

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2016
Vol.89 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



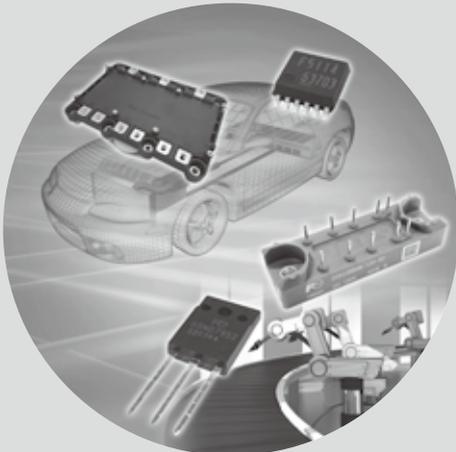
特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

地球温暖化の原因となる CO₂ の排出量を抑制するためには、太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギーの利用、エネルギー変換効率の向上、HEV・EV などの電動化車両を導入することが有効な対策となります。そこで重要になるのが、電気エネルギーを制御するパワーエレクトロニクス技術です。富士電機は、パワーエレクトロニクス装置の圧倒的な小型化や効率向上に寄与するパワー半導体を開発し、製品化しています。

本特集では富士電機のパワー半導体について、最新の技術および製品を紹介します。

表紙写真（左上から右回り）

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール、車載用ハイサイド 2in1 IPS「F5114H」、All-SiC 2in1 モジュール、第2世代 SJ-MOSFET「Super J-MOS S2 シリーズ」



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〕 SiC-MOSFET の本格的な普及を期待して 赤木 泰文	225 (3)
〔現状と展望〕 パワー半導体の現状と展望 藤平 龍彦 ・ 宝泉 徹 ・ 栗原 俊治	226 (4)
1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET 辻 崇 ・ 岩谷 将伸 ・ 大西 泰彦	234 (12)
All-SiC 2 in 1 モジュール 蝶名林 幹也 ・ 大友 良則 ・ 唐沢 達也	238 (16)
All-SiC モジュールの高耐圧化 日向 裕一朗 ・ 谷口 克己 ・ 堀 元人	242 (20)
All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化 仲俣 祐子 ・ 立岡 正明 ・ 市村 裕司	247 (25)
第7世代「X シリーズ」 IGBT モジュール「Dual XT」 吉田 健一 ・ 吉渡 新一 ・ 川畑 潤也	251 (29)
第7世代「X シリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール 山野 彰生 ・ 高橋 美咲 ・ 市川 裕章	256 (34)
第2世代小容量 IPM の系列化 手塚 伸一 ・ 鈴木 啓久 ・ 白川 徹	261 (39)
RC-IGBT を搭載した車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの 高速動作化 高下 卓馬 ・ 井上 大輔 ・ 安達 新一郎	266 (44)
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 佐藤 憲一郎 ・ 榎本 一雄 ・ 長畦 文男	270 (48)
車載用ハイサイド 2 in 1 IPS「F5114H」 森澤 由香 ・ 鷹坂 浩志 ・ 安田 貴弘	275 (53)
車載用第2世代 SJ-MOSFET「Super J MOS S2A シリーズ」 田平 景輔 ・ 新村 康 ・ 皆澤 宏	279 (57)
高効率電源用の臨界モード PFC 制御 IC「FA1A60N」と LLC 電流共振制御 IC「FA6B20N」 園部 孝二 ・ 矢口 幸宏 ・ 北條 公太	283 (61)
高速ダイオードを内蔵した第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」 渡邊 荘太 ・ 坂田 敏明 ・ 山下 千穂	289 (67)

新製品紹介論文

屋外型 555 kVA パワーコンディショナ「PVI600BJ-3/555」	294 (72)
「MICREX-SX シリーズ」のモーションコントローラ「SPH3000D」	296 (74)
縮小型 72-145 kV ガス絶縁開閉装置「SDH714」	299 (77)
冷凍保冷庫「WALKOOL (フローズン)」	302 (80)
略語・商標	305 (83)

Power Semiconductors Contributing in Energy Management

[Preface] Expecting the Proliferation of SiC-MOSFETs AKAGI, Hirofumi	225 (3)
Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook FUJIHIRA, Tatsuhiko HOSEN, Toru KURIHARA, Toshiharu	226 (4)
1.2-kV SiC Trench MOSFET TSUJI, Takashi IWAYA, Masanobu ONISHI, Yasuhiko	234 (12)
All-SiC 2-in-1 Module CHONABAYASHI, Mikiya OTOMO, Yoshinori KARASAWA, Tatsuya	238 (16)
Enhanced Breakdown Voltage for All-SiC Module HINATA, Yuichiro TANIGUCHI, Katsumi HORI, Motohito	242 (20)
Enhanced Thermal Resistance of Molding Resin Used for All-SiC Modules NAKAMATA, Yuko TACHIOKA, Masaaki ICHIMURA, Yuji	247 (25)
7th-Generation "X Series" IGBT Module "Dual XT" YOSHIDA, Kenichi YOSHIWATARI, Shinichi KAWABATA, Junya	251 (29)
7th-Generation "X Series" RC-IGBT Module for Industrial Applications YAMANO, Akio TAKAHASHI, Misaki ICHIKAWA, Hiroaki	256 (34)
2nd-Generation Small IPM Series TEZUKA, Shinichi SUZUKI, Yoshihisa SHIRAKAWA, Toru	261 (39)
Speed Enhancement for the 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications with RC-IGBT KOGI, Takuma INOUE, Daisuke ADACHI, Shinichiro	266 (44)
Functionality Enhancement of 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications Equipped with RC-IGBT SATO, Kenichiro ENOMOTO, Kazuo NAGAUNE, Fumio	270 (48)
High-Side 2-in-1 IPS "F5114H" for Automobiles MORISAWA, Yuka TOBISAKA, Hiroshi YASUDA, Yoshihiro	275 (53)
2nd-Generation SJ-MOSFET for Automotive Applications "Super J MOS S2A Series" TABIRA, Keisuke NIIMURA, Yasushi MIINAZAWA, Hiroshi	279 (57)
Critical Mode PFC Control IC "FA1A60N" and LLC Current Resonant Control IC "FA6B20N" for High-Efficiency Power Supplies SONOBE, Koji YAGUCHI, Yukihiro HOJO, Kota	283 (61)
2nd-Generation Low Loss SJ-MOSFET with Built-In Fast Diode "Super J MOS S2FD Series" WATANABE, Sota SAKATA, Toshiaki YAMASHITA, Chiho	289 (67)
New Products	
Outdoor 555-kVA Power Conditioning Sub-System "PVI600BJ-3/555"	294 (72)
"MICREX-SX Series" Motion Controller "SPH3000D"	296 (74)
72- to 145-kV Compact Gas-Insulated Switchgear "SDH714"	299 (79)
Frozen Storage Container "WALKOOL"	302 (80)
Abbreviations and Trademarks	305 (83)

特集に寄せて

SiC-MOSFET の本格的な普及を期待して

Expecting the Proliferation of SiC-MOSFETs

赤木 泰文 AKAGI, Hirofumi

東京工業大学 工学院 教授 工学博士



1957年12月に、米国のGE社の研究者がSCR (Silicon-Controlled Rectifier) を発表した。当時、ダイオードは存在していたが、その動作は回路で決まり、外部からはまったく制御できない。これに対してSCRは、オンのタイミングを制御できるパワー半導体デバイスである。その後、SCRはサイリスタに呼称が変更された。水銀整流器とサイリスタのデバイス(素子)としての基本動作は同一であるが、放電と固体(半導体)という本質的な相違がある。しかも飽和電圧が約20Vから約2Vに低減し、機器・装置の小型化が一気に進んだ。“サイリスタの発明がパワーエレクトロニクス(パワエレ)という新たな技術分野を創出した”といっても過言ではない。

筆者は、2014年にスウェーデンのストックホルムにある王立工科大学で、水銀整流器を使用した直流電源装置(200V/10A)の実物を見る機会を得た。これは1926年にASEA社が製造したもので、三相電源に接続すれば現在でも動作しそうな保存状態に感動した。一方で、その体積に驚いた。講演会場の演台と同程度の体積であり、水銀整流器の時代が終焉(しゅうえん)したのは当然である。

1980年代後半からIGBTの実用化が始まった。これは革新的なデバイス構造と微細化に特徴がある。ゲート構造はプレーナ(平面)からトレンチ(溝)へ発展し、現在では第7世代IGBTの製品化が始まっている。1990年代にはパワートランジスタを早々に駆逐し、2000年代には高圧大容量GTOサイリスタをも駆逐してしまった。IGBTは1980年代後半から現在までの約30年という長期にわたってパワーデバイスの主役を務めている。この事実はIGBTが“筋の良い”パワーデバイスであることを正直に物語っている。

近年、ポストIGBTとしてSiC-MOSFETが注目されている。炭化けい素(SiC)はシリコン(Si)よりも優れた物性値を有しているが、SiCパワーデバイスの研究・開発は難航した。しかし、日本を含む世界の半導体材料・デバイスの研究者および技術者の地道な努力によって、第一ステップとしてのSiC-SBDの製品化が実現した。

第二ステップとしてのオン・オフ能力を有するスイッチングデバイスについては、欧州の企業は製造プロセスが比較的単純なSiC-JFETに注力した。しかし、SiC-JFETは原理的にノーマリーオン(ゲート電圧がゼロでオンす

る)デバイスであり、停電時やゲート駆動回路の故障時の対策・保護回路などを必要とする。このため、パワエレの回路や応用の研究者および技術者には好まれない。結局、SiC-JFETは本格的な普及には至っていない。

これに対して日本企業は、SiC-JFETよりも製造プロセスが複雑で、しかもオン抵抗が原理的にやや高くなるSiC-MOSFETの研究・開発に意欲的に挑戦した。その最大の理由は、SiC-MOSFETはノーマリーオフデバイスを実現できるからである。数年前からはサンプル出荷も始まり、早晩、複数の日本企業による安定供給体制が確立されるであろう。

電力変換システムへのSiC-MOSFETの応用研究も着実に進展している。筆者は、2016年9月にEPE Conference(5~9日、ドイツ・カールスルーエ)とIEEE ECCE-USA(18~22日、米国・ミルウォーキー)に出席した。いずれの国際会議においてもSiC-MOSFETのパッケージング、実装、回路、制御、応用に関する論文が多く発表され、SiC-MOSFETの応用研究が現在のホットなテーマであることを再認識した。

産業界では、大容量太陽光発電(メガソーラ)向けにSiC-MOSFETを使用したPVインバータの製品化が始まっている。PVインバータの定格出力での運転は地域にもよるが年間に10時間程度で、実質的には軽負荷での運転である。SiC-MOSFETにはビルトイン電圧が存在しないので、軽負荷時の電力損失を低減できる。その結果としてエネルギー効率も向上する。EVインバータについても同様で、軽負荷時(市内走行)の電力損失の低減に有効である。

SiC-MOSFETの高速スイッチング特性も魅力の一つである。MRIやCTなどの医療用機器の電源、高周波誘導加熱の電源などへの応用も検討されている。SiC-MOSFETを使用した小型・高効率の高周波電力変換回路と小型・軽量の高周波変圧器を一体化したSST(Solid-State Transformer)の研究も活発に進められている。さらにSiC-MOSFETは、新しい応用を生み出す可能性も秘めている。

2017年は、サイリスタ誕生から60年の還暦を迎えることになる。この節目の年にSiC-MOSFETの本格的な普及が進展することを期待したい。

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN, Toru

栗原 俊治 KURIHARA, Toshiharu

① まえがき

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

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

② パワーモジュール

パワー半導体製品は、単体もしくは複数のパワー半

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

2.1 第7世代 IGBT

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

2.2 パワーモジュールの構造

IGBTは通常、ダイオードなどとともに一つのパッ

(*)1) パワーモジュール

ダイオードやトランジスタといった複数のパワー素子を一つのパッケージに搭載したものである。一つのモジュールの中の素子（通常はIGBT+逆並列接続FWD）の数に応じて、1in1、2in1、6in1などと呼ばれる。パワー素子を制御する駆動回路も搭載したものは、インテリジェントパワーモジュール（IPM）と呼ばれる。

(*)2) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistorの略である。ゲー

ト部はMOSFETと同じ構造で、酸化物絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。MOSFETとバイポーラトランジスタの長所を生かしたものである。バイポーラ動作であるため伝導度変調を用いることができるので、インバータへの応用に十分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立できる。

(*)3) MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistorの略である。電界効果トランジスタの一つであり、酸化物絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デ

バイスである。LSIでは最も一般的な構造である。ユニポーラ動作であるため高速動作が可能であるが、耐圧に応じてオン抵抗も上昇するため低耐圧・高周波デバイスとして用いられる。ゲート部が素子の表面にあり、チャンネルが素子面と平行になるプレーナゲートMOSFETに対し、トレンチゲートMOSFETでは素子に溝を形成してゲート部を溝内に埋め込み、チャンネルを素子面に対して垂直方向にしている。

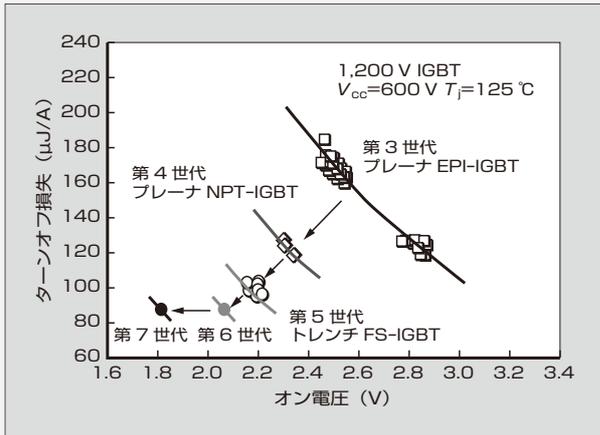


図1 IGBTのトレードオフ特性

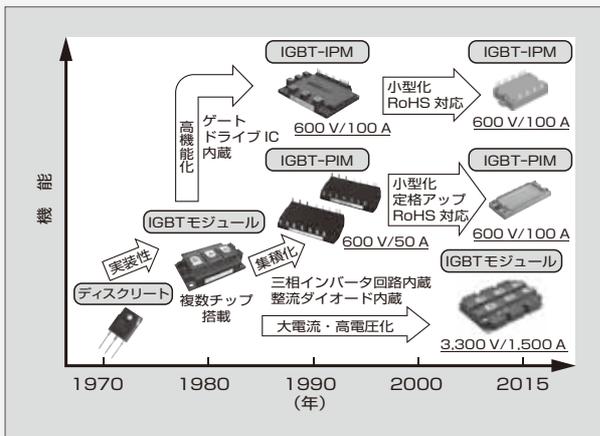


図2 パワーモジュール構造の変遷

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

(* 4) IPM

Intelligent Power Module の略である。パワー半導体素子に加え、駆動回路、保護回路を内蔵したパワーモジュールである。回路設計の負担を軽減できる上、専用の駆動回路を用いることで半導体素子の性能を最大限に引き出すことができる。

(* 5) FWD

Free Wheeling Diode の略である。還流ダイオードともいう。インバータなどの電力変換回路において、IGBT と並列に接続され、IGBT をオフした際にインダ

クタンスに蓄えられたエネルギーを電源側へ還流させる役割を担うデバイスである。Si の FWD では、PIN ダイオードが主流である。少数キャリアも用いたバイポーラタイプであるため、順方向電流通流時の電圧降下を小さくできるが、その分、逆回復損失が大きくなる。

(* 6) RC-IGBT

Reverse-Conducting (逆導通) IGBT の略である。モジュールにおいて対で使われる IGBT と FWD をワンチップ化した素子である。IGBT 部と FWD 部が交互に動作するので放熱性に優れ、モジュール内のチップ

数を削減できるため、IGBT モジュールの小型化とパワー密度向上につながる。

(* 7) SiC

けい素 (Si) と炭素 (C) の化合物である。3C, 4H, 6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって 2.2 ~ 3.3 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。

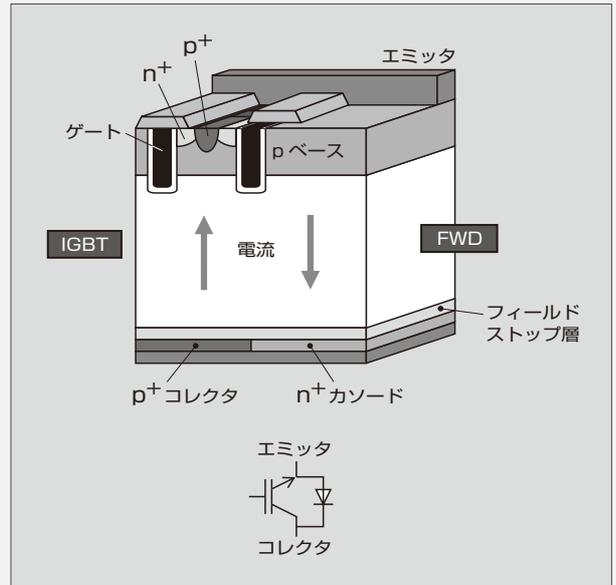


図3 RC-IGBTの概略構造

2.3 RC-IGBT モジュール

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

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

2.4 All-SiC モジュール

SiC は優れた物性を持ち、Si に代わる次世代半導体

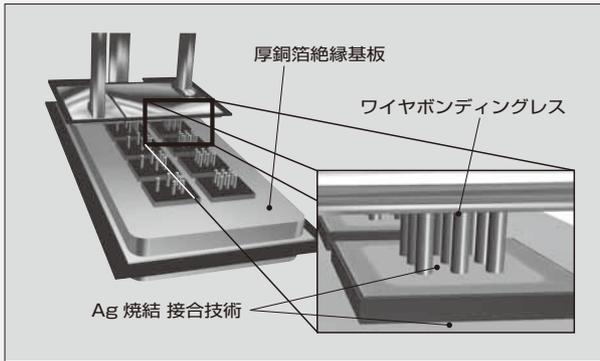


図4 All-SiC モジュールの内部構造の模式図

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

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

2.5 パワーモジュール製品

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

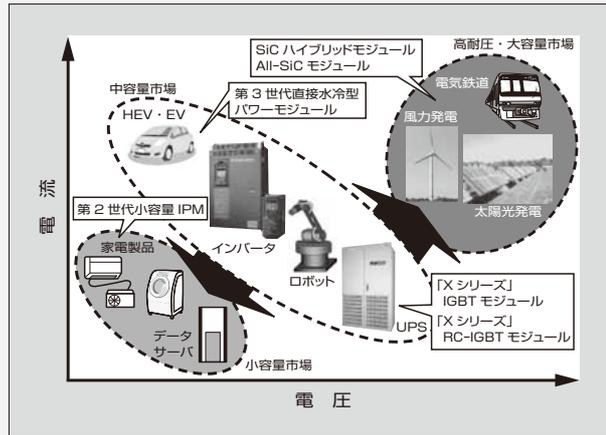


図5 パワーモジュール製品の応用例

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

③ パワーディスクリート・パワーIC

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

パワーIC製品としては、情報通信機器やTVなど

(* 8) SBD

Schottky Barrier Diodeの略である。金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用した整流作用を持つダイオードである。その優れた電気特性により、SiC-SBDのFWDへの適用検討が始まっている。少数キャリアも利用するPiN(P-intrinsic-N)ダイオードと比較して、多数キャリアのみで動作するSBDは逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。

(* 9) パワーディスクリート

パワー素子のIGBTやMOSFETを1素子、またはそれに逆並列にダイオードが挿入された1in1と呼ばれる回路から構成されるパワー半導体である。形状は、汎用的にピンレイアウトが決まっており、TO-220やTO-3Pなどがある。小容量タイプのPC電源、無停電電源装置、液晶ディスプレイ、小型モータの制御回路などに使われている。

(* 10) パワーIC

パワー素子と制御・保護回路を一つの半導体チップ上に集積した高耐圧ICである。パワーエレクトロニクス機器の小型化や低消費電力化が可能となり、産業、車載、民生の各用途に応じて数十Vクラスから1,200Vクラスまでのものが製品化されている。

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

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

3.1 SJ-MOSFET^(*11)

耐圧 600 V に代表される縦型の高耐圧 MOSFET では、耐圧を確保するためにドリフト層と呼ばれる領域のドーピング濃度を下げるか、厚くする必要がある。これらはいずれも抵抗増大につながることから、性能向上のためには抵抗と耐圧のトレードオフを改善する必要がある。このトレードオフ改善にブレークスルーをもたらし⁽⁴⁾たのが、スーパージャンクション (SJ) 構造である。SJ 構造の採用により、600 V 系パワー MOSFET の $R_{on} \cdot A$ は、数分の 1 に低減された。図 6 に従来構造と比較して SJ 構造の概念図を示す。SJ 構造は、p/n ピラーが交互に並んだ断面形状 (SJ 層) を持つ。富士電機では、SJ 層を多段エピタキシャル成長と不純物拡散により形成しており、スイッチング性能や特性ばらつきを考慮して適宜濃度分布を調整している。

3.2 電源 IC

電源 IC の市場では、モバイル機器のアダプタ電源や 32 インチ以下の TV の組み込み電源で^(*)12)使用される PWM-IC が市場全体の約 50% を占め、40 インチ以上の TV や比較的大容量の通信電源などで使用される

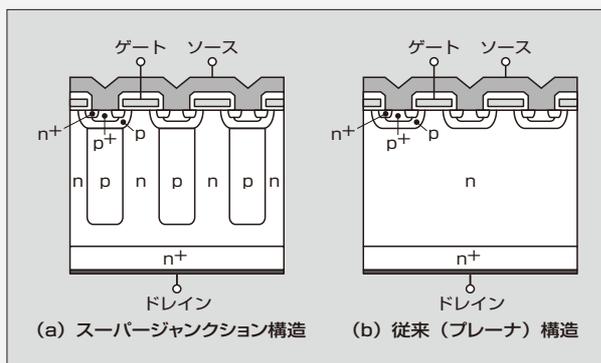


図 6 従来構造と SJ 構造の概念図

(* 11) SJ-MOSFET

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

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

(* 12) PWM

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

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

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

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

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

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

3.3 IPS

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

スイッチング素子を用いた電力制御の方式の一つである。DC 入力に対し、一定周波数でオン・オフを繰り返し、オンの時間幅を変化させることで出力を変化させる。インバータで DC-AC 変換を行う際などに一般的に用いられている。

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

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

④ パワー半導体の開発状況

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

4.1 1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET

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

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

4.2 All-SiC 2 in 1 モジュール

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

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

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

4.3 All-SiC モジュールの高耐圧化

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

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

4.4 All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

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

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

4.5 第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール「Dual XT」

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

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

4.6 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール

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

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

4.7 第2世代小容量IPMの系列化

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.10 車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5 あとがき

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

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

参考文献

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



藤平 龍彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、日本金属学会会員、IEEE 会員。



宝泉 徹

パワー半導体の開発、事業企画に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部長。電気学会会員。



栗原 俊治

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



1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET

1.2-kV SiC Trench MOSFET

辻 崇 TSUJI, Takashi

岩谷 将伸 IWAYA, Masanobu

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

富士電機は、これまで SiC プレーナゲート MOSFET を開発し、製品化している。プレーナゲート MOSFET は過度に微細化すると JFET 抵抗が増加し、理論的限界に迫る低オン抵抗にできない。一方、トレンチゲート MOSFET にはこのような問題がなく、微細化するほどオン抵抗を低減することができる。そこで、1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET を開発した。セルピッチの縮小や MOS チャネル長の最適化を図るとともに、JFET 領域の構造を最適化した。これにより従来と比較して、スイッチング損失を低減するとともに、しきい値電圧を 2.4 倍高くでき、オン抵抗を 48% 低減することができた。

Fuji Electric has developed and released SiC planar gate MOSFETs. Excessive shrinkage of the cell pitch of planar MOSFETs leads to a high JFET resistance, which prevents them from achieving a low on-resistance close to the theoretical limit. To the contrary, the cell pitch of trench-gate MOSFETs can be shrunk without the increase of the JFET resistance. We have therefore developed a 1.2-kV SiC trench gate MOSFET. We have optimized the structures of the MOS channel and the JFET region, as well as reduced the cell pitch. Our trench-gate MOSFETs realize low switching loss, the increase of the threshold voltage 2.4 times, and the reduction of the on-state resistance by 48% compared with the conventional planar MOSFETs.

1 まえがき

富士電機は、環境とエネルギーで資源循環型社会に貢献するため、鉄道、自動車、電源、電力系統などに使用されるパワーエレクトロニクス機器を提供している。その中のコア部品であるパワー半導体デバイスは、Si-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) からワイドギャップ半導体の一つである炭化けい素 (SiC) を用いた MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) への移行が進んでいる。この理由は、SiC ではドリフト層の抵抗を Si の約 300 分の 1 にできるために導通損失を Si-IGBT より低減できることと、ユニポーラデバイスである SiC-MOSFET ではスイッチング時に少数キャリアの掃き出しがないためにスイッチング損失を Si-IGBT より低減できることによる。

富士電機は、これまで SiC プレーナゲート MOSFET およびこれを搭載した All-SiC モジュールを開発し、このモジュールを組み込んだ高効率かつ小型・軽量のパワーコンディショナ (PCS) やメガソーラー用 PCS を製品化している。

本稿では、開発した 1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET について述べる。

2 設計・特徴

SiC は、Si に比べてゲート酸化膜である SiO_2 との界面の界面準位密度が高く、電子の捕獲が起こりやすい。そのため、MOS チャネル抵抗が高くなり理論的限界までオン抵抗を低減できない。MOS チャネル抵抗を低減するためには、界面準位密度を低減すると同時にセル密度を増加 (微細化) することが有効である。これまでの

プレーナゲート MOSFET を過度に微細化すると、JFET (Junction Field-Effect Transistor) 抵抗が増加する⁽¹⁾。一方、MOS チャネルが表面に対して垂直となるトレンチゲート MOSFET では、微細化による JFET 抵抗成分の増加はないので微細化するほどオン抵抗を低減することができる。

図 1 に今回開発した SiC トレンチゲート MOSFET の断面構造とチップの写真を示す。開発に当たってのポイントは次の三つである。

- (a) ゲート信頼性の向上
- (b) 高いしきい値電圧と低いオン抵抗の両立
- (c) 低オン抵抗と高耐圧の両立

ゲートの信頼性を向上させるためには、逆方向電位を印加したときのトレンチ底のゲート酸化膜の高い電界を緩和する必要がある。そのため図 1 に示すように、トレンチ底のゲート酸化膜を p ウェル (図中 A) で覆う構造とした。デバイスシミュレーションから電界はトレンチ底の p ウェルのボトムコーナー部で最大となっており、ゲート酸化膜

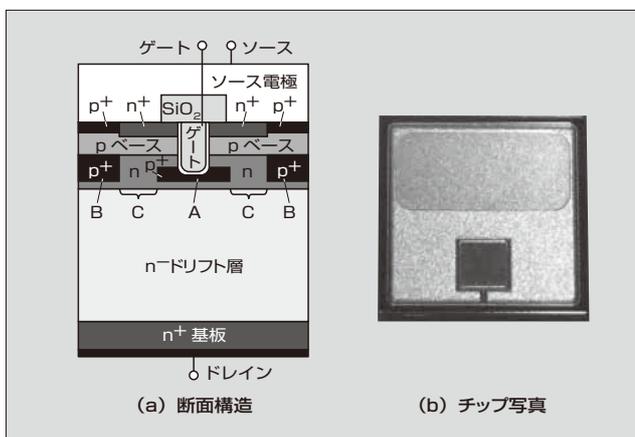


図 1 SiC トレンチゲート MOSFET

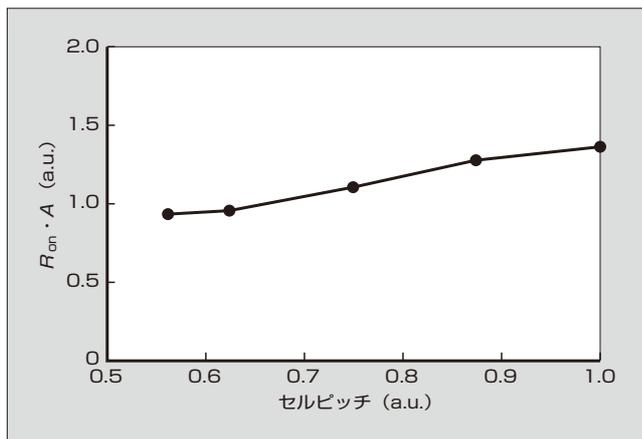


図2 オン抵抗のセルピッチ依存性

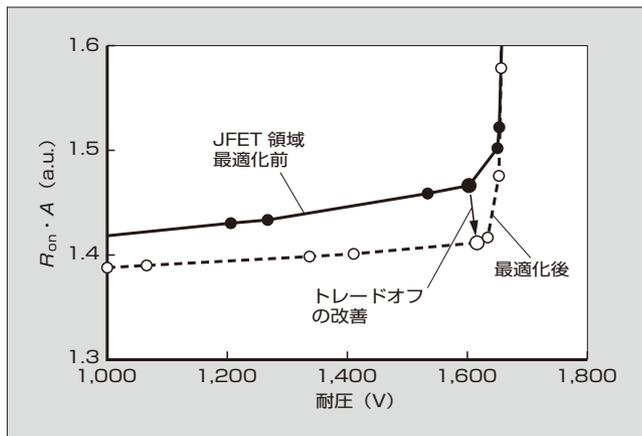


図3 オン抵抗と耐圧のトレードオフの関係

の電界は緩和されていることを確認している⁽⁸⁾。
 高いしきい値電圧と低オン抵抗を両立するために、セルピッチの縮小による微細化と、MOSチャネル長を最適化した。図2に示すように、セルピッチが縮小するほどオン抵抗が低くなる。しかしながら、プロセスの工程能力との兼ね合いからセルピッチをプレーナゲートMOSFETの約1/2とした。

低オン抵抗と高耐圧を両立させるために、図1のトレンチ底のpウェル(図中A)とソースコンタクト下のpウェル(図中B)で挟まれたJFET領域(図中C)を最適化した。最適化する上で多数あるパラメータの決定には、デバイスシミュレーションを利用した⁽⁸⁾。図3に、オン抵抗と耐圧のトレードオフの関係を示す。JFET領域の最適化により、オン抵抗は約3%低減し、耐圧は約2%向上した。

3 特性

3.1 静特性

開発したSiCトレンチゲートMOSFETの静特性を図4に示す。図4(a)に、デバイス接合温度25℃および175℃における順方向時のドレイン電流-ドレイン電圧特性を示す。定格電流時のオン電圧は25℃で1.3V、175℃で2.3Vであった。図4(b)に、逆方向バイアス時のドレイン電流-

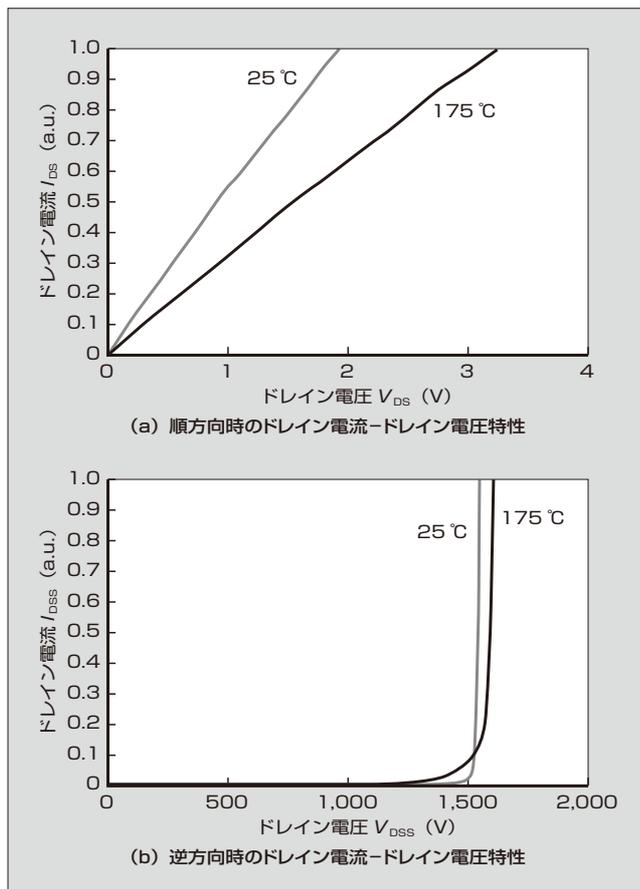


図4 SiC トレンチゲート MOSFET の静特性

ドレイン電圧特性を示す。耐圧は25℃で1.55kV、175℃で1.61kVである。プレーナゲートMOSFETと同様に、温度の増加とともに耐圧も増加している。また、1.2kVクラスの素子として十分な電圧を確保できている。

