

モビリティ・エネルギーマネジメントに 貢献するパワー半導体

Power Semiconductors Contributing to Mobility and Energy Management

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

井川 修 IKAWA, Osamu

1 まえがき

世界的にカーボンニュートラル実現に向けた脱炭素化の取組みが加速しており、日本を含む世界各国で温室効果ガス削減の具体的目標が定められている。富士電機は、“豊かさへの貢献”“創造への挑戦”“自然との調和”を経営理念に掲げ、エネルギー・環境事業で持続可能な社会の実現に貢献していくことを経営方針の柱に据えており、革新的クリーンエネルギー技術・省エネルギー（省エネ）製品の普及拡大を通じ、“脱炭素社会”“循環型社会”“自然共生社会”の実現を目指す、“環境ビジョン 2050”を策定している。

中でも、脱炭素社会の実現に対しては、自動車電動化の拡大や電気エネルギーの効率的な利用が必須であり、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器はこれらの実現に必要な不可欠である。このことから、パワエレ機器の主要なデバイスであるパワー半導体に対する期待はますます高まってきている。

2 富士電機のパワー半導体

富士電機は、市場の要求に応じたさまざまなパワー半導体を開発している。図1に富士電機のパワー半導体製品の適用例を示す。

2.1 車載分野

世界における動力機関別の乗用車の販売台数予想を図2に示す。これから分かるように、モータ搭載車の販売台数は今後伸長していくものと考えられている。^(*)富士電機は、モータ制御用の車載 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール、ならびに充電器、直流電源の電力変換制御用途のパワー半導体製品を開発し、量産体制を拡大している。

一方、内燃機関搭載車は環境性能を重視したハイブ

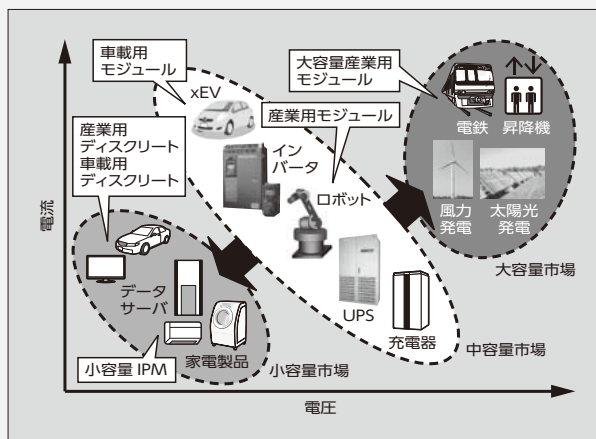


図1 富士電機のパワー半導体製品の適用例

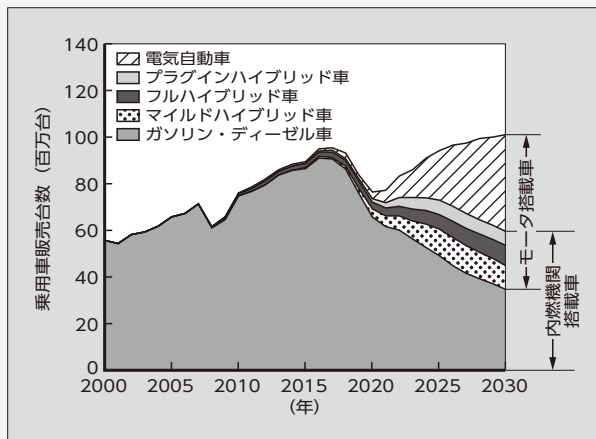


図2 動力機関別の乗用車の販売台数予想（富士電機作成）

リッド車などの形で存続すると予想される。この用途向けにエンジンやトランスミッションの油圧バルブなどの駆動電流をオン・オフ制御する IPS (Intelligent Power Switch) 製品、ガソリンエンジンの吸気・排気系や、トランスミッション、パワーステアリング、ブレーキなどの油圧制御部などに用いられる圧力

(*) 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。

センサ、ガソリンエンジンの点火制御に用いられるワンチップイグニタなどの車載用の製品を開発し、製品化しており、エンジンの効率的な燃焼などを通じて、CO₂削減に貢献している。

