

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

高橋 良和 TAKAHASHI, Yoshikazu

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN, Toru

① まえがき

富士電機は、創業以来90年にわたり磨き上げてきた電気・熱エネルギー技術と、それを駆使したものづくり力で、地球規模の重要なテーマの一つであるエネルギー課題の解決に取り組んできている。

近年、ますます深刻となっている地球温暖化を防止し、地球環境との調和を図りつつ、安全・安心で持続可能な社会を実現する必要がある。そのため、太陽光発電などの再生可能エネルギーの普及と、エネルギーの効率的な利用を支えるパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術に対する世の中の期待は非常に大きい。

このような期待の中、富士電機では、省エネルギー（省エネ）で地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発し、製品化している。パワー半導体は、エネルギーと環境分野をはじめとした自動車、産業機械、鉄道車両および家電製品においてパワエレ技術のキーデバイスとして世の中に貢献している。

本稿では、パワーモジュール^{(*)1}、パワーIC^{(*)2}、パワーディスクリート^{(*)3}を中心に、パワー半導体の最新の技術および製品の現状と展望について述べる。

② パワーモジュール

図1に、パワーモジュール製品の応用例を示す。大容量市場向けには、SiC-SBD^{(*)4} (Schottky Barrier Diode) と SiC-MOSFET^{(*)5} を搭載した All-SiC^{(*)6} モジュールを開発した。また、SiC-SBD と Si-IGBT^{(*)7} (Insulated Gate Bipolar Transistor) とを組み合わせた 1,700 V 耐

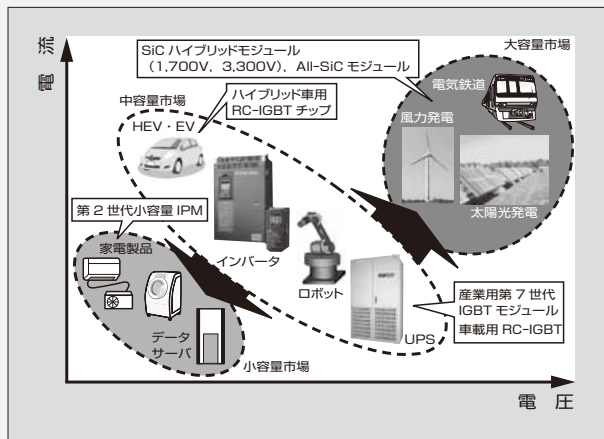


図1 パワーモジュール製品の応用例

(*) 1) パワーモジュール

ダイオードやトランジスタといった複数のパワー素子を一つのパッケージに搭載したものである。一つのモジュールの中の素子（通常は IGBT+逆並列接続 FWD）の数に応じて、1in1, 2in1, 6in1 などと呼ばれる。パワー素子を制御する駆動回路も搭載したものは、インテリジェントパワーモジュール (IPM) と呼ばれる。

(*) 2) パワー IC

パワー素子と制御・保護回路を一つの半導体チップ上に集積した高耐圧 IC である。パワーエレクトロニクス機器の小型化や低消費電力化が可能となり、産業、車載、民生の各用途に応じて数十 V クラスから 1,200 V クラスまでのものが製品化されている。

(*) 3) パワーディスクリート

パワー素子の IGBT や MOSFET を 1 素子、またはそれに逆並列にダイオードが挿入された 1in1 と呼ばれる回路から構成されるパワー半導体である。形状は、汎用的にピンレイアウトが決まっており、TO-220 や

TO-3P などがある。小容量タイプの PC 電源、無停電電源装置、液晶ディスプレイ、小型モータの制御回路などに使われている。

(*) 4) SBD

Schottky Barrier Diode の略である。金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用した整流作用を持つダイオードである。その優れた電気特性により、SiC-SBD の FWD への適用検討が始まっている。少数キャリアも利用する PiN (P-intrinsic-N) ダイオードと比較して、多数キャリアのみで動作する SBD は逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。

(*) 5) MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor の略である。電界効果トランジスタの一つであり、酸化物質絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。LSI では最も一般的な構造である。ユニポーラ動作であるため高速動作が可能であるが、耐圧に応じてオン抵抗も上昇するため低耐圧・高周波デバイスとして用いられる。

