

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN, Toru

栗原 俊治 KURIHARA, Toshiharu

1 まえがき

パワー半導体はエネルギー供給や電子機器にはなくてはならない部品であり、その用途は拡大を続けている。最近では、省エネルギー（省エネ）化、高効率化、CO₂排出量抑制などの世界的なニーズを背景に、再生可能エネルギーをはじめ、ハイブリッド自動車（HEV）や電気自動車（EV）などの電動化車両の普及が進んでおり、これらを支えるパワーエレクトロニクス（パワーエレ）技術のキーデバイスとして、パワー半導体は大きな役割を果たしている。パワー半導体市場は、2015年は中国と欧州における景気減速の影響で対前年マイナス成長となったが、産業・自動車向け市場が成長を牽引（けんいん）することで、今後の世界市場規模は拡大していくと予測されている。産業機器向けでは、太陽光発電や風力発電などの新エネルギー分野や、データセンターなどの無停電電源装置（UPS）の分野などで成長が見込まれている。また車載用途では、HEVやEVのインバータに加え、DC/DCコンバータやセンサ、電子スイッチなど、電装化が進むにつれて搭載されるパワー半導体の数も増加していくと考えられる。

本稿では、今後も成長が期待されるパワー半導体の技術動向および富士電機の技術開発状況について述べる。

2 パワーモジュール

パワー半導体製品は、単体もしくは複数のパワー半

導体デバイスを一つのパッケージに収めた形で提供される。また、制御用ICチップを同じパッケージに搭載し、制御機能や保護機能を付加した製品もある。ここでは、パワー半導体デバイスについて述べるとともに、複数のデバイスを組み合わせてパッケージに収めたパワーモジュール^{(*)1}と呼ばれる製品とその技術について述べる。

2.1 第7世代 IGBT

パワー半導体デバイスの代表的な例として、IGBT^{(*)2}（Insulated Gate Bipolar Transistor）が挙げられる。IGBTは、制御に要する消費電力が少なく高速であるというMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）の長所と、低抵抗で大電流を流せるというバイポーラトランジスタの長所を併せ持つデバイスであり、富士電機は1988年に製品化した。その後、世代交代による特性改善を重ね、現在は第7世代を上市している。IGBTは伝導度変調によりオン電圧を下げるができる反面、ターンオフ時には蓄積されたキャリアを吐き出す必要があり、電流が裾を引いて流れ続ける（テール電流）問題がある。つまり、オン電圧とターンオフ時の損失はトレードオフの関係にあり、この改善が重要なポイントとなる。図1に、第3世代IGBTから第7世代IGBTまでのトレードオフ特性を示す。世代が進むにつれて、トレードオフ特性が改善されていることが分かる。

2.2 パワーモジュールの構造

IGBTは通常、ダイオードなどとともに一つのパッ

(*)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) 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。

(*)3) 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。ゲート部が素子の表面にあり、チャンネルが素子面と平行になるプレーナゲートMOSFETに対し、トレンチゲートMOSFETでは素子に溝を形成してゲート部を溝内に埋め込み、チャンネルを素子面に対して垂直方向にしている。