2.2 産業分野

産業用途については、小容量、中容量、大容量の製品を展開している。

小容量の製品分野では、エアコンなど家電製品のモータ駆動用の小容量IPM^{(*)2}(Intelligent Power Module)を開発し、製品化している。また、小容量のパワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning System)や無停電電源装置(UPS: Uninterruptible Power System)などの電力変換装置を主な用途とするディスクリート^{(*)3}IGBT製品を開発し、製品化している。さらに、LED照明をはじめとするさまざまな電子機器のスイッチング電源制御のためのパワーIC製品を開発し、製品化している。

中容量の製品分野では、汎用インバータ、工作機械やロボットのサーボモータ制御、業務用エアコンのモータ制御、データセンター向けUPSの電力変換装置などに用いられる産業用IGBTモジュールを開発し、量産している。この分野では、労働力不足や生産性向上に対応するための自動化投資などに伴い需要の拡大が期待されている。

大容量の製品分野では、風力発電やメガソーラー発電などの再生可能エネルギー向けの電力変換装置用や鉄道車両のモータの可変速駆動装置用のIGBTモジュールを開発し、製品化している。

これらの製品のほか、それぞれの用途において、既存のシリコン(Si)デバイスと比較して低損失、高耐圧、高温動作といった優れた特徴を持った次世代のパワー半導体である炭化けい素^{(*)4}(SiC)デバイスも開発し、製品化している。

3 パワー半導体の開発状況

富士電機のパワー半導体における最新の開発成果は、次のとおりである。

(*)2 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、パワー半導体素子の性能を最大限に引き出すことができる。

(*)3 ディスクリート

パワー半導体素子の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デバイスで

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 炭化けい素(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。

(*)5 RC-IGBT

Reverse-Conducting IGBT(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。

3.1 xEV向けIGBTモジュールの高電力密度化を実現するパッケージ技術

電動車(xEV)の駆動用モータの制御に必要な車載IGBTモジュールは、限られたスペースに搭載されるために小型化が必須であり、さらに高出力化も求められていることから、高電力密度化が必要である。富士電機は、パワーモジュールを高電力密度化するために必要な半導体素子やパッケージの技術の開発に取り組んでおり、xEVのパワートレインを構成するキーコンポーネントとして100kWクラスのインバータをターゲットとした業界トップクラスの超小型⁽¹⁾⁽²⁾のxEV向けIGBTモジュール「M677」を開発した(図3)。M677では小型化と高出力化を両立させるため第7世代RC-IGBT^{(*)5}(逆導通IGBT: Reverse Conducting IGBT)を採用し、さらにその導通損失を低減するため、Siウェーハの薄化と表面構造の最適化を行っている。チップ体積の減少に伴い熱容量が減少し、内部温度が上昇しやすくなることへの対策として、従来のアルミニウムワイヤ配線に比べて放熱性の高い銅製リードフレームを採用した。これにより、例えばリーク電流に起因する熱暴走によりチップを破壊するのに要する短絡破壊エネルギーは、従来品に対して40%向上した。

また、高電力密度、高温環境下で使用されることにより配線抵抗や熱抵抗の上昇を引き起こすことが懸

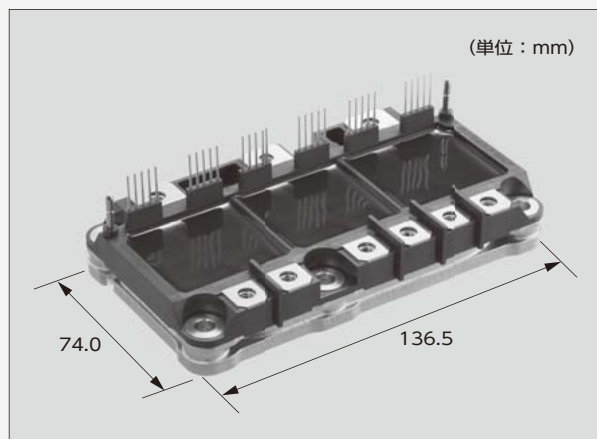


図3 xEV向けIGBTモジュール「M677」

念されるエレクトロマイグレーションに対し、このパッケージが十分な耐性を備えていることを確認した。(185 ページ、“xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現するパッケージ技術” 参照)。