(*) 6) SiC

けい素 (Si) と炭素 (C) の化合物である。3C, 4H, 6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって 2.2~3.3 eV のバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとして実用化が進められている。

(*) 7) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor の略である。ゲート部は MOSFET と同じ構造で、酸化物質絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。MOSFET とバイポーラトランジスタの長所を生かしたものである。バイポーラ動作であるため伝導度変調を用いることができるので、インバータへの応用に十分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立できる。

圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、製品化した。さらに、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、駆動用主変換装置（インバータ、コンバータ）に搭載して新幹線にて走行試験を実施中である。中容量市場では、産業用第 7 世代 IGBT モジュール、車載用 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆導通 IGBT）モジュールを開発し、実用化した。小容量分野では、第 2 世代小容量 IPM^{(*)9} (Intelligent Power Module) を開発し、製品化した。

また、車載向けの直接水冷のためのパッケージ技術にも取り組んでいる。

2.1 All-SiC モジュールのパッケージ技術

近年、急速に普及している太陽光発電において、発電した電力をより効率的に供給するため、富士電機では、All-SiC モジュールを搭載したメガソーラー用パワーコンディショナ（PCS）の量産を 2014 年度に開始した。図 2 に PCS の外観と内蔵するパワーユニット、および All-SiC モジュールの外観を示す。All-SiC モジュールを搭載することで効率 98.8% を実現し、さらに装置の小型・軽量化も図っている⁽¹⁾。このモジュールは、従来の Si-IGBT モジュールと異なり、銅ピンとパワー基板を用いた三次元配線や、厚銅板と高熱伝導セラミックス基板（Si₃N₄）を接合したセラミックス絶縁基板の採用により、小型、低インダクタンス、低熱抵抗化を図っている。また、これらをエポキシ樹脂で封止することによって、電氣的絶縁性を確保すると

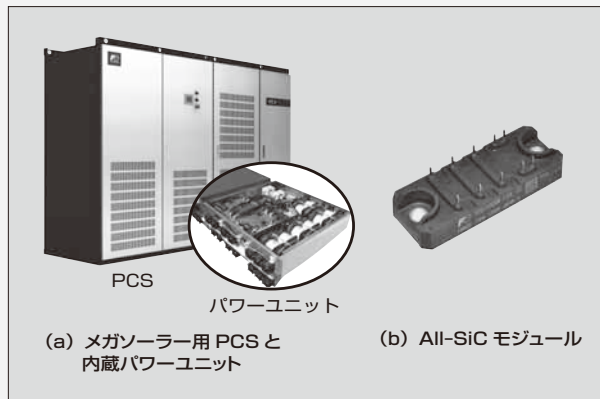


図2 メガソーラー用 PCS と All-SiC モジュール

も、チップ接合部のひずみを緩和して信頼性を大きく向上させている（241 ページ “All-SiC モジュールのパッケージ技術” 参照）。

2.2 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

富士電機では、これまでに 600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧の SiC-SBD の開発を完了しており、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。今回、系列の拡大を図るため、電気鉄道市場に向けた高信頼性 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、製品化した。

1,700 V/1,200 A (2 in 1) 定格の SiC ハイブリッドモジュールは、高信頼性を確保するため、ベース材料に AlSiC（アルミニウムと炭化けい素の複合材料）、絶縁基板材料に高熱伝導率の AlN（窒化アルミニウム）を適用した高信頼性パッケージを採用している。また、電気鉄道市場では、キャリア周波数が約 0.5 kHz 以下という低いスイッチング周波数における運転が多いことから、定常損失が支配的となる。この SiC ハイブリッドモジュールでは、キャリア周波数が 0.3 kHz のとき、コレクターエミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ が低い仕様では、ターンオフ損失 E_{off} は増大するものの、発生損失は Si モジュールに対して 11%、標準仕様に対して 6% 低減する（245 ページ “1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール” 参照）。