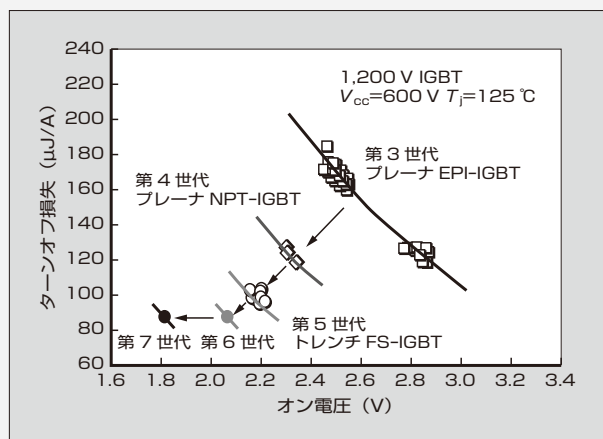


図1 IGBTのトレードオフ特性

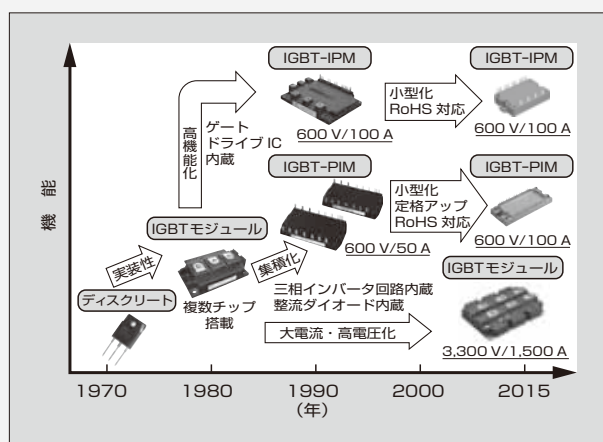


図2 パワーモジュール構造の変遷

ケースに搭載される。これをパワーモジュールと呼び、中でも制御用 IC チップを搭載したパワーモジュールを IPM (Intelligent Power Module) と呼んでいる。パワーモジュールでは、はんだや構成材料を工夫することで、長寿命化・高温対応を可能にしている。また、素子の配置を最適化することで、小型のチップでも大きな電力を制御できるよう工夫しており、装置の小型化と大電力化に貢献している。図2にパワーモジュール構造の変遷を示す。富士電機では、高機能で大容量かつ環境対応といった要求を満足するパッケージ開発を進めている。

(* 4) 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。

(* 5) 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。

(* 6) 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 をワン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。

(* 7) 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 ~ 3.3eV 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。

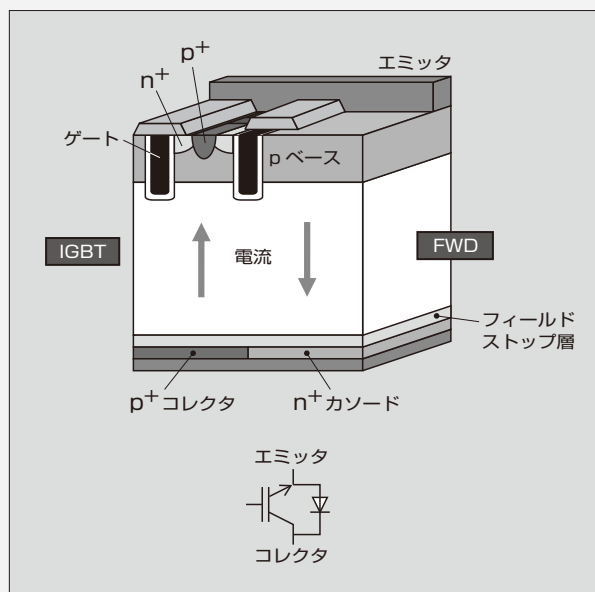


図3 RC-IGBTの概略構造

2.3 RC-IGBT モジュール

インバータなどに用いられるパワーモジュールでは、IGBT と逆並列に還流ダイオード (FWD: Free Wheeling Diode) を接続している。FWD は、パワーモジュールにモータなどの誘導性負荷が接続されている場合に、IGBT のオン・オフ切替え時に流れる逆電流をバイパスし、IGBT を破壊から保護する役割がある。この IGBT と FWD を一体化したデバイスが、図3に概略構造を示す RC-IGBT (Reverse Conducting IGBT) である。一体化により単にチップ数が減少するだけではなく、素子面積や熱抵抗の低減というメリットがあり、それによるインバータの小型・軽量化、低コスト化が期待できる。しかし従来、大容量チップでは損失低減が困難であったため、車載用や産業用には用いることができなかった。