3.2 第 2 世代 1,700 V All-SiC モジュールの系列拡大

AC 690 V 系モータドライブや電鉄に用いられるパワエレ機器は、DC バス電圧が 900 ~ 1,100 V であるため、定格電圧 1,700 V のパワー半導体が求められている。また、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの分野では、発電効率の向上やコスト低減を図るため、DC バス電圧の高圧化が進んでいる。このような高耐圧のパワー半導体が要求される産業用途向けに、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を搭載した定格電圧 1,700 V の All-SiC モジュールを開発しており、その系列製品を今回開発した。

開発した 1,700 V All-SiC モジュールにより 2 レベル回路を構成し、DC バス電圧 1,100 V のパワエレ機器に適用した場合の発生損失は、従来の 1,200 V Si-IGBT により 3 レベル NPC 回路を構成した場合に比べて 69% 低減した (図 4)。このように高効率化が見込めるとともに、3 レベル回路から 2 レベル回路として使用するパワー半導体デバイス数を減らすことが可能となり、パワエレ機器の高信頼化やコスト低減も期待できる。

SiC-MOSFET は Si-IGBT に比べ、はるかに高速

なスイッチングが可能であるが、高速スイッチング時には、モジュール内部の配線インダクタンスにより高いサージ電圧を引き起こすという弊害がある。今回系列拡大した All-SiC モジュールでは、内部構造の変更により配線インダクタンスを 24% 低減しながらも、第 7 世代「X シリーズ」IGBT の 2 in 1 パッケージ「M276」の外形および端子配置との互換性を確保しており、Si-IGBT を容易に置き換えることができる (190 ページ、“第 2 世代 1,700 V All-SiC モジュールの系列拡大” 参照)。

3.3 RC-IGBT を搭載した第 7 世代 IGBT-IPM の小型製品の系列化

近年、ファクトリーオートメーション化や携帯電話などの通信機器の普及により、産業用ロボットや工作機械などに使用されるサーボシステムの需要が拡大している。こうした装置に強く求められるのが省スペース化であり、これを実現するためには、そこに使われるパワー半導体も小型化することが必要であり、高温動作化と低損失化が鍵となる。また、突然の故障を防止するため高信頼性であることも求められている。

IGBT-IPM は、IGBT のゲートを駆動する制御 IC を内蔵し、さらに保護機能も備えた IGBT モジュールであり、高信頼性が要求される NC 工作機、ロボット、エレベータなど、用途は多岐にわたっている。

最新世代である第 7 世代 IGBT-IPM⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾ は、低損失化を実現するために、IGBT のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によりドリフト層を薄化した第 7 世代チップ技術に加え、IGBT のゲートを駆動する新たな制御技術を採用した。さらに高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの第 7 世代パッケージ技術により、高温動作化を実現した。今回、さらなる小型化、高信頼性の要求に応えるため、第 7 世代 IGBT-IPM の系列に、RC-IGBT チップを適用した製品を加えた。RC-IGBT チップとは、IGBT チップと FWD (Free Wheel Diode) チップをワンチップ化したものである。^(*6)

RC-IGBT の採用により、IGBT と FWD のそれぞれのチップから構成される第 6 世代 IGBT-IPM に比べてチップ総面積が 33% 低減し、パッケージの小型化が可能となった。また、第 7 世代チップ技術と新たな制御技術により、発生損失を第 6 世代 IGBT-IPM に比べ約 7% 低減させた。チップ面積と発生損失の低減により、今回開発した小型パッケージ「P639」では、チップからの発熱を放熱する銅ベースの面積を従来

