

# 富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2020  
Vol.93 No.



特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



## 特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

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、企業活動全体で SDGs を推進し、サプライチェーンを視野に入れて、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ます。この取組みを通じて、国際社会が目指す経済・社会・環境の統合的向上に応え、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献しています。

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機器、これを動かす上で重要な役割を担うパワー半導体デバイスの性能向上は低炭素化社会の実現にはとても重要です。本特集では、富士電機のパワー半導体デバイスについて、最新の技術および製品を紹介します。

### 表紙写真

- ①第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM「P644」、②ディスプレイスクリーン IGBT「XSシリーズ」TO-247-4 パッケージ、③ xEV 向け IGBT モジュール



# 目次

## 特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

〔特集に寄せて〕 微分方程式から偏微分方程式の世界へ 小笠原 悟司	201 (3)
〔現状と展望〕 パワー半導体の現状と展望 大西 泰彦 ・ 宮坂 忠志 ・ 井川 修	202 (4)
xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上 原 康文 ・ 吉田 崇一 ・ 井上 大輔	210 (12)
xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術 玉井 雄大 ・ 小山 貴裕 ・ 井上 大輔	214 (16)
車載用第 5 世代 IPS 「F5202H」 岩田 英樹 ・ 豊田 善昭 ・ 中村 賢平	219 (21)
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 掛布 光泰 ・ 山野 彰生 ・ 平田 朋也	224 (26)
第 2 世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大 高崎 愛子 ・ 奥村 啓樹 ・ 丸山 力宏	229 (31)
小型パッケージ 「P644」 を採用した 第 7 世代 「X シリーズ」 IGBT-IPM 寺島 健史 ・ 及木 達矢 ・ 大瀬 智文	234 (36)
ディスクリート IGBT 「XS シリーズ」 の系列拡大 原 幸仁 ・ 前田 涼 ・ 坂井 琢磨	239 (41)
第 4 世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B00N」 日朝 信行 ・ 遠藤 勇太 ・ 矢口 幸宏	243 (45)
1.2 kV SiC スーパージャンクション MOSFET 俵 武志 ・ 馬場 正和 ・ 竹中 研介	249 (51)
<b>解 説</b>	
上アームと下アーム	255 (57)
<b>新製品紹介論文</b>	
シンチレーション式中性子サーベイメータ 「NSN4」	256 (58)
東海旅客鉄道株式会社向け N700S 新幹線電車用電機品	259 (61)
第 2 世代 SiC-SBD	262 (64)
こんなところに富士電機	265 (67)
略語・商標	266 (68)
富士電機技報 vol.93 2020 年 総目次	

## Power Semiconductors Contributing to Energy Management

<b>[Preface] Change from Differential Equation to the World of Partial Differential Equation</b> OGASAWARA, Satoshi	201 (3)
<b>Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook</b> ONISHI, Yasuhiko MIYASAKA, Tadashi IKAWA, Osamu	202 (4)
<b>Enhanced Over-Current Capability of IGBT Modules for xEVs</b> HARA, Yasufumi YOSHIDA, Soichi INOUE, Daisuke	210 (12)
<b>Direct Water Cooling Technology for Power Semiconductor Modules for xEVs</b> TAMAI, Yuta KOYAMA, Takahiro INOUE, Daisuke	214 (16)
<b>“F5202H” 5th-Generation Intelligent Power Switch for Automotive Applications</b> IWATA, Hideki TOYODA, Yoshiaki NAKAMURA, Kenpei	219 (21)
<b>7th-Generation “X Series” 1,200-V / 2,400-A RC-IGBT Modules for Industrial Applications</b> KAKEFU, Mitsuhiro YAMANO, Akio HIRATA, Tomoya	224 (26)
<b>1,200-V 2nd-Generation All-SiC Modules</b> TAKASAKI, Aiko OKUMURA, Keiji MARUYAMA, Rikihiro	229 (31)
<b>7th-Generation “X Series” IGBT-IPM with “P644” Compact Package</b> TERASHIMA, Kenshi OYOBIKI, Tatsuya OSE, Tomofumi	234 (36)
<b>“XS Series” Discrete IGBTs Line-up Expansion</b> HARA, Yukihito MAETA, Ryo SAKAI, Takuma	239 (41)
<b>“FA1B00N” 4th-Generation Critical Conduction Mode Power Factor Correction Control IC</b> HIASA, Nobuyuki ENDO, Yuta YAGUCHI, Yukihiro	243 (45)
<b>1.2 kV SiC Super Junction MOSFET</b> TAWARA, Takeshi BABA, Masakazu TAKENAKA, Kensuke	249 (51)
<b>Supplemental Explanation</b>	
Upper arm and lower arm	225 (57)
<b>New Products</b>	
“NSN4” Scintillation Based Neutron Survey Meter	256 (58)
Electrical Equipment for the N700S Shinkansen Rolling Stock of Central Japan Railway Company	259 (61)
2nd-Generation SiC-SBD	262 (64)
<b>Fe-Products Found in Society</b>	265 (67)
<b>Abbreviations and Trademarks</b>	266 (68)
<b>Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOURNAL vol.93, 2020</b>	

特集に寄せて

## 微分方程式から偏微分方程式の世界へ

Change from Differential Equation to the World of Partial  
Differential Equation

小笠原 悟司 OGASAWARA, Satoshi

北海道大学 大学院情報科学研究院 教授



パワーエレクトロニクスの歴史は、放電現象を用いた水銀整流器の時代から、半導体化された SCR (Silicon Controlled Rectifier) またはサイリスタ、自己消弧能力を有するパワートランジスタ、パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、GTO サイリスタ (Gate Turn-Off Thyristor)、現在広く使用されている IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) へと、パワーデバイスの主役が代わるにつれて大きく発展してきた。さらに近年は、SiC (炭化けい素) や GaN (窒化ガリウム) などのワイドバンドギャップ半導体を用いたパワー半導体デバイスの普及が進もうとしており、ますます大きな発展を遂げようとしている。パワーエレクトロニクス技術は、パワーデバイスのスイッチング動作に基づき、電力の形態 (電圧、電流、周波数など) を変換・制御する電力変換器を基本としており、これが一般産業、電力、鉄道などの分野に応用されているだけでなく、現在では自動車、家電、住宅など社会の隅々にまでその応用範囲が広がっており、今や社会の基盤技術と言っても過言ではない。

パワーエレクトロニクス機器において、パワーデバイスをスイッチとして利用するという原理は、創成期から現在まで全く変わってはいない。しかし、パワーデバイスの発展の歴史とともに、オン状態の電圧降下の低減による導通損失の低減と、スイッチング速度の高速化によるスイッチング損失の低減が、絶え間なく進められてきた。特にスイッチング時間は  $\mu\text{s}$  オーダから  $\text{ns}$  オーダへと大幅に高速化され、利用可能なスイッチング周波数は電源周波数から MHz オーダへと高周波化されようとしている。スイッチング周波数の高周波化により、インダクタ、トランス、キャパシタなどの受動部品の小型化が実現できることから、パワーエレクトロニクス機器はますます小型化、軽量化、高効率化の方向に向かっている。損失密度の観点からは、パワーエレクトロニクス機器の高効率化と冷却技術は、小型化と同時に達成すべき重要な課題である。冷却技術を考える上では、熱抵抗回路だけでなく“熱伝導の方程式”を用いた温度分布の検討も必要であるし、流体力学の素養も必要である。

一方、これまでほとんど無視されていた配線インダクタンスや浮遊容量は、スイッチング速度の高速化によりデバイスのスイッチング特性やスイッチング損失に対して大きな影響を及ぼすようになってきている。これらのパラメータは、主回路の実装技術に大きく依存しており、機器の小型化すなわち部品の近接化は浮遊容量を増加させる要因にもなっている。したがって、パワーエレクトロニクス機器の設計においては、電気回路的な素養だけでなく、電界、磁界、電磁誘導などの電磁気学的な素養も必要になってきている。また、スイッチング周波数の高周波化は電磁妨害の高周波化、広帯域化の原因にもなっており、100 MHz オーダの周波数帯域にまで影響を与える可能性がある。例えば、300 MHz の電磁波の波長は 1 m で、その大きさから考えるとパワーエレクトロニクス機器や配線はアンテナと考えなければならず、電磁界の素養も必要になっている。さらに、機器の振動・騒音を考えるためには力学場や音場に対する素養が必要である。

パワーエレクトロニクス技術の発展により、従来用いていた電気回路、磁気回路、力学回路、熱回路などの集中定数的なモデルのみでは現象を表すことができなくなっており、電磁場 (静電場、静磁場、電磁誘導を含む)、力学場、熱と温度の場のような分布定数的あるいは空間的なモデルを用いて現象を表さなければならなくなっている。これら全てを習得することは、一見大変なことに感じるかもしれない。しかし、前者の集中定数モデルはいずれも微分方程式で表され、後者の分布定数モデルはいずれも偏微分方程式で表されていることに注意が必要である。すなわち、異なる物理系の現象であっても同じ形の微分方程式あるいは偏微分方程式で表される現象であれば、物理量を入れ替えるだけで同様の特性を有していることになり、他分野の理解がより容易にできるはずであるからである。これからの技術者は、単なる電気回路屋からマルチフィジックスへ、微分方程式から偏微分方程式の世界へ踏み出して、パワーエレクトロニクス技術をさらに発展させていきたいと願っている。さらに、IT や AI 技術とも融合してエネルギーマネジメントに貢献する社会の基盤技術として、パワーエレクトロニクス技術が活躍し続けることを願っている。

## 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<sup>(\*)1</sup> (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ット IGBT<sup>(\*)2)</sup> <sup>(\*)3)</sup>

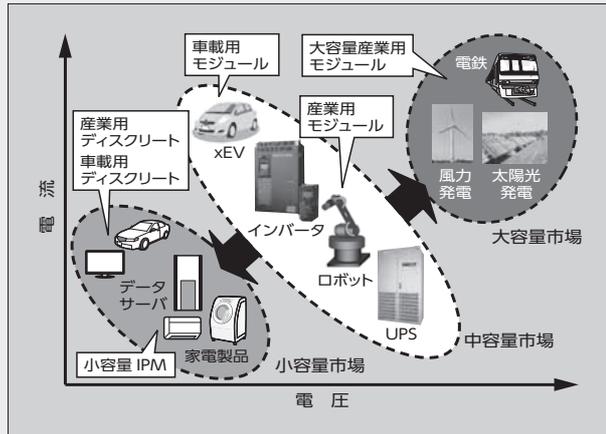


図 1 富士電機のパワー半導体の製品応用例

(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) ディスクリット

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・低オン抵抗を両立で

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ナイタを開発し、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<sup>(※5)</sup> (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 (I<sup>2</sup>t 耐量)<sup>(※6)</sup> 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<sup>(1)</sup> を採用し、I<sup>2</sup>t 耐量を向上させた xEV 向け IGBT モジュールを開発した (図 2)。

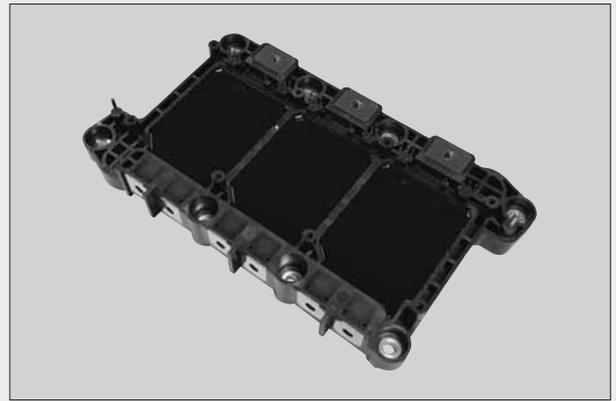


図 2 xEV 向けモジュール (開発品)

RC-IGBT では IGBT 領域と FWD<sup>(※7)</sup> (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<sup>2</sup>t 耐量が向上する。

また、I<sup>2</sup>t 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<sup>2</sup>t 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<sup>2</sup>t 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。

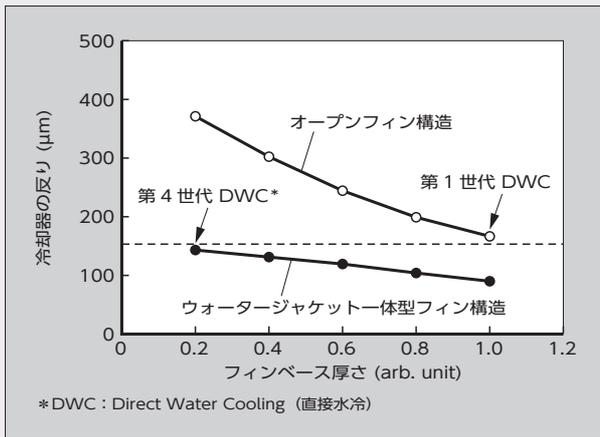


図3 要素モデルを使った冷却器反りのフィンベース厚さ依存性

直接水冷パワーモジュールを開発し、提供してきた<sup>(3)(4)</sup>。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、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したウォータージャケット一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。ウォータージャケット一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150μm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、ウォータージャケット一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・高放熱性に貢献する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-

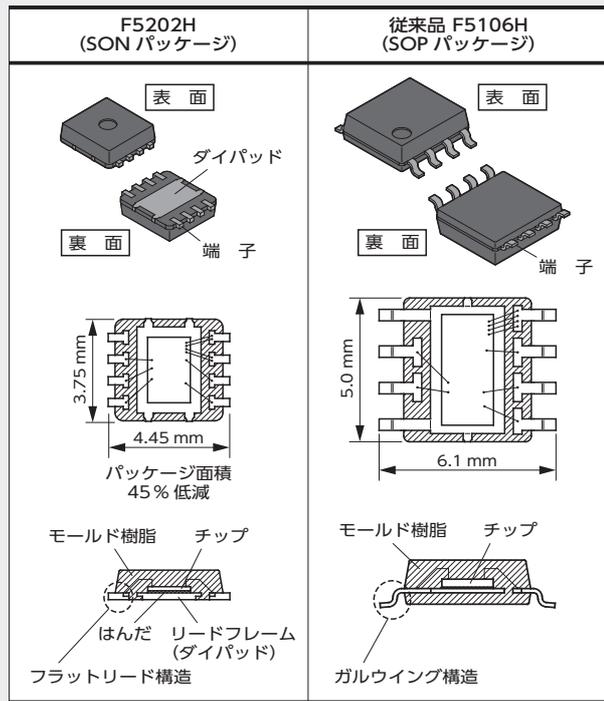


図4 パッケージの外観と内部構造の比較

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℃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<sup>(6)</sup>。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

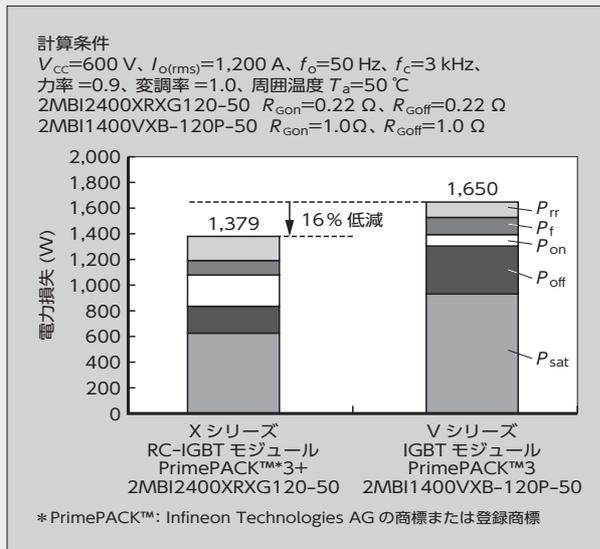


図5 「Xシリーズ」「Vシリーズ」発生損失の比較

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™<sup>(注)</sup>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、高耐熱シリコーンゲルの採用により、連続動作時の最大接合温度を 175 °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<sup>(8)</sup>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

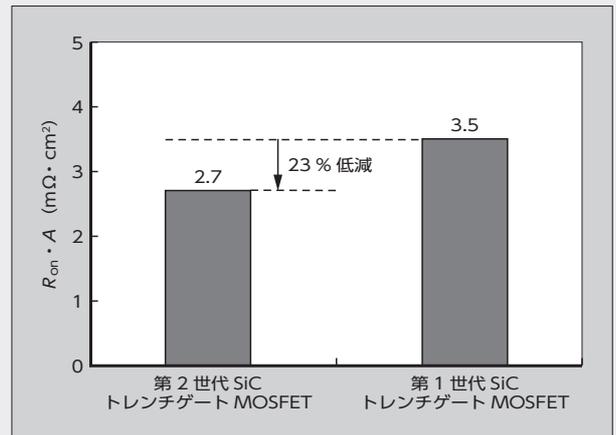


図6 第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET と第 1 世代 SiC トレンチゲート MOSFET の  $R_{on} \cdot A$  比較

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 × 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 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

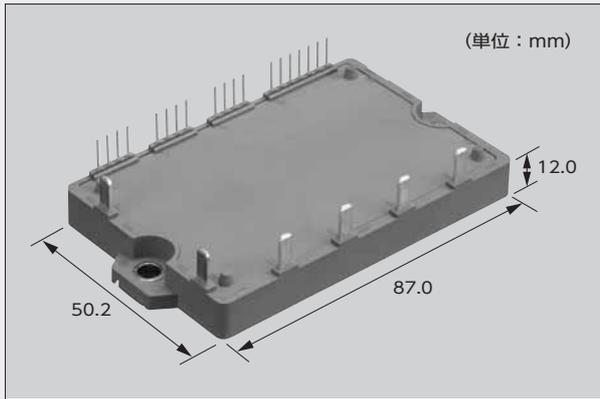


図7 「Xシリーズ」IPM「P644」の製品外観

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 $T_{jop}$ の最高温度をVシリーズIPMの125°Cから150°C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

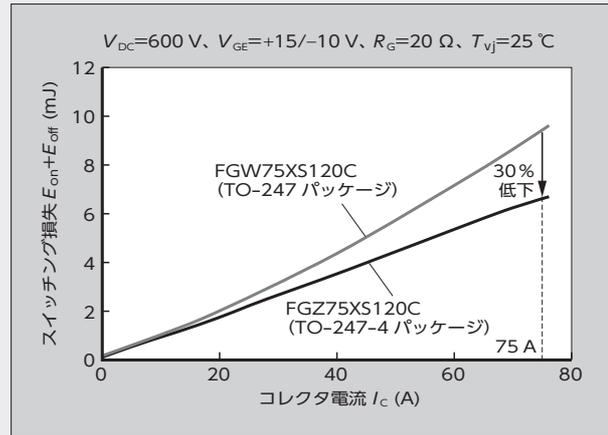


図8 TO-247-4パッケージ品とTO-247パッケージ品のスイッチング損失比較 ( $I_c$  依存性)

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 <sub>CC</sub> 電圧過電圧保護	あり	なし
V <sub>fb</sub> 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、起動時のオーバシュート低減機能<sup>(6)</sup>、PFC出力電圧低下抑制機能およびV<sub>CC</sub>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<sub>fb</sub>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<sup>(\*)</sup>(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、

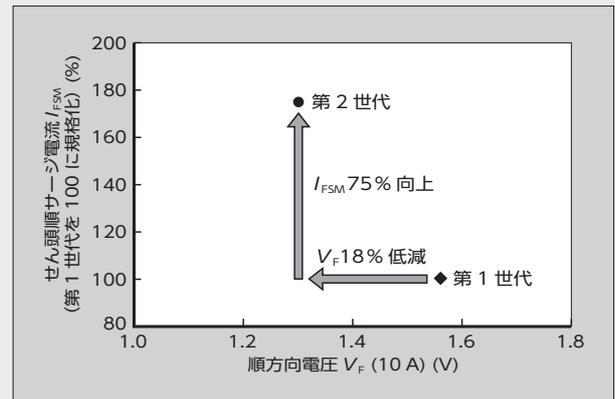


図9 650V耐圧SiC-SBD第1世代と第2世代のV<sub>F</sub>-I<sub>FSM</sub>特性

ショットキー接合の最適化によるV<sub>F</sub>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<sub>F</sub>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<sub>F</sub>-順サージ耐量I<sub>FSM</sub>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<sub>F</sub>(10A)が18%低減するとともに、I<sub>FSM</sub>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プレイスクリーン製品の開発を、2020年度に開始した<sup>(7)</sup>。

### 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<sub>on</sub>・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、SJ構造<sup>(8)</sup>に注目し、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

(\*) 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。

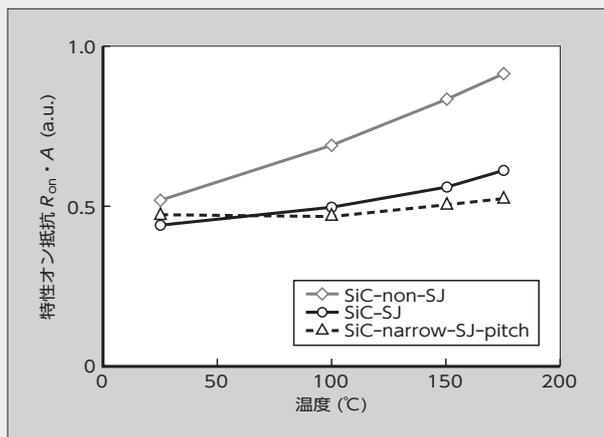


図 10 特性オン抵抗の温度依存性

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 °C 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 °C 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.



**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。



**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。



# xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上

Enhanced Over-Current Capability of IGBT Modules for xEVs

原 康文 HARA, Yasufumi

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

井上 大輔 INOUE, Daisuke

近年、省エネルギー化や CO<sub>2</sub> 排出規制に伴い、世界各国でハイブリッド自動車や電気自動車のような電動化車両への切換えが加速している。電動化車両のインバータに搭載される車載 IGBT は、異常時に発生した過電流に対する耐量 (I<sup>2</sup>t 耐量) の向上が要求される。富士電機は、RC-IGBT を搭載し、さらに RC-IGBT 表面電極の回路への接続をリードフレーム方式として、I<sup>2</sup>t 耐量を向上させた xEV 向け IGBT モジュールを開発した。従来の構造では個別 FWD とワイヤボンディングによる方式を採用していたが、RC-IGBT とリードフレームを組み合わせた構造によって、I<sup>2</sup>t 耐量が 2.6 倍向上した。

In recent years, measures to achieve energy savings and reduce CO<sub>2</sub> emissions have accelerated the switchover to xEVs, such as hybrid vehicles and electric vehicles, throughout the world. The IGBTs used in the inverters of xEVs are being required to enhance their capability to withstand over current (I<sup>2</sup>t capability) at the time of accident. Fuji Electric has developed IGBT modules for xEVs that use RC-IGBTs and a lead frame to connect to the circuit of RC-IGBT surface electrodes, improving I<sup>2</sup>t capability. The I<sup>2</sup>t capability is 2.6 times higher for the new structure combining RC-IGBTs with a lead frame than for the conventional method using discrete FWDs and wire bonding.

## ① まえがき

近年、省エネルギー化や CO<sub>2</sub> 排出規制に伴い、世界各国でハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) や電気自動車 (EV: Electric Vehicle) などの電動化車両 (xEV) への切換えが加速している。HEV や EV には電気モータを駆動するために搭載されるインバータとともに、その構成部品である xEV 向け IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの需要が高まっている。この xEV 向け IGBT モジュールは車両の小型化、高効率化、高信頼性を実現する上でのキーデバイスである。

富士電機は、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) を 1 チップ化した RC-IGBT (逆導通 IGBT: Reverse-Conducting IGBT) を搭載し、さらに RC-IGBT の表面電極の回路への接続を従来のワイヤボンディング方式に替わるリードフレーム (LF) 方式を適用し、過電流耐量 (I<sup>2</sup>t

耐量) を向上させた xEV 向け IGBT モジュール (図 1) を開発したので、その内容について述べる。

## ② I<sup>2</sup>t 耐量

### 2.1 I<sup>2</sup>t 耐量の向上の必要性

車両に搭載されたインバータ装置では、過電流や過電圧などで異常が発生した場合に、減速して停止する処理が実行される。その際、モータの逆起電力による平滑コンデンサの破壊を防止するため、アクティブショートサーキット (ASC: Active Short Circuit) 制御が働き、上下アームどちらかの IGBT を ON 状態にする場合がある (図 2)。HEV や EV の効率を改善するため、バッテリーが高電圧化する傾向にある。それに伴い、モータの駆動電圧が高電圧化し、ASC 制御の動作時にパワーモジュール内の半導体チップに瞬間的に流れる過電流が増加する。この過電流によって発生する熱に対する IGBT モジュールの FWD チップの I<sup>2</sup>t 耐量の向上が課題となっている<sup>(1)</sup>。

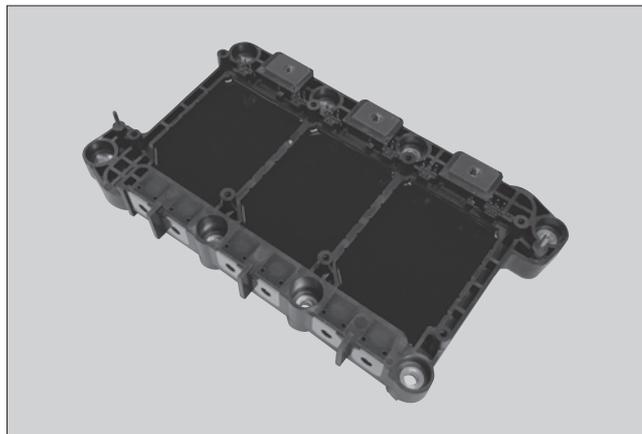


図 1 xEV 向けモジュール (開発品)

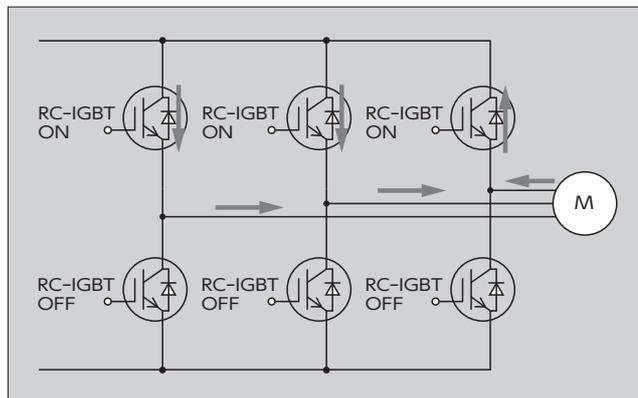


図 2 アクティブショートサーキット (ASC) 時の電流経路例

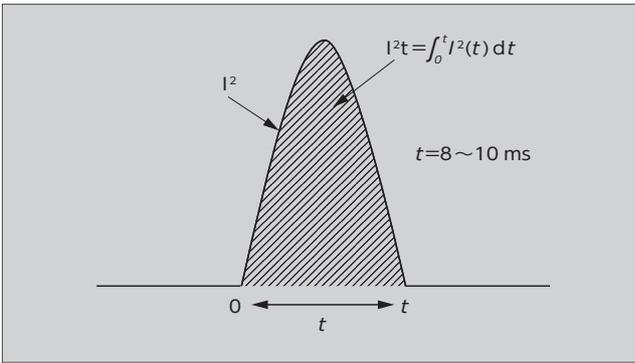


図3 I<sup>2</sup>t を定義する電流波形

### 2.2 I<sup>2</sup>t 耐量の定義と耐量を決める要因

I<sup>2</sup>t 耐量とは、式(1)で示すように、通電時の電流と電圧によって発生するジュール熱に関わる時間幅 8 ~ 10 ms の正弦半波の 1 サイクルで素子が破壊する耐量と定義され、図3に示すように電流の 2 乗を時間に対して積分した値である。

$$E = \int_0^t IV dt = \int_0^t I \cdot IR dt \propto \int_0^t I^2 dt \dots\dots\dots(1)$$

I<sup>2</sup>t 耐量は、チップ自体の発熱だけでなく表面電極や回路への接続部の発熱や放熱特性に依存する。そのため、I<sup>2</sup>t 耐量を向上するためには、放熱性の向上が必要である。

### ③ RC-IGBT 適用による放熱性の向上

従来の IGBT と FWD の個別チップの組合せ (IGBT+FWD チップ構成) と RC-IGBT の断面模式図を図4に示す。従来のモジュールでは、IGBT チップと FWD チップをそれぞれ配置していた。RC-IGBT は、1 チップ内に IGBT 領域と FWD 領域をストライプ状に配置しているため、搭載面積が減少する。さらに、IGBT と FWD は同時に通電動作することがないので、そ

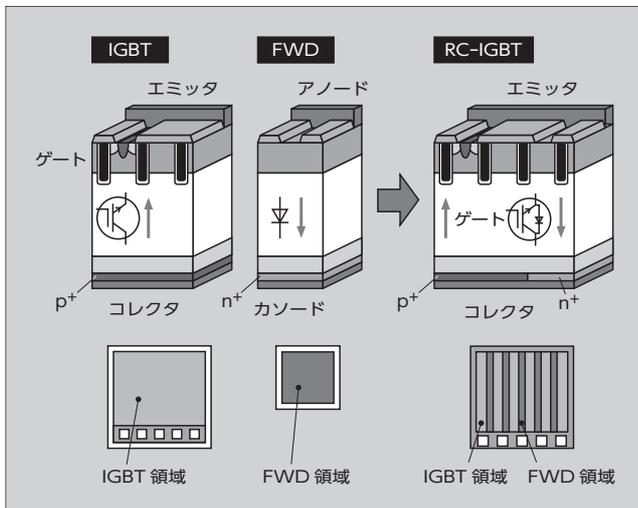


図4 個別チップと RC-IGBT との比較図

れぞれが動作するときにはチップ面全体で放熱できるので熱抵抗が低いという特徴がある。

従来の IGBT+FWD では、FWD チップサイズの面積は IGBT よりも小さい。そのため、FWD チップの熱抵抗が高くなり、I<sup>2</sup>t 耐量が低下する傾向にある。

FWD チップと RC-IGBT チップの I<sup>2</sup>t 耐量を実測した結果を図5に示す。FWD のチップ面積 (活性面積) が大きくなると熱抵抗と電流密度がともに下がるため、I<sup>2</sup>t 耐量が向上している。FWD 領域の活性面積が同じ条件で比較すると、RC-IGBT の I<sup>2</sup>t 耐量は FWD の約 2 倍になることが分かった。この耐量の向上は、上述したチップの熱抵抗の低減に加え、RC-IGBT は FWD よりもワイヤ本数が 20% 多いことによって、放熱性が向上した効果によるものである。

実験結果の妥当性を検証するため、FWD 通電時のシミュレーションを行った結果を図6に示す。本シミュレーションでは、チップ厚さ、ワイヤ本数、FWD 活性面積を同一としている。RC-IGBT チップでは、FWD 部の発熱が IGBT 部分に拡散するため、160℃以上の高温部分は、FWD チップよりも減少していることが分かる。その結果、RC-IGBT は従来の FWD に比べて熱抵抗が低くなり、I<sup>2</sup>t 耐量が向上したと考えられる。

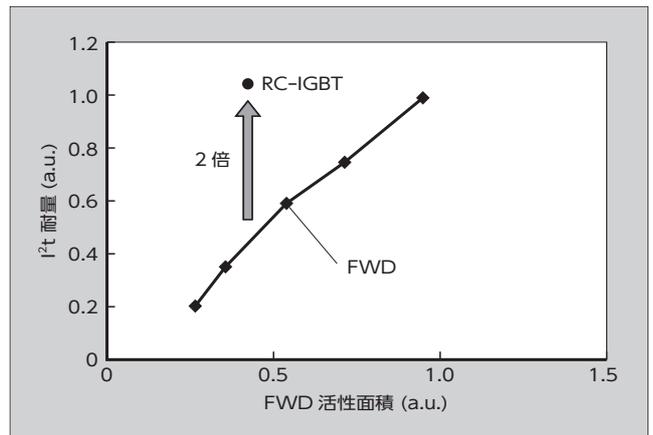


図5 I<sup>2</sup>t 耐量の比較

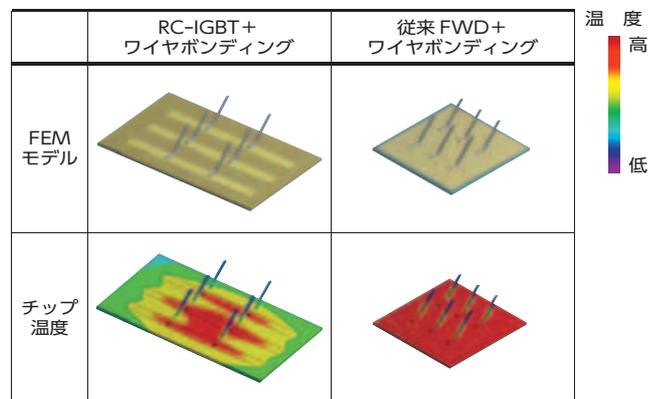


図6 ワイヤボンディング構造の熱シミュレーション

#### ④ リードフレーム方式による放熱性の向上

$I^2t$  耐量に影響を及ぼす放熱条件は、チップと配線の接合面積を増加させることによって向上する。従来のワイヤボンディング方式（図7(b)）では、ワイヤをチップの表面電極に超音波接合している。これに対し、LF方式（図7(a)）では、LFをチップの表面電極にはんだ接合して接合面積を増やして放熱性を向上させている。このことは、図8に示す熱シミュレーションでも確認している。

表1に、LF方式とワイヤボンディング方式の $I^2t$ 耐量の実測結果を示す。同一活性面積で比較すると、LF方式を採用することで $I^2t$ 耐量が0.3から0.4に約30%向上する。

表1  $I^2t$  耐量比較 (LF-ワイヤボンディング)

接続方式	$I^2t$ 耐量 (a.u.)
LF	0.4
ワイヤボンディング	0.3

#### ⑤ 開発品と従来品の $I^2t$ 耐量比較

ワイヤボンディング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倍に向上した。これは、RC-IGBTとLF方式の組み合わせによる放熱性の向上の効果である。

#### ⑥ あとがき

xEV向けIGBTモジュールの過電流耐量の向上について述べた。今回、xEV向けIGBTモジュールにRC-IGBTとLF方式を採用することによって $I^2t$ 耐量が向上した。これにより、インバータ装置のASC制御時の過電流に対して使い勝手がよく、高い信頼性のxEV向けIGBTモジュールを提供することができた。

今後、xEV向けIGBTモジュールとしてさらなる損失の低減、小型化、信頼性の向上に取り組み、インバータ装置の性能向上に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- (1) Nakano, H. et al. "Impact of  $I^2t$  capability of RC-IGBT and Leadframe combined structure in xEV active short circuit survival". Proc. PCIM Europe 20118.
- (2) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド専用RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (3) Otsuki, M. et al. "Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution". ISPSD 2003.

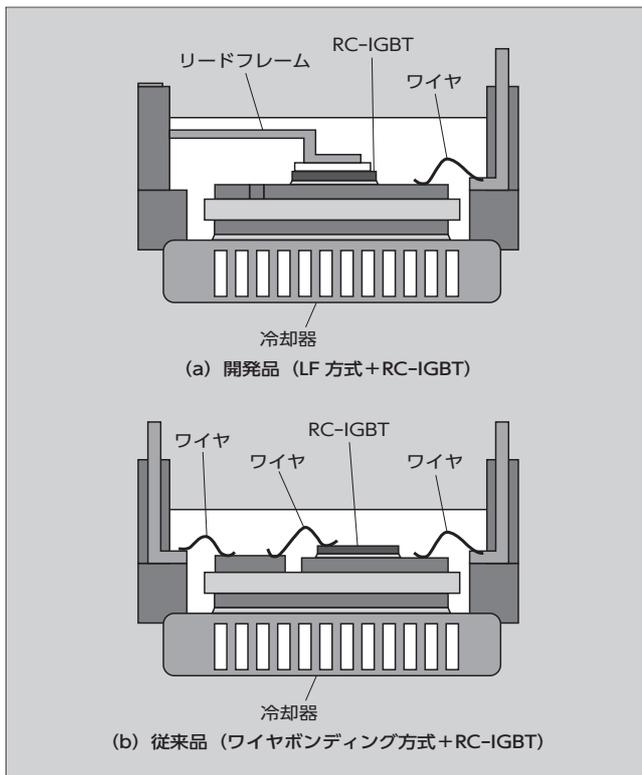


図7 開発品と従来品の構造比較

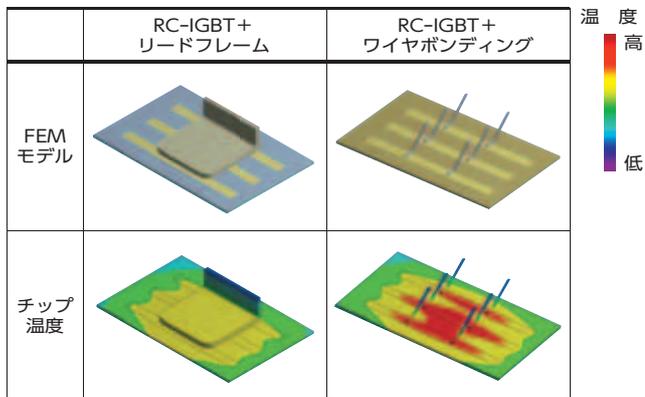


図8 LFとワイヤボンディング構造の熱シミュレーション



原 康文

車載IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部電装モジュール部。



**吉田 崇一**

車載用 IGBT 半導体素子の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部電装モジュール部。



**井上 大輔**

車載用 IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。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パッケージ開発部。



# xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術

Direct Water Cooling Technology for Power Semiconductor Modules for xEVs

玉井 雄大 TAMAI, Yuta

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

井上 大輔 INOUE, Daisuke

自動車産業では、電力を動力源とする電気自動車（EV）やハイブリッド車（HEV）への切替えが加速しており、これらの自動車では小型・薄型、かつ、高い信頼性を持つパワーモジュールが求められている。これに応えるため、富士電機は、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化した直接水冷構造を開発し、世代ごとに冷却性能を改善してきた。この構造によって、従来のオープンフィン構造に対して冷却器の変形を抑制でき、ヒートシンクのベース厚さを20%まで薄型化して放熱性能の向上と、2倍以上の温度サイクル耐量を実現し、信頼性を向上させた。

In the automobile industry, the switchover to electricity-powered electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs) has been accelerating. This has increased the demand for smaller, thinner, and more reliable power modules for xEVs. To meet this demand, Fuji Electric has been developing direct water cooling structures that integrate a heat sink and water jacket. The cooling performance of the structures has improved with each successive generation. Compared with conventional open fin structures, the direct water cooling structure can suppress cooling unit deformation. This characteristics allows the heat sink base to be thinned up to 20% to achieve better heat dissipation performance and increase the temperature cycling capability more than twice, improving overall reliability.