富士電機ではこれまでに、技術的な困難を克服して低損失・大容量 RC-IGBT を開発してきた。

2.4 All-SiC モジュール

SiC は優れた物性を持ち、Si に代わる次世代半導体

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

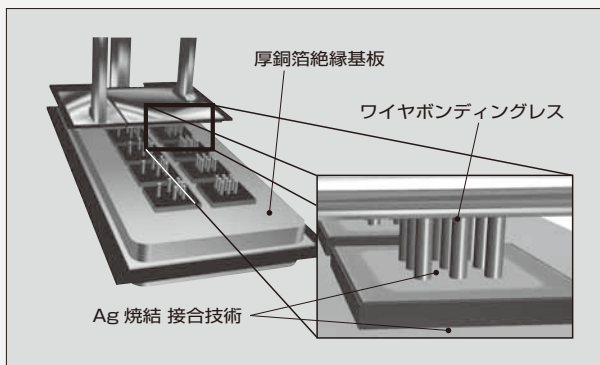


図4 All-SiC モジュールの内部構造の模式図

材料として期待されている。例えば、バンドギャップはSiの約3倍あり、熱励起で生成されるキャリアが少ないため、より高温での使用が可能になる。また、絶縁破壊電圧はSiの約10倍あり、Siの1/10の厚さにしても同じ電圧に耐えられるため、低抵抗化できる。さらに、バイポーラデバイスであるSi-IGBTをユニポーラデバイスであるSiC-MOSFETに置き換えることで、先に述べた蓄積キャリアによるスイッチング損失を低減できるというメリットもある。これらの特徴から、SiCパワーモジュールは、パワエレ機器の小型・高効率化に貢献する。

富士電機では、IGBTを用いた従来のパワーモジュールとは構造が大きく異なるAll-SiCモジュールを製品化している⁽³⁾(図4)。本モジュールは、SiのIGBT、FWDに替えて、それぞれSiC-MOSFET、SiC-SBDを搭載しており、本モジュールでは、従来のアルミニウムワイヤに替えて銅ピンを、またDCB(Direct Copper Bonding)基板に替えてSi₃N₄を使用した厚銅箔(どうか)絶縁基板を採用している。さらに、内部の封止樹脂にはシリコンゲルに替えてエポキシ樹脂を採用している。これらの材料と構造により、小型でも大電流を流すことができ、高温動作においても高い信頼性が得られる。

2.5 パワーモジュール製品

図5にパワーモジュール製品の応用例を示す。家電製品やデータサーバなど小容量市場向けには、三相インバータブリッジ回路と制御・保護回路を内蔵した小容量IPMを製品化している。インバータ、ロ

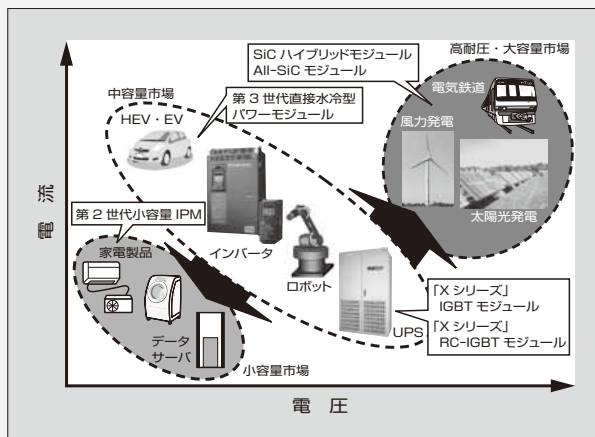


図5 パワーモジュール製品の応用例

ット、UPSなどの中容量産業分野向けには、産業用IGBTモジュールおよびIPMを製品化しており、現在は第7世代の技術を用いたXシリーズが最新の製品群になる。また、中容量車載分野向けには、車載用RC-IGBTモジュールを製品化している。大容量分野では、Si-IGBTとSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)を組み合わせた1,200V・1,700Vハイブリッドモジュール、およびメガソーラー用パワーコンディショナ(PCS)向け1,200V All-SiCモジュールを製品化している。さらに、3,300Vハイブリッドモジュールについては、新幹線の駆動用主変換装置に搭載して走行試験を実施中である。

③ パワーディスクリート・パワーIC

パワーディスクリートやパワーICなどのディスクリート半導体は、複数の素子を一つのパッケージに搭載するパワーモジュールとは異なり、ダイオードやMOSFETなどを主に小型の汎用パッケージに搭載した単機能の素子を指す。富士電機では、電動化車両の駆動系以外の部品、例えば車載用DC/DCコンバータや充電器向けに、またパワーウィンドウやパワーステアリング向けにパワーディスクリート⁽⁹⁾製品を展開している。さらに、産業および民生用には、LED照明、スイッチング電源、情報通信機器などに使用される製品群を展開している。

パワーIC製品としては、情報通信機器やTVなど

(* 8) 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。

(* 9) 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。

(* 10) 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1,200Vクラスまでのものが製品化されている。

の民生機器向けに電源 IC を、また車載用途ではエンジン、トランスミッション、ブレーキなどの自動車電装システム向けに IPS (Intelligent Power Switch) を製品化している。この他にも、自動車用のイグナイタや圧力センサを製品化しており、自動車制御システムの小型・高精度化、信頼性の向上に貢献している。