図5に、しきい値電圧およびオン抵抗の温度依存性を示す。しきい値電圧は、25~200℃の範囲では温度の上昇とともに単調に減少し、25℃に対し175℃で約26%低下する。一方、オン抵抗は単調に増加し、25℃に対し175℃で約57%の増加となる。複数のチップを並列に接続した場合、特定のチップに電流の集中が起きたとしても温度上昇によりオン抵抗は増加して電流が低下するため、熱暴走

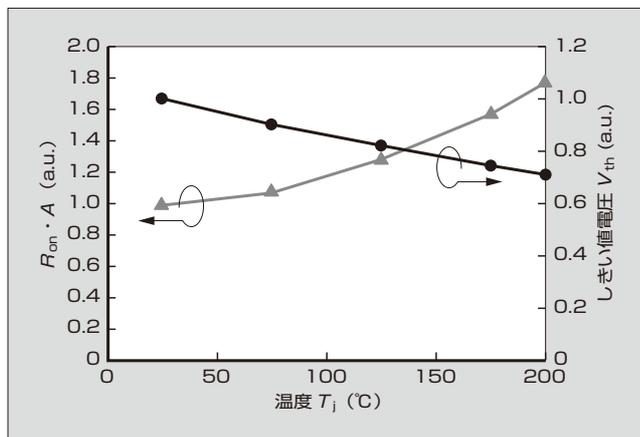


図5 しきい値電圧およびオン抵抗の温度特性

を起こしにくいという特徴がある。

また、単位面積当たりのオン抵抗は、プレーナゲート MOSFET に対しトレンチゲート MOSFET では約 50% 低減することに成功した。モジュールやパワーエレクトロニクスシステムにおける効率向上や冷却部品の小型化を通して、これまで以上にシステム全体の低コスト化への貢献が期待できる。

3.2 スイッチング特性

図 6 に、スイッチング評価回路、および代表的なターンオン波形と、ターンオフ波形を示す。ゲート電圧が 0V のときに、ドレイン電流がオン時の 90% になるまでのターンオン時間は約 60 ns である。また、ゲート電圧がオン時の 90% のときには、ドレイン電流がオン時の 10% になるまでのターンオフ時間は約 75 ns である。

図 7 に、スイッチング損失のゲート抵抗依存性を示す。ドレイン電圧 600V、ゲート抵抗 22 Ω、25℃ の場合で比較すると、トレンチゲート MOSFET はプレーナゲート

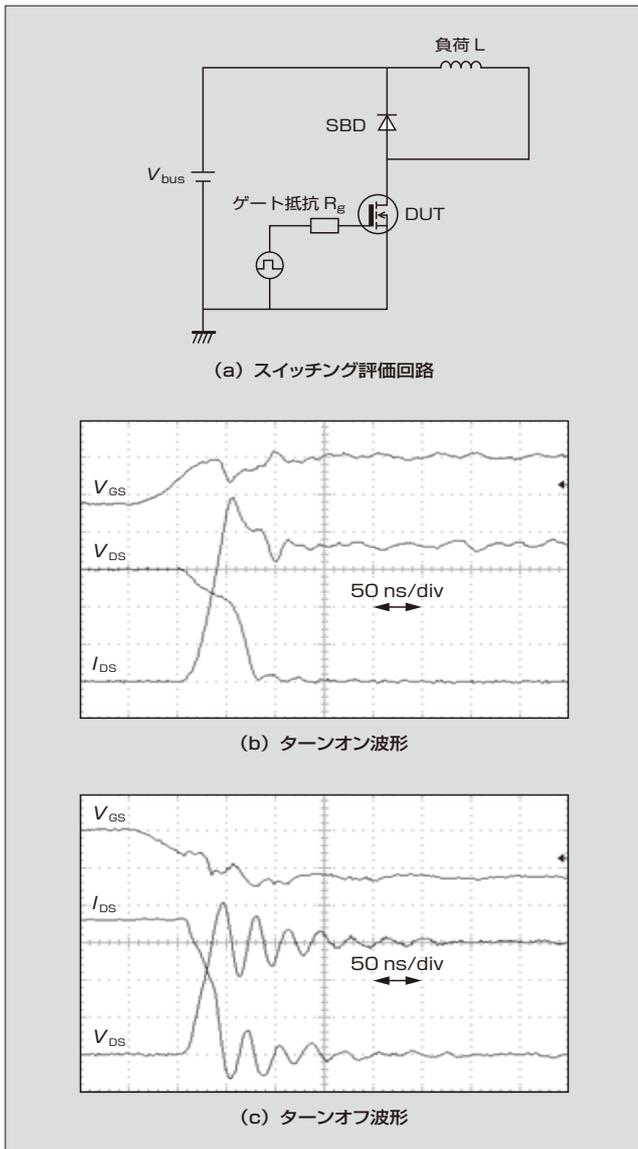


図 6 スイッチング評価回路および代表的な波形

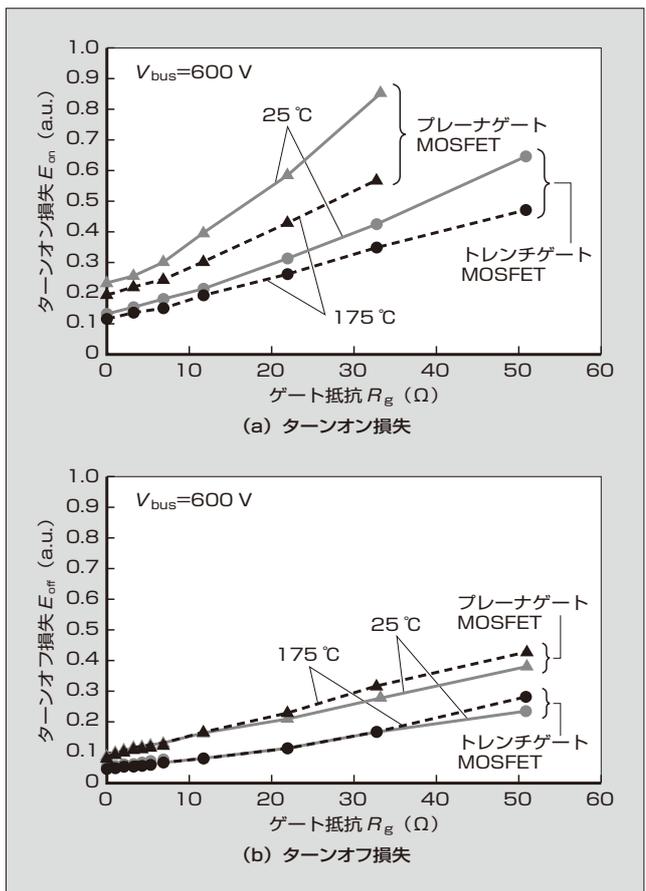


図 7 スイッチング損失のゲート抵抗依存性

MOSFET に対してターンオン損失で 47%，ターンオフ損失で 48% 低くなっている。これは帰還容量 C_{rss} がプレーナゲート MOSFET より今回開発したトレンチゲート MOSFET の方が小さいためであると考えられる。

175℃ のときのターンオン損失は、25℃ のときに比べて低い。これは、175℃ においてはしきい値電圧も同様に低いので、ターンオン時のゲートへの充電時間が短くなるので、低ターンオン損失となるものと考えられる。また、ターンオフ損失は 175℃ の方が若干高くなる。ターンオフ時に駆動電圧としきい値電圧との差は 175℃ の方が若干大きく、ゲートからの電荷の放電時間が長くなるためであると考えられる。

3.3 短絡耐量・アバランシェ耐量

図 8 に、ドレイン電圧 800V、175℃ における短絡耐量試験の破壊直前の波形を示す。短絡時間 9.8 μs と十分高い短絡耐量を確認できた。

図 9 は、負荷インダクタンス 100 μH、175℃ におけるアバランシェ耐量試験時の波形である。アバランシェ耐量は 6.0 J/cm² であり、プレーナゲート MOSFET と同レベルであった。

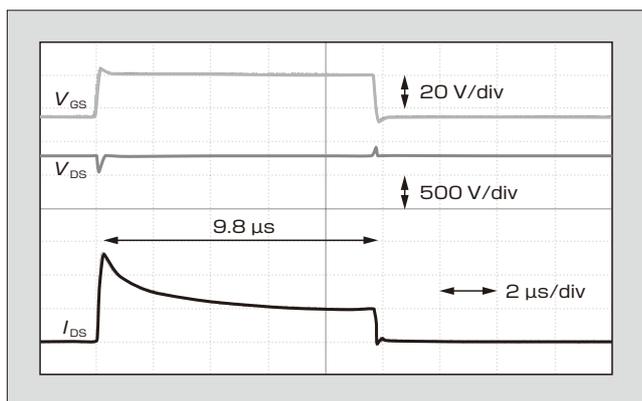


図8 短絡耐量試験時の波形

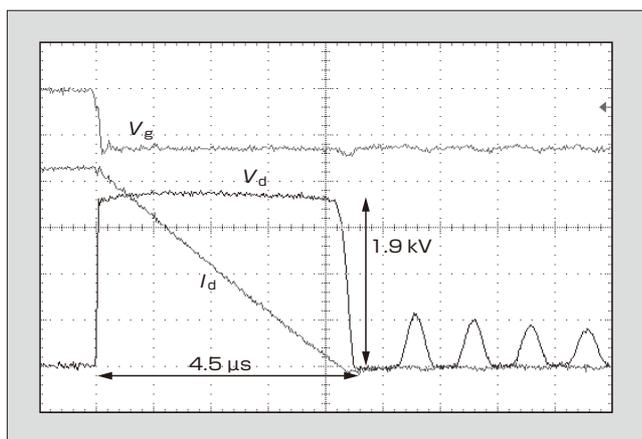


図9 アバランシェ耐量試験時の波形

4 あとがき

本稿では、1.2 kV SiC トレンチゲート MOSFET について述べた。

セルピッチの短縮とチャネル長の最適化により、SiC プレーナゲート MOSFET より高いしきい値電圧と低いオン抵抗を両立できる SiC トレンチゲート MOSFET を開発した。今後は、さらなるオン抵抗の低減を目指し、SiC/SiO₂ 界面品質の向上に取り組む所存である。

本研究の一部は、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。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) B.J.Baliga, POWER SEMICONDUCTOR DEVICE, PWS Publishing Company.
- (2) 梨子田典弘ほか. All-SiCモジュール技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.403-407.
- (3) 仲野逸人ほか. 超小型・高信頼性All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.244-248.
- (4) 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.
- (5) 松本康ほか. SiCデバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.255-259.
- (6) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用PCS「PVI1000AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (7) T.Kimoto and J.A.Cooper, FUNDAMENTALS OF SILICON CARBIDE TECHNOLOGY, 2014 John Wiley & Sons.
- (8) 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.

辻 崇



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 SiC 開発部。応用物理学会会員。

岩谷 将伸



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プロセス開発部。応用物理学会会員。

大西 泰彦



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 SiC 開発部マネージャー。工学博士。電気学会会員。



All-SiC 2 in 1 モジュール

All-SiC 2-in-1 Module

蝶名林 幹也 CHONABAYASHI, Mikiya

大友 良則 OTOMO, Yoshinori

唐沢 達也 KARASAWA, Tatsuya

防じん防水型の高性能コンパクト型 IP65 対応インバータを実現するため、SiC デバイスを用いた All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した。SiC デバイスは、Si デバイスに比べてスイッチング損失を大幅に低減できるが、これを用いるためには、モジュール内部の配線インダクタンスを低減するとともに、高温動作を保証する高い信頼性のパッケージ技術が必要である。富士電機は、これらを解決するために新構造のパッケージを開発した。IP65 対応インバータは、Si デバイスを用いた従来のインバータに比べて主回路の損失を 44% 低減した。

Fuji Electric has developed an All-SiC 2-in-1 module utilizing a SiC device that has been adopted in the development of a high-performance compact IP65-rated inverter characterized by its dustproof and waterproof features. In order to make use of the much lower switching loss of SiC devices compared with Si devices, it is necessary to create a highly reliable packaging technology that ensures high-temperature operation while also reducing wiring inductance inside the module. Fuji Electric has developed a package with a new structure to meet these requirements. As a result, the IP65-rated inverter reduces loss in the main circuit by 44% when compared with conventional inverters that use Si devices.

① まえがき

低炭素社会を実現するために、再生可能エネルギーの積極的な活用や、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。パワエレ機器の電力変換において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）デバイスは特性改善が進められているが、既に物性に基づく理論的限界に近づきつつある。このような状況から、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）が注目されている。SiC デバイスは、Si デバイスよりも大幅に低損失化が可能であるため、さらなる省エネ化への貢献が期待されている。

富士電機は、メガソーラー用パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）向けに SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を組み合わせた All-SiC モジュールを開発し、量産している。All-SiC モジュールを PCS の昇圧回路に採用することで 20% の損失低減を実現し、変換効率は世界最高レベルの 98.8% を達成した。変換効率の向上と同時に回路を最適化し、従来機種を 2 台設置した場合と比較してフットプリントで約 60% の小型化を実現した⁽¹⁾。

今回、防じん防水型の高性能コンパクト型 IP65 対応インバータを実現するため、All-SiC 2 in 1 モジュールを開発した（図 1）。このインバータは、現場環境の壁に直接取り付けることができ、収納するための専用の電気盤が不要である。本稿では、この All-SiC 2 in 1 モジュールの要素技術と特性について述べる。

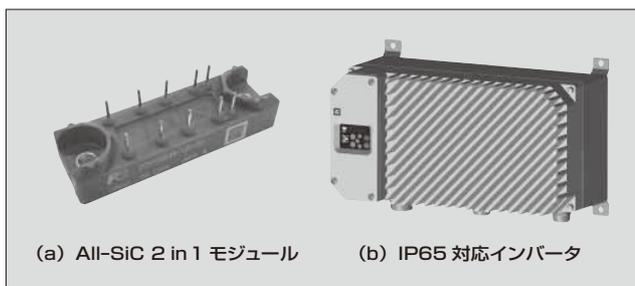


図 1 All-SiC 2 in 1 モジュールと IP65 対応インバータ

② 要素技術

2.1 SiC デバイスの適用

SiC は、Si に比べて最大電界強度が約 10 倍高い。そのため、電気抵抗の主要因であるドリフト層を 1/10 程度の厚さにすることができ、電力損失を大幅に削減できる。また、Si では不可能であった高耐圧デバイスを実現することができる。さらに、SiC は Si に比べてバンドギャップが約 3 倍広いので、高温においても安定した動作が可能である。これに加えて、SiC の熱伝導率は Si の 3 倍以上であり、放熱性が高い。

従来の Si デバイスで低オン抵抗化を行うためには、バイポーラ動作が必要であった。そのため、スイッチング動作時にキャリアの注入や掃き出しが必要となるためスイッチング損失が大きかった。SiC デバイスは、前述の特性により、従来の Si デバイスでは実現不可能であった 1,200 V 以上の耐圧の MOSFET 構造や SBD 構造のデバイスを実現することが可能である。MOSFET や SBD は、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）や pn ダイオードなどのバイポーラトランジスタと異なり、ユニポーラ動作のため非常に速いスイッチングが可能であり、スイッチング

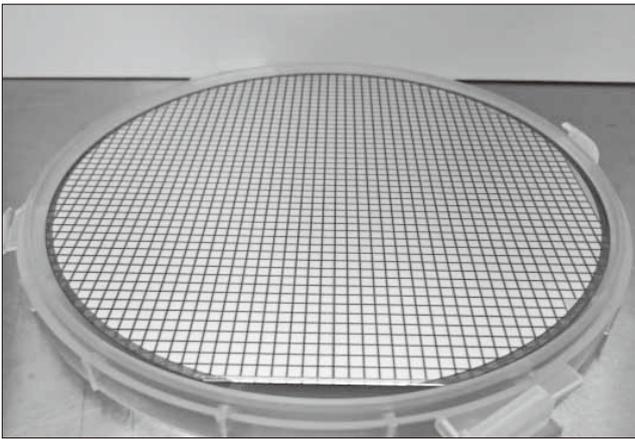


図2 6インチウェーハ

損失が大幅に低減できる。

富士電機では、2013年から松本工場にて世界初のSiC6インチウェーハの生産ラインを稼動している。図2に6インチウェーハの外観を示す。

2.2 新構造パッケージ

2.1節で述べたように、SiC-MOSFETはSi-IGBTに比べて高速スイッチングが可能である。しかし、スイッチング速度の高速化に伴ってサージ電圧が高くなるため、モジュール内部の配線インダクタンスを低減する必要がある。また、SiC-MOSFETなどのサイズの小さいチップを多数並列に接続でき、SiCデバイスの高温動作を保証する高い信頼性のモジュール用のパッケージ技術が必要である。

富士電機は、これらの課題を解決するために、All-SiC 2 in 1 モジュール用に新構造のパッケージを開発した(図3)。

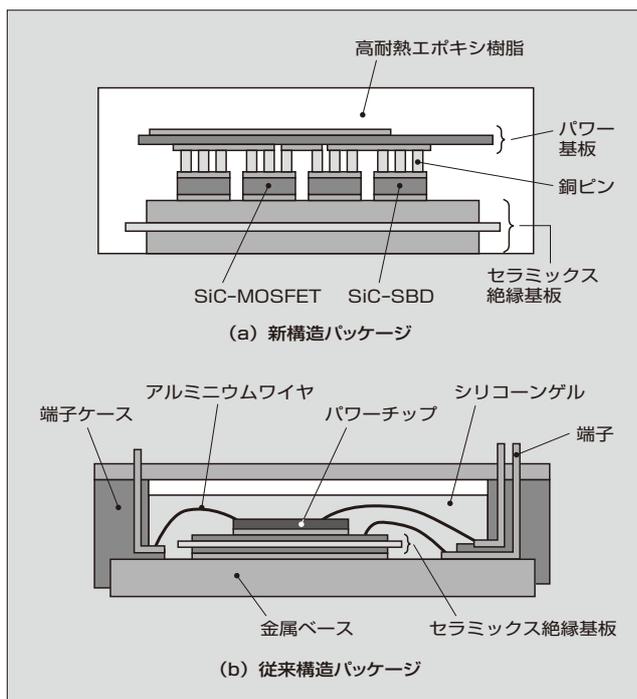


図3 新構造パッケージと従来構造パッケージの比較

図3(b)に示す従来のアルミニウムワイヤボンディングに替えて、図3(a)の新構造パッケージでは、SiCデバイス上に形成した銅ピンで配線しているため、大電流を流すことができる。また、サイズの小さなSiCチップを高密度で実装でき、多数並列に接続することができる。さらに、アルミニウムワイヤボンディングに比べ、内部のインダクタンスが約1/4に減少する。パワーチップを搭載する従来の絶縁基板に替えて、厚い銅板が接合されたセラミックス絶縁基板を採用し、低熱抵抗化を図っている。これに加えて、モジュール内部の封止材料である従来のシリコンゲルに替えて高耐熱エポキシ樹脂を採用することにより、チップと銅ピンの接合部などにおけるひずみの発生を抑制した。この構造の採用により、従来品に比べて ΔT_j パワーサイクル耐量が10倍という高い信頼性を確保している。

③ 特性

3.1 導通時のI-V特性

モジュール導通時に発生する損失(定常損失)を決める特性がI-V特性である。All-SiC 2 in 1 モジュールとSi-IGBTモジュールのI-V特性を図4に示す。MOSFETは、IGBTのようなビルトイン電圧がない。そのためAll-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBTに比べてある一定の電流以下で定常損失を低減することが可能である。

3.2 スイッチング特性

スイッチング損失は、ターンオン時に発生するターンオン損失、ターンオフ時に発生するターンオフ損失、逆回復時に発生する逆回復損失の三つに分けることができる。ターンオン損失を図5に、ターンオフ損失を図6に、逆回復損失を図7に、トータルスイッチング損失を図8に示す。All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBTモジュールに対して、ターンオン損失が62%、ターンオフ損失が74%、逆回復損失が100%、それぞれ低減する。これによりAll-SiC 2 in 1 モジュールは、従来のSi-IGBTモジュールに対して、トータルスイッチング損失が75%低減する。

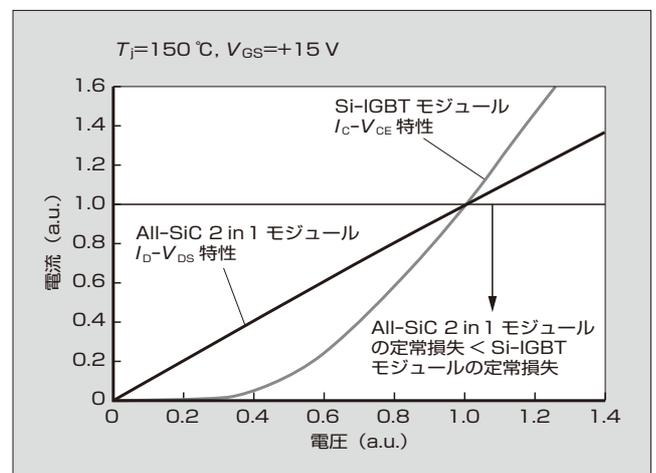


図4 I-V特性

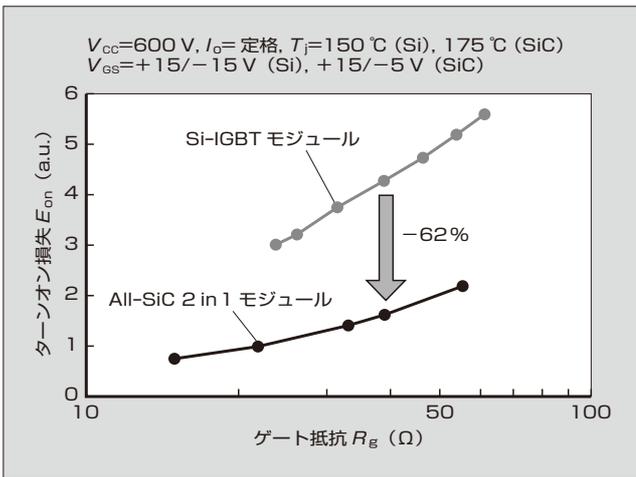


図5 ターンオン損失

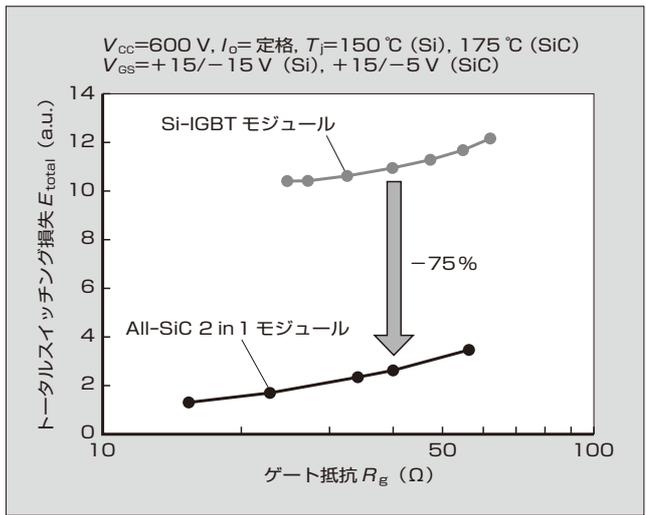


図8 トータルスイッチング損失

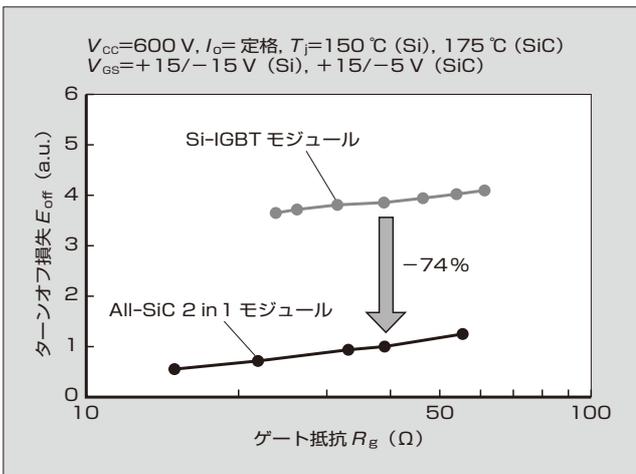


図6 ターンオフ損失

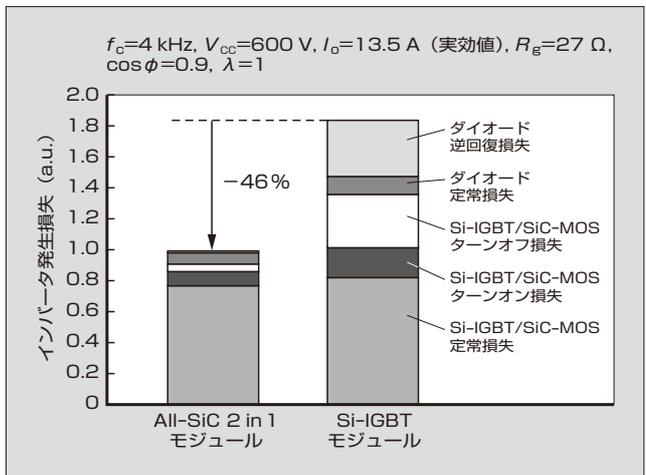


図9 インバータ発生損失シミュレーションの結果

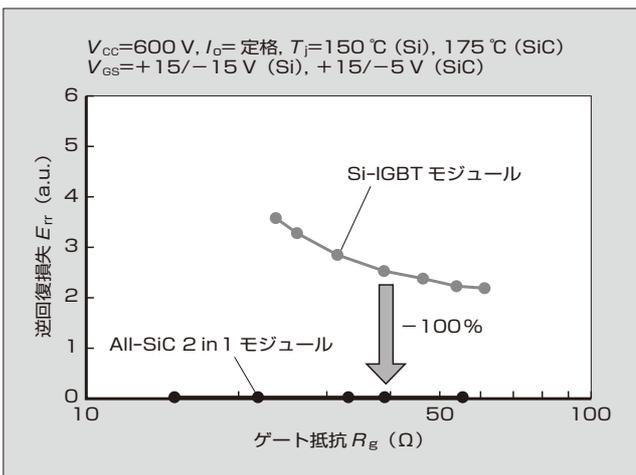


図7 逆回復損失

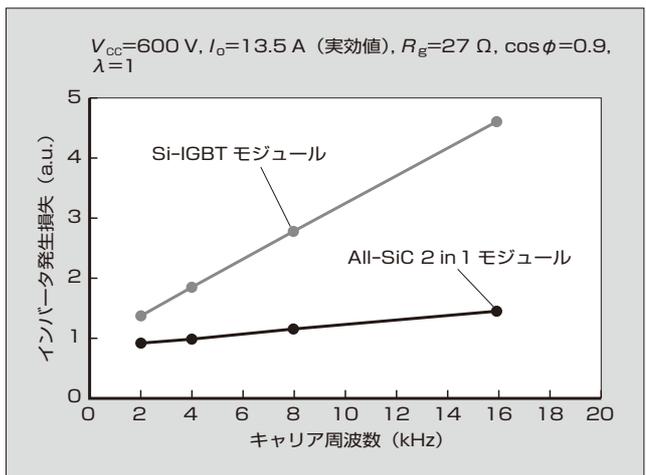


図10 インバータ発生損失のキャリア周波数依存性

3.3 インバータ発生損失シミュレーション

インバータの一般的な使用条件において、All-SiC 2 in 1 モジュールと Si-IGBT モジュールについてインバータ発生損失シミュレーションを行った。キャリア周波数 4kHz におけるシミュレーションの結果を図 9 に示す。All-SiC

2 in 1 モジュールは、Si-IGBT モジュールに対してインバータ発生損失が 46% 低い。

図 10 にインバータ発生損失のキャリア周波数依存性を示す。All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBT モジュールに比べてスイッチング損失が非常に小さいため、キャリア

表1 All-SiC 2 in 1 モジュールの系列展開

項目	タイプ1	タイプ2	タイプ3L
外観			
外形寸法 (mm)	W62 × D20 × H12	W68 × D26 × H13	W126 × D45 × H13
パッケージ	新構造パッケージ		
定格	定格電圧 (V)	1,200	
	定格電流 (A)	15, 35	50, 75, 150, 200, 320
適用素子	MOSFET	SiC-MOSFET	
	SBD	SiC-SBD	

周波数を上げてインバータ発生損失の増加は小さい。したがって、All-SiC 2 in 1 モジュールは、Si-IGBT よりも高いキャリア周波数でのスイッチング動作が可能となるため、フィルタなどの受動部品が小型になり、パワーエレ機器の小型化につながる。

3.4 製品への適用

富士電機では、2章で述べた要素技術により All-SiC 2 in 1 モジュールを製品化し、表1に示す系列展開を行う。IP65 対応インバータには小型化のメリットが大きいタイプ1〔外形寸法：W62×D20×H12 (mm)〕を採用した。これにより、従来の Si-IGBT モジュール〔外形寸法：W94×D34×H30 (mm)〕に対し、モジュールのフットプリントを約 60% 低減した。

IP65 対応インバータは、食品加工ライン、工業炉、家畜厩舎（きゅうしゃ）など、厳しい環境で使用用途に向けて開発した。このような環境で使用用途には、小型化だけでなく、高い保護構造と自冷構造が要求される。

これらを実現するために、低損失、高温動作保証、高信頼性、低熱抵抗という All-SiC 2 in 1 モジュールの特性を生かし、IP65 対応インバータの開発に貢献した。All-SiC 2 in 1 モジュールの搭載により、従来の Si モジュールを搭載した製品に比べて主回路損失において 44% の低減を実現している。

4 あとがき

IP65 対応インバータを実現するための All-SiC 2 in 1 モジュールについて述べた。

現在、SiC-MOSFET ではゲートを基板の表面に形成するプレーナゲート型が主流である。さらなる省エネルギー化や低価格化の市場要求に応えるためには、SiC-MOSFET が導通する際のオン抵抗 R_{on} を低減する必要がある。この実現のために、富士電機ではトレンチゲート MOSFET を開発中である⁽⁴⁾。トレンチゲート MOSFET を

All-SiC 2 in 1 モジュールに実装することにより、モジュールのいっそうの小型化と大容量化が可能となる。

今後も、All-SiC 2 in 1 モジュールをさまざまなパワーエレクトロニクス機器に搭載し、パワーエレクトロニクス技術の発展と低炭素社会の実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用 PCS「PV1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (2) 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.
- (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) 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.



蝶名林 幹也

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事業統括部モジュール技術部。



大友 良則

パワー半導体用パッケージ組立の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部。



唐沢 達也

SiC の構造開発・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実装開発部。

All-SiC モジュールの高耐圧化

Enhanced Breakdown Voltage for All-SiC Module

日向 裕一郎 HINATA, Yuichiro

谷口 克己 TANIGUCHI, Katsumi

堀 元人 HORI, Motohito

現在、耐圧が1kV程度の分野で普及が進んでいるSiCデバイスは、ハイブリッド自動車や電気自動車などの信頼性が強く求められる分野、および鉄道などの耐圧が3~10kVの高耐圧の分野に採用が見込まれている。富士電機は、銅ピン接続と樹脂封止からなる新構造のパッケージを開発し、All-SiCモジュールの高耐圧化を実現した。電界シミュレーションや熱解析の結果を基に、絶縁基板における電極の位置や厚みを最適化することにより、電界強度の緩和と放熱性を両立させている。

In recent years, SiC devices have been widespread mainly in fields that require a breakdown voltage of approximately 1kV. They are expected to be used in the high voltage fields that require a breakdown voltage from 3 to 10kV such as railways, as well as the automotive field that require high reliability such as hybrid vehicles and electric vehicles. Fuji Electric has developed a newly structured package featuring copper pin connections and resin molding to achieve SiC modules with high breakdown voltage. Based on the results of electric field simulations and thermal analysis, the electric field strength relaxation and high heat radiation are achieved by the optimization of the positioning and thickness of electrodes on the insulation substrate.