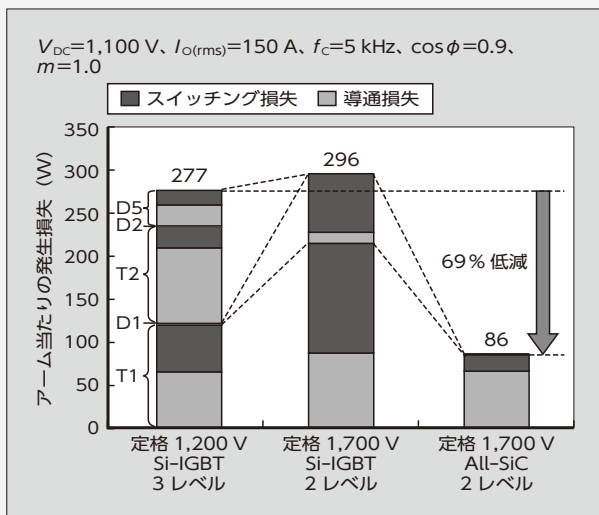


図 4 3 レベル回路と 2 レベル回路での損失比較

(*6) FWD

Free Wheeling Diode の略である。選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に還流させる役割を担うデバイスである。Si の FWD として主に使われている PiN (P-intrinsic-N) ダイオードは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。

に比べ 33% 縮小することができ、パッケージ面積は 27% 低減した。さらに、RC-IGBT の採用によりパワーモジュールの代表的な寿命特性である ΔT_{vj} パワーサイクル寿命も向上する。従来の第 6 世代 IGBT-IPM では IGBT と FWD が交互に発熱と冷却を繰り返すのに比べて、RC-IGBT では IGBT 領域と FWD 領域が一つのチップ内にあるためチップ全体の温度変化 ΔT_{vj} が個別チップの場合よりも小さい。これにより、温度変化による接合部の摩耗劣化に起因する ΔT_{vj} パワーサイクル寿命は、出力周波数 1 Hz 動作時には第 6 世代に比べて約 10 倍となると推定される。

例として、従来品の「P629」を使った幅 60 mm のバックフィンタイプのサーボアンプにおいて、開発品である P639 で置き換えると、サーボアンプの筐体（きょうたい）幅を 46.5 mm 程度にすることができ、約 20% の縮小が可能となる（図 5）（195 ページ、「RC-IGBT を搭載した第 7 世代 IGBT-IPM の小型製品の系列化」参照）。

3.4 3.3 kV 第 7 世代「X シリーズ」IGBT チップ技術

高速鉄道は、同じ長距離の輸送手段である飛行機よりも格段に CO₂ の排出量が少なく、国内はもとより国外での導入が近年増加している。その鉄道車両のモータの駆動には IGBT モジュールが使われる。CO₂ を削減するために、IGBT モジュールのさらなる低損失化が求められている。また、高速鉄道自体の消費電力低減のためには、車両や搭載機器の軽量化が重要であり、システムの小型・軽量化に貢献できる IGBT モジュールが求められている。

富士電機は、最新世代である「X シリーズ」の

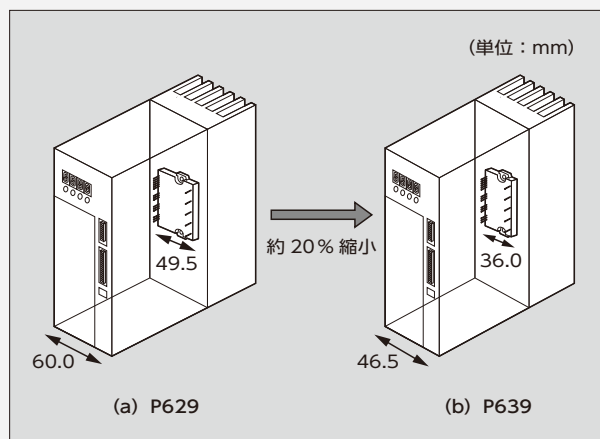


図 5 バックフィンタイプのサーボアンプ模式図

IGBT と SiC-SBD^(*) (Schottky Barrier Diode) を組み合わせた 3.3 kV 定格の SiC ハイブリッドハイパワーモジュール（HPM：High Power Module）を開発し、大幅な損失低減を実現した¹⁰⁾。

今回開発した、3.3 kV X シリーズ IGBT チップ（X-IGBT）では、従来と比べて表面構造を微細化するとともに、n-ドリフト層の厚さを従来よりも薄くすることにより、導通損失の指標である定格電流でのコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を従来に対して 1.0 V 低減している。