ここでは、これらの製品の中からいくつかを取り上げ、技術動向を簡単に説明する。

3.1 SJ-MOSFET^{(*)11}

耐圧 600 V に代表される縦型の高耐圧 MOSFET では、耐圧を確保するためにドリフト層と呼ばれる領域のドーピング濃度を下げると、厚くする必要があるのである。これらはいずれも抵抗増大につながるから、性能向上のためには抵抗と耐圧のトレードオフを改善する必要がある。このトレードオフ改善にブレークスルーをもたらしたのが、スーパージャンクション (SJ) 構造である。SJ 構造の採用により、600 V 系パワー MOSFET の $R_{on} \cdot A$ は、数分の 1 に低減された。図 6 に従来構造と比較して SJ 構造の概念図を示す。SJ 構造は、p/n ピラーが交互に並んだ断面形状 (SJ 層) を持つ。富士電機では、SJ 層を多段エピタキシャル成長と不純物拡散により形成しており、スイッチング性能や特性ばらつきを考慮して適宜濃度分布を調整している。

3.2 電源 IC

電源 IC の市場では、モバイル機器のアダプタ電源や 32 インチ以下の TV の組み込み電源で使用される PWM-IC が市場全体の約 50% を占め、40 インチ以上の TV や比較的大容量の通信電源などで使用される

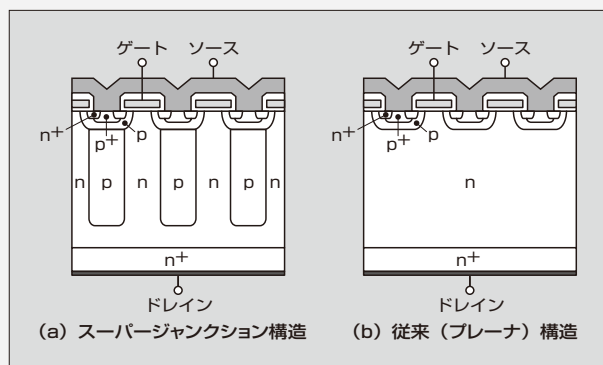


図 6 従来構造と SJ 構造の概念図

(*) 11 SJ-MOSFET

ドレイン、ソース電極が素子の対向面に形成される縦型パワー MOSFET において、従来は低濃度の n 層でドリフト層を形成していた。これに対し、ドリフト層を周期的な pn カラム構造にしたものが、スーパージャンクション (SJ)-MOSFET である。SJ-MOSFET は、

従来の MOSFET と比較して、素子の $R_{on} \cdot A$ 耐圧とオン抵抗のトレードオフ特性を大幅に改善することができる。

(*) 12 PWM

Pulse Width Modulation (パルス幅変調) の略である。

LLC 電流共振制御 IC と PFC 制御 IC を併せて約 30% を占める。電源の低コスト化、小型化、省電力化、低ノイズ化などの要求に伴い、電源 IC にもこれらに貢献する性能が求められている。

富士電機の PWM-IC では、X-コンデンサ放電機能やパワーオフモードを内蔵することで、低待機電力化を実現している。また、高精度の各種保護機能を搭載することで、電源の信頼性向上に貢献している。

スイッチング電源では、入力に平滑コンデンサが用いられているが、これによって入力電流の波形がひずみ高調波電流が発生する。その結果、電源から発生したノイズが周囲の機器に影響を与えたり、商用電源側に流出して設備の故障原因になったりする。そのため、規制により一定値以下にすることが求められている。この問題を解決するためには PFC 回路が必要であり、PFC 回路により高調波の抑制だけではなく、力率改善による無効電力抑制の効果もある。最近では電源変換効率の高さを示す 80PLUS 認証があり、ここでは 0.9 以上の高い力率が求められている。このような PFC 回路を制御し、高い力率を実現するために必要なものが PFC-IC である。

LLC 方式の共振コンバータは、シンプルなブリッジ回路でソフトスイッチングが実現でき、それによってスイッチング損失とノイズを低減できる。また、フライバック回路などと比較して低い耐圧の MOSFET が使用でき、導通損失を低減できるなどのメリットがある。これらの特性から、高効率・低ノイズの優れた電源方式である反面、入力電圧や負荷の変動に弱い、軽負荷時の損失が大きいのデメリットがある。そこで、LLC 方式のメリットを生かしたコンバータを実現するためには、制御 IC によるコントロールが重要になる。