1 まえがき

地球温暖化などの環境問題への関心が高まる中、CO₂などの温室効果ガスの排出量の削減が求められており、電気を効率よく使いこなして省エネルギー（省エネ）を行う電力変換技術に期待が寄せられている。電力変換を行う機器・装置において、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。これまで主流であったSi（シリコン）を使用した半導体デバイスは、長年にわたって改良が進められ、その性能が物性に基づく理論的限界に近づいている。そこで、次世代材料であるSiC（炭化けい素）やGaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体を使用したデバイスの開発が盛んに進められている。特に、SiCデバイスは飛躍的な低損失化が可能であり、パワーエレクトロニクス製品の損失を低減することにより省エネ化への貢献が期待される。現在は、太陽光発電用パワーコンディショナ（PCS）やデータサーバ用電源などの耐圧が1kV程度の分野で普及が進んでいる。今後、ハイブリッド自動車や電気自動車などの信頼性が強く求められる分野、および鉄道などの耐圧が3~10kVの高耐圧の分野に採用が見込まれている。

富士電機では、従来のワイヤボンディングとシリコンゲル封止からなる構造に替えて、銅ピン接続と樹脂封止からなる新構造のパッケージを開発し、All-SiCモジュールの高耐圧化を実現した。

2 モジュールの基本構造と高耐圧化のための課題

図1に示すように、All-SiCモジュールの構造は従来のSi-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールの構造と大きく異なっている^{(1),(2)}。All-SiCモジュールでは、

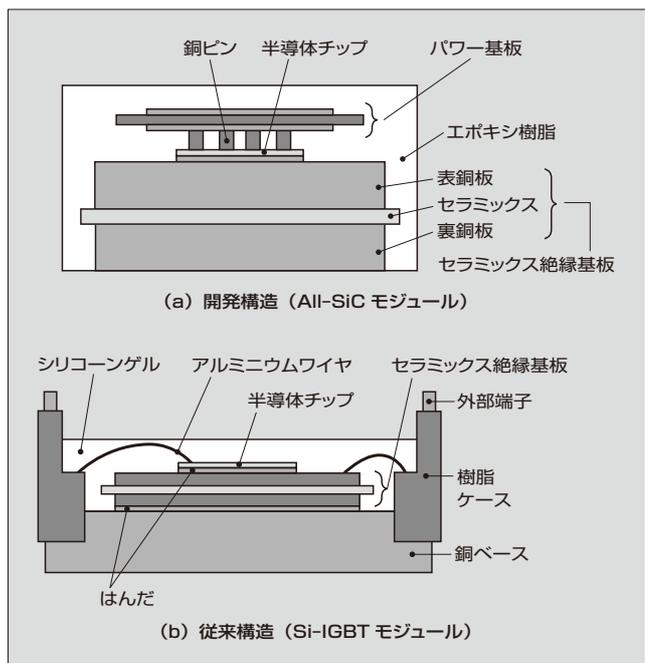


図1 モジュールの構造

従来のアルミニウムワイヤに替えて、パワー基板上に形成した銅ピンで接続している。これによって大電流が流せるようになり、SiCデバイスの高密度実装が可能になった。半導体チップを搭載するセラミックス絶縁基板には、従来よりも厚い銅板が接合されたSi₃N₄（窒化けい素）絶縁基板を採用し、低熱抵抗化を図っている。さらに、モジュール内部の封止材料として、従来のシリコンゲルに替えてエポキシ樹脂を採用することで、高温動作におけるはんだ層の劣化や絶縁性能の低下を抑え、高い信頼性を確保している。

半導体モジュールは十数年という長期にわたって使用さ

れるため、使用方法や使用環境によって変化する熱応力や電圧変化に対し、安定した絶縁性能の確保が必要である。絶縁設計を行う上では、絶縁破壊電界が重要な指標の一つである。電界強度は、材料に印加される電圧、構成材料の形状、誘電率などの影響を大きく受ける。また、電界強度は、ポイドや剥離などの封止材料の欠陥および電極端部において高くなることが多い。従来構造で封止材に用いているシリコンゲルにおいても、175℃以上の高温で使用するとシリコンゲルの内部にポイドやクラックが発生し、そこを起点に絶縁破壊に至る。そのため、高耐圧化や高温対応を行った All-SiC モジュールのパッケージを開発するためには、封止樹脂やセラミックスといった材料に適切なものを選定することが重要である。さらに、パワー基板やセラミックス絶縁基板などの界面の電界を緩和する構造を検討する必要がある。

③ 高耐圧化に向けたパッケージ設計技術

3.1 絶縁性能に関するパッケージ設計

半導体モジュールの内部で電界強度が高くなりやすい箇所は、半導体チップ表面の端部近傍や銅板の端部近傍におけるエポキシ樹脂やセラミックスなどの絶縁体である。このような電界強度の高い箇所を起点としたセラミックス貫通破壊や、セラミックスとエポキシ樹脂、表銅板とエポキシ樹脂といった部品の接合部での界面破壊が起きることにより、絶縁破壊となることが多い。導体である銅板、絶縁体であるエポキシ樹脂およびセラミックスが1点で交わる三重点に着目して電界シミュレーションを行った。

図2は、セラミックスの厚みや種類、銅板の厚み、エポキシ樹脂の種類を統一し、セラミックス端部から表裏の銅板までの距離が同じ場合〔図2(a)〕と、表銅板のみセラミックス端部からの距離を増やした場合〔図2(b)〕の電界強度の分布を示している。シミュレーションの結果から、

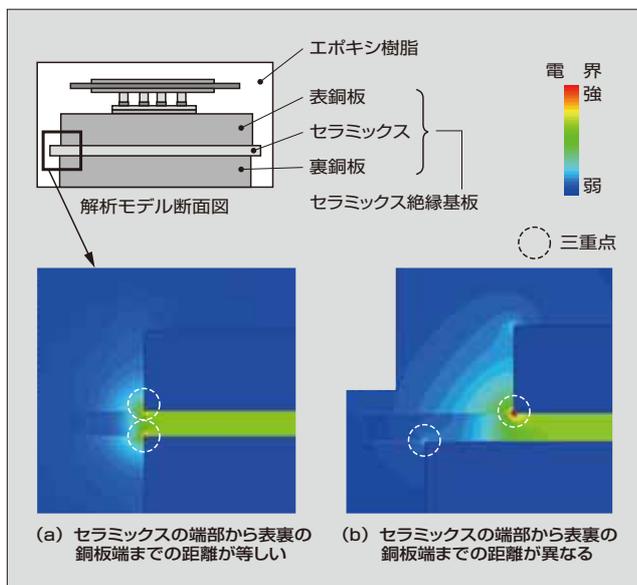


図2 電界シミュレーション結果（電界強度分布）

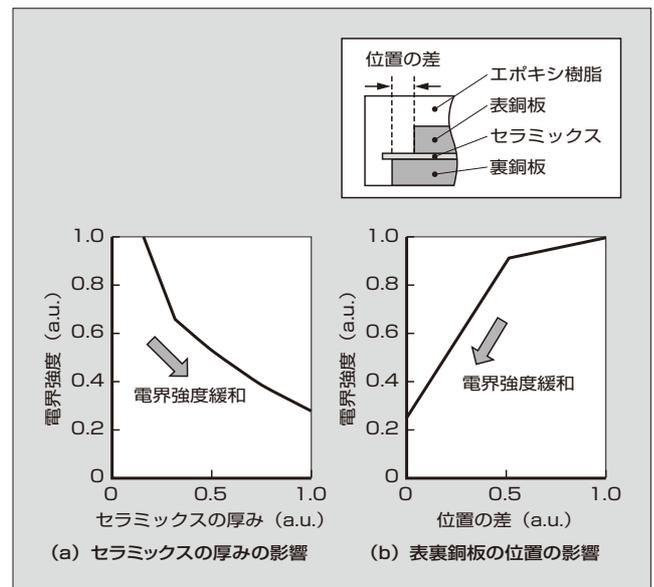


図3 電界シミュレーション結果（電界強度の変化）

電界強度が最も高い位置はセラミックスと銅板とエポキシ樹脂の三重点であり、特に、表銅板の端部近傍の電界強度が高いことが分かる。

図3は、図2(a)にてセラミックスの厚みを変えた場合と、図2(b)にて表銅板の位置を変えた場合の最大電界強度の変化を示している。セラミックスを厚くすることと、セラミックスの端部から表裏の銅板までの距離を等しくすることで電界強度を緩和できることが分かる。しかし、セラミックスを厚くするとモジュールの放熱性は悪化する。また、銅板の厚みや位置バランスが悪くなると、熱膨張係数の差によって異なる熱応力が増加し、セラミックス絶縁基板の熱変形が生じる。これによりセラミックスが割れ、絶縁性能が低下することが懸念される。

セラミックスの熱抵抗は、モジュールの構成部品全体の熱抵抗の2~3割を占める場合が多い。図3に示すように、セラミックスが薄い領域での電界強度の変化が大きく、セラミックスを厚くすることで電界強度を最高値の半分以下に低減できるが、厚さにほぼ比例してセラミックスの熱抵抗も増加し、放熱性が大きく悪化する。そのため、絶縁性能と放熱性能を最適化した設計が必要である。

3.2 放熱性が高いパッケージ構造

従来構造と開発構造について熱解析を行った。得られた温度分布を図4に示す。開発構造ではチップ下に配置した表銅板が従来よりも厚くなった分、表銅板内部で面内方向に熱を拡散することにより、熱伝導率の低いセラミックス部の熱抵抗を低減でき、モジュール全体として熱抵抗を低減できる。図5に、モジュールのセラミックスの厚みと熱抵抗の関係を示す。開発構造は従来構造に比べて熱抵抗を大きく低減できるので、絶縁性能を向上するためにセラミックスを厚くしても絶縁性能と放熱性能を両立できる。なお、半導体のチップサイズやセラミックスの熱伝導率により、銅板による熱抵抗の低減効果が異なる。そこで、電

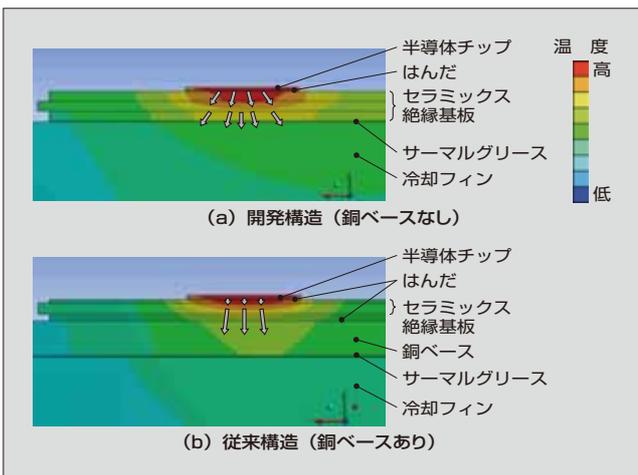


図4 熱解析結果（温度分布）

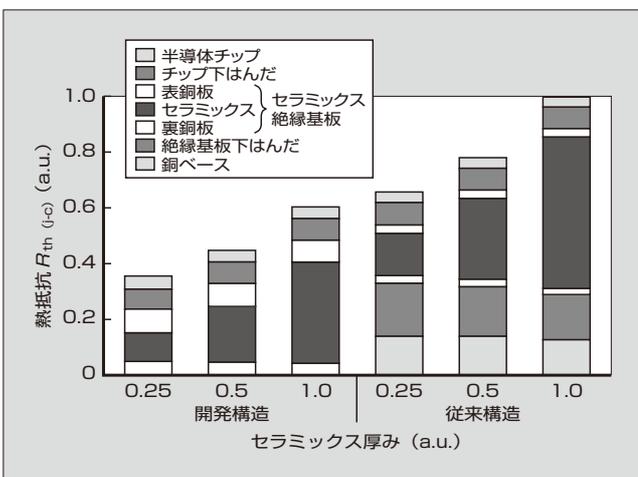


図5 絶縁基板厚みと熱抵抗の関係

流・電圧定格に応じて最適化することにより効果を最大化している。

4 高耐圧化に向けた封止材料評価

初期的な絶縁耐圧試験ならびに長時間一定の電圧や温湿度環境にさらす高温電圧印加試験を行い、モジュールの絶縁性能を評価している。

特に、高温環境と高電圧の使用条件を想定すると、従来構造に用いているシリコンゲル封止は、温度上昇とともに絶縁破壊電圧が大きく低下する。これに対して、エポキシ樹脂は高温での絶縁性能の低下がシリコンゲルよりも小さいため、高温・高耐圧環境での使用が優位になる。

4.1 封止材料の絶縁評価

従来構造で採用しているシリコンゲル封止と、開発構造で採用しているエポキシ樹脂封止について、絶縁性能を比較した。セラミックスや銅板の形状を同じにして封止材料を変えた試験サンプルを作製し（図6）、表面電極に接合した端子と裏面電極との間に電圧を印加して絶縁破壊電圧を測定した。図7に絶縁破壊電圧と累積破壊率の関係を、

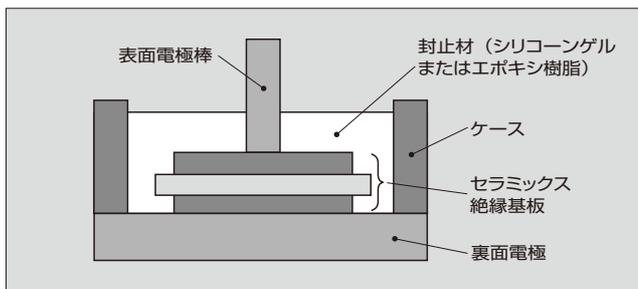


図6 試験サンプル形状

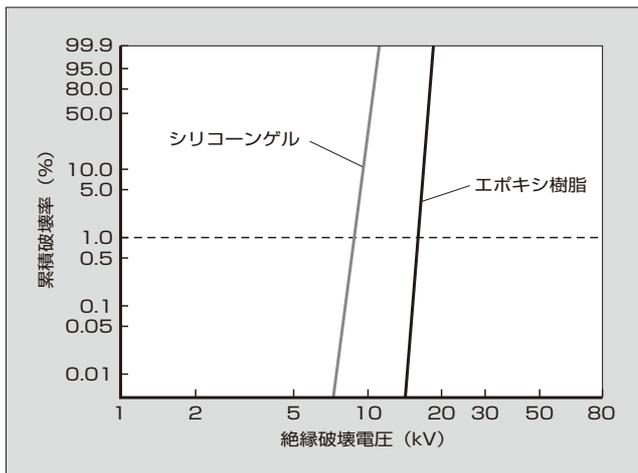


図7 絶縁破壊電圧と累積破壊率の関係

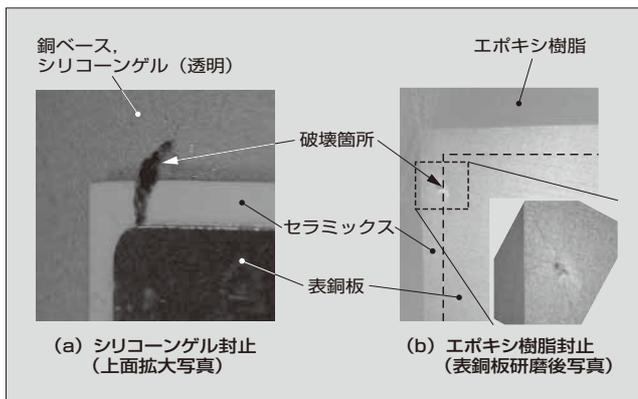


図8 絶縁破壊箇所

図8に絶縁破壊箇所を示す。累積破壊率が1%のとき、絶縁破壊電圧はシリコンゲルの8.8kVに対してエポキシ樹脂は16.3kVであり、約1.9倍の絶縁耐圧を持つ。また、このときの絶縁破壊箇所は、シリコンゲル封止の場合は表銅板とセラミックスとシリコンゲルの三重点を起点として、裏銅板側へシリコンゲルの内部を進展している破壊であった。一方、エポキシ樹脂封止の場合はセラミックスの貫通破壊であった。このことから、エポキシ樹脂封止の絶縁性能はセラミックス絶縁基板自体の破壊耐量で決まり、セラミックスの厚さや絶縁耐圧を向上することにより、さらなる高耐圧化が可能であることが分かった。

4.2 封止材料の寿命評価

初期の製品評価に基づいて長期的な製品寿命を評価する方法として、部分放電の有無の確認が有効である。部分放電が発生すると放電箇所を起点として劣化が進展し、長期的には絶縁破壊に至る可能性が高い。部分放電の有無によって不良品を選別・排除し、長期にわたって破壊を防ぐことができる。

図9に、シリコンゲル封止とエポキシ樹脂封止を行った試験サンプルの部分放電試験の結果を示す。昇圧時に電荷量が増え始める電圧を部分放電開始電圧 (PDIV) と呼び、降圧時に電荷量がゼロになる電圧を部分放電消滅電圧 (PDEV) と呼ぶ。シリコンゲル封止の場合は、PDIV が7kVであった。これに対し、エポキシ樹脂封止の場合は、10kVでも部分放電の発生はなく、シリコンゲル封止に比べて部分放電が起こりにくい。

図10に、部分放電試験を繰り返した際のPDIVとPDEVを示す。エポキシ樹脂封止のサンプルは、約15kVのときに、封止材の部分ではなくケースの外側を経路とした放電が発生した。グラフはそのときの値を用いている。エポキシ樹脂のPDIVはシリコンゲルに比べて2倍以上である。

シリコンゲル封止は、一度部分放電が起きると、その後のPDIVは繰り返し回数が増えるごとに徐々に低下する。

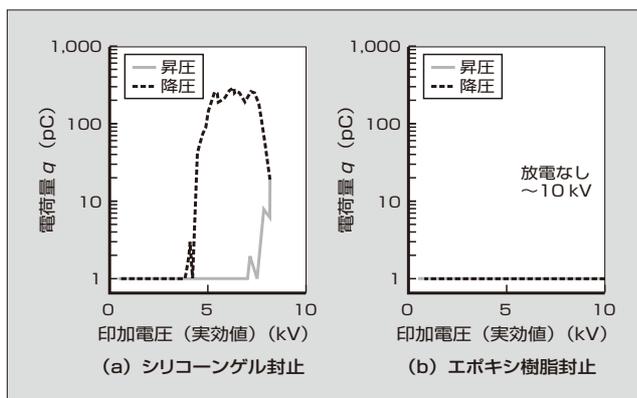


図9 試験サンプルの部分放電試験結果

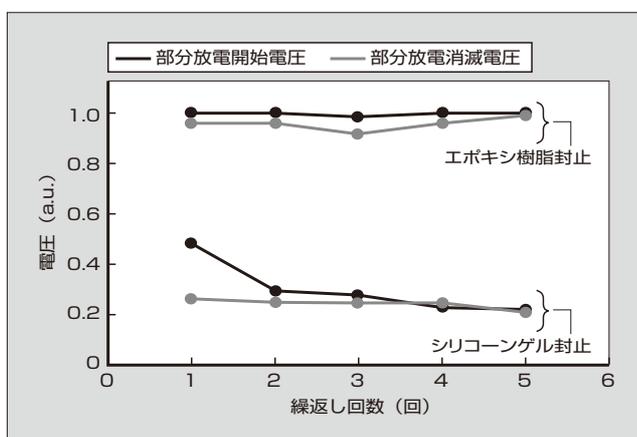


図10 部分放電開始電圧と部分放電消滅電圧

これは、放電箇所を起点としたシリコンゲルのクラックによる空隙や、分解ガスの影響による気泡などの空隙が発生し、シリコンゲルの内部やシリコンゲルとセラミックスの界面での破壊が進むためと考えられる。これに対して、エポキシ樹脂は同じ試験電圧と比較すると部分放電が発生しないことから、長時間使用したとしても部分放電に起因する劣化は起きにくく、SiC デバイスの高耐圧化に向けて優れた封止材であるといえる。

5 あとがき

本稿では、All-SiC モジュールの高耐圧化について述べた。シミュレーションに基づく電界強度緩和と放熱性への影響、および封止材料の違いによる絶縁性能の違いを確認した。今後は、高耐圧化した All-SiC モジュールのいっそうの高信頼性化を進めて適用範囲を広げ、パワーエレクトロニクス技術の発展と低炭素社会の実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Horio, M et al. "New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices," Proceedings of PCIM, 2011, p.229-234.
- (4) Ikeda, Y et al. "Investigation on Wirebond-less Power Module Structure with High-density Packaging and High Reliability," Proceedings of ISPSD, 2011, p.272-275.
- (5) Horio, M et al. "Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200 °C Operating Capability," Proceedings of ISPSD, 2012, p.81-84.



日向 裕一朗

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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次世代モジュール開発部。



谷口 克己

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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次世代モジュール開発部チームリーダー。



堀 元人

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。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次世代モジュール開発部チームリーダー。日本伝熱学会会員。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

Enhanced Thermal Resistance of Molding Resin Used for All-SiC Modules

仲俣 祐子 NAKAMATA, Yuko

立岡 正明 TACHIOKA, Masaaki

市村 裕司 ICHIMURA, Yuji

175℃で動作する従来のSiデバイスに比べてSiCデバイスは200℃以上の高温動作が可能であり、SiCデバイスの普及のためには、パワーデバイスを構成する封止樹脂に、さらなる高耐熱性が要求されている。SiCデバイスが持つ性能を最大限に発揮させるAll-SiCモジュールにおいて、耐熱寿命を延ばすこと、耐トラッキング性能を向上させることなどによって封止樹脂の高耐熱性化を行い、200℃以上の連続動作が可能であることを確認した。

SiC devices are capable of operating at high temperatures of 200℃ or higher, while conventional Si devices at 175℃, and the molding resin that molds the power devices requires an even higher thermal resistance to spread in the market. Our All-SiC module maximizes the performance of SiC devices, and we have confirmed that the module can operate continuously at temperatures of 200℃ or higher through the use of a high thermal-resistant molding resin that is characterized by a longer thermal-resistant service life and improved tracking resistance.

1 まえがき

パワーモジュールは、電力変換システムの主要デバイスとして、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを扱う社会インフラ分野、電鉄分野、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)などの自動車分野、エアコンなどの民生分野など幅広い分野で使用されている。

電力変換システム向けのパワーモジュールに対して小型・軽量化や高性能化の要求が増している。しかし、従来のSiデバイスの性能が限界に近く、次世代デバイスとしてSiCを搭載したパワーモジュールの本格的な普及が期待されている。

175℃で動作する従来のSiデバイスに比べ、SiCデバイスは、2～3倍の高電流密度で200℃以上の高温での動作が可能であり、パワーデバイスを構成する半導体封止樹脂^{(1)~(3)}には、さらなる高耐熱性や高絶縁耐圧性が要求されている。

本稿では、SiCデバイスが持つ性能を最大限に発揮させる樹脂封止型All-SiCモジュールにおいて、200℃以上の連続動作を可能とする封止樹脂の高耐熱性化について述べる。

2 パワーモジュール

2.1 パッケージの構造と特徴

パワーモジュールの構造は、Siデバイスで主流になっている従来のワイヤボンディングの構造と異なり、**図1**に示すように、半導体チップ、銅ピン、セラミックス絶縁基板、はんだ、封止樹脂から構成される。従来のワイヤに替えて銅ピンを形成し、パワーモジュール内部の絶縁材料にはシリコングルに替えてエポキシ樹脂を用いている^{(4),(5)}。

本構造では、パワー基板と低熱抵抗絶縁基板を採用する

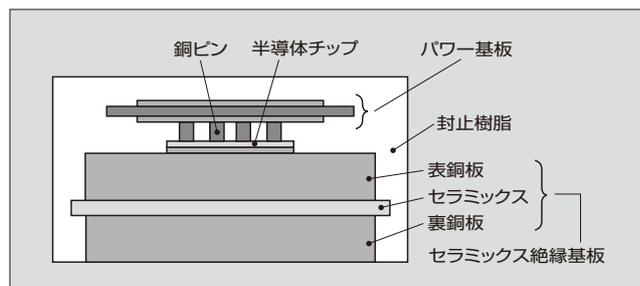


図1 パッケージの内部断面構造図

とともに、パワーチップの配線を銅ピンで接続した。これにより、パワーモジュールを小型化し、電流経路を短縮して低インダクタンス化を行った。また、チップ電極と銅ピンとの接合を強化することにより、 ΔT_j パワーサイクル耐量を向上させた。

2.2 封止樹脂の高耐熱化の課題

封止樹脂の耐熱性の重要な指標として、ガラス転移温度 T_g がある。封止樹脂を加熱した場合、ガラス状態からゴム状態に変わる現象がガラス転移であり、ガラス転移が起こる温度が T_g である。 T_g よりも高い温度では、線膨張係数(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)と弾性率が急激に変化し、封止樹脂に要求される強度、密着性、絶縁性などの特性が劣化する。そこで、パワーモジュールの耐熱性を向上させるために封止樹脂の T_g を高める必要がある⁽⁶⁾。

しかしながら、封止樹脂が200℃以上において長期耐熱性を満足するためには、 T_g を高めるだけでは不十分である。パワーモジュールのヒートサイクル試験、高温印加試験、高温高湿試験(THB: Temperature Humidity Bias)などの長期信頼性試験に耐える必要がある。さら

に、ジャンクション温度 T_j が 200℃において連続使用を保証するためには、UL 規格で規定される加速寿命試験を行い、製品規格の絶縁破壊耐圧を維持しなければならない。 $T_j=200℃$ を保証する場合には、225℃・6,663hの寿命が要求され、封止樹脂は T_j よりも高い温度に対する耐熱性を持つ必要がある。

3 樹脂封止技術

3.1 ガラス転移温度 T_g と熱減量との関係

ガラス転移温度 T_g は、図 2 に示す TMA (Thermo-mechanical Analysis) チャートにおいて、変位曲線の二次微分曲線がピークとなる温度で定義されている。

封止樹脂の指標である T_g を高くする方法の一つに、単結合による架橋点数を多くするという方法がある。しかし、単結合は化学結合力が弱いので、架橋点は分解しやすい。そのため、高温環境において熱分解が促進し、強度、密着性および絶縁性が低下してしまう。

そこで、高い T_g を確保しつつ、熱分解により特性が劣化しない高耐熱樹脂を得るためには、図 3 に示すように、樹脂の架橋点数を多くするだけでなく、芳香族環/CH₂ 比が大きい樹脂組成を選択する必要がある。

エポキシ架橋点を増やすと T_g が大きくなるが、200℃

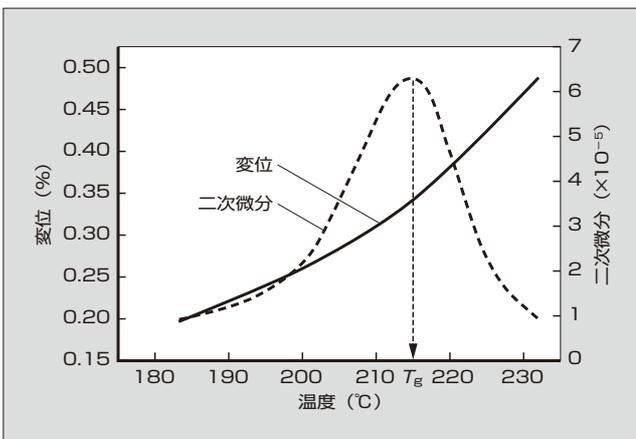


図 2 封止樹脂の TMA チャート

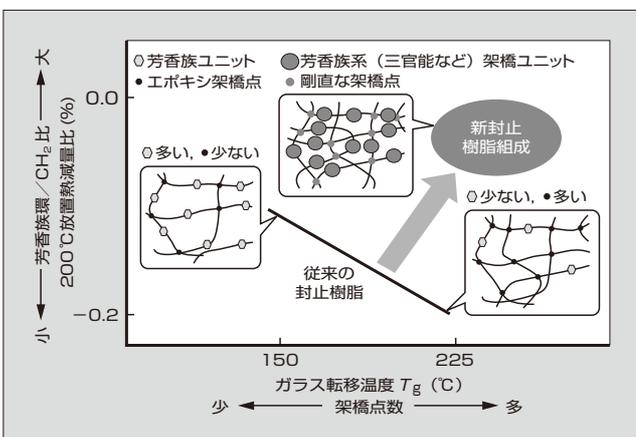


図 3 T_g と 200℃ 放置熱減量比の関係

放置熱減量比はマイナスが大きくなり、また、芳香族ユニットを増やすと 200℃ 放置熱減量比はゼロに近づくが、 T_g は小さくなる。このように、 T_g と 200℃ 放置熱減量比とはトレードオフの関係にある。 T_g とともに 200℃ 放置熱減量比を高くするためには、三官能などの芳香族系架橋ユニットと剛直な架橋点を持つ構造が必要である。

3.2 耐トラッキング性

封止樹脂内に芳香族系架橋ユニットを導入することにより架橋点数が大きくなって T_g は向上するが、芳香族系架橋ユニットの主骨格である芳香族環が増加するため炭化しやすくなり、耐トラッキング性が低下する。

封止樹脂の表面に高い電界が印加された状態で、封止樹脂の表面に付着した粉じんや水分によってアーク放電が生じやすくなる。その結果として、表面が炭化して炭化導通路が形成される。そのため、絶縁性が低下して絶縁破壊に至ることがある。

太陽光発電や風力発電など、厳しい設置環境で使用されるパワーモジュールの封止樹脂においては、耐トラッキング性の向上が必須である。封止樹脂として耐トラッキング性を表す比較トラッキング指数 (CTI: Comparative Tracking Index) が表 1 の材料グループ I ($600 \leq CTI$) であるものが求められる。

富士電機では、封止樹脂の組成を工夫することで、SiC パワーモジュール用の封止樹脂は、600 以上の CTI を実現している。

3.3 難燃性

パワーモジュール用封止樹脂に添加されている難燃剤は、昇華などの分解温度が 200℃ 近辺にある。 $T_j=200℃$ 動作を保証する UL1557 の加速寿命試験条件は、225℃・6,663h に相当し、難燃剤の分解温度に近い。耐熱性を向上させるには、分解温度の高い難燃剤を選定するとともに、多芳香環などの、難燃性が付与された架橋ユニットと剛直な架橋点を持つ樹脂組成を導入することが必要である。

3.4 耐熱寿命の予測

耐熱性の定義には、短期耐熱性と長期耐熱性の二つがある。

短期耐熱性は、短時間であっても、高温環境で樹脂がその形状や性質を保持できることである。短期耐熱性は、樹脂の物理的性質を保持できる上限の温度で表し、 T_g がこ

表 1 比較トラッキング指数

成形材料の区分 *1	比較トラッキング指数 (CTI) *2
材料グループ I	$600 \leq CTI$
材料グループ II	$400 \leq CTI < 600$
材料グループ III a	$175 \leq CTI < 400$
材料グループ III b	$100 \leq CTI < 175$

* 1 IEC 60664-1 による

* 2 CTI: Comparative Tracking Index

れに相当する。

長期耐熱性は、ある温度に暴露し続けても、樹脂の形状や性質を保持できることである。長期耐熱性は、熱分解温度 T_d で表す。高温下に放置すると、熱による酸化劣化により架橋点などの結合部が分断し、 T_d が低下する。そこで、耐熱性を向上するためには T_d を上げることが必須となる。

樹脂は加熱すると T_g でゴム状になり、さらに加熱を続けると T_d で熱分解を起こすようになる。

長期耐熱性の耐熱寿命を、熱重量測定法を用いて予測した。測定は複数の昇温速度で行い、各速度での1%熱減量温度 T_{d1} を求め、反応速度論に基づいてアレニウスプロットを行い、熱分解の活性化エネルギーを算出した。次に、昇温しながら実施した熱重量測定の結果から、式(1)を使って樹脂が一定温度にさらされた場合に重量が1%減少する耐熱寿命 τ を求めた。

$$\tau = \frac{\int_{T_0}^{T_{d1}} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT}{B \exp\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right)} \dots\dots\dots(1)$$

- τ : 使用環境温度 T_c における耐熱寿命 (s)
- E_a : 活性化エネルギー (J/mol)
- R : 気体定数 [J/(mol・K)]
- T : 温度 (K)
- B : 熱重量測定における昇温速度 (K/s)
- T_0 : 熱重量測定の開始温度 (熱分解が生じていない温度) (K)
- T_{d1} : 1%熱減量温度 (熱重量測定において熱分解により減量率が1%となる温度) (K)
- T_c : 使用環境温度 (K)

表 2 に封止樹脂の物性と耐熱寿命の予測結果を示す。3種類の封止樹脂は、芳香族系架橋ユニットの量を調整し、 T_g を 215℃、CTE を 13 ppm/K、弾性率を 16 GPa に固定し、 T_{d1} を変化させたものである。CTI は材料グループ I の 600 以上、難燃性は認定基準 V-0 とした。

耐熱寿命は T_{d1} が高いほど長く、 $T_{d1}=411℃$ の樹脂 C が UL1557 で規定されている 225℃・6,663 h の耐熱性を確保していることを確認した。

表 2 封止樹脂の物性と耐熱寿命予測結果

樹脂	熱分解温度 T_{d1} (℃)	200℃寿命 (h)	225℃寿命 (h)
樹脂 A	320	21	4
樹脂 B	338	712	103
樹脂 C	411	75,000	10,500

〈注〉難燃性の認定基準：産業資材用途に用いられるプラスチックの難燃性 (優) 5V>V-0>V-1>V-2>HB (劣)

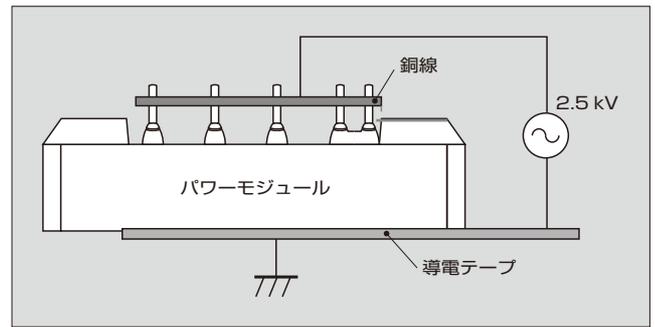


図 4 絶縁試験方法

項目	樹脂 A	樹脂 B	樹脂 C
試験後モジュール外観			
絶縁基板観察結果	基板周辺に剥離あり	短絡あり	正常

図 5 パワーモジュールの耐熱試験結果

表 3 パワーモジュールによる樹脂の評価結果

樹脂	絶縁破壊試験合格率
樹脂 A	0%
樹脂 B	60%
樹脂 C	100%

3.5 パワーモジュールの加速寿命試験結果

図 4 に、耐熱寿命加速試験後のパワーモジュールの絶縁試験方法を示す。

$T_j=200℃$ での動作を確認するため、表 2 に示した樹脂を用いたパワーモジュールについて、UL1557 の 225℃・6,663 h の条件で加速寿命試験を行った。樹脂 A の場合は、絶縁基板の側面に達するほどのクラックが発生し、絶縁破壊電圧が規格を満足できなかった。樹脂 B の場合は、絶縁基板の端部で短絡し、絶縁破壊が生じた。これに対して、樹脂 C の場合は、封止樹脂と絶縁基板や素子などの構成部材との剥離、および封止樹脂のクラックが抑制され、絶縁性能を満足した (図 5)。

表 3 に示すように、パワーモジュールによる樹脂の評価結果は、 T_{d1} が高いほど良好な結果を示した。剛直な骨格の導入によって、225℃における熱分解が抑止された結果、加速寿命試験で剥離やクラックが発生せず、絶縁性を確保できたものと考えられる。

4 あとがき

本稿では、All-SiC モジュール用封止樹脂の高耐熱性化

について述べた。パワーモジュールにおいて、耐熱寿命を延ばしつつ、高耐熱化の背反となる耐トラッキング性を向上させることなどにより、200℃以上の連続動作が可能となる樹脂を開発した。

今後は、高耐熱封止樹脂の適用を目指して開発を進め、パワーモジュールの高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Masafumi, H. et al. “New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices” PCIM Europe 2011, 37 (2011), p.229-234.
- (2) 鶴田和弘. SiC半導体パワーデバイスの車載実用化の展望. デンソーテクニカルレビュー 16 (2011), p.90-95.
- (3) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.5, p.431-434.
- (4) 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チョップモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-247.
- (5) 立岡正明ほか. 超小型封止樹脂パッケージの高信頼性検証. Mate2015.
- (6) 小椋一郎. エポキシ樹脂の化学構造と特性の関係. DIC Technical Review. 2001, no.7, p.1-12.
- (7) 西村孝司ほか. IGBTハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.390-394.
- (8) 市村裕. 絶縁材の反応速度論的解析. Application Brief.