## 1 まえがき

国連サミットで採択された持続可能な開発目標（SDGs：Sustainable Development Goals）の達成に向け、地球温暖化対策のためのCO<sub>2</sub>排出量の削減や省エネルギーが世界各国で求められている。自動車産業ではCASE〔Connected（コネクテッド）、Autonomous（自動化）、Shared（シェアリング）、Electric（電動化）〕をキーワードとした大きな変革期を迎えている。電動化では電力を動力源としてモータで走行する電気自動車（EV）やハイブリッド自動車（HEV）への切替えが加速している。こ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・薄型化、低燃費（電費）を意識した軽量化、効率向上などが求められる。これらの要求に応えるため、モータとインバータに加えて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。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、高信頼性を達成する製品の開発を進めている。

本稿では、xEV向けパワー半導体モジュールのヒートシンクとウォータージャケットを一体化したウォータージャケット一体型フィン構造（Integrated fin）のパワーモジュールの高放熱化、小型・薄型化、および高信頼性技術と、熱流体シミュレーションを行う上で重要な流れの可視化技術について述べる。

## 2 富士電機の車載用直接水冷パワーモジュールのトレンドと特徴

図1に富士電機の車載用直接水冷パワーモジュールの電力密度のトレンドを示す。これまで富士電機は、軽量かつ

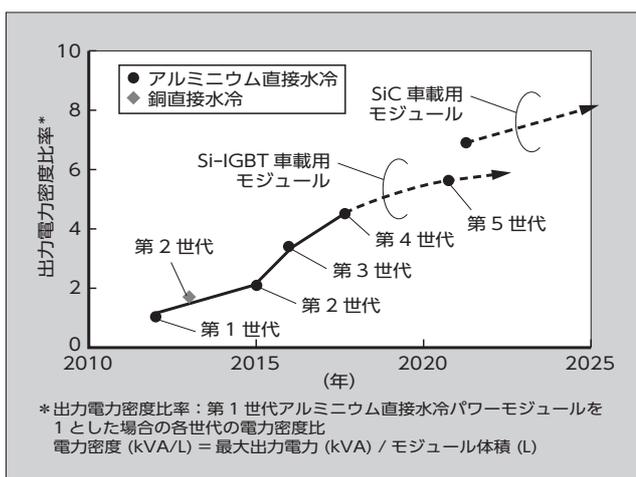


図1 車載用直接水冷パワーモジュールの電力密度トレンド

加工性に優れたアルミニウム製冷却器を備えた直接水冷パワーモジュールを開発してきた。第1世代（2012年）、第2世代（2015年）、第3世代（2017年）、第4世代（2019年）と世代ごとに電力密度が約20%向上している<sup>(1)</sup>。主な適用技術を次に示す。

- 高放熱冷却器設計技術<sup>(1)(2)(3)</sup>
- 高信頼性はんだ技術<sup>(1)</sup>
- 超音波接合技術<sup>(2)(3)</sup>
- 175°C連続動作保証技術<sup>(2)(3)</sup>
- 半導体素子（チップ）であるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とFWD（Free Wheeling Diode）をワンチップ化したRC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）<sup>(4)</sup>
- リードフレーム配線技術<sup>(5)</sup>

前述の(a)高放熱冷却器設計技術では、図2に示すウォータージャケット一体型フィン構造を開発し、第2世代か

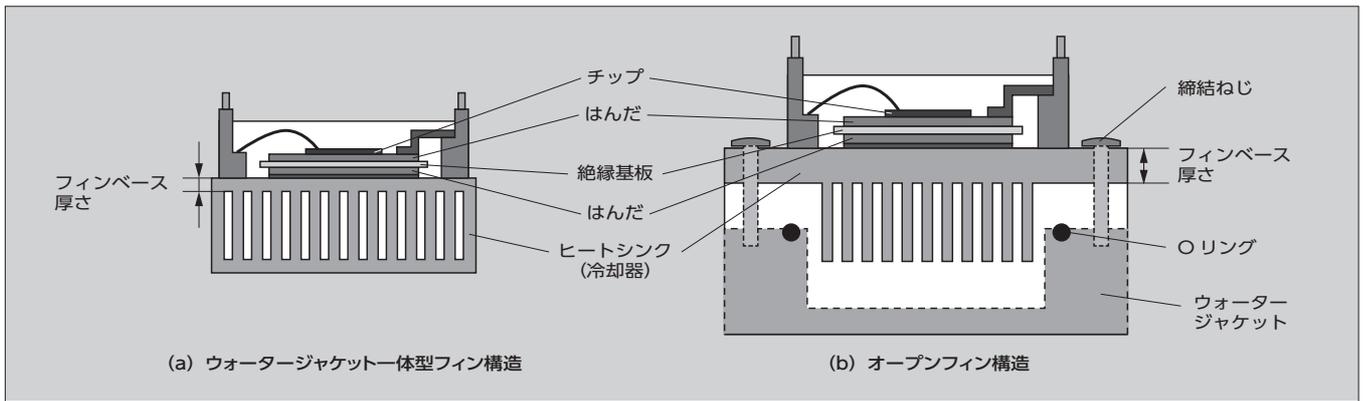


図2 ウォータージャケット一体型フィン構造およびオープンフィン構造の断面図

ら採用し冷却器の冷却性能（放熱性）を向上させてきた。この構造は、一体化していないオープンフィン構造（Open fin）に比べ冷却器の変形を抑制でき、ヒートシンクのベース厚さ（フィンベース厚さ）を20%まで薄型化して冷却性能が向上しているだけでなく、2倍以上の温度サイクル耐量も持っている。

### ③ ウォータージャケット一体型構造フィンによる高放熱化

#### 3.1 高放熱化の課題

パワーモジュールの放熱性の向上には、冷却器のフィン表面に流れる冷媒の流速を増やすとよい。しかし、図3に示すように放熱性を示す特性である熱抵抗と、冷却器の圧力損失はトレードオフの関係にあり、流速を増やすと圧力損失が大きくなり循環ポンプの負荷が増える。そこで、世代ごとにフィン形状を見直し、このトレードオフを改善<sup>(6)</sup>して放熱性を向上させてきた。圧力損失が大きくなるように、フィン高さを調整する方法がある。しかし、図4の冷却器の断面図から明らかなように、フィンが高くすると冷却器の体積が増えてしまう。そこで、高パワー密度化するには、顧客が許容できる圧力損失や体積の範囲内で高放熱化と高信頼化を両立する必要がある。

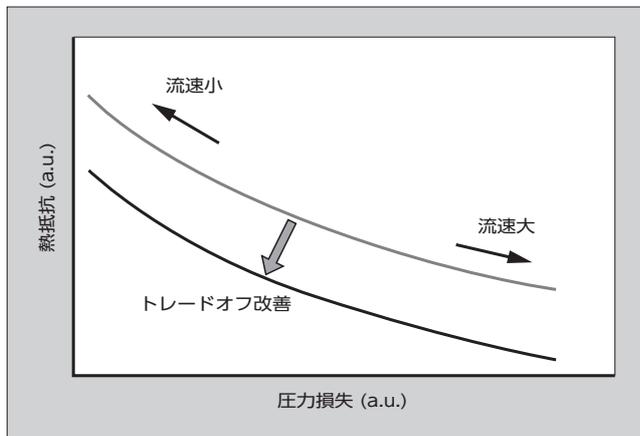


図3 熱抵抗と圧力損失の関係

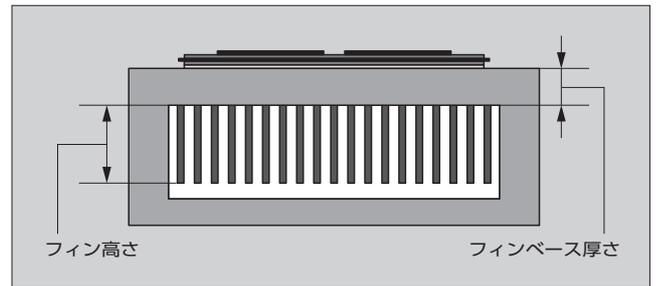


図4 冷却器の断面図

#### 3.2 放熱性の向上

第1世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗を成分ごとに分解して調べた結果を図5に示す。冷却器のフィンベースの熱抵抗が全体の36%を占めており、放熱性能を阻害していた。フィンベースの厚さを20%まで薄くした構造にすればモジュールの熱抵抗を改善できる。しかし、モジュールの熱変形を抑制するには、冷却器の剛性を確保することも必要であった。これまでは、フィンベースに厚さを持たせて剛性を確保していた。

そこで、熱抵抗の改善と熱変形の抑制を両立するため、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したウォータージャケット一体型フィン構造を開発した。図6にオープンフィン構造の第1世代直接水冷（DWC：Direct Water Cooling）パワーモジュールと、ウォータージャ

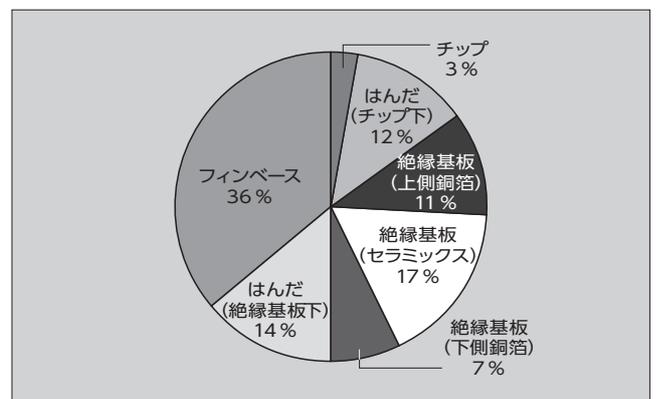


図5 第1世代直接水冷構造の熱抵抗比

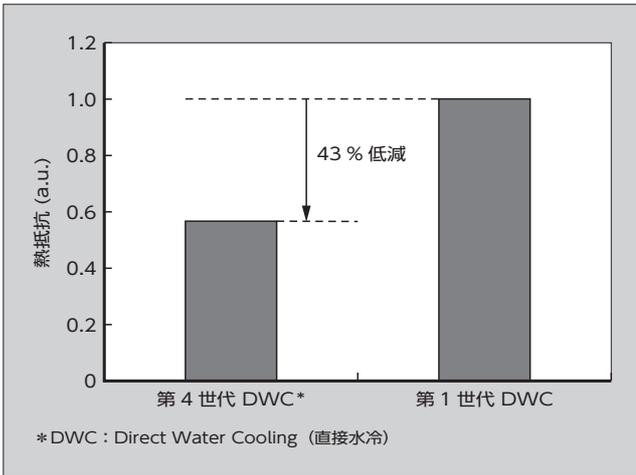


図6 第1世代および第4世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗比較

ケット一体型フィン構造の第4世代直接水冷パワーモジュールの熱抵抗の比較を示す。第4世代直接水冷パワーモジュールは、ウォータージャケットを一体化することによって冷却器全体の剛性を高め、オープンフィンに比べてフィンベースの厚さを薄型化した。さらに、フィン形状の最適化やはんだを薄くするなど、熱抵抗を低減する施策により、第1世代に比べ熱抵抗を43%低減した。

#### ④ ウォータージャケット一体型フィン構造による高信頼性化

##### 4.1 冷却器の熱応力による反りの低減

パワーモジュールには、高い放熱性能に加えて高い信頼性が必要である。オープンフィン構造およびウォータージャケット一体型フィン構造の要素モデルを用いて、熱応力シミュレーション(図7)によって求めた冷却器の反りのフィンベース厚さ依存性を図8に示す。

冷却器のシール性やインバータへの搭載しやすさから冷却器の反りは小さいほど良く、約150 $\mu\text{m}$ 以下になるように設計している。図8に示すように、ウォータージャケット一体型フィン構造は、剛性を高めた構造としたことで、反りを150 $\mu\text{m}$ 以下に抑えることができる。

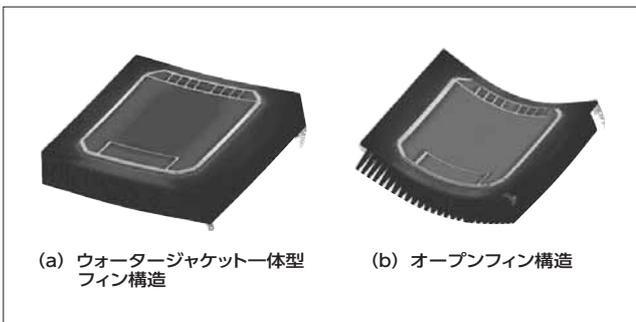


図7 ウォータージャケット一体型フィンおよびオープンフィン構造の要素モデルの熱応力シミュレーション

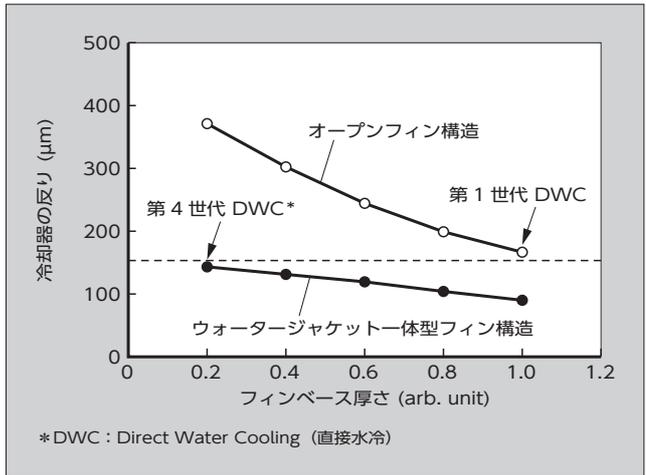


図8 要素モデルを使った冷却器反りのフィンベース厚さ依存性

##### 4.2 温度サイクル耐量の向上

温度サイクルでは、冷却器と絶縁基板の熱膨張係数の差によってはんだ接合部にひずみが繰り返し発生し、はんだにき裂が進展することで熱抵抗が悪化してパワーモジュールの故障に至る。故障が生じるまでの温度サイクルを温度サイクル耐量として図9に示す。ウォータージャケット一体型フィン構造の温度サイクル耐量は、フィンベースの厚さの影響が小さい。それに対し、オープンフィン構造は、フィンベースの厚さに大きく依存する。オープンフィン構造でフィンベースが薄い場合(0.2 arb. unit)は、絶縁基板の熱変形に冷却器が追従することで、はんだに発生するひずみが小さくなり温度サイクル耐量が高くなっているが、前述したように、反りが大きく実用に適さない。図9において、冷却器の反りが約150 $\mu\text{m}$ だった第1世代と第4世代の要素モデルの温度サイクル耐量を比較すると、ウォータージャケット一体型フィン構造(フィンベース厚さ0.2 a.u.)はオープンフィン構造(フィンベース厚さ1.0 a.u.)に比べて2倍以上の温度サイクル耐量を持つ。

以上の結果から、フィンベースの薄型化と信頼性の向上

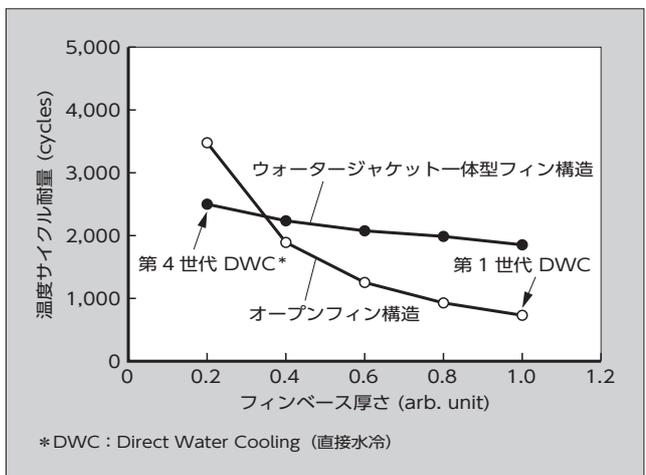


図9 要素モデルを使った温度サイクル耐量のフィンベース厚さ依存性

を両立するには、ウォータージャケット一体型フィン構造が適していることが分かる。第4世代直接水冷モジュールは第1世代に比べて、フィンベースの厚さを20%にし、冷却器全体の高さも1/2（50%減）に削減することができる。

#### 4.3 パワーモジュールの信頼性向上

第1世代および第4世代の直接水冷パワーモジュールの温度サイクル耐量の評価結果を図10に示す。第4世代直接水冷モジュールは、ウォータージャケット一体型フィン構造を採用したことで、1.4倍の温度サイクル耐量を得た。さらに、パワーモジュールの温度サイクル耐量を向上する施策の一つに、はんだ材料の高強度化がある。富士電機は、Sb含有量を最適化して高強度Sn-Sbはんだを開発してきた<sup>(8)(9)</sup>。第4世代の直接水冷パワーモジュールに高強度はんだを適用することで、今後、信頼性をさらに高めていくことも可能である。

温度サイクル評価後のパワーモジュールのはんだ接合部破壊形態を図11に示す。この破壊形態は1世代と同様に基板とはんだ界面にき裂が進展している。このき裂進展による熱抵抗の悪化が製品の温度サイクル耐量を決めるため、はんだ材料の疲労寿命曲線に基づいた信頼性設計を行う。

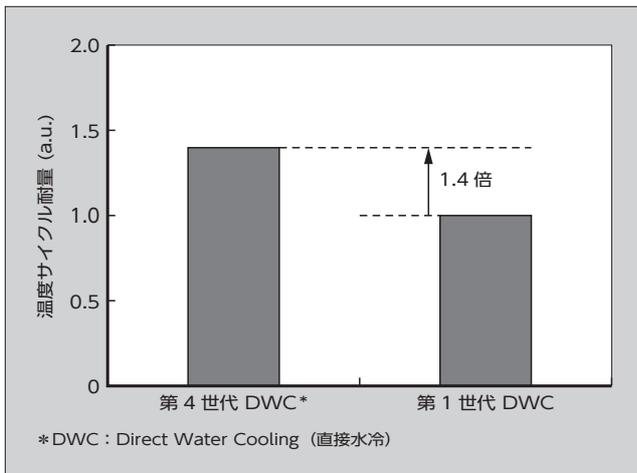


図10 パワーモジュールの温度サイクル耐量

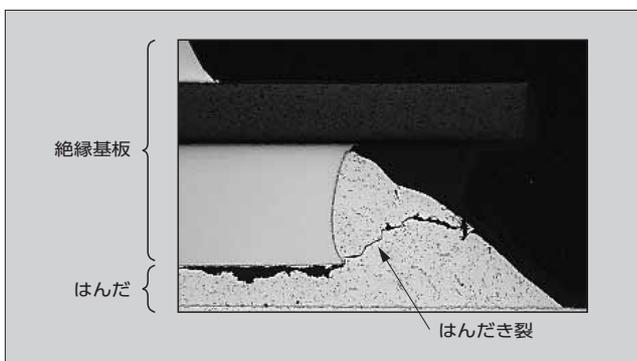


図11 温度サイクル試験後の絶縁基板下はんだ接合部破壊形態

#### 5 冷却器設計の可視化技術

冷却器を設計する上で、熱流体シミュレーションの解析精度と実際の流れを可視化することは重要である。図12に、熱流体シミュレーションによる冷却器流路内の流速分布の計算結果を示す。熱流体シミュレーションで求めた冷却器流路内の流速分布が意図したとおり再現できているかを検証するために、冷媒に粒子を分散させて透明な冷却器に流し、粒子画像流速測定法（PIV：Particle Image Velocimetry）により冷媒の流速分布を可視化した。図13に、冷却器流路内の粒子の動きを測定した結果を示す。この測定結果を基に、図14に示すように冷却器流路内の流

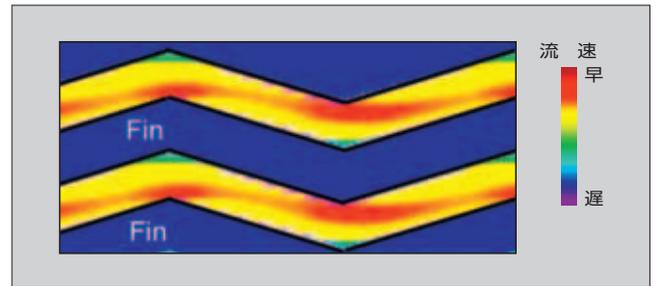


図12 熱流体シミュレーションによる冷却器流路内の流速分布の計算結果

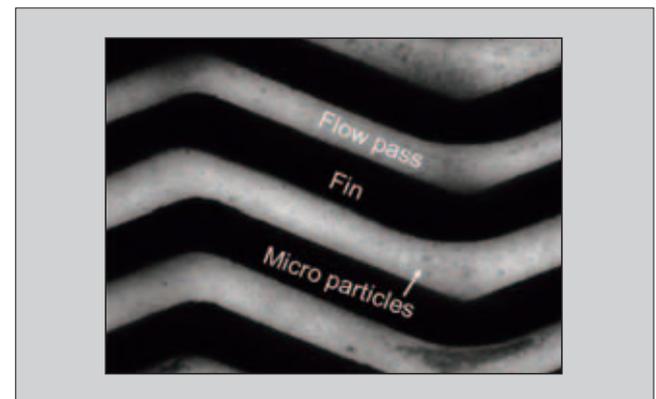


図13 PIVによる冷却器流路内の粒子の動き測定

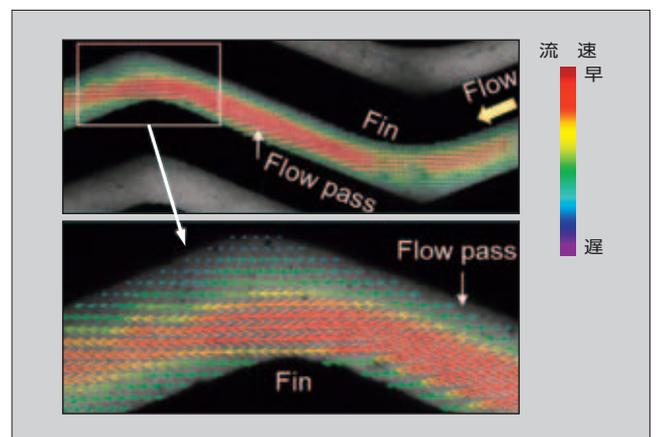


図14 冷却器流路内の流速分布の評価結果

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

速分布を求めた。その結果、波フィンの屈折部で速くなっていて意図したとおりの流れを再現しており、図 12 の熱流体シミュレーションと整合することを確認した。熱流体シミュレーションと可視化技術を組み合わせ、実際の流れを再現するためシミュレーションモデルのメッシュサイズなどを最適化した。これにより、熱抵抗の誤差が 5% 未満となる解析精度が得られるようになり、冷却性能の向上と限界設計が可能になった。

## 6 あとがき

本稿では、xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術について述べた。

今後も、これらの技術を基に継続的な技術開発を推進し、お客様の要求を満足する製品をタイムリーに提供することで、地球温暖化対策のための CO<sub>2</sub> 排出量の削減や持続可能な省エネルギー化社会の実現に貢献する所存である。

## 参考文献

- (1) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (2) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第2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. 2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (3) 郷原広道ほか. 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.
- (4) 佐藤憲一郎ほか. 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. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.
- (5) 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.
- (6) 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, 1187-1194.

- (7) Saito, T. et al. "Investigation of New Joint Technology for High Temperature Operation and High Reliability of Power Module". Proceedings of the 20th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics. Yokohama, 2014.
- (8) Nishiura, A. et al. "Improved life of IGBT module suitable for electric propulsion system". Proceedings of the 24th EVS, Stavanger, 2009.
- (9) Saito, T. et al. "New assembly technologies for Tjmax=175°C continuous operation guaranty of IGBT module". Proceedings of PCIM Europe 2013, 455-461.
- (10) McKenna, S.P.; McGlillis, W.R. "Performance of digital image velocimetry processing techniques". Exp. Fluids, 32 (2002), 106-115.
- (11) The Visualization Society of Japan. "PIV Handbook". print 2002.



**玉井 雄大**

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発・設計に従事。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パッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



**小山 貴裕**

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発・設計に従事。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パッケージ開発部。



**井上 大輔**

車載用 IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。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パッケージ開発部。



# 車載用第 5 世代 IPS 「F5202H」

“F5202H” 5th-Generation Intelligent Power Switch for Automotive Applications

岩田 英樹 IWATA, Hideki

豊田 善昭 TOYODA, Yoshiaki

中村 賢平 NAKAMURA, Kenpei

近年、自動車の電動化による電子制御システムの大規模化に伴い、各部品への小型・高放熱化が継続的に求められている。この要求に応えるため、富士電機は車載用第 5 世代 IPS 「F5202H」を開発した。負荷電流を高精度に検出するオペアンプを搭載しており、三重拡散構造デバイスの適用により、基本機能を維持したままチップサイズの従来比 45% 削減を実現した。また、小型・高放熱化に寄与する SON パッケージの採用により、パッケージ面積の 45% 削減、熱抵抗の 80% 低減を実現した。エンジンルーム内の過酷な環境下への搭載を想定し、車載向け集積回路 (IC) の信頼性規格 AEC-Q100 に準拠している。

As automobiles have been electrified, their electronic control system is becoming large scale. This has increased the demand for miniaturization and high heat dissipation in system components. It is against this backdrop that Fuji Electric developed the “F5202H” 5th-generation intelligent power switch (IPS) for automotive applications. The F5202H comes with an operational amplifier that detects load currents with high accuracy, and utilizes a device with a triple-diffused structure. As a result, it has reduced a chip size by 45%, while maintaining the same basic functions. Furthermore, it uses a small outline non-leaded (SON) package to contribute to miniaturization and high heat dissipation, reducing the package size by 45% and thermal resistance by 80%. The F5202H is designed to be used in the harsh environments of engine compartments and complies with the AEC-Q100 reliability standard for automotive electronic components.

## 1 まえがき

現在、自動車は電動化・自動化・IT 化の流れの中で、電子制御システムの大規模化が進んでいる。そのため、システムに搭載される各部品の小型化や高放熱化が継続的に求められている。また、電動車が増加する中、内燃機関であるエンジンを搭載したハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) やプラグインハイブリッド自動車 (PHV: Plug-in Hybrid Vehicle) などの自動車の販売台数も増加傾向にある。

富士電機は、このエンジンやトランスミッションなどからなるパワートレインの油圧制御システムの電磁弁や、排気ガス再循環 (EGR: Exhaust Gas Recirculation) システムのモータなど、負荷を駆動する電流をオン・オフ制御する IPS (Intelligent Power Switch) 製品を開発し、量産してきた。出力段に用いる縦型パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と制御・保護回路に用いる横型パワー MOSFET を一つのチップ上に集積している。これらの回路に加え、燃費向上や排出ガス低減のために負荷電流を高精度に検出するオペアンプを内蔵した IPS を開発し、量産してきた。

このたび、さらなる電子制御システムの小型・高放熱化に貢献する車載用第 5 世代 IPS 「F5202H」を開発したので、その内容について述べる。

## 2 製品の特徴

F5202H の外観を図 1 に、従来品とのパッケージ内部構造の比較を図 2 に示す。SOP (Small Outline Package) パッケージを採用した従来製品の「F5106H」では、図

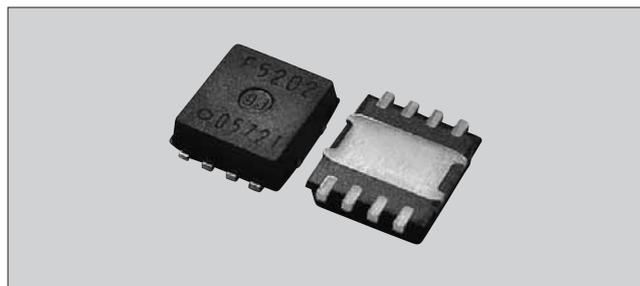


図 1 「F5202H」の外観

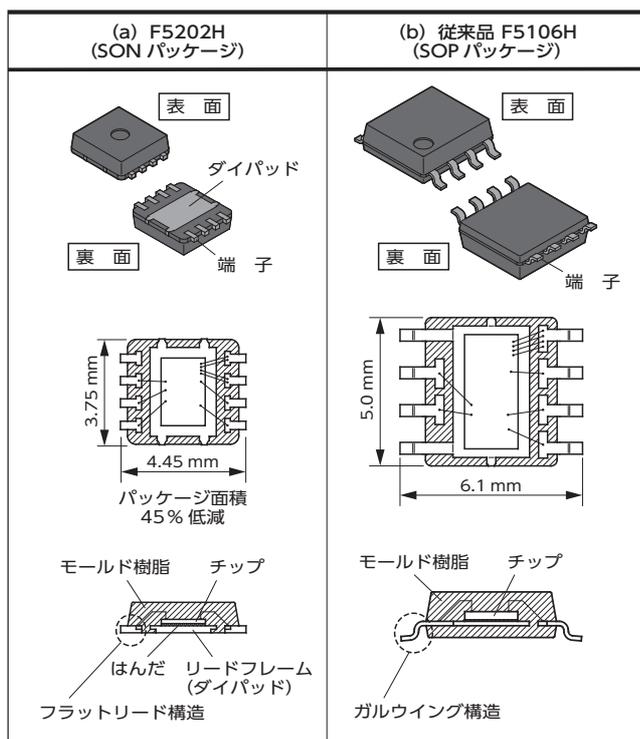


図 2 パッケージの外観と内部構造の比較

2(b)に示すようにリード部がガルウイング構造であるため左右に突き出している。一方、SON (Small Outline Non-leaded) パッケージを採用した本製品 F5202H では、図2(a)に示すようにパッケージ裏面と平行に配置したフラットリード構造と端子飛出し長さを最小化したノンリード構造の特徴を併せ持っている。また、チップを搭載したダイパッドが裏面で露出している。そのため F5202H は、従来パッケージと比べて小型で、実装面積を削減できる。さらに、チップを搭載したダイパッドが裏面で露出しているので基板に接続した際の放熱性が大幅に向上している。

回路ブロック図を図3に、使用例を図4に示す。F5202H は、次に述べる特徴と工夫により、従来品が持つ高い電流検出精度などの電気的特性を維持したままチップを小型化している。

- (a) 第5世代 IPS デバイス・プロセス技術を適用して、電気的特性の基本性能を維持したまま、制御・保護回路、特にオペアンプ部の小型化を図り、チップサイズを従来比で45%削減した。

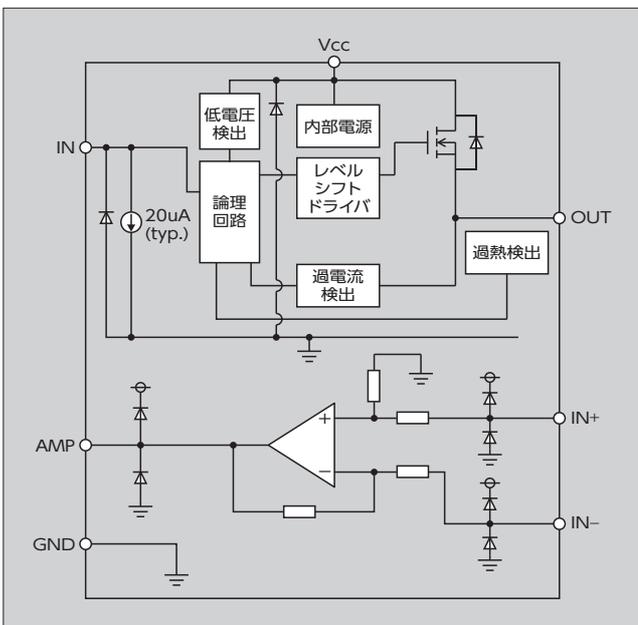


図3 「F5202H」の回路ブロック図

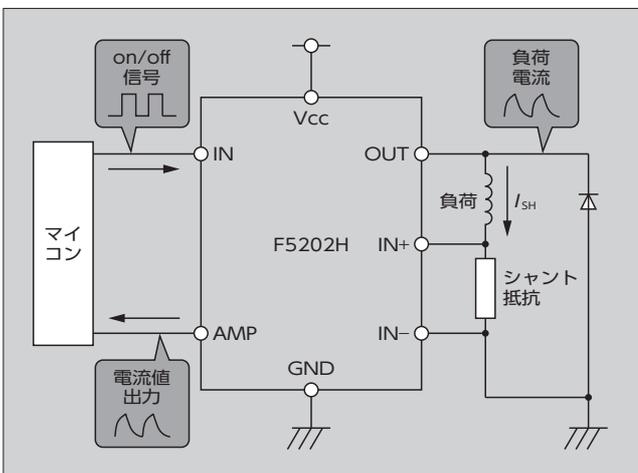


図4 「F5202H」の使用例

- (b) 小型で放熱性に優れた SON パッケージに搭載することで、従来品に比べてパッケージ面積を45%削減しながら熱抵抗を80%低減した。
- (c) 温度環境が過酷なエンジンルームに搭載されることを想定し、接合部温度  $T_{vj}$  の最大定格は  $175^{\circ}\text{C}$  である。さらに、車載向け集積回路 (IC) の信頼性規格 AEC-Q100 に準拠している。
- (d) 制御対象である油圧バルブなどに流れる負荷電流が  $1\text{A}$  のときに  $\pm 3.1\%$  の精度で検出する高精度オペアンプを内蔵している (図3)。図4に示すように、外付けシャント抵抗の両端電位をオペアンプ入力に接続し、オペアンプで増幅された電圧をマイコンに出力することで、負荷電流をモニタする電子制御システムが構築できる。
- (e) 電源電圧  $4\text{V}$  での低電圧動作が可能である。
- (f) システム異常に対する保護機能 (低電圧検出、過電流検出、過電流モード下出力電流発振、過熱検出) を内蔵し、素子の破壊を防止する。
- (g) 低インピーダンスサージ吸収用ツェナーダイオードを内蔵し、高い ESD (Electrostatic Discharge) 耐量を確保している。

このような工夫により、F5202H はパッケージの小型化と放熱性が向上したので電子制御システムの一層の小型・高放熱化に貢献する。

### 3 電気的特性

#### 3.1 IPS 部とオペアンプ部の電気的特性

IPS 部の電気的特性を表1に、オペアンプ部の電気的特性を表2に示す。F5202H は小型化したにもかかわらず、従来品である F5106H と同等の電気的特性を持っている。

#### 3.2 オペアンプ部

負荷電流  $I_{SH}$  がシャント抵抗  $R_{SH}$  を流れるときの電圧降下として負荷に流れる電流を検出する。オペアンプでは、この電圧降下分がオペアンプ入力電圧  $V_{IN+}$  として入力され、8 倍に増幅し出力電圧として出力する。電流検出精度は、例えば、 $I_{SH}=1\text{A}$  ( $R_{SH}=0.25\Omega$ ) の電流値では  $\pm 3.1\%$  で負荷電流をモニタすることが可能である。一般的にオペアンプを小型化すると精度が悪化する。しかし、今回は小型化したにもかかわらず、次に示す3項目を実施することで  $-40 \sim +175^{\circ}\text{C}$  の広い温度範囲で従来品と同等の高い電流検出精度を確保した。

