進んでいる。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)など硬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、半導体素子とリードフレームなどの銅板を直接接合材で接続したDLB(Direct Lead Bonding)構造を車載向けのパワーモジュールを中心に採用を継続していく。

2.2.3 放熱技術

更なる冷却性能改善と長寿命化のため、半導体素子を搭載した絶縁基板とヒートシンクを一体化し、はんだ層とグリース層の削減を実現する技術を開発した。冷却性能改善によってパワーモジュール自体の小型化・大電流化が可能で高パワー密度実装を実現できる。一方で、近年の市場拡大に合わせて車載向けインバーター形状が多様化しており、それぞれの形状に適したヒートシンク設計の要求が高まっている。ヒートシンク一体型技術に加えて、パワーモジュールとヒートシンクを焼結銀などの熱伝導率の高い金属材料で接合する技術の開発も進めている。

2.2.4 封止技術

半導体素子表面の保護やモジュール内部の絶縁確保のために、封止材料が用いられる。当社では、封止材料が筐体(きょうたい)を兼ねたモールド型パワーモジュールと、ケース内部に液状材料を注入して封止するケース型パワーモジュールがある(図3)。モールド型パワーモジュールは、金型を用いて生産するため高い生産性が得られるとともに、樹脂材料によって強固にワイヤやはんだなどの接合材を保護できるため、信頼性が高いという特長を持ち、民生などの小容量のパワーモジュールから車載などの中容量のパワーモジュールにまで幅広く適用されている。

ケース型パワーモジュールでは、シリコンゲルで封入される製品が多く見られるが、当社ではダイレクトポッティング(DP)樹脂による封止技術を実現している。DP樹脂は高温環境下で高い安定性を持ち、さらにシリコンゲルが凝固する-50℃以下の過酷な環境にも耐えることが可能である。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る特長を持つ。電力システムや産業向けなどの高い信頼性が要求されるパワーモジュールに適用され、更なる適用範囲の拡大を検討している。



図3-パワーモジュールの封止構造

3. 市場別の製品技術と展望

3.1 自動車応用製品

車載用パワーモジュールは、車両の居住空間、荷物スペースの確保及び衝突安全性を確保するためにパワーモジュールの小型化、軽量化、低背化が求められている。当社では20年以上にわたって車載用パワーモジュールを開発・製品化することで、自動車の電動化の発展に貢献してきた。特に近年では電気自動車の普及が急速に進んで、自動車メーカーでも複数の車種の電動化を進めているため、多様な出力のモーター駆動用インバーターの開発が急務になっている。しかしながら、モーター駆動用インバーターに適用するパワーモジュールは、様々な形状・特性があるため、製品ごとにインバーター設計を行わねばならず、開発負荷が高いことが課題になっている。

当社では、これまで培ってきたトランスファーモールド技術を用いたJ3シリーズの開発を進めている(図4)。J3シリーズは、小型、低背、軽量の2in1モジュールであるJ3-T-PMをコアとし、要求に合わせてJ3-T-PMの並列数を増やすことで高出力化できる。また、RC-IGBT又はSiC-MOSFETのパワー半導体を搭載した製品ラインアップによって、モーター最大定格50kWから300kWまで幅広い出力に対応可能である。製品ごとの要求に合わせて並列数や搭載パワー半導体を選択することでインバーター設計を容易に実現でき、開発負荷を軽減できる。

より一層加速する電動化に貢献するためにも、当社はSi、SiCパワー半導体技術、パッケージング技術に対して更なる要素技術開発、及び製品化を継続して進めていき、環境保全や持続可能社会の実現に貢献していく。