2.3 3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

富士電機では、1,700 V を超える高耐圧化要求に応えるため、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発した。

図 3 に、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観・内部回路およびフットプリントサイズの比較を示す。FWD（Free Wheeling Diode）には、共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション（TPEC）と共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si-IGBT モジュールよりも発生損失を大幅に低減させた。2.4 節で述べる第 7 世代「X シリーズ」IGBT モジュールのために開発した Sn-Sb 系はんだをチップ下のはんだに適用することで、高信頼性を確保し、連続動作温度を Si-IGBT モジュールの 125 °C

(* 8) RC-IGBT

Reverse-Conducting（逆導通）IGBT の略である。モジュールにおいて対で使われる IGBT と FWD を 1 チップ化した素子である。IGBT 部と FWD 部が交互に動作するので放熱性に優れ、モジュール内のチップ数を削減できるため、IGBT モジュールの小型化とパワー密度向上につながる。

(* 9) IPM

Intelligent Power Module の略である。パワー半導体素子に加え、駆動回路、保護回路を内蔵したパワーモジュールである。回路設計の負担を軽減できる上、専用の駆動回路を用いることで半導体素子の性能を最大限に引き出すことができる。

(* 10) FWD

Free Wheeling Diode の略である。還流ダイオードともいう。インバータなどの電力変換回路において、IGBT と並列に接続され、IGBT をオフした際にインダクタンスに蓄えられたエネルギーを電源側へ還流させる役割を担うデバイスである。Si の FWD では、PIN ダイオードが主流である。少数キャリアも用いたバイポーラタイプであるため、順方向電流通流時の電圧降下を小さくできるが、その分、逆回復損失が大きくなる。

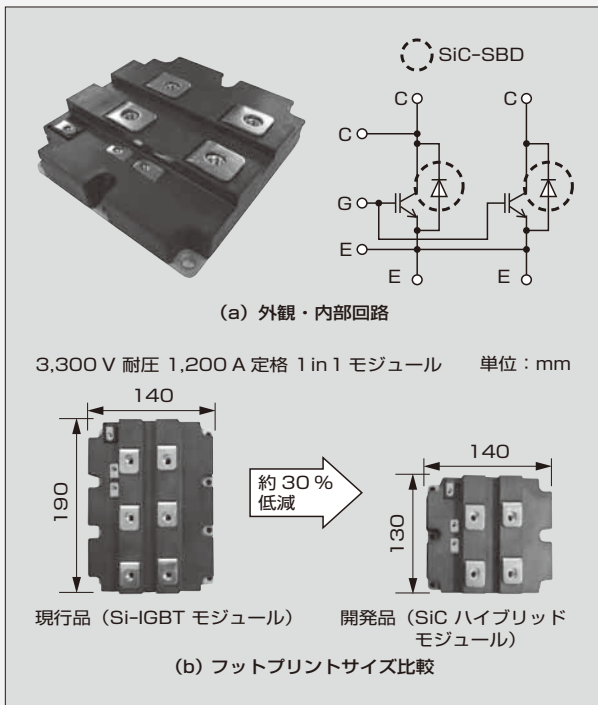


図3 3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュールの概要

から 150℃に向上させた。これら発生損失の低減および連続動作温度の向上によって高パワー密度化を実現し、図3(b)に示すとおり、現行品と比較してモジュールのフットプリントサイズを約30%低減した(249ページ“3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュール技術”参照)。

2.4 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール

富士電機では、IGBTモジュールのさらなる小型化、低損失化、高信頼性化を実現するために、新たなチップ技術およびパッケージ技術を開発し、これを適用して第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュールを開発した。本モジュールでは、チップ特性とパッケージの長期信頼性を向上することにより、チップ接合温度 T_j が175℃での連続動作を実現した。

チップの小型化、すなわちパワー密度の上昇に対しては、チップ接合温度の上昇とこれによる信頼性の低下が課題となる。新たに開発した薄型のAlN絶縁基板により放熱性を向上させるとともに、高強度はんだの採用とワイヤボンディング設計の最適化により、 ΔT_j パワーサイクル耐量も向上させた。

