

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

井川 修 IKAWA, Osamu

1 まえがき

富士電機は、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、サプライチェーンを含めた企業活動全体で SDGs を推進し、地球温暖化をはじめとする社会・環境課題の解決に取り組んでいる。このような取り組みを通じて、国際社会が目指す経済・社会・環境の統合的な向上に応え、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献している。

富士電機が取り組む環境課題の一つである“低炭素社会の実現”のためには、産業分野や社会インフラなどさまざまなシステムで使われているパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器の効率化が必須であり、これらを動かすパワー半導体デバイスの性能向上は非常に重要である。

2 富士電機のパワー半導体

富士電機は、図 1 に示すように用途ごとにさまざまなパワー半導体デバイスを提供している。

小容量機器の分野では、エアコンなど家電製品のモータドライブシステムに用いる小容量 IPM^{(*)1} (Intelligent Power Module)、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) などの電力変換に用いる産業用ディスクリート IGBT^{(*)2} ^{(*)3}

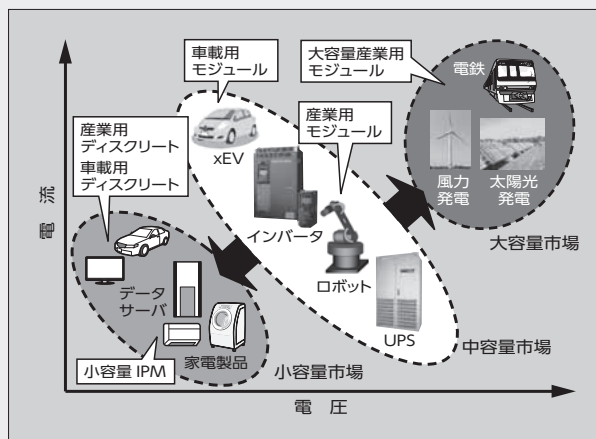


図 1 富士電機のパワー半導体の製品応用例

(Insulated Gate Bipolar Transistor)、その他さまざまな機器の電力変換に用いるスーパージャンクション (SJ) - MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor) を開発し、提供している。SJ - MOSFET では、産業用途だけでなく、自動車のエンジンやトランスミッション、ブレーキなどの制御部品や xEV (電動化車両) 用充電器の電力変換や制御のための製品も開発や提供を進めている。さらに車載用途では、エンジンやトランスミッションなどのパワートレイ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)、ガソリン車の吸気系・排気系のガス圧制御部や、エンジン、トランスミッション、パワーステアリング、ブレーキ

(*)1 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。

(*)2 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 1 in 1 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い

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で使われている。

(*)3 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

きる。

(*)4 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。

の油圧制御部などに用いられる圧力センサ、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を開発し、提供している。また、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を制御するパワー IC を開発し、提供している。

中容量機器の分野では、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、UPS の電力変換などに用いる産業用 IGBT モジュールを開発し、提供している。労働力不足の解消や生産性向上のための自動化の設備やシステムで産業用パワー半導体の需要は拡大するものと見込まれている。車載用途では、xEV のモータ制御に IGBT モジュールを開発し、提供してきた。世界各国でガソリン車から xEV へのシフトが始まり、今後も車載用パワー半導体の需要は拡大するものと見込まれている。

大容量機器の分野では、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の電力変換、鉄道車両のモータの可変速駆動で用いる IGBT モジュールなどを開発して提供し、ゼロエミッションの実現に向け貢献している。また、既存のシリコン (Si) デバイスと比較して低損失や高耐圧、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^{(*)5} (SiC) パワー半導体デバイスを開発し、提供している。

③ パワー半導体の開発状況

富士電機のパワー半導体開発における最新の成果を抜粋してまとめる。

3.1 xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上

xEV 向け IGBT モジュールは、車両の小型化、高効率化、高信頼性を達成するためのキーデバイスである。xEV 向け IGBT パワーモジュールの課題の一つに過電流耐量^{(*)6} (I^2t 耐量) の改善がある。今回、RC-IGBT (逆導通 IGBT) を採用し、さらに RC-IGBT 表面電極の回路への接続を従来のワイヤボンディング (ワイヤ) 方式に替わりリードフレーム (LF) 方式^{(*)7} を採用し、 I^2t 耐量を向上させた xEV 向け IGBT モジュールを開発した (図 2)。