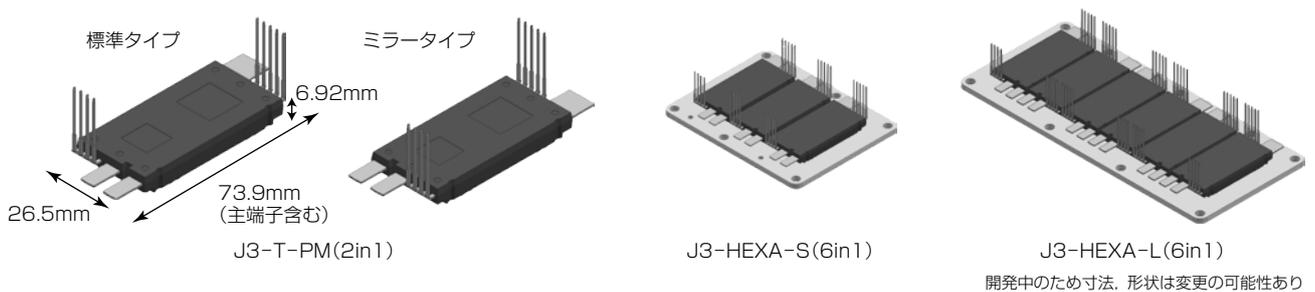


図4-J3シリーズ

3.2 民生応用製品

近年、家電の高機能化と世界的な省エネルギー意識向上に伴い、白物家電市場ではインバーター化が急速に進んでいる。当社では、1997年からパワーチップとそれを駆動するICチップを内蔵したトランスファーモールド構造のDIPIMを製品化しており、品質向上及びインバーターシステムの設計負荷軽減に貢献してきた。2015年にはSLIMDIPをリリースし、IGBTと環流ダイオードを一つのチップ上に形成した構造を持つRC-IGBTを適用することによって、低コスト化とパッケージとしては業界最小(注2)となる小型化を達成した。既存のパッケージである超小型DIPIMと比較して、フットプリントは30%小型化した(図5)。また、RC-IGBTの高キャリア周波数駆動に適したSLIMDIP-W、ノイズ低減を実現し

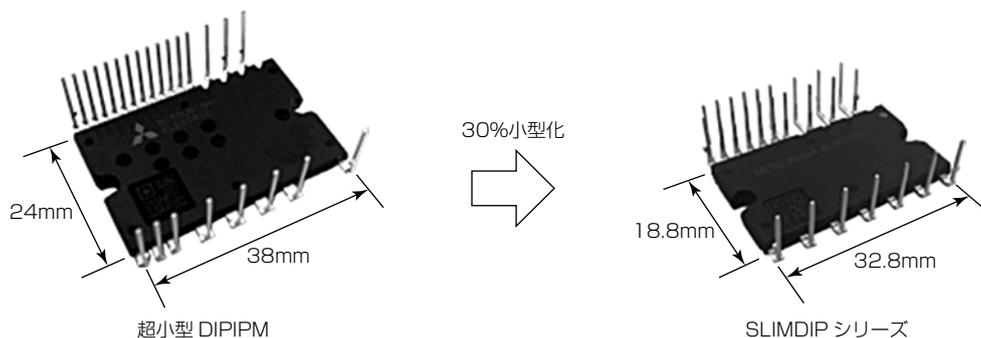


図5-パッケージサイズ比較

たSLIMDIP-X, 最大定格30Aの大電流化を実現したSLIMDIP-Zとラインアップを拡充させたことによって, 超小型DIPIPMと同等の幅広い容量帯をカバーすることを達成した(表1)。

表1-超小型DIPIPMとSLIMDIPシリーズのラインアップ比較

超小型DIPIPM	SLIMDIPシリーズ	定格電流	定格電圧
PSS05S92*6	SLIMDIP-S	5 A	600V
PSS10S9**6	SLIMDIP-M	10A	600V
PSS15S9**6	SLIMDIP-L	15A	600V
PSS20S9**6	SLIMDIP-X, -W	20A	600V
PSS30S9**6	SLIMDIP-Z	30A	600V