さらに、従来よりも耐熱性を向上させたシリコンゲルを採用することにより、XシリーズIGBTモジュールでは連続175℃動作が可能となった。また、放熱性も改善したことにより、同じ定格電流の第6世代「Vシリーズ」の製品と比べて、約35%の出力電流の増加が可能になった(図4)。従来製品からXシリーズIGBTモジュールに置き換えることによって電

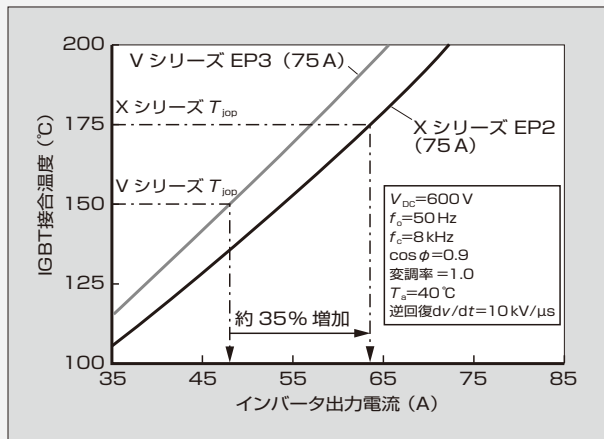


図4 インバータ出力電流とIGBT接合温度の関係

力変換装置が小型になり、今後の電力変換装置のさらなる普及と高効率化によって世界的なエネルギー問題の解決にも大いに貢献できる(254ページ“第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール”参照)。

2.5 第2世代小容量IPM

モータドライブシステムの構築に必要なパワーデバイスや制御ICなどを一つのパッケージに集積した小容量IPMを開発し、製品化してきた。小容量IPMには、三相インバータブリッジ回路、制御回路・保護回路を内蔵している。図5に製品の外観を、図6に回路構成を示す。

今回、さらなる省エネを図るため第2世代小容量IPMを開発した。第2世代小容量IPMは第1世代と同一の外形サイズ、ピン配置の互換パッケージ構造としている。ラインアップは600V/10~30Aであり、エアコンの入力電力1.5kVAのコンプレッサ用と、0.1~0.2kW出力の小容量の産業用インバータやサーボ向けに新たに10A定格を加え、系列拡充を行っている。

第2世代小容量IPMの特徴は次のとおりである。

- (a) 省エネ性能が向上する低損失特性
- (b) インバータの設計自由度向上と動作領域の拡大
- (c) 熱抵抗の低減

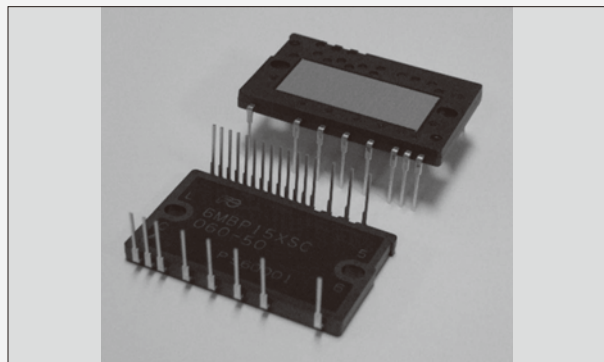


図5 第2世代小容量IPM

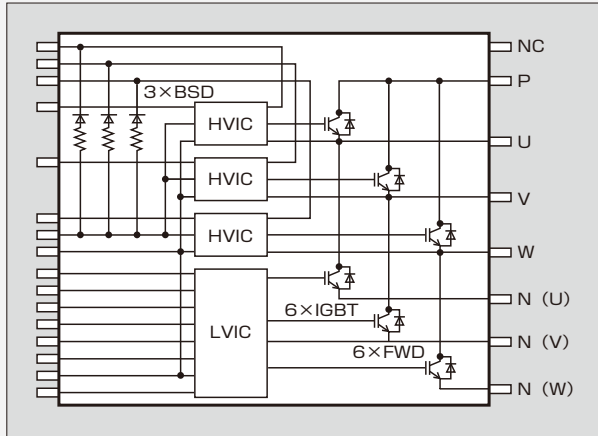


図6 内部等価回路の構成

通年エネルギー消費効率（APF：Annual Performance Factor）に対する省エネ性能として特に要求される中間負荷領域において、10%以上の損失を低減している。また、動作保証温度の拡大と熱抵抗の低減により、許容電流と適用容量を拡大し、システムの設計自由度が向上する製品となっている（259ページ“第2世代小容量IPM”参照）。