図 6 にターンオフ損失 E_{off} と $V_{CE(sat)}$ の関係を示す。X-IGBT では、同じ E_{off} で比べたときの $V_{CE(sat)}$ が、従来品に対して 1.0 V 低減している。また、表面構造の微細化によりターンオン時の dv/dt 、 di/dt のゲート抵抗による制御性を改善し、これによりターンオン損失 E_{on} を改善させた。

この IGBT を搭載した 3.3 kV SiC ハイブリッド HPM は高速鉄道に採用され商用運転しており、高速鉄道の消費電力の低減とともに、機器の小型・軽量化に寄与している（200 ページ、「3.3 kV 第 7 世代「X シリーズ」IGBT チップ技術」参照）。

3.5 第 7 世代 PWM 電源制御 IC 「FA8C00 シリーズ」

電子機器に用いられるスイッチング電源についても、省エネ化に関する要求が厳しくなっており、特にネットワークの利用が拡大して常時稼働のシステムが増えることにより、軽負荷時の電力変換効率の向上が強く求められている。また新興国では、インフラ整備の遅れにより、商用電源（AC 電源）の電圧変動が頻発している。これにより、AC 電源に高電圧が発生し、電

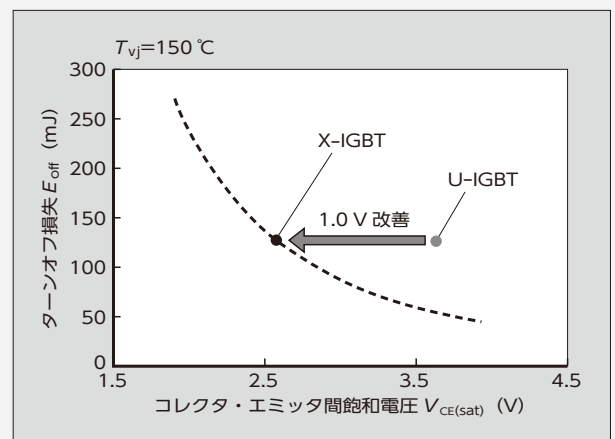


図 6 ターンオフ損失とコレクタ・エミッタ間飽和電圧の関係

(*) 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使用した

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 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。

表1 「FA8C00 シリーズ」の機能概要

項目	従来製品	FA8C00シリーズ
最小出力パルス幅の選択機能	なし	内蔵
高AC入力電圧端子最大印可電圧	650V	710V
IC出力電圧のクランプ機能	なし	内蔵 (16V)
外部レギュレータ	必要	不要 (8点の部品削減可能)

源装置の入力電圧範囲を超えることによる電源装置の破壊が問題となっている。さらに、電子機器の継続的な低価格化ニーズを受けて電源の部品点数削減の要求も強い。

今回、従来製品⁽¹⁾⁽¹¹⁾と比べて電源システムの軽負荷時の電力変換効率のさらなる向上と、高 AC 入力電圧対応、電源部品の削減を可能とする「FA8C00 シリーズ」を開発した。表 1 に FA8C00 シリーズの機能概要を示す。

軽負荷時の電力変換効率を高めるため、連続スイッチング動作とスイッチング停止を繰り返すバースト動作を行い、MOSFET のスイッチング損失を低減する方法が従来から採られていた。この動作において電力変換効率をさらに向上させるためには、幅の狭い MOSFET 駆動用出力パルスを生じないように、電源に合わせて出力パルス幅を最適化することが効果的である。FA8C00 シリーズでは電源に合わせて最小の出力パルス幅を設定できる機能を追加したことにより、軽負荷時の電力変換効率を向上させることが可能となった。

また、商用電源に接続される高 AC 入力電圧端子 (VH 端子) の回路内部に用いられる起動素子を改良し、最大印加電圧を 710 V に高めることにより、AC 電源の電圧変動による破壊を抑制できるようにした。

さらに、電源 IC により駆動される MOSFET のゲート端子の定格電圧は 20 ~ 30 V であり、これを超える電圧が印加されると MOSFET が破壊される。これを防ぐために、従来品では、MOSFET を駆動するドライバ回路の電源電圧である VCC 端子電圧を、20 V 以下に制限するレギュレータ回路を外付けする必要があった。新製品の FA8C00 シリーズでは、IC 内部で出力端子電圧をクランプする機能を内蔵することで、VCC 端子電圧が 30 V を超えても、IC から出力するゲート電圧値は 16 V に抑えられる。したがって、外部で構成していたレギュレータ回路が不要となり、電源の部品削減を可能とした (204 ページ、「第 7 世代 PWM 電源制御 IC 「FA8C00 シリーズ」」参照)。

