

パワー半導体の現状と展望

The Current Status and Future Outlook for Power Semiconductors

関 康和 Yasukazu Seki

宝泉 徹 Toru Housen

山添 勝 Masaru Yamazoe

地球環境保護への取り組みが注目され、パワーエレクトロニクスの基幹部品であるパワー半導体の重要性が増大している。第6世代 IGBT「V シリーズ」技術を用いて高温動作、高耐圧・大容量のパワーモジュールの製品化や開発を行った。ポストシリコンとして、ワイドバンドギャップ半導体を用いたデバイスの開発や Superjunction MOSFET の開発を行っている。さらに“きぼう”で使われている宇宙用 MOSFET では高信頼性化や低損失化、電源制御用 IC では低ノイズ・省エネルギー化を達成している。自動車用の排気系圧力センサやハイブリッド車用の制御 IC を新たに製品化した。

With the increased focus on efforts to protect the global environment, power semiconductors, which are the main power electronics products, are becoming increasingly important. Using 6th-generation IGBT V-Series technology, Fuji Electric has developed and commercialized high voltage, large capacity power modules that are capable of operating at high temperatures. As post-silicon technology for the next generation, we are pursuing the development of devices that utilize wide band gap semiconductor material and the development of superjunction MOSFETs. Additionally, MOSFETs designed for applications in outer space and used in the Japanese experimental module known as “Kibo” attain high reliability and low loss, while ICs designed for use in power supply control achieve low noise and energy savings. Exhaust system pressure sensors for use in automobiles and control ICs for use in hybrid vehicles have been newly commercialized.

① まえがき

2009 年は米国でオバマ政権が発足し、グリーンニューディール政策が始動した。同年 9 月には国連気候変動サミットで鳩山首相が、日本は 2020 年までに 1990 年比で温室効果ガスを 25% 削減することを新たな中期目標として表明した。各国のリーダーが新しい方針を示す中で、今最も注目を集めているのがエネルギー・環境関連事業である。

富士電機では、現在“エネルギー・環境”を核とした事業構造への変革に取り組んでいる。さらに以前から地球環境保護や CO₂ 削減を実現するための中核をなすパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術の革新に取り組んできた。パワエレ技術は、エネルギーを効率的に動力へ変換するための重要技術の一つであり、その基幹部品としてのパワー半導体の重要性がますます増大してきている。

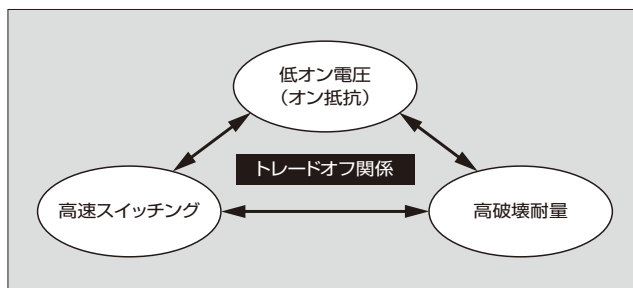
パワー半導体への要求は、低損失・高速スイッチングに加え低ノイズと使いやすさである。

本稿では、富士電機が取り組んでいるエネルギー・環境対応パワー半導体を中心に、その代表製品であるパワーモジュール、パワーディスクリート、電源制御 IC および自動車用デバイスについて、その現状と今後の展望を紹介する。

② パワーモジュール

“エネルギー・環境”をキーワードとして IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）パワーモジュールをさまざまな分野に展開している。その核となる IGBT チップは、第6世代 IGBT チップとして「V シリーズ」の展開を開始している。図1に示すように、IGBT モジュールに対する要求項目は多く、それぞれの要求項目と特性はトレードオ

図1 IGBT モジュールに要求される特性



フの関係であり、すべての要求を満たすには多くの技術的なブレイクスルーが必要である。

第6世代 IGBT モジュール「V シリーズ」では、理論限界に近い特性を達成し、発生損失の低減を果たした。また、十分に環境を意識して設計している。例えば、鉛フリーをベースとした RoHS 指令^(注1)対応や、発生するノイズを大きく低減させたパッケージ構造とし、小型軽量化も同時に実現させている。さらに 175℃までの高温動作を可能とした。