富士電機では、PFC-IC および LLC-IC を製品化しており、優れた制御により電源の性能向上に貢献している。

3.3 IPS

自動車電装分野では、システムの小型化、高信頼性化、高機能化の要求が高まっている。例えば、MOSFET を搭載する場合、システムの信頼性を確保するためには過電流保護や加熱保護などの保護回路が必須となる。この MOSFET と各種保護回路を含む制御 IC を一つのパッケージに搭載したものが IPS であ

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。DC 入力に対し、一定周波数でオン・オフを繰り返す、オンの時間幅を変化させることで出力を変化させる。インバータで DC-AC 変換を行う際などに一般的に用いられている。

る。この製品によって部品点数が削減できるだけでなく、部品レベルで信頼性と安全性を確保できるようになる。富士電機では、MOSFETと制御ICを一つのチップに集積化したワンチップ構造の製品に加え、大電流用にチップオンチップ構造の製品を展開している。

ワンチップ構造のIPS製品では、オン・オフ制御の製品に加え、高精度電流検出アンプを搭載したりニア制御用IPSを製品化している。また、チップオンチップ構造の大電流IPSでは、トレンチゲートMOSFET上に制御ICを積載することで、小型パッケージで低オン抵抗（最大5mΩ）を実現している。

4 パワー半導体の開発状況

ここでは、富士電機におけるパワー半導体の開発状況に関し、概要を述べる。詳細は、本稿に続く各技術論文を参照いただきたい。

4.1 1.2kV SiC トレンチゲート MOSFET

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PCSの量産を2014年に開始した。このモジュールにはSiCプレーナゲートMOSFETを採用しており、その優れた性能により機器の高効率化、小型・軽量化に貢献している。All-SiCモジュールのさらなる性能向上には、SiC-MOSFETの低抵抗化が有効である。セル密度を増加（微細化）させることで低抵抗化が可能であるが、プレーナゲートMOSFETではさらなる微細化が困難な状況であった。それに対し、トレンチゲートを用いれば、微細化が可能である。このような背景から、富士電機ではSiCトレンチゲートMOSFETを開発している。

この開発により、単位面積当たりのオン抵抗は、プレーナゲートMOSFETに対しトレンチゲートMOSFETでは約50%低減することができた。また、帰還容量を低減することで、ターンオン損失を47%、ターンオフ損失を48%低減した（234ページ“1.2kV SiCトレンチゲートMOSFET”参照）。

4.2 All-SiC 2 in 1 モジュール

前述のとおり、富士電機はこれまでにAll-SiCモジュールを開発し、メガソーラー用PCS向けに量産を開始している。今回は、さらなるパワーエレクトロニクス機器へのAll-SiCモジュール適用を目指し、防じん防水型の高性能コンパクト型IP65対応インバータ向けのAll-SiC 2 in 1モジュールを開発した。SiC-MOSFETはSi-IGBTと比較して高速スイッチングが可能であるが、スイッチング速度に比例してサージ電圧が大きくなる。そのため、モジュール内部の配線インダクタンスを低減する必要がある。また、SiCの高温動作に耐えるこ

とができる高信頼性パッケージも必要になる。これらの要求を満たす新構造パッケージを開発した。

開発したAll-SiC 2 in 1モジュールは、Si-IGBTモジュールに対し、ターンオン損失を約62%、ターンオフ損失を約74%、逆回復損失を約100%低減することができた。また、一般的なインバータ使用条件でシミュレーションを実施したところ、Si-IGBTモジュールに対し発生損失を約46%削減できることを確認した（238ページ“All-SiC 2 in 1モジュール”参照）。

4.3 All-SiC モジュールの高耐圧化

現在、SiCデバイスは主に家庭用エアコンやデータサーバ向け電源といった耐圧1kV程度の市場で普及が進んでいる。しかし、今後、HEVやEVなどの信頼性を強く求められる市場や、耐圧3～10kV程度で使用される鉄道・重電分野向けの高耐圧市場への本格的な普及が期待されている。富士電機では、従来のワイヤボンディングとゲル封止からなる構造に替わり、銅ピン付きプリント基板と低熱抵抗な絶縁基板を樹脂で封止したパッケージを開発し、高信頼性化に加え高耐圧化も可能とした。