1986, TA no.25, p.1-3.

- (9) 小澤丈夫. 非低温速度論(1)単一素過程の場合. Netsu Sokutei. 2004, 31(3), p.125-132.
- (10) 近畿経済産業局. 平成24年度戦略的基板技術高度化支援事業 “パワー半導体混載モジュールの樹脂封止剤真空加圧成形プロセスの開発”.



仲俣 祐子

半導体封止樹脂の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部次世代モジュール開発部チームリーダー。エレクトロニクス実装学会会員。



立岡 正明

SiC 適用次世代モジュールの研究開発に従事。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次世代モジュール開発部。



市村 裕司

SiC 適用次世代モジュールの樹脂封止材料の研究開発に従事。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次世代モジュール開発部課長。



第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール「Dual XT」

7th-Generation “X Series” IGBT Module “Dual XT”

吉田 健一 YOSHIDA, Kenichi

吉渡 新一 YOSHIWATARI, Shinichi

川畑 潤也 KAWABATA, Junya

電力変換装置に対する小型化、低損失化、高信頼性化の要求に応えるため、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールの系列において定格電流を拡大した「Dual XT」(Xシリーズ Dual XT)を開発した。Xシリーズ Dual XTは、半導体チップの特性の改善によって電力損失が低減するとともに、パッケージ構造の改善によってパッケージ通電能力が向上した。また、 ΔT_j パワーサイクル耐量の向上と絶縁用シリコンゲルの耐熱性の向上により、連続動作時接合温度 $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ を実現した。このパッケージサイズで業界初となる1,200 V/800 A 定格の製品である。

Power conversion equipment has been increasingly required to exhibit compactness, low loss and high reliability, and it is against this backdrop that Fuji Electric developed the 7th-generation “X Series” IGBT module “Dual XT” (X Series Dual XT) as a module that expands rated current. The X Series Dual XT has reduced power loss through semiconductor chip characteristic enhancement, while also improving the package current-carrying capability through package structure enhancement. In addition, by improving the ΔT_j power cycle capability and the heat resistance of the insulation-use silicone gel, the module achieves a junction temperature of $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ under continuous operation. It is also the industry's first module in this package size that has a 1,200-V/800-A rating.

1 まえがき

近年、地球温暖化防止の観点から、エネルギー効率の改善とCO₂排出量の削減が求められており、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー分野の需要が伸びている。この分野では特に電力変換装置の大容量化が進み、大容量IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールのニーズが拡大している。

電力変換装置に対する小型化、低損失化、高信頼性化の要求に応えるため、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールの系列において定格電流を拡大した「Dual XT」(Xシリーズ Dual XT)を開発した。

2 製品ラインアップ

Xシリーズ Dual XTの外観と内部を図1に、製品系列を表1に示す。ソルダーピンタイプ (M254, M285) とプレスフィットピンタイプ (M282, M286) の合計4種

表1 Xシリーズ Dual XT の製品系列

製品型式	ピンタイプ	定格電圧 (V)	定格電流 (A)	パッケージ型式	絶縁基板
2MBI225XNA120-50	ソルダーピンタイプ	1,200	225	M254	Al ₂ O ₃
2MBI300XNA120-50			300		
2MBI450XNA120-50			450		
2MBI600XNE120-50			600	M285	
2MBI800XNE120-50			800		
2MBI225XNB120-50	プレスフィットピンタイプ		225	M282	Al ₂ O ₃
2MBI300XNB120-50			300		
2MBI450XNB120-50			450		
2MBI600XNF120-50			600	M286	
2MBI800XNF120-50			800		
2MBI225XNA170-50	ソルダーピンタイプ	1,700	225	M254	Al ₂ O ₃
2MBI300XNA170-50			300		
2MBI450XNA170-50			450		
2MBI600XNE170-50			600	M285	
2MBI800XNE170-50			800		
2MBI225XNB170-50	プレスフィットピンタイプ		225	M282	Al ₂ O ₃
2MBI300XNB170-50			300		
2MBI450XNB170-50			450		
2MBI600XNF170-50			600	M286	
2MBI800XNF170-50			800		

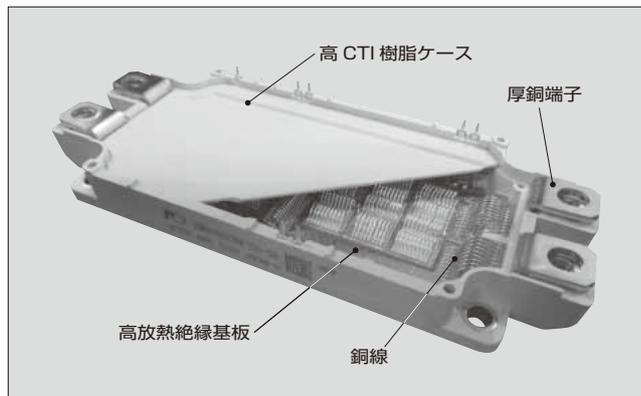


図1 Xシリーズ Dual XT の外観と内部

類のパッケージをラインアップした。M285パッケージとM286パッケージは、定格電流の拡大と信頼性の向上を図るため、出力端子の厚銅化、高放熱絶縁基板を採用するとともに、銅線接合技術、高CTI (Comparative Tracking Index) 樹脂ケースなどの新パッケージ技術を適用している。新技術の適用により、このパッケージサイズでは業界初となる1,200 V/800 A 定格の製品を実現した。

③ 特性

エネルギー変換効率を向上する上で IGBT モジュールの電力損失の改善が重要であり、その電力損失は IGBT や FWD (Free Wheeling Diode) といった半導体チップの特性によって決定される。

3.1 IGBT 特性の改善

Xシリーズ Dual XT の IGBT では、ドリフト層の厚さを薄くすることにより、コレクター-エミッタ間飽和電圧を低減した。また、フィールドストップ (FS) 層を最適化することによって、ドリフト層を薄くした場合に起こり得るターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下を抑制した。

これにより、Xシリーズ Dual XT の IGBT では、図 2 に示すように、従来製品「Vシリーズ」Dual XT に対して飽和電圧で約 0.4 V 低減、ターンオフ損失で約 7% 低減と大幅に特性を改善した。

3.2 FWD 特性の改善

Xシリーズ Dual XT の FWD では、ドリフト層の厚さを薄くすることにより、アノード-カソード間順方向電圧を低減した。また、ローカルライフタイムの最適化により、図 3 に示すように、従来製品と比較して逆回復波形をよりソフトなものにした。さらに、逆回復時のピーク電流とテール電流の削減によって逆回復損失を大幅に低減した。

これにより、図 4 に示すように Xシリーズ Dual XT の FWD では、従来製品に対して順方向電圧で約 0.1 V 低減、逆回復損失で約 9% 低減と大幅に特性を改善した。

3.3 電力損失比較

図 5 に電力損失を計算した結果を示す。3.1 節、3.2 節にて述べた改善によって、Xシリーズ Dual XT は電力損失を従来製品に対して、キャリア周波数 1 kHz で約 12% 低減した。

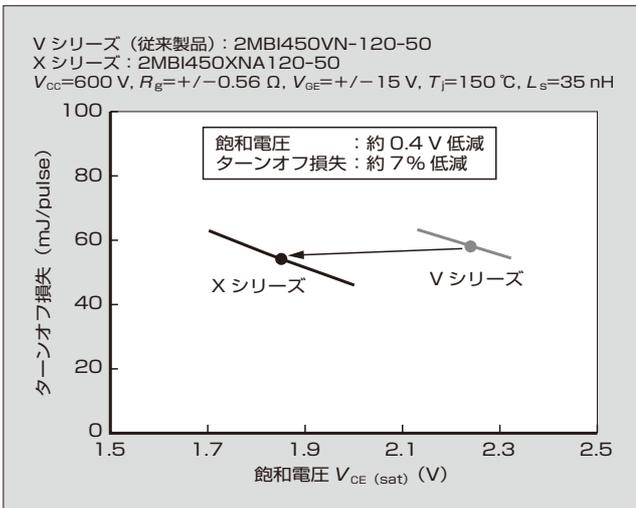


図 2 トレードオフ特性 (IGBT)

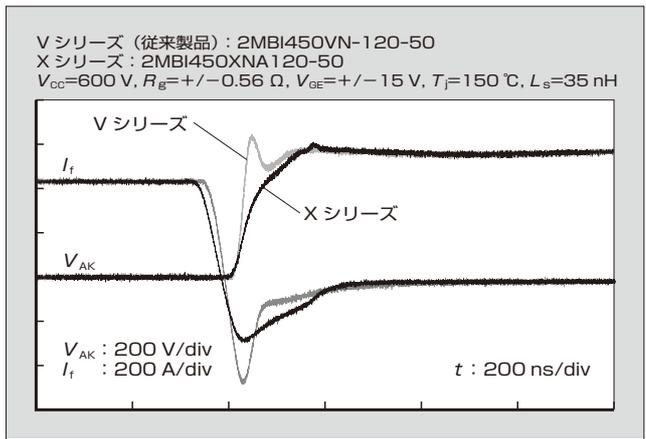


図 3 逆回復波形

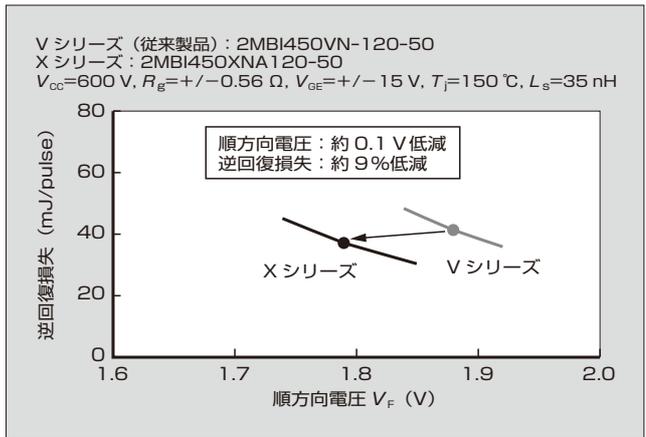


図 4 トレードオフ特性 (FWD)

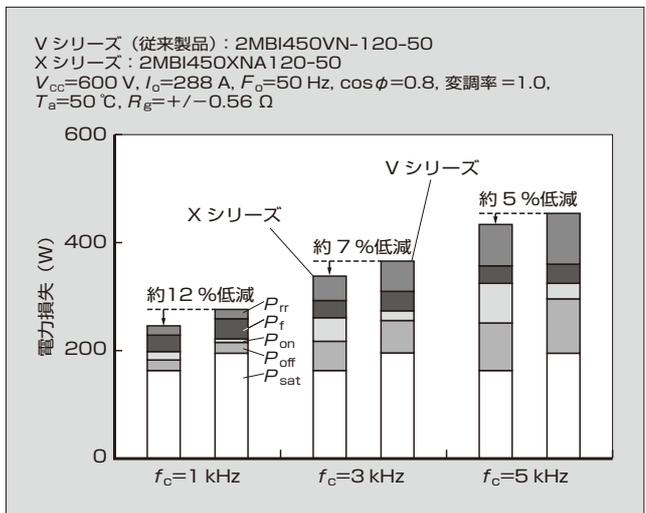


図 5 電力損失

④ パッケージ技術

表 2 に、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージ構造における特徴を示す。新パッケージ構造では、装置の小型化に寄与するために、パッケージサイズを維持したまま出力電流の増大を図った。これを実現するために

表2 Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージ構造における特徴

項目	Xシリーズ Dual XT	Vシリーズ Dual XT (従来製品)	
搭載チップ	Xシリーズ	Vシリーズ	
定格電圧	1,200 V	1,200 V	
最大定格電流	800 A	600 A	
絶縁基板	AlN	Si ₃ N ₄	
出力端子の銅厚	2.0mm	1.5 mm	
ワイヤ 接合	出力端子	銅	アルミニウム
	絶縁基板間	銅	アルミニウム
T _{jop}	175℃	150℃	
ケース樹脂材料	高CTI樹脂	従来樹脂	
シリコーンゲル	高耐熱ゲル (-40~+175℃)	従来ゲル (-40~+150℃)	

は、通電時におけるパッケージ内の半導体チップを含む通電部分の発熱とパッケージの放熱性の両方を改善することが必要である。

4.1 AlN 絶縁基板による熱抵抗の低減

Xシリーズ Dual XT (M285, M286) では、半導体チップで発生した熱を効率よく放熱するために、AlN 基板⁽²⁾を用いた高放熱絶縁基板を新規に開発した。

図6にジャンクション-ケース間の熱抵抗を示す。AlN 絶縁基板を適用した半導体チップは、一般的に広く使用されている Al₂O₃ 絶縁基板を用いた場合に比べて、同一チップサイズで熱抵抗が約45%低減する。

4.2 銅線によるパッケージ内部の発熱低減

従来製品は、パッケージ内部の主回路配線にアルミニウム線を採用している。しかし、アルミニウム線は通電時の発熱が多く、従来製品の最大定格電流は600Aが限界であった。そこで、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) は、主回路配線に銅線を採用した。表3に示すように、銅はアルミニウムに比べて抵抗率が40%低く、熱伝導率が77%高い。通電時のパッケージ内の発熱の抑制と放熱の

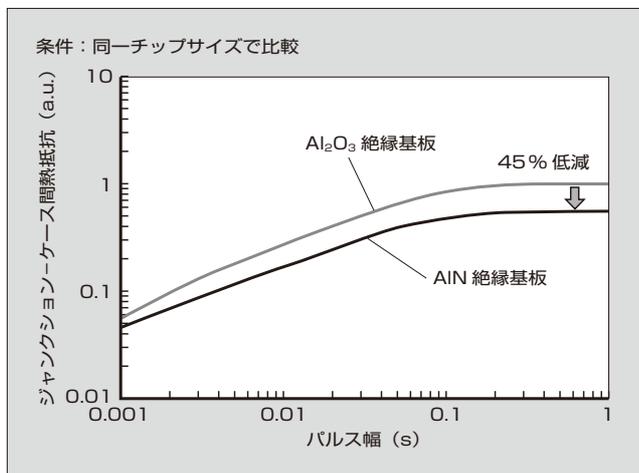


図6 ジャンクション-ケース間熱抵抗

表3 配線材料の物性

材 料	抵抗率 (10 ⁻⁸ Ω・m)	熱伝導率 (W/(m・K))
アルミニウム	2.5	220
銅	1.5	390
銅線効果	40%低減	77%向上

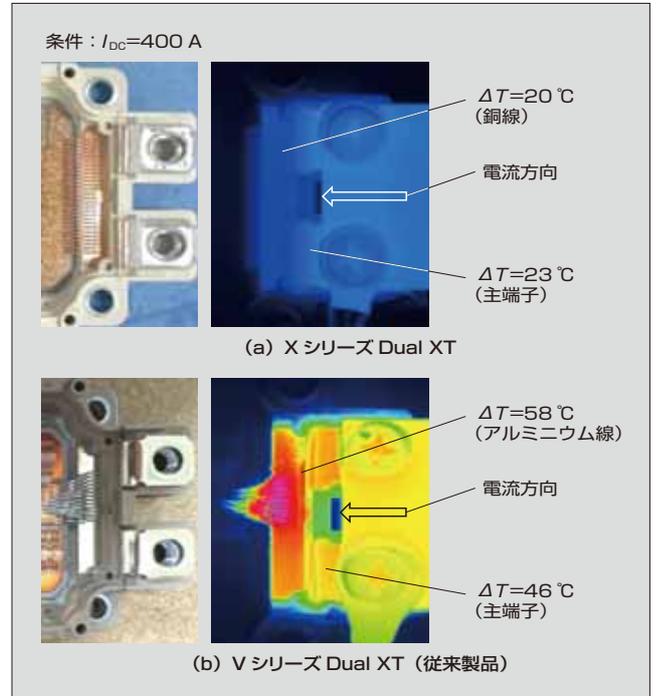


図7 パッケージの発熱の評価結果

改善により、温度上昇が劇的に改善した。また、従来製品の端子-絶縁基板間のアルミニウム線は密集している。Xシリーズ Dual XT はさらなる配線の低抵抗化を図るために、絶縁基板のレイアウトを一新することで銅線を一直線に配列できるようにし、かつ、本数を増やした。

パッケージの発熱の評価結果を図7に示す。従来製品のパッケージにおける配線の温度上昇がΔT=58℃であるのに対して、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージではΔT=20℃と半分以下に改善した。

4.3 出力端子の厚銅化によるパッケージ主端子の発熱低減

Xシリーズ Dual XT (M285, M286) は、出力端子の厚みを従来製品の1.5mmから2.0mmに厚くし、さらに、端子形状を最適化して発熱を低減した。図7に示すように、従来製品のパッケージにおける主端子の温度上昇がΔT=46℃であるのに対して、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージではΔT=23℃と半分に改善した。

4.4 連続動作時接合温度 T_{jop} の拡大

Xシリーズ Dual XT ではさらに高い出力電流を達成するために、連続動作時接合温度 T_{jop} を従来製品の150℃から175℃に拡大した。T_{jop} を拡大するためには、大きな温

度変化に対する耐量 (ΔT_j パワーサイクル耐量) の向上や、高温での長期信頼性 (絶縁用シリコンゲルの耐熱性) の改善が必要である。

図8に ΔT_j パワーサイクル耐量を示す。従来製品では $T_{jmax}=150^\circ\text{C}$ に対して 175°C に温度を上げると、 ΔT_j パワーサイクル耐量が劇的に低下する。これに対して、Xシリーズ Dual XT でははんだ材の新規開発と半導体チップ上の新配線接合技術の適用により、 $T_{jmax}=175^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_j=50^\circ\text{C}$ の条件で従来製品に比べて約2倍となる耐量の向上を実現した。

この結果、Xシリーズ Dual XT の ΔT_j パワーサイクル耐量は、 $T_{jmax}=175^\circ\text{C}$ 動作においても従来製品の $T_{jmax}=150^\circ\text{C}$ 動作を超える耐量を実現した。

IGBTモジュールの内部には、絶縁性能を確保するためにシリコンゲルが使用されている。図9に、シリコンゲル自体の温度と寿命の関係を示す。従来のシリコンゲルは、 150°C では10年以上の寿命があるが、 175°C では寿命は約2年に低下する。これに対して、Xシリーズ Dual XT は、新シリコンゲルを採用することによって 175°C でも10年以上の寿命があり、 150°C における従来製品と

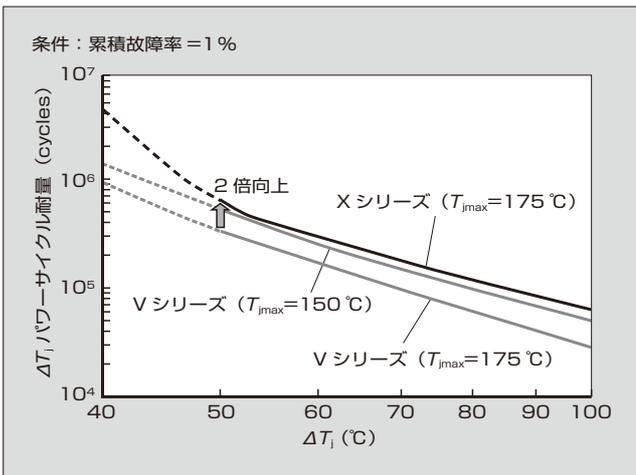


図8 ΔT_j パワーサイクル耐量

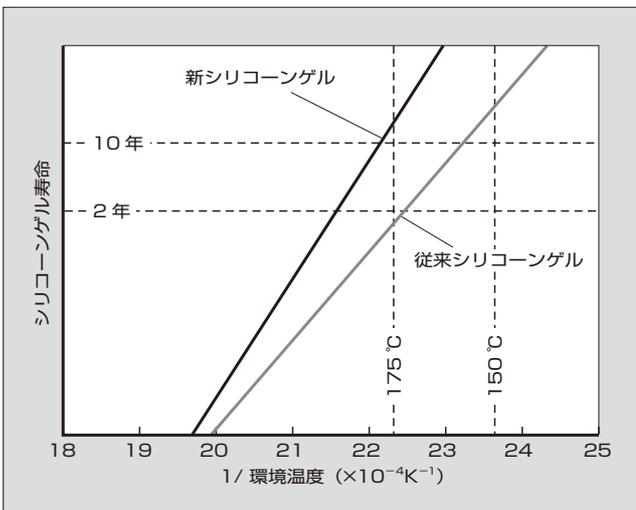


図9 シリコンゲル自体の温度と寿命の関係

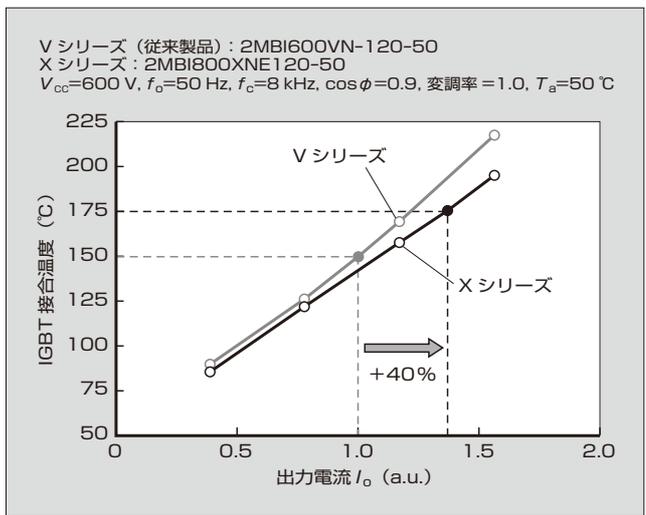


図10 インバータ出力電流とIGBT接合温度

同等のシリコンゲルの寿命を確保した。

5 まとめ

Xシリーズ Dual XT では、半導体チップの特性の改善による電力損失の低減、パッケージ構造の改善によるパッケージ通電能力の向上、および ΔT_j パワーサイクル耐量の向上と絶縁用シリコンゲルの耐熱性の向上により $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ を実現した。これにより、インバータなどのIGBTモジュールを適用する製品において目標としていたエネルギー変換効率の向上や実動作時の出力電流の向上を実現できる。

図10に、改善効果の例として、インバータ出力電流とIGBT接合温度の関係を示す。Xシリーズ Dual XT の適用によって、従来製品の場合に比べて出力電流が40%向上した⁽⁴⁾。

6 あとがき

第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール「Dual XT」は、半導体チップの大幅な特性の改善と新パッケージ技術により業界初の800A定格を実現した。今後も、新技術を適用した製品を提供することにより、各種電力変換装置の小型化や高効率化、高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Onozawa, Y. et al. "Development of the 1200 V FZ-Diode with soft Recovery Characteristics by the New Local Lifetime Control Technique". Proceeding of ISPSD 2008, p.80-83.
- (2) Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", PCIM Europe 2015.
- (3) 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.

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



吉田 健一

IGBT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事業統括部モジュール技術部。



吉渡 新一

IGBT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事業統括部モジュール技術部チームリーダー。



川畑 潤也

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事業統括部モジュール技術部。



第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール

7th-Generation "X Series" RC-IGBT Module for Industrial Applications

山野 彰生 YAMANO, Akio

高橋 美咲 TAKAHASHI, Misaki

市川 裕章 ICHIKAWA, Hiroaki

近年、IGBT モジュールには、小型化、低損失化、高信頼性が強く求められている。これに応えて、富士電機は、IGBT と還流ダイオード FWD をワンチップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT : 逆導通 IGBT) を適用し、産業用 RC-IGBT モジュールを開発した。さらに、第7世代「Xシリーズ」の技術を適用して最適化することにより、損失と熱抵抗の大幅な低減および高信頼性化を行った。これらの技術革新により、従来の IGBT と FWD の組合せでは困難であった定格電流の拡大、高パワー密度化および小型化を達成した。

In recent years, IGBT modules have been increasingly required to be smaller in size while exhibiting lower loss and higher reliability. To meet the requirements, Fuji Electric has developed an industrial-use reverse conducting IGBT (RC-IGBT) module by using an RC-IGBT that integrates an IGBT and a free wheeling diode (FWD) on a single chip. Furthermore, the module greatly reduces loss and thermal resistance and enhances reliability through optimization based on our 7th-generation "X Series" technology. These technology innovations have achieved enhancements such as expansion of rated current, increased power density and miniaturization, all of which were impossible through the combination of conventional IGBT and FWD.

① まえがき

近年、地球温暖化の防止や安全・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できるパワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術への期待が高まっている。中でも、産業、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、パワー半導体の需要が拡大している。

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て以来、多くの技術革新によって IGBT モジュールの小型化、低損失化、高信頼性化を行い、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。しかし、IGBT モジュールをさらに小型化しようとするするとパワー密度が増大し、IGBT や還流ダイオード FWD (Free Wheeling Diode) の動作温度の上昇による信頼性の低下を招く危険性がある。このため、高い信頼性を保ち、かつ IGBT モジュールを小型化するためには、チップおよびパッケージの技術革新が不可欠である。

富士電機では、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た^{(1),(2)}。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、これを搭載した第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュールを開発した。第7世代 X シリーズのチップ技術を適用し、チップ構造を最適化することで、X シリーズ IGBT と X シリーズ FWD の組合せと同等の発生損失でありながら、チップ数およびトータルチップ面積を低減した。さらに、第7世代 X シリーズのパッケージ技術と RC-IGBT を組み合わせることで、熱抵抗の低減と

高信頼性化を行った。これらの技術革新により、従来の IGBT と FWD の組合せでは困難であった、IGBT モジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を達成した。

② 特徴

2.1 「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT の特徴

従来の IGBT は、ゲートに電圧を印加することでコレクタからエミッタ方向にのみ通電する。電力変換装置として広く用いられているインバータの負荷として使用されるインダクタは、自己誘導作用により電流変化を妨げる方向に誘導起電力を発生する。その結果、IGBT をオフにしても同じ方向に電流が流れようとするため、逆方向に電流を流すためには FWD を IGBT と逆並列に接続する必要があった。これに対して、「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT (X シリーズ RC-IGBT) は、RC-IGBT を用いることにより一つの素子で実現している (図1)。

図2に X シリーズ RC-IGBT の断面図を示す。X シリー

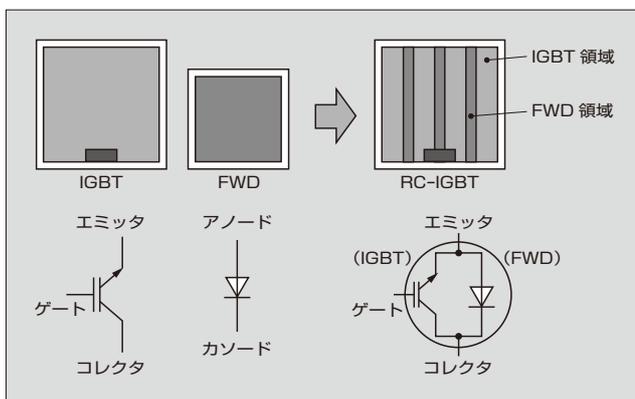


図1 「Xシリーズ」RC-IGBT の概略図と等価回路

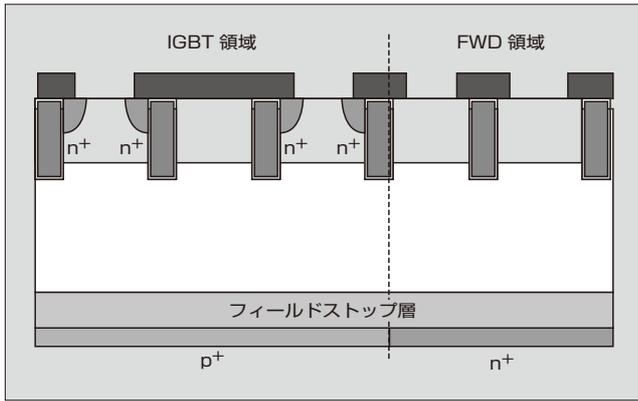


図2 「Xシリーズ」RC-IGBTの断面図

ズRC-IGBTは第7世代XシリーズIGBTのチップ技術を適用しており、表面構造にトレンチゲートを、裏面構造にフィールドストップ（FS）層を用いたIGBTである。XシリーズRC-IGBTはXシリーズIGBTと同様に、第6世代「Vシリーズ」IGBTと比較してさらなる微細化を行い、表面構造を最適化することで、導通損失に寄与するコレクタ-エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を大幅に低減している。また、最先端の薄ウェーハ加工技術を適用し、飽和電圧とターンオフ時のスイッチング損失とのトレードオフ関係を改善した。XシリーズRC-IGBTはFWD領域を内蔵するため、コレクタ側にpn接合を持つ。そのため、裏面へのパターニングおよび不純物層形成工程を追加し、IGBTのコレクタ側のp形層とFWDのカソード側のn形層を同一チップの裏面に形成した。また、ライフタイム制御を最適化することでトレードオフ関係を改善した。

2.2 電気特性

図3に1,200V XシリーズRC-IGBTの出力特性を示す。XシリーズRC-IGBTは、一つのチップで順方向（IGBT）と逆方向（FWD）の両方向に電流を出力できる。第7世代Xシリーズのチップ技術の適用により、VシリーズIGBTよりも低い飽和電圧を実現した。また、RC-IGBTでは、FWD領域のカソード層に電子が注入されることにより、IGBTのコレクタ層からのホール注入が抑制されて

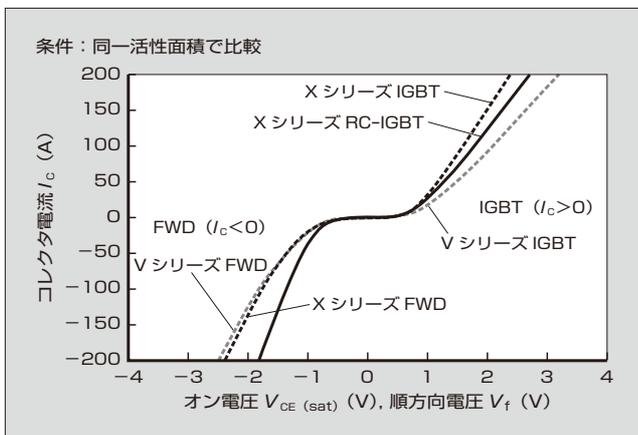


図3 「Xシリーズ」RC-IGBTの出力特性

伝導度変調が起こりにくくなる。そのため、低飽和電圧領域においてスナップバック現象が起こることが報告されている。これに対し、XシリーズRC-IGBTはチップの各構造を最適化することによってスナップバック現象を解決した。

XシリーズRC-IGBTのターンオフ波形を図4に、ターンオン波形を図5に、逆回復波形を図6に示す。図4から、XシリーズRC-IGBTのサージ電圧は、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せや、XシリーズIGBTとX