3.6 IPS 用オートゼロアンプ技術

富士電機は、自動車のトランスミッションなどを制

御するためのソレノイドバルブを動作させる電流駆動素子である IPS を開発し、製品化してきた。IPS の小型化、周辺部品を取り込んだ 1 チップ化は、ECU (Electronic Control Unit) 基板の小型化を可能にして車内の快適性能の向上に寄与し、また IPS の電流検出精度の向上は燃費向上に寄与する。これまで別置されていた IPS と電流検出用のシャント抵抗を 1 チップ化すると、シャント抵抗で発生するジュール熱によりチップ温度が上昇する問題がある。このチップ温度の上昇を抑えるために、シャント抵抗の抵抗値を現状の 1/4 にする必要があり。これに対して、入力電流-アンプ出力電圧特性を維持するために、アンプの差動ゲインを従来の 4 倍にすると、アンプ出力の誤差も大きくなり、電流検出精度が悪化する問題が起きる。これを解決するため、オフセット電圧を一定時間ごとに自己補償するオートゼロアンプ技術を開発した。

図 7 にオートゼロアンプを使用した実機評価結果を示す。ゲインはシャント抵抗を従来の 1/4 にすることを考慮して従来品の 4 倍の 32 倍とした。アンプ入力には負荷電流 1 A、かつシャント抵抗が従来品の 1/4 に相当する入力電圧を印加した。この条件で温度 -40 °C から +175 °C の範囲で電流検出精度の評価を行った。電流検出精度の目標値は、第 5 世代 IPS と同等の ±3.1% 以下とした。ゲインを従来品の 4 倍の 32 倍としたにも関わらず第 5 世代 IPS の目標仕様を満足している。

これにより、従来と同等の電流検出精度を保ちつつ、ECU 基板の実装面積の縮小が期待できる (209 ページ、「IPS 用オートゼロアンプ技術」参照)。

3.7 トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した SiC-MOSFET

SiC は Si に比べて絶縁破壊電界強度が高いため、電圧を支えるドリフト層を薄く、高濃度にするこ

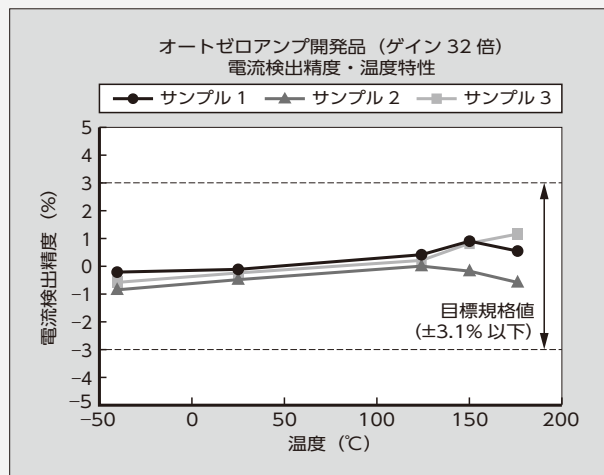


図 7 オートゼロアンプを使用した実機評価結果

り素子の低抵抗化が可能である。その結果、電力変換機器の低損失化に貢献できる。また、SiCは熱伝導率が高く、バンドギャップが広いので、素子の高温動作が可能となることから冷却システムを簡素化できるので、電力変換機器の小型・軽量化に有利となる。

一方、SiC-MOSFETの還流素子として機能するボディダイオードに電流を流すと、オン電圧が増大する現象（バイポーラ劣化）によって損失が増大するという問題があり、バイポーラ劣化の抑制方法として、SBDとMOSFETのワンチップ化（トレンチSBD内蔵）を検討した。