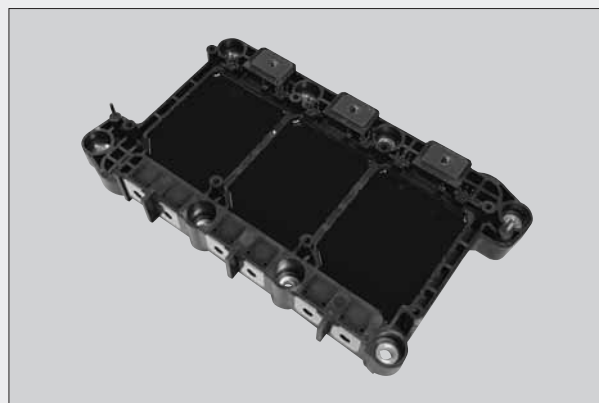


図 2 xEV 向けモジュール (開発品)

RC-IGBT では IGBT 領域と FWD^{(*)7} (Free Wheeling Diode) 領域がワンチップ上に作り込まれており、FWD 通電時の FWD からの発熱は IGBT 領域を含めた全領域で放熱するため、従来の FWD に比べて熱抵抗が低くなり、 I^2t 耐量が向上する。

また、 I^2t 耐量は放熱条件にも依存する。そこで、LF 方式によりチップ表面と回路との接合面積を増加させて I^2t 耐量を向上させた。ワイヤ方式を採用した個別 FWD と IGBT からなる IGBT モジュール (従来品) に比べ、LF 方式を採用した RC-IGBT モジュール (開発品) の I^2t 耐量は 2.6 倍に向上し、高い信頼性の xEV 向け IGBT モジュールを実現した (210 ページ、"xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上" 参照)。

3.2 xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術

xEV のモータ制御に用いるインバータユニットは限られたスペースに搭載されるため、小型かつ搭載方法の自由度の高さ、低燃費を意識した軽量化、効率向上などが求められる。これらの要求に対し、昨今の電動化システムは大幅な効率向上と低コスト化を目指し、モータとインバータに加え、ギアボックスを統合する新しい機電一体化システムの開発が活発化している。富士電機はパワーモジュールにおいても、この新システムに最適な小型・薄型化、高信頼性を達成し、軽量化かつ加工性に優れたアルミニウム製冷却器を採用した

(*)5 SiC

けい素 (Si) と炭素 (C) の化合物である。3C、4H、6H など多くの結晶多形が存在し、結晶構造によって 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。

(*)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 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 として主に使われている PiN 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。