これらの優れた V シリーズ IGBT を用いて、600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧での IGBT モジュール系列や、IPM 系列を製品化している。

富士電機はこれまでハイブリッド車用に IGBT モジュールや IPM（Intelligent Power Module）を開発してきた。また、ハイブリッド車適用の基幹部品として両面冷却構造パッケージ構造に用いるめっき適用 IGBT、FWD（Free Wheeling Diode）チップも開発してきた。これは一般用の IGBT と比較して約 2 倍の電流密度を達成している。今回はさらに第6世代 IGBT「V シリーズ」技術、微細加工

〈注1〉 RoHS 指令：電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

技術を適用し、FS (Field Stop) 構造改善により、従来と比較して大幅に特性改善を達成している。また、温度センシング、電流センシング機能も内蔵し、より使いやすいチップとしている。

エネルギー・環境分野への適用として、例えば風力発電用として高耐压・大容量 IGBT モジュールの適用が始まっている。最近の風力発電用途での傾向では、高耐压・大容量の IGBT モジュールの要求が強く、富士電機では 1,200 V 耐压, 1,700 V 耐压, 3,300 V 耐压の大容量モジュールを準備しこの要求に対応している。HPM (High Power Module), EconoPACK^(注2) などの豊富なスタンダードパッケージ群をとりそろえ、顧客展開をしている。

新たな IGBT の展開として、富士電機では RB-IGBT (逆阻止型 IGBT) や RC-IGBT (逆導通型 IGBT) などを開発している。特に RB-IGBT では次世代アプリケーションとして期待が大きいマトリックスコンバータへの適用や、新 3 レベル方式のインバータへの適用などが期待されている。

③ 次世代パワーモジュール

第 6 世代 IGBT の V シリーズの特性はシリコンの理論限界に近づきつつある。そこで、シリコンに代わる次世代パワーデバイスの材料として、炭化けい素 (SiC) と窒化ガリウム (GaN) が有力な候補となっている。これまで SiC は、その物性がパワーデバイスに最適であることから長い間研究開発がなされてきたが、最近になり実用化が急速に話題になり始めている。SiC は結晶成長やプロセス技術が難しいことからコストが極めて高いが、技術的解決の道筋が少しずつ見えてきており、いずれコスト問題も解決するものと思われる。

また、青色ダイオードで一躍有名になった GaN は、パワーデバイスにとっても有望な材料であることが判明し、次世代パワーデバイスの材料候補になった。まだパワーデバイスとしての歴史は浅いが、シリコンウェーハの上に形成することができることから、その安価なコストメリットを生かすことができるかどうかが決め手となる。

SiC も GaN も将来のパワーデバイス材料候補としては有望である。富士電機は、SiC では独立行政法人産業技術総合研究所と共同研究を実施している。さらに、GaN では古河電気工業株式会社と次世代パワーデバイス技術研究組合を設立し、共同研究を実施しており、その成果を取り入れて次世代パワーモジュールに適用する計画である。

④ パワーディスクリット

高耐压 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) では、今回 “Superjunction MOSFET