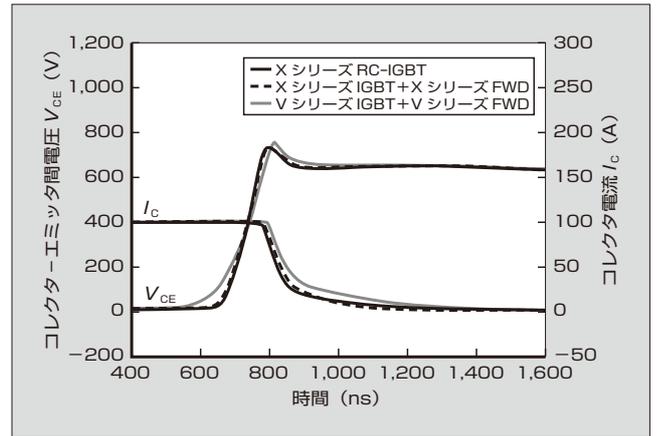


図4 「Xシリーズ」RC-IGBTのターンオフ波形

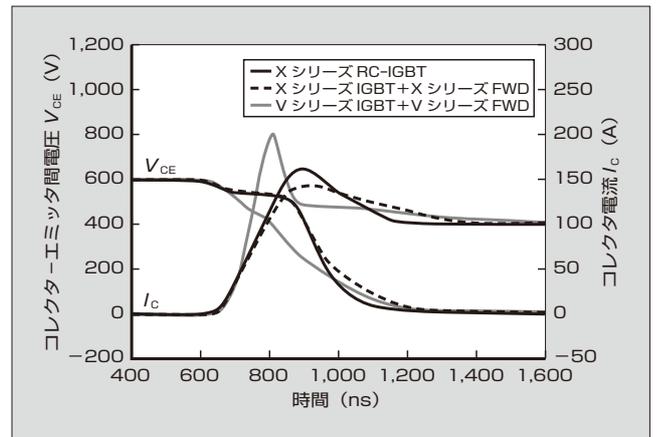


図5 「Xシリーズ」RC-IGBTのターンオン波形

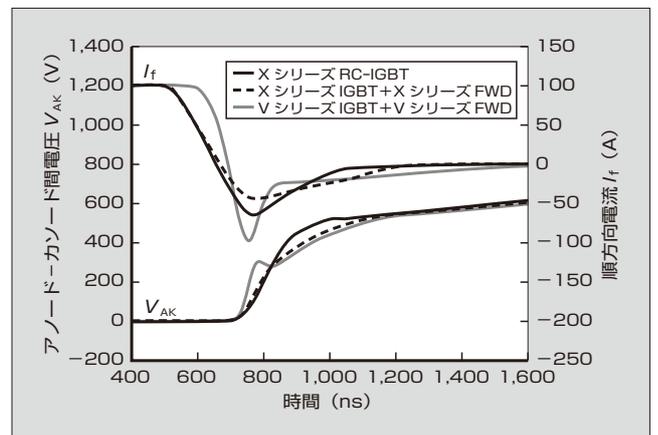


図6 「Xシリーズ」RC-IGBTの逆回復波形

シリーズFWDの組合せと同等である。また、テール電流はVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せに比べて小さく、ターンオフ損失 E_{off} は23%低減しており、異常波形は観測されない。XシリーズRC-IGBTは、特性を改善するためにVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せよりも薄ウェーハ化を行っている。薄ウェーハを用いることでターンオフ時の振動や耐圧の低下が懸念されるが、XシリーズRC-IGBTはウェーハの抵抗率と各構造を最適化することによって振動と耐圧低下を抑制した。図5と図6に示すように、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せでは急峻（きゆうしゅん）な電流波形となっているのに対し、XシリーズRC-IGBTではライフタイム制御を最適化することで、よりソフトな電流波形を実現している。逆回復電流ピーク I_{rrm} とテール電流の低減により、逆回復損失 E_{rr} は20%低減した。また、ターンオン波形と逆回復波形は、ともに異常波形は観測されない。

図7に、同一活性面積で比較したIGBTのトレードオフ特性を示す。図中のXシリーズRC-IGBTの各点は、ライフタイム制御の変更によってトレードオフの調整を行ったものである。XシリーズRC-IGBTは、同一スイッチング損失の場合、VシリーズIGBTに比べて飽和電圧を0.5V改善している。

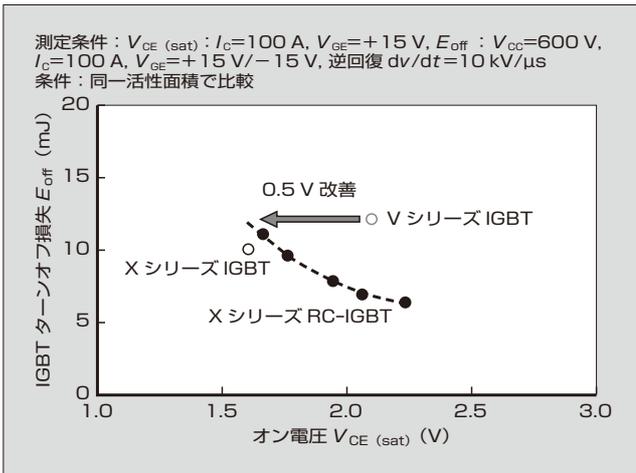


図7 「Xシリーズ」RC-IGBT (IGBT) のトレードオフ特性

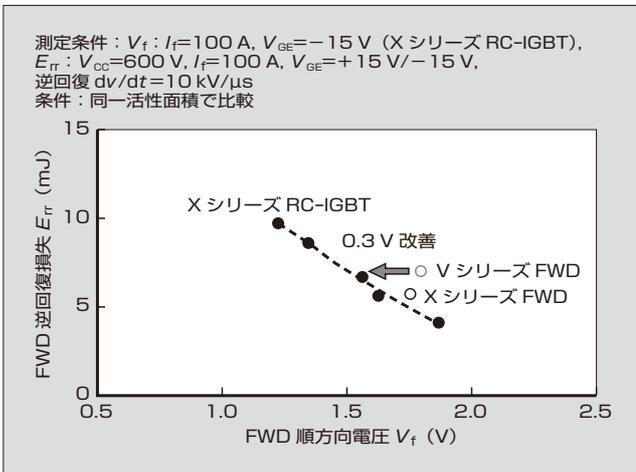


図8 「Xシリーズ」RC-IGBT (FWD) のトレードオフ特性

改善している。また、XシリーズIGBTと同等のIGBT特性が期待できる。

図8に、同一活性面積で比較したFWDのトレードオフ特性を示す。図中のXシリーズRC-IGBTの各点は、図7と同様にトレードオフの調整を行ったものである。XシリーズRC-IGBTは、同一スイッチング損失の場合、VシリーズFWDに比べて順方向電圧を0.3V改善している。また、XシリーズFWDと同等のFWD特性が期待できる。

2.3 熱特性

XシリーズRC-IGBTは、IGBTとFWDをワンチップ化したことにより、IGBT領域またはFWD領域での発生損失による発熱がチップ全体で放熱される。このため、熱抵抗の低減が期待できる。また、熱抵抗のさらなる低減のため、第7世代Xシリーズのパッケージ技術として、新たなAlN（窒化アルミニウム）絶縁基板を採用した。

AlN絶縁基板は、熱伝導率が高いため熱抵抗が低くなるが、抗折強度が低いため、絶縁基板として広く使用されているAl₂O₃（アルミナ）絶縁基板よりセラミックスを厚くすることで実用化されている。ただし、基板を厚くすると熱抵抗と信頼性が損なわれるという課題があった。そこでこれらを改善するために、AlN絶縁基板の薄型化が必要であった。従来、AlN絶縁基板を薄型化すると実装工程での基板割れや絶縁耐量の低下の懸念があり、実用化できなかった。これに対して、AlNの焼結条件の見直しによる高強度化および沿面距離の見直しによる絶縁設計の最適化を行うことにより、薄型化した新AlN絶縁基板を実現した。

図9にジャンクション-ケース間熱抵抗を示す。新AlN絶縁基板は、Al₂O₃絶縁基板に比べて同一チップサイズで熱抵抗が約45%となり、大幅に改善した。これにより、IGBTモジュールの小型化による温度上昇の課題を解決した。さらに、ワイヤボンディングの最適化および高強度はんだと高耐熱シリコーンゲルの採用により、高信頼性を確保するとともに175℃連続動作の保証を実現した。

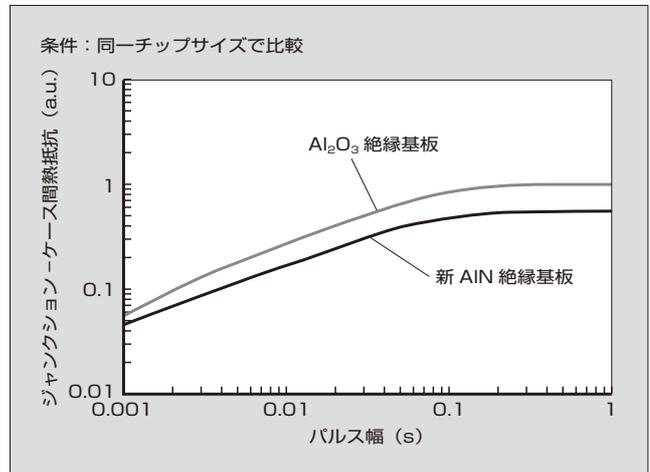


図9 ジャンクション-ケース間熱抵抗

③ 高パワー密度化・小型化

表1に1,200V/100AのVシリーズIGBTモジュールとの比較を、図10に各モジュールの電力損失、接合温度 T_j および接合温度の変動 ΔT_{jc} の計算結果を示す。第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術を適用することで、従来のVシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せに比べて電力損失と熱抵抗を大幅に低減し、高信頼性を確保するとともに175℃連続動作の保証を実現した。また、XシリーズRC-IGBTを用いることで、チップ数とトータルチップ面積の低減が可能になり、IGBTモジュールの小

表1 1,200V/100A IGBTモジュールの比較

項目	Xシリーズ RC-IGBTモジュール	Vシリーズ IGBTモジュール
チップ	XシリーズRC-IGBT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD
絶縁基板	新 AlN 絶縁基板	Al ₂ O ₃ 絶縁基板
連続動作温度 T_j (°C)	175	150

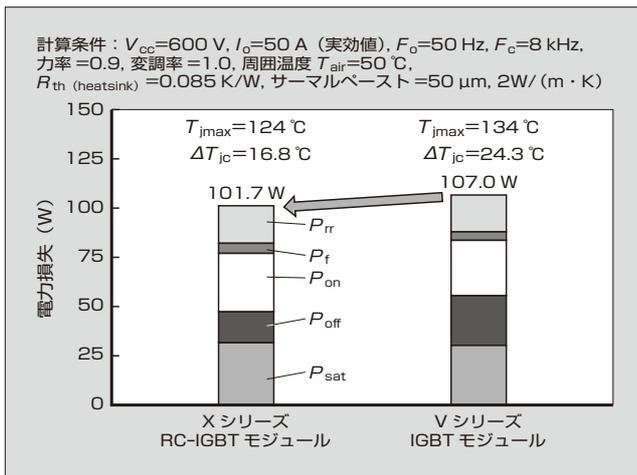


図10 1,200V/100A IGBTモジュールの電力損失および接合温度

表3 定格電圧1,200Vの「Dual XT」とPrimePACK2の特徴

項目	Dual XT			PrimePACK*2
	225	300	450	900
外観				
モジュール設置面積 (cm ²)	93	93	93	153
チップ	VシリーズIGBT + VシリーズFWD	XシリーズIGBT + XシリーズFWD	XシリーズRC-IGBT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD
モジュール定格電流 (A)	600	800	1,000	900
絶縁基板	SiN 絶縁基板	新 AlN 絶縁基板	新 AlN 絶縁基板	Al ₂ O ₃ 絶縁基板
熱抵抗 $R_{th(jc)}$ (K/W)	IGBT: 0.04 FWD: 0.06	IGBT: 0.037 FWD: 0.044	IGBT: 0.022 FWD: 0.022	IGBT: 0.03 FWD: 0.054

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

型化が期待できる。

これらのことから、RC-IGBTのチップ技術および第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術を適用することにより、同一パッケージにおいて、従来のIGBTとFWDの組合せよりも定格電流を大きくできる。

表2に定格電圧1,200Vの製品ラインアップとしてDual XTとPrimePACK2を、表3にその特徴を示す。定格電圧1,200VのDual XTでは、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せでは定格電流の上限は600Aであった。第7世代Xシリーズのチップ技術とパッケージ技術により、XシリーズIGBTとXシリーズFWDの組合せにより定格電流を800Aまで拡大した。さらに、XシリーズRC-IGBTを用いることで、同一パッケージで定格電流が1,000Aであるモジュールを提供できる。VシリーズIGBTとVシリーズFWDを用いたPrimePACK2と比較して、Dual XTはモジュール設置面積で40%、さらにXシリーズRC-IGBTを用いることで熱抵抗 $R_{th(jc)}$ は27%低減する。これにより、従来のVシリーズIGBTとVシリーズFWDを用いたPrimePACK2の領域までカバーすることができる。

図11に、VシリーズIGBTとVシリーズFWDの組合せ、XシリーズIGBTとXシリーズFWDの組合せおよびXシリーズRC-IGBTを用いた各Dual XTにおけるインバータ動作時の出力電流 I_o とIGBT最大接合温度 T_{jmax} の計算結果を示す。また、XシリーズRC-IGBTを用いることで電力損失とジャンクション-ケース間の熱抵抗を

表2 定格電圧1,200Vの「Dual XT」とPrimePACK2の製品ラインアップ

製品名	定格電流 (A)						
	225	300	450	600	800	900	1,000
Dual XT	VシリーズIGBT + VシリーズFWD						
	XシリーズIGBT + XシリーズFWD					XシリーズRC-IGBT	
PrimePACK*2				VシリーズIGBT + VシリーズFWD			

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

<注> PrimePACK : Infineon Technologies AG の商標または登録商標

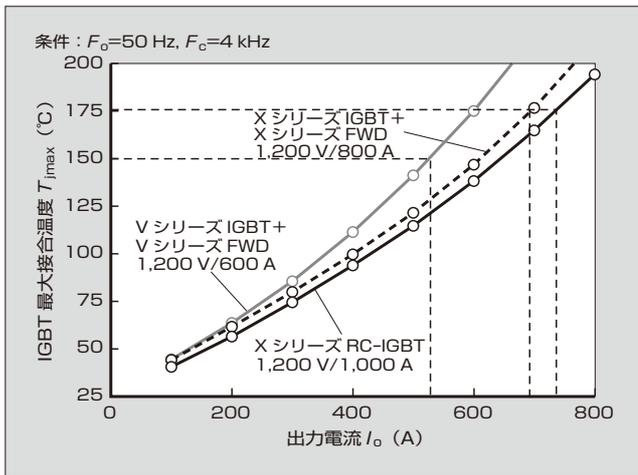


図11 「Dual XT」のIGBT最大接合温度

低減した。さらに、第7世代Xシリーズのパッケージ技術を適用することにより連続動作保証を従来の150℃から175℃に拡大した。この結果、同一パッケージにおいて従来と比較して高い電流密度が可能となり、IGBTモジュールのさらなる高パワー密度化と小型化を達成した。これにより、小型化、低損失化、高信頼性化といったIGBTモジュールに求められる要求に応えることができる。

4 あとがき

本稿では、IGBTとFWDをワンチップ化したRC-IGBTを搭載することにより、いっそうの高パワー密度化と小型化を達成した第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールについて述べた。このモジュールにより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、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) Takahashi, H. et al. “1200 V Reverse Conducting IGBT”, Proceeding of ISPSD 2004, p.133-136.
- (6) M. Rahimo. et al. “The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications”, Proceeding of ISPSD 2009, p.283-286.



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事業統括部モジュール技術部。



高橋 美咲

パワー半導体チップの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



市川 裕章

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モジュール技術部。



第2世代小容量 IPM の系列化

2nd-Generation Small IPM Series

手塚 伸一 TEZUKA, Shinichi

鈴木 啓久 SUZUKI, Yoshihisa

白川 徹 SHIRAKAWA, Toru

モータドライブ機器向けに、第2世代小容量 IPM の定格電流 20 A 品と 30 A 品を新たに系列に加えた。IGBT は第7世代 IGBT チップ技術をベースとし、FWD はドリフト層の厚さとライフタイム制御を最適化することにより、低ノイズ・低損失化を実現するとともに、デバイスの温度上昇を大幅に低減した。適用先として想定される標準的な冷房能力 14 kW のパッケージエアコンの最大負荷時の温度上昇シミュレーションにおいて、第1世代小容量 IPM に比べて約 11℃ 低下しているため、機器の許容出力電流の拡大も可能となる。

Fuji Electric has recently added products with current ratings of 20 and 30 A to our 2nd-generation small IPM series to meet the needs of motor drive devices. Applying the 7th-generation IGBT chip technology as a base and optimizing the lifetime control and drift layer thickness of the FWD, we have significantly reduces the temperature rise while lowering noise and loss. We ran a temperature rise simulation of a package air conditioner that has a standard cooling capacity of 14 kW at the maximum load, which are expected to be actual conditions. It showed 11℃ lower temperatures than the 1st-generation small IPM. It can therefore expand the allowable output current of the devices.

① まえがき

近年、温室効果ガスの排出量の増加による地球温暖化を防止するため、モータドライブ機器も省エネルギー（省エネ）化が要求されている。中でもエネルギー消費比率が大きいパッケージ（業務用）エアコンについては、2015年度から「トップランナー制度」が適用され、APF（Annual Performance Factor：通年エネルギー消費効率）の大幅な向上が必要となり、中間負荷領域での高効率化が求められている。さらに、小型化、省スペース化に対応しながら、室外機の運転温度範囲の拡大のために高負荷条件下における損失改善も求められている。

また、産業用の汎用インバータやサーボシステムにおいては、筐体（きょうたい）やフレームのダウンサイジング化が進む一方で、出力容量の拡大に対応するため、これらのシステムの高効率化の要求がさらに高まっている。

富士電機はこれらの要求に対応するため、インバータ方式の小容量モータドライブ用に、小型、低損失、低ノイズを特徴とし、三相インバータブリッジ回路、制御回路および保護回路を内蔵した小容量 IPM（Intelligent Power Module）を製品化してきた。

今回、パッケージエアコン、汎用インバータ、サーボシステムなどのモータドライブ機器における省エネ性能を

さらに向上させるため、第7世代 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）チップ技術⁽³⁾を適用した第2世代小容量 IPM⁽⁴⁾の定格電流 20 A 品と 30 A 品を新たに系列に加えた。

② 製品概要

図1に今回開発した第2世代小容量 IPM の外観を、表1に製品ラインアップと主要特性を示す。

製品の外形寸法は 43×26×3.7（mm）であり、既に量産している 10 A 品や 15 A 品と同一の小型パッケージを採用

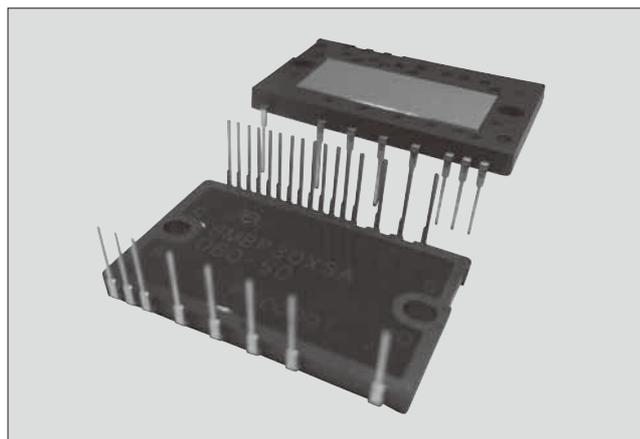


図1 第2世代小容量 IPM

表1 製品ラインアップと主要特性

型式名	V_{CE}	I_C	$V_{CE(sat)}$ (typ.)	V_F (typ.)	温度保護機能
6MBP20XSA060-50	600 V	20 A	1.45 V	1.50 V	アナログ温度出力
6MBP20XSC060-50					アナログ温度出力+過熱保護
6MBP30XSA060-50		30 A	1.45 V	1.55 V	アナログ温度出力
6MBP30XSC060-50					アナログ温度出力+過熱保護

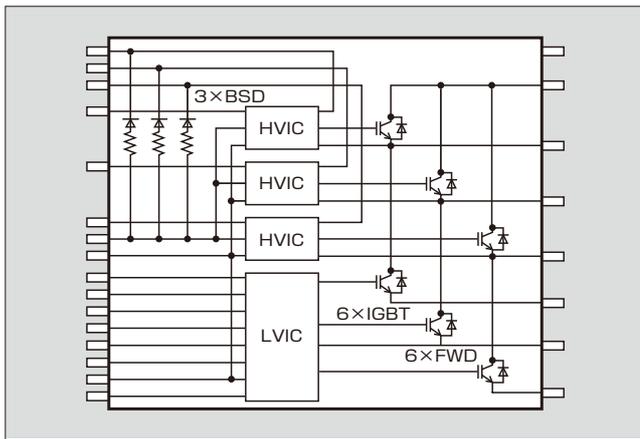


図2 内部等価回路

用し、インバータ基板の小型化に寄与している。

10 A 品や 15 A 品と同様に温度保護機能として、アナログ温度出力のみのもものと、アナログ温度出力に過熱保護を加えたものの2種類をそろえている。

今回開発した 20 A 品と 30 A 品は、8~14 kW のパッケージエアコンのコンプレッサ駆動用、および 1.0~2.2 kW 出力の汎用インバータ、0.4~1.0 kW 出力のサーボンプなどに適用可能な製品である。

図2に、内部等価回路を示す。10 A 品や 15 A 品と同様に、第7世代IGBTチップ技術を適用した低損失IGBTと高速FWD (Free Wheeling Diode) で構成する三相インバータブリッジ回路をアルミニウム絶縁基板上に実装している。この三相インバータブリッジ回路のローサイドIGBTを駆動するためのLVIC (Low Voltage Integrated Circuit) を一つ、さらに、ハイサイドIGBTを駆動するためのHVIC (High Voltage Integrated Circuit) を三つ、リードフレーム上に直接実装している。

また、電流制限抵抗を内蔵したBSD (Boot-Strap Diode) を搭載することで、ハイサイドの駆動回路の電源を少ない部品点数で構成できる。

第2世代小容量IPMは、低損失デバイスを採用し、また、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を 125 °C から 150 °C に拡大することで、第1世代小容量IPMよりも、インバータ回路の許容出力電流を拡大させ、設計の自由度を向上させている。

3 設計

3.1 デバイス設計

電流容量の拡大に伴い、スイッチング動作時に発生するノイズの増加が懸念されたため、スイッチング損失とノイズのトレードオフを改善する低ノイズ化の設計を行った。

(1) 導通損失の低減

IGBTは、第7世代IGBTチップ技術をベースに、トレンチゲートのセルピッチの配置とゲートしきい値電圧の最適化を行うことで導通損失の低減を図った。

図3に、IGBTのオン電圧とコレクタ電流特性を示す。30 A 品の定格電流でのオン電圧は、第1世代小容量IPM

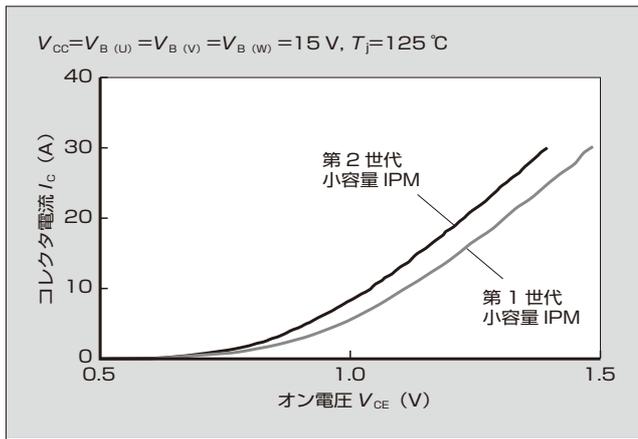


図3 IGBTのオン電圧とコレクタ電流特性

に対して約8%低減しており、また、エアコン用途で重要となるAPFに大きな影響を与える低電流領域のオン電圧は、約7%低減した。

(2) ターンオフ損失の低減

ターンオフ損失を低減するためには、スイッチング速度を高くすればよいが、 dv/dt が急峻 (きゅうしゅん) になるため発生ノイズの増加が懸念された。

第2世代小容量IPMでは、 dv/dt は従来の第1世代小容量IPMと同等レベルに抑えながら、IGBTのターンオフで発生するテール電流を抑制し、ノイズとターンオフ損失のトレードオフを改善することとした。テール電流を抑制するために、IGBTのドリフト層の厚さ、フィールドストップ層および裏面pn接合からのキャリア注入量を最適化した。

図4に、IGBTのターンオフ波形の周波数解析による電圧ノイズレベルとターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。定格電流30 Aにおいて第1世代小容量IPMに対し、電圧ノイズレベルを同等にしなが、ターンオフ損失を約50%と大幅に低減した。

(3) ターンオン損失の低減

図5に、リカバリー時のスイッチング波形を示す。仮に、第1世代小容量IPMのFWDを使用し、スイッチング速

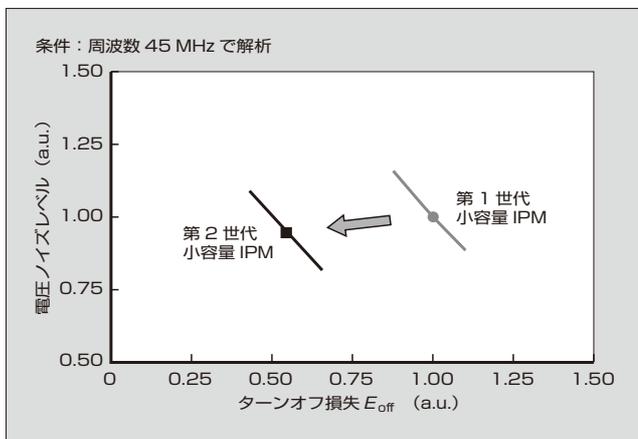


図4 IGBTの電圧ノイズレベルとターンオフ損失のトレードオフ特性

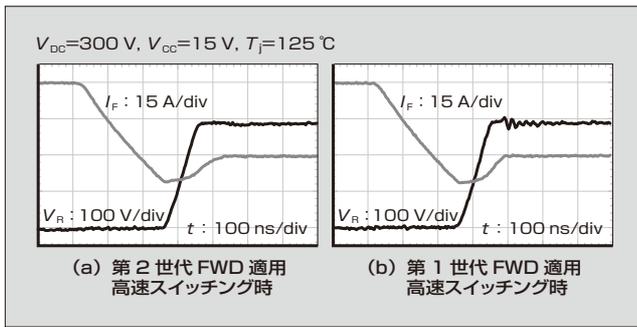


図5 リカバリー時のスイッチング波形

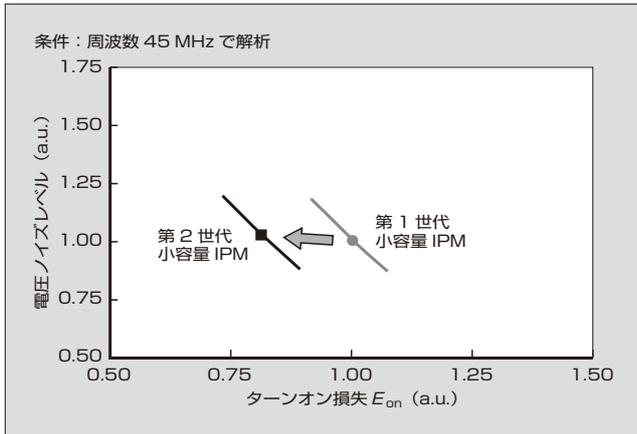


図6 FWDの電圧ノイズレベルとターンオン損失のトレードオフ特性

度を高くしてスイッチング損失を下げた場合、跳ね上がり電圧が増加して発生ノイズが大きくなる。発生ノイズの抑制と同時に、ターンオン損失を低減するためには、リカバリー電流を低減し、跳ね上がり電圧を抑制する必要がある。

図6に、FWDのリカバリー時の電圧ノイズレベルとターンオン損失のトレードオフ特性を示す。今回の製品では、FWDのドリフト層の厚さとライフタイム制御を最適化し、定格電流30Aにおいて、第1世代小容量IPMに対し電圧ノイズレベルを同等としながら、ターンオン損失を約20%低減した。

3.2 制御回路設計

LVICの過熱保護機能は、LVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ が動作保証値以上にならないように保護するとともに、IGBTの連続動作時の温度上昇によって過熱保護の動作が生じないようにする必要がある。

図7に示すように、第2世代小容量IPMにおいてLVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ の動作温度範囲の上限は150℃である。また、IGBTが動作保証温度 $T_{j(ope)}$ 上限である150℃に達すると、隣接するLVICの温度は136℃に上昇するため、この温度以下では、過熱保護が動作しないようにする必要がある。そこで、LVICのジャンクション温度の検出のばらつきを抑え、過熱保護範囲を143℃±7℃としている。一方、第1世代小容量IPMでは、LVICのジャンクション温度 $T_{j(LVIC)}$ の動作温度範

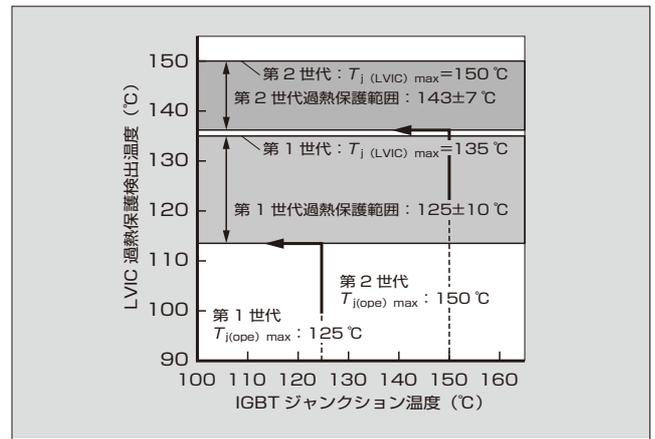


図7 LVIC 過熱保護検出温度とIGBT ジャンクション温度

囲の上限は135℃である。また、IGBTの動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の上限である125℃に達すると、隣接するLVICの温度は115℃に上昇する。そのため、過熱保護範囲が125℃±10℃であった。このように、第2世代小容量IPMでは、LVICの動作温度範囲を拡大させただけでなく、検出範囲を±7℃以下になるようにIC内部の基準電源回路などを高精度化することにより、IGBTの動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMから25℃拡大した150℃とすることができ、許容出力電流の拡大が可能となった。また、LVICに内蔵しているアナログ温度出力機能の特性値を第1世代小容量IPMと互換性を持たせることで、顧客による保護回路設計の共通化も可能とした。

3.3 パッケージ設計

第2世代小容量IPMは、パッケージエアコン、汎用インバータなどのプリント基板に、はんだで直接接合するパッケージ構造となっている。プリント基板の出力電流が増加すると、外部リード端子の温度が上昇し、はんだ付け部の温度も上昇する。一方、はんだ付け部の信頼性を確保するためには、運転時のはんだ付け部の温度を90~100℃以下に維持する必要がある。そのため、出力電流を制限する必要があった。

図8に、パッケージの断面構造を示す。先に製品化している10A品や15A品と同一となる、アルミニウム絶縁基板側にワイヤで生じるジュール熱を放熱する構造としなが

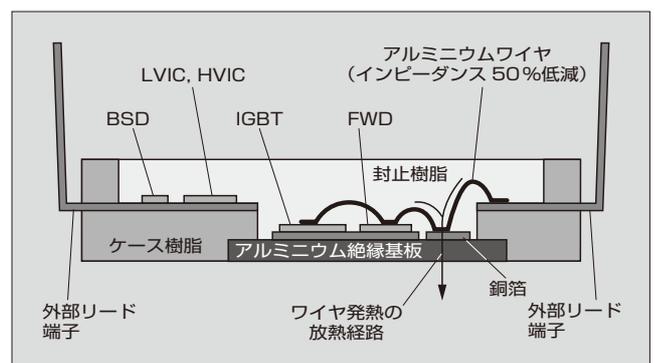


図8 パッケージの断面構造

ら、今回、電流容量の拡大に伴い、外部リード端子の温度上昇を抑制するために、ワイヤのインピーダンスを従来よりも50%下げてジュール熱を低減した。

4 適用効果

パッケージエアコンおよびサーボンプへの定格600V/30A品の適用効果を示す。

図9に、標準的な14kWのパッケージエアコンを想定し、最大負荷時の温度上昇についてシミュレーションを行った結果を示す。

第2世代小容量IPMの最大負荷時の温度上昇は前述の損失低減効果により、第1世代小容量IPMに対して約11℃低下している。さらに、第2世代小容量IPMでは動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMの125℃から150℃に拡大したことにより、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の保証値以下での動作が可能となった。これにより、第1世代小容量IPMでは適用困難であり、1ランク定格電流の大きいIPMが必要であった出力容量のエアコンへの適用が可能となる。