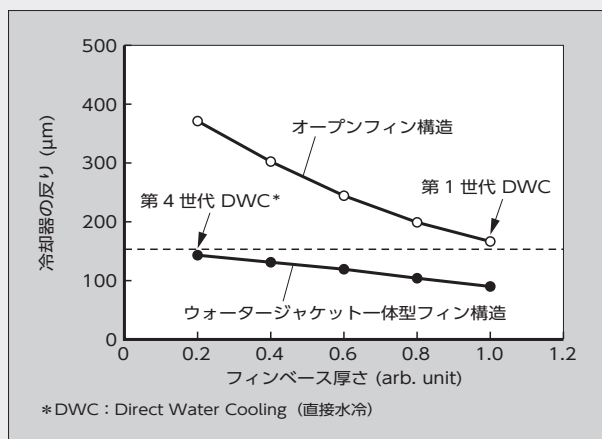


図3 要素モデルを使った冷却器反りのフィンベース厚さ依存性

直接水冷パワーモジュールを開発し、提供してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。第1世代直接水冷構造では冷却器のフィンベースが熱抵抗全体の36%を占めており、放熱性能を阻害していることが熱解析シミュレーションによって明らかになっていた。フィンベースの厚みを20%まで薄くすればその熱抵抗は低下し、モジュール全体の熱抵抗を改善できる。一方、モジュールの温度変化による熱変形を抑制するには、冷却器に剛性を持たせるために、フィンベースの厚さがある程度必要だった。これらを両立するため、ヒートシンクとウオータージャケットを一体化したウオータージャケットー体型フィン構造を開発した。この構造では、従来の一体化していないオープンフィン構造に比べて冷却器の変形を容易に抑制することができる。図3に、冷却器の反りのフィンベース厚さ依存性を示す。ウオータージャケットー体型フィン構造では、従来のオープンフィン構造に比べ、20%にまで薄くしても約150 μm 以下まで反りを低減できる。剛性を確保しつつフィンベースの熱抵抗を低減した。

また、冷却器の反りが同等の場合、ウオータージャケットー体型フィン構造はオープンフィン構造に比べて2倍以上の温度サイクル耐量があり、信頼性が向上している(214ページ、「xEV向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術」参照)。

3.3 車載用第5世代IPS「F5202H」

IPSは出力段として用いる縦型パワーMOSFETと制御・保護回路を構成する横型パワーMOSFETを一つのチップ上に集積した製品である。今回、電子制御システムの小型・高放熱化に貢献するAMP付IPS「F5202H」を開発した。第5世代IPSデバイス・プロセス技術を採用することで、基本性能を維持したままチップサイズを従来比で45%削減した。その結果、小型で放熱性に優れたSON (Small Outline Non-

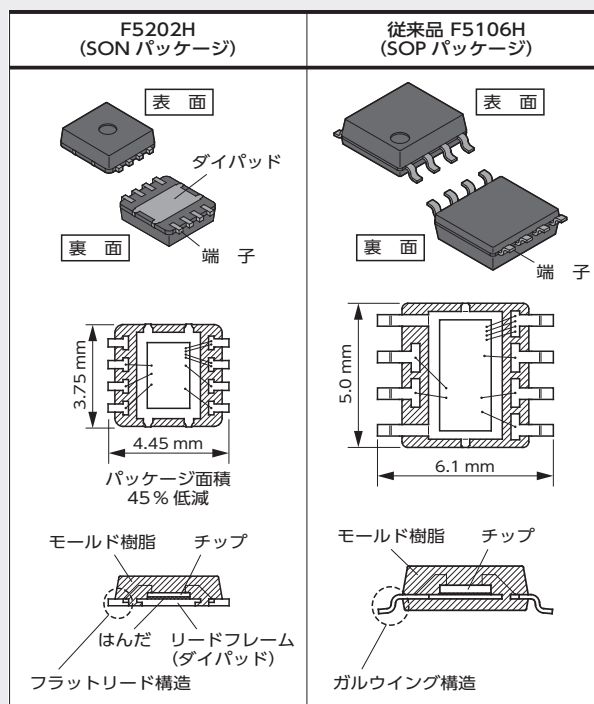


図4 パッケージの外観と内部構造の比較

leaded) パッケージに搭載することができ、パッケージ面積を45%削減し、熱抵抗を80%低減した。

図4に、F5202Hの外観と内部構造を従来と比較して示す。次に示す特徴を持ち、電子制御システムの小型化に貢献する。

- (a) 基本性能を維持したまま、制御・保護回路の小型化
- (b) 小型で高い放熱性を持つSONパッケージの採用
- (c) 高精度オペアンプを内蔵し、高精度な負荷電流をモニタすることが可能
- (d) 接合部温度 T_{vj} の最大定格を175 $^{\circ}\text{C}$ とし、高温環境下で長時間動作対応が可能

(219ページ、「車載用第5世代IPS「F5202H」」参照)