富士電機は、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：Tsukuba Power-Electronics Constellations）のプロジェクトに参加し、その中でSiCトレンチゲートMOSFETにトレンチSBDを形成する技術を確認した。トレンチSBDを内蔵する場合、トレンチゲート間に平面的にトレンチSBDを形成してしまうと従来のSiCトレンチゲートMOSFETに対しセルピッチを広げる必要があり、導通損失が増大する。そこで、セルピッチを広げることなく従来のSiCトレンチゲートMOSFETにトレンチSBDを形成し、SBD内蔵を実現した。さらに、セルピッチを狭めるとバイポーラ劣化を起こしにくくなり、損失増加が抑制された。

図8に順方向通電電流密度とバイポーラ劣化の指標であるドレイン・ソース間順方向電圧の初期値に対する変動量 ΔV_F の関係を示す。セルピッチの大きい素子Bではバイポーラ電流により ΔV_F が増加しているが、相対的にセルピッチが狭い素子Cはバイポーラ劣化が抑制されており、通電装置上限の電流密度2,000 A/cm²まで ΔV_F が増大しないことが実証された。また、エピタキシャル基板の貫通BPD（基底面転位：Basal Plane Dislocation）密度に関係なく、安定してバイポーラ劣化を抑制できることも確認した（214ページ、「トレンチSBD内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した

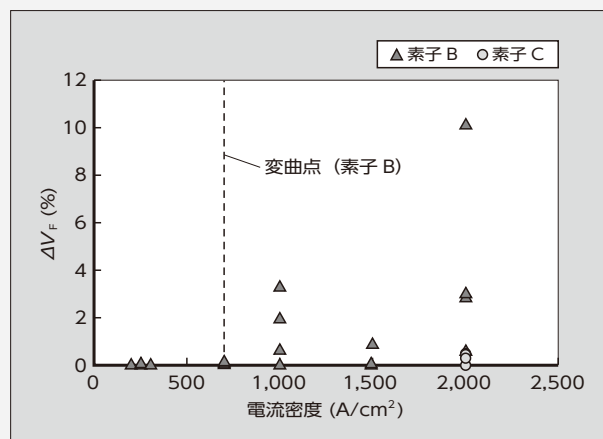


図8 順方向通電電流密度に対する ΔV_F

SiC-MOSFET”参照)。

4 あとがき

富士電機のパワー半導体開発における最新の成果を抜粋して述べた。富士電機では、創業以来、エネルギー・環境技術の革新を追求し、産業・社会インフラ、自動車などの分野で、広く世の中に貢献してきた。中でもパワーエレクトロニクスは、急速に高まっている省エネルギー化、脱炭素化など環境問題への施策を牽引する技術である。パワー半導体は、パワーエレクトロニクスにおけるキーデバイスであり、今後もその技術革新を通じて安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.236-239.
- (2) 立石義博ほか. xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.240-245.
- (3) Branislav Stevanovic. et al. “Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-Stage Grid-Connected 1500-V PV System With Employed 900-V SiC Devices”. 2019, IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electronics, vol.7, no.2, p.811-832.
- (4) 岩崎吉記ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.229-233.
- (5) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219-223.
- (6) 寺島健史ほか. 小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.234-238.
- (7) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM「P631」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.251-255.
- (8) Satou, K. et al. “The 7th Generation Intelligent Power Module for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Asia 2021.
- (9) 国土交通省. “主な鉄道プロジェクトと海外展開に向けた取組”. <https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001590734.pdf>, (参照 2022-11-24).
- (10) 関野裕介, 森谷友博. 電鉄向け 3.3 kV SiCハイブリッドハイパワーモジュール. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.1, p.63-65.
- (11) 藪崎純ほか. 第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.452-456.

- (12) 日朝信行ほか. 650 V耐圧PWM電源制御IC「FA8A80シリーズ」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.246-250.
- (13) 中川翔ほか. ワンチップ リニア制御用IPS「F5106H」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.273-276.
- (14) Toyoda, Y. et al. “60 V-Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET”. ISPSD. 2013, p.147-150.
- (15) 岩田英樹ほか. 車載用第5世代IPS「F5202H」. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.219-223.



大西 泰彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部長。工学博士。電気学会会員。



宮坂 忠志

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部長。電気学会会員。



井川 修

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部長。工学博士。電気化学会会員。





*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。