封止材料をゲルからエポキシ樹脂に変更することにより、絶縁破壊寿命（故障確率 $F(t)=1\%$ ）は8.8kVから16.3kVに約1.9倍向上した。また、高電圧を印加したときの部分放電開始電圧と部分放電消滅電圧を比較した結果、エポキシ樹脂はゲルと比べて2倍近い絶縁耐量を持つことを確認した（242ページ“All-SiCモジュールの高耐圧化”参照）。

4.4 All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

従来の175℃で動作するSiデバイスに比べ、SiCデバイスは2～3倍の高電流密度で、200℃以上の高温動作が可能である。しかし、パワーモジュールを構成する半導体封止樹脂が高温・高電圧に耐えられなければ、SiCが潜在能力を発揮することができない。そこで、SiCデバイスが持つ性能を最大限に発揮させるべく、高絶縁耐圧かつ200℃以上の連続動作を可能とする樹脂封止技術について開発した。

ガラス転移温度を上昇させながら熱分解により物性を損なわない高耐熱性を得るため、芳香族環/CH₂比が大きい樹脂組成を選択した。このとき、耐トラッキング指数が低下して絶縁性が損なわれないよう、添加剤を配合した。また、高温放置時に架橋点などの結合部が分断しないよう、熱分解温度の向上を図った。その結果、 $T_j=200\text{℃}$ 動作を保証するUL1557の加速寿命試験条件である225℃ 6,663hを満足し、高い絶縁性能を有する封止材料を開発することができた（247ページ“All-SiCモジュール用封止樹脂の高耐熱性化”参照）。

4.5 第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール「Dual XT」

太陽光発電、風力発電といった再生可能エネルギーの分野では電力変換装置の大容量化が進み、大容量IGBT モジュールのニーズが拡大している。そこで、電力変換装置市場における小型・低損失・高信頼性化の要求に応えるため、新たに第7世代「Xシリーズ」IGBT を搭載したIGBT モジュール「Dual XT」を開発した。

X シリーズ IGBT では、ドリフト層の厚さを薄くすることで、コレクター-エミッタ間飽和電圧を低減した。また、フィールドストップ層を最適化することによって、ドリフト層を薄くした場合に起こりえるターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下を抑制した。これにより、X シリーズ Dual XT では、従来製品に対して、飽和電圧約 0.4 V、ターンオフ損失約 7% の特性改善を実現した。パッケージに関しては、新規に開発した AIN を用いた高放熱絶縁基板を適用することで、同一チップサイズで熱抵抗を約 45% 低減した。また、パッケージ内部ワイヤおよび端子発熱を半分以下に改善した。さらに構成材料などの工夫により、 $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ 動作でも従来製品 $T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$ 動作以上の耐量を実現した。これらの技術により、当該パッケージサイズでは業界初となる 1,200 V/800 A 定格の製品を実現した (251 ページ “第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール「Dual XT」” 参照)。

4.6 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール

富士電機は、第7世代「Xシリーズ」IGBT の技術を応用した RC-IGBT と、これを搭載した産業用 RC-IGBT モジュールを新たに開発した。X シリーズのチップ技術を適用し最適化することで、X シリーズ IGBT と X シリーズ FWD の組合せと同等の発生損失を実現し、かつチップ数およびトータルチップ面積を低減した。さらに X シリーズのパッケージ技術と RC-IGBT の組合せにより、熱抵抗の低減と高信頼性化を実現した。これにより、IGBT モジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を実現した。

X シリーズ RC-IGBT を用いることで、Dual XT パッケージにおいて定格電流 1,000 A が可能となる。これにより、従来の PrimePACK2 の領域までカバーすることが可能となり、高パワー密度化と小型化を実現した。第6世代 IGBT および FWD を用いた PrimePACK2 (定格電流 600 ~ 900 A) と比較すると、モジュール設置面積で 40%、熱抵抗は 27% 低減する (256 ページ “第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール” 参照)。

4.7 第2世代小容量 IPM の系列化

富士電機は市場のニーズに対応するため、インバータ方式の小容量モータドライブ用に、小型・低損失・低ノイズであり、三相インバータブリッジ回路と制御回路、保護回路を内蔵した小容量 IPM を製品化してきた。今回、パッケージエアコン、汎用インバータ、サーボシステムなどのモータドライブ機器のさらなる省エネ化に向け、第7世代 IGBT チップ技術を適用した第2世代小容量 IPM の定格電流 20 A 品、30 A 品の系列化開発を行った。