2.6 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術

車載用パワーモジュールには大幅な電力密度の向上が求められ、富士電機では、車載用アルミニウム直接水冷型パワーモジュールを開発し、製品化している。また、第1世代（2012年）の製品に対し、第2世代（2015年）、第3世代（2018年）と世代ごとに電力密度を20%以上向上する技術開発を行っている。図7に直接水冷構造を示す。今回、第3世代の直接水冷型パワーモジュールではIGBTとFWDを統合したRC-IGBTチップを採用することで、第2世代より30%の大幅なフットプリントの削減を行っており、冷却構造の最適化によって薄型化を実現している。

軽量なアルミニウム冷却器を用いた放熱性能の向上と高密度配線技術の技術展開に向けて、シミュレーションと信頼性予測技術を用いて次の設計技術を構築した。

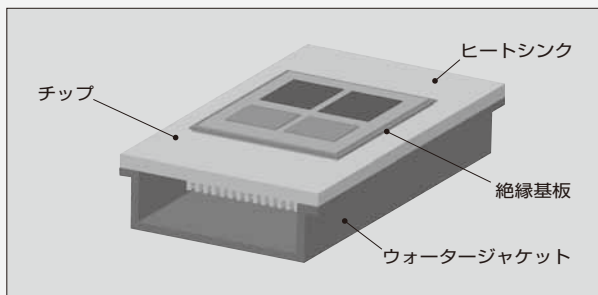


図7 直接水冷構造図

- (a) 高放熱冷却器の設計技術
- (b) 超音波接合の設計技術
- (c) 175℃連続動作保証技術

これを実現するため、冷媒の流れと熱伝がりを再現する高精度な熱流体シミュレーション技術、ならびに実機破壊モードに合わせたテストピースによる寿命予測技術により、高精度な製品設計技術を構築した。この設計技術を駆使して、要素技術の向上や製品開発期間の短縮を進め、早期の技術展開を実施している（274ページ“車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術”参照）。

2.7 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

富士電機では、ハイブリッド自動車（HEV）や電気自動車（EV）に搭載されるインバータの小型化や高効率化に貢献するために、車両内部の限られたスペースに搭載可能で、高電力かつ低損失な車載用第3世代標準モジュールを開発した。

図8に、車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの外観を示す。開発した製品は、カバー一体型のアルミニウム製の冷却ユニットを採用することで高い冷却性能を実現し、従来構造に比べて熱抵抗を30%低減した。また、新はんだを開発して信頼性を向上させ、175℃動作が可能となった。さらに、同製品に適用したRC-IGBTチップは、第7世代チップ技術を使用することで損失の低減を図った。RC-IGBTは、IGBTとFWDを一つのチップに収めたものである。従来のIGBTチップとFWDチップを組み合わせた場合の合計のチップ面積に比べて30%削減し、インバータ動作時の電力損失は20%以上低減した。

高放熱性能を実現した冷却システムの使用をはじめ、動作温度を175℃にし、RC-IGBTを搭載することにより、従来品に対して電力容量当たりの体積を40%削減した第3世代標準モジュールを実現した（269ページ“車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール”参照）。