- (a) オペアンプの差動増幅部は、4章で述べるよう

〈注〉 AEC : Automotive Electronics Council の略で、車載向け電子部品の標準化団体である。Q100 は、集積回路 (IC) の部品カテゴリに関わる規格である。

表1 IPS部の電気的特性

項目	記号	条件	規格値			単位
			min.	typ.	max.	
動作電源電圧	$V_{CC}$	$V_{CC}$ =低下時	3.6	—	16	V
		$V_{CC}$ =上昇時	3.8	—	16	V
低電圧検出	$UV_1$	$V_{IN}=5V$ 、 $V_{CC}$ =低下時	—	3.0	3.6	V
低電圧復帰	$UV_2$	$V_{IN}=5V$ 、 $V_{CC}$ =上昇時	—	3.2	3.8	V
静止電源電流	$I_{CC(L)1}$	$V_{IN}=0V$ 、 $R_L=10\Omega$	—	0.26	0.8	mA
入力スレッショルド電圧 (ヒステリシス有)	$V_{IN}$	$V_{CC}=4.5\sim 16V$ 、 $R_L=10\Omega$	1.5	—	2.8	V
入力電流	$I_{IN(H)}$	$V_{IN}=5V$	—	20	—	$\mu A$
オン抵抗	$r_{DS(on)}$	$T_{vj}=25^\circ C$ 、 $I_{OUT}=1.5A$	—	0.08	—	$\Omega$
		$T_{vj}=175^\circ C$ 、 $I_{OUT}=1.5A$	—	0.17	—	$\Omega$
過電流検出	$I_{OC}$	$V_{CC}=13V$ 、 $V_{IN}=5V$	2	—	7	A
過熱検出 (ヒステリシス有)	$T_{trip}$	$V_{IN}=5V$	175	—	207	$^\circ C$
オン時伝達遅延時間	$T_{ACCON}$	$V_{CC}=13V$ 、 $V_{IN}=5V-0V$ $R_L=10\Omega$	—	10	—	$\mu s$
オフ時伝達遅延時間	$T_{ACCOFF}$		—	20	—	$\mu s$
ターンオン時間	$t_{on}$		—	20	—	$\mu s$
ターンオフ時間	$t_{off}$		—	10	—	$\mu s$

\*特記なき場合は、 $T_{vj}=-40\sim +175^\circ C$ 、 $V_{CC}=8\sim 16V$ とする。

表2 オペアンプ部の電気的特性

項目	記号	条件	規格値			単位
			min.	typ.	max.	
電源電圧変動除去比	PSRR	DC	80	—	—	dB
AMP出力電圧範囲	$V_{OH}$	$R_{AMP}=50k\Omega$	0	—	5	V
AMP出力クランプ電圧	$V_{ACL}$	$R_{AMP}=50k\Omega$	5	—	7	V
AMP出力電流	$I_{AMP}$ (SOURCE)	$V_{IN+}=375mV$ 時 $V_{AMP}=V_{OAMP}$ $V_{AMP}=0.977*V_{OAMP}$	-10	—	-0.1	mA
	$I_{AMP}$ (SINK)	$V_{IN+}=375mV$ 時 $V_{AMP}=V_{OAMP}$ $V_{AMP}=1.023*V_{OAMP}$	0.1	—	10	mA
AMPスルーレート	SR	$R_{AMP}=50k\Omega$ $V_{IN+}=0.625V$	—	0.9	2	V/ $\mu s$
ゲイン	G	—	—	8	—	倍
電流検出精度1	$I_{sns5}$	$V_{IN+}=250mV$ $R_{AMP}=50k\Omega$	-3.1	—	3.1	%
電流検出精度2	$I_{sns11}$	$V_{IN+}=250mV$ $V_{CC}=14\pm 1V$ $R_{AMP}=50k\Omega$ $T_{vj}=25^\circ C$	-2.1	—	2.1	%
通常動作時 AMP出力電圧範囲	$V_{OAMP}$	$V_{IN+}=12.5\sim 375mV$ $V_{CC}=4\sim 16V$	0.053	—	3.947	V
	$V_{OAMP0}$	$V_{IN+}=0mV$ $V_{CC}=4\sim 16V$	-0.053	—	0.053	V

\*特記なき場合は、 $T_{vj}=-40\sim +175^\circ C$ 、 $V_{CC}=8\sim 16V$ とする。

に第4世代技術の中耐圧横型pチャネルMOSFET (PMOS)の代わりに、第5世代IPSデバイス・プロセス技術である三重拡散構造を持つ低耐圧横型pチャネルMOSFETを採用した。この第5世代技術により、差動増幅部を構成するMOSFET群を近接して配置できるので、高い電流検出精度を維持したまま、チップを小型化できるようになった。

(b) 差動増幅部にコモンセントロイドレイアウトを採用し、電流検出精度のばらつきを低減している。

(c) 電流を検出する精度のばらつきを補正するトリミング回路を見直して、テストパッド数とデコーダ回路を削減した。これによりチップを小型化した。

#### ④ 第5世代IPSデバイス・プロセス技術

##### 4.1 技術の概要

従来品では、第4世代IPSデバイス・プロセス技術<sup>(2)(3)</sup>を適用することで、主に出力段パワーMOSFETをプ

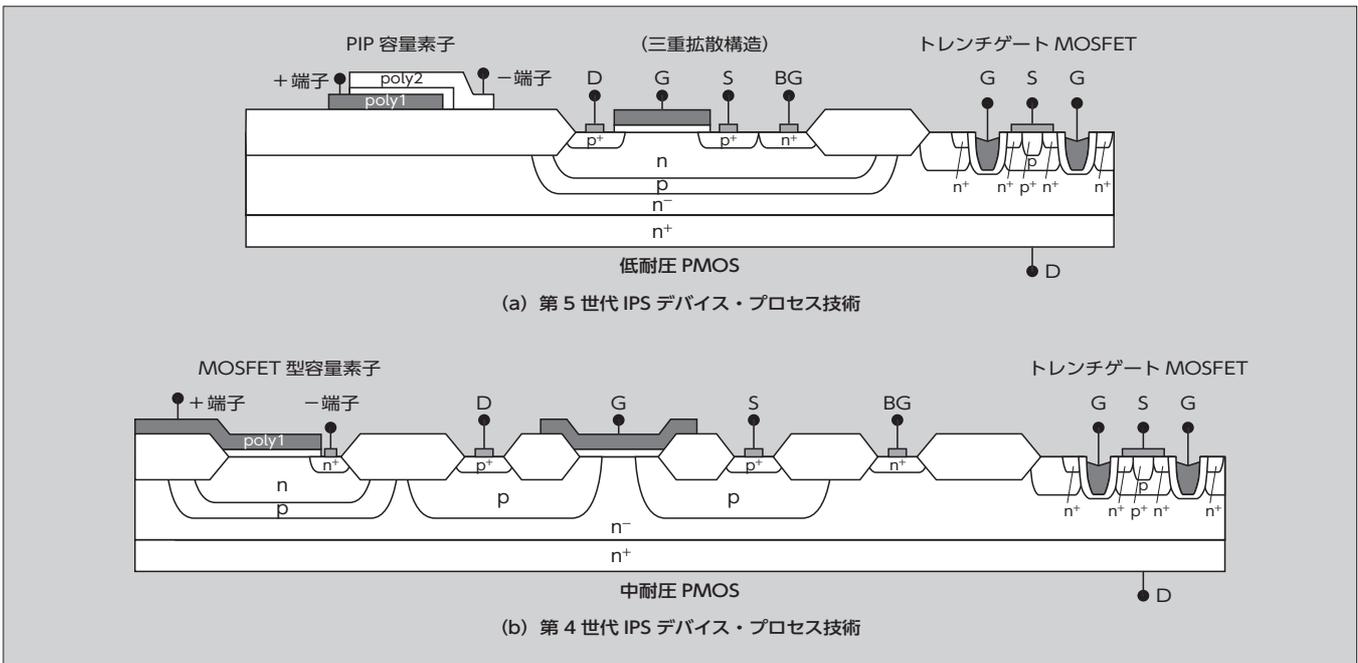


図5 オペアンプと出力段の主要デバイス・プロセス技術の比較

レーナゲート型からトレンチゲート型に変更してチップを小型化した。F5202Hでは、第5世代IPSデバイス・プロセス技術を適用することで、三重拡散構造を持った低耐圧横型pチャンネルMOSFETとPIP(Polysilicon-Insulator-Polysilicon)容量素子を採用して制御回路を小型化した。

#### 4.2 低耐圧横型pチャンネルMOSFET (PMOS)

第4世代IPSデバイス・プロセス技術では図5(b)に示すように、PMOSはバックゲート層としてn<sup>-</sup>基板を使用していたため、バックゲート電位が必然的に縦型トレンチMOSFETのドレイン電位(電子制御システムのバッテリー電位)に固定され、バックゲートと各ノード間に高電圧が印加されていた。そのため、第4世代IPSのオペアンプなどの回路にはこの高電圧に耐えられるように、各ノードに高い耐圧構造を持つ中耐圧PMOSを採用する必要があり、回路面積の増加につながっていた。

そこで、第5世代IPSデバイス・プロセス技術では、三重拡散構造の低耐圧PMOSを開発した。三重拡散構造のp層により、バックゲートと各ノード間に高電圧が印加されない構造となったので、従来の中耐圧PMOSに代わって小型の低耐圧PMOSが使えるようになり回路面積を縮小できるようになった。

#### 4.3 三重拡散構造

三重拡散構造では、拡散層間の耐圧を確保するために、従来よりも深い拡散層を形成する必要がある。第5世代IPSデバイス・プロセス技術では、従来の第4世代IPSデバイス・プロセス技術の熱処理条件に変更を加えることなく深い拡散層を形成できるように、イオン注入の加速電圧条件を最適化した。そのため、従来の第4世代IPSか

ら変更の必要がないデバイスに関しては、特性を維持したまま第5世代IPSにおいても使用できる。その結果、従来の製品仕様からの変更を最小限に抑えて、置き換えを容易にしている。

#### 4.4 PIP容量素子

所望のオペアンプ特性を実現するために不可欠な容量素子として、従来はMOSFET型容量素子を使っていた。しかし、この容量素子ではガードリング構造が必要な上、印加電圧によって容量が変動するので、素子面積を大きくする必要があった。

第5世代IPSデバイス・プロセス技術では、絶縁膜厚の最適化と制御性を高めることで、ガードリング構造が不要で容量変動が少なく小面積化が可能なPIP容量素子を使用できるようにした。その結果IPSの小型化につながることができた。

### 5 SONパッケージ

#### 5.1 SONパッケージによる小型・高放熱化

F5202Hでは、SONパッケージを採用した。従来品F5106H(SOPパッケージ)に比べ、図6に示すようにパッケージ面積を45%削減した。また、チップを搭載したダイパッド(縦型トレンチMOSFETのドレイン電極)が裏面で露出しているため、基板に接続した際の放熱性が大幅に向上し、熱抵抗を80%低減している。

#### 5.2 AEC-Q100準拠

F5202Hはエンジンルーム内の過酷な環境下で使用されることを想定し、車載向け集積回路(IC)の信頼性規格AEC-Q100に準拠している。熱応力耐性を確保して温

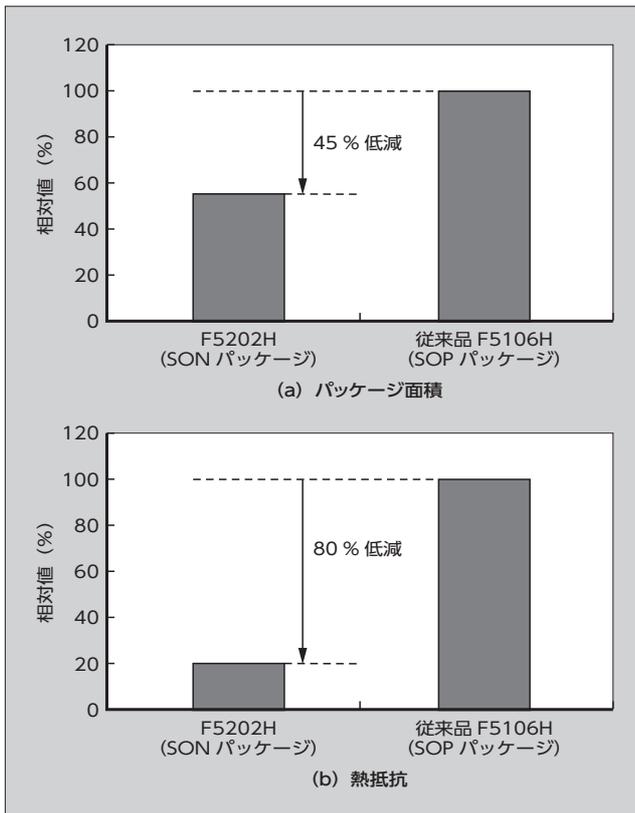


図6 SONパッケージと従来のSOPパッケージの比較

度サイクル試験やパワー温度サイクル試験などの基準を満たすために、チップ厚さ、チップとリードフレームを接続するはんだ組成・厚さを最適化した。

さらに、高温環境下で長時間動作することを想定し  $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$  保証としている。そのために高信頼性ワイヤを採用し、ワイヤと電極パッド間の接合界面の信頼性を向上している。

## 6 あとがき

本稿では、車載電子制御システムの小型化、高放熱化に

貢献する、車載用第5世代IPS「F5202H」について述べた。今後は、周辺部品の取込みによる部品点数削減など、小型化、高機能化へのさらなる取組みを進め、自動車業界に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 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.
- (2) 蔦坂浩志ほか. 車載用第4世代IPS「F5100シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.440-444.
- (3) Toyoda, Y. "60 V-Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET". ISPSD. p.147-150, 2013.
- (4) 森澤由香ほか. 車載用ハイサイド2in1IPS「F5114H」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.275-278.



### 岩田 英樹

半導体デバイスの製品設計に従事。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電装ディスクリート部主査。



### 豊田 善昭

半導体デバイスの開発・設計に従事。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デバイス開発部主査。



### 中村 賢平

半導体デバイスのパッケージ開発に従事。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パッケージ開発部。



# 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

7th-Generation “X Series” 1,200-V / 2,400-A RC-IGBT Modules for Industrial Applications

掛布 光泰 KAKEFU, Mitsuhiro

山野 彰生 YAMANO, Akio

平田 朋也 HIRATA, Tomoya

IGBT モジュールの小型化や高信頼性化といった市場要求に応えるため、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT) を開発した。第7世代「Xシリーズ」のチップ技術およびパッケージ技術と RC-IGBT の技術を組み合わせ、第7世代「Xシリーズ」産業用 1,200 V RC-IGBT モジュールを系列化し、2,400 A を加えて定格電流を拡大した。これにより、従来製品と比較して実動作時のチップ接合温度や接合温度上昇を大幅に改善し、電力変換装置のさらなる出力向上や小型化、高信頼性化に貢献する。

In order to meet the market demand for smaller and more reliable IGBT modules, Fuji Electric has developed reverse-conducting IGBTs (RC-IGBTs), which integrate IGBTs and FWDs on a single chip. Specifically, we created a line-up of 7th-generation “X Series” 1,200-V RC-IGBT modules for industrial applications that combine 7th-generation “X Series” chip and packaging technologies with RC-IGBT technology. More recently, we have enhanced the line-up by adding 2400-A products to increase the current rating. This enhancement substantially improves chip junction temperature and junction temperature rise during operation compared with conventional products. This contributes to further output improvement, miniaturization, and higher reliability for power conversion systems.

## ① まえがき

近年、地球温暖化対策や安全・安心で持続可能な社会を実現するために、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギーに貢献するパワーエレクトロニクス技術への期待が高まっている。中でも、産業や民生、自動車、再生可能エネルギーなどの幅広い分野で用いられる電力変換装置のキーデバイスとして、パワー半導体の重要性が増している。

富士電機は、1988年にパワー半導体の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを製品化した。以来、IGBT モジュールの小型化、低損失化、高信頼化によって電力変換装置の小型化や低コスト化、高性能化に貢献してきた。さらなる貢献のために IGBT モジュールを従来よりも小型化しようとする、パワー密度の増大による IGBT 素子や還流ダイオード FWD (Free Wheeling Diode) 素子の動作温度の上昇や信頼性の低下を招く。そのため、高い信頼性を保ち、かつ IGBT モジュールを高パワー密度化するためには、チップおよびパッケージの技術革新が不可欠である。

富士電機はチップおよびパッケージの技術革新を行い、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と高信頼化による高パワー密度化を実現している<sup>(1)(2)</sup>。さらに、IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を開発し、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を低減した。<sup>(3)(4)</sup>

Xシリーズ RC-IGBT モジュールは、Xシリーズ IGBT モジュールのチップ技術とパッケージ技術に RC-IGBT 技術を加えることで、さらなる高パワー密度化による小型化を実現した。今回、RC-IGBT を搭載した 1,200 V/2,400 A 定格 PrimePACK<sup>TM</sup> 3+ を開発し、系列に加えた。

## ② 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールの特徴

図1に、Xシリーズ RC-IGBT の概略図と等価回路を示す。電力変換装置として広く用いられている電圧型インバータでは、IGBT と FWD を逆並列に接続する必要がある。従来は、IGBT と FWD の二つのチップが必要であったが、RC-IGBT では、一つのチップに IGBT の動作領域と FWD の動作領域を作り込んでいる。

Xシリーズ RC-IGBT では Xシリーズのチップ技術により、第6世代「Vシリーズ」IGBT と比較してさらなる

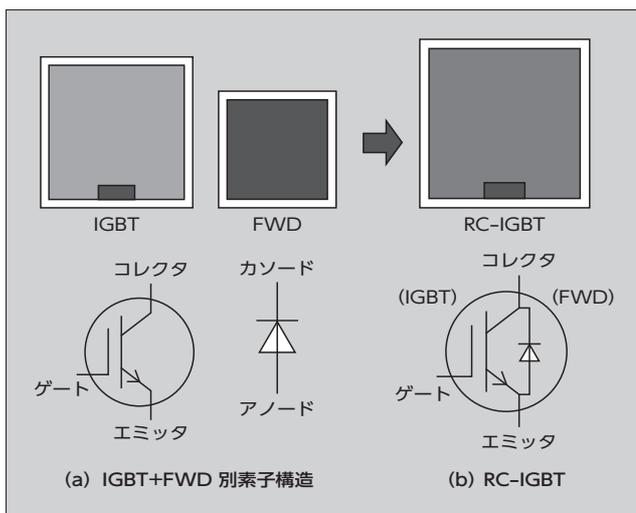


図1 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT の概略図と等価回路

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

微細化を行い、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適用することで、 $V_{CE(sat)}$  とスイッチング損失とのトレードオフ関係を改善した。一般に薄ウェーハを用いると、ターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されるが、Xシリーズ RC-IGBT ではチップ構造を最適化することで、電圧振動や耐圧低下を抑制した。

さらに、Xシリーズ IGBT モジュールのパッケージ技術の一つである高放熱絶縁基板を採用し、熱抵抗を大幅に低減した。また、ワイヤボンディングの最適化や高強度はんだ、高耐熱シリコンゲルの採用により、接合温度175℃での連続動作を保証するとともに高信頼性も確保した。

これらの技術を採用することで、RC-IGBT モジュールは、IGBT と FWD の二つのチップを組み合わせた従来のIGBT モジュールよりも、同一パッケージサイズで高い定格電流を実現した。<sup>(5)(6)(7)(8)</sup>

3 製品ラインアップ

表1に、Xシリーズ RC-IGBT モジュールのラインアップを示す。

また、表2に今回新たに系列化したXシリーズ RC-IGBT モジュール PrimePACK™3+ の外観写真を示す。従

来の定格電流1,800AのXシリーズ IGBT モジュールと同じパッケージサイズで、RC-IGBT モジュールは定格電流2,400Aを実現している。

4 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール PrimePACK™3+ の特性

(1) ターンオフ損失

図2に、Xシリーズ RC-IGBT モジュールの  $V_{CE(sat)}$  と

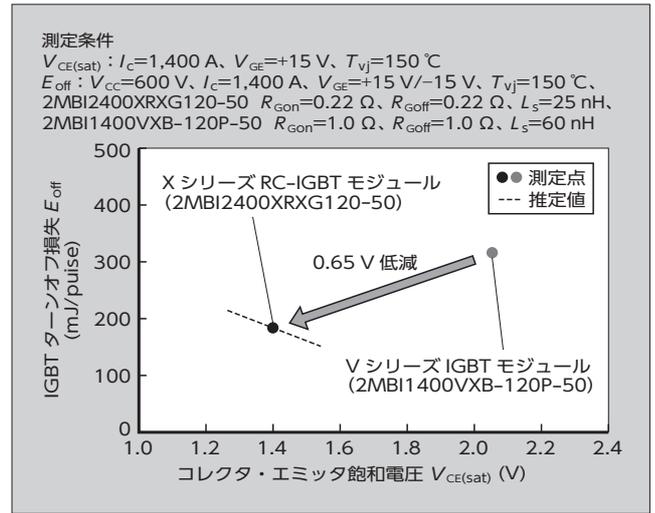


図2 IGBTトレードオフ特性

表1 Xシリーズ RC-IGBT モジュールのラインアップ

製品名	製品型式	定格電圧	定格電流	備考	
Small-PIM2	7MBR50XRKD120-50	1,200 V	50 A	ソルダーピン	
	7MBR50XRKB120-50			プレスフィットピン	
PC3	6MBI250XRBE120-50		250 A	ソルダーピン	
	6MBI250XRXE120-50			プレスフィットピン	
DualXT	2MBI1000XRNE120-50		1,000 A	ソルダーピン	
	2MBI1000XRNF120-50			プレスフィットピン	
PrimePACK™3+	2MBI2400XRXG120-50		2,400 A	—	
DualXT	2MBI800XRNE170-50		1,700 V	800 A	ソルダーピン
	2MBI800XRNF170-50				プレスフィットピン
PrimePACK™3+	2MBI2200XRXG170-50			2,200 A	—

\*PrimePACK™: Infineon Technologies AG の商標または登録商標

表2 製品の的外観

		定格電流 (A)		
		1,400	1,800	2,400
1,200 V	Xシリーズ	X-IGBT + X-FWD		X-RC-IGBT
	Vシリーズ	V-IGBT + V-FWD		
製品外観	従来品	(単位: mm) PrimePACK™3		開発品 (単位: mm) PrimePACK™3+

\*PrimePACK™: Infineon Technologies AG の商標または登録商標

ターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。Xシリーズ RC-IGBT モジュールは、Vシリーズ IGBT モジュールと比較して、飽和電圧を0.65V低減するとともに、ターンオフ損失を42%低減し、大幅にトレードオフ特性を改善した。これにより、高効率化と高電流密度化を実現した。

一方、従来のVシリーズ IGBT モジュールでは、大電流が流れた場合に出力端子がその配線抵抗によって発熱し、温度が過剰に上昇する懸念があるため出力電流の拡大に制約があった。そこでXシリーズ RC-IGBT モジュールでは、配線抵抗を下げるため従来のVシリーズ IGBT モジュールから外形サイズを変えることなく、出力端子の数を1端子から2端子に増やした。

(2) 出力端子温度

図3に、従来のVシリーズ IGBT モジュールとXシリーズ RC-IGBT モジュールの通電試験時の出力端子温度を測定した結果を示す。Xシリーズ RC-IGBT モジュールは、通電時に1端子当たりの電流を低減することができる。これにより、従来のVシリーズ IGBT モジュールと比較して、1,100A通電時の端子温度が51°C低くなり、定格電流が拡大できた。

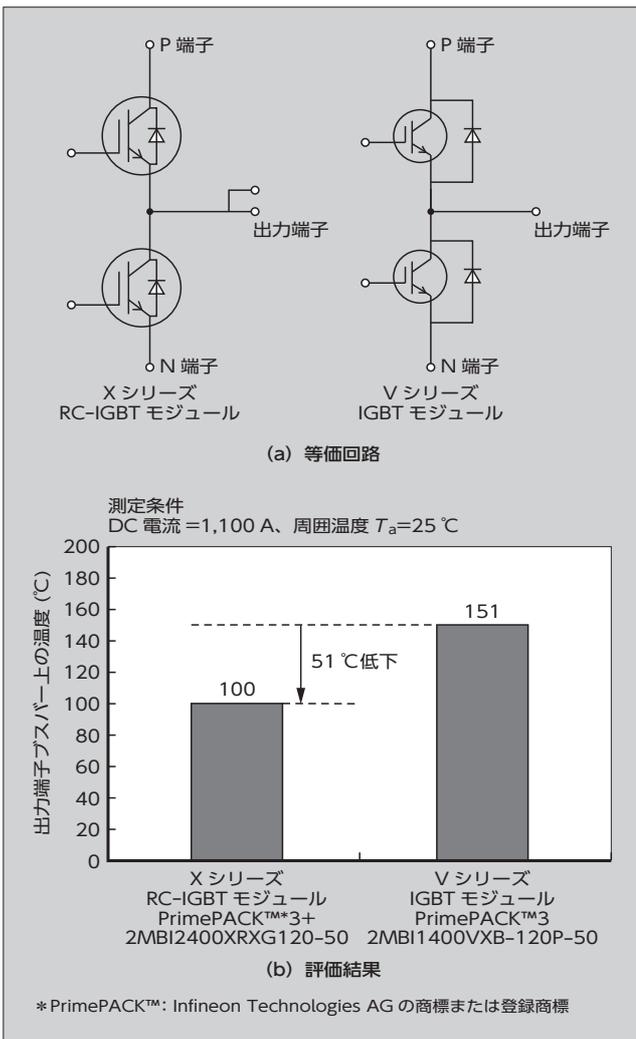


図3 等価回路と端子温度評価結果

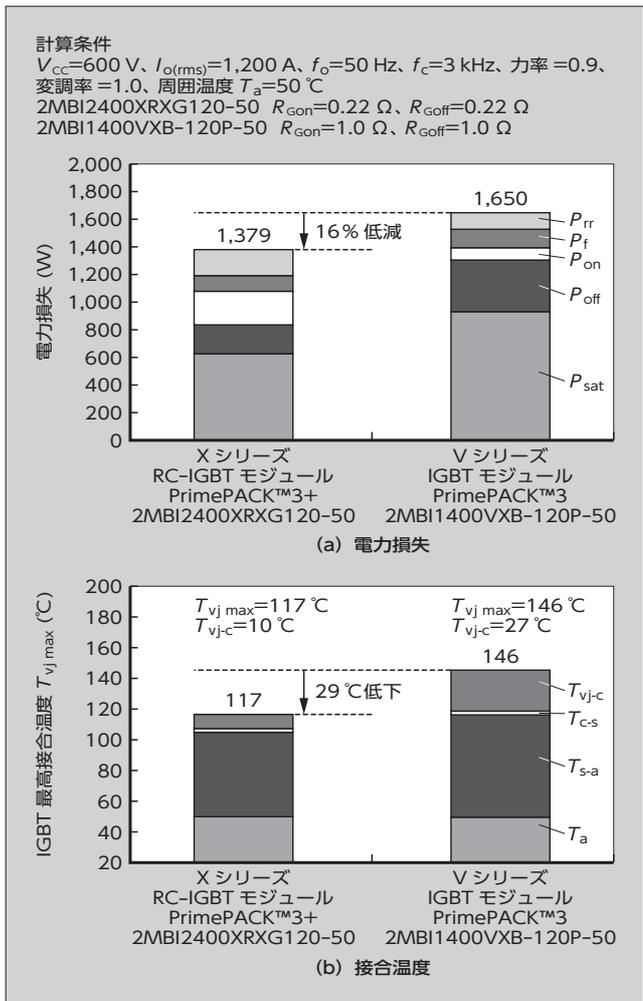


図4 電力損失および接合温度

(3) インバータ搭載時の電力損失と接合温度

図4に、従来のVシリーズ IGBT モジュールとXシリーズ RC-IGBT モジュールを電圧型インバータに搭載したときの電力損失と接合温度  $T_{vj}$  およびジャンクション-ケース間温度上昇  $T_{vj-c}$  をシミュレーションで求めた結果を示す。Vシリーズ IGBT モジュールと比較して、同じ条件で電力損失を16%削減した。さらに、Xシリーズのパッケージ技術とRC-IGBTの技術を組み合わせることで熱抵抗を大幅に低くし、 $T_{vj-c}$  が17°C低減できたことにより、最高接合温度  $T_{vj\text{-}max}$  を29°C下げることができた。

(4) パワーサイクル耐量

図5に、モータの加減速時などインバータが低周波で動作するときの  $T_{vj}$  のシミュレーション結果を示す。従来のIGBT+FWD構造では、IGBTおよびFWDがそれぞれ発熱および放熱を繰り返す、1周期における  $T_{vj}$  の最低温度と最高温度の差  $\Delta T_{vj}$  は90°Cになる。一方、IGBTとFWDの領域をワンチップ化したRC-IGBTでは、素子内のIGBT領域およびFWD領域が交互に発熱する。これにより、RC-IGBTではIGBTで発生した熱がFWD領域にも伝わり、またFWDで発生した熱はIGBT領域にも伝わるため、IGBT+FWD構造と比較して放熱面積の拡大効果が得られ、 $T_{vj}$  の温度変化が約1/4

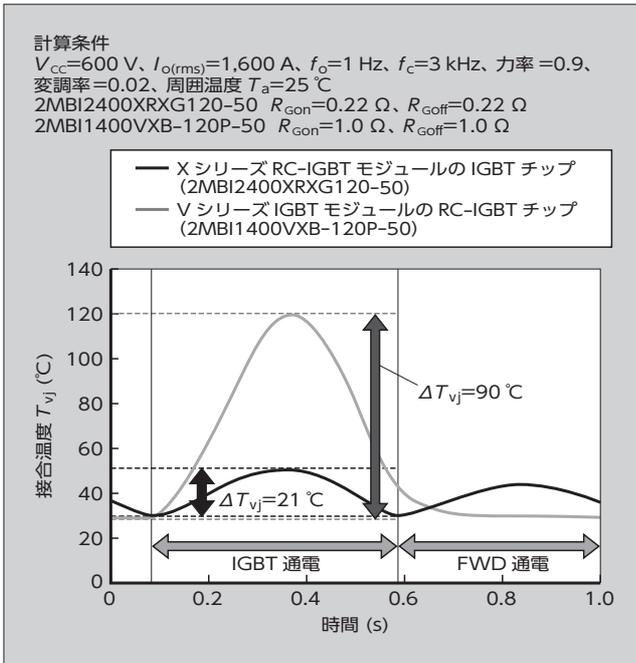


図5 低周波動作時の接合温度  $T_{vj}$  の時間変動

と小さくなり、1周期の $\Delta T_{vj}$ は $21\text{ }^\circ\text{C}$ にとどまる。これにより、アルミニウムワイヤ接合部およびシリコンチップ下はんだ接合部への熱ストレスが大幅に緩和する。

図6に $\Delta T_{vj}$ パワーサイクル耐量と、今回の低周波動作時の温度上昇計算結果を示す。XシリーズRC-IGBTモジュールでは $\Delta T_{vj}$ が大幅に低減したため、低周波動作時の $\Delta T_{vj}$ パワーサイクル耐量が $7 \times 10^4\text{ cycles}$ から $4 \times 10^9\text{ cycles}$ に増え、信頼性が劇的に向上した。一方、従来と同等のパワーサイクル耐量の条件で使用するには高出力化が期待できる。

(5) 出力電流の向上

連続動作についてシミュレーションを行った結果、図7に示すように、電力損失と熱抵抗の低減、ならびに連続動作時の最高接合温度をVシリーズIGBTモジュールの $150\text{ }^\circ\text{C}$ からXシリーズIGBTモジュールでは $175\text{ }^\circ\text{C}$ に上げることができることによって、同一パッケージにおいて出力電流を55%拡大できる。

また、図8に示すようにインバータが出力電流定格の100%で連続動作したのち200%で3s間の過負荷動作した100%出力電流 $I_o$ と $T_{vj\text{ max}}$ のシミュレーションを行った。その結果、図9に示すように、XシリーズRC-IGBTモジュールを用いることで、過負荷動作においても出力電流が54%拡大できることが示された。

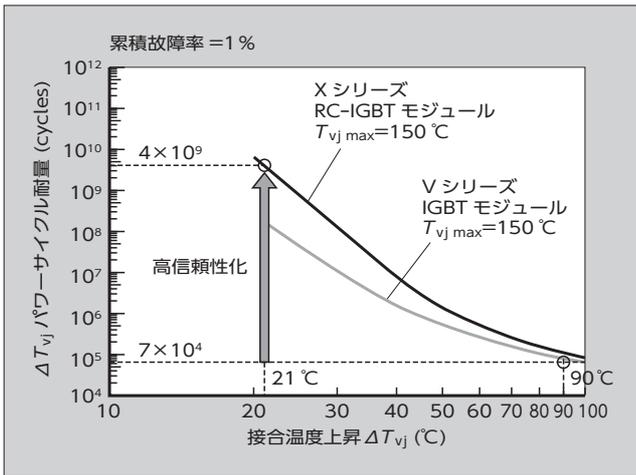


図6  $\Delta T_{vj}$ パワーサイクル耐量

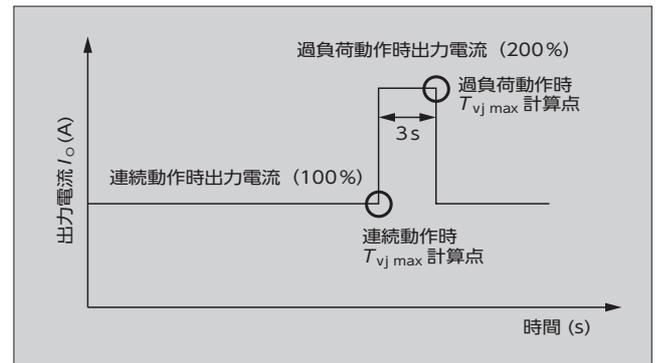


図8 インバータの過負荷時の動作パターン

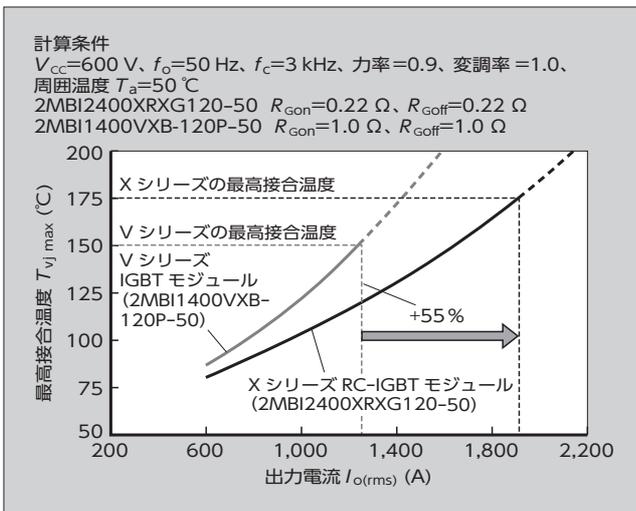


図7 連続動作時の最高接合温度

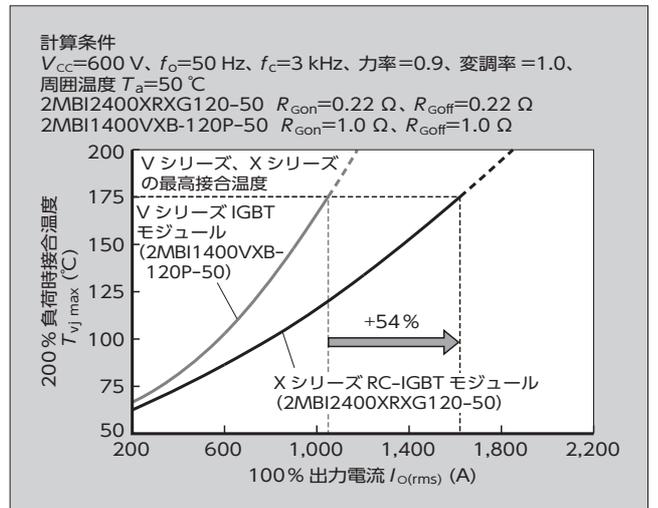


図9 過負荷動作時の最高接合温度

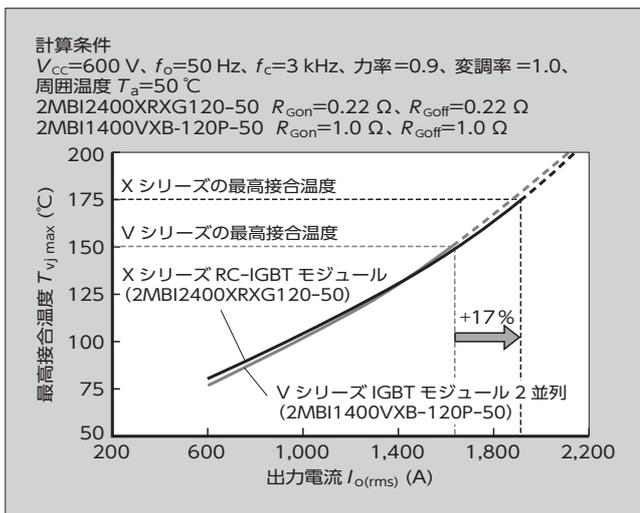


図10 連続動作時の最高接合温度

図10に、連続動作時の $I_O$ と $T_{vj\_max}$ のシミュレーション結果を示す。VシリーズIGBTモジュール1,400Aを2並列する必要があったものが、XシリーズRC-IGBTモジュール2,400A1台に置き換えることができ、かつ出力電流を17%拡大でき、省スペース化が可能となった。

5 あとがき

第7世代「Xシリーズ」産業用1,200V/2,400A RC-IGBTモジュールについて述べた。このモジュールを電力変換装置に搭載することにより、これまで実現が困難であった出力電流の拡大を達成し、電力変換装置の小型化や高効率化、高信頼化、低コスト化によりいっそう貢献できると考える。

今後もIGBTモジュールの技術革新を進め、安全・安心で持続可能な社会の実現に向け貢献していく所存である。

参考文献

(1) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

(2) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.