図10に1.0kW出力のサーボンプにおける加速・減速

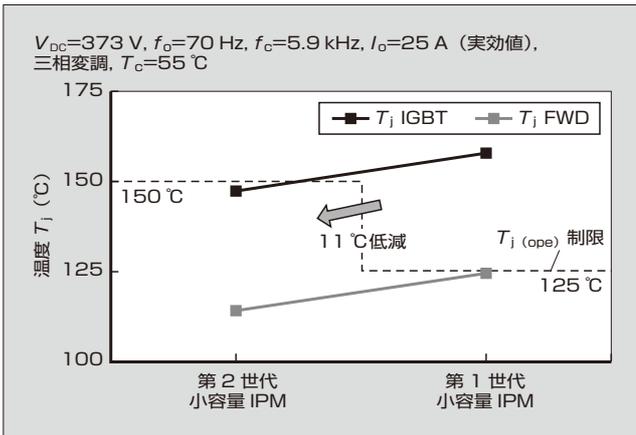


図9 パッケージエアコンにおける最大負荷時の温度上昇シミュレーション結果

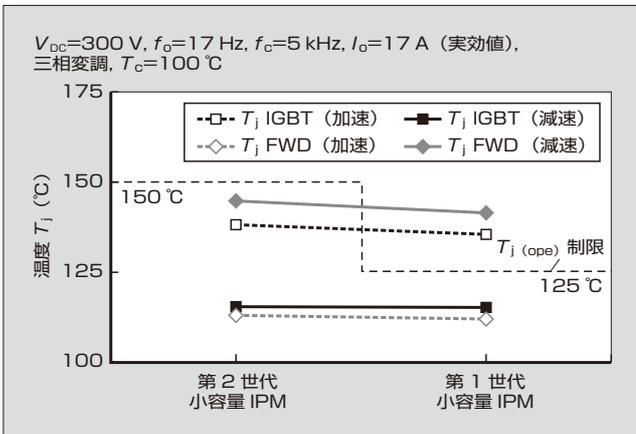


図10 サーボンプにおける加速・減速動作時の温度上昇シミュレーション結果

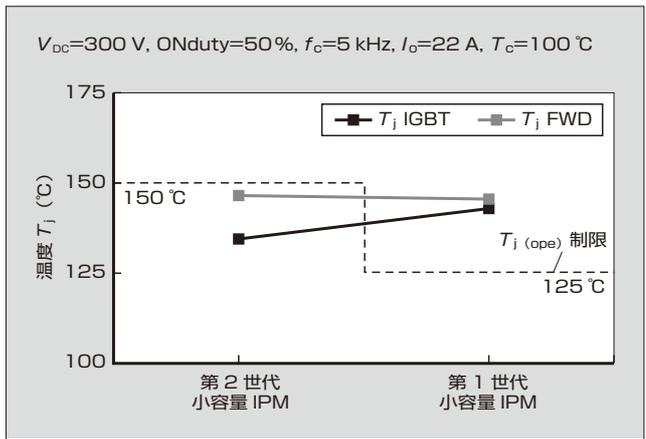


図11 サーボンプにおけるモータロック動作時の温度上昇シミュレーション結果

速動作時の温度上昇シミュレーションの結果を、図11にモータロック動作時の温度上昇シミュレーションの結果を示す。

第2世代小容量IPMの加速・減速動作およびモータロック動作を行った際の温度上昇は、第1世代小容量IPMとほぼ同じ値である。しかし、第2世代小容量IPMにおける動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を第1世代小容量IPMにおける125℃から150℃に拡大したことにより、動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の保証値以下での動作が可能となる。これにより、第1世代小容量IPMでは適用困難であり、1ランク定格

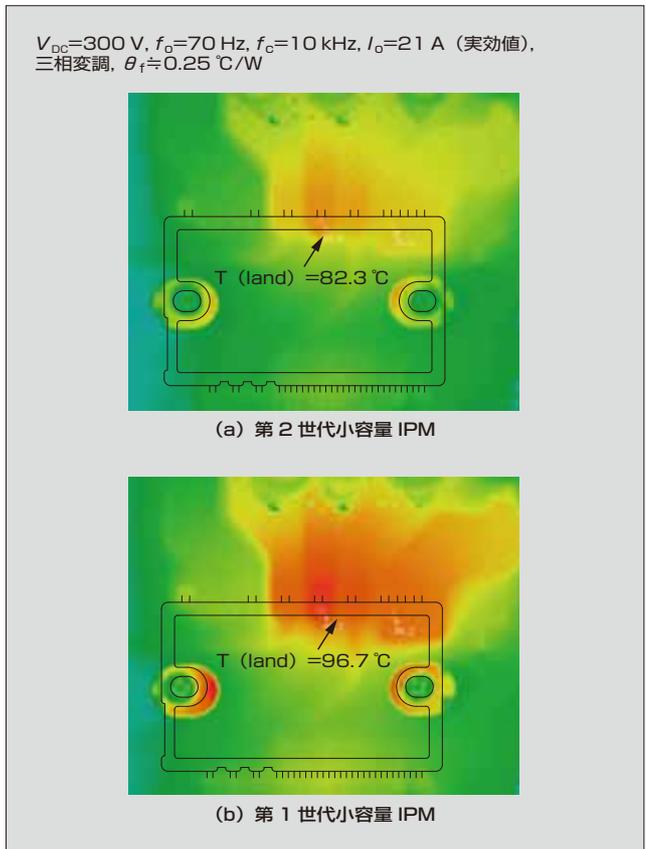


図12 パッケージエアコンにおけるPWM動作時のんだ付け部温度測定結果

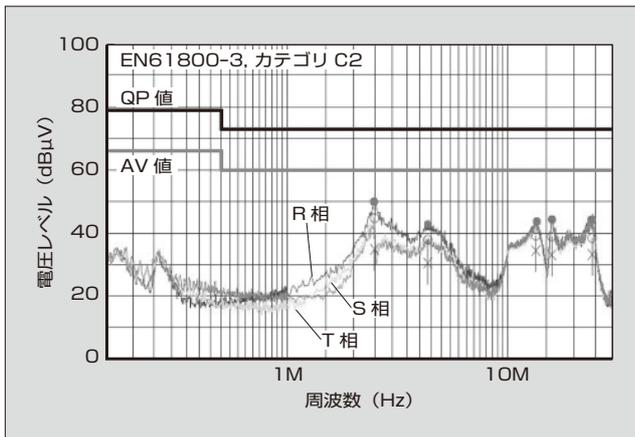


図13 サーボアンプにおける伝導ノイズ評価結果

電流の大きいIPMが必要であった出力容量のサーボアンプへの適用が可能となる。

図12に、600V/30A品を搭載したパッケージエアコンがPWM(Pulse Width Modulation)で定常動作を行っているときのプリント基板はんだ付け部の温度を測定した結果を示す。第2世代小容量IPMは、デバイスの低損失化とパッケージの外部リード端子部の温度上昇の抑制効果により、第1世代小容量IPMよりも、はんだ付け部の温度は約14℃低下している。その結果、はんだ付け部の温度上昇を抑制できることから許容出力電流は約19%拡大する。

図13に、0.75kW出力のサーボアンプに適用したときの伝導ノイズの評価結果を示す。EN61800-3カテゴリC2の限度値(QP値)以下であり、前述の温度上昇の抑制効果と合わせて低ノイズ特性を実現している。

5 あとがき

本稿では、第2世代小容量IPMの系列化として、電流容量を拡大した20A品と30A品について述べた。本製品は、既に量産を開始した10A品や15A品と同様に、第7

世代IGBTチップ技術をベースに最適化した低ノイズで低損失のデバイスを採用することで、インバータ制御のモータドライブ機器における省エネルギー化を実現できる。

今後も、モータドライブ機器の省エネルギー性能の向上に貢献できる製品を開発していく所存である。

参考文献

- (1) Yamada, T. et al. "Novel Small Intelligent Power Module For RAC", proc. 2012 PCIM Asia.
- (2) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.
- (3) T. Heinzl, et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems", Proceeding of PCIM Europe 2015, p.359-367.
- (4) 荒木龍ほか. 第2世代小容量IPM. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.259-263.



手塚 伸一

ディスクリートパワーデバイス、小容量IPM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ディスクリート・IC技術部。



鈴木 啓久

ディスクリートパワーデバイスおよび小容量IPM用FWDチップの設計・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。



白川 徹

ディスクリートパワーデバイスおよび小容量IPM用IGBTチップの設計・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。

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

Speed Enhancement for the 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications with RC-IGBT

高下 卓馬 KOGE, Takuma

井上 大輔 INOUE, Daisuke

安達 新一郎 ADACHI, Shinichiro

富士電機は、薄型化した RC-IGBT (逆導通 IGBT) を搭載し、高速動作化したパッケージ構造の車載用第 3 世代直接水冷型モジュールを開発した。IGBT と FWD をワンチップ化した RC-IGBT の適用により、ターンオン、ターンオフ時のスイッチング速度の増加を実現した。また、寄生インダクタンスは、RC-IGBT と内部レイアウトの最適化により従来パッケージに対して 50% 減少させた。さらに、重畳サージ電圧は三相それぞれに PN 端子対を持つパッケージ構造とすることで減少させた。これらの技術により、第 3 世代のモジュールのスイッチング損失は第 2 世代のモジュールに対して 30% 減少した。

Fuji Electric has employed a thin reverse-conducting IGBT (RC-IGBT) in the development of a 3rd-generation direct liquid cooling module for automotive applications that is characterized by its high-speed packaging structure. By utilizing an RC-IGBT that integrates an IGBT and FWD on a single chip, the module achieves faster switching at turn-on and turn-off. In addition, parasitic inductance has been decreased by 50% compared with conventional packages through use of the RC-IGBT and internal layout optimization. Furthermore, superimposed surge voltage has been reduced by adopting a packaging structure that equips all 3 phases with a PN terminal pair. These technologies have enabled the 3rd-generation module to reduce switching loss by 30% compared with 2nd-generation modules.

1 まえがき

地球温暖化防止に向けた CO₂ 排出規制の強化を背景に、エンジンとモータの双方を利用するハイブリッド自動車 (HEV)、ならびにモータのみで走行する電気自動車 (EV) が実用化され、開発は現在も活発に進められており、さらなる普及が期待されている。HEV や EV の動力制御に用いるインバータには、車内の限られたスペースに搭載するための小型化および電池やモータの高出力に対応するための高電力密度化が求められている。

図 1 に、富士電機の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールにおける電力密度トレンドを示す。産業用 IGBT モジュールの最新世代である第 7 世代モジュールにおける電力密度は、300 kVA/L 程度である。これに対し、車載用 IGBT モジュールの最新世代である第 3 世代モジュールは 800 kVA/L であり、約 2.5 倍高い。

富士電機は、高電力密度化の要求に応えるため、最新

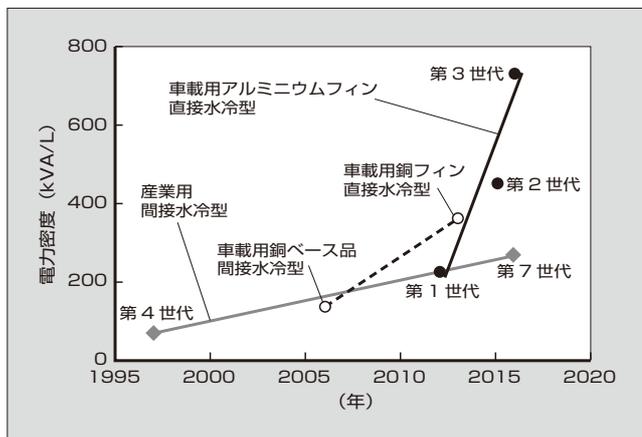


図 1 IGBT モジュールの電力密度トレンド

の薄ウェーハ化技術を適用し、薄型化した IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) をワンチップ化した第 7 世代 RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を開発した。インバータ動作では発生損失の低減のため、定常損失だけでなくスイッチング損失を低減する必要がある。

本稿では、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュール (車載用第 3 世代モジュール) における低損失化のための、薄型化した RC-IGBT 技術と高速動作化してスイッチング損失を低減したパッケージ構造について述べる。

2 低インダクタンスパッケージ設計

2.1 低インダクタンス化における RC-IGBT の特徴

図 2 に、RC-IGBT の概略構造を示す。HEV 向けの RC-IGBT は、量産しているフィールドストップ (FS) 型 RC-IGBT をベースとし、ストライプ状に IGBT 領域と FWD 領域を形成している。最新の薄ウェーハ化技術により電力損失を低減するとともに、トレンチ間隔、チャンネル密度、コンタクトなどの表面構造の最適化を行い、RC-IGBT の性能を向上させた。図 3 に、同一電流密度における第 7 世代 RC-IGBT と従来の第 6 世代 IGBT・FWD の

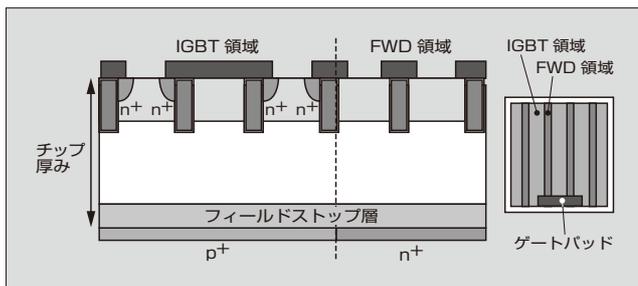


図 2 RC-IGBT の概略構造

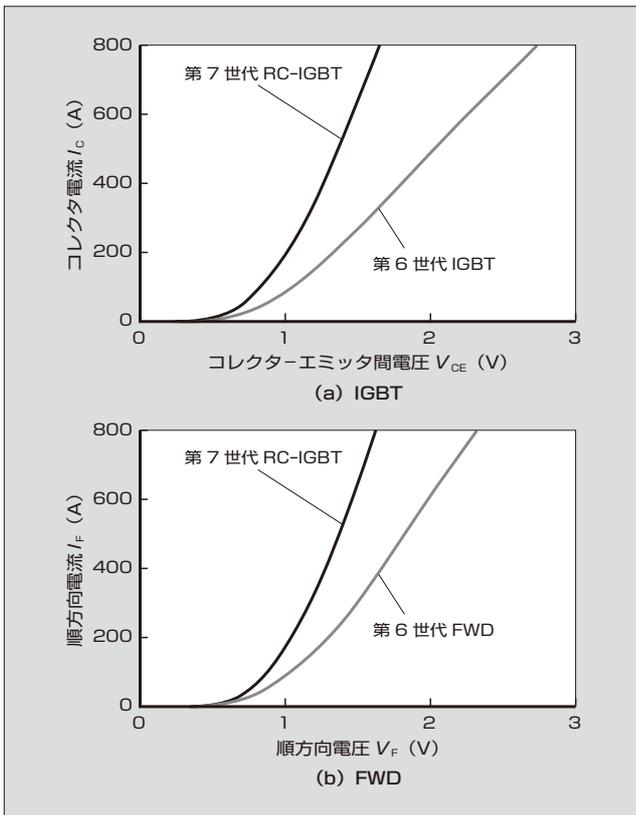


図 3 RC-IGBT と従来の IGBT・FWD の出力特性

出力特性を示す。薄ウェーハ化技術と表面構造の最適化により、 $V_{CE(sat)}$ と V_F は、従来の第 6 世代 IGBT・FWD の組合せと比較して飛躍的に減少した。

RC-IGBT は IGBT と FWD のワンチップ化により、パッケージサイズの小型化が可能になる。第 7 世代 RC-IGBT は、同一の出力電力を従来チップに比べて 70% に相当するサイズで達成できる。図 4 に、RC-IGBT と一般的な従来のハーフブリッジ回路の基板レイアウトを示す。RC-IGBT の場合、従来の IGBT と FWD で構成される IGBT モジュールに対して基板面積を 75% まで減少でき、P 端子から N 端子への電流経路長を 78% まで減少できる。

IGBT モジュールの寄生インダクタンスは、P 端子から N 端子への電流経路幅と PN 端子間距離に依存する。

項目	第 7 世代 RC-IGBT	第 6 世代 IGBT・FWD
基板レイアウト		
基板サイズ割合	0.75	1
PN 間電流経路長の比率	0.78	1

図 4 RC-IGBT と従来の基板レイアウト比較

IGBT モジュールを IGBT と FWD で構成すると、電流経路長に限界がある。そのため、寄生インダクタンスを減少させるために、電流経路幅を大きくできる並列接続や、PN 端子間距離を小さくできるラミネートブスバーがよく適用されている。しかしながら、これらの施策はパッケージサイズが大きくなる傾向がある。^{(3)~(6)} RC-IGBT は電流経路が短くなるので、寄生インダクタンスが飛躍的に減少するとともに、パッケージの小型化が可能である。

2.2 重畳サージ電圧抑制のためのパッケージ設計

周知のように、パッケージの低インダクタンス化によりターンオフ時と逆回復時のサージ電圧は減少する。車載用第 3 世代モジュール (6MBI800XV-075V) の寄生インダクタンスは第 7 世代 RC-IGBT の適用と内部レイアウトの最適化により、第 6 世代 IGBT・FWD を搭載した車載用第 2 世代モジュール (6MBI600VW-065V) ⁽⁷⁾ に対して 2 分の 1 程度である。しかし、寄生インダクタンスの減少だけでなく、重畳サージ電圧を減少することがインバータ動作において重要である。三相インバータのサージ電圧は、平滑コンデンサとモジュールが接続された状態でターンオフ動作時にモジュールの PN 端子に発生する。ターンオフ動作が、例えば U 相とその他の相 (V 相) の間において起こると、P 端子と N 端子の間に発生するサージ電圧は重畳される。

図 5 に、世代別 PN 端子間のサージ電圧を示す。平滑コンデンサは、自動車用インバータにおいては直列に接続した状態で使用される。車載用第 3 世代モジュールのパッケージではスイッチング速度 ($-di/dt$) が 1.5 倍大きいにもかかわらず、PN 端子間サージ電圧が飛躍的に減少している。サージ電圧は、車載用第 2 世代モジュールのパッケージのように各相の PN 端子が共通化されている場

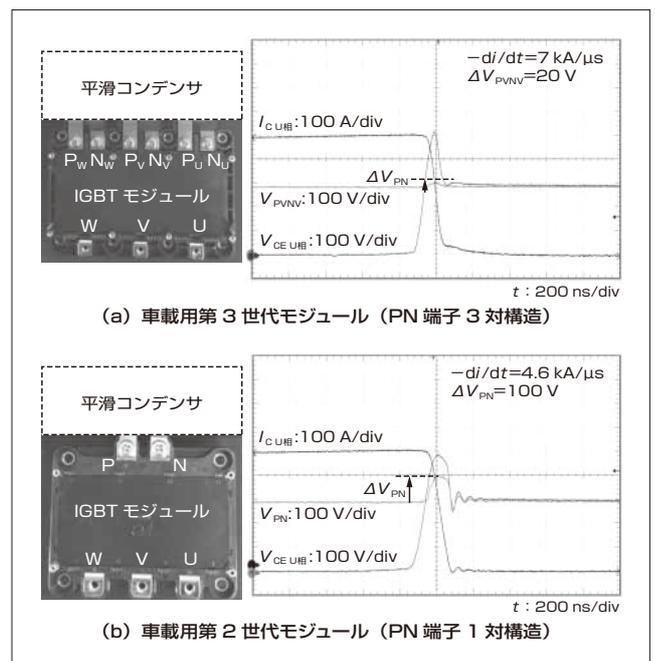


図 5 世代別 PN 端子間のサージ電圧

合、容易に重畳される。一方、車載用第 3 世代モジュールのパッケージでは、各相の PN 端子が独立しているため、PN 端子間サージ電圧は大幅に低減している。

重畳サージ電圧を評価するため、二相スイッチングにおけるサージ電圧を測定した。図 6 に、二相スイッチングにおける重畳サージ電圧測定の等価回路を示す。

車載用第 2 世代モジュールでは、パッケージ構造の制限により各相の電流を測定するのは困難であった。そのため、電流は二相全体で測定した。図 7 に、世代別モジュールのターンオフ波形を示す。上側の波形は U 相のみの単相スイッチングの場合であり、下側の波形は U 相と V 相による二相スイッチングの場合である。車載用第 2 世代モジュールでは、二相スイッチング時のサージ電圧は単相スイッチングに対して 54 V 増加した。一方、車載用第 3 世代モジュールでは、単相スイッチングと二相スイッチングでほとんど差がなかった。さらに、スイッチング速度 ($-di/dt$) が 1.5 倍大きいにもかかわらず、車載用第 3 世代モジュールでのサージ電圧は車載用第 2 世代モジュールよりも小さくなった。この結果は、同じバッテリー電圧とデバイス耐圧の状態の下で車載用第 2 世代モジュールに対し、1.5 倍以上スイッチング速度を増加できることを示している。重畳サージ電圧は逆回復動作時と同様に発生する。したがって、車載用第 3 世代モジュールではターンオン時の

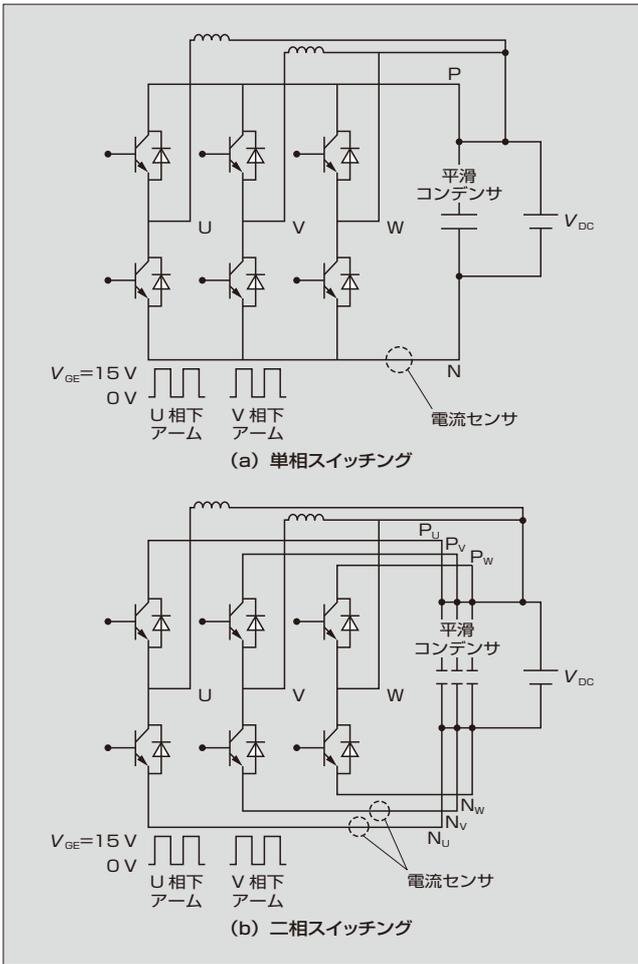


図 6 重畳サージ電圧測定の等価回路

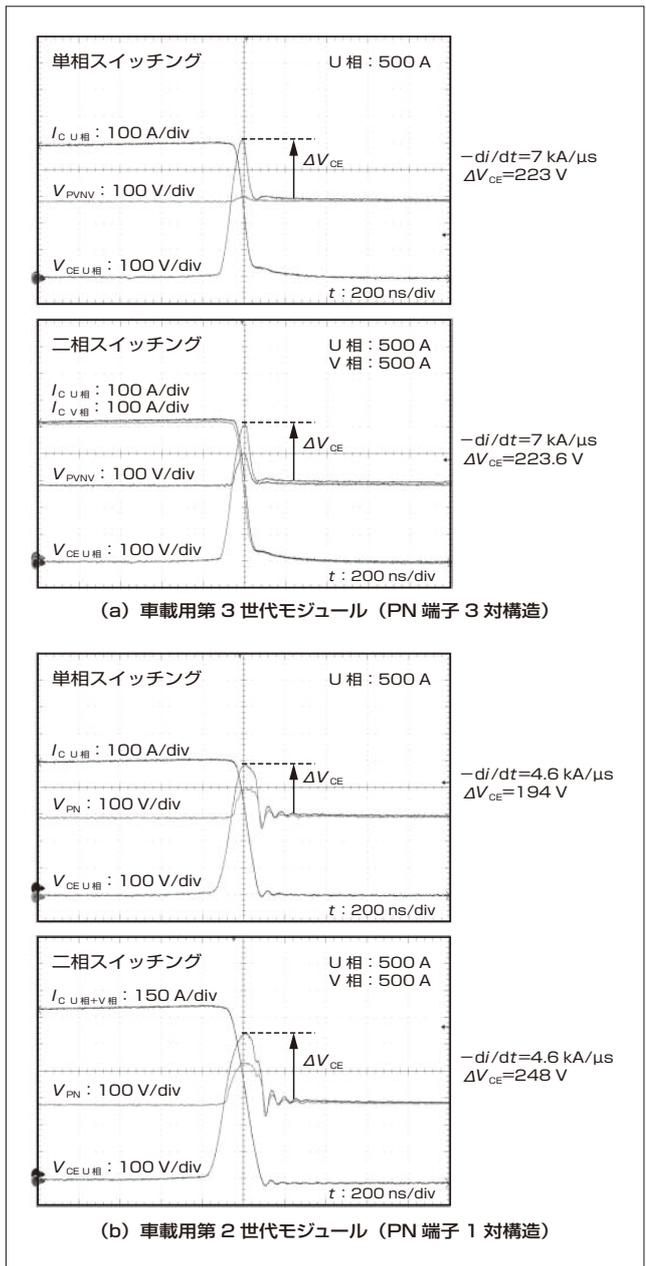


図 7 世代別モジュールのターンオフ波形

スイッチング速度も増加できる。

③ RC-IGBT 適用モジュールの損失特性

図 8 に、世代別モジュールの電力損失の計算結果を示す。 $V_{cc}=400\text{ V}$ 、出力電流(実効値) 400 A 、スイッチング周波数 $f_c=10\text{ kHz}$ の条件の下でのインバータ動作時において、車載用第 2 世代モジュールの電力損失と、RC-IGBT と PN 端子 3 対構造のパッケージを組み合わせた車載用第 3 世代モジュールの電力損失とを比較したものである。ターンオン di/dt とターンオフ $-di/dt$ は、重畳サージ電圧含むサージ電圧が同等になるように設定した。RC-IGBT のサイズは、IGBT と FWD を合わせた全体のサイズに対して 70% 相当である。スイッチング損失は高速スイッチング化により 30% 減少することができた。

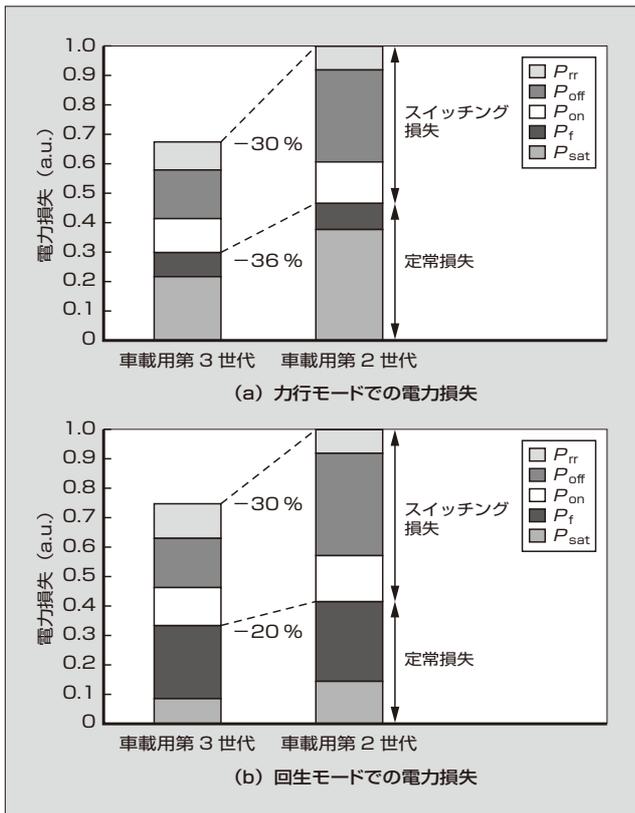


図 8 世代別モジュールの電力損失計算結果

4 あとがき

本稿では、RC-IGBT を搭載した車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの高速動作化について述べた。

逆回復特性のソフト性向上のため、第 7 世代 RC-IGBT は表面構造およびフィールドストップ (FS) 層を最適化した。この RC-IGBT の適用により、ターンオン時とターンオフ時のスイッチング速度の増加を実現した。また、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールの寄生インダクタンスは、RC-IGBT と内部レイアウトの最適化により従来パッケージに対して 50% 減少させた。さらに、重畳サージ電圧は三相それぞれに PN 端子対を持つパッケージ構造とすることで減少させた。

これらの技術により、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールは、スイッチング損失を車載用第 2 世代直接水冷型パワーモジュールに対して 30% 減少でき、高電力密度化した HEV や EV のインバータシステムの実現に多大

な貢献が期待できる。

今後、さらに設計技術を向上し、小型化、高電力密度化を達成できる製品開発を進める所存である。

参考文献

- (1) 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.
- (2) Higuchi, K. et al. "New standard 800 A/750 V IGBT module technology for Automotive application", PCIM Europe 2015, p.1137-1144.
- (3) C. Muller, S. Buschhom. "Power-module optimizations for fast switching a comprehensive study", PCIM Europe 2015, p.434-441.
- (4) Kawase, D. et al. "High voltage module with low internal inductance for next chip generation-next High Power Density Dual", PCIM Europe 2015, p.217-223.
- (5) G. Borghoff. "Implementation of low inductive strip line concept for symmetric switching in a new high power module", PCIM Europe 2013, p.185-191.
- (6) R.Bayerer, D.Domes. "Power circuit design for clean switching", CIPS2010.
- (7) Adachi, S. et al. "High thermal conductivity technology to realize high power density IGBT modules for electric and hybrid vehicles", PCIM Europe 2012, p.1378-1384.



高下 卓馬

車載用 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 EV モジュール技術部。



井上 大輔

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実装開発部。



安達 新一郎

車載用 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 EV モジュール技術部チームリーダー。

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

Functionality Enhancement of 3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications Equipped with RC-IGBT

佐藤 憲一郎 SATO, Kenichiro

榎本 一雄 ENOMOTO, Kazuo

長睦 文男 NAGAUNE, Fumio

富士電機は、ハイブリッド自動車や電気自動車向けに、車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュールを開発した。車載用パワーモジュールには、低損失化と小型化が求められている。水冷フィンとカバーを一体化したアルミニウム製ウォータージャケットとフランジ構造の冷媒出入り口を採用し、放熱性を改善した。また、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD (Free Wheeling Diode) を一体化した RC-IGBT (逆導通 IGBT) を適用し、同じ活性面積で 20% の電力損失を低減した。これらにより、パワーモジュールの低損失化と小型化を実現した。

Fuji Electric has developed a 3rd-generation direct liquid cooling power module for automotive applications such as hybrid and electric vehicles. Power modules for automotive applications are required to be compact and exhibit low power loss. We have improved heat dissipation performance of the module by using an aluminum water jacket that combines the liquid cooling fins with cover as well as refrigerant inlet and outlet ports with a flange structure. In addition, employing a reverse conducting IGBT (RC-IGBT) that integrates an insulated gate bipolar transistor (IGBT) with free wheeling diode (FWD) enables the power module with the same active area to reduce power loss by 20%. As a result, the power module has achieved a lower loss and a smaller size.