3.4 第7世代「Xシリーズ」産業用1,200V/2,400ARC-IGBTモジュール

富士電機は、チップおよびパッケージの技術革新を行った第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュールを製品化し、IGBTモジュールの低損失化・高信頼化による高パワー密度化を実現してきた⁽⁶⁾。さらに、IGBTとFWDをワンチップ化して発生損失を低減しつつ、チップ数およびトータルチップ面積が低減できるRC-IGBTを開発してきた。第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBT(「Xシリーズ」RC-IGBT)モジュールでは、第7世代XシリーズIGBTモジュールのチップ技術、パッケージ技術とRC-IGBT技術

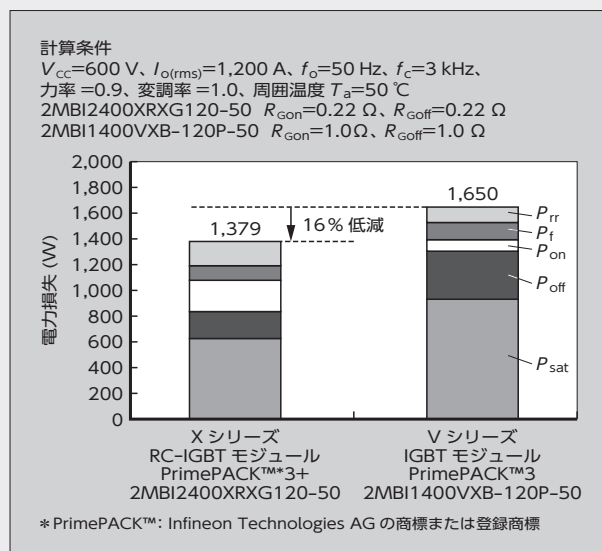


図5 「X シリーズ」「V シリーズ」発生損失の比較

を組み合わせるさらなる高パワー密度を実現した。今回、RC-IGBT を搭載した 1,200 V/2,400 A 定格 PrimePACK™^(注)3+ を開発し、系列に加えた。

X シリーズのチップ技術により、コレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を大幅に低減した。また、最先端の薄ウェーハ加工技術を採用することで、飽和電圧とスイッチング損失のトレードオフ関係を改善した。これらにより従来に比べ電力損失を 16% 低減した (図 5)。

さらに、「X シリーズ」RC-IGBT モジュールでは、RC-IGBT 技術、高放熱絶縁基板を採用して熱抵抗を大幅に低減し、同じパッケージサイズで従来よりも高い定格電流を実現した。さらに、高耐熱シリコンゲルの採用により、連続動作時の最大接合温度を 175 $^{\circ}\text{C}$ に上げるとともに高信頼性も確保した (224 ページ、「第 7 世代「X シリーズ」産業用 1,200 V/2,400 A RC-IGBT モジュール」参照)。

3.5 第 2 世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大

Si を使用したパワー半導体デバイスの特性は、その材料物性の理論的限界に近づいている。そこで、Si の特性限界を超え、小型化や高効率化の要求に対応できる次世代半導体の材料として SiC が、注目されている。

富士電機は、2017 年にトレンチゲート構造を採用した第 1 世代 SiC-MOSFET チップ⁽⁸⁾をフルモールドパッケージに搭載した定格容量 1,200 V/400 A の All-SiC 2 in 1 モジュールを市場に展開している。

〈注〉 PrimePACK™: Infineon Technologies AG の商標または登録商標

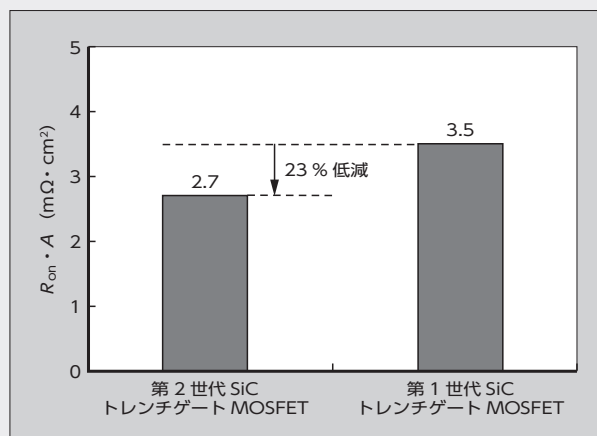


図6 第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET と第 1 世代 SiC トレンチゲート MOSFET の $R_{on} \cdot A$ 比較