(3) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”. Proceeding of PCIM Europe 2016.

(4) Takahashi, K. et al. “1200 V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”. Proceeding of PCIM Europe 2014.

(5) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.256-260.

(6) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールの系列化. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.233-237.

(7) Yamano, A. et al. “The Series of 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2018.

(8) Yamano, A. et al. “1,700 V 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2019.



掛布 光泰

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



山野 彰生

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



平田 朋也

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



# 第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大

## 1,200-V 2nd-Generation All-SiC Modules

高崎 愛子 TAKASAKI, Aiko

奥村 啓樹 OKUMURA, Keiji

丸山 力宏 MARUYAMA, Rikihiko

富士電機は、低炭素社会の実現に貢献するためにさまざまな電力変換装置に搭載する Si-IGBT モジュール製品を市場に展開してきた。今回、電力変換効率を改善するため、第2世代 1,200 V トレンチゲート構造の SiC-MOSFET チップを搭載した All-SiC モジュールを開発した。現行品と互換性を持ちつつ内部インダクタンスを低減するとともに、低オン抵抗の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を採用することで、低損失化を達成した。これにより、従来の Si-IGBT モジュールに対してインバータ発生損失を 63% 低減でき、パワーエレクトロニクス機器の高密度化と小型化に貢献する。

Fuji Electric has been commercializing Si-IGBT modules for use in a variety of power conversion systems to contribute to realizing a low-carbon society. We have recently developed All-SiC modules equipped with 2nd-generation trench gate SiC-MOSFET chips to improve power conversion efficiency. While maintaining compatibility with conventional products, they reduce internal inductance and power loss by taking advantage of the low on-resistance of the 2nd-generation SiC trench gate MOSFET. Compared with conventional Si-IGBT modules, they reduce inverter generated loss by 63%, contributing to the improved density and miniaturization of power electronics equipment.

### 1 まえがき

低炭素社会を実現するために、パワーエレクトロニクス（パワエレ）機器の省エネルギー（省エネ）化が必要である。省エネ化のためには、パワエレ機器の電力変換効率を向上させることが必要であり、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。現在、主流であるシリコン（Si）デバイスの特性は、物性で決まる限界に近づいており、大幅な特性改善が困難な状況になりつつある。このような中、次世代半導体材料としてワイドバンドギャップ半導体である炭化けい素（SiC）を使ったデバイスが注目されている。SiC デバイスは Si デバイスよりも大幅な低損失化が可能であり、パワエレ機器の電力変換効率の一層の改善と省エネの実現が期待されている。

富士電機は、SiC モジュールとして、2017 年にトレンチゲート構造を採用した第1世代 SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) チップ<sup>(1)(2)(3)</sup>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<sup>(1)(4)</sup>を市場に展開した。さらに、従来の Si-IGBT モジュールの 62 mm 2 in 1 標準パッケージ (W108 mm×D62 mm) を使って、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。

今回開発した第2世代 1,200 V All-SiC モジュールは、現行品と互換性を持ちつつ内部インダクタンスを低減した。また、第1世代よりも低オン抵抗の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を採用することで、低損失化を達成している。

本稿では、Si-IGBT モジュールの 62 mm 2 in 1 標準パッケージと外形が同じ M295 パッケージ〔2 in 1 パッケージ (W108 mm、D62 mm)〕を採用した定格容量

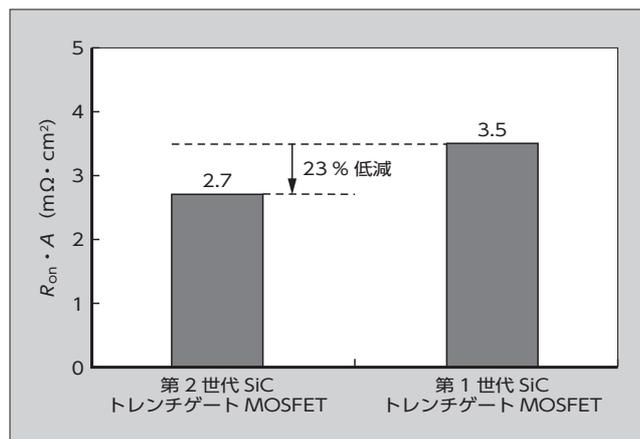


図1 第2世代 SiC トレンチゲートと第1世代 SiC トレンチゲートの  $R_{on} \cdot A$  比較

1,200 V/600 A の All-SiC モジュールについて述べる。

### 2 第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET

第1世代から第2世代でチップ厚の薄化と、トレンチ構造のセルピッチを微細化したことにより、1,200 V 耐圧の第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET の規格化オン抵抗  $R_{on} \cdot A$  は第1世代 SiC トレンチゲート MOSFET に比べて 23% 低減した(図1)。また、第1世代 SiC トレンチゲート MOSFET からチャンネル移動度を 20% 向上させた。

### 3 M295 パッケージ

SiC-MOSFET は多数キャリアデバイス(ユニポーラデバイス)であるため、少数キャリアデバイス(バイポーラデバイス)である Si-IGBT (Insulated Gate Bipolar

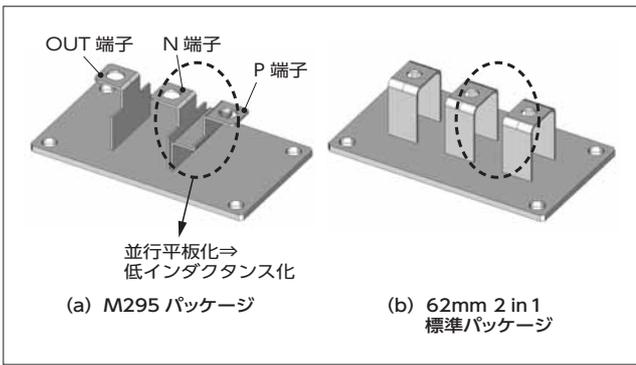


図2 M295パッケージと62mm 2 in 1標準パッケージの内部構造の相違点

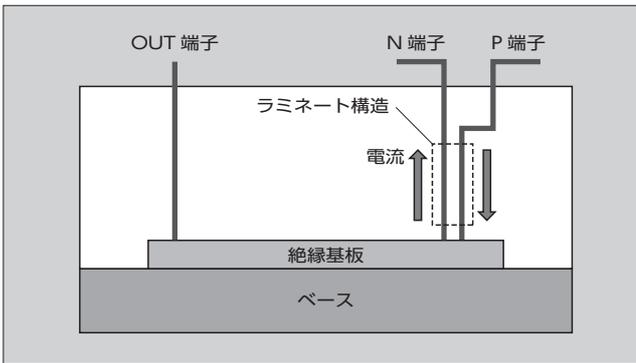


図3 モジュールの断面構造

Transistor) に比べて高速スイッチングが可能である。しかし、高速スイッチングはモジュール内部の配線インダクタンスの影響を受け、高いサージ電圧を引き起こすという弊害を持つ。

そこで、M295パッケージでは、Si-IGBT 62mm 2 in 1標準パッケージの外形および端子配置の互換性を確保しつつ、配線インダクタンスを低減するため、次のような工夫をした。Si-IGBTの2 in 1標準パッケージと今回開発したM295パッケージの内部構造を図2に示す。M295パッケージでは、図3に示すように隣接・並行する主端子の平板部分をできるだけ近づけて電磁相互誘導作用を活用できるようにするラミネート構造を採用し、内部インダクタンスを従来よりも24%低減した。

#### 4 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール(1,200V/600A定格品)の電気特性

##### 4.1 出力特性

第2世代SiCトレンチゲートMOSFETをM295パッケージに搭載したAll-SiCモジュール(All-SiCモジュール)と、標準パッケージを採用した第7世代「Xシリーズ」Si-IGBTモジュール(Si-IGBTモジュール)の1,200V/600A定格品の出力特性の比較を図4に示す。一般にMOSFETは、IGBTのようなバイポーラデバイスで見られるビルトイン電圧がないといった特徴がある。こ

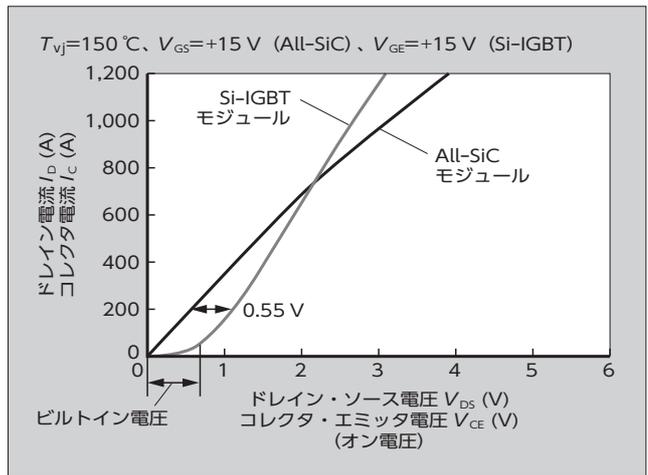


図4 出力特性の比較

れにより、定格電流( $I_D=600A$ )以下において、スイッチング素子としてMOSFETを搭載しているAll-SiCモジュールは、Si-IGBTモジュールよりオン電圧が低い。

インバータなどの電力変換装置では、モジュールの電流定格の30%程度で通常運転することが一般的であるため、モジュールの電流定格の約30%に相当する200Aと比較した。その結果、All-SiCモジュールのオン電圧はSi-IGBTモジュールよりも約0.55V低く、定常損失が約50%に低減できる(図9の $P_{sat}$ )。

##### 4.2 スwitching特性

一般に、図5に示すようにSi-IGBTモジュールは温度が高くなるとスイッチング速度が遅くなる。

一方、図6に示すようにAll-SiCモジュールは、 $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ と $150^\circ\text{C}$ でスイッチング速度はほとんど変わらない。All-SiCモジュールにはSi-IGBTモジュールで見られるようなターンオフ時や逆回復時のテール電流がほとんどなく、またキャリア移動度の温度依存性が小さいことなどが理由としてあげられる。

スイッチング速度の指標である $dv/dt$ と $di/dt$ が $T_{vj}=150^\circ\text{C}$ において、All-SiCモジュールとSi-IGBTモ

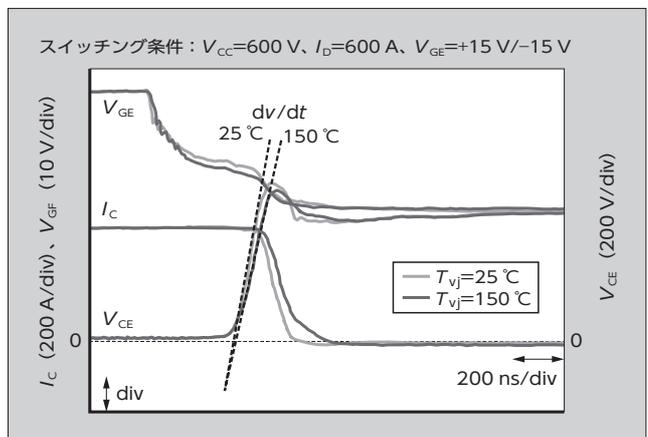


図5 Si-IGBTモジュールの $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ と $150^\circ\text{C}$ のスイッチング波形比較

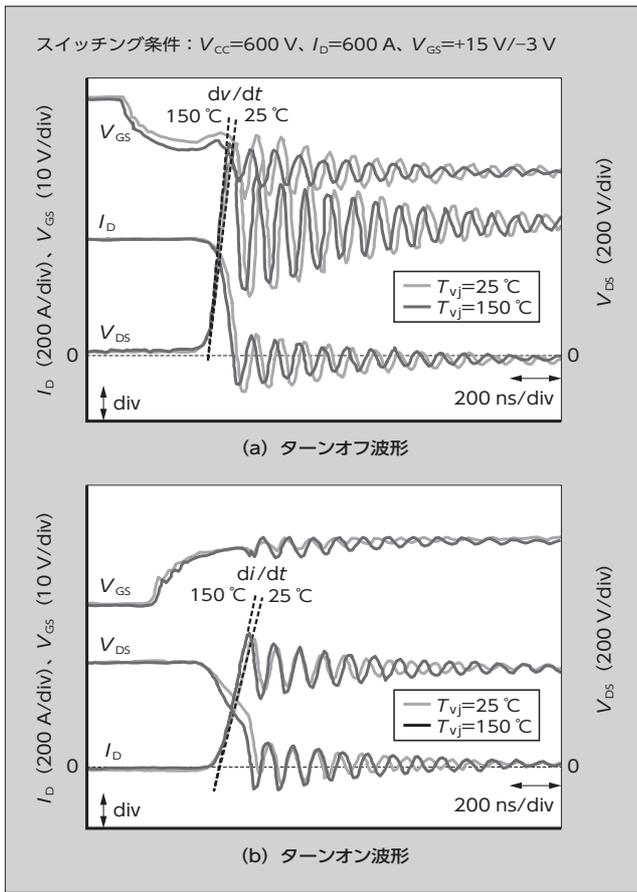


図6 All-SiC モジュールの  $T_{vj}=25\text{ }^\circ\text{C}$  と  $150\text{ }^\circ\text{C}$  のスイッチング波形比較

ジュールでおおむね同等になるよう駆動ゲート抵抗  $R_G$  を選定した上で、スイッチング特性を比較した結果を図7に示す。

All-SiC モジュールは、Si-IGBT モジュールに比べてターンオフ (図7(a)) 時のテール電流が大幅に減少している。また、逆回復 (図7(c)) 時にはテール電流だけでなく、ピーク電流も大幅に減少している。これは、スイッチング時に Si-IGBT モジュールでは少数キャリアの注入で動作する一方、All-SiC モジュールでは多数キャリアだけで動作するためである。また、All-SiC モジュールはターンオフ時の  $di/dt$  が Si-IGBT モジュールに比べて速いが、ターンオフ時のサージ電圧はほぼ同等に抑えられている。これは3章で記載した M295 パッケージの低インダクタンス化の効果によるものである。

これらにより、All-SiC モジュールは Si-IGBT モジュールに比べて定格電流である 600 A において、ターンオフ損失  $E_{off}$  を 25%、ターンオン損失  $E_{on}$  を 72%、逆回復損失  $E_{rr}$  を 90% 低減した (図8)。

このように、スイッチング速度を同等とした場合、All-SiC モジュールは Si-IGBT モジュールよりも総スイッチング損失が 57% 低い。

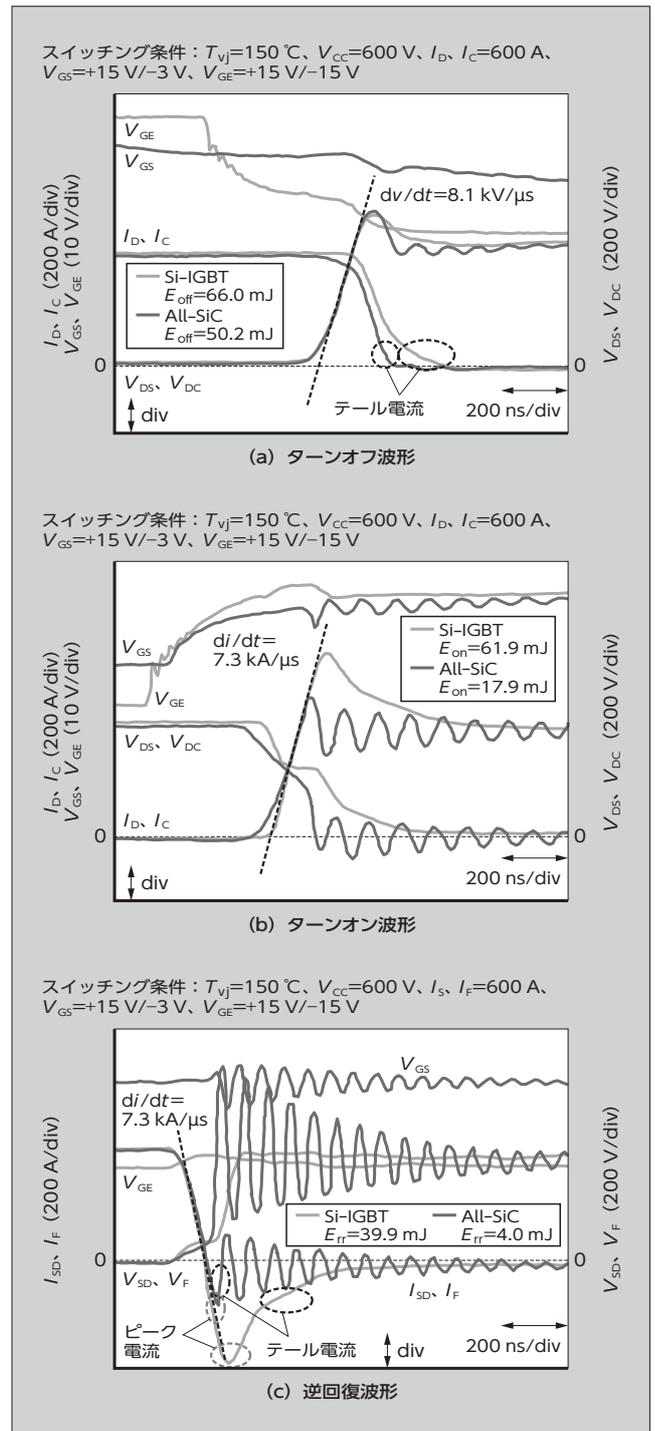


図7 1,200 V/600 A 定格の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチング波形

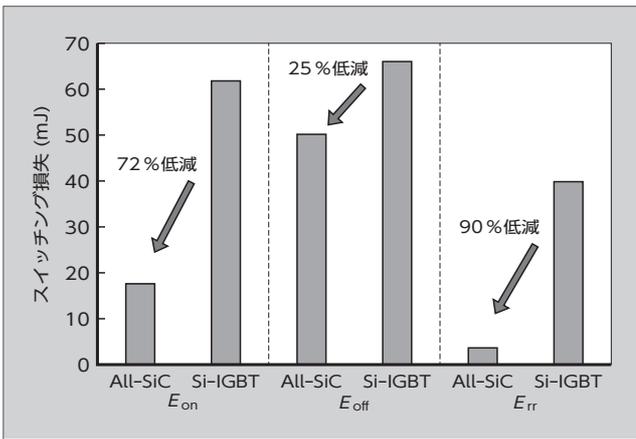


図8 1,200 V/600 A 定格の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチングロス比較

### 5 インバータ発生損失結果

4章の All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールの  $dv/dt$  と  $di/dt$  をおおむね同等とした際の駆動ゲート条件にて、シミュレーションにより2レベルインバータの発生損失を計算した結果を図9に示す。同じ出力電流 [ $I_{O(rms)}=200\text{ A}$ ] の条件において All-SiC モジュールを搭載した場合は、スイッチング損失の大幅な低減効果により、キャリア周波数  $fc=5\text{ kHz}$  ではインバータ発生損失が59%低減し、ジャンクション-ケース間温度  $\Delta T_{vj-c}$  が4℃低下する。また、高キャリア周波数条件である  $fc=20\text{ kHz}$  でもインバータ発生損失が63%低減し、 $\Delta T_{vj-c}$  が14℃低下する。なお、All-SiC モジュールを搭載した場合の  $fc=20\text{ kHz}$  における損失は、Si-IGBT モジュールを搭載した場合の  $fc=5\text{ kHz}$  における損失とほぼ同じである。このように、第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した All-SiC モジュールを採用する

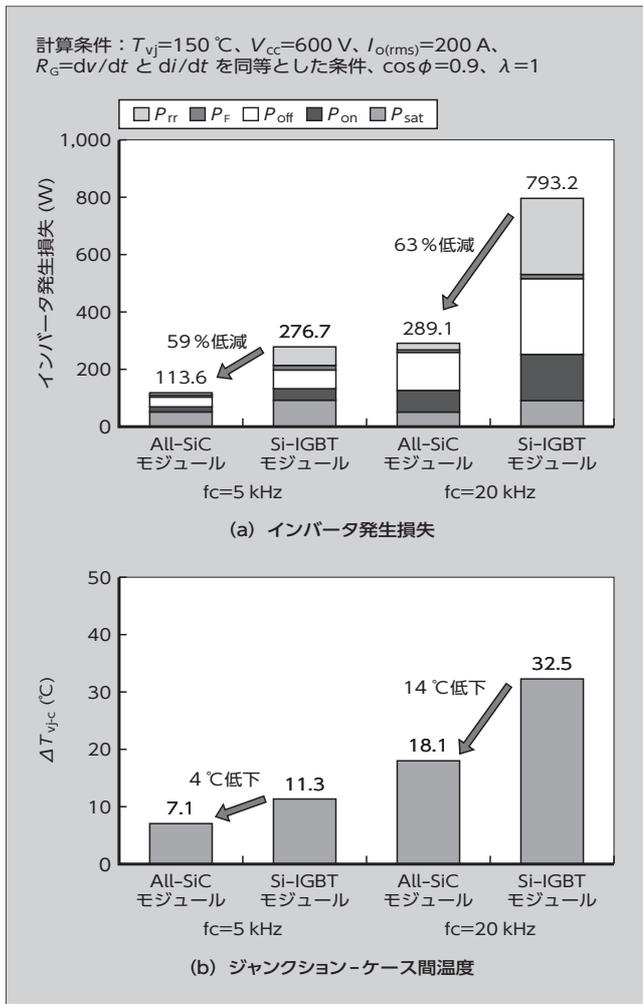


図9 インバータ発生損失のシミュレーション結果

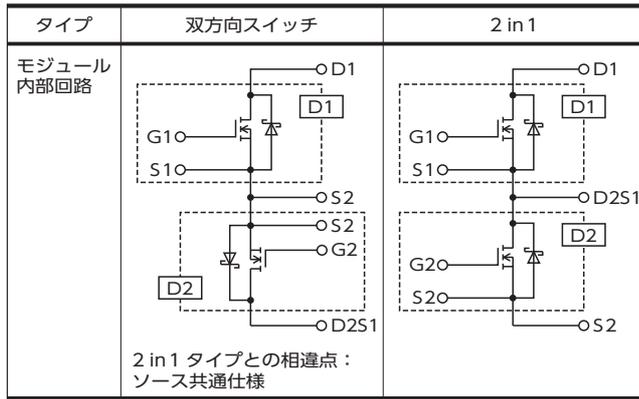
と、発生損失が小さくなり高密度化や大容量化が可能となる。また、高周波化によって小型の受動部品が使用できるようになり、パワエレ機器の小型化に貢献できる。

表1 第2世代 1,200 V All-SiC モジュールのラインアップ計画

パッケージ	外形寸法 W×D×H (mm)	回路パターン	定格電流							
			50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	450 A	600 A
Small1B	33.8×62.8×12.0	2 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
		6 in 1	○	—	—	—	—	—	—	—
Small2B	56.7×62.8×12.0	2 in 1	—	—	○	○	○	—	—	—
		6 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
EconoPACK™*2	45.0×107.5×20.5	6 in 1	○	○	○	○	—	—	—	—
62 mm (M295)	62.0×108.0×30.5	2 in 1	—	—	—	—	—	○	○	○
		双方向スイッチ	—	—	—	—	—	○	—	—

\* EconoPACK™: Infineon Technologies AGの商標または登録商標

表2 M295 62mm パッケージ搭載 All-SiC モジュールの内部回路



## 6 第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大

表1に、1,200 V 耐圧の第2世代 MOSFET を搭載した All-SiC モジュールのラインアップ計画を示す。現在、小容量帯である Small 1B、Small 2B、EconoPACK<sup>TM</sup><sub>(注)</sub>2 から中容量帯である M295 62 mm モジュールまで、系列開発を行っている。これらの製品は、従来の Si-IGBT モジュールと外形および端子配置に互換性を持ったパッケージとなっている。

また近年、再生可能エネルギーの分野で、インバータ回路に中性点を持たせた3レベルインバータの採用が進んでいる。これは、多くの電力変換装置で採用されている2レベルインバータと比べて、3レベルインバータは、出力側の高調波抑制と発生損失低減による高効率化が可能となるためである。そこで、本稿で述べた M295 の 62 mm パッケージを採用したモジュールでは、表2に示すように2 in 1 のほかに、3レベルインバータの構成が可能な双方向スイッチの内部回路を持ったモジュールも系列に加えることを計画している。

## 7 あとがき

第2世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大について述べた。

〈注〉 EconoPACK<sup>TM</sup> : Infineon Technologies AG の商標または登録商標

インバータ発生損失シミュレーション結果より大幅な発生損失の低減を達成し、高電力密度化や装置の小型・軽量化が実現できると考える。今後も、All-SiC モジュールがさまざまなパワーエレクトロニクス機器に搭載され、省エネルギー化が実現されるよう All-SiC 技術の発展に貢献する所存である。

## 参考文献

- (1) Iwasaki, Y. et al. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package". PCIM Europe 2017. p.651-657.
- (2) 辻崇ほか. 1.2 kV SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (3) 小林勇介ほか. シミュレーションによるSiCトレンチ型 MOSFETの特性予測. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.11-15.
- (4) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiC モジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.209-213.
- (5) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (6) 陳土爽清ほか. 3レベル電力変換器大容量IGBTモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.253-257.
- (7) 小松康佑ほか. アドバンストNPC回路用IGBTモジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.



高崎 愛子

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール部。



奥村 啓樹

SiC パワー MOSFET、SBD 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デバイス開発部。



丸山 力宏

SiC モジュールの開発・設計に従事。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パッケージ開発部。

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

7th-Generation “X Series” IGBT-IPM with “P644” Compact Package

寺島 健史 TERASHIMA, Kenshi

及木 達矢 OYOBIKI, Tatsuya

大瀬 智文 OSE, Tomofumi

富士電機は、電力変換装置のさらなる小型化や高効率化、高出力化の要求に応えるため、ブレーキ回路内蔵 IPM としては業界最小クラスの「P644」パッケージを採用した IGBT-IPM を開発した。この製品は、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の系列に属する。従来製品の「Vシリーズ」IPM「P636」に比べ、連続動作時の発生損失を約17%低減し、150°Cでの高温動作化を実現した。これにより、モジュール設置面積を約12%縮小し、インバータの出力電流を約26%増加できる。

Fuji Electric has developed a new IGBT-IPM to meet the requirements of the further miniaturization, high efficiency, and high power of conversion systems by using the “P644” package, which is the smallest in the industry for IPMs equipped with a brake circuit. This IPM is included in our line-up of the “X Series” IPMs, which uses a 7th-generation chip and packaging technologies. The new X Series IPM has lower power dissipation than the conventional “V Series” IPMs using “P636” by approximately 17% and can operate in high-temperatures up to 150°C. These enhancements can reduce the module footprint by approximately 12% and increase inverter output current by approximately 26%.

## 1 まえがき

地球温暖化とエネルギー問題は、近年の重要な課題である。この課題を解決する上で、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギー化に貢献するパワーエレクトロニクス電力変換装置においてキーデバイスであるパワー半導体の技術開発は不可欠である。

富士電機は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの製品化を通じて電力変換装置の小型化や高効率化、高出力化に貢献してきた。IGBT-IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) からなる通常の IGBT モジュールに、IGBT のゲート駆動回路や保護回路などを内蔵した高機能 IGBT モジュールである<sup>(1)</sup>。このゲート駆動回路は、顧客要求である低損失化を実現するよう最適設計されており、スイッチング損失と放射ノイズのトレードオフ特性の改善が可能となる。IPM に搭載される IGBT と FWD の改良に加え、ゲート駆動回路による低損失化によって動作時の温度上昇を抑制し、IGBT-IPM を小型化してきた。

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、ブレーキ回路を内蔵した IGBT-IPM としては最小クラスの「P644」パッケージを採用した第7世代 IGBT-IPM (Xシリーズ IPM) を開発した。

本稿では、製品の特徴と電力変換装置への効果について述べる。

## 2 製品概要

図1に新小型パッケージである Xシリーズ IPM「P644」(X-P644) の外観、図2に回路ブロック図を示す。P644パッケージの外形寸法は、W87.0×D50.2×H12.0 (mm)

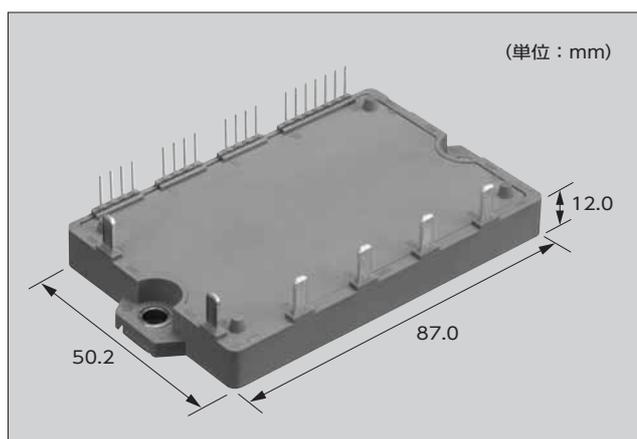


図1 Xシリーズ IPM「P644」の製品外観

である。三相インバータ回路とブレーキ回路を一つのモジュールに集積化した 7 in 1 の回路構成となっている。ブレーキ回路の搭載により、外付けのブレーキ回路が不要となり、電力変換装置の小型化、省スペース化に貢献する。

表1に製品ラインアップを示す。X-P644の製品ラインアップは、定格 650 V 系は 50 A と 75 A、定格 1,200 V 系は 25 A と 35 A である。同一定格帯の従来の V シリーズ IPM「P636」に比べ小型化し、冷却器上のモジュール設置面積を 12% 縮小した。

第7世代チップ技術による IGBT チップの低損失化と、ゲート駆動回路の改善によって、従来の V シリーズ IPM に比べ低損失化と小型化を同時に実現した。さらに、連続動作時の接合温度  $T_{vjop}$  の最高温度を V シリーズ IPM の 125°C から 150°C に拡大し、高温動作を可能にした。

Xシリーズ IPM のアラーム出力において下アーム保護<sup>(注1)</sup>

〈注1〉上アームと下アーム：255 ページ「解説1」を参照のこと

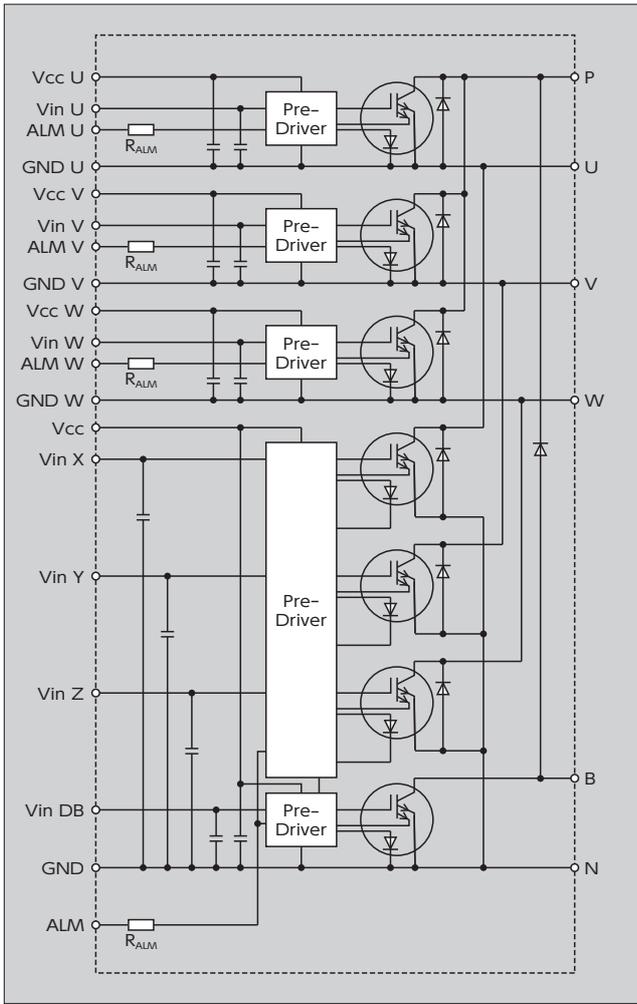


図2 回路ブロック図

表1 製品ラインナップ

定格電圧	定格電流		製品型式	内蔵機能
	INV	DB		
650 V	50 A	30 A	7MBP50XJA065-50	<ul style="list-style-type: none"> <li>○IGBT駆動回路</li> <li>○過電流保護</li> <li>○制御電源電圧低下保護</li> <li>○チップ加熱保護</li> <li>○アラーム出力 (上下アラーム)</li> </ul>
	75 A	50 A	7MBP75XJA065-50	
1,200 V	25 A	15 A	7MBP25XJA120-50	
	35 A	25 A	7MBP35XJA120-50	

動作時のブレーキ部 IGBT の独立動作を可能にした。従来の V シリーズ IPM では、下アームが異常を検知してアラームを出力すると、ブレーキ部の動作を含む下アーム全ての動作を停止する回路ロジックとなっていた。そのため、下アームが異常を検知するとモータの回転エネルギーをブレーキ回路で再生できず、P-N 間電圧が上昇して、場合によっては半導体素子が過電圧破壊してしまうという問題があった。この問題を解決するため、X シリーズ IPM では、下アームが異常を検知しアラームを出力しても、ブレーキ部が独立して動作するようにした。これにより、モータからの電力再生による主電源の P-N 間電圧の上昇を抑制した。なお、ブレーキ部の異常の場合には従来

どおりブレーキ部と同時に他の下アームのインバータ部も保護する仕様となっている。

### ③ 小型化と発生損失の低減

#### 3.1 ターンオフ特性の改善

P644 パッケージの採用による小型化と IGBT-IPM の高出力化を両立する上で、電力密度の上昇に伴うパッケージ内部の熱集中と熱干渉によるチップ温度上昇が問題であった。この問題の解決においては、IGBT-IPM の発生損失の低減が重要である。

第7世代の IGBT は、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るドリフト層の薄化によって、コレクタ・エミッタ飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を改善した<sup>(2)(3)</sup>。

図3に、X-P644 と従来製品 V シリーズ IPM 「P636」(V-P636) の飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。X-P644 は、V-P636 と比べ、飽和電圧を約 0.1 V 低減、ターンオフ損失を約 29% 低減した。これにより、X-P644 は、V-P636 に比べ、図7に示す IGBT-IPM の発生損失の約 60% を占める定常損失  $P_{sat}$  とターンオフ損失の合計を連続動作時で約 19% 低減した。

また、裏面構造のフィールドストップ (FS) 層を最適化することで、薄ウェーハ化による素子耐圧の低下およびターンオフ時の電圧振動を抑制した。

#### 3.2 ターンオン特性の改善

IGBT-IPM の発生損失を低減するために、前述の IGBT のトレードオフ特性の改善に加え、発生損失の約 20% を占める IGBT のターンオン損失を改善した。図4に示すように、X-P644 は V-P636 と比較して、ターンオン損失を約 13% 低減した。

X シリーズ IPM では、スイッチング時のターンオン損失を低減するために、IGBT チップの接合温度に応じて IGBT のターンオン時のゲート駆動能力を最適に制御する機能を新たに搭載した。一般に IGBT は、温度が高いほ