第2世代 30 A 品では、第1世代に対し、定格電流において電圧ノイズレベルを同等にしながら、ターンオフ損失を約 50%、ターンオン損失を約 20% 低減した。また、内蔵する IGBT と FWD の動作保証温度を 125°C から 150°C へ拡大することで、インバータ回路の熱設計自由度を向上した。600 V/30 A 製品を適用したパッケージエアコンの定常動作に相当する PWM 実動作時のリード端子はんだ付け部の温度上昇を評価したところ、第1世代品と比較して約 14°C 低減した。その結果、はんだ付け部温度で制約される許容出力電流を約 19% 拡大することが可能となった (261 ページ “第2世代小容量 IPM の系列化” 参照)。

4.8 RC-IGBT を搭載した車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの高速動作化

HEV や EV の動力制御に用いるインバータには、高電力密度化と小型化が求められている。富士電機は、第7世代の間接水冷型産業用 IGBT モジュールと比較して約 2.5 倍高い電力密度を可能にする、車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール (車載用第3世代モジュール) を開発した。本モジュールでは、薄型 RC-IGBT 技術による低損失化、およびパッケージ構造の工夫による高速動作化を実現している。

第7世代 RC-IGBT を採用することで、同一の出力電力を従来の 70% に相当するサイズで達成できた。また、IGBT と FWD で構成する IGBT モジュールに対して、基板面積と P 端子から N 端子への電流経路長をそれぞれ 75%、78% まで短縮し、寄生インダクタンスを大幅に低減した。インバータ動作において重要な重畳サージ電圧については、三相それぞれに PN 端子対を持つパッケージ構造とすることで低減した。これらの効果をターンオフ動作で確認した。

車載用第2世代モジュールと車載用第3世代モジュールを比較したところ、車載用第3世代モジュールではスイッチング速度 ($-di/dt$) が 1.5 倍大きいにもかかわらず、サージ電圧は小さくなった。この結果は、同じバッテリー電圧とデバイス耐圧の下で車載用第2世代モジュールに対し、スイッチング速度を 1.5 倍

以上増加できることを示している（266 ページ “RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高速動作化” 参照）。

4.9 RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化

従来のパワーモジュールよりも高性能・高機能化を実現した、次世代の車載用直接水冷型パワーモジュールを開発した。この製品は、最適化された冷媒の流路設計により、従来品よりも高い放熱性能を有する。また、カバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットと、フランジ構造の冷媒出入り口を採用したことで、ユーザはフランジ出入り口に指定流量の冷媒を流す配慮をするだけでよく、使用性が向上している。

IGBT の特性が向上し、飽和電圧やスイッチング損失が低減すると、重要となるのが短絡保護である。飽和電圧の低減に伴い短絡電流が増加するので、より短時間で、サージ電圧の増加を招くことなく安全に電流を遮断する必要がある。今回開発した直接水冷型パワーモジュールでは、高速かつ確実に遮断するため、電流検出方式による短絡保護を採用した。また、ユーザのインバータ装置設計を支援するため、電流検出方式による短絡保護回路を搭載した評価用のドライブ回路を用意している（270 ページ “RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化” 参照）。

4.10 車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」

富士電機では、エンジン、トランスミッション、ブレーキなどの電装システム向けに IPS 製品を開発している。IPS は ECU (Electronic Control Unit) の回路部品数や実装面積の低減、および小型化に貢献してきた。今回は、チップを小型化して従来と同じ実装面積に 2 チャンネル分のチップを搭載し、さらに信頼性を向上した車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」を開発した。これにより、電装システムの小型・低価格化および高信頼性化に貢献する。

F5114H は、従来品と同等の電気的特性を持ち、かつ、負荷短絡保護、低電源電圧検出、通電能力の確保という三つの機能を搭載している。負荷短絡については、過電流と過熱の二重の保護機能により、製品の安全性を向上させている。低電源電圧検出については、エンジン始動時など電源電圧が瞬間的に低下する状況に備え、電源電圧低下時でも回路動作が不安定にならないようにしている。また、小型化や 2 in 1 としても信頼性を確保できるよう、パッケージやリードワイヤを工夫している（275 ページ “車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」” 参照）。