さらに製品系列を拡大するため、Si-IGBT モジュールの標準パッケージ [W108 $\times$ D62 (mm)] を採用し、外形および端子配置の互換性を確保した All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した。今回の All-SiC モジュールは主端子部にラミネート構造を採用し、内部インダクタンスを低減した。

図 6 に、1,200 V 耐圧の第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET と、第 1 世代 SiC トレンチ MOSFET の規格化オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ の比較を示す。セルピッチを微細化した第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET は、第 1 世代に比べて $R_{on} \cdot A$ を 23% 低減し、導通損失を低減している。

今回開発した All-SiC モジュールは、出力電流 $I_{O(rms)}=200\text{ A}$ の条件において、Si-IGBT モジュールと比較してキャリア周波数 $f_c=5\text{ kHz}$ では 59%、 $f_c=20\text{ kHz}$ でも 63% のインバータ発生損失を低減させることをシミュレーションで確認した。このように、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載すると All-SiC モジュールの発生損失が小さくなり、高密度化や大容量化が可能となる。また、スイッチングの高周波化により小型の受動部品が使用できるようになり、パワーエレクトロニクス機器が小型化できる (229 ページ、「第 2 世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大」参照)。

3.6 小型パッケージ「P644」を採用した第 7 世代「X シリーズ」IGBT-IPM

IPM は、IGBT と FWD からなる IGBT モジュールに IGBT のゲート駆動回路と保護回路を内蔵した高機能の IGBT モジュールである。

電力変換装置のさらなる小型化、高効率化、高出力化の要求に応えるために、第 7 世代チップ技術とパッケージ技術を適用した「X シリーズ」IPM⁽⁹⁾の系列において、ブレーキ回路を内蔵した IPM としては、図 7 に示す業界最小クラスの「P644」パッケージを採用

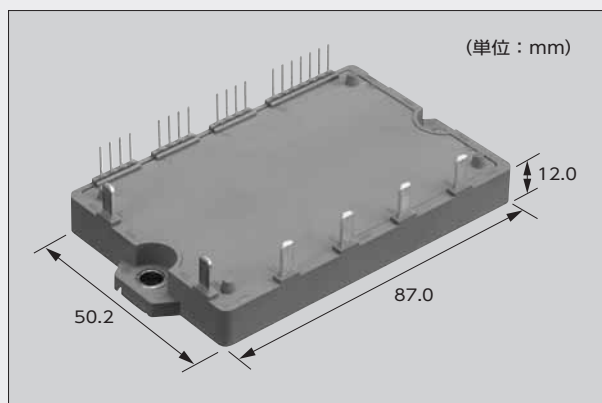


図7 「Xシリーズ」IPM「P644」の製品外観

した製品を開発した。

XシリーズIPM P644の製品系列では、定格650V系は50Aと75A、定格1,200V系では25Aと35Aであり、同一定格帯の従来の「Vシリーズ」IPMの7in1用パッケージ「P636」に比べ、冷却器上のモジュール設置面積を12%縮小した。

表面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、IGBTのターンオフ損失と導通損失のトレードオフ特性を改善した第7世代チップ技術と、スイッチング時のターンオン損失を低減するゲート駆動回路の改善によって、従来のVシリーズIPMよりも発生損失を大幅に低減した。さらに、高温動作を実現するため、高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどを採用し、連続動作時のチップ接合温度 T_{vjop} の最高温度をVシリーズIPMの125℃から150℃に拡大した。また、下アーム保護動作時にブレーキ部IGBTが独立動作できるようにし、半導体素子の過電圧破壊を防ぐことができる。これらの新技術により、XシリーズIPM P644はVシリーズIPMに比べ、外形の小型化に加え、さらなる高出力化が可能となった(234ページ、「小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM」参照)。