1 まえがき

CO₂ 排出量の削減や地球資源の保護のために、世界各国が取組みを加速しており、自動車メーカーはハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の開発を積極的に進めている。HEV や EV では、電気モータを動作させるためにインバータが用いられており、その中で重要なキーコンポーネントの一つが IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである。IGBT モジュールには、バッテリーの電力を効率よく利用するために低損失化と小型化が求められている。

これらの要求に応えるため、富士電機はこれまで直接水冷方式を用いた IGBT モジュールを製品として提供するとともに開発を継続してきた^{(1)~(4)}。今回、従来の車載用直接水冷型パワーモジュールよりも、さらに高性能化と高機能化を行った車載用第 3 世代直接水冷型パワーモジュール (車載用第 3 世代モジュール) を開発した。

本稿では、RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT)⁽⁵⁾ 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について述べる。

2 特徴

今回開発した車載用第 3 世代モジュールの外観を図 1 に示す。この製品は、冷媒の流路設計の最適化により、従来品よりも高い放熱性能を達成している。カバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットと、フランジ構造の冷媒出入り口を採用したことにより、ユーザはフランジ出入り口に指定流量の冷媒を流す配慮を行うだけでよい。

車載用第 3 世代モジュールの主な製品仕様を表 1 に、モジュールの等価回路を図 2 に示す。また、製品の特徴を次

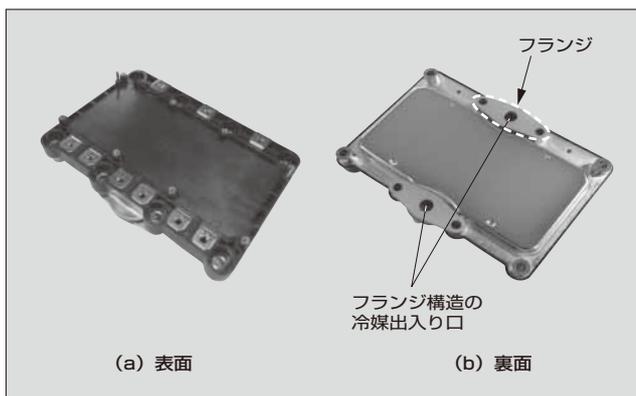


図 1 車載用第 3 世代モジュール

表 1 車載用第 3 世代モジュールの主な仕様

項目	定格・特性
コレクター-エミッタ間電圧	750 V
定格電流	800 A
最大動作温度	175 °C
外形寸法	W162 × D116 × H24 (mm)
絶縁耐圧	2,500 V (交流実効値)
IGBT 部飽和電圧	1.45 V (25 °C, 800 A)
FWD 部順電圧	1.50 V (25 °C, 800 A)
IGBT/FWD 部熱抵抗	0.14 °C/W (10L/min, LLC)
質量	560 g

に示す。

(1) パワーモジュールの小型化

IGBT には、第 7 世代のチップ技術を適用して損失を低減するとともに、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) をワンチップ化した RC-IGBT を採用して、パワーモ

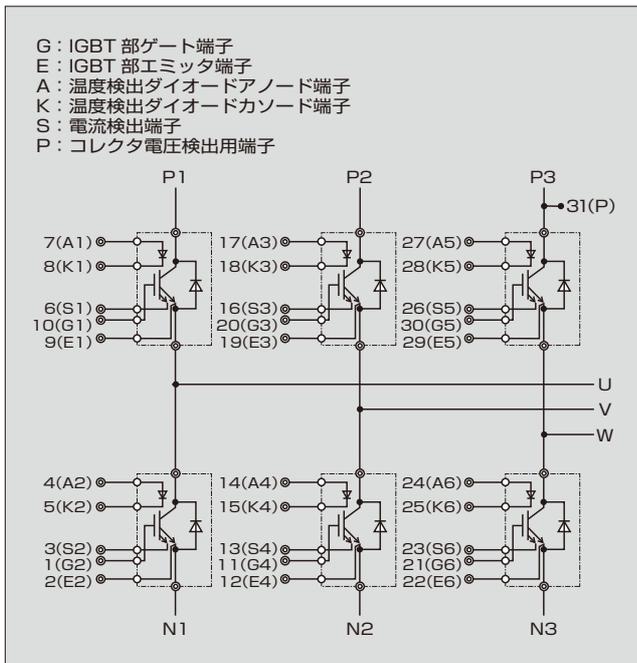


図2 車載用第3世代モジュールの等価回路

ジュールの15%小型化を図った。また、RC-IGBTにはIGBTに流れる電流とジャンクション温度の検出機能を搭載し、小型化を損なわずにチップ性能を発揮すること、短絡や過熱に対して確実な保護動作を行うことができるようにした。

車載用第3世代モジュールでは、図2に示すように各アームのIGBT部には、駆動に必要なゲートおよびエミッタ端子に加えて、温度検出用ダイオードのアノードおよびカソード端子、電流検出用端子を配置している。温度検出用ダイオードはRC-IGBTに内蔵している。

(2) 高放熱性能を持つ冷却器構造

水冷フィンとカバーを一体化した冷却器構造により、放熱性の向上と薄型化を実現した。冷媒出入り口はフランジ構造を採用し、インバータ筐体(きょうたい)との水密性はOリングなどで確保する。

(3) 主端子配線の低インダクタンス化

平滑コンデンサに接続する各相の入力端子を独立させること、配線を最短にすることによりインダクタンスを下げ、高速スイッチング動作によるスイッチング損失の低減と、電流遮断時のサージ電圧の低減を図った。⁽⁶⁾

3 高機能化のための要素技術

3.1 RC-IGBT の設計技術

図3に、RC-IGBTの概略構造を示す。フィールドストップ(FS)型IGBTを採用し、ストライプ状に交互にIGBT領域とFWD領域を一つのチップに配置した構造である。ワンチップ化でチップ周辺部の耐圧を確保するガードリングと呼ばれる領域を削減でき、二つのチップで構成する従来よりもチップ面積が小さくなる。また、IGBT動作時にはFWD部からも放熱し、FWD動作時にはIGBT

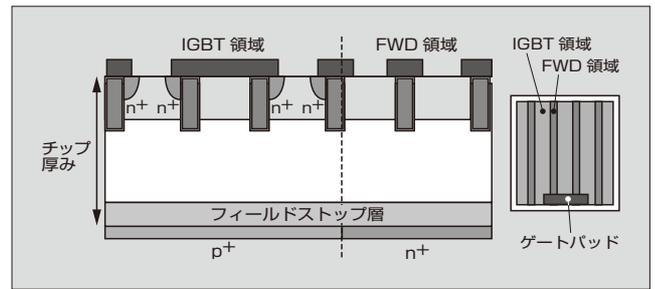


図3 RC-IGBTの概略構造

部からも放熱するので、IGBTとFWDそれぞれの動作時に熱抵抗を低減できる効果がある。さらに、最新の薄ウェーハ化技術、トレンチ構造、チャンネル密度などの最適化により低損失化とチップの小型化が可能となり、パワーモジュールの小型化に貢献している。IGBT領域およびFWD領域の比率は、インバータの力行動作および^(注1)回生動作を考慮して最適化している。また、IGBTとFWDを一体化したことにより、IGBT部のターンオフ動作時にFWD領域もキャリアの排出経路として使うことにより、RC-IGBTではターンオフ損失を低減することができる。

RC-IGBTの採用、IGBT領域とFWD領域の配分の最適化、さらには最新世代のチップ技術を用いることにより、IGBTモジュールとしての電気特性も改善でき、電力損失を低減している。同じ活性面積では、20%の電力損失の低減を実現している。⁽⁷⁾

3.2 RC-IGBT の保護技術

IGBT技術の世代交代が進み、飽和電圧やスイッチング損失が低減すると、重要となるのが短絡保護である。すなわち、飽和電圧の低減に伴って短絡電流が増加するため、短絡エネルギー耐量を超えることなく短時間で遮断するとともに、サージ電圧の増加を抑える必要がある。RC-IGBTにおいて短絡動作が発生した場合、高速かつ確実に遮断するため、車載用第3世代モジュールでは電流検出方式による短絡保護を採用している(図4)。この方式は、短絡が発生した場合に短絡電流の一部を電流検出端子に分流し、接続した抵抗に発生する電流検出用電圧 V_{SC} によって短絡保護動作を開始する。直列に接続した抵抗 R_{SE1} および R_{SE2} の抵抗値を設定することにより、短絡保護を開始する電流値を設定する。富士電機では、電流検出方式による短絡保護回路を搭載したモジュール評価用のドライブ基板を用意している。ここでは、評価用ドライブ基板の機能を紹介するとともに、短絡保護の考え方を述べる。

(1) 評価用ドライブ基板

図5に、車載用第3世代モジュールに装着した評価用ドライブ基板の外観を示す。評価用ドライブ基板は6アー

〈注1〉 力行：モータの動力を機械に伝えて加速すること

〈注2〉 回生：減速時モータが発生する電力をバッテリーへ返すこと

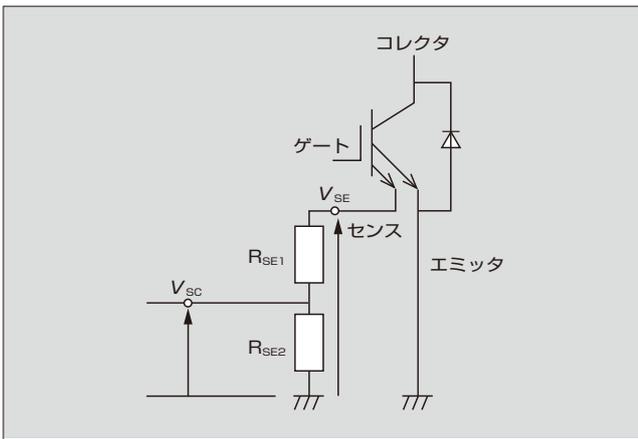


図4 電流検出方式による短絡保護

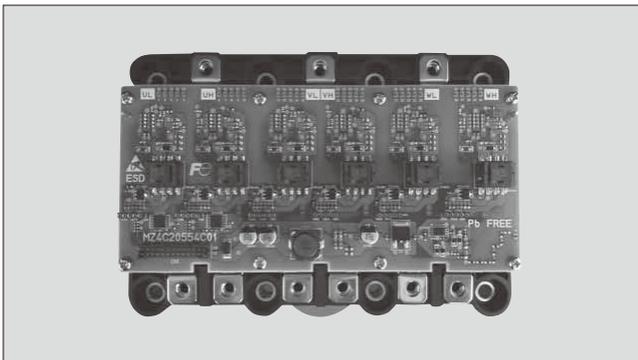


図5 車載用第3世代モジュールに装着した評価用ドライブ基板

μ分の IGBT 部ドライブ回路を持ち、ゲート駆動電圧は +15/-0V（オン電圧/オフ電圧）である。短絡検知と同時に、短絡電流を抑制するため、ゲート駆動電圧をクランプ状態にする機能を持っている。また、短絡保護機能とともに、図2に示すパワーモジュールのコレクタ電圧検出用端子を用いてパワーモジュールに入力される直流電圧の監視機能も持っている。

図6に、車載用第3世代モジュールにおける、評価用ドライブ基板を用いた短絡保護動作波形の例を示す。このときの短絡保護の動作フローを次に示す。

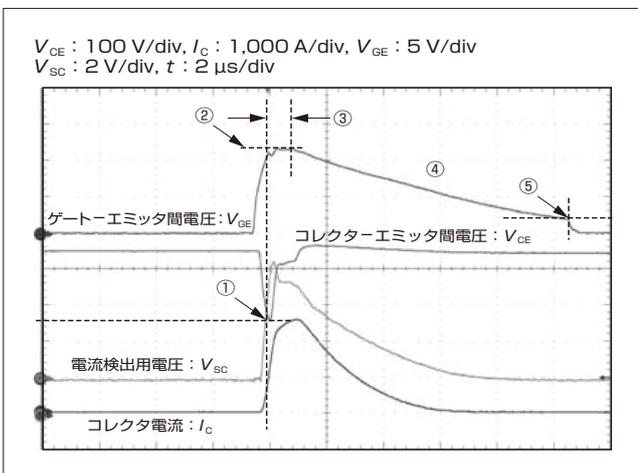


図6 短絡保護動作波形

- (a) 短絡が発生し、 V_{SC} (図4) が上昇する (図6①)。
- (b) V_{SC} が短絡電流と判断するしきい値電圧を超えた時点から、短絡電流を抑制するためにゲート-エミッタ間電圧が12Vでゲートクランプ状態になる (図6②)。
- (c) 短絡状態が継続すると、ゲートクランプ状態が継続する (図6③)。
- (d) ゲートクランプ状態がある期間継続すると、短絡発生の異常状態と判断し、ゲート-エミッタ間電圧が緩やかに低下するソフト遮断動作を行う (図6④)。
- (e) IGBTのゲートしきい値電圧よりも十分低いゲート-エミッタ間電圧でソフト遮断動作が終了し、通常遮断状態でゲート-エミッタ間電圧がオフする (図6⑤)。

(2) 短絡保護設計のポイント

素子破壊を起こさず、確実に短絡動作を検知し、短絡保護を行うことが必要であり、次に示す内容が短絡保護設計のポイントとなる。

- (a) 短絡検知電圧
短絡電流を検知する電圧値を決定する。
- (b) V_{SC} 最大電圧
ドライブICの耐圧以下とする。
- (c) ゲートクランプ電圧
短絡電流の制限値を決定する。
- (d) ゲートクランプ保持時間・ソフト遮断動作時間
短絡エネルギーを破壊レベル以下とするための、それぞれの時間を決定する。

一方、IGBTの正常なスイッチング動作では、 V_{SC} を適用最大電流の範囲で短絡検知電圧より低い値とする必要がある。万一、正常動作において短絡を誤検知した場合、IGBTのスイッチング損失の増加や装置の誤動作を引き起こす。先に述べた短絡保護での短絡検知電圧の設定においては、正常動作での V_{SC} の挙動も考慮する必要がある。

(3) 評価結果の例

図7にターンオン時の V_{SC} の挙動を含む動作波形を、図8に短絡状態とターンオン時の V_{SC} のチップ温度依存性を示す。

図7における(i)から(iii)の期間での V_{SC} の挙動を次に示す。

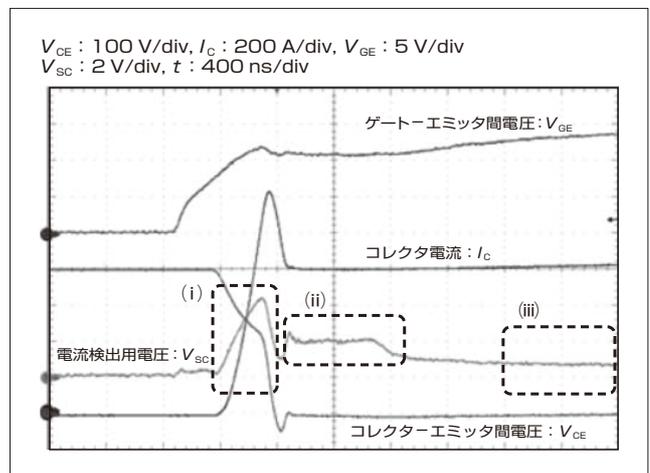


図7 ターンオン動作波形

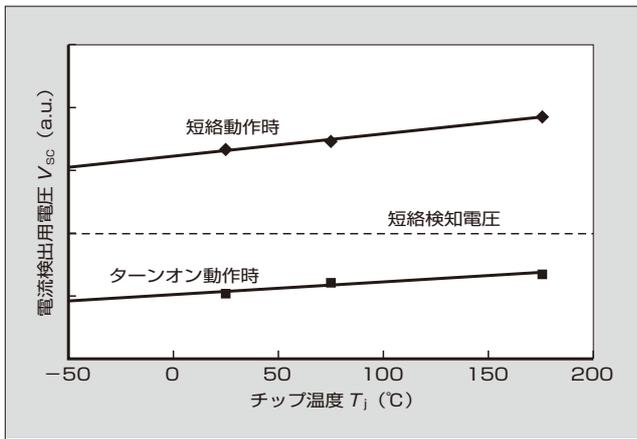


図8 電流検出用電圧のチップ温度依存性

(a) 期間(i)

コレクタ電流が増加し、電流の傾きにより過渡的に V_{sc} が上昇する。この期間は正常動作の範囲であり、短絡を検出しない期間とする必要がある。

(b) 期間(ii)

コレクタ電流は一定値に達したが、ゲート-エミッタ間電圧が一定期間 IGBT のしきい値電圧レベルに保持される期間であり、この期間で高い V_{sc} が発生する。この期間で短絡を検知すべきであるが、誤検知を防ぐために通常スイッチング時は V_{sc} を短絡検知電圧よりも低く設定する必要がある。

(c) 期間(iii)

ターンオン電流とゲート-エミッタ間電圧は所定の設定値へ移行する期間となり、 V_{sc} も低い値となる。

図8に示すターンオン時の V_{sc} は、期間(ii)の値を示しており、適用される全電流と全温度領域で短絡検知電圧よりも低い値であることが必要である。また、短絡保護動作でのゲートクランプ期間は、上述の通常スイッチングでの期間(i)も考慮して設定する必要がある。

3.3 高放熱冷却器の適用技術

車載用第3世代モジュールでは、カバー一体型のアルミニウム製ウォータージャケットとフランジ構造の冷媒出入口を採用している。ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したことおよびフィン形状に工夫を加えたこと^{(7),(8)}で、従来品よりも放熱性を30%向上させている。車載用第3世代モジュールは、冷媒出入口にフランジ構造を採用したことが特徴であり、ここではOリングを用いたフランジ構造のシールの確保について述べる。

直接水冷型パワーモジュールは、フランジでシール材を介して装置筐体に取り付けられる。使用温度や冷媒の圧力が変化した場合でも、冷媒漏れを防止するシールが必要である。車載用第3世代モジュールにOリングを用いた例を、図9に示す。実際には、使用環境や通電条件により、装置全体に変形や振動などが発生するので、使用環境下で常にOリングが適切なつづれ幅でフランジと筐体に接している状態を維持することが必要である。

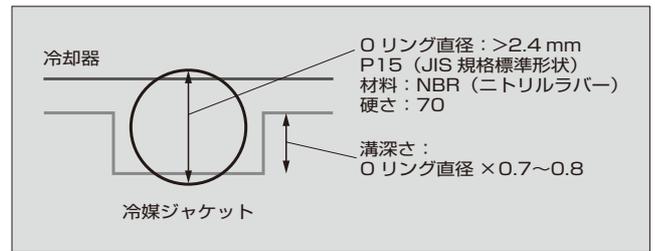


図9 Oリングを用いたシールの例

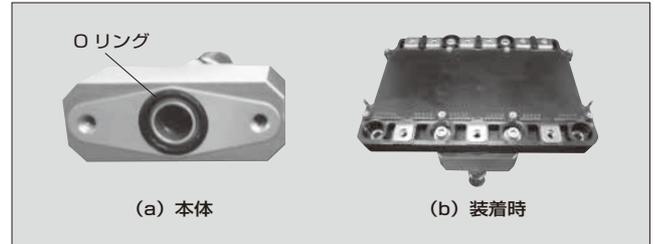


図10 フランジ接続用アダプタ

富士電機では、ユーザの評価用として、フランジと接続し冷媒を流すためのアダプタを用意している。図10にフランジ接続用アダプタの外観を示す。

4 あとがき

本稿では、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について述べた。パワーモジュールの高機能化を実現する要素技術であるRC-IGBTとその保護技術、および直接水冷を実現する冷却器の適用技術は、ユーザのインバータ装置設計を支援するものである。今後も、さらなる技術革新を推進し、より使いやすい高機能な製品を充実させ、提供していく所存である。

参考文献

- (1) 日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.
- (2) 安達新一郎ほか. 車載用IGBTモジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.435-439.
- (3) 高橋良和ほか. パワー半導体の現状と展望. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.234-239.
- (4) Higuchi, K. et al. "An intelligent power module with high accuracy control system". Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.39-46.
- (5) 吉田崇一ほか. 車載用RC-IGBT. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.279-282.
- (6) Adachi, S. et al. "Automotive power module technologies for high speed switching". Proceedings of PCIM Europe 2016, May 10-12, Nuremberg, p.1956-1962.
- (7) 荒井裕久ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.269-273.
- (8) 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.



佐藤 憲一郎

ハイブリッド自動車用 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 EV モジュール技術部。



長畦 文男

ハイブリッド自動車用 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 EV モジュール技術部課長。工学博士。電気学会会員。



榎本 一雄

ハイブリッド自動車用 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 EV モジュール技術部主査。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」

High-Side 2-in-1 IPS “F5114H” for Automobiles

森澤 由香 MORISAWA, Yuka

鷹坂 浩志 TOBISAKA, Hiroshi

安田 貴弘 YASUDA, Yoshihiro

近年、安全、環境、省エネルギーをキーワードに、自動車分野での電子制御化が進んでいる。電装システムに使用される半導体製品には、これらのキーワードに加え、小型化、高信頼性化の要求がある。富士電機は、さらなる小型化を目的として車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」を開発した。SOP-8 パッケージと同じ外形寸法の SSOP-12 パッケージに、従来品と同等の機能を持ったチップを 2 個搭載し、1 チャンネル品と同等の実装面積で 2 チャンネル化を実現した。また、高温の環境で使用可能な高信頼性ワイヤを採用した。これらにより、ECU (Electronic Control Unit) の大幅な小型化を可能にした。

In recent years, electronic control has been advancing in automotive electrical systems based on the keywords of safety, environment, and energy savings. In addition to these keywords, semiconductor products are also required to be compact and highly reliable. Fuji Electric has developed the high-side 2-in-1 intelligent power switch (IPS) “F5114H” for automotive applications to achieve even greater device miniaturization. Fuji Electric has equipped the SSOP-12 package, which has the same external dimensions as the SOP-8 package, with 2 chips that have the same functionality as previous products, allowing for two channels on the same mounting area as the previous one channel products. It also utilizes a highly reliable wire that can be used in high temperature environments. These enhancements have made it possible to greatly reduce ECU size.

1 まえがき

近年、安全、環境、省エネルギーをキーワードに自動車分野での電子制御化が進んでいる。電装システムに使用される半導体製品には、これらのキーワードに加え、小型化、高信頼性化の要求が高まっている。

富士電機では、エンジン、トランスミッション、ブレーキなどの電装システム向けに IPS (Intelligent Power Switch) を開発している。この IPS は出力段として用いる縦型パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と制御・保護回路を構成する横型 MOSFET を同一のチップ上に集積化している。電源側に半導体デバイスを配置し、グランド側に負荷を配置するハイサイド型 IPS と、この配置を逆にしたローサイド型 IPS を系列

化している。IPS を採用することにより ECU (Electronic Control Unit) の回路部品数を削減するとともに実装面積が縮小し、ECU の小型化につながる。近年では、第 4 世代 IPS のデバイス技術やプロセス技術を適用し、チップをいっ(1)~(3)そう小型化した。本稿では、さらなる小型化を目的として開発した車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」について述べる。

2 製品概要

F5114H の特徴を次に示す。

- (a) 小型 SSOP-12 パッケージにおける 2 チャンネル分のチップの搭載
- (b) 高信頼性ワイヤの適用

型 式	外形図	パッケージ	チャンネル数	デバイス構造図
F5114H (開発品)		SSOP-12	2	
F5044H (従来品)		SOP-8	1	

図 1 「F5114H」の外形とデバイス構造

図1に、F5114Hの外形とデバイス構造を示す。第4世代IPSデバイス技術やプロセス技術によって、出力段パワーMOSFETを従来のプレーナゲートMOSFETからトレンチゲートMOSFETに変更し、回路部は要素デバイス自体の微細化に加え、要素デバイス間を接続する配線面積を低減し、多層配線技術を適用することでチップを小型化した。チップの小型化に伴い、SOP-8パッケージと同実装面積のSSOP-12パッケージに、従来品と同等の機能を持ったチップを2個搭載した。これにより、電装システムのさらなる小型化と部品点数の低減によるトータルコストダウンに貢献する。また、ボンディングワイヤには、ECUの小型化に伴うデバイス自身や使用環境の高温化に対して信頼性を確保できる材料を採用した。

3 特性

F5114Hの回路ブロック図を図2に、絶対最大定格を表1に、論理表を表2に、電気的特性を表3に示す。F5114Hは従来品であるIPS「F5044H」と同等の電気的特性を持ち、かつ次の機能を搭載している。

- (a) 負荷短絡保護機能
- (b) 低電源電圧検出機能
- (c) 2チャンネル分の通電能力の確保

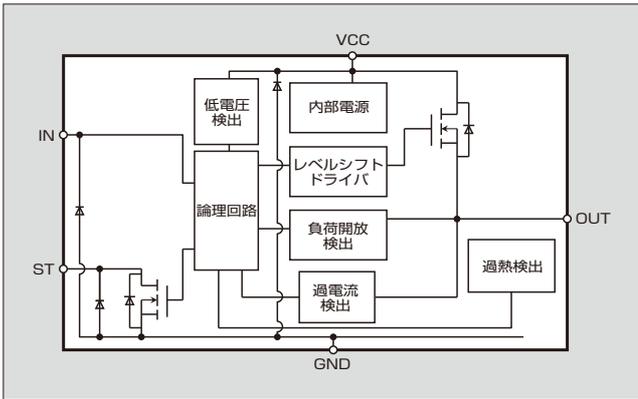


図2 「F5114H」の回路ブロック図 (1チャンネル分)

表1 絶対最大定格

項目	記号	条件	定格	
電源電圧 (V)	V_{cc1}	250 ms	—	50
	V_{cc2}	DC	-0.3	35
出力電流 (A)	I_D	1チャンネル当たり*	—	1.65
出力電圧 (V)	V_{OA}	—	$V_{cc} - 50$	—
消費電力 (W)	P_D	*	—	1.5
入力電圧 (V)	V_{IN}	DC	-0.5	7
入力電流 (mA)	I_{IN}	DC	-10	10
ステータス電圧 (V)	V_{ST}	DC	-0.3	7
ステータス電流 (mA)	I_{ST}	—	—	5
接合部温度 (°C)	T_J	—	-40	175
保存温度 (°C)	T_{STG}	—	-55	175

* ガラスエポキシ4層基板 [10 × 5 × 1.2 (mm)] 実装, 2チャンネル同時オン

表2 論理表

モード	IN	ST	OUT
正常動作	L H	L H	L H
過熱検出	L H	L L	L L
過電流検出	L H	L L	L L
負荷開放検出	L	H	H
低電圧検出	L H	L L	L L
IN入力端子開放	L Open	L L	L L

表3 電気的特性

項目	記号	条件	規格値	
			最小	最大
動作電源電圧 (V)	V_{cc}	$T_J = -40 \sim 175^\circ\text{C}$	4.5	16
低電圧検出 (V)	UV_1	$V_{IN} = 5\text{V}$	2	4.3
低電圧復帰 (V)	UV_2	$V_{IN} = 5\text{V}$	2.2	4.5
静止電源電流 (mA)	$I_{cc(L)1}$	$R_L = 10\Omega$ $V_{IN} = 0\text{V}$	—	0.6
	$I_{cc(L)2}$	OUT オープン $V_{IN} = 0\text{V}$	—	0.6
動作電源電流 (mA)	$I_{cc(H)}$	$V_{IN} = 5\text{V}$ $R_L = 1\text{k}\Omega$	—	5
入力レシヨールド電圧 (V)	$V_{IN(H)}$	$V_{cc} = 4.5 \sim 16\text{V}$ $R_L = 10\Omega$	2.8	—
	$V_{IN(L)}$		—	1.5
入力電流 (μA)	$I_{IN(H)}$	$V_{IN} = 5\text{V}$	5	70
	$I_{IN(L)}$	$V_{IN} = 0\text{V}$	-10	10
オン抵抗 (Ω)	$R_{DS(on)}$	$I_L = 1.5\text{A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$	—	0.12
		$I_L = 1.5\text{A}$ $T_J = 175^\circ\text{C}$	—	0.27
出力リーク (mA)	I_{OH}	$V_{OUT} = V_{cc}$ $V_{IN} = 0\text{V}$	—	2
	I_{OL}	$V_{OUT} = 0\text{V}$ $V_{IN} = 0\text{V}$	-0.24	—
過電流検出 (A)	I_{OC}	$V_{cc} = 13\text{V}$ $V_{IN} = 5\text{V}$	2	7
過電流モード下ピーク電流 (A)	$PeakI$	$V_{cc} = 13\text{V}$ $V_{IN} = 5\text{V}$	—	16
過電流モード下周期 (ms)	Per		—	3
過電流モード下デューティ (%)	$Duty$		—	40
過熱検出	検出 (°C)	T_{trip1}	—	207
	復帰 (°C)	T_{trip2}	175	—
オン時伝達遅延時間 (μs)	t_{ACCON}	$V_{cc} = 13\text{V}$ $R_L = 10\Omega$ $V_{IN} = 5\text{V} \rightarrow 0\text{V}$	—	140
オフ時伝達遅延時間 (μs)	t_{ACCOFF}		—	140
ターンオン時間 (μs)	t_{on}		—	120
ターンオフ時間 (μs)	t_{off}		—	70
ステータス電圧Lレベル (V)	$V_{ST(L)}$	$V_{IN} = 0\text{V}$ $R_L = 10\Omega$ $I_{st} = 0.6\text{mA}$	—	0.5
ステータスリーク電流 (μA)	I_{STLeak}	$V_{IN} = 5\text{V}$ $R_L = 10\Omega$ $V_{st} = 7\text{V}$	—	10
ステータスディレイ (μs)	$t_{ST(on)}$	$V_{cc} = 13\text{V}$ $R_L = 10\Omega$ $V_{IN} = 5\text{V} \rightarrow 0\text{V}$ $V_{st} = 5\text{V}$	—	200
	$t_{ST(off)}$		—	200
負荷開放検出電圧 (V)	V_{OH}	$V_{IN} = 0\text{V}$ $V_{ST} = L \rightarrow H$	4	—
負荷開放復帰電圧 (V)	V_{OIL}	$V_{IN} = 0\text{V}$ $V_{ST} = H \rightarrow L$	—	1.6

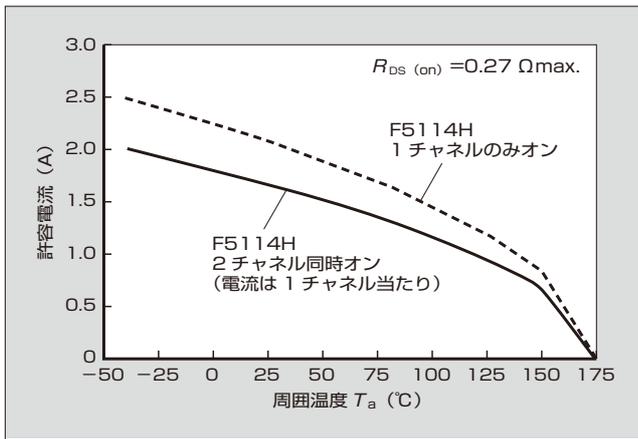


図3 「F5114H」の許容電流範囲

3.1 負荷短絡保護機能

負荷短絡保護機能は、出力段パワー MOSFET に過電流が流れた場合に、デバイス自身を保護することによってシステムと負荷も同時に保護する。この機能によって負荷短絡時の過電流を検出し、電力を下げるために出力電流を発振状態にする際のピーク電流を一定に抑えている。これにより、異常状態においても素子が発生するノイズを低減する。なお、F5114H では、過電流と過熱の二重の保護機能により、製品の安全性を向上させている。

3.2 低電源電圧検出機能

低電源電圧動作は、エンジン始動時など電源電圧が瞬間的に低下する状況に備え、電源電圧が 4.5 V に低下しても通常電圧の 13 V 時とほぼ同等のオン抵抗を維持できるようにしている。また、電源電圧が 4.5 V 未満の領域では回路動作が不安定にならないように、低電圧を検出するとともに出力をオフにする設計とした。これらの工夫により、電源電圧が低下したときでも通常時と同等の素子の性能を確保している。

3.3 2チャンネル分の通電能力の確保

従来の 1 チャンネル品と比較して、2 チャンネル品は同一パッケージに二個のチップが搭載されているため、許容電流や許容損失が低下することが懸念される。これに対し、接合部保証温度を 175 °C とすることで、許容電流や許容損失の低下を防いだ。

図 3 に、F5114H の許容電流範囲を示す。熱的に最も厳しい動作条件である 2 チャンネルが同時にオンのときでも、1 チャンネルあたり $I_D=1.65 \text{ A}$ ($T_a=25^\circ\text{C}$ 時) の通電能力を確保している。また、許容損失に関しても、従来品と同等の許容損失 $P_D=1.5 \text{ W}$ を確保している。

4 パッケージの特徴

4.1 パッケージの冗長設計

F5114H では、各チャンネルの機能が独立して働くように

するため、図 4 に示すようにチップごとにリードフレームが分離する構造にした。内部電源や GND 回路などを共有せず各チャンネルに配置し、片側のチャンネルが異常に発熱した場合や、破壊した場合でも、もう一方のチャンネルの動作が阻害されない冗長設計にした。端子配列もフェールセーフの観点から、電源端子 (VCC) と出力端子 (OUT) 間に NC (Non Connect) 端子を設けることで、隣接端子間の短絡による破壊のリスクを低減した。端子幅とピッチは、JEITA の EIAJ EDR-7314A に準拠したパッケージ設計にした。なお、端子めっきには、鉛フリーはんだ (Sn-Ag) を使用している。

4.2 高信頼性ワイヤの適用

F5114H は、ECU の小型化に伴うデバイス自身や使用環境の高温化に対して保証温度範囲を $T_j=-40\sim+175^\circ\text{C}$ としており⁽²⁾、従来よりも高温の環境で使用が可能である。今後、高温環境下で動作する時間が延びることが想定されることから、高温使用における信頼性を高めることができるワイヤ材を採用する必要がある。

高温環境において長時間放置した際の、ワイヤとアルミニウム電極パッドの接合界面の状態を図 5 に示す。従来のワイヤでは界面の状態に変化が見られるが、今回適用した高信頼性ワイヤでは界面の変化がほとんど見られない。今後のさらなる高温環境下での使用に備え、信頼性の向上を図った。

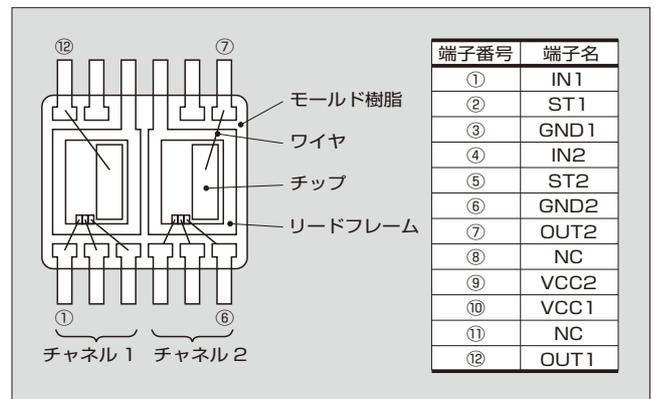


図4 「F5114H」の内部構造概略

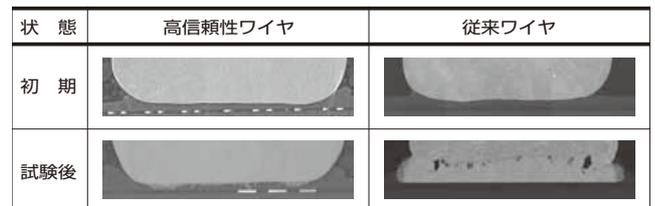


図5 高温放置試験後のワイヤ-電極間断面観察結果

〈注〉 JEITA の EIAJ EDR-7314 A : 一般社団法人 電子情報技術産業協会が定めるシュリンクスモールアウトラインパッケージ (SSOP) に関する集積回路パッケージデザインガイド

⑤ あとがき

本稿では、車載用ハイサイド 2 in 1 IPS 「F5114H」について述べた。従来の 1 チャンネル品と同じパッケージサイズで同等の通電能力を確保した 2 チャンネル分のチップの搭載を実現したことにより、実装面積の低減とトータルコストダウンに貢献できる。加えて、高信頼性ワイヤを採用したことにより、厳しさを増す高温環境下での使用を考慮している。今後、さらなる IPS の系列化を進め、電装システムの小型化、低価格化、高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Toyoda, Y. et al. “60 V-Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET”. ISPSD 2013, p.147-150.