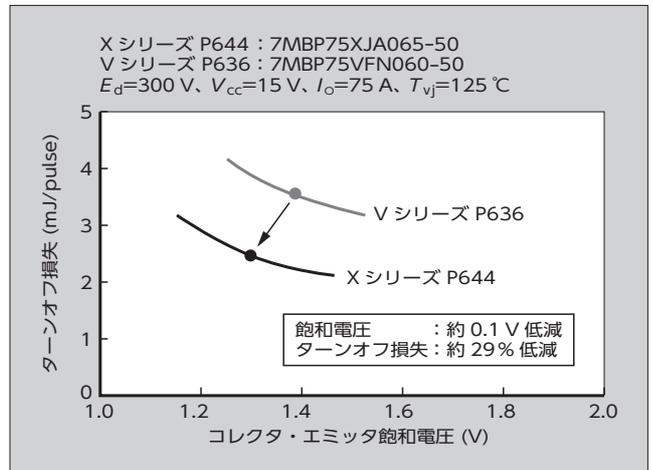


図3 第7世代 IGBT のトレードオフ特性

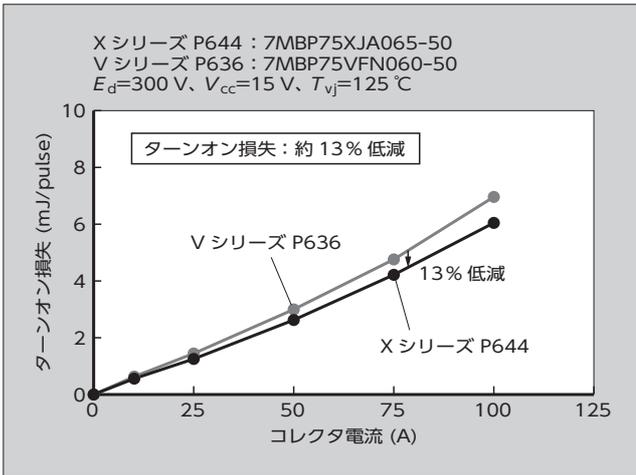


図4 ターンオン損失の比較

ど電圧変化  $dv/dt$  や電流変化  $di/dt$  が小さくなりスイッチングが遅くなるため、発生損失が増加する。XシリーズIPMでは、IGBTに内蔵した温度センサを使ってIGBTの温度をリアルタイムに監視することにより、温度上昇によってスイッチング時の電圧変化  $dv/dt$  や電流変化  $di/dt$  が小さくならないようターンオン駆動能力の切替え制御を行っている<sup>(1)</sup>。図5に示すように、本機能によって定格電流でのターンオン損失を約25%低減することが可能である。

また、スイッチング損失を低減するためスイッチング特性  $dv/dt$  や  $di/dt$  を大きくすると、放射ノイズが大きくなる。すなわち、スイッチング損失と放射ノイズはトレードオフの関係にある。XシリーズIPMは、 $dv/dt$  や  $di/dt$  が従来のVシリーズIPMと同等になるようにターンオン駆動能力切替え機能を最適化し、放射ノイズを抑制しつつ、スイッチング損失を低減した。図6に示すように、同じ定格製品(650V/75A)において、X-P644の放射ノイズはV-P636と同等レベルとなっている。

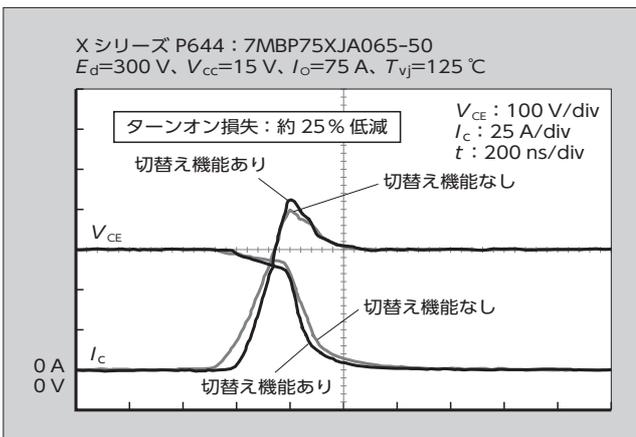


図5 ターンオン駆動能力切替え機能によるターンオン損失の改善効果

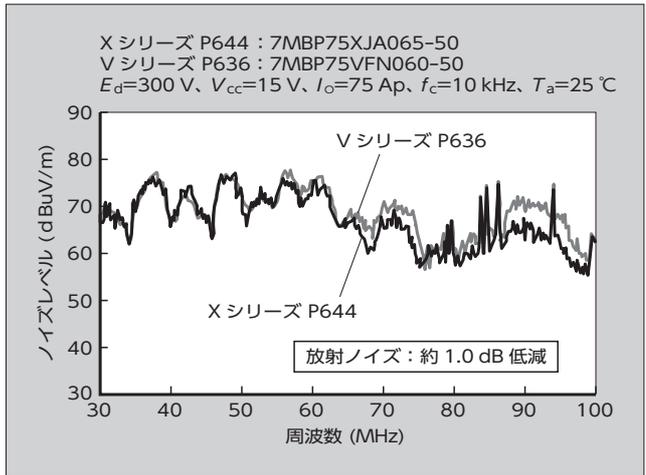


図6 放射ノイズの比較(相対比較試験結果)

### 3.3 発生損失

図7に、同じ定格製品(650V/75A)におけるPWMインバータ動作時の発生損失のシミュレーション結果を示

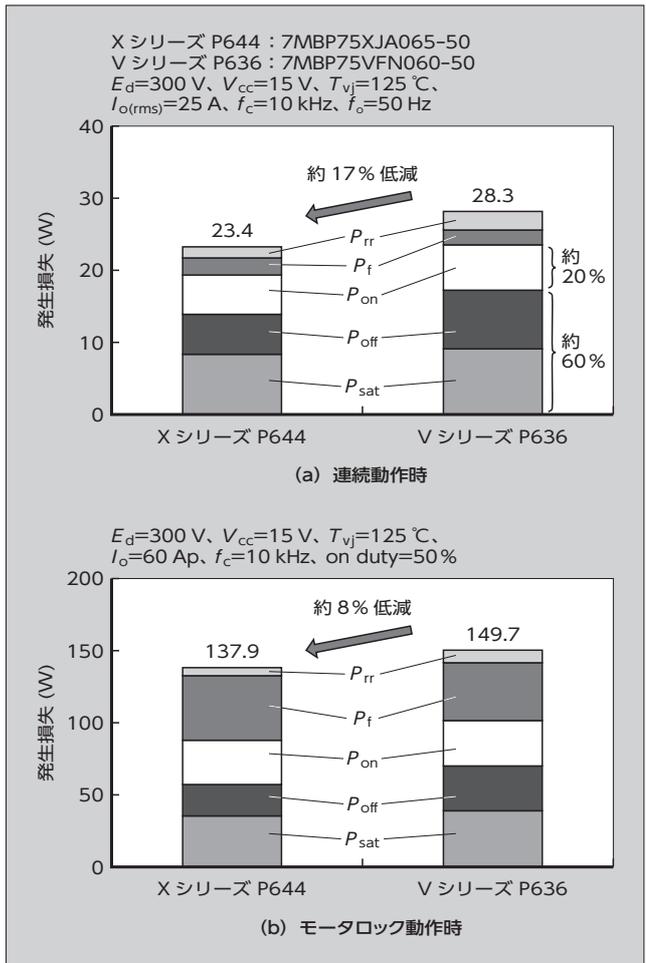


図7 発生損失シミュレーションの比較

〈注2〉モータロック：モータが制御可能状態で位置を保持している状態である。外から力がかかったときに停止している位置がずれても、停止位置に戻そうと制御する。

す。前述の特性改善により、X-P644のトータル発生損失は、V-P636と比較して、連続動作時に約17%、モータロック動作時に8%低減した( $f_c=10\text{ kHz}$ )。

4 高温動作化

表2に、X-P644とV-P636の最高動作温度の比較を示す。X-P644は、第7世代パッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの高温動作を可能にする技術の採用により、連続動作時の接合温度 $T_{vjop}$ をVシリーズIPMの125℃から150℃に拡大し、最高接合温度 $T_{vjmax}$ をVシリーズIPMの150℃から175℃に拡大した。

5 低価格基板の採用

従来製品のV-P636は、高熱伝導絶縁基盤であるAlN(窒化アルミニウム)材を採用し低熱抵抗化することで、熱集中による温度上昇を改善していた。一方、X-P644は、チップの高温動作を可能にしたため動作温度範囲が拡大している。さらに発生損失の低減により、AlN材よりも安価で一般的に広く使われている $\text{Al}_2\text{O}_3$ (アルミナ)材を絶縁基板として採用し、低価格化を実現した。

X-P644の絶縁基板の変更と小型化したパッケージ

表2 最高動作温度の比較

項目	Xシリーズ IPM	Vシリーズ IPM
最高ケース温度 $T_{cmax}$	125℃	110℃
連続動作時チップ接合温度 $T_{vjop}$	150℃	125℃
最高チップ接合温度 $T_{vjmax}$	175℃	150℃

内部の熱集中と熱干渉による温度上昇を確認するために、FEM(有限要素法: Finite Element Method)による過渡伝熱解析を行った。図8は、V-P636と同じ連続動作条件でX-P644を動作させたときの温度分布の比較である。V-P636は連続動作時の接合温度の上限値 $T_{vjop}=125\text{℃}$ に対して、マージンがわずか5℃であるが、X-P644は接合温度の上限値 $T_{vjop}=150\text{℃}$ に対して、26℃のマージンが確保できている。このため、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 材絶縁基板でも問題なく適用可能である。

6 小型化と高出力化

図9に示すように、X-P644はV-P636に対し、出力電流を約26%増加することができる。

また、図10は図8の連続動作時の状態からモータロック動作したときの温度分布の比較である。V-P636と同じ条件でロック動作させたとき、X-P644は小型化に

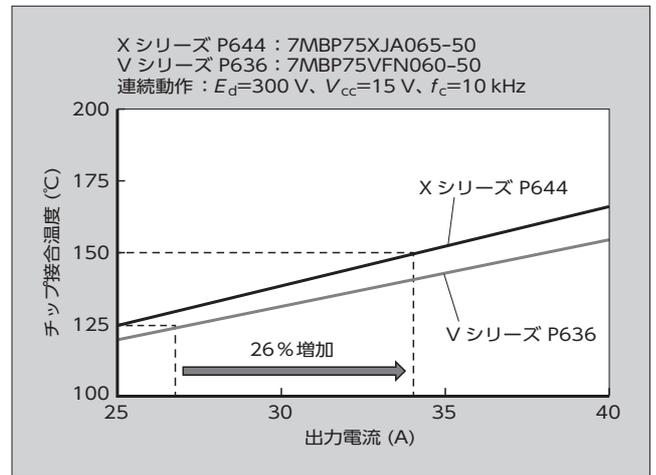


図9 電力変換装置の出力電流と接合温度

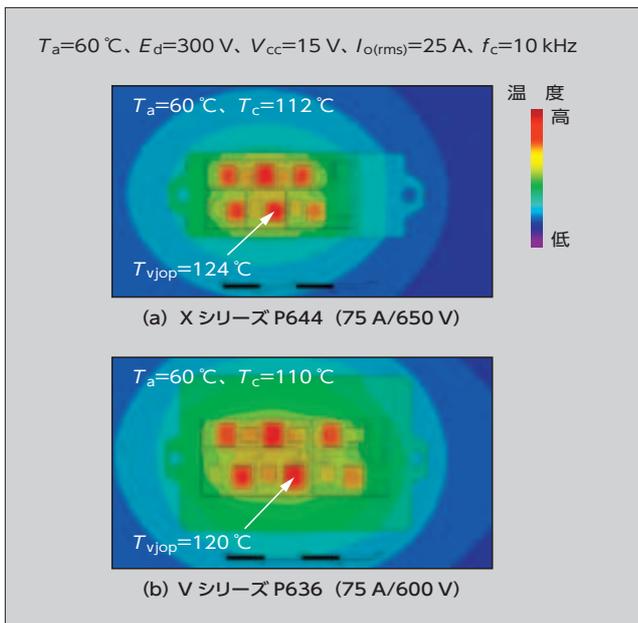


図8 連続動作時の温度分布比較 (過渡伝熱解析結果)

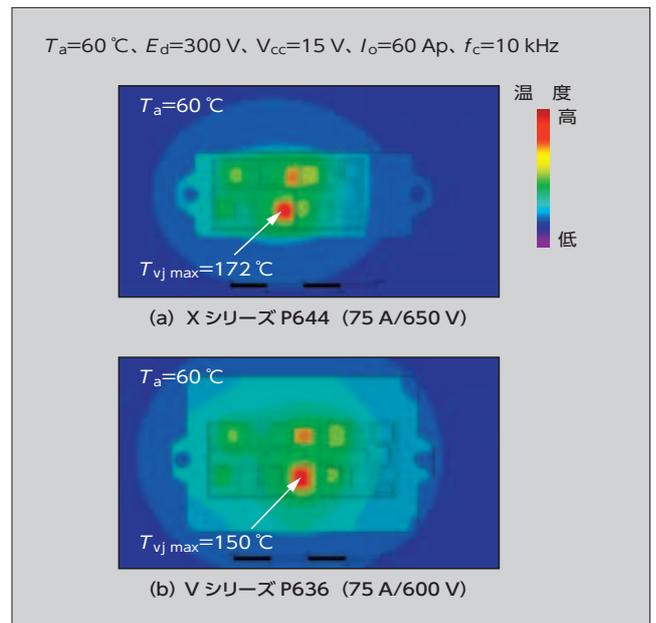


図10 モータロック動作時の温度分布比較 (過渡伝熱解析結果)

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

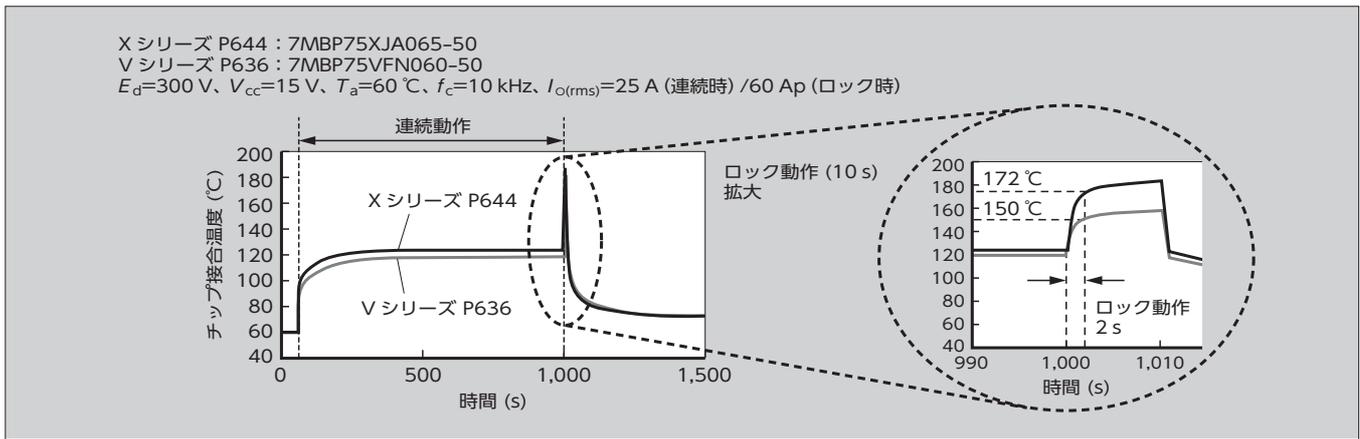


図 11 接合温度上昇の比較 (過渡伝熱解析結果)

より接合温度が  $T_{vj}=172$  °C と高くなるが、最高接合温度  $T_{vj\ max}=175$  °C よりも低いため、従来製品と同じ条件で使用可能である。図 11 に、上述の一連の動作における接合温度の変化の比較を示す。これらの結果より、V-P636 から X-P644 に置き換えることにより、電力変換装置のモジュールの設置面積を約 12% 縮小できるだけでなく、さらなる高出力化が可能である。

7 あとがき

小型パッケージ「P644」を採用した第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM について述べた。

ブレーキ回路を内蔵した 7 in 1 の IGBT-IPM としては業界最小クラスの「P644」を新たに製品系列にラインアップをしたことにより、今後の電力変換装置のさらなる小型化とコストダウンを実現し、広く世の中に貢献できると考えている。

今後もさらなる技術革新を推進し、IGBT モジュールの製品開発をととして世界的なエネルギー、環境問題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 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.

(2) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.  
 (3) Kawabata, J. et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". Proceeding of PCIM Europe 2015.



寺島 健史

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



及木 達矢

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業モジュール部。



大瀬 智文

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、富士電機深圳有限公司開発室パワー半導体開発部。



# ディスクリート IGBT 「XS シリーズ」 の系列拡大

“XS Series” Discrete IGBTs Line-up Expansion

原 幸仁 HARA, Yukihito

前田 涼 MAETA, Ryo

坂井 琢磨 SAKAI, Takuma

無停電電源装置（UPS）やパワーコンディショナ（PCS）で使用される半導体スイッチングデバイスのさらなる低損失化は、装置の高効率化において極めて重要である。そこで富士電機は、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、UPS や PCS を高効率化する 650 V および 1,200 V 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。スイッチング損失のさらなる低減が可能なサブエミッタ端子を追加した TO-247-4 パッケージ品を開発し、系列に加えた。定格は 1,200 V/75 A で、従来の TO-247 パッケージ品に比べスイッチング損失を 20 ～ 30% 低減している。

To further improve the efficiency of electric systems, reducing power loss is pivotal to the semiconductor switching devices used in uninterruptible power systems (UPSs) and power conditioning systems (PCSs). Fuji Electric has thus been mass producing 650-V and 1,200-V “XS Series” discrete IGBTs, which improve conduction loss and switching loss trade-off characteristics to enhance the efficiency of UPSs and PCSs. We have developed and added a module to the product line-up that uses a TO-247-4 package, which has a sub-emitter terminal capable of further reducing switching loss. The new module has a rated capacity of 1,200 V/75 A and lower switching loss than the conventional TO-247 package products by 20% to 30%.

## 1 まえがき

近年、IoT（Internet of Things）やビッグデータ、人工知能（AI:Artificial Intelligence）などの活用が進む中、情報・通信システムの高度化やクラウド化によってデータ使用量が増加している。このようなデータを扱うサーバやデータセンターでは省電力化に対する要求が強く、これらの装置に高品質な電力を供給する無停電電源装置（UPS: Uninterruptible Power System）の高効率化による省電力化も不可欠となっている。

また、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及が進んでいる。例えば、太陽光発電では、直流電力を交流電力に変換するパワーコンディショナ（PCS: Power Conditioning System）などの電力変換装置の高効率化は最重要課題になっている。

これらの UPS や PCS などで使用される半導体スイッチングデバイスのさらなる低損失化は、装置の高効率化において極めて重要である。

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、UPS や PCS を高効率化する 650 V および 1,200 V 耐圧のディスクリート IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）「XS シリーズ」を量産している。新たに XS シリーズの 1,200 V/75 A の TO-247-4 パッケージ品を開発し、系列に加えた。本稿では、本製品の概要と効果について述べる。

## 2 「XS シリーズ」の概要

図1に、ディスクリート IGBT の主な用途を示す。XS シリーズは、スイッチング周波数 20 kHz 程度で使用される UPS や PCS をターゲットとしている。

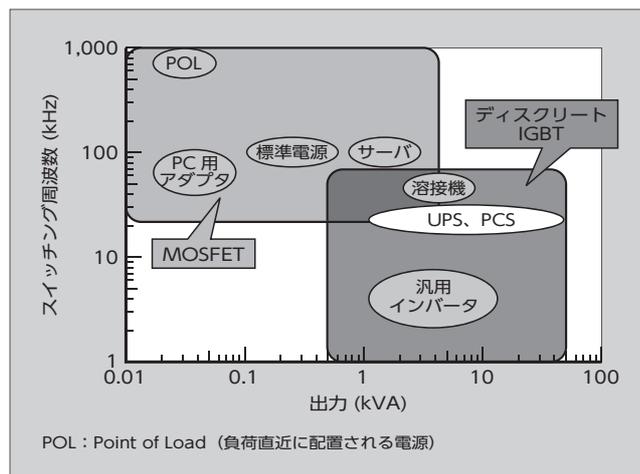


図1 ディスクリート IGBT の主な用途

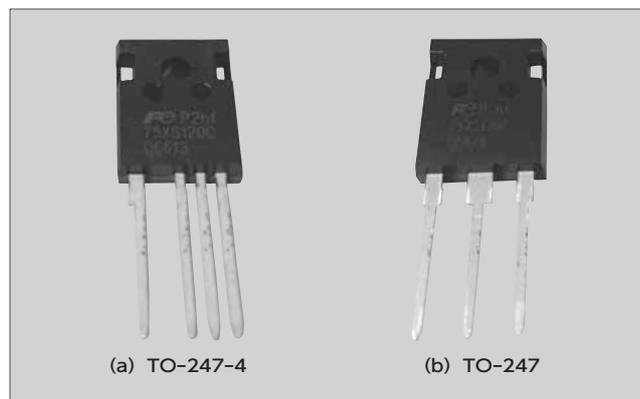


図2 パッケージ外観

今回開発した 1,200 V XS シリーズ TO-247-4 パッケージ品は、IGBT と FWD（Free Wheeling Diode）チップを搭載している。図2にパッケージの外観を、

表 1 「XS シリーズ」 の主要最大定格と電気的特性

型 式	内蔵 FWD	パッケージ	最大定格				電気的特性			
			IGBT			FWD	IGBT		FWD	
			$V_{CES}$	$I_C$ $T_{vj}=100^\circ\text{C}$	$I_{CP}$	$I_F$ $T_{vj}=100^\circ\text{C}$	$V_{CE(sat)}$ $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ (typ.)	$V_{CE(sat)}$ $T_{vj}=125^\circ\text{C}$ (typ.)	$V_F$ $T_{vj}=25^\circ\text{C}$ (typ.)	$V_F$ $T_{vj}=125^\circ\text{C}$ (typ.)
			(V)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(V)
FGZ75XS120C*	あり	TO-247-4	1,200	75	300	75	1.60	1.85	2.90	2.95
FGW75XS120C	あり	TO-247	1,200	75	300	75	1.60	1.85	2.90	2.95
FGW75XS120	なし		1,200	75	300	—	1.60	1.85	—	—
FGW40XS120C	あり		1,200	40	160	40	1.60	1.85	2.90	2.95
FGW40XS120	なし		1,200	40	160	—	1.60	1.85	—	—

\*新規系列化

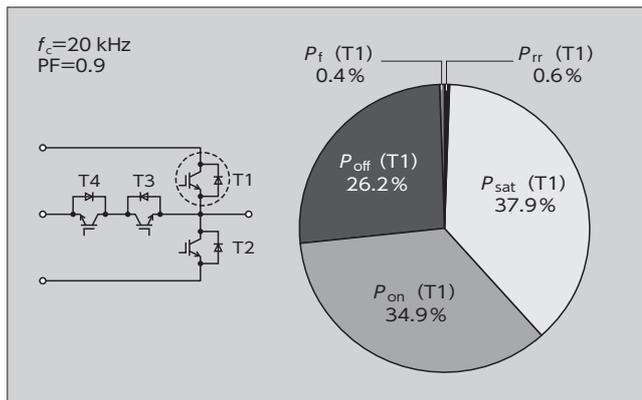


図 3 デバイス損失分析結果 (T-type)

表 1 に XS シリーズの主要最大定格と電気的特性を示す。数 kVA ～数 10 kVA の UPS や PCS 向けに、40 A や 75 A と大きな電流定格を持つ製品をラインアップしている。

### ③ ディスクリート IGBT の課題

数 kVA 以上の UPS や PCS では、電力変換効率を改善するため、3 レベルインバータが一般的に採用されている。

T-type 3 レベルインバータのメインスイッチ部 (T1、T2) における 1,200 V 定格の IGBT の損失内訳を図 3 に示す。IGBT の発生損失の約 40% を占める導通損失  $P_{sat}$  と約 60% を占めるスイッチング損失 ( $P_{on}$  と  $P_{off}$  の合計) を低減することが重要である。

### ④ 1,200 V 「XS シリーズ」と TO-247-4 パッケージの特徴

1,200 V XS シリーズは、第 7 世代「X シリーズ」IGBT と FWD のチップ技術をもとに、駆動周波数 20 ～ 40 kHz 程度で使用されるディスクリート製品である。

75 A 定格品のように電流定格が大きい製品では、1 素子当たりに流れる電流が大きい。さらに、従来の TO-247 パッケージのような 3 端子品では、エミッタ・コモンインダクタンスやゲート・エミッタループの配線インダ

クタンスがスイッチング損失に影響を及ぼす。そこで 4.3 節で述べるように、パッケージにはサブエミッタ端子を追加した TO-247-4 を採用し、3 端子の TO-247 と比較してスイッチング損失が向上している。

#### 4.1 IGBT チップ

図 4 に IGBT チップの断面構造を示す。第 6 世代「V シリーズ」IGBT を元にした従来品の「High-Speed W (HSW) シリーズ」に比べ、XS シリーズでは、第 7 世代 X シリーズ IGBT をベースにして、駆動周波数 20 ～ 40 kHz 向けのディスクリート IGBT として最適となる表面構造、フィールドストップ層 (FS 層) とホールの注入を抑制するコレクタの最適化層と Si 基板の薄化などによって、図 5 に示すように、従来製品と比較してターンオフ損失  $E_{off}$  を約 6% 低減すると同時に、コレクタ・エミッタ飽和電圧  $V_{CE(sat)}$  を 0.35 V 低減し、トレードオフ特性を改善した。

#### 4.2 FWD チップ

図 6 に FWD チップの断面構造を示す。順電圧  $V_F$  とリカバリ損失  $E_{rr}$  のトレードオフ特性を改善した第 7 世代 X シリーズ FWD をベースにして、Si 基板の薄化とライフタイムキラー量を最適化した FWD である。 $E_{rr}$  を従来の

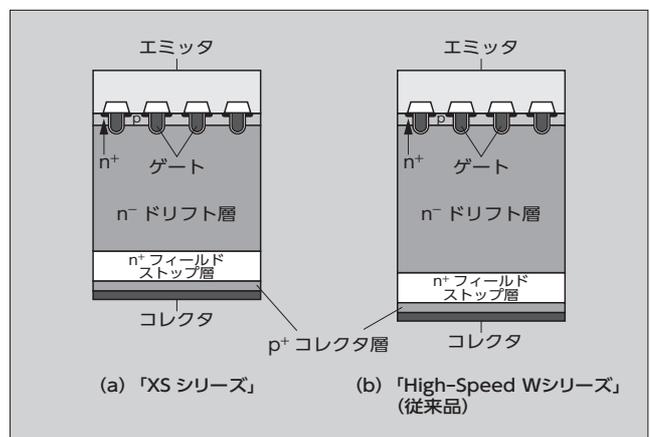


図 4 IGBT チップの断面構造図

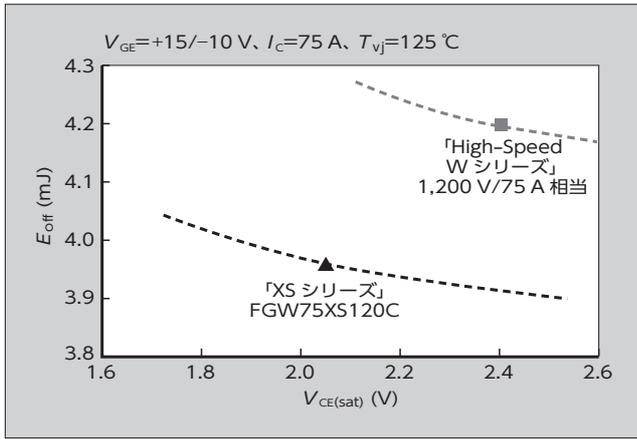


図5 トレードオフ特性 (IGBT)

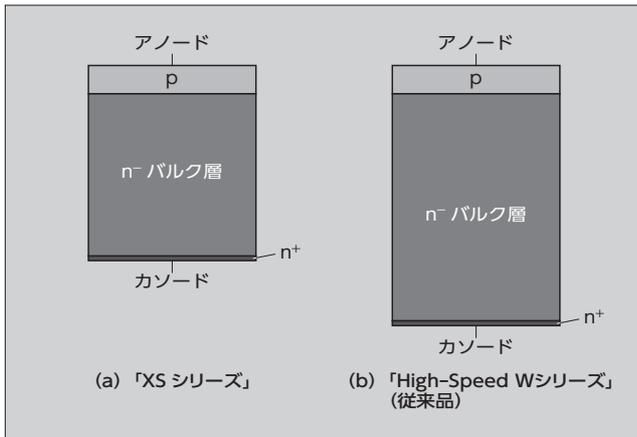


図6 FWD チップの断面構造図

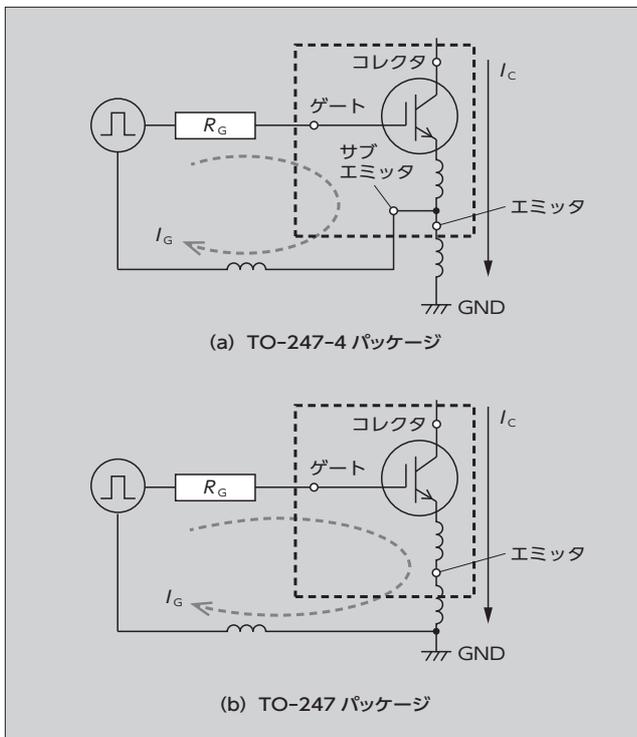


図7 TO-247-4 パッケージと TO-247 パッケージのゲート電流ループ

HSW シリーズに比べて約 60% 改善することでスイッチング損失を低減した。

### 4.3 パッケージ

サブエミッタ端子を追加するため、TO-247-4 パッケージを採用した。これにより図7に示すように、ゲート電流とコレクタ電流  $I_C$  が分離できるため、ターンオンやターンオフ時のコレクタ電流とエミッタの配線インダクタンスによって生じる逆起電力がゲート電圧に与える影響を抑えられるため、スイッチング損失が減少する。

## ⑤ 「XS シリーズ」 TO-247-4 の効果

### 5.1 スwitching 損失

図8に、1,200 V/75 A 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 パッケージ品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 パッケージ品と比較して、定格電流 75 A のときに 30% 低下している。

図9に、スイッチング損失のゲート抵抗依存性を示す。

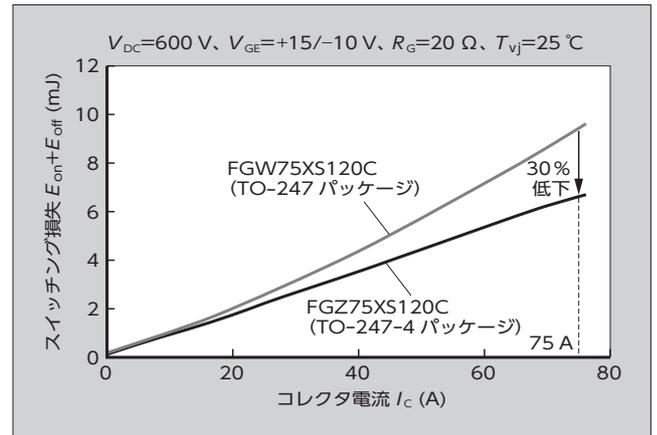


図8 TO-247-4 パッケージ品と TO-247 パッケージ品のスイッチング損失比較 ( $I_C$  依存性)

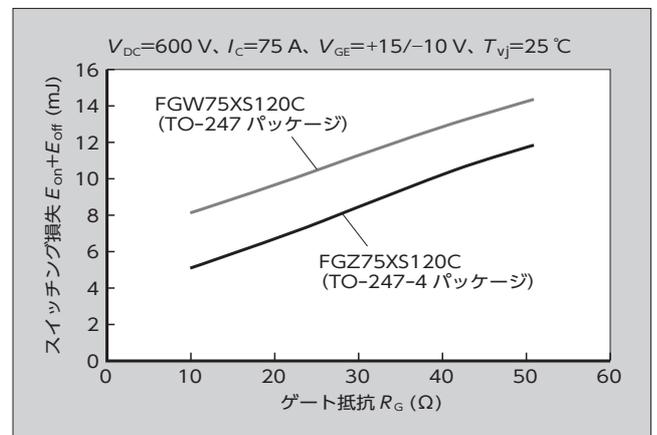


図9 TO-247-4 パッケージ品と TO-247 パッケージ品のスイッチング損失比較 ( $R_G$  依存性)

ゲート抵抗 10 ～ 51 Ω の範囲で TO-247 パッケージ品と比較して、TO-247-4 パッケージ品のスイッチング損失はおよそ 20 ～ 30% の範囲で低下した。

## 5.2 実動作評価

インバータ回路を模擬した模擬回路を使い、1,200 V/75 A 定格の TO-247-4 パッケージ品と TO-247 パッケージ品をそれぞれ動作させたときのパッケージ温度を図 10 に、IGBT ケースの温度  $R_G$  依存性を図 11 に示す。TO-247-4 パッケージ品のケース温度は、TO-247 パッケージ品と比較して最大で 4.5 °C 低くなることを確認した。ケース温度が低くなったことで、デバイスを取り付ける放熱フィンの小型化や、より大きな電力を扱うことが期待できる。

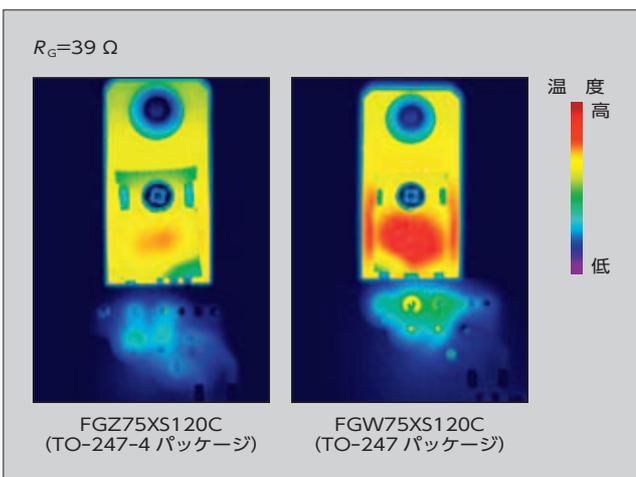


図 10 IGBT ケース温度 ( $I_{O(rms)} = 20 A$ )

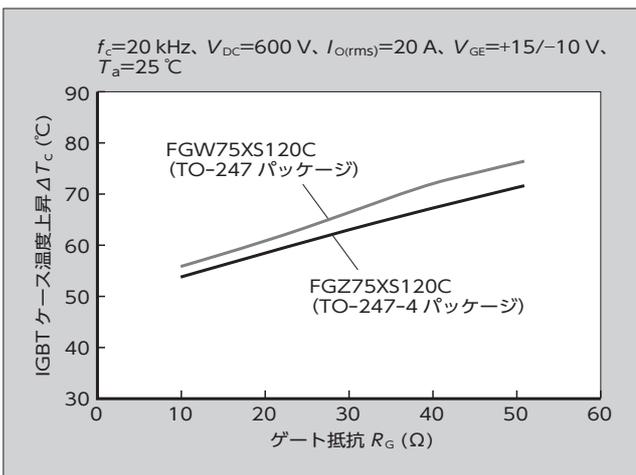


図 11 IGBT ケース温度  $R_G$  依存性

## 6 あとがき

ディスクリート IGBT 「XS シリーズ」 の系列拡大について述べた。サブエミッタ端子を追加した TO-247-4 パッケージ品がスイッチング損失とパッケージ温度上昇の低減に効果的であることを確認した。

本製品は、UPS や PCS を主な対象として開発したが、スイッチング電源の PFC 回路や産業機器などにも使用できる。

今後もデバイスのさらなる低損失化を進め、お客さまの要求に応える製品を供給していくことで、省エネルギー化、電力変換の高効率化に貢献していく所存である。

### 参考文献

- (1) 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.
- (2) 原幸仁ほか. 650 VディスクリートIGBT「XSシリーズ」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.236-240.
- (3) Heinzl, T. et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". PCIM Europe 2015.
- (4) Yoshida, K. et al. "Power Rating extension with 7th generation IGBT and thermal management by newly developed package technologies". PCIM Europe 2017.