4.11 車載用第 2 世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」

富士電機では、車載用 DC/DC コンバータや充電器 (PFC+DC/DC コンバータ) といった電力変換機器向けに、高効率、小型、低ノイズのスーパージャンクション構造パワー MOSFET 「Super J MOS」を製品化している。今回、従来品に対して素子の耐圧とオン抵抗のトレードオフ特性を改善し、かつターンオフスイッチング時の跳ね上がり電圧を抑制した、車載用第 2 世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」(S2A シリーズ) を開発した。本製品は使いやすさと電力変換効率向上に寄与する。

車載用の電力変換器はエンジンルームに搭載され、高温で使用されるケースが多いことから、S2A シリーズではしきい値電圧を上げることで誤オンの抑制を図った。同時に、しきい値電圧を上げてターンオフスイッチング時のサージ電圧が大きくならないよう、ゲート抵抗内蔵化などの設計施策を取り入れた。また、車載用 DC/DC コンバータでの使用を考慮し、軽負荷時の損失を低減した。電源が軽負荷で動作しているときには、MOSFET に流れる電流が小さいため、出力容量の充放電時に発生する損失 E_{oss} の占める割合が増える。そこで、S2A シリーズは、表面構造の最適化によってトータルゲート電荷量を低減し、従来製品の「Super J MOS S1A シリーズ」に対して E_{oss} を約 30% 低減した（279 ページ “車載用第 2 世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」” 参照）。

4.12 高効率電源用の臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」 と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」

スイッチング電源における軽負荷時の効率改善、低待機電力、電源部品削減を実現するために、PFC 制御 IC と LLC 電流共振制御 IC を組み合わせることで電源システムの最適動作を実現する臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」 と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」を開発した。

FA1A60N は軽負荷時の効率を向上させるために、ボトムスキップ機能に加えて、意図的にスイッチング停止期間を設けるバースト動作と、消費電流の削減機能を内蔵している。PFC の出力電圧を維持しながらスイッチング損失を小さくすることで、スタンバイ状態での高効率と低待機電力を実現した。FA6B20N は一次側の LLC 電流共振回路の共振電流を検出しコンデンサで平滑することで、二次側の負荷情報を検出する機能を内蔵した。また、連続スイッチングを行うノーマル状態と、バースト動作を行うスタンバイ状態とを自動で切り替える自動スタンバイ機能を持つ。これら

を組み合わせ使用することで、効率向上だけでなく、フォトプラなど電源部品を削減することができ、電源システムのコストダウンに貢献する（283 ページ “高効率電源用の臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」 と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」” 参照）。

4.13 高速ダイオード内蔵 第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」

従来品（S1 シリーズ）に対し素子の耐圧と単位面積で規格化されたオン抵抗とのトレードオフの関係を改善し、かつターンオフスイッチング時の跳ね上がり電圧を抑制した S2 シリーズにおいて、内蔵ダイオードを高速化した系列である第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」(S2FD シリーズ) を製品化した。

通信・産業分野の比較的大容量の電源で広く使用されている電流共振などのフルブリッジ-LLC 回路では、共振はずれ時に上・下アームが短絡し、MOSFET の内蔵ダイオードが逆回復動作に入る場合がある。内蔵ダイオードにライフタイムキラーを適用することで、損失低減と破壊耐量向上が可能になるが、同時にトレードオフでドレイン-ソース間漏れ電流が増加する。

S2FD シリーズでは、S1FD シリーズと同等の逆回復特性を維持しつつ、逆回復耐量（ $-di_{DR}/dt$ 耐量）を 66% 向上し、さらにドレイン-ソース間漏れ電流を約 50% 低減した。本製品は、スイッチング電源の高効率化・小型化・高信頼性化に貢献する（289 ページ “高速ダイオード内蔵 第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」” 参照）。

5 あとがき

環境保全や省エネルギーに対するニーズの高まりを背景に、パワー半導体市場は産業、車載、民生のいずれの分野でも順調に伸長していくものと期待されている。

持続可能な社会の実現に向け、直面する困難な課題を解決できるよう、富士電機はこれからも技術革新を追求していく。

参考文献

- (1) Thomas Heinzl, et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems,” Proc. PCIM Europe 2015.
- (2) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RCIGBT Chip Technologies,” Proc. PCIM Europe 2016.
- (3) Ikeda, Y. et al. “Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-density Packaging and High Reliability,” Proceedings of ISPSD, 2011, p.272-275.
- (4) Fujihira, T. “Theory of Semiconductor Superjunction Devices,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.36 (1997).



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。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。



栗原 俊治

電子デバイスの生産部門に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部生産統括部長。





*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。