2.8 車載用RC-IGBT

富士電機は、マイルドハイブリッド車用RC-IGBT

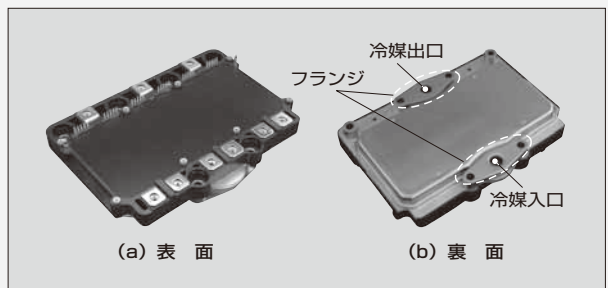


図8 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

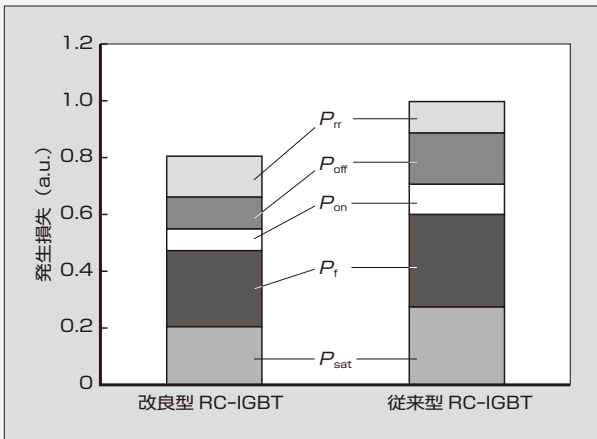


図9 車載用 RC-IGBT のインバータ動作時の発生損失

(従来型 RC-IGBT) を改良し、より低損失化した車載用 RC-IGBT (改良型 RC-IGBT) を開発した。フルハイブリッドやマイルドハイブリッドなどモータの各駆動方法に対応することができる。HEV のインバータ動作時を想定した発生損失では、図9に示すように定常損失 (P_{sat} , P_f) の低減が必須である。車載用 RC-IGBT では、表面構造の微細化、フィールドストップ (FS) 構造の最適化、ライフタイム制御方法の確立などで、低オン電圧化、低定常損失化、低スイッチング損失化を実現し、インバータ動作時の発生損失を約 20% 低減した (279 ページ “車載用 RC-IGBT” 参照)。

③ パワー IC ・ パワーディスクリートおよび車載用センサ

パワー IC ・ パワーディスクリート分野においては、^(*)11)ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」、第 2 世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」、高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」の製品化、およびインテリジェントパワーモジュール用 HVIC 技術の開発を行った。

また、自動車の環境負荷低減のために車載用燃料タンク圧検知相対圧センサを製品化した。

3.1 IPM 用 HVIC 技術

IPM は、システムにおける部品点数の削減や小型化、設計の簡素化などに貢献し、産業機械、エアコンなどの家電製品、サーバ用電源機器など幅広い用途で用いられている。

富士電機では、新たに 600 V/1,200 V 耐圧保証 HVIC

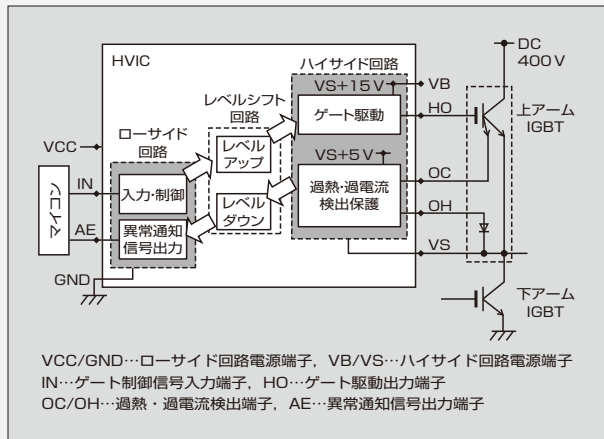


図10 1,200 V 耐圧保証 HVIC 回路および周辺回路ブロック図

技術を確立した。図10に、1,200 V 耐圧保証 HVIC 回路および周辺回路のブロック図を示す。上アーム側に過熱・過電流保護技術を導入することより素子保護機能を実現した。また、新規の省面積耐圧構造と高ノイズ耐量レベルシフト回路技術の導入により、20% の省面積化と高信頼性化を図った (264 ページ “IPM 用 HVIC 技術” 参照)。