原 幸仁

ディスクリート半導体デバイスの開発・設計に従事。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産業ディスクリート部。



前田 涼

ディスクリート半導体デバイスの開発・設計に従事。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産業ディスクリート部。



坂井 琢磨

パワー半導体のフィールドアプリケーションエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部営業統括部応用技術部。

# 第4世代臨界モード PFC 制御 IC 「FA1B00N」

“FA1B00N” 4th-Generation Critical Conduction Mode Power Factor Correction Control IC

日朝 信行 HIASA, Nobuyuki

遠藤 勇太 ENDO, Yuta

矢口 幸宏 YAGUCHI, Yukihiko

近年、電子機器の小型・軽量化に伴いスイッチング電源の普及が進んでおり、LED 照明などの電子機器の長寿命化と低価格化、高信頼性化と電源コスト低減の両立が求められている。富士電機はこれらの要求に応えるため、第4世代臨界モード PFC (Power Factor Correction) 制御 IC 「FA1B00N」を開発した。従来品が持つ機能に加え、起動時のオーバershoot 低減機能などの保護機能の追加、ならびに PFC 出力電圧や過電圧検出電圧の精度向上により、電子機器の信頼性向上と電源コスト低減を実現する。

As electronic devices become smaller and lighter, switching power supplies are becoming more widely used and are required to help electronic devices, such as LED lighting, to have a long life, low price, and high reliability while reducing power supply costs. To meet these demands, Fuji Electric developed the “FA1B00N” 4th-generation critical conduction mode (CRM) power factor correction (PFC) control IC. In addition to the conventional model’s functions, this IC features a startup overshoot reduction and other protective functions, as well as higher accurate detection for PFC output voltage and overvoltage. These enhancements enable it to improve the reliability of electronic devices and reduce power supply costs.

## 1 まえがき

電子機器の小型・軽量化に伴いスイッチング電源の普及が進んでいる。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。そこで、高調波電流を一定の値以下に抑えるため、国際規格 IEC 61000-3-2 において、表1に示すように電気・電子機器を四つのクラスに分類し、クラスごとに電源高調波電流の規制値を設定している。

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いる。

PFC 回路においても、省電力化のために待機電力の削減や、軽負荷を含めた広い負荷領域での効率向上が求められている<sup>(1)</sup>。

さらに、近年の LED 照明などの電子機器の長寿命化や低価格化に対する消費者の期待や要求を受け、PFC 回路においても高信頼性と電源コストの低減の両立が求められている。

富士電機は、これらの要求に応えるため、LED 照明用途向けに高調波電流規制のクラス C を満足する臨界モード PFC 制御 IC 「FA5601N」を量産している。この IC の特徴を継承しつつ保護機能をさらに強化し、電源コ

表1 高調波電流規制 (IEC 61000-3-2) の分類

分類	代表的な機器
クラスA	白物家電、音響機器
クラスB	手持ち電動工具、アーク溶接機
クラスC	照明機器
クラスD	PC、TV

ストの低減に貢献する第4世代臨界モード<sup>(注)</sup> PFC 制御 IC 「FA1B00N」を開発した。

## 2 「FA1B00N」の概要

今回開発した FA1B00N の外観を図1に、従来品である FA5601N との性能比較を表2に示す。

FA1B00N のブロック図を図2に示す。FA1B00N は、端子配列および基本機能を踏襲することで FA5601N からの置換えができるので、電源を設計する際のリードタイムの短縮につながる。

従来品が持つ機能に加え、起動時のオーバershoot 低減機能、PFC 出力電圧低下抑制機能と、 $V_{CC}$  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  $V_b$  の精度および、過電流検出電圧の精度を向上させた。

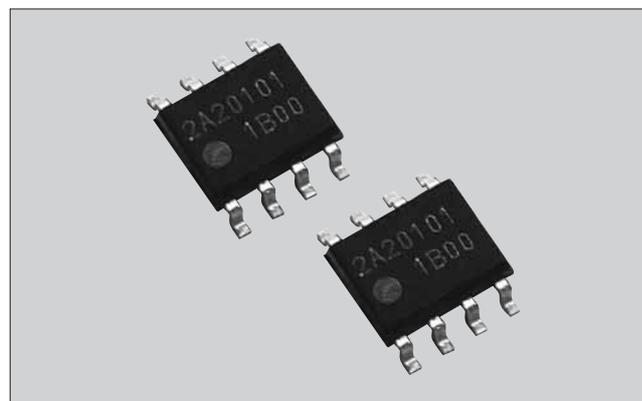


図1 「FA1B00N」

<注> 臨界モード：インダクタに流れる電流が0Aになったときに MOSFET をオンにする動作モード

表2 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 <sub>CC</sub> 電圧過電圧保護	あり	なし
V <sub>fb</sub> 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

これらの機能の追加や精度の向上により、電源のコストの低減と信頼性を向上した。

### 2.1 動作説明 (オン幅固定制御)

FA1B00N は、自動発振を利用して臨界動作する PFC 制御 IC である。図3に概略動作回路を、図4にスイッチング動作における各部の波形を示す。

図4の時刻  $t_1$  において、MOSFET ( $Q_1$ ) がオンすると、インダクタ ( $L_1$ ) の電流  $I_{L1}$  はゼロから上昇する。同時に、IC 内部の RAMP 発振器の出力  $V_{ramp}$  が RT 端子の抵抗  $R_3$  で決まる傾きで上昇する。

時刻  $t_2$  において、 $V_{ramp}$  とエラーアンプの出力である誤差増幅電圧  $V_{comp}$  を PWM コンパレータ (PWM comp.)

が比較し、 $V_{ramp} > V_{comp}$  で  $Q_1$  をオフする。 $Q_1$  がオフすると、 $I_{L1}$  は反転し、昇圧ダイオード ( $D_1$ ) を通して出力側に電流を供給しながら、 $I_{L1}$  は減少し、補助巻線の電圧  $V_{sub}$  も反転しプラスの電圧が発生する。

時刻  $t_3$  において、 $I_{L1}$  が完全にゼロに戻ると  $Q_1$  のドレイン・ソース電圧  $V_{ds}$  は  $Q_1$  のドレイン・ソース間の寄生容量と共振し、急速に低下する。同時に  $V_{sub}$  も急速に低下する。

時刻  $t_4$  において、 $V_{sub}$  がゼロ電流検出電圧以下になるタイミングをゼロ電流検出コンパレータで検出し、 $Q_1$  をオンさせる。この動作の繰返しにより、IC は臨界動作する。

上記動作において、PFC 回路の負荷が一定の場合、 $V_{comp}$  は一定となるため、オン幅も一定となる。このとき、インダクタのピーク電流は式(1)で与えられる。

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{L} \times T_{on} \dots\dots\dots(1)$$

- $I_{max}$  :  $L_1$  のピーク電流
- $V_{in}$  : 入力電圧
- $L$  :  $L_1$  のインダクタンス値
- $T_{on}$  : オン幅

式(1)において、 $L$ 、 $T_{on}$  は一定のため、 $L_1$  のピーク電流は  $V_{in}$  に比例し、その波形は入力電圧と同じ AC 波形となる。この動作により力率改善が可能となる。

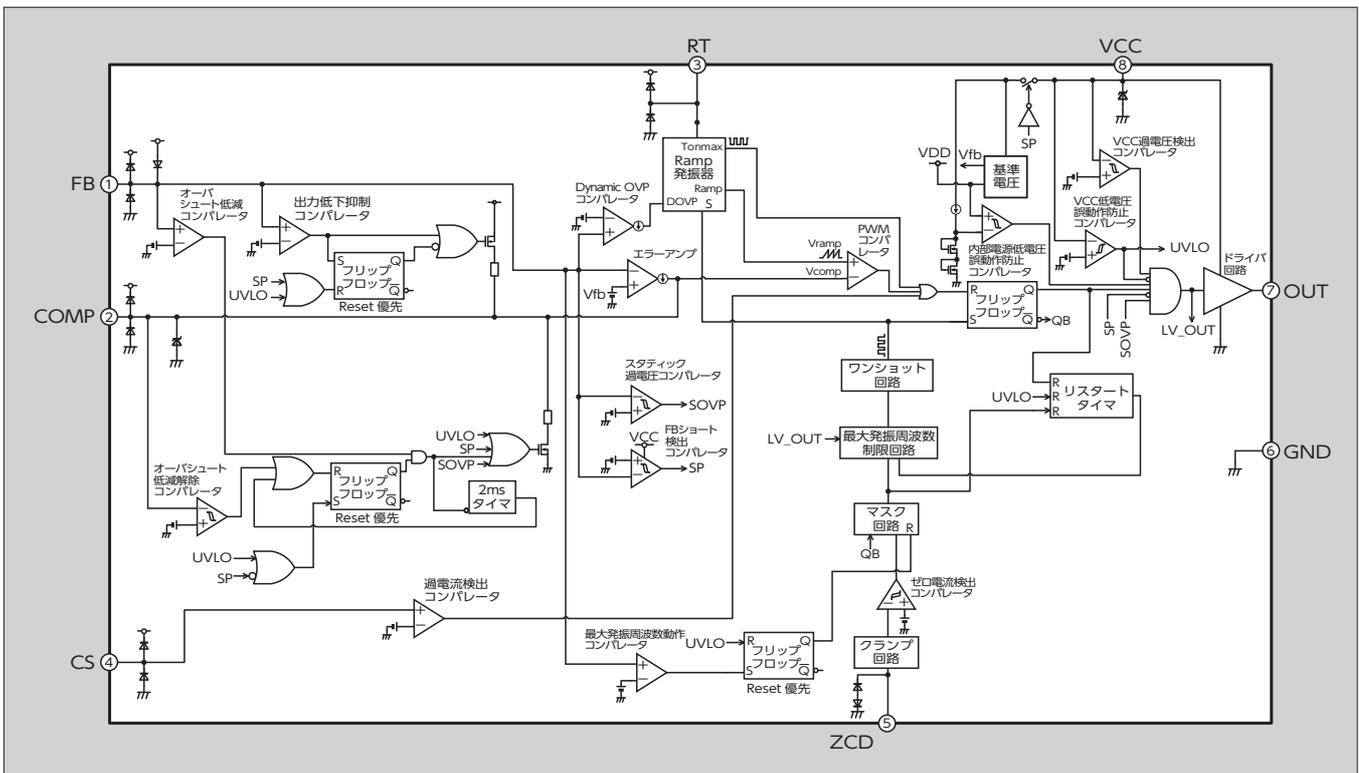


図2 「FA1B00N」のブロック図

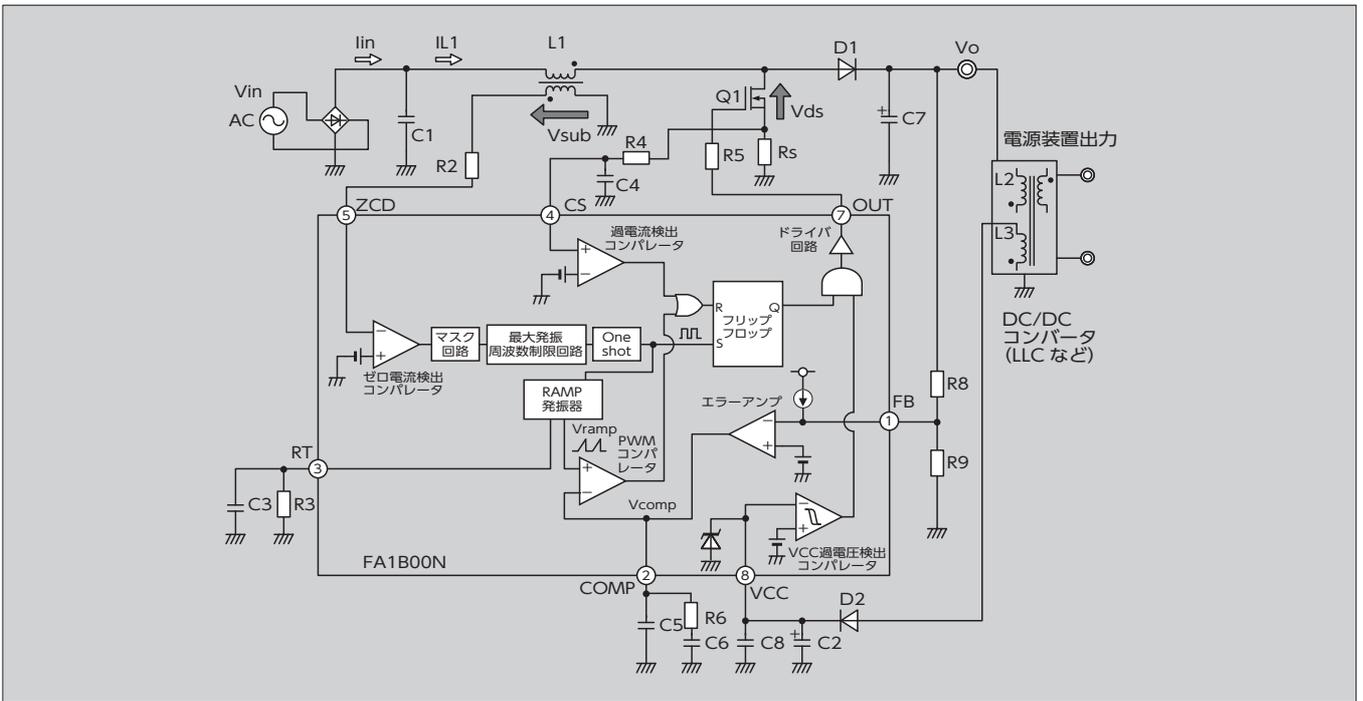


図3 概略動作回路

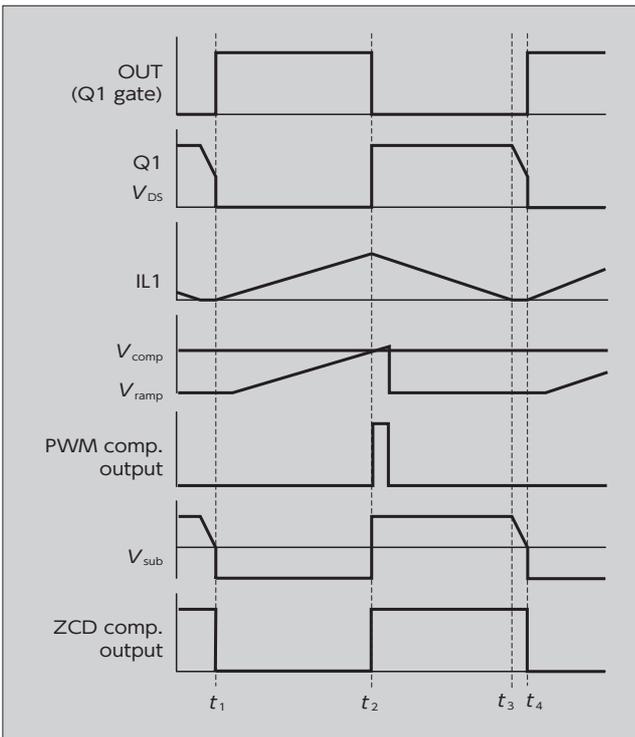


図4 スイッチング動作における各部波形

### 3 特徴

#### 3.1 オーバershoot低減機能

PFC回路では、AC入力電圧の周波数成分を持った出力電圧リップルが発生する。この出力電圧リップルがPFC制御ICの動作に与える影響を低減するためには、一般的にCOMP端子に接続するコンデンサ容量を大きくして

いる。しかし、コンデンサ容量が大きくなると起動時の $V_{comp}$ の応答が遅れが生じ、PFC回路の出力電圧が上昇し、オーバershootが発生する。

また、電源のコストを低減するため、PFC回路の出力に接続する電解コンデンサの定格電圧（耐圧）は、PFC回路の出力設定電圧に対して十分な耐圧マージンを確保していないことが多い。そのため、起動時にPFC回路の出力電圧が電解コンデンサの定格電圧の近くまでオーバershootし、電解コンデンサの寿命を縮めたり、破壊に至る可能性がある。

このような問題を解決するため、FA1B00Nは、起動時にPFC回路の出力電圧のオーバershootを低減する機能

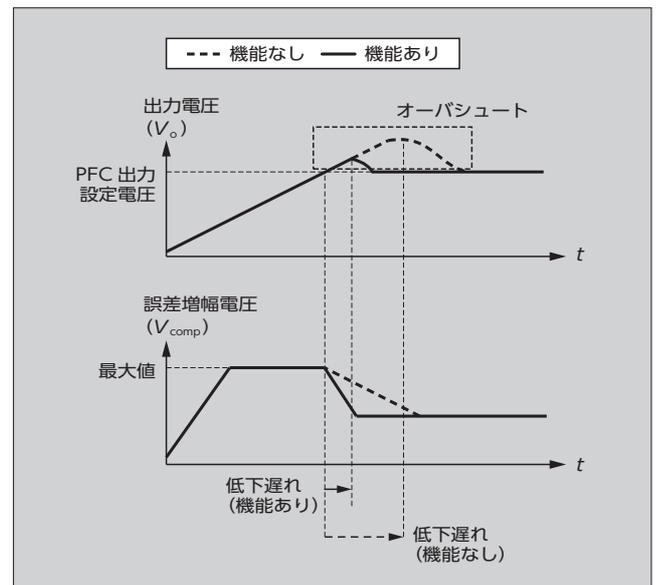


図5 オーバershoot低減機能の動作波形

を内蔵している<sup>(3)</sup>。図5にこの機能の動作波形を示す。

PFC 制御 IC は、 $V_{comp}$  が高い程大きな電力を PFC 回路の出力に供給する。起動時は PFC 回路の出力電圧を設定電圧まで上昇させるために大きな電力が必要なので、 $V_{comp}$  は最大値まで上昇する。しかし、PFC 回路の出力電圧が設定値まで到達しても、COMP 端子に接続されたコンデンサの影響で  $V_{comp}$  の低下が遅れる。そのため、電力を過剰に供給し、PFC 回路の出力電圧にオーバershootが発生する。そこで、FA1B00N では、起動時に PFC 出力電圧が設定電圧値に到達したときに  $V_{comp}$  を一時的に引き下げることで電力の過剰状態を解除し、起動時のオーバershootを低減している。これにより、耐圧マージンが小さい電解コンデンサを安全に使用でき、電源のコストの低減につながる。

### 3.2 PFC 回路の出力電圧低下抑制機能

電源のコストを低減するために、PFC 回路の出力に接続する電解コンデンサの容量を小さくすることが望ましい。しかし、電解コンデンサの容量が小さい場合、PFC 回路の後段に接続する DC/DC コンバータの負荷が急増すると、PFC 回路の出力電圧が大きく低下する。図6(a)に従来の動作波形を示す。PFC 回路の出力電圧が低下すると、 $V_{comp}$  が上がり、出力電圧を設定電圧値まで上昇させようとする。しかし、COMP 端子に接続されたコンデンサの容量が大きいと  $V_{comp}$  の応答が遅れるため、出力電圧の低下が発生する。この出力電圧が DC/DC コンバータの最低入力電圧を下回ると、DC/DC コンバータが停止し、負荷に電力を供給できなくなる場合がある。

そこで、FA1B00N は、PFC 回路の出力電圧低下を抑制する機能を内蔵した。図6(b)にこの機能の動作波形を示す。

FA1B00N では、PFC 回路の出力電圧が PFC 出力電圧低下抑制しきい値よりも低くなると  $V_{comp}$  を強制的に引き上げ OUT 端子のオン幅を広げ、電力の供給量を増やすことで、PFC 回路の出力電圧の低下を抑制する。その結果、安定した出力電圧を後段の DC/DC コンバータに供給でき

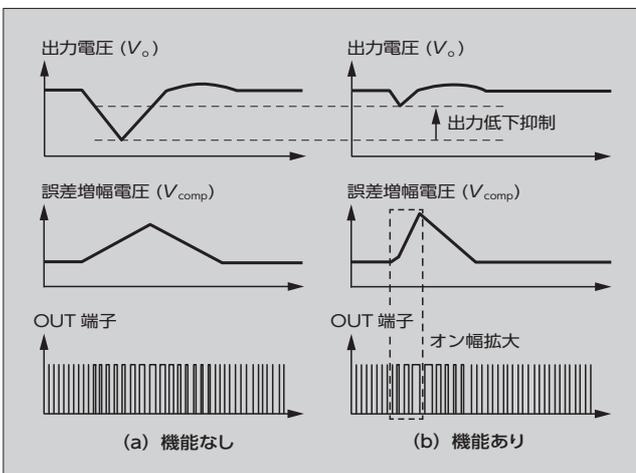


図6 PFC 出力低下抑制機能の動作波形

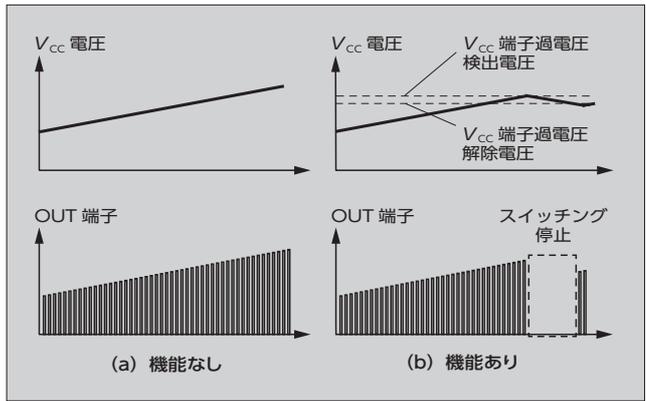


図7  $V_{CC}$  電圧の過電圧保護機能の動作波形

る。また、容量の小さな電解コンデンサが使用できるので電源コストの低減につながる。

### 3.3 $V_{CC}$ 電圧の過電圧保護機能

PFC 制御 IC の VCC 端子への電圧供給は、一般にトランスの補助巻線 ( $L_3$ ) を使用して AC 入力電圧を降圧させ、補助巻線に発生する電圧をダイオードで整流し、コンデンサで平滑させて供給する。この方式は、過負荷などで電源の出力電流が大きくなった場合、VCC 端子に接続された IC 内部の回路や MOSFET が破壊する可能性がある。そのため、保護用にツェナーダイオードを接続することがある。

FA1B00N は、図7に示すように VCC 端子電圧が  $V_{CC}$  過電圧検出電圧に達すると、OUT 端子のスイッチングを停止し、MOSFET を過電圧破壊から保護する機能を内蔵している。この機能により、VCC 端子に接続された IC 内部の回路や MOSFET のゲートを保護するためのツェナーダイオードが不要となり、電源のコストの低減につながる。

このような保護機能以外にも、PFC 回路出力電圧制御の基準電圧の精度を向上させた。これにより PFC 回路の出力電圧の上限が下がり、PFC 回路に接続される電解コンデンサの耐圧に対するマージンが、従来よりも大きくなり、電解コンデンサの破壊が防止できる。

また、MOSFET に流れる過電流の検出精度を向上させた。その結果、過電流発生時に即時に MOSFET をオフすることで過電流を制限することができるので、MOSFET などの電源部品の破壊を防止し、電源の信頼性を向上できる。

### 3.4 軽負荷時の高効率化 (最大発振周波数制限)

臨界動作では、軽負荷時にスイッチング周波数が増加するため、MOSFET のスイッチング損失が増加し、効率が低下するという問題があった。

FA1B00N は、軽負荷時の効率を改善するため、従来品の FA5601N と同様に最大発振周波数制限機能を持っている。軽負荷時にスイッチング周波数が RT 端子の抵抗で決まる最大発振周波数  $F_{max}$  以上になると、インダクタ電流がゼロになるタイミングを検出しても、 $1/F_{max}$  よりも

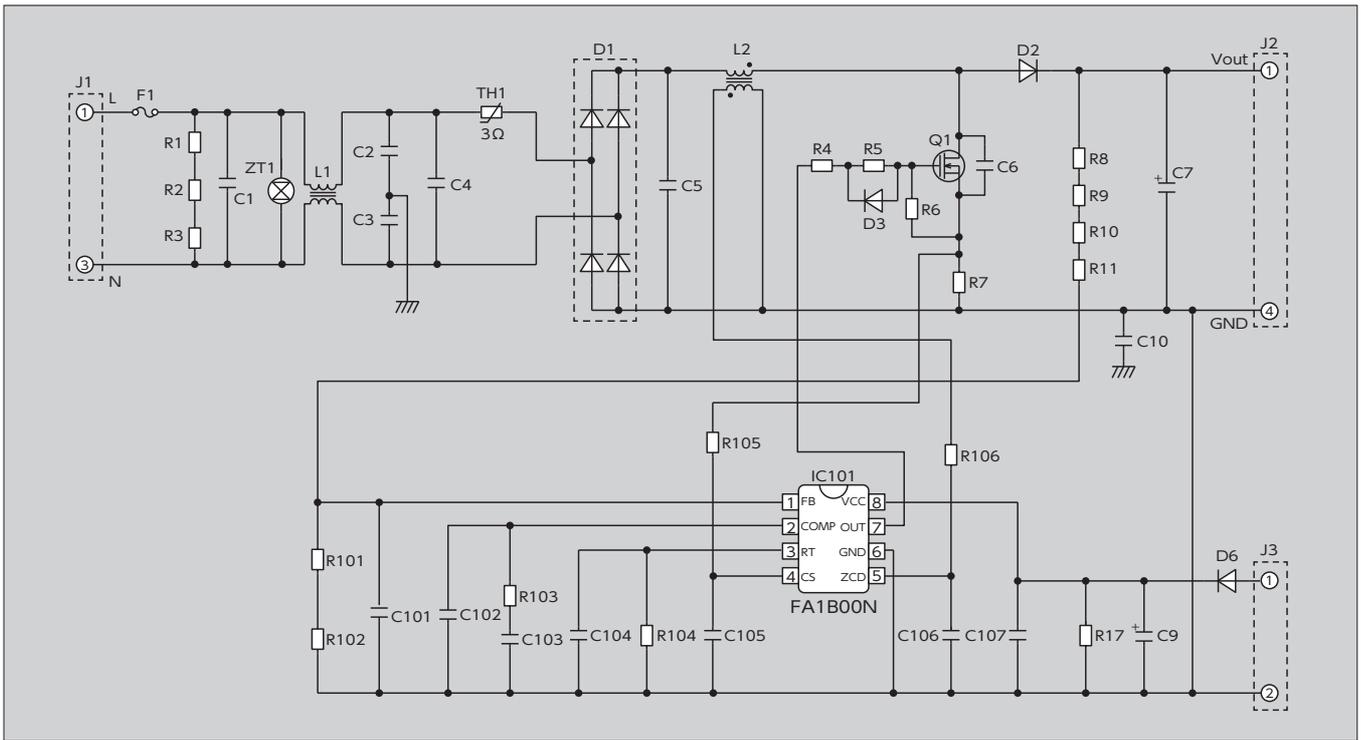


図8 応用回路例

遅い周期でターンオンする。この最大発振周波数制限機能により、スイッチング周波数の増加を抑制するため、スイッチング損失が減り、軽負荷時の効率が向上する。さらに、MOSFETの発熱も少なくなり放熱用ヒートシンクが小さくなるので、電源のコスト低減につながる。

4 応用回路例

図8に、LED照明を想定したPFC回路の応用回路例(入力90~264V、出力390V、150W)を示す。

図9に示すように、標準的な入力電圧(110V、220V)でかつ定格負荷(150W)において、一般的な電子機器に求められる力率0.95以上を確保している。

図10に示すように、高調波電流特性は、照明機器に必要な国際規格IEC 61000-3-2のクラスCを満足している。

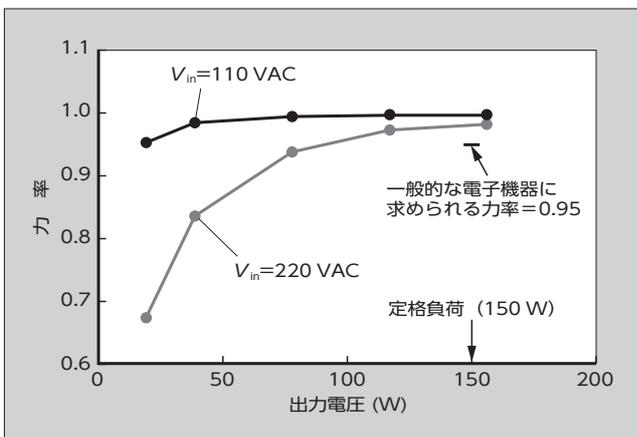


図9 力率特性

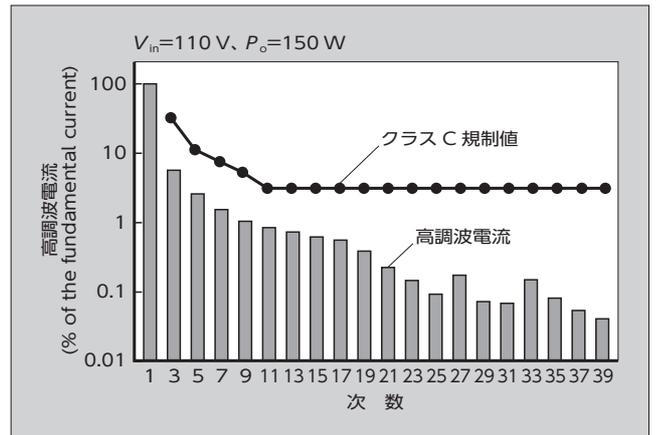


図10 高調波電流特性

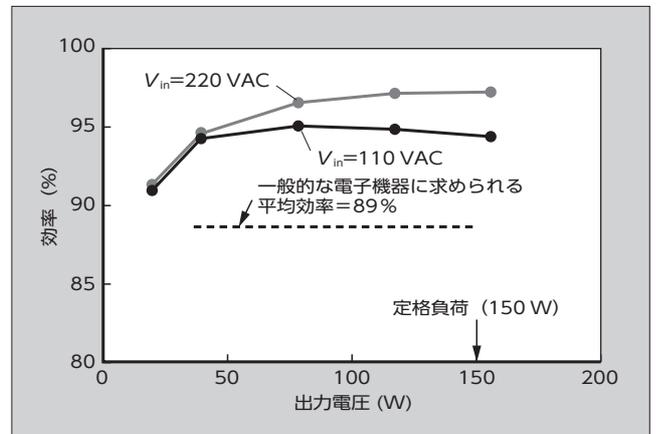


図11 効率特性

図11に示すように、標準的な入力電圧(110V、220V)の平均効率(負荷が25%、50%、75%、100%時の効率の平均値)は、一般的な電子機器に求められる89%以上を確保している。

## 5 あとがき

第4世代臨界モードPFC制御IC「FA1B00N」について述べた。本IC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、電源コストの低減が可能となる。

今後も、さらなる低待機電力化、高効率化を行うとともに、電源部品削減を可能とする製品を提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) 日朝信行ほか. 第4世代臨界モードPFC制御IC「FA1B00N」シリーズ. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.230-235.
- (2) 菅原敬人ほか. 第2世代臨界モードPFC制御IC「FA5590」シリーズ. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.405-410.

- (3) 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.



### 日朝 信行

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



### 遠藤 勇太

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



### 矢口 幸宏

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



# 1.2 kV SiC スーパージャンクション MOSFET

## 1.2 kV SiC Super Junction MOSFET

俵 武志 TAWARA, Takeshi

馬場 正和 BABA, Masakazu

竹中 研介 TAKENAKA, Kensuke

4H-SiC を材料にした 1.2 kV 耐圧の SiC スーパージャンクション MOSFET (SiC-SJ-MOSFET) を n 型エピタキシャル成長と Al イオン注入を繰り返して作製し、静特性とリカバリー特性を評価した。SiC-SJ-MOSFET の 175°C のオン抵抗は、従来の SiC トレンチゲート MOSFET に比べて、55% ~ 67% に低下した。またリカバリー特性についても、175°C ではわずかに蓄積電荷量が増加する程度であり、過大なサージ電圧も見られなかった。これらの結果から SiC-SJ-MOSFET をインバータ回路に適用した際には、トータル損失の低減が期待できる。

Fuji Electric formed a 4H-SiC-based 1.2-kV SiC super junction MOSFETs (SiC-SJ-MOSFETs) by repeating n-type epitaxial growth and Al ion implantation and verified its static and recovery characteristics. The on-resistance of the SiC-SJ-MOSFETs at 175°C was 67% to 55% that of the conventional trench gate MOSFETs. In terms of recovery characteristics, the SiC-SJ-MOSFETs did not show an excessive surge voltage despite a slight increase in accumulated charge at 175°C compared with conventional SiC trench gate MOSFETs. We expect that the use of SiC-SJ-MOSFETs in inverter circuits will contribute to reducing total loss.