今後, SLIMDIPシリーズで白物家電のインバーター化・高効率化をトータルでサポートしていくために, 生産効率に優れる12インチウエハー対応のパワー半導体を適用し安定供給に努めるとともに, SiCなど次世代パワー半導体の適用による付加価値向上に努めていく。

(注2) 2015年4月23日現在, 当社調べ

3.3 再生可能エネルギー応用製品

太陽光発電システムや風力発電システムでは, 再生可能エネルギー拡大の期待に対応するため, 出力電力の大容量化が求められている。これまでは, パワーモジュールの定格電流・定格電圧を上昇させることで出力電力の大容量化に対応してきた。しかしながら, 大電流化によってバスバーやケーブルなどのパワーモジュール以外の周辺部品の発熱も著しく大きくなる点や, 高電圧化によって半導体素子定格と動作電圧との尤度(ゆうど)が小さくなり宇宙線による破壊耐量の上昇が課題になっている。

当社では, 現在主流であるDC1,500V電力変換機器に対応するパワーモジュールとして, 鉄道・電力用途で広く使用されている汎用性の高い共通外形パッケージであるLV100タイプを, 新たに産業用途向けに開発した(表2)。独自のCSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)構造を採用した第7世代IGBT及びRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを, 高耐電圧仕様にそれぞれ最適化し, トレードオフ関係にある高電圧動作対応と低電力損失を両立させることで, 業界最大クラスの電流密度を実現した。また, 端子配列の最適化と出力電極の3端子化によって, IGBTモジュールの並列接続の容易化と電極端子の発熱緩和を実現し, 様々なインバーター構成への対応と高出力化を可能にした。

表2-当社LV100パッケージ製品ラインアップ一覧

製品	絶縁耐圧 4 kV 製品群 (産業用途向けLV100)			絶縁耐圧 6 kV 製品群 (電鉄用途向けLV100)	
					
外観サイズ(mm)	100×140×40			100×140×40	
絶縁耐圧(kV)	4			6	
定格電圧(kV)	1.2	1.7	2.0	1.7	3.3
定格電流(A)	Si	800 1,200	800 1,200	1,200	450 600
	ハイブリッドSiC	-	-	-	600
	フルSiC	-	-	-	750 800
品質マネジメント	ISO9001			IRIS	

今後, カーボンニュートラル実現への世界的潮流が加速していくことが見込まれ, 更なる大電流化・高電圧化の技術開発を進めるとともに, LV100パッケージの適用領域を産業用途向けにも拡大し標準化に貢献していく。

3.4 電鉄・電力応用製品

社会インフラを担う鉄道や電力システム用途では、高信頼性と低損失の要求が高く、特に高速鉄道向けには他製品に先駆けてSiCパワー半導体が搭載されたパワーモジュールが適用されている。鉄道や電力システム用途では、適用される電圧レベルが高いことから、SiCのボディダイオードのバイポーラ劣化が顕著に見られるという課題があった。

当社で開発したSBD内蔵MOSFETでは、SBDを内蔵したことでボディダイオード通流を抑制し、バイポーラ劣化のリスクを最小化できるようになった。さらに、従来のMOSFETとSBDを個別に搭載する素子構成と比較して、SBDを内蔵した1チップにすることでスイッチング損失の低減が可能になり、更なる高効率化を実現した。

この技術を適用したSiCパワーモジュールを一般鉄道向けなどに適用を拡大し、鉄道や電力システム分野の製品の省エネルギー化に貢献する。

4. む す び

当社は、カーボンニュートラルの実現に向けて急速に拡大する市場の要望に合わせて、Si半導体、SiC半導体を中心とした多種多様なパワーデバイス技術と、トランスファー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、幅広い要求に対して最適なソリューションを提案する。また、各アプリケーションに適したパワーモジュールのパフォーマンスを追求し、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) 安田幸央, ほか: パワーモジュールの最新動向と展望, 三菱電機技報, 96, No.3, 139~143 (2022)