3.7 ディスクリートIGBT「XSシリーズ」の系列拡大

サーバやデータセンター向けUPSおよび再生可能エネルギー用途PCSへの高効率化の要求が高まっている。富士電機は導通損失とスイッチング損失のトレードオフ特性を改善してUPSやPCSの高効率化を実現する650Vおよび1,200V耐圧のディスクリートIGBT「XSシリーズ」を量産供給している。

新たにXSシリーズの1,200V/75AのTO-247-4パッケージ品を開発し、系列に加えた。

このシリーズのIGBTチップは、第7世代XシリーズIGBTをベースにして、UPSやPCS向けに表面構造やFS層を最適化するとともに、ホールの注入を

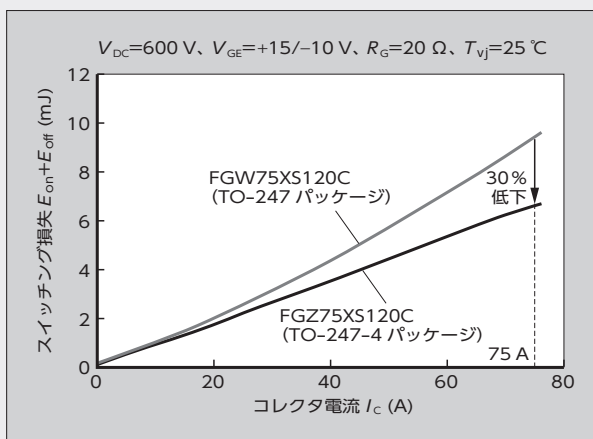


図8 TO-247-4パッケージ品とTO-247パッケージ品のスイッチング損失比較 (I_c 依存性)

抑制するコレクタの最適化とSiウェーハの薄化など、第6世代と比較して導通損失 $V_{CE(sat)}$ ・ターンオフ損失 E_{off} のトレードオフを改善した。

従来のTO-247パッケージにサブエミッタ端子を追加したTO-247-4パッケージを採用している。サブエミッタ端子を追加してゲート電流とコレクタ電流 I_c を分離することにより、ターンオンやターンオフ時のゲート電圧に与えるコレクタ電流とエミッタ配線インダクタンスによる逆起電力を低下でき、スイッチング損失の低減が可能となる。

図8に、1,200V/75A定格のTO-247-4パッケージ品とTO-247パッケージ品のスイッチング損失の I_c 依存性を示す。サブエミッタを追加したTO-247-4パッケージのスイッチング損失(ターンオン損失 E_{on} +ターンオフ損失 E_{off})は、TO-247パッケージと比較して、定格電流75Aのときで30%低損失化した(239ページ、「ディスクリートIGBT「XSシリーズ」の系列拡大」参照)。

3.8 第4世代臨界モードPFC制御IC「FA1B00N」

電子機器の小型・軽量化に伴いスイッチング電源の利用が広く普及している。スイッチング電源における高調波電流は、機器や配線設備の動作障害や力率低下をもたらし、皮相電力を増加させる。この電源高調波電流および力率の問題を解決するために、アクティブフィルタ方式の力率改善(PFC: Power Factor Correction)回路が広く使われており、富士電機はPFC回路を制御するICを製品化している。

電気機器全般における省エネルギー(省エネ)化が重要になっており、PFC回路においても待機電力の削減や、軽負荷を含めた広い負荷領域での効率向上が求められる。

さらに、近年のLED照明などの電子機器に対する消費者の長寿命化への期待と、低価格化要求を受け、

表1 従来品との性能比較

項 目	FA1B00N	FA5601N
ターンオン タイミング検出	ZCD*巻線	ZCD巻線
制御方式	オン幅固定制御	オン幅固定制御
起動時オーバーシュート 低減機能	あ り	な し
PFC出力電圧 低下抑制機能	あ り	な し
V _{CC} 電圧過電圧保護	あ り	な し
V _{fb} 基準電圧	2.5V±1.0%	2.5V±1.4%
過電流検出電圧	0.65V±2.0%	0.65V±3.1%
軽負荷時 スイッチング動作	最大発振周波数制限	最大発振周波数制限