### ① まえがき

炭化けい素 (SiC) を基板に用いた SiC パワーデバイス、シリコン (Si) よりも絶縁破壊電界が一桁高い材料特性を生かし、ドリフト層のドーピング濃度を高めることで導通損失を減らすことができる。富士電機では、650 V ~ 3.3 kV 耐圧クラスの SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) や 1.2 kV 耐圧クラスの SiC-MOSFET (Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を量産している。長年、SiC-MOSFET に関しては導通時のチャネル抵抗が高く、特性オン抵抗  $R_{on} \cdot A$  が下がらない問題があった。近年、トレンチゲートを採用したセルピッチの縮小や短チャネル技術により、チャネル抵抗の低減が急速に進んでいる<sup>(1)</sup>。今後、さらなる  $R_{on} \cdot A$  の低減のためには、MOSFET 抵抗の主要な部分を占めるドリフト層抵抗のより一層の低減に取り組む必要がある。

本稿では、ドリフト層抵抗を低減した 1.2 kV 耐圧クラスの SiC スーパージャンクション MOSFET (SiC-SJ-MOSFET) のデバイス特性について主に述べる。

### ② SJ 構造のメリット

スーパージャンクション (SJ) 構造は耐圧を低下させずに、ドリフト層抵抗を効果的に下げることができる構造である。1997 年に発表されて以来、各社で開発が行われている<sup>(2)</sup>。縦型 SJ 素子の場合、ドリフト層に周期的な p-n カラム構造を形成することにより、従来の素子に比べて

$(32/27) \cdot (d \cdot E_c / V_B)$  倍にドリフト層抵抗を下げることができる ( $d$ 、 $E_c$ 、 $V_B$  はそれぞれ、カラム幅、絶縁破壊電界および耐圧<sup>(2)</sup>)。SJ 構造ではカラム幅を微細化することでオン抵抗を下げるのが可能であり、Si の SJ-MOSFET では Si 限界を超えて低いオン抵抗が得られている。一方、絶縁破壊電界が Si より一桁高い SiC に適用した場合でも耐圧が高い素子ではドリフト層抵抗を十分に低減できる。例えば SiC を用いて耐圧 1.6 kV の SJ-MOSFET<sup>(3)</sup> を作製した際には、ドリフト層抵抗はおおよそ半分になると推定される。図 1 に Si-SJ-MOSFET、Si-IGBT、SiC-MOSFET、SiC-SJ-MOSFET のオン抵抗と耐圧の関係を示す。SJ 構造によって SiC の場合でも高耐圧素子になるほどトレードオフは改善する。

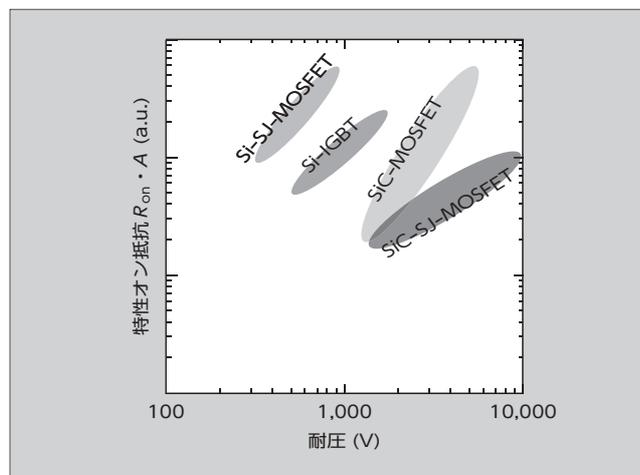


図 1 特性オン抵抗と耐圧の関係

〈注 1〉特性オン抵抗：単位面積で規格化したオン抵抗。導通損失の性能指標。

### ③ SiC-SJ-MOSFET の作製

Si-SJ-MOSFET では多段エピタキシャル成長方式が知られており、n 型エピタキシャル成長と p 型イオン注入を繰り返し、最後に熱拡散によりカラムを形成する<sup>(4)</sup>。一方、SiC を半導体材料に用いて SJ 構造を形成する場合、通常 p 型ドーパントとして用いるアルミニウム (Al) は、SiC 中の拡散係数が小さいために熱拡散が使えない。イオン注入を使ってカラムを形成する方法<sup>(5)</sup>や n 型ドリフト層にトレンチを掘り p 型エピタキシャル層をトレンチ内に埋め込む方法<sup>(6)</sup>が提案されている。今回は、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) のプロジェクトの成果を活用し、窒素 (N) ドープエピタキシャル成長と Al イオン注入を繰り返す行うことで深いカラムを形成し、1.2 kV 耐圧クラスの SiC-SJ-MOSFET を試作した。SiC の場合、注入イオンが熱拡散しにくいために比較的容易にカラム幅を微細化することが可能であり、今回は従来の半分のカラム幅の素子も試作した。

図 2 に、試作した 1.2 kV 耐圧クラスの SiC-SJ-MOSFET の素子構造を示す。いずれもトレンチゲートである。標準 SiC-SJ-MOSFET (SiC-SJ)、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET (SiC-narrow-SJ-pitch)、およびリファレンスとして SiC-non-SJ-MOSFET (SiC-non-SJ) を試作した。標準 SiC-SJ-MOSFET では、p カラム

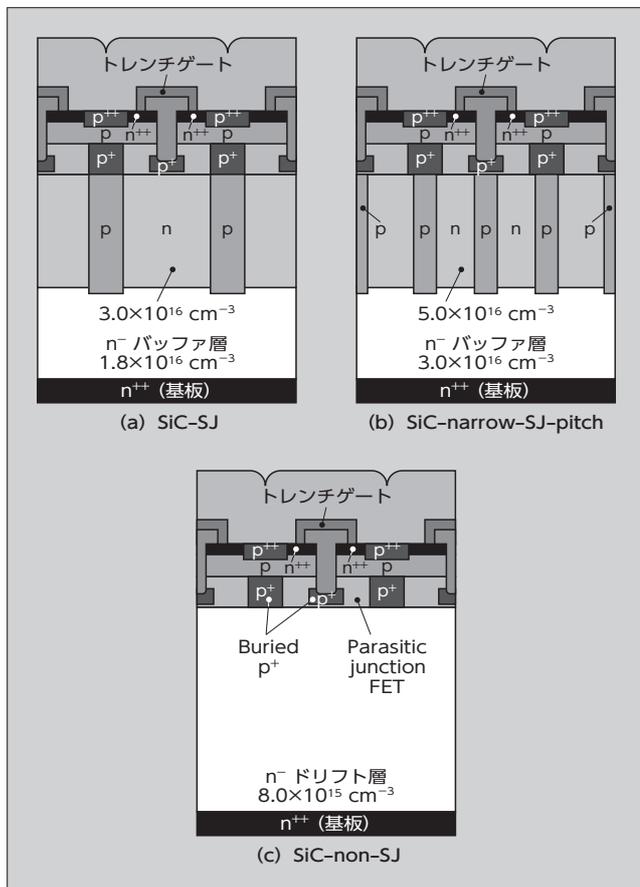


図 2 試作した素子構造

をトレンチゲート間に形成している。SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET は、耐圧を維持したままオン抵抗を下げるため、標準 SiC-SJ-MOSFET に比べて p、n カラム濃度を高め、カラム幅を半分にして、カラム間隔を狭めている。SiC-non-SJ-MOSFET は比較のためにドリフト層に SJ 構造を持たない通常のトレンチゲート MOSFET である。なお、今回試作した素子は、ハードリカバリー特性を抑制するために提案されている SJ 構造の下部にバッファ層を設けた Semi-SJ 構造を採用している。

SJ 構造は、4 度オフ n 型 4H-SiC 基板上に 4.4 μm の n<sup>-</sup> バッファ層を成長した後、その上に 0.65 μm の n ドープエピタキシャル層を 7 回成長した。p カラムは、n ドープエピタキシャル層を形成するたびに合計 8 回の Al イオン注入を行い形成した。図 3 に標準 SiC-SJ-MOSFET の作製プロセスの一部を示す。多段エピタキシャル成長を行った後は、SiC-non-SJ-MOSFET と同様の工程で上部のトレンチゲート MOSFET 構造を作製してい

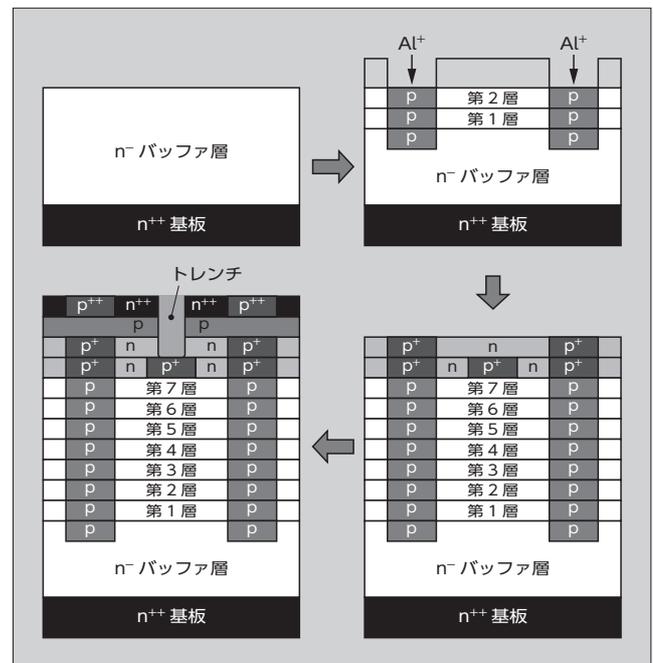


図 3 SiC-SJ-MOSFET の作製プロセス

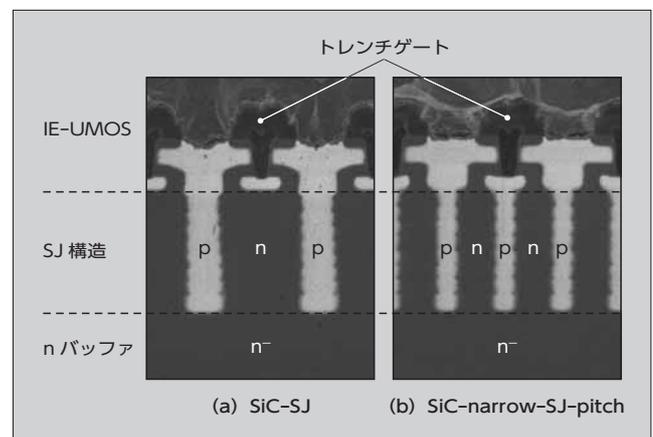


図 4 SJ 構造の断面 SEM 像

る。図4に試作した標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の断面 SEM (Scanning Electron Microscope) 像を示す。多段エピタキシャル成長方式により、垂直な p カラムが形成できていることが分かる。

4 静特性

作製した素子は 3 mm×3 mm サイズであり、TO-247 パッケージに組み込んで評価した。なお、各素子の定格電流は 18 A (330 A/cm<sup>2</sup>) である。

試作した素子の室温および 175 °C でゲート電圧を 20 V に設定したときの  $R_{on} \cdot A$  の温度依存性を図5に示す。SiC-non-SJ-MOSFET に比べ、いずれの温度でも標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET はオン抵抗が低下し、さらに高温でオン抵抗が上昇しにくい特徴を示した。標準 SiC-SJ-MOSFET の 175 °C の  $R_{on} \cdot A$  は、SiC-non-SJ-MOSFET に比べて 67% に低下した。また同様に SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET では 55% に低下した。SiC-SJ-MOSFET のオン抵抗が高温で大幅に下がる理由は、高温になるほど電子移動度が低下してドリフト層抵抗が増大し、オン抵抗におけるドリフト層抵抗の占める割合が増え、SJ 構造の効果が顕著になるためである。

標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の  $R_{on} \cdot A$  を比べると、室温では差がほぼないものの、175 °C では SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の方が低い値を示した。その理由として、室温ではチャンネル抵抗、基板抵抗や JFET 抵抗<sup>(注2)</sup>などに比べドリフト層抵抗が小さいので、試作した素子間の差が顕著ではなかった。しかし、高温では電子移動度の低下によりドリフト層抵抗が大きくなるため、ピッチ縮小の効果が現れ、試作した素子抵抗の差が顕著になったと推測される。この結果から、ドリフト層抵抗が支配的な場合には、カラム幅を狭めて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。

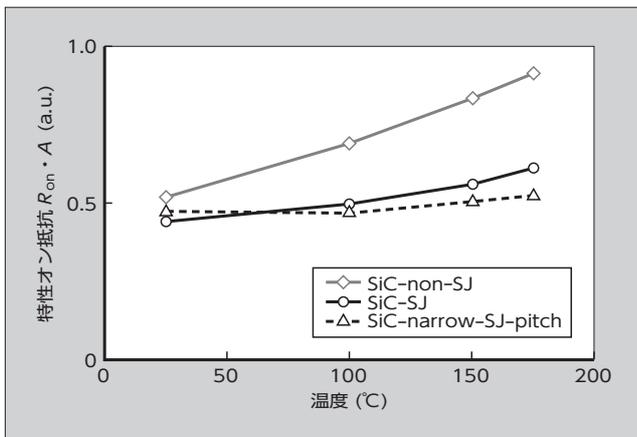


図5 特性オン抵抗の温度依存性

〈注2〉 JFET 抵抗：隣接する p 型領域からの n 型領域へ空乏層が伸びて電流通路を狭める JFET 効果によるオン抵抗増加分。

図6に室温の耐压波形を示す。いずれの構造も 1.2 kV 耐压クラスの素子として十分な特性を示した。

次にボディダイオードの  $I-V$  特性と、特性から算出した微分コンダクタンス  $di/dv$  と  $V_F$  の温度依存性を図7および図8に示す。SiC-non-SJ-MOSFET は室温から 175 °C にするとわずかだが  $di/dv$  が増加 (微分抵抗が減少) している。一方、標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET では高温で  $di/dv$  が減少 (微分抵抗が増加) している。高温におけるボディダイオードの微分

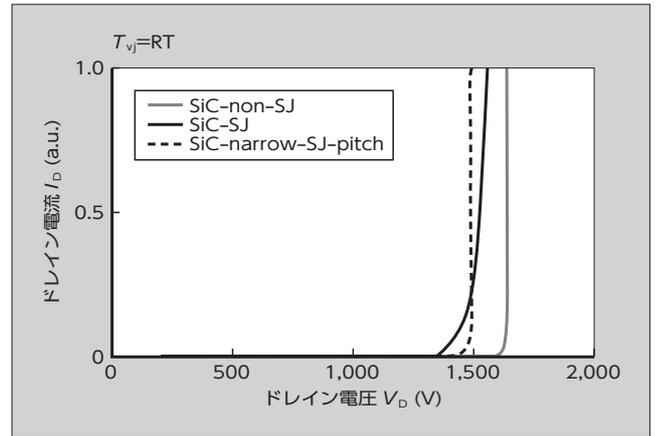


図6 耐压波形

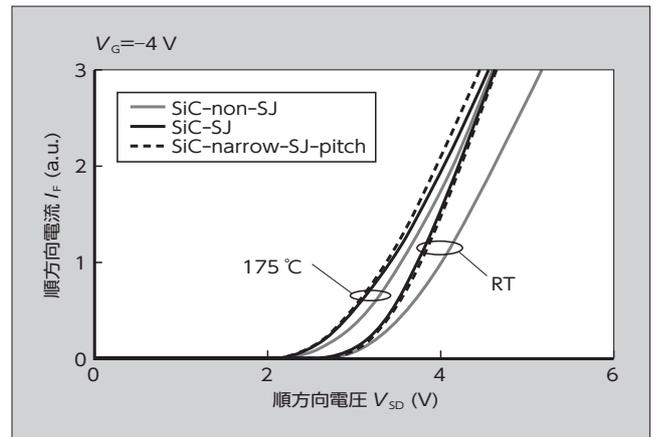


図7 ボディダイオードの  $I_F-V_{SD}$  特性

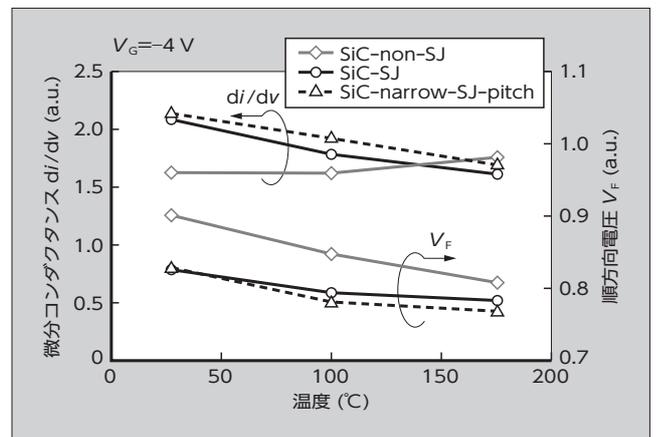


図8 ボディダイオードの  $di/dv$ 、 $V_F$  の温度依存性

抵抗は、キャリア注入量の増加による抵抗減少と、移動度低下による抵抗増加のバランスで決まる。図8の結果から、高温において、SiC-SJ-MOSFETではSiC-non-SJ-MOSFETに比べてキャリア注入量が少なく、移動度低下の影響を強く受けていると考えられる。また、SiC-SJ-MOSFETでキャリア注入量が少ない原因としては、例えば、pカラム作製の際のイオン注入ダメージに起因してSJ構造部のキャリアライフタイムが短くなっていることなどが考えられる。

5 ボディダイオードのリカバリ特性と波形

近年、モジュールコスト低減や熱分布を改善するため、インバータ回路において外付けSBDの代わりに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ており、ボディダイオードのリカバリ特性が注目されている。Si-SJ-MOSFETではリカバリ特性が悪いことが報告されているが、SiC-SJ-MOSFETの場合についても調査する必要がある。

(1) ボディダイオードのリカバリ特性

スイッチング時のボディダイオードのリカバリ特性評価の結果について述べる。評価は図9に示す単純なチョップパ回路を用い、素子はSiC-non-SJ-MOSFET、標準SiC-SJ-MOSFET素子を用いた。ゲート電圧は

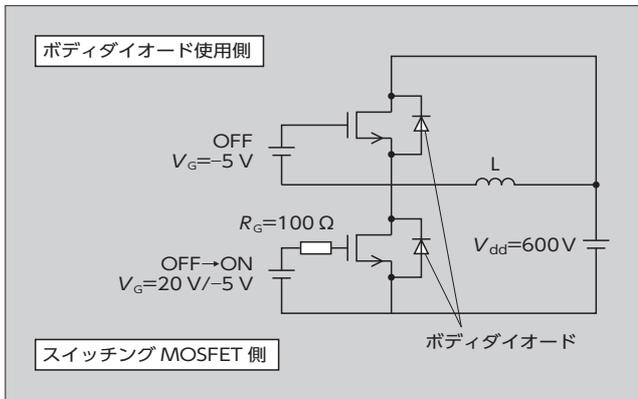


図9 スwitching特性の評価回路

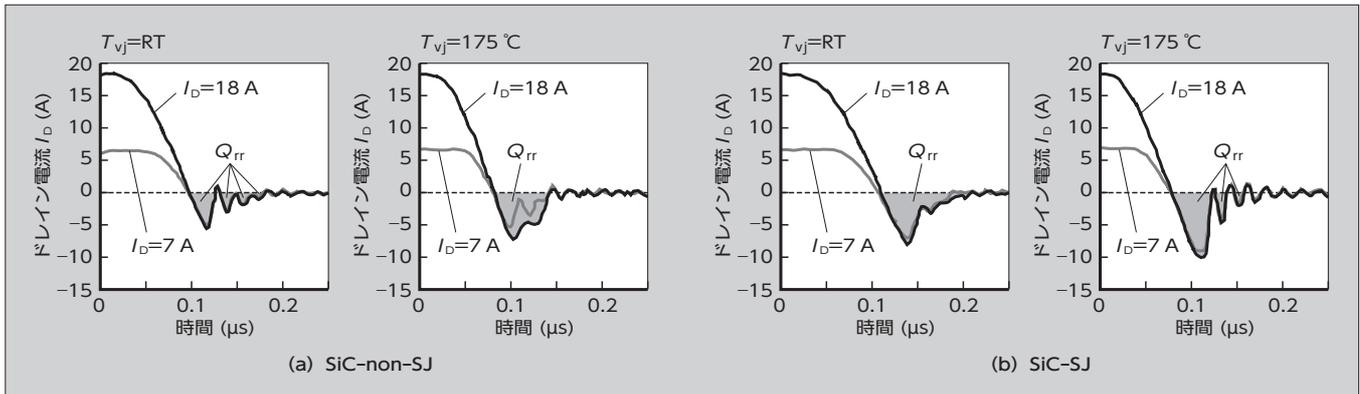


図10 ボディダイオードのリカバリ波形

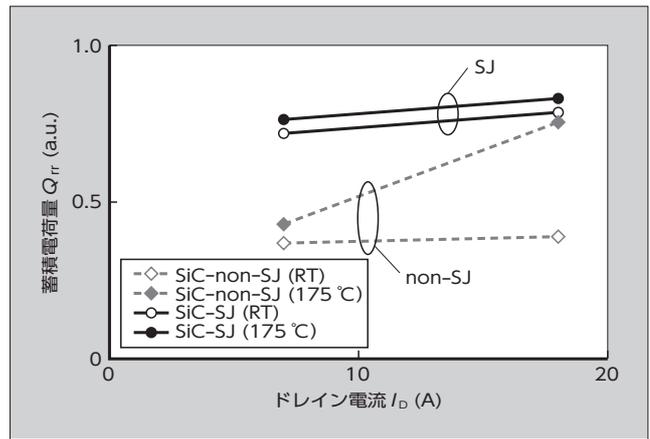


図11 Qrrのドレイン電流、温度依存性

$V_g=+20V/-5V$ であり、ゲート抵抗は $100\Omega$ である。図10に室温RTと $175^\circ C$ のリカバリ波形を示す。ドレイン電流 $I_D$ は $7A$ および $18A$ に設定した。図10に示すように蓄積電荷 $Q_{rr}$ はリカバリ波形において、振動分を考慮した逆電流を時間積分した値である。ボディダイオードが順バイアスの際に素子内に蓄積される電荷量である $Q_{rr}$ によって逆バイアス時に逆電流が流れて損失が発生するため、 $Q_{rr}$ は小さいことが望ましい。Si-SJ-MOSFETではpnカラムから注入されるキャリアのライフタイムが長いこと、 $Q_{rr}$ が大きくなることが報告されている。

図11に示すように室温時や低電流密度の場合は、nカラム濃度、pn接合面積によるドレイン・ソース容量の違いを反映して、SiC-non-SJ-MOSFETに比べて標準SiC-SJ-MOSFETの $Q_{rr}$ が高い。しかし、高温になりp層からのキャリア注入が増えてくると、SiC-non-SJ-MOSFETでは $Q_{rr}$ が急増するのに対し、標準SiC-SJ-MOSFETでは $Q_{rr}$ の増加量はわずかである。

$Q_{rr}$ のドレイン電流、温度依存性の結果は、標準SiC-SJ-MOSFETがSiC-non-SJ-MOSFETに比べてキャリア注入効率が低いことを示唆しており、ボディダイオードのI-V特性の温度変化とも整合している。このことから、高温、大電流通電時のスイッチング条件下では、標準SiC-SJ-MOSFETとSiC-non-SJ-MOSFETのリカバリ損失の差は小さくなる。

## (2) ボディダイオードのリカバリー波形

ボディダイオードのリカバリー波形の  $di_R/dt$  について述べる。 $di_R/dt$  は逆電流がピークを過ぎた後、ゼロになるまでの電流減少速度の最大値である。過大な  $di_R/dt$  は EMI ノイズや回路内にサージ電圧を発生させる原因となるため、値は小さいほうが望ましい。しかしながら、Si-SJ-MOSFET では注入されたホールがすぐに p カラム近傍から電界によって吐き出されるために、 $di_R/dt$  が大きいハードリカバリー特性となることが知られている。

SiC-non-SJ-MOSFET、標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の 175°C のリカバリー波形を図 12 に示す。また波形から求めた  $di_R/dt$  値の温度依存性を図 13 に示す。室温から 175°C にかけて標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の  $di_R/dt$  が大きくなるものの、SiC-non-SJ-MOSFET の 3~4 倍程度に抑制されており、ボディダイオードのサージ電圧に大きな差は見られなかった。

Si の SJ-MOSFET はボディダイオードの  $Q_{rr}$  やサージ電圧が大きいいため、インバータ回路への適用は難しい。一方、SiC の SJ-MOSFET の場合、低  $Q_{rr}$  や低サージ電圧が電子線照射などの特別な処理なしで実現できており、インバータに搭載するハードルは Si よりも低いと考えられる。今後、特性改善を進めることにより、リカバリー

特性に優れた SiC-SJ 素子の実現の可能性がある。

## ⑥ あとがき

Semi-SJ 構造を備えた 1.2 kV 耐圧クラスの SiC-SJ-MOSFET について室温、高温での静特性、動特性の評価を行った。今回試作した SiC-SJ-MOSFET の 175°C の  $R_{on} \cdot A$  は、従来の SiC-non-SJ-MOSFET に比べて、55%~67% に低下した。SiC-SJ-MOSFET は温度依存性が小さいことから、将来的な超高温動作時には両構造の  $R_{on} \cdot A$  の差は広がると期待される。SiC-SJ-MOSFET の低  $R_{on} \cdot A$  による定常損失が少ないメリットを生かし、さらに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) 殿の事業として行われた。試作・評価、および議論に関してご協力頂いた小林勇介氏、京極真也氏、森本忠雄氏、熊澤輝頭氏、山城祐介氏、原田信介氏に深く謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Harada, S. et al. "1200 V SiC IE-UMOSFET with Low On-Resistance and High Threshold Voltage". Mat. Sci. Forum 897 (2017) p.497.
- (2) Fujihira, T. "Theory of Semiconductor Superjunction Devices". Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) p.6254.
- (3) Harada, S. et al. "First Demonstration of Dynamic Characteristics for SiC Superjunction MOSFET Realized using Multi-epitaxial Growth Method". IEDM (2018) p.181.
- (4) Deboy, G. et al. "A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon". IEDM (1998) p.683.
- (5) Kosugi, R. et al. "First experimental demonstration of SiC super-junction (SJ) structure by multi-epitaxial growth method". Proc. ISPSD2014 (2014) p.346.
- (6) Kosugi, R. et al. "Breaking the Theoretical Limit of 6.5 kV-Class 4H-SiC Super-Junction (SJ) MOSFETs by Trench-Filling Epitaxial Growth". (Late News) Proc. ISPSD2019 (2019) p.39.
- (7) Lorenz, L. et al. "COOLMOSTM - a new milestone in high voltage Power MOS", Proc. ISPSD1999 (1999) p.3.
- (8) Saito, W. et al. "600V Semi-superjunction MOSFET". Proc. ISPSD2003 (2003) p.45.
- (9) Schmitt, M. et al. "A Comparison of Electron, Proton and Helium Ion Irradiation for the Optimization of the CoolMOSTM Body Diode". Proc. ISPSD2002 (2002) p.229.

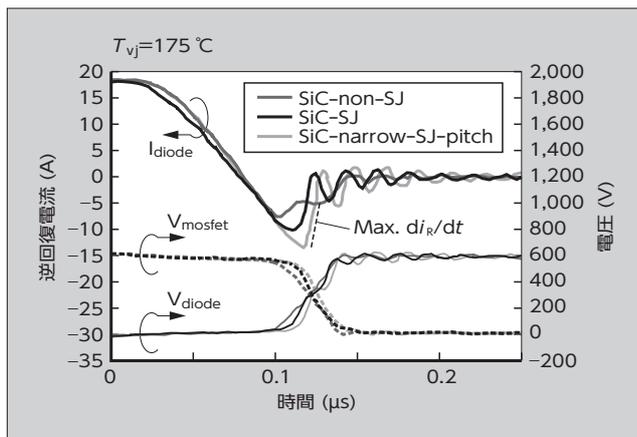


図 12 ボディダイオードのリカバリー波形の比較

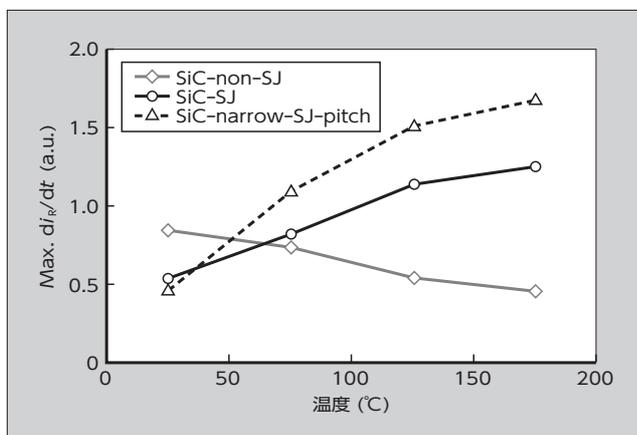


図 13 リカバリー波形の  $di_R/dt$  の温度依存性



**俵 武志**

SiC パワー MOSFET、SBD の研究開発に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。応用物理学会、プラズマ・核融合学会会員。



**竹中 研介**

半導体デバイスの研究に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。応用物理学会会員。



**馬場 正和**

SiC パワー MOSFET の研究開発に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。工学博士、応用物理学会会員。



## 解説 1 上アームと下アーム *Upper arm and lower arm*

p.234

インバータなどのスイッチング回路において、図1のように、電源から負荷に電流を供給する回路を上アームという。電源に負荷から電流を引き込む回路を下アームという。

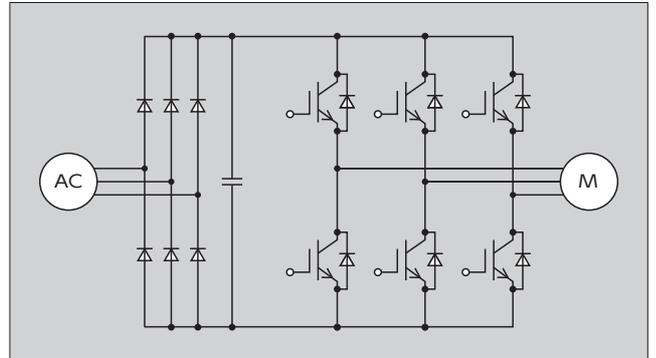


図1 スwitchング回路



# シンチレーション式中性子サーベイメータ「NSN4」

“NSN4” Scintillation Based Neutron Survey Meter

乾 大佑\* INUI, Daisuke

松中 允亨\* MATSUNAKA, Masayuki

布宮 智也\* NUNOMIYA, Tomoya

富士電機は、原子力施設、加速器施設、高度医療施設などにおいて中性子による1 cm線量当量率<sup>(注1)</sup>を測定するシンチレーション式中性子サーベイメータ「NSN4」を開発した。現在、中性子検出器に最も広く利用されている<sup>(注2)</sup> $^3\text{He}$ は、自然界にはほとんど存在せず、人工的に製造されるため供給量が限定される。また、テロ対策として、放射性物質などの不審物を検査する必要性から、国際的に需要が増加したことによって $^3\text{He}$ を入手することができず、さらに価格も高騰するなど供給の安定性が国際情勢の影響を受けやすいといった問題がある。そこで、富士電機は、放射線が入射すると発光するシンチレータ<sup>(注3)</sup>を検出器に採用することで、 $^3\text{He}$ を使用しないシンチレーション式中性子サーベイメータを製品化した。図1に外観を示す。

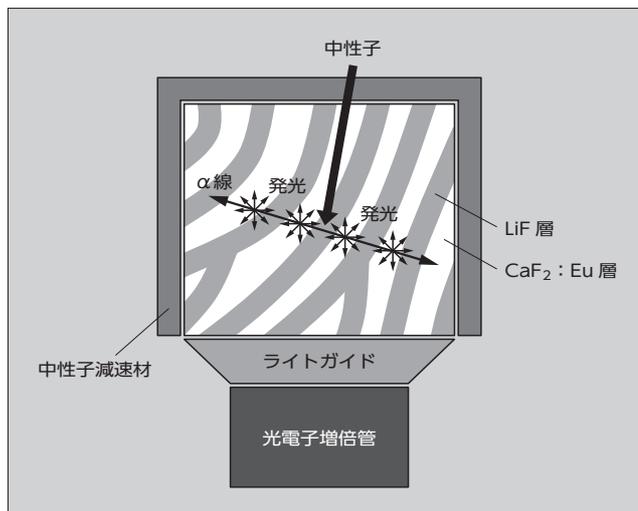


図2 「NSN4」の測定原理概念図

## ① 中性子測定原理

NSN4では、中性子を検出するシンチレータに、LiF/CaF<sub>2</sub>:Eu共結晶<sup>(注5)(1)</sup>を採用した。この共結晶は、LiF層と、Euを添加したCaF<sub>2</sub>層を結晶内に併せ持つ構造である。共結晶に中性子が入射すると、LiF層に含まれる<sup>6</sup>Liが中



図1 「NSN4」

性子捕獲反応を起こすことで、荷電粒子であるα線などが発生する。発生した荷電粒子が、シンチレータであるEuを添加したCaF<sub>2</sub>層を通過すると、シンチレータが荷電粒子からの付与エネルギーをシンチレーション光として放出する。LiF/CaF<sub>2</sub>:Eu共結晶はほぼ無色透明であり、図2に概念図を示すように内部で発生した光をライトガイドなどで光電子増倍管に導入し、電気信号として取り出すことで中性子を測定する。

LiF/CaF<sub>2</sub>:Eu共結晶は、単位付与エネルギー当たりの発光量が大きく、光電子増倍管の受光感度に適合した発光波長を持つという特徴がある。また、化学的に安定しているため加工や取扱いが容易である。

## ② 「NSN4」の特徴

### 2.1 製品の安定供給

$^3\text{He}$ だけでなく、 $^3\text{He}$ を用いた中性子検出器も供給量が限定されており、国外から輸入する必要がある。それに対し、本製品では国内で安定的に生産可能なシンチレータを検出器に採用しているため、従来製品で懸念された安定供給の課題を解決した。

### 2.2 軽量化

従来の $^3\text{He}$ を用いた製品の質量は約7kgであった。一方、共結晶内の<sup>6</sup>Li含有量や共結晶サイズ、共結晶周囲の中性子減速材の構造を最適化することにより、NSN4

\* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部 会社ソリューション事業部放射線システム部

‡ 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部 東京工場放射線装置部

は約 3.7 kg まで軽量化することができた。これにより、原子力施設などで作業者の持ち運びが容易になり、使用時の利便性が向上した。

### 2.3 国際市場対応

中性子検出器の安定供給は国際的な課題であるため、海外からの需要が見込まれる。NSN4 は国際規格である IEC 61005 : 2014 に準拠すると共に、CE マーキングを取得することで、日本国外の多くの国や地域でも販売と使用ができる。また、中性子線源を用いた点検校正をユーザー単独で実施できるよう、ソフトウェアや校正手順を提供している。

### 3 仕様および機能

NSN4 の仕様および機能を表 1 に示す。NSN4 は JIS Z 4341 : 2006〔中性子用線量当量(率)サーベイメータ〕

表 1 「NSN4」の仕様および機能

項目	仕様・機能
測定線種	中性子
測定エネルギー範囲	0.025 eV ~ 15 MeV
検出器	LiF/CaF <sub>2</sub> : Eu共晶体
減速材	ポリエチレン
1 cm線量当量率有効測定範囲	0.1 μSv/h ~ 99.99 mSv/h
1 cm線量当量有効測定範囲	0.01 μSv ~ 99.99 mSv
線量率測定精度	±20%以内 (10 μSv/hにて)
線量測定精度	±20%以内 (1 μSvにて)
エネルギー依存性	ICRP Publ.74 H* (10)/φレスポンスカーブに準拠
方向依存性	±25% (0 ±90°)
線量率特性	±20% (10 μSv/h基準)
γ線感度	<sup>137</sup> Csにおいて10 mSv/hまで1%以下
表示器	液晶画面
表示範囲	デジタル最大5桁表示 (単位自動切替) 線量率 : 0.00 ~ 999.99 μSv/h 1.00 ~ 99.99 mSv/h 積算線量 : 0.00 ~ 999.99 μSv 1.00 ~ 99.99 mSv
外部出力	USBシリアル通信
電源	○一次電池 (単三形アルカリ乾電池6本) ○二次電池 (単三形Ni-MH電池6本) ○商用AC電源 (ACアダプタ)
トレンド機能	記録件数 : 最大1,200件 記録周期 : 10s、20s、30s、60s、120s、300s、600sから選択可能 記録内容 : 機体番号、測定日/時刻、線量率、積算線量、トレンド周期、補正カウント、電池電圧、高圧設定値
連続使用時間	12時間以上
使用温度範囲	-10 ~ +45 °C
使用湿度範囲	35 ~ 90% (結露なきこと)
外形寸法	W150×H250×L300 (mm)
質量	約3.7 kg

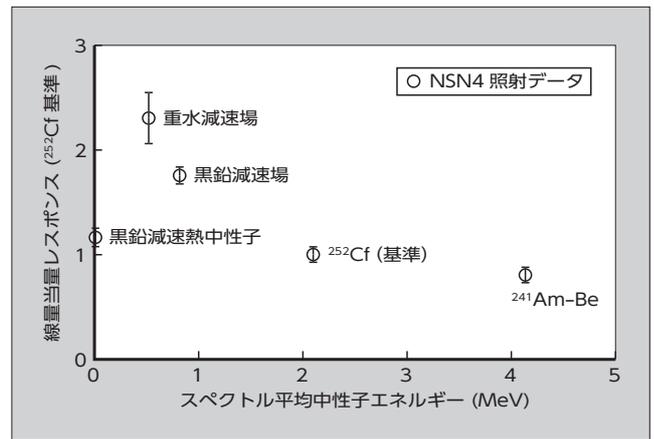


図 3 連続エネルギー中性子に対する線量当量レスポンス

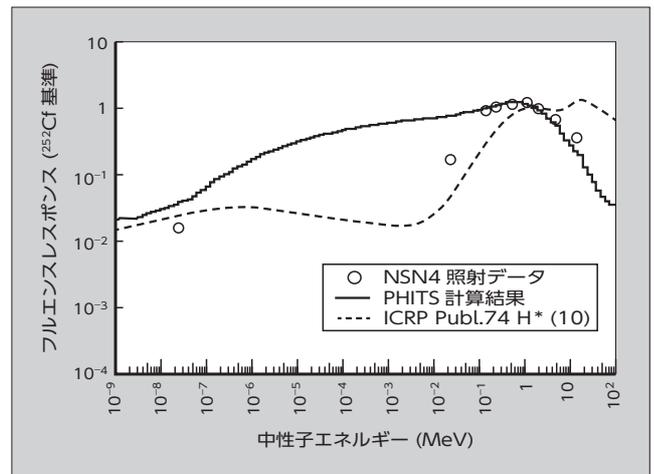


図 4 単色エネルギー中性子に対するフルエンスレスポンス

および IEC 61005 : 2014〔Radiation protection instrumentation-Neutron ambient dose equivalent (rate) meters〕に準拠している。図 3 に連続エネルギー中性子に対する線量当量レスポンス<sup>(注 6)</sup>を、図 4 に単色エネルギー中性子に対するフルエンスレスポンス<sup>(注 7)</sup>を示す。図 3 に示すとおり、黒鉛減速熱中性子が位置する低エネルギー領域を含めた、幅広いエネルギー範囲で良好なレスポンス(線量当量レスポンス 0.5 以上)が得られた。図 4 には、照射試験に使用可能な単色エネルギーの中性子場の入手性が限定されるため、実際の取得データに加え、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS<sup>(注 8)</sup>の計算結果を示す。8 桁以上の幅広いエネルギー範囲にわたり、ICRP74 のレスポンスカーブに近い応答を実現できた。

### 謝辞

NSN4 の開発過程において、名古屋大学大学院工学研究科の渡辺賢一准教授、および株式会社トクヤマ殿の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

- 〈注1〉1 cm 線量当量 (率) : ICRU 球を単一方向の面平行ビームの中性子または光子で照射したときの、入射方向に沿い入射面から主軸上 1 cm の深さにおける線量当量 (率) である。なお、中性子の 1 cm 線量当量率はフルエンスに換算係数を乗じて求める。
- 〈注2〉シンチレーション : 放射線が物質中の原子または分子を励起し、この励起エネルギーが光として放出される現象、および放出される光をいう。
- 〈注3〉 $^3\text{He}$  :  $\text{He}$  の同位体の一つである。大気中の存在比は、 $^4\text{He}$  の約 100 万分の 1 である。リチウム ( $^6\text{Li}$ ) に陽子ビームを照射して得たトリチウム ( $^3\text{H}$ ) のベータ崩壊 (半減期 12.3 年) によって  $^3\text{He}$  を生成する。
- 〈注4〉シンチレータ : シンチレーションを起こす物質の総称であり、放射線検出器として広く用いられる。
- 〈注5〉共晶体 : 2 成分以上を含む液体から同時に析出する 2 種以上の結晶の混合物をいう。
- 〈注6〉レスポンス : 測定値を基準値で除した値である。
- 〈注7〉フルエンス : 断面積  $da$  を持つ球に入射する中性子数を  $dN$  としたとき、 $dN$  を  $da$  で除した値である。
- 〈注8〉PHITS : あらゆる物質中でのさまざまな放射線挙動を、核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ

計算コードである。日本原子力研究開発機構が中心となって開発した。

#### 参考文献

- (1) Kawaguchi, N. et al. "Fabrication and characterization of large size  $^6\text{LiF}/\text{CaF}_2 : \text{Eu}$  eutectic composites with the ordered lamellar structure". Nucl. Instrum. Meth. A652, 2011, p.209-211.
- (2) Sato, T. et al. "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02". J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 2018, p.684-690.