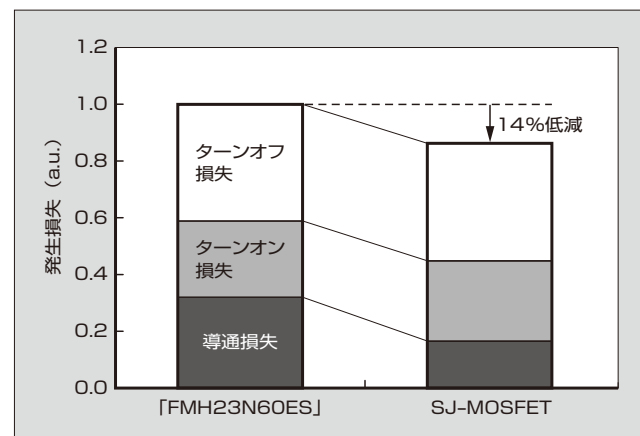
(SJ-MOSFET)” を開発した。富士電機では、2008 年度にプレーナ型 MOSFET として最高性能の $R_{on} \cdot A$ (単位面積で規格化したオン抵抗) を持った「SuperFAP-E^{3S} 600 V シリーズ」を開発し、低損失化とスイッチング性能のトレードオフ改善とともに低ノイズ化を実現し、機器の高効率化に貢献してきた。最近、MOSFET の主要アプリケーションであるスイッチング電源分野では、国際エネルギースタープログラムに代表される国際的な省エネルギー (省エネ) 規制に対応するため、高効率化が加速している。特に IT 社会の基盤として欠かせない、インターネットデータセンターで使用される大容量サーバなどでは、電源効率 92% 以上 (50% 負荷時) が求められている。これらを実現するためには、MOSFET もさらなる低損失化が必要で、今回新しく低オン抵抗性能を持った SJ-MOSFET を開発した。SJ-MOSFET は、業界最高水準の $R_{on} \cdot A$ を持ち、従来の「SuperFAP-E^{3S} シリーズ」と比べ約 1/4 のオン抵抗を実現した。電源の力率改善回路に搭載した場合で図 2 に示すように約 14% の損失低減が可能であり、早期の製品化に向け開発を加速している。

また、人工衛星などの宇宙用として信頼性の高い MOSFET も製品化している。富士電機の最初の宇宙用デバイスは、1994 年の純国産ロケット 1 号機へ搭載され打ち上げ成功に貢献した。その経験とその後の研究開発の成果を生かし、現在系列化している宇宙用 MOSFET には、それまでの課題を克服した低オン抵抗および宇宙空間で必須の電離放射線や高エネルギー粒子に対する耐性を持たせることを可能にした。さらに、2008 年に打ち上げられた国際宇宙ステーションの日本実験モジュール “きぼう” に搭載され順調な運転を続けている。今後は、積極的に海外の宇宙産業向けにも展開していく。

一方、ダイオードでは、太陽光発電など高温環境下でも使用可能な超低 I_R ショットキーバリアダイオード (SBD) を開発した。従来の SBD に比べ、逆方向リーク電流 I_R を 1/10 以下に低減したことで、接合温度 175℃ 保証を可能にした。

将来に向け、現行のシリコンに比べ圧倒的な低損失を実

図 2 パワー MOSFET の発生損失比較 (入力 AC100 V/ 出力 400 W)



〈注 2〉 EconoPACK : Infineon Technologies AG. の商標または登録商標

現する SiC や GaN を用いた次世代デバイスの開発を、前述したように外部との共同開発を活用し加速していく。

⑤ 電源制御 IC

電源制御 IC では、スイッチング電源の省エネ、低ノイズや機器の低コストに貢献するため、富士電機独自の制御方式を開発し適用している。常時コンセントに接続されているテレビやパソコン、プリンタなどでは待機状態の時間が長く、省エネ化のためには待機時の消費電力低減が必須である。米国環境保護庁発効の EPA5.0 規格では、軽負荷時も含めた平均効率が規定されており、これに対応する EPA5.0 規格対応カレントモード PWM 制御 IC「FA5592 シリーズ」を開発した。FA5592 は、軽負荷時の効率改善のため、負荷率 60% 以下でスイッチング周波数を低減することにより図 3 に示すように軽負荷時の効率を大幅に向上させた。また、スイッチング周波数分散機能内蔵による低ノイズ化や 750 V 耐圧保証の起動回路を内蔵することで、電源変動の大きい国や地域でも適用可能にした。

比較的大容量の電源用に多機能ボルテージモード PWM 制御 IC「FA5604/FA5605」や低ノイズ電流連続モード PFC 制御 IC「FA5610/FA5611」を開発し、高性能化とともに SOP8 ピンパッケージに搭載し小型化を実現した。特に、FA5610N は、発振周波数分散機能により高力率と低ノイズを実現し入力フィルタの簡素化を可能とした。