3.2 ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」

富士電機では、以前から高効率、低待機電力、低ノイズカレントモード電源制御 IC を多数製品化している。ノート PC やインクジェットプリンタ分野において、新 CPU やモータの駆動負荷など最大出力電力の増大に対応するために PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」を新規に開発した。その特徴としては、高いスイッチング周波数に対応することによる 3 段電力出力、ライン電圧変動に強い過電流保護の高精度化やスイッチング周波数ジッタ拡大による EMI ノイズ低減効果の強化などがある。その結果、ピーク負荷対応を可能にしたほか、電源平均効率が 0.2 ~ 0.3% 向上できた (287 ページ “ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」” 参照)。

3.3 第 2 世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」

富士電機では、高効率な電力変換を実現可能とする優れた特性を持つ製品の開発に取り組んでいる。今回、素子の耐圧 BV_{DSS} と単位面積で規格化されたオン抵抗

(*) 11) PWM

Pulse Width Modulation (パルス幅変調) の略である。スイッチング素子を用いた電力制御の方式の一つである。

る。DC 入力に対し、一定周波数でオン・オフを繰り返す。DC-AC 変換を行う際などに一般的に用いられている。

$R_{on} \cdot A$ とのトレードオフをさらに改善し、かつターンオフ時の跳ね上がり電圧を抑制することで誤オンを抑制し、使いやすさと電力変換機器の変換効率を向上した、第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」を開発し、製品化した。表1に、その製品系列を示す。

電源の CCM-PFC 回路部に搭載して、従来品と比較し、全負荷領域において高効率であることを確認した(292 ページ “第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」” 参照)。

3.4 高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」

無停電電源装置 (UPS) や PCS, 小型のインバータ溶接機では、スイッチングデバイスに対する小型・軽量化を可能とする高速スイッチングと低損失の要求が強い。今回、富士電機では、オン電圧とスイッチング特性のトレードオフを改善した高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」を開発し、製品化した。

従来品の「High-Speed V シリーズ⁽⁷⁾」に対して、High-Speed W シリーズでは、650 V および 1,200 V IGBT で、寄生容量を大幅に低減させた活性部構造と、FS 層の最適化、ホールを抑制するコレクタ層、基板の薄化などを行い、高速駆動向けに E_{off} を約 40% 以上低減した。

5 kW 出力の UPS への適用を想定した発生損失のシミュレーションでは、1,200 V クラスの IGBT で、従来品に対してトータル損失を約 19% 低減した。ま

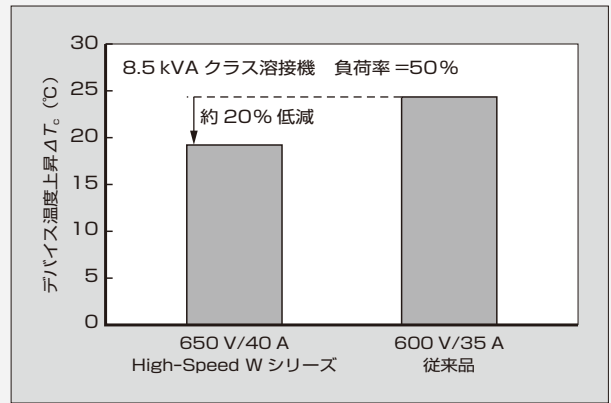


図11 600V系 IGBT の溶接機評価結果

た、図11の600V系 IGBT の溶接機評価結果に示すように、8.5kVA クラスの溶接機では600V クラスの IGBT で、デバイスの温度上昇が従来品より約 5°C (約 20%) 低く抑えられる。1,200 V IGBT, 600 V IGBT とともに発生損失の大きな割合を占める E_{off} を低減させたことが、トータル損失の低減に大きく寄与している(296 ページ “高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」” 参照)。

3.5 車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ

米国では、自動車の環境負荷の低減が求められ、その一環として気化燃料漏れの検出が義務化されている。この検出を実現するため、富士電機では、車載用燃料タンク圧検知相対圧センサを開発した。