*ZCD：Zero Current Detection

PFC回路においても高信頼性化と、電源コスト低減との両立が求められている。

これらの要求に応えるため、高調波電流規制を満足した主にLED照明用途向けの製品である臨界モードPFC制御IC「FA5601N」に対し、保護機能の強化、および電源コスト低減を可能とする第4世代臨界モードPFC制御IC「FA1B00N」を開発した。今回開発したFA1B00Nと従来品との主要機能比較を表1に示す。

FA1B00Nでは、従来品に対し、起動時のオーバーシュート低減機能⁽⁵⁾、PFC出力電圧低下抑制機能およびV_{CC}電圧の過電圧保護機能を追加した。さらに、PFC出力電圧制御の基準電圧V_{fb}の精度、および過電流検出電圧の精度向上を行った。

これらの機能追加と精度向上により、待機電力の削減や、軽負荷を含めた広い負荷領域での効率向上、信頼性の向上および電源コスト低減が可能となる（243ページ、「第4世代臨界モードPFC制御IC「FA1B00N」」参照）。

3.9 第2世代SiC-SBD

富士電機は、これまでにSiCを用いたSBD^(*)（Schottky Barrier Diode）とプレーナゲートMOSFET、トレンチゲートMOSFETを量産している。これらは、太陽光PCS、産業用インバータ、および鉄道車両用インバータなどに採用され、省エネに貢献している。

今回、第1世代SiC-SBDに比べ、特性および順サージ耐量が向上した第2世代SiC-SBDを開発した。

第2世代SiC-SBDは、第1世代と比較して、

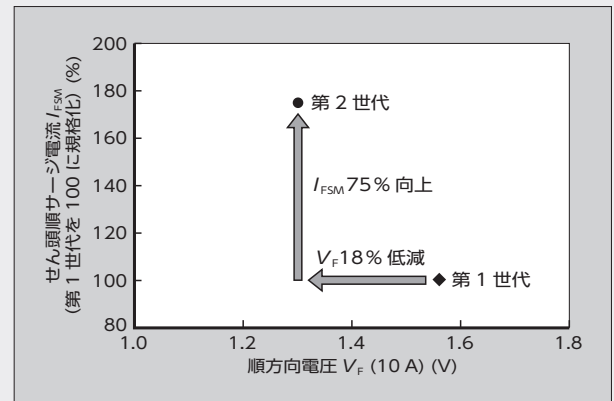


図9 650V耐圧SiC-SBD第1世代と第2世代のV_F-I_{FSM}特性

ショットキー接合の最適化によるV_Fの3%改善、ジャンクションバリアショットキー（JBS：Junction Barrier Schottky）構造とドリフト層の最適化によりドリフト抵抗を低減し、素子の厚さを約1/3に薄化することにより基板抵抗を低減した。これらにより、V_Fを18%低減して導通損失を改善した。

図9は、650V耐圧SiC-SBDの順方向電圧V_F-順サージ耐量I_{FSM}特性について示している。第1世代に対して、第2世代SiC-SBDはV_F（10A）が18%低減するとともに、I_{FSM}は75%向上し、低損失化と高信頼性とを両立させた。本SBD素子を採用したディスクリット製品の開発を、2020年度に開始した⁽⁷⁾。

3.10 1.2kV SiC スーパージャンクションMOSFET

SiC-MOSFETにおける特性オン抵抗R_{on}・Aを低減するためには、MOSFETの抵抗の主要部分を占めるドリフト層の抵抗を低減する必要がある。また近年、MOSFETの寄生ダイオード（ボディダイオード）を還流ダイオードとして用いることが検討され、ボディダイオードのリカバリー特性も注目されている。