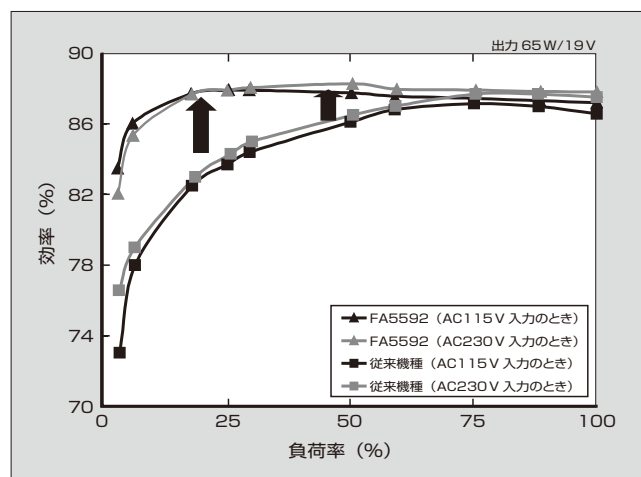
電源制御 IC 分野では、ますます厳しくなる高効率化、省エネ化、小型化、機器の低コスト化などの要求を実現するために、富士電機独自の特徴ある制御方式の研究開発に継続的に取り組んでいく。

⑥ 自動車デバイス

自動車用デバイスでは、IPS (Intelligent Power Switch)、排気系圧力検出用センサおよびハイブリッド車用 IGBT 駆動 IC「Fi009」を開発した。

(1) 排気系圧力検出用センサ

図 3 FA5592 の電源効率の負荷電流依存性



自動車排出ガス規制は、2009 年から日本ではポスト新長期規制、欧州では EUR05 が施行され、年々厳しくなっている。これに対し、近年、排ガスの一部を吸気側に再度戻してエンジン内燃焼を制御する排ガス再循環システムも採用され始めた。新しく開発した排気系圧力検出用センサは、従来の吸気系圧力センサに適用していた CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) ワンチップ技術をベースに、新しい構造の採用により耐腐食性を大幅に向上させた。この技術を基に、重機などへの適用に向け製品開発を続けていく。

(2) ハイブリッド車用 IGBT 駆動 IC「Fi009」

ガソリンエンジンと電動モータを組み合わせることで、自動車の走行状態による負荷分担を最適化することで、高燃費を実現するハイブリッド車の需要が急速に拡大している。ハイブリッド車のモータ駆動用インバータシステムの主デバイスとして IGBT が使用されている。この IGBT を駆動する制御 IC には、インバータシステムの高信頼性のため IGBT を保護する必要な役割を持っている。今回開発した制御 IC は、富士電機製 IGBT チップに内蔵されている温度センサや電流センサからの信号を受けて過熱や過電流から保護する機能を持っている。

富士電機の自動車用デバイスには、今回紹介した製品以外にもワンチップイグナイタなど富士電機独自の特徴ある技術を用いた製品がある。この技術を生かし、今後も顧客の要求に応える高信頼性で高性能な製品開発を行っていく。

⑦ あとがき

地球環境保護が重要な課題となった今日、CO₂ 削減などの環境対策、化石燃料に頼らない新エネルギーの開発が急務である。富士電機では、“エネルギー・環境”をキーワードにこれらの問題に積極的に取り組み、貢献していくことを経営目標に掲げている。その実現のためには、パワーエレクトロニクス技術の基幹部品であるパワー半導体の技術革新が不可欠である。

本稿で述べたとおり、富士電機では特徴あるパワー半導体製品の開発に努めており、低損失化、高機能化、小型化、高信頼性化、低ノイズ化などを革新的な技術で実現していく。今後も、お客さまの視点での製品開発に向け、継続的に技術開発を進めていく所存である。



関 康和

半導体の研究開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部副統括部長。工学博士。電気学会会員。



宝泉 徹

半導体の研究開発に従事。現在、富士電機システムズ株式会社半導体事業本部半導体統括部副統括部長。電気学会会員。



山添 勝

富士電機システムズ株式会社取締役副社長，半導体事業本部長。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。