#### 発売時期

2020 年 1 月

#### お問い合わせ先

富士電機株式会社  
営業本部社会ソリューション統括部営業第四部  
(03) 5435-7049



# 東海旅客鉄道株式会社向け N700S 新幹線電車用電機品

Electrical Equipment for the N700S Shinkansen Rolling Stock of Central Japan Railway Company

小林 宣之\* KOBAYASHI, Nobuyuki

富士電機は、これまで東海道新幹線の初代0系からN700Aに至るまで、新幹線電車用電機品を納入してきた。このたび、東海旅客鉄道株式会社は、N700系以降13年ぶりのフルモデルチェンジとなる、新型車両N700Sを開発した。N700Sは、さらなる安全・安定輸送を追求し、省エネルギー化などの環境性能、および快適性・利便性を向上させた車両である。また、N700Sは、標準車両の実現により、16両編成だけでなく8両編成や6両編成などさまざまな編成構成に柔軟に対応できる。

富士電機は、新型車両N700Sの実現のため、主回路電機品およびフルアクティブ制振制御システムに組み込まれるフルアクティブダンパ駆動装置を開発してきた。そして、確認試験車を使った走行試験による機能・性能評価を経て、これらの電機品をN700S量産車向けに納入した(図1)。



図1 N700S 新幹線電車  
(写真提供：東海旅客鉄道株式会社)

## 1 主回路電機品

### 1.1 装置仕様

主回路電機品のシステム構成は、図2に示すように、主変圧器、主変換装置、主電動機で構成される。主変圧器の二次巻線を3分割または4分割して、それぞれに主変換装置が接続され、1台の主変換装置で主電動機4台

を駆動している。装置仕様を表1に示す。

### 1.2 特徴

N700Sは、さまざまな編成構成に対応できる標準車両を実現している。この実現には床下機器を最適に配置する必要がある。さらに、架線停電時における自力走行や利便性の向上のために大容量バッテリーも搭載することから、床下に艤装(ぎそう)される主回路システムには、

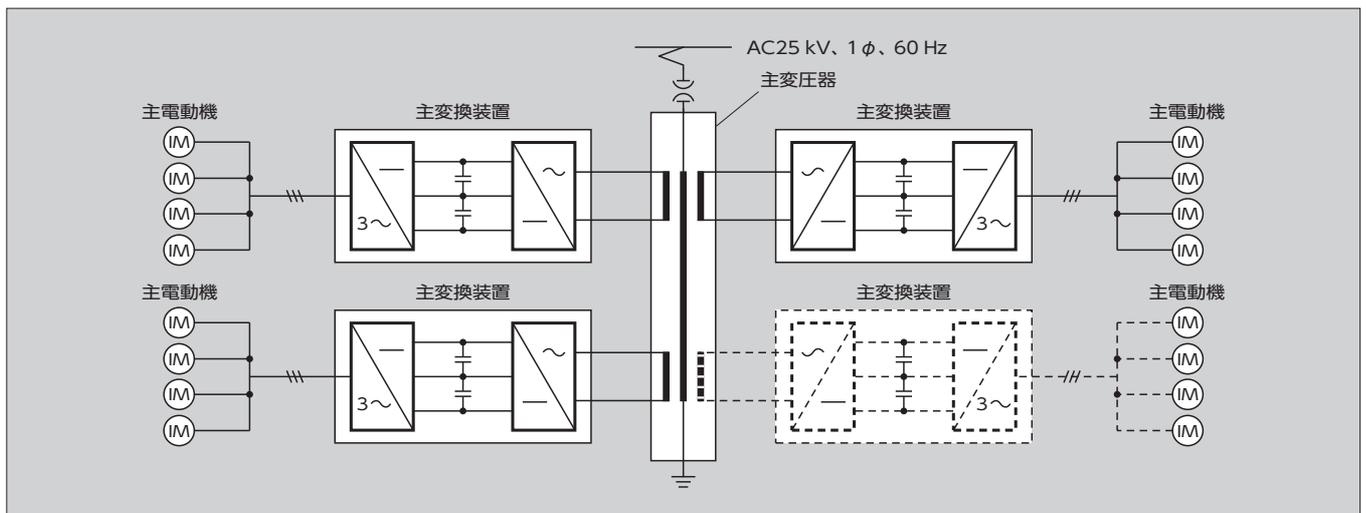


図2 主回路電機品のシステム構成

\* 富士電機株式会社パワエレシステム インダストリー事業本部鈴鹿工場車両システム機器部

表1 主回路電機品の装置仕様

項目		仕様
公称電車線電圧		AC25 kV、単相、60 Hz
主変圧器	方式	単相外鉄形無圧密封式 (二次巻線：3分割または4分割)
主変換装置	回路方式	3レベルPWMコンバータ 3レベルPWMインバータ
	パワーデバイス	SiCパワー半導体モジュール
	冷却方式	走行風自冷
主電動機	方式	かご型誘導電動機
	極数	6極
	定格電圧	AC2,300 V
	定格出力	305 kW (連続)

小型・軽量化が強く求められた。図3に各装置の外観を示す。

次に示す特徴により、主回路電機品の小型・軽量化を実現した。

- (1) 主変圧器の銅損を従来よりも小さくする設計とし、巻線にアルミニウム電線を採用した。また、冷却方式としてユニットクーラを採用した。これらにより、二次巻線4分割タイプの主変圧器で12%の小型化と10%の軽量化を実現した。
- (2) 主変換装置のパワーデバイスとして、SiC-SBD (Silicon Carbide-Schottky Barrier Diode) と IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を組み合わせた SiC パワー半導体モジュールを採用し、低損失、高耐熱の特性を生かして冷却体の小型・軽量化を行った。さらに、パワーユニット内の構造および導体構成の最適化により、従来の主変換装置と比較し、9%の小型化と14%の軽量化を実現した。



図3 主回路電機品

- (3) 主電動機の極数を従来の4極から6極に変更し、また、低損失の鉄心材料とすることで、従来の主電動機と比較し、11%の小型化と17%の軽量化を実現した。

## 2 フルアクティブダンパ駆動装置

### 2.1 装置仕様

N700Sでは、フルアクティブ制振制御システムをグリーン車などに搭載し、乗り心地の向上を図っている。フルアクティブダンパ駆動装置は、フルアクティブ制振制御システム内に組み込まれ、ダンパ用モータとこれを駆動するモータ駆動装置で構成される。ダンパ用モータで油圧ポンプを駆動することにより、車両の左右振動を抑制するダンパに油圧を供給し、乗り心地の向上に貢献している。装置仕様を表2に示す。

### 2.2 特徴

フルアクティブダンパ駆動装置の特徴は次のとおりである。また、装置の外観を図4に示す。

- (1) フィルタなどのメンテナンス部品を削減するため、モータ駆動装置箱を密閉構造とし、箱内の空気循環だけで内部機器を冷却するようにした。
- (2) ダンパ用モータは、台車の限られたスペースに艤装できるように、モータを小型化するとともに、走行時に受ける振動を考慮し、耐振性を強化した。

表2 フルアクティブダンパ駆動装置の仕様

項目		仕様
モータ駆動装置	入力電圧	AC100 V
	出力電圧	AC100 V (三相)
	構造	密閉室、防水・防じん
ダンパ用モータ	方式	同期電動機
	電圧	AC100 V (三相)
	定格トルク	1.1 N・m
	定格回転速度	3,000 r/min

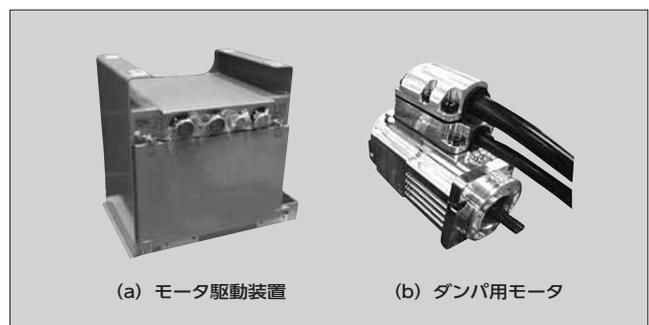


図4 フルアクティブダンパ駆動装置

## 営業運転開始時期

2020年7月

---

## お問い合わせ先

富士電機株式会社

パワエレシステム インダストリー事業本部鈴鹿工場

車両システム機器部

電話 (059) 383-8362



# 第2世代 SiC-SBD

## 2nd-Generation SiC-SBD

橋爪 悠一\* HASHIZUME, Yuichi

内田 貴史\* UCHIDA, Takafumi

大瀬 直之\* OSE, Naoyuki

地球温暖化などの環境問題への対応や低炭素社会の実現に向けて、高効率のパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器による省エネルギー化や再生可能エネルギーの活用が進んでいる。このような中、自動車や鉄道、エネルギーシステム、産業機器などさまざまな分野において、パワエレ機器に搭載されるパワー半導体の市場が拡大している。

従来のシリコン（Si）を使用したパワー半導体デバイスは材料物性に起因する理論的な特性限界に近づいている。そのため、パワエレ機器のさらなる小型・高効率化に向けて、Si に比べて、バンドギャップが約3倍、絶縁破壊電界強度が約10倍と大きい炭化けい素（SiC）が、Siの限界を超えるパワー半導体材料として期待されている<sup>(1)</sup>。富士電機は、これまでSiCを用いたSBD（Schottky Barrier Diode）やプレーナゲートMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）、トレンチゲートMOSFETを量産し、太陽光発電用向けのPCS（Power Conditioning System）や産業用インバータ、鉄道車両用インバータなどに採用されている<sup>(2)~(11)</sup>。

図1(a)、図1(b)に、富士電機が開発したSi-IGBTとSiC-SBDを搭載したハイブリッドSiCモジュール製品を示し、図1(c)にSiC-SBDのディスクリート製品を示す。

本稿では、第1世代SiC-SBDに比べ、特性および順サージ耐量を向上させた第2世代SiC-SBDについて述べる。なお、本製品の系列には定格電圧650Vと1,200V

があり、ここでは定格電圧650Vについて述べる。

### 1 構造

図2は、第1世代SiC-SBDと第2世代SiC-SBDの構造を示す。いずれも素子表面にp<sup>+</sup>層を形成したJBS（Junction Barrier Schottky）構造であり、一般的な構造のSBDに比べ、リーク電流が低い。

第2世代SiC-SBDの構造は、第1世代と比較して、次の特徴を持つ。

- (a) ショットキー接合の最適化によりバリアハイトを下げ、順方向電圧V<sub>F</sub>を低減した。
- (b) JBS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、V<sub>F</sub>とせん頭順サージ電流I<sub>FSM</sub><sup>(注)</sup>を改善した。
- (c) n<sup>+</sup>SiC基板の厚さを約1/3に薄化したことにより、基板抵抗を低減し、V<sub>F</sub>とI<sub>FSM</sub>を改善した。

JBS構造では、通常動作時は表面電極とn<sup>-</sup>ドリフト層とで形成されるショットキー領域に電流が流れる。落雷時など順方向に高いサージ電流が流れる場合は、p<sup>+</sup>層とn<sup>-</sup>ドリフト層で構成されるpn接合ダイオードが動作し、表面電極とp<sup>+</sup>層のオーミック領域に大電流が流れる<sup>(12)</sup>。第2世代SiC-SBDでは、独自のプロセス技術により、図2のp<sup>+</sup>層と表面電極界面であるオーミック領域の接触抵抗

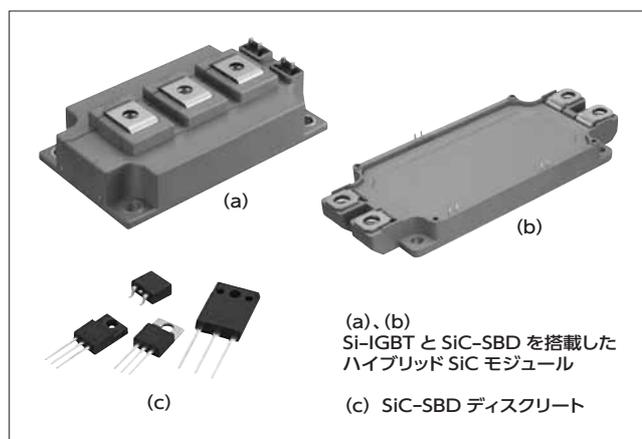


図1 富士電機のSiC素子適用製品例

\* 富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部

‡ 富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部プロセス開発部

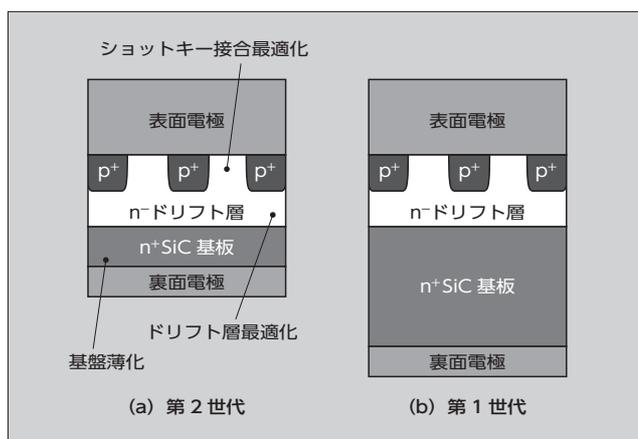


図2 第1世代と第2世代のSiC-SBDの構造

〔注〕せん頭順サージ電流I<sub>FSM</sub>：素子破壊しない範囲で許容される商用正弦半波（50Hzまたは60Hz）の非繰り返し電流のピーク値に相当する順サージ耐量。

を低減させ、pn 接合ダイオードが動作しやすくすることで、 $I_{FSM}$  を向上させた。

2 特性

2.1 第2世代 SiC-SBD の順方向電圧とオーミックコンタクト抵抗  $R_C$

図3に、650V 耐圧 10A 素子の SiC-SBD の  $V_F$  を第1世代と第2世代とで比較した結果を示す。ドリフト抵抗と基板抵抗を低減したことにより、 $V_F$  が第1世代に比べて改善した。

図4に SiC-SBD の p<sup>+</sup>層と表面電極のオーミックコンタクト抵抗  $R_C$  を示す。第2世代 SiC-SBD の  $R_C$  は、第1世代に比べて約 99.7% 低減した。

2.2 第2世代 SiC-SBD 650V の耐性

図5に、SiC-SBD 650V 耐圧素子の順方向  $I_F$ - $V_F$  特性を示す。第2世代では第1世代と比較して、順電流  $I_F=10A$  における  $V_F$  が、ジャンクション温度  $T_{vj}=25^\circ C$  で 18%、 $T_{vj}=175^\circ C$  で 21% 低減した。

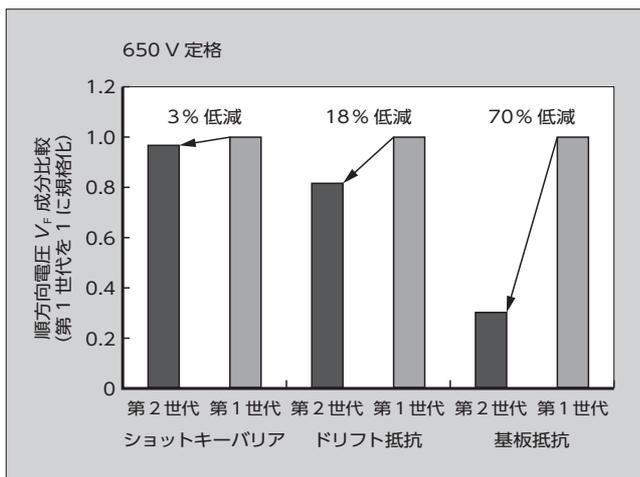


図3 第1世代 (各抵抗を1に規格化) と第2世代の SiC-SBD の  $V_F$  成分比較

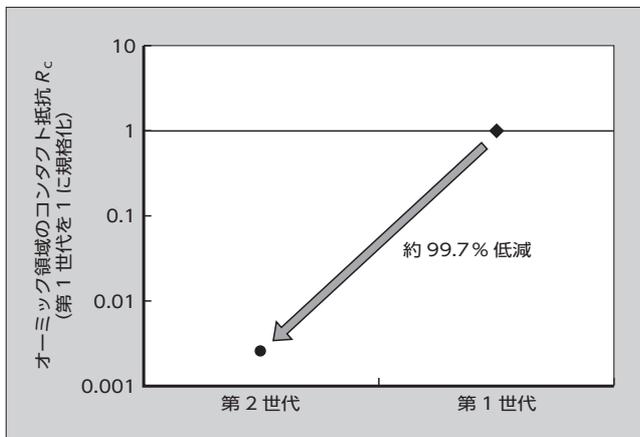


図4 第1世代 (1に規格化) と第2世代の p<sup>+</sup>層と表面電極のオーミックコンタクト抵抗  $R_C$  の比較

図6は、 $I_F=10A$  における  $V_F$  の温度特性である。-50 $^\circ C$  から +175 $^\circ C$  までの全温度領域において、第2世代 SiC-SBD の方が 18% 以上低い。

図7は 650V 耐圧素子の電流領域の  $I_F$ - $V_F$  特性を示

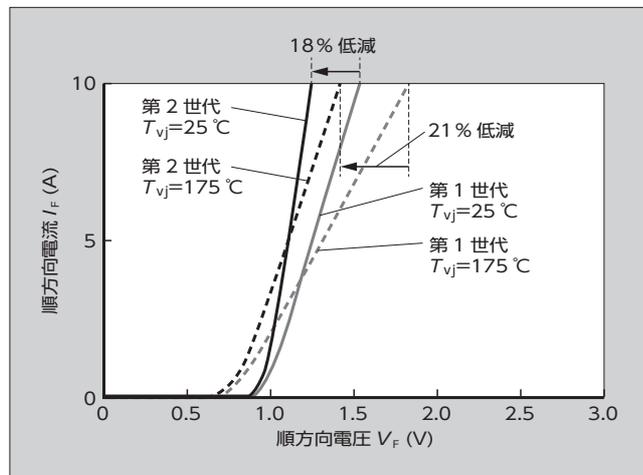


図5 650V/10A SiC-SBD 第1世代と第2世代の  $I_F$ - $V_F$  特性定格電流領域

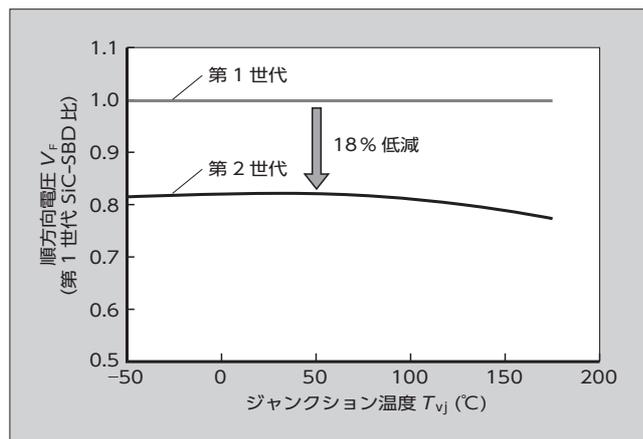


図6 650V 耐圧 SiC-SBD 第2世代の  $V_F$  温度特性 (第1世代の  $V_F$  を1と規格化)

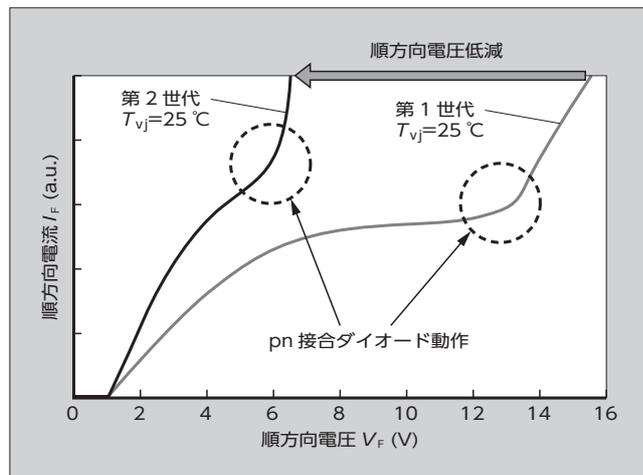


図7 650V 耐圧 SiC-SBD 第1世代と第2世代の  $I_F$ - $V_F$  特性大電流領域

新製品紹介

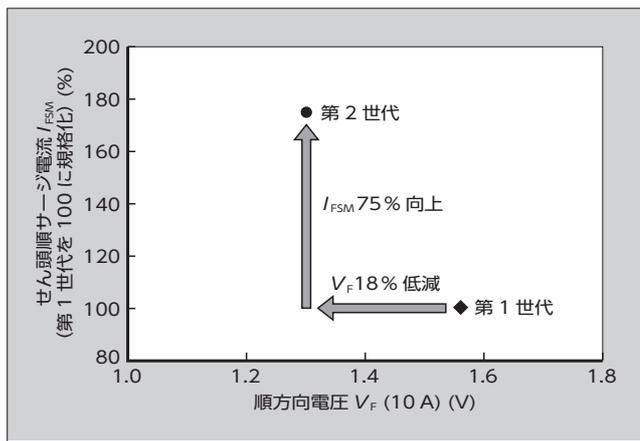


図8 650V耐圧SiC-SBD第1世代と第2世代の $V_F$ - $I_{FSM}$ 特性

す。第2世代では、コンタクト抵抗が低減したことにより、第1世代よりpn接合ダイオードが動作しやすくなっている。そのため、大電流通電時の $V_F$ が低下し、発生損失が小さくなる。この効果によって順サージ耐量が向上することを確認した。

図8は、650V耐圧SiC-SBDの $V_F$ - $I_{FSM}$ 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%低減し、 $I_{FSM}$ は75%向上した。

#### 参考文献

- (1) Kimoto, T. Cooper, James A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications.
- (2) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用PCS「PVI1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (3) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4. p.241-244.
- (4) 蝶名林幹也ほか. All-SiC 2in1モジュール. 富士電機技報.

2016, vol.89, no.4, p.238-241.

- (5) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4. p.209-213.
- (6) 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.
- (7) 辻崇ほか. 1.2kV SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (8) 関野裕介ほか. 大容量SiCハイブリッドモジュール「HPnC」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.228-232.
- (9) 白井亮輔ほか. 高速IGBTとSiC-SBDを組み合わせた高速ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.201-205.
- (10) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (11) 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.
- (12) Bjoerk, F. et al. "2nd generation 600 V 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.

#### 発売時期

2021年4月

#### お問い合わせ先

富士電機株式会社  
電子デバイス事業本部営業統括部営業第一部  
電話 (03) 5435-7152

(2021年4月9日 Web公開)

# 省エネを実現しCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献 シンガポールの病院に空調用インバータ



当社製インバータ  
「FRENIC-HVAC」

シンガポールでは、高齢者の増加を背景とした医療ニーズの変化への対応と、既設病院の患者受け入れ負担の軽減が課題となっており、同国政府は「コミュニティ病院」の設立を推進している。

2019年12月に開業したOutram Community Hospital (以下、OCH)もコミュニティ病院の一つだ。OCHは、シンガポール初の国立総合病院であるSingapore General Hospital (以下、SGH)の敷地内に建設され、主に急を要しないまたは集中治療を必要としない患者を受け入れることでSGHの負担軽減に寄与するとともに、高齢者や身体に障がいのある患者にリハビリテーション・ケアを提供している。

このOCHに、富士電機アジアパシフィック社(FAP)は、富士電機マニュファクチャリング(タイランド)社製の空調用インバータ「FRENIC-HVAC」を719ユニット納入した。OCH内の空調・換気に使われるファン・ポンプを制御して風量や水量を

最適化。省エネを実現し、CO<sub>2</sub>排出量削減に貢献している。

FRENIC-HVACは、インバータ業界で初めてUL/EPD認証※<sup>1</sup>を取得し、環境配慮型製品として世界で高い評価を得ている。さらにシンガポールではグリーンラベル4ティッククラス※<sup>2</sup>を取得。同インバータを採用した建築物のオーナーは、環境に配慮した事業者として社会的評価を受け、建築物の取得・保持などの面で税制優遇のメリットを得ることが可能だ。

「シンガポールの医療の発展に寄与できてとても嬉しい。今後も事業拡大を通じてお客様のCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献し続けていきたい」とFAPの白山社長は抱負を語る。

※1: 第三者機関(UL/EPD)による環境配慮型製品に対する認証

※2: シンガポール建設業管理庁による環境配慮型製品に対する認証



※1

※2



富士電機アジアパシフィック社 ドライブ&オートメーションチーム

## たとえばこんなSDGs

7 エネルギーをみんなに  
そしてクリーンに



●目標7

すべての人々の、安価かつ信頼できる  
持続可能な近代的エネルギーへの  
アクセスを確保する

本目標では、再生可能エネルギーの普及とともに、エネルギー効率の改善が求められています。オフィスビルや病院では、空調設備で多くのエネルギーを消費します。「FRENIC-HVAC」は、空調を最適に制御し快適な環境を提供するとともに、省エネを実現し地球温暖化防止に貢献します。

## 略語（本号で使った主な略語）

AEC	Automotive Electronics Council	車載向け電子部品の標準化団体
AI	Artificial Intelligence	人工知能
ASC	Active Short Circuit	アクティブショートサーキット
DWC	Direct Water Cooling	直接水冷
EGR	Exhaust Gas Recirculation	排気ガス再循環
ESD	Electrostatic Discharge	
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FEM	Finite Element Method	有限要素法
FWD	Free Wheeling Diode	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IoT	Internet of Things	
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PFC	Power Factor Correction	力率改善
PHV	Plug-in Hybrid Vehicle	プラグインハイブリッド自動車
PIP	Polysilicon-Insulator-Polysilicon	
PIV	Particle Image Velocimetry	粒子画像流速測定法
RC-IGBT	Reverse-Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
SCR	Silicon Controlled Rectifier	
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発目標
SEM	Scanning Electron Microscope	走査型電子顕微鏡
SON	Small Outline Non-leaded	
SOP	Small Outline Package	
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
ZCD	Zero Current Detection	

## 商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

EconoPACK™	Infineon Technologies AG の商標または登録商標
PrimePACK™	Infineon Technologies AG の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。



# *Innovating Energy Technology*

## エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、  
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、  
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。

**F** **富士電機**



## 主要事業内容

### パワーエレクトロニクス エネルギー

確かな技術で電力インフラを支え、エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

#### エネルギーマネジメント

エネルギーマネジメントシステム (EMS)、電力流通、スマートメータ、変電

#### 施設・電源システム

データセンター、無停電電源装置 (UPS)、配電盤

#### 器具

受配電・制御機器

### パワーエレクトロニクス インダストリー

パワーエレクトロニクス応用製品に計測機器、IoT を組み合わせ、工場の自動化や見える化により生産性の向上と省エネを実現します。

#### オートメーション

インバータ、モータ、FA コンポーネント、計測機器、FA システム、物流システム、駆動制御システム、計測制御システム、工業電熱

#### 社会ソリューション

鉄道車両電機品、EV システム、放射線管理システム、船舶用排ガス浄化システム

#### 情報ソリューション

情報制御システム

### 電子デバイス

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

#### 半導体

産業分野、自動車分野

#### ディスク媒体

### 発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

#### 再生可能・新エネルギー

地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

#### 火力発電

原子力関連設備

### 食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

#### 自販機

飲料・食品自動販売機

#### 店舗流通

店舗設備機器、金銭機器、エネルギー管理システム

\*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。

富士電機技報 (和文)

[https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents\\_02\\_03.html](https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html)

FUJI ELECTRIC REVIEW (英文)

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊 (中文)

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



### 次号予定

富士電機技報 第94巻 第1号

特集 省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献する  
パワーエレクトロニクス

### 富士電機技報企画会議

幹事	中山 和哉				
企画メンバー	斎藤 哲哉	桑山 仁平	眞下 真弓	前田政一郎	
	渡部 雅教	熊谷 明恭	片桐 源一	出野 裕	
	鈴木 健司				
特集委員	熊谷 明恭	木内 伸	小林 靖幸		
事務局	荻野 慎次	堀口 道子			
編集室	木村 基	小野寺拓也	小野 直樹	高橋 徹	

### 富士電機技報 第93巻 第4号

令和2年12月20日印刷 令和2年12月30日発行

編集兼発行人 近藤 史郎

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部  
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号  
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内  
「富士電機技報」編集室  
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地  
電話 (042) 585-6965  
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社オーム社  
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地  
電話 (03) 3233-0641  
振替口座 東京 6-20018

\*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。

© 2020 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

# 富士電機技報 vol.93 2020年 総目次

## No.1 特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

〔特集に寄せて〕 Society 5.0はCPHSoSで	本多 敏	3 (3)
〔現状と展望〕 自動化と省エネルギーに貢献する		
計測・制御ソリューションの現状と展望	鉄谷 裕司 笹谷 俊幸	4 (4)
蒸気のムダが見える化する世界初のクランプオン式蒸気用超音波流量計	宮本 汐里 木代 雅巳 坂上 智	11 (11)
船舶スクラバ向けレーザ方式ガス分析計	東 亮一 田原 雅哉 赤尾 幸造	16 (16)
モーションコントローラ「MICREX-SX SPH5000M」	下川 孝幸 宮下 裕史 久保隅 創	21 (21)
保守性と信頼性を向上した監視制御システム		
「MICREX-View XX (ダブルエックス)」	笹野喜三郎 藤澤 昭博 永塚 一人	26 (26)
工場ですぐ使えるタッチオペレーションの現場型診断装置		
「SignAiEdge (サインアイエッジ)」	松本 充弘 佐藤 好邦 坂井 一博	30 (30)
エッジコントローラで動作するモデル予測制御	丹下 吉雄 桐生 智志 松井 哲郎	34 (34)
異常兆候を検知し回避手順を示すプラント運転支援システム	鳴海 克則 鈴木 聡 館山 淳也	40 (40)
監視制御システムの設計工期短縮と品質向上を実現する		
エンジニアリング支援ツール「HEART」	北村 純郎 加藤 邦昭 吉野 稔	47 (47)
安定操業を実現するセメントプラント監視制御パッケージ	梅基 一生	52 (52)
効率的な維持管理を実現するごみ焼却施設パッケージ	古川 浩司	56 (56)
AI技術により予測精度を高めたエネルギー制御パッケージ		
「EMS-Package」	鳴海 克則 丹下 吉雄 島崎 祐一	61 (61)
安全・安心に貢献する放射線管理サービスソリューション	前川 修 加藤 勉 安部 繁	66 (66)
普通論文		
大容量UPSを用いたデータセンター向け共通予備システム	安本 浩二 濱田 一平 根本 健司	72 (72)
新製品紹介論文		
太陽光発電用パワーコンディショナ「PIS-50/500 (DC1,100 V/50 kVA)」		78 (78)
蒸気用超音波流量計 (クランプオン式)		81 (81)
電機高速コントローラ		
「MICREX-View XX (ダブルエックス) XCS-3000 Type E」		84 (84)

## No.2 特集 2019年度の技術成果と展望

特集に寄せて		
“パワエレシステムとパワー半導体事業を核にして、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献”	北澤 通宏	93 (3)
“新たな価値創出と社会・環境課題の解決に向け、リアルな技術を磨くとともにデジタル技術を深化”	近藤 史郎	94 (4)
ハイライト		95 (5)
パワエレシステム エネルギー		104 (14)
□エネルギーマネジメント □施設・電源システム □受配電・開閉・制御機器コンポーネント		
パワエレシステム インダストリー		108 (18)
□オートメーション □情報ソリューション □社会ソリューション □フィールドサービス		
電子デバイス		116 (26)
□半導体 □ディスク媒体		
発電プラント		120 (30)
□火力・地熱発電 □水力発電 □原子力関連設備 □新エネルギー		
食品流通		124 (34)
□自動販売機 □店舗流通		
基盤・先端技術		126 (36)
□基盤技術 □先端技術		
デザイン (Fe design)		132 (42)

**No.3 特集 低炭素社会実現に向けた富士電機の発電プラント事業**

〔特集に寄せて〕低炭素社会のための地熱資源の開発 ..... 海江田秀志 141 (3)

〔現状と展望〕低炭素社会実現に向けた富士電機の  
 発電プラント事業の現状と展望..... 堀江 理夫 上野 康夫 北西 啓一 142 (4)

インドネシア・ムアララボ地熱発電所..... 服部 康之 148 (10)

大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステム..... 磯野与志雄 笹川 剛 153 (15)

国内最大級の蓄電池併設型メガソーラー発電所..... 椎橋 哲也 名塚 武洋 佐藤 智希 159 (21)

韓国向けりん酸形燃料電池..... 川上 幸次 堀内 義実 165 (27)

日本初の内陸型大型 GTCC (ガスタービンコンバインドサイクル発電)  
 プロジェクトー発電機現地製作技術ー..... 谷藤 怜 中山 大樹 水本 貴之 170 (32)

オンラインガス分析による回転機固定子巻線の劣化診断..... 中山 昭伸 石井 佑一 175 (37)

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術..... 古賀 和浩 179 (41)

先進固化技術“SIAL®”による放射性廃棄物処理 ..... 関根 伸行 見上 寿 小野崎公宏 185 (47)

**新製品紹介論文**

LAN 式回転機故障予兆監視システム「Wiserot」..... 189 (51)

こんなところに富士電機 ..... 192 (54)

**No.4 特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体**

〔特集に寄せて〕微分方程式から偏微分方程式の世界へ ..... 小笠原悟司 201 (3)

〔現状と展望〕パワー半導体の現状と展望 ..... 大西 泰彦 宮坂 忠志 井川 修 202 (4)

xEV 向け IGBT モジュールの過電流耐量の向上 ..... 原 康文 吉田 崇一 井上 大輔 210 (12)

xEV 向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術 ..... 玉井 雄大 小山 貴裕 井上 大輔 214 (16)

車載用第 5 世代 IPS「F5202H」..... 岩田 英樹 豊田 善昭 中村 賢平 219 (21)

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..... 掛布 光泰 山野 彰生 平田 朋也 224 (26)

第 2 世代 1,200 V All-SiC モジュールの系列拡大 ..... 高崎 愛子 奥村 啓樹 丸山 力宏 229 (31)

小型パッケージ「P644」を採用した  
 第 7 世代「X シリーズ」IGBT-IPM ..... 寺島 健史 及木 達矢 大瀬 智文 234 (36)

ディスクリット IGBT「XS シリーズ」の系列拡大 ..... 原 幸仁 前田 涼 坂井 琢磨 239 (41)

第 4 世代臨界モード PFC 制御 IC「FA1B00N」..... 日朝 信行 遠藤 勇太 矢口 幸宏 243 (45)

1.2 kV SiC スーパージャンクション MOSFET ..... 俵 武志 馬場 正和 竹中 研介 249 (51)

**解 説**

上アームと下アーム..... 255 (57)

**新製品紹介論文**

シンチレーション式中性子サーベイメータ「NSN4」..... 256 (58)

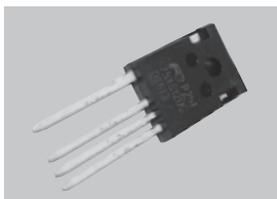
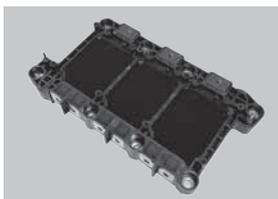
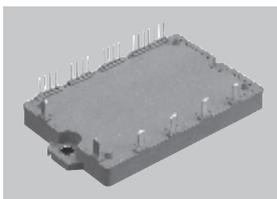
東海旅客鉄道株式会社向け N700S 新幹線電車で用電機品 ..... 259 (61)

第 2 世代 SiC-SBD ..... 262 (64)

こんなところに富士電機 ..... 265 (67)

# 未来の集積。

独自のパワーエレクトロニクス技術と用途の可能性を凝縮した、富士電機のパワー半導体。高耐圧・大容量化、低電力損失化、小型軽量パッケージ化を進めているこのキーデバイスは、太陽光発電、風力発電などのクリーンエネルギー分野、産業や家庭に求められる省エネルギー分野、ハイブリッドカー・電気自動車といった交通分野まで、様々な場面で活躍しています。さらに、新素材 SiC を採用した、より高性能な次世代パワー半導体を開発。富士電機は、これからもエネルギー技術を革新し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していきます。



---

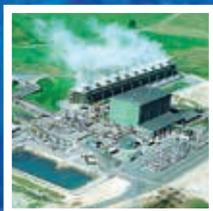
## 富士電機のパワー半導体

---

# Innovating Energy Technology

## エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、  
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、  
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



耐食・材料・熱水利用技術  
地熱発電プラント



デバイス技術  
IGBTパワー半導体



パワーエレクトロニクス技術  
メガソーラー向けPCS  
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術  
インバータ



パワーエレクトロニクス技術  
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術  
ハイブリッドヒートポンプ式  
自動販売機

**F** 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および  
植物油インキを使用しています。また、ユニ  
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた  
見やすいデザインの文字を採用しています。