図12にセンサセルの実装形態の例を示す。相対圧センサのパッケージに、燃料耐性を持つ O リングや車

表1 「Super J MOS S2 シリーズ」の製品系列

V_{DS} (V)	$R_{DS(on)max}$ (mΩ)	I_D (A)	製品系列			
			TO-247 パッケージ	TO-3P パッケージ	TO-220 パッケージ	TO-220F パッケージ
600	25.4	95.5	FMW60N025S2	—	—	—
	40	66.2	FMW60N040S2	—	—	—
	55	49.9	FMW60N055S2	—	—	—
	70	39.4	FMW60N070S2	—	—	FMV60N070S2
	79	37.1	FMW60N079S2	—	FMP60N079S2	FMV60N079S2
	88	32.8	FMW60N088S2	—	FMP60N088S2	FMV60N088S2
	99	29.2	FMW60N099S2	—	FMP60N099S2	FMV60N099S2
	125	22.7	FMW60N125S2	—	FMP60N125S2	FMV60N125S2
	160	17.9	FMW60N160S2	—	FMP60N160S2	FMV60N160S2
	190	15.5	FMW60N190S2	FMH60N190S2	FMP60N190S2	FMV60N190S2
	280	10.4	—	FMH60N280S2	FMP60N280S2	FMV60N280S2
	380	8.1	—	—	FMP60N380S2	FMV60N380S2

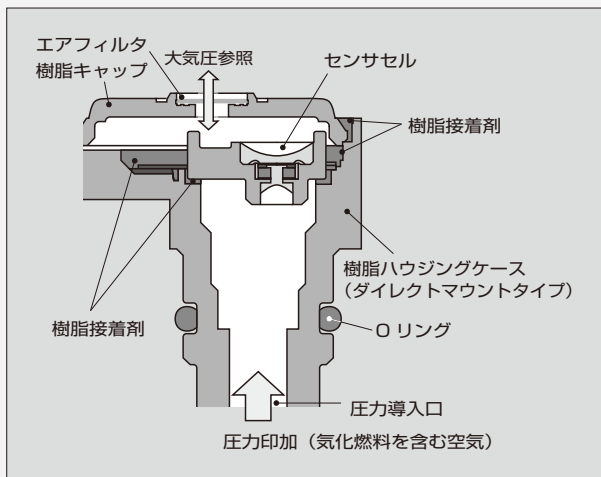


図12 実装形態の例

載IP試験規格の耐じん性(IP6KX)と耐水性(IPX9K)をクリアしたエアフィルタを採用し、気化燃料を含んだ空気や外来異物に影響されにくい、高耐久性かつ高精度な圧力検知を実現した(283ページ“車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ”参照)。

4 あとがき

パワー半導体は、産業機器、鉄道車両、自動車、情報機器および新エネルギーなどの分野におけるパワーエレクトロニクス製品にとって必要不可欠なキープデバイスである。

IGBT、All-SiCモジュール、ハイブリッドモジュールおよびパワーIC・パワーディスクリートのパワー半導体の高性能化、高機能化および高信頼性化はさらに進み、これらパワー半導体製品を適用したパワーエレクトロニクス製品のエネルギーの高効率化もますます進展していくであろう。

富士電機では、パワー半導体の技術革新の追求により、エネルギーを最も効率的に利用できる製品をつくり出し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向けAll-SiCモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (2) Horio, M et al. “Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200°C Operating Capability”, Proceedings of ISPSD, 2012, p.81-84.
- (3) Momose, F. et al. “The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module”, PCIM Europe 2015.
- (4) Yamada, T. et al. “Novel Small Intelligent Power Module For RAC”, proc. 2012 PCIM Asia.
- (5) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.
- (6) Higuchi, K. et al. “An intelligent power module with high accuracy control system”, Proceeding of PCIM Europe 2014, p.39-46.
- (7) 渡島豪人ほか. 高速ディスクリートIGBT「High-Speed Vシリーズ」富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.393-397.



高橋 良和

パワー半導体の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、エレクトロニクス実装学会会員、日本デザイン学会会員。



藤平 龍彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部長兼技術開発本部電子デバイス研究所長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、日本金属学会会員、IEEE 会員。



宝泉 徹

パワー半導体の開発、事業企画に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部長。電気学会会員。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。