富士電機は、これらの課題に対して耐圧を低下させずに、ドリフト層の抵抗を効果的に下げることができると注目に値し、開発に取り組んでいる。

1.2kV耐圧クラスの標準SiC-SJ-MOSFET（SiC-SJ）とSiC狭ピッチSJ-MOSFET（SiC-narrow SJ pitch）、比較のためのSiC-non-SJ-MOSFET（non-SJ）を試作した。SiC狭ピッチSJ構造は、標準SiC-SJ構造に比べて、pカラム幅が半分であり、標準SiC-SJ-MOSFETよりもnカラム濃度が高くなっている。試作したMOSFETをTO-247パッケージに組み立て、静特性およびボディダイオードのリカ

(*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。

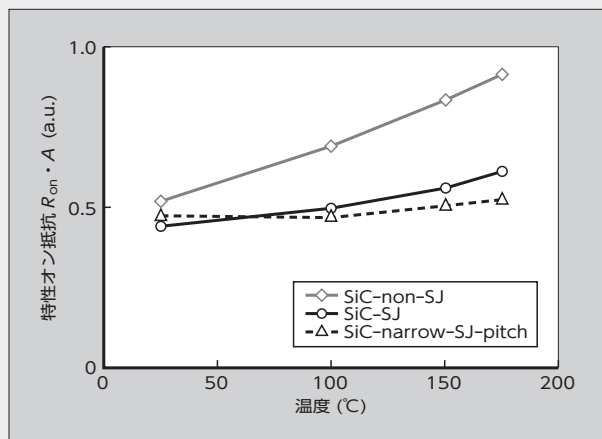


図 10 特性オン抵抗の温度依存性

バリー特性について比較評価した。

静特性について、室温および 175℃でゲート電圧を 0V に設定し、順方向の $I-V$ 特性を調べた。図 10 に、 $R_{on} \cdot A$ の温度依存性を示す。標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET では $R_{on} \cdot A$ が SiC-non-SJ に比べて低く、その温度依存性も低い。さらに、175℃では SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET で最も低い $R_{on} \cdot A$ が得られており、n カラムを高濃度にし、狭ピッチ化することでさらに SiC-SJ-MOSFET の抵抗を下げられることが確認できた。その他の静特性（耐圧、ボディダイオードの $I-V$ 特性）や、ボディダイオードのリカバリー特性を改善することで、インバータ回路への適用を目指す。

本研究は、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）の事業として行われた（249 ページ、「1.2 kV SiC スーパージャンクション 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技術の革新に取り組んできており、経営方針として“エネルギー・環境技術の革新により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献”を掲げている。その中でもパワーエレクトロニクスは、ますます高まっている省エネルギー化、低炭素化など環境問題への対応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、その技術革新を通じて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) ISPSD 2003 Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution.
- (2) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4. p.254-257.
- (3) 井上大輔ほか. xEV向け第4世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.238-242.
- (4) Gohara, H. et al. “Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”. Proceedings of PCIM Europe 2014. p.1187-1194.
- (5) 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.
- (6) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.
- (7) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”. Proceeding of PCIM Europe 2016.
- (8) Takahashi, K. et al. “1200 V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”. Proceeding of PCIM Europe 2014.
- (9) Iwasaki, Y. et al. “ALL-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New concept Package”. PCIM Europe 2017. vol.94, p.16-18.
- (10) Iwasaki, Y. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package”. PCIM Europe 2017. p.651-657.
- (11) 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.
- (12) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.
- (13) 原幸仁ほか. 1,200 VディスクリートIGBT「XSシリーズ」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.247-250.
- (14) Yoshida, K. et al, “Power Rating extension with 7th generation IGBT and thermal management by newly developed package technologies”. PCIM Europe 2017.
- (15) 菅原 敬人ほか. 第3世代臨界モードPFC制御IC「FA1A00シリーズ」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.263-267.
- (16) Bjoerk, F. et al. “2nd generation 600V SiC Schottky diodes use merged pn/Schottky structure for

surge overload protection”. Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.

(17) 橋爪悠一ほか. 第2世代SiC-SBD. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.262-264.

(18) Fujihira, T. “Theory of Semiconductor Superjunction Devices”, Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) p.254.



井川 修

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



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。



宮坂 忠志

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部長。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。