森澤 由香

インテリジェントパワースイッチの設計開発に従事。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自動車電装技術部。



蔦坂 浩志

インテリジェントパワースイッチの設計開発に従事。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自動車電装技術部。



安田 貴弘

パワー半導体デバイス、特にディスクリート製品の組立技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部。



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

2nd-Generation SJ-MOSFET for Automotive Applications “Super J MOS S2A Series”

田平 景輔 TABIRA, Keisuke

新村 康 NIIMURA, Yasushi

皆澤 宏 MINAZAWA, Hiroshi

ハイブリッド自動車などの環境対応車における燃費の向上や電力変換機器の小型化要求を受け、パワー MOSFET には小型で低損失、低ノイズの製品が求められている。富士電機は、スーパージャンクション構造を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を実現した車載用「Super J MOS S1A シリーズ」を開発し、量産化してきた。今回、導通損失を低減し、かつスイッチング損失とターンオフスイッチング時の跳ね上がり電圧のトレードオフを改善した車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」を開発した。本製品の適用により、電力変換機器の高効率化や小型化に貢献できる。

There has been increasing demand for smaller power conversion equipment and better fuel efficiency in eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicles. Accordingly, power MOSFET products are being required to be compact, low loss and low noise. Fuji Electric has developed and launched the “Super J MOS S1A Series,” a product for automotive applications that adopt a superjunction structure characterized by their low on-state resistance and low switching loss. More recently, Fuji Electric has developed the 2nd-Generation SJ-MOSFET for automotive applications “Super J MOS S2A Series,” which reduces conduction loss while improving the trade-off between switching loss and jumping voltage during turn-off switching. The use of this product contributes to size reduction and enhanced efficiency of the power conversion equipment for automotive applications.

① まえがき

近年、自動車市場においては、厳しくなる環境規制やユーザの環境意識の高まりにより、ハイブリッド自動車 (HEV) やプラグインハイブリッド自動車 (P-HEV)、電気自動車 (EV) に代表される環境対応車に注目が集まっている。これらの車種に搭載されているバッテリーの電力を効率的に利用することが燃費の向上に直結するため、電力変換技術 (パワーエレクトロニクス) の重要性が増している。加えて自動車の車内空間を広くして搭乗者の快適性を向上するため、車載用の電力変換器には小型化の要求も強い。そのため、車載用 DC/DC コンバータや充電器などの電力変換機器には、小型で高効率、低ノイズが要求されている。これらの電力変換機器に使用されているパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) などの半導体スイッチング素子にも、小型で低損失、低ノイズであることが求められている。

このような要求に応えるため、富士電機では 2011 年に、スーパージャンクション構造を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を実現した第1世代「Super J MOS S1 シリーズ」^{(1)~(3)}を開発し、2014年に車載用のディスクリート製品「Super J MOS S1A シリーズ」(S1A シリーズ)を開発し、製品化した。

本稿では、S1A シリーズと比較して導通損失を低減し、かつターンオフスイッチング時におけるドレイン-ソース間電圧 V_{DS} の跳ね上がり (V_{DS} サージ) を抑制した車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」(S2A シリーズ) について述べる。

② 設計コンセプト

図1に、車載用充電器の PFC 回路においてパワー MOSFET に発生する損失の内訳を示す。パワー MOSFET の発生損失は、導通損失 P_{on} ならびにターンオン損失 P_{ton} とターンオフ損失 P_{toff} からなるスイッチング損失に大別できる。電力変換機器の電力変換効率を向上させるためには、導通損失とスイッチング損失の両方を低減させる必要がある。導通損失の低減にはオン抵抗の低減が有効であり、スイッチング損失の低減にはスイッチング速度を高くすることが有効である。ただし、スイッチング損失低減のためにターンオフ側のスイッチング速度を高くすると、ターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが大きくなるため、ゲート振動により誤オンするといった課題がある。

そこで、S2A シリーズは S1A シリーズよりも単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ を低減して導通損失を低減させることと、スイッチング損失を増やさずに V_{DS} サージを抑制してトレードオフを改善することを目標としている。

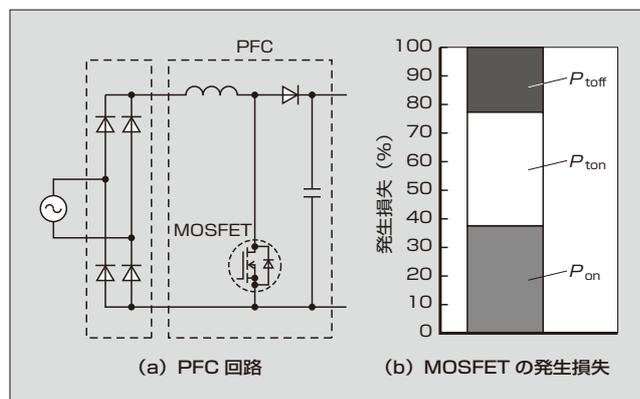


図1 充電器の PFC 回路部における MOSFET の発生損失

③ 特徴

3.1 導通損失の低減

導通損失の低減にはオン抵抗の低減が有効であるため、S2A シリーズは $R_{on} \cdot A$ の低減に取り組んでいる。

S1A シリーズと S2A シリーズに適用しているスーパージャンクション構造は、ドリフト層である n 形領域と p 形領域を交互に配置することで、ドリフト層全体で耐圧を確保する構造となっている。このため、従来のプレーナ型と耐圧が同じであってもドリフト層の n 形領域の不純物濃度を高くすることができ、 $R_{on} \cdot A$ を大幅に低減することができる (図 2)。

S2A シリーズでは S1A シリーズと比較して、不純物拡散プロセスにおける技術の向上により、n 形領域の不純物濃度を高く保つことでドリフト層の抵抗値を低減して $R_{on} \cdot A$ のさらなる低減を可能にした^(9),10)。図 3 に、600V 耐圧の S1A シリーズと S2A シリーズの $R_{on} \cdot A$ の比較を示す。S2A シリーズの $R_{on} \cdot A$ は $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、S1A シリーズの $20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ に対して 25% 低減している。

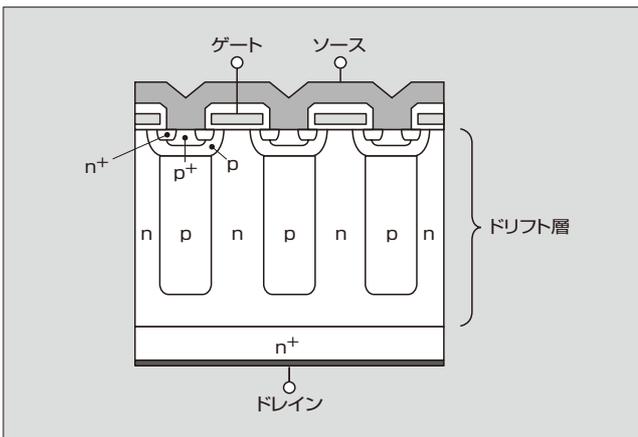


図 2 スーパージャンクション構造

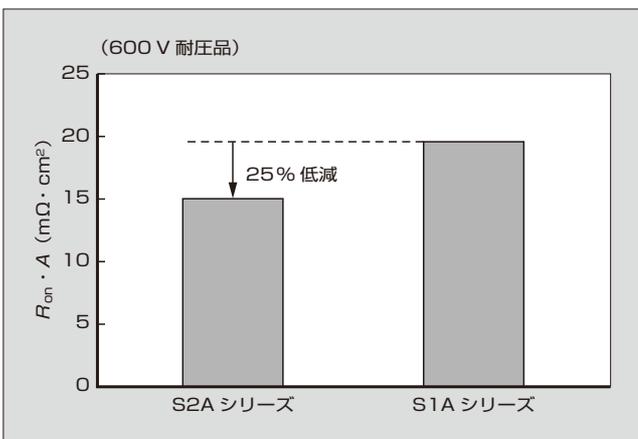


図 3 単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$

3.2 V_{DS} サージの抑制

②章で述べたように、スイッチング損失低減と V_{DS} サージ抑制にはトレードオフの関係があり、この関係を改善することが課題である。S2A シリーズでは、スイッチング損失を増やさずに V_{DS} サージを抑制し、トレードオフを改善している。

電源基板の回路パターン設計を行う場合、従来の電源基板のパターン設計の流用や、部品レイアウトなどの制約から理想的な回路パターンにできないことが多い。その場合、使用する MOSFET を置き換えるだけでは、回路上のインダクタンスが大きくなり、かつ駆動条件や回路定数が適切でない場合、 V_{DS} サージが大きくなるため、スイッチング時のゲート振動によって誤オンが発生することがある。

例として、チョップ回路を用いて、S1A シリーズと S2A シリーズを比較した。比較しやすいように、この回路は駆動条件や回路定数を、使用する MOSFET に合わせた最適化を行っていない。図 4 に、それぞれのターンオフスイッチング波形を示す。S1A シリーズでは、 V_{DS} サージが大きくなって誤オンが発生している [図 4 (a)]。

また、車載用の電力変換器はエンジンルームに搭載されるため高温で使用されるケースが多く、さらに、しきい値電圧 $V_{GS(th)}$ は負の温度特性を持っているため、ゲート振動の影響を受けやすく、誤オンしやすいことが想定される。誤オンの抑制には、 $V_{GS(th)}$ を上げることが考えられるが、一方で、 $V_{GS(th)}$ を上げるだけではターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが大きくなるため、ゲート振動による誤オンの発生が懸念される。

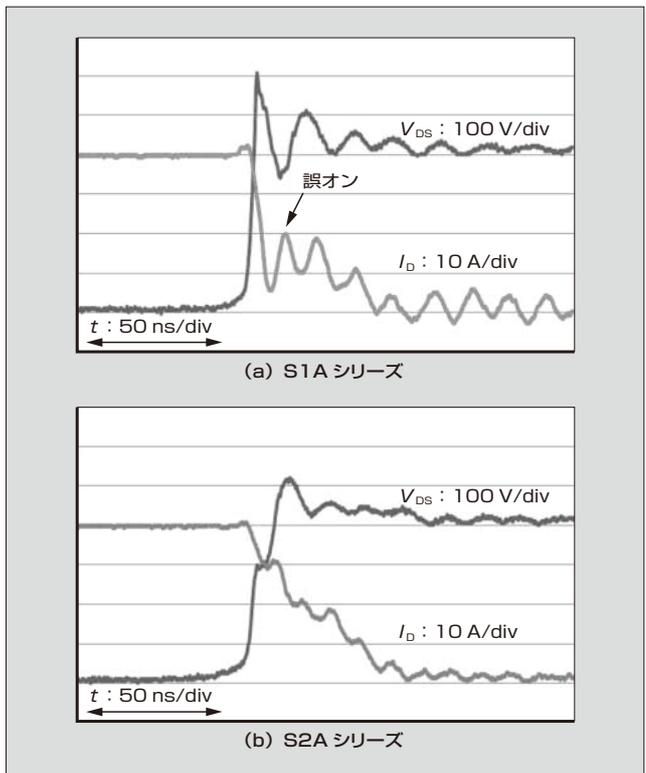


図 4 ターンオフスイッチング波形 (外付けゲート抵抗 $R_g: 2 \Omega$)

そこで S2A シリーズでは、 $V_{GS(th)}$ の最適化やゲート抵抗 R_g のチップへの内蔵化などの対策を行うことで、 $V_{GS(th)}$ を上げつつ、誤オンの発生を防ぐために V_{DS} サージを抑制している [図 4 (b)]。

図 5 に、チョッパ回路を使って評価した外付けゲート抵抗 R_g と V_{DS} サージの特性を示す。 R_g が小さい場合、S2A シリーズは S1A シリーズに対して V_{DS} サージの抑制効果が見られている。また、図 6 に示すように同一の V_{DS} サージにおいて、S2A シリーズは S1A シリーズよりもターンオフスイッチング損失 E_{toff} が小さく、 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフが改善している。

これまで示したように、 V_{DS} サージを抑制したことにより、今まで使用していた MOSFET から新しい MOSFET に置き換えたときに、顧客による回路パターンの変更や、部品定数の大幅な変更をする必要がなくなり、容易に高効率の電源が設計できるようになる。

また、素子耐圧の選択の可能性が広がり、今までよりも耐圧の低い素子、すなわちオン抵抗の低い素子が見えるという効果もある。そこで、S2A シリーズは S1A シリーズの 600 V 耐圧および 650 V 耐圧に加えて、500 V 耐圧と 400 V 耐圧も製品化し系列に加えている。

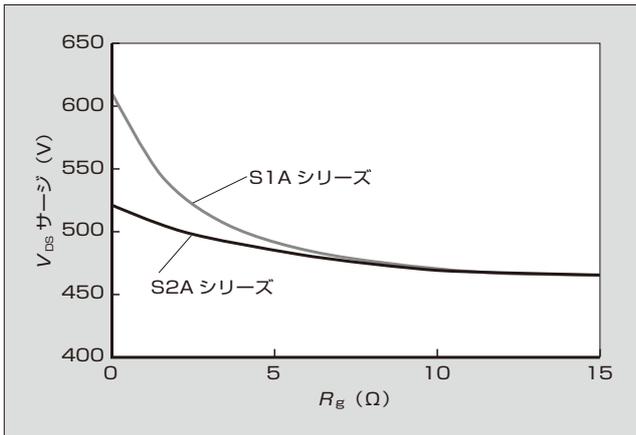


図 5 外付けゲート抵抗 R_g と V_{DS} サージの特性

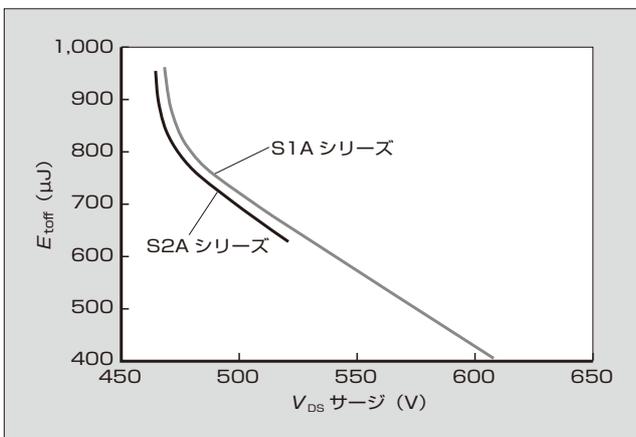


図 6 ターンオフスイッチング損失 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフ特性

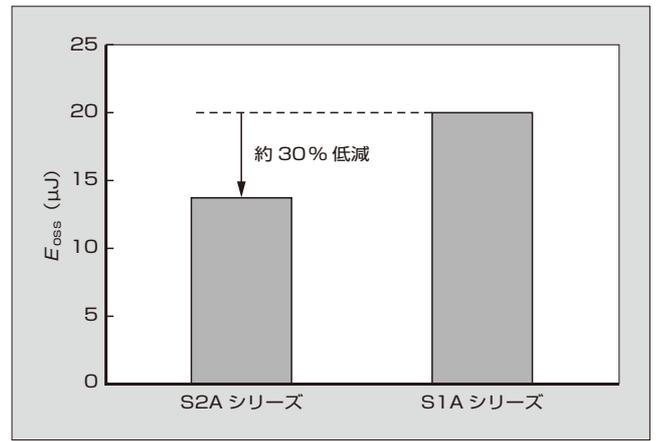


図 7 充放電時に発生する損失 E_{oss}

3.3 軽負荷時の損失低減

バッテリーの寿命を延ばすため、車載用 DC/DC コンバータは生涯動作の大部分が軽負荷で駆動される。そのため、軽負荷時の損失低減が燃費向上に大きく貢献する。DC/DC コンバータが軽負荷で動作しているときには MOSFET に流れる電流が小さいため、出力容量 C_{oss} の充放電時に発生する損失 E_{oss} の占める割合が大きい。そこで、S2A シリーズは、表面構造を最適化してトータルゲート電荷量 Q_G を低減し、S1A シリーズに対して E_{oss} を約 30% 低減した (図 7)。

S2A シリーズは、 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフの改善や E_{oss} の低減により、スイッチング損失を低減した。これにより、電力変換回路を従来よりも高周波で駆動できるのでトランスが小型になり、電力変換装置の小型化につながる。

3.4 車載品質

車載製品は温度変化に対する高い耐量が求められる。S1A シリーズと S2A シリーズは、チップの厚さの最適化、組立時のチップ下のはんだ付け条件の最適化、モールド樹脂とリードフレームの密着性の向上などに取り組み、同一パッケージで同一チップサイズの民生品と比較してヒートサイクル耐量を大幅に改善した (図 8)。

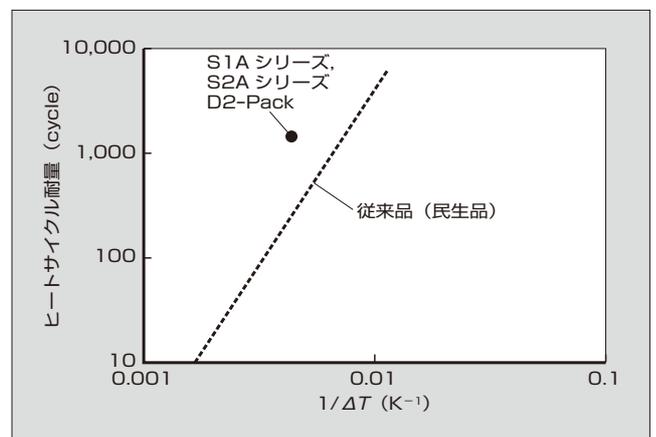


図 8 ヒートサイクル耐量

表1 「Super J MOS S2A シリーズ」の製品系列と主要特性

V_{DS}	$R_{DS(on)max.}$	I_D	FRED	TO-247	T-Pack (D2-Pack)
400 V	60 mΩ	42 A	○	—	FMC40N060S2FDA
500 V	71 mΩ	39 A	○	FMY50N071S2FDA	FMC50N071S2FDA
600 V	25.4 mΩ	95 A		FMY60N025S2A	—
	40 mΩ	66 A		FMY60N040S2A	—
	70 mΩ	39 A		FMY60N070S2A	—
	79 mΩ	37 A		FMY60N079S2A	FMC60N079S2A
	81 mΩ	36 A	○	FMY60N081S2FDA	FMC60N081S2FDA
	88 mΩ	33 A		FMY60N088S2A	FMC60N088S2A
	99 mΩ	29 A		FMY60N099S2A	FMC60N099S2A
	105 mΩ	28 A	○	FMY60N105S2FDA	FMC60N105S2FDA
	125 mΩ	23 A		FMY60N125S2A	FMC60N125S2A
	133 mΩ	22 A	○	FMY60N133S2FDA	FMC60N133S2FDA
160 mΩ	18 A		FMY60N160S2A	FMC60N160S2A	

4 製品系列と特性

表1にS2Aシリーズの製品系列と主要特性を示す。これまで述べてきたオン抵抗特性やスイッチング特性の改善に併せて、車載用ディスクリート製品の信頼性保証のスタンダードである AEC Q101 規格についても全製品系列について保証している。

TO-247 パッケージを使った S1A シリーズでは 600 V 耐圧でオン抵抗の最小値が 40 mΩ であったが、S2A シリーズでは 25.4 mΩ が可能である。また、小型 SMD (Surface Mount Device) の T-Pack (D2-Pack) でも S1A シリーズでは 600 V 耐圧で 145 mΩ であったが、S2A シリーズでは 79 mΩ が可能であり、パッケージサイズの面から電力変換機器の小型化に寄与できる。

TO-247 パッケージでオン抵抗が 25.4~160 mΩ、T-Pack でオン抵抗が 81~160 mΩ の製品を系列化する。また、S2A シリーズよりも内蔵ダイオードを高速化した FRED (Fast Recovery Diode) タイプである「Super J MOS S2FDA シリーズ」も併せて製品化した。

5 あとがき

車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」は、低損失と V_{DS} サージ抑制を両立した製品であり、電力変換機器の高効率化・小型化に大きく貢献できる。

今後は、市場ニーズのさらなる高度化に応えるために、耐圧系列の拡大や、スーパージャンクション構造のいっそ

うの微細化などにより、チップの小型化やオン抵抗の低減などを進め、高性能、高品質の車載用ディスクリート製品を開発していく所存である。

参考文献

- (1) 田村隆博ほか. 低損失SJ-MOSFET 「Super-JMOS」. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.340-343.
- (2) Tamura, T. et al. "Reduction of Turn-off Loss in 600 V-class Superjunction MOSFET by Surface Design", PCIM Asia 2011, p.102-107.
- (3) Watanabe, S. et al. "A Low Switching Loss Superjunction MOSFET (Super J-MOS) by Optimizing Surface Design", PCIM Asia 2012, p.160-165.
- (4) Fujihira, T. "Theory of Semiconductor Superjunction Devices", Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.
- (5) Deboy, G. et al. "A New Generation of High Voltage MOSFETs Breaks the Limit Line of Silicon", Proc. IEDM, 1998, p.683-685.
- (6) Onishi, Y. et al. "24 m · cm² 680 V Silicon Superjunction MOSFET", Proc. ISPSD'02, 2002, p.241-244.
- (7) Saito, W. et al. "A 15.5 m · cm²-680 V Superjunction MOSFET Reduced On-Resistance by Lateral Pitch Narrowing", Proc. ISPSD'06, 2006, p.293-296.
- (8) 大西泰彦ほか. Superjunction MOSFET. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.389-392.
- (9) 渡邊壮太ほか. 第2世代「Super J MOS S2シリーズ」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.292-295.
- (10) Sakata, T. et al. "A Low-Switching Noise and High-Efficiency Superjunction MOSFET, Super J MOS[®] S2", PCIM Asia 2015, p.419-426.



田平 景輔

ディスクリートパワー MOSFET 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事業統括部ディスクリート・IC 技術部。



新村 康

パワー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。



皆澤 宏

分析評価技術の開発、磁気記録媒体の開発、SJ-MOSFET のチッププロセス開発に従事。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プロセス開発部主査。日本物理学会会員。

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

Critical Mode PFC Control IC “FA1A60N” and LLC Current Resonant Control IC “FA6B20N” for High-Efficiency Power Supplies

園部 孝二 SONOBE, Koji

矢口 幸宏 YAGUCHI, Yukihiro

北條 公太 HOJO, Kota

電子機器に用いられる比較的大きな容量のスイッチング電源には、高調波電流を抑える力率改善（PFC）回路が必要であり、また、低ノイズ化に有効な LLC 共振電流回路が広く使用されている。富士電機は、これまでの技術を継承しつつ新たな機能を追加した、臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」を開発した。これらの IC を組み合わせて適用することで、電源システムにおける、軽負荷時の効率向上、低待機電力、および電源部品の削減によるシステムのコストダウンが可能になる。さらには、従来製品ではできなかった電源アダプタへの適用が可能である。

For the relatively large capacity switching power supplies for electronic equipment, a power factor correction (PFC) circuit is required to suppress harmonic current, and a LLC current resonant circuit is also widely used due to the effectiveness in low noise applications. Fuji Electric has developed the critical mode PFC control IC “FA1A60N” and LLC current resonant control IC “FA6B20N” adding new functionality while using our conventional technology. Using these ICs in combination allows power supply systems to improve the efficiency during light loads, achieve low standby power, and reduce the system cost by reducing the number of power supply components. Furthermore, as an enhancement over previous products, these ICs can be used in power supply adapters.

1 まえがき

近年、スイッチング電源には効率向上とシステムのコストダウンが求められている。出力電力 75 W 以上の電源システムでは、国際規格 IEC 61000-3-2 により、機器の動作障害や力率低下による無効電力の増加などの問題を引き起こす高調波電流を抑制するための力率改善（PFC：Power Factor Correction）回路が必要である。また、電力変換部には、低ノイズ化に有効なソフトスイッチング制御を行う LLC 電流共振回路が広く使用されている。

富士電機はこれまでに、PFC 回路向けに電源のコストダウンと軽負荷時の効率を改善する臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A00N シリーズ」を製品化した。また、LLC 電流共振回路向けには、AC85~264 V の幅広い入力電圧に対応し、小型の電源システムが構成できる LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」を、低待機電力化と保護機能を充実させた LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N」を製品化した。

今回、これまでの技術を継承しつつ、電源システムのさらなる軽負荷時の効率改善、低待機電力、電源部品削減を実現する臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」を開発した（図 1）。

これらの IC を使用した電源の特徴は次のとおりである。

- (a) 電源の部品点数の大幅な削減
- (b) 軽負荷時の効率向上（出力電力 $P_o=5$ W 時の効率 75%）
- (c) スタンバイ状態の消費電力の低減
- (d) 低入力電圧時の重負荷起動
- (e) ノーマル状態とスタンバイ状態の自動切替え

なお、(d)、(e)を実現したことにより、電源アダプタへの適用も可能である。

本稿では、FA1A60N と FA6B20N の特徴と電源への適

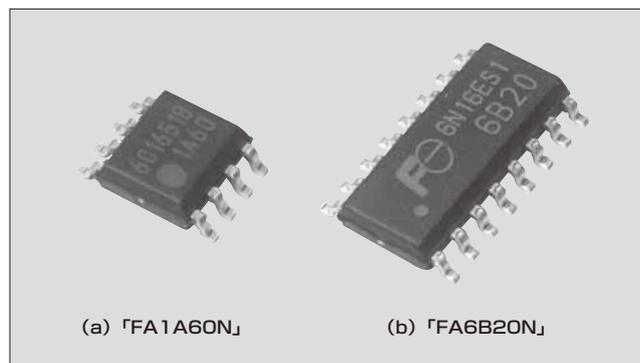


図 1 外観

用効果について述べる。

2 臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」の特徴

2.1 概要

図 2 に FA1A60N のブロック図を、表 1 に FA1A60N と従来製品の機能比較を示す。一般的に、臨界モード PFC 制御 IC は、MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）のドレイン電圧の最低電圧（ボトム）でターンオンする。従来製品は、軽負荷時にターンオン信号をスキップさせ、スイッチング周波数の上昇を抑えるボトムスキップ機能を内蔵している。これに対して FA1A60N は、軽負荷時の効率をさらに向上させるために、2.2 節で述べるように意図的にスイッチング停止期間を設けるバースト動作による消費電流の削減機能を内蔵している。

電子機器の状態は、主要な機能を動作させるノーマル状態と停止させるスタンバイ状態に分けられる。ノーマル状態ではスイッチング停止期間を設けず連続スイッチ

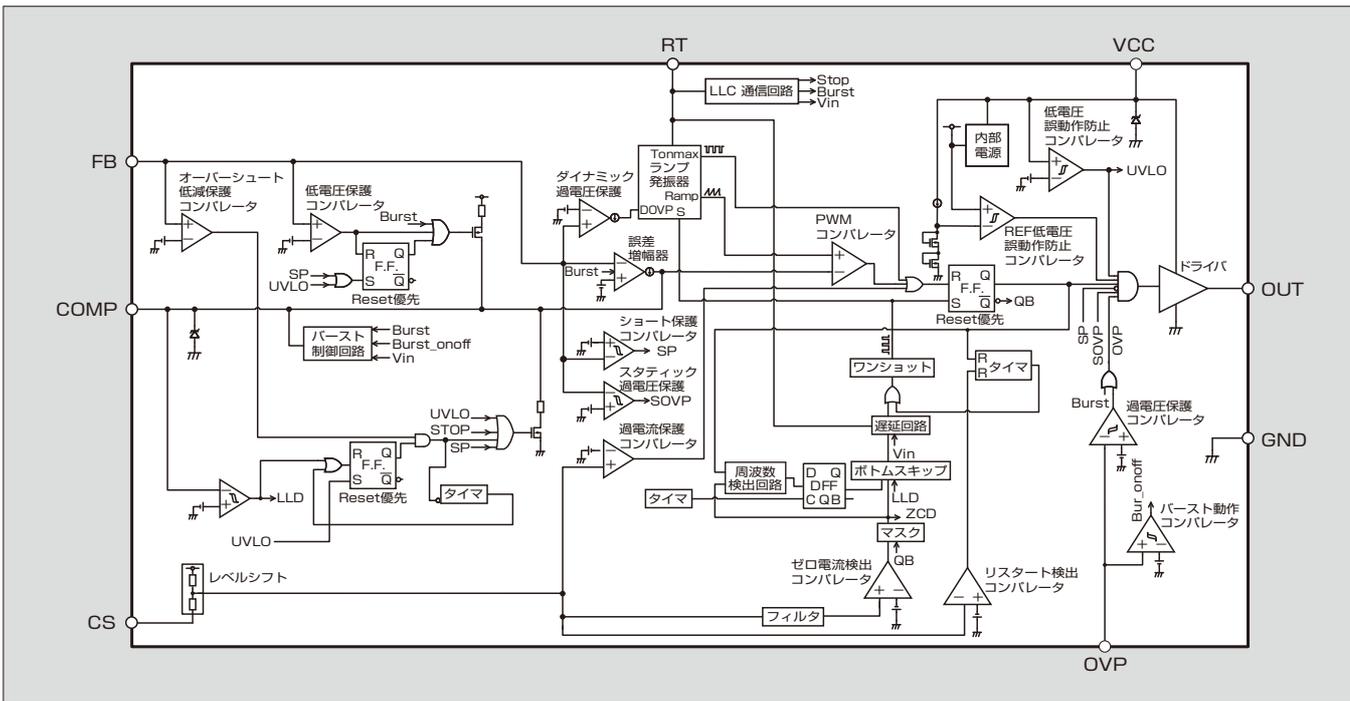


図2 「FA1A60N」のブロック図

表1 「FA1A60N」と従来製品の機能比較

項目	FA1A60N	従来製品
軽負荷時ボトムスキップ機能	あり	あり
スタンバイ状態のバースト動作	あり	なし
スタンバイ状態の消費電流	250 μA	500 μA
LLC との連携機能	あり	なし

ング動作を行い、スタンバイ状態ではバースト動作を行う。FA1A60N では、ノーマル状態からスタンバイ状態に切り替わる信号は、LLC 電流共振制御 IC FA6B20N から FA1A60N の RT 端子に送られる。FA6B20N から送られる信号は、スタンバイ信号のほかに、入力電圧情報、PFC 停止信号があり、FA1A60N は高効率制御が可能となる。FA1A60N のパッケージは JEDEC 準拠の 8 ピン SOP (Small Outline Package) を採用した。

2.2 高効率バースト制御

スタンバイ状態での低待機電力を実現するためには、PFC 回路のスイッチングを停止することが有効である。しかし、この場合には、次のような問題がある。

- (a) PFC 制御 IC への電源供給を遮断するスイッチ回路が必要になる。
- (b) PFC 回路の出力電圧が低下するため重負荷への過渡応答で出力電圧が低下する。
- (c) LLC 電流共振回路が広範囲の入力電圧に対応する必要があるため、トランス設計の自由度が低い。

これらを解決するために、FA1A60N は、スタンバイ状態時にバースト動作を導入した (図 3)。FA1A60N のバースト動作は、PFC 出力電圧 V_{bulk} が上限値以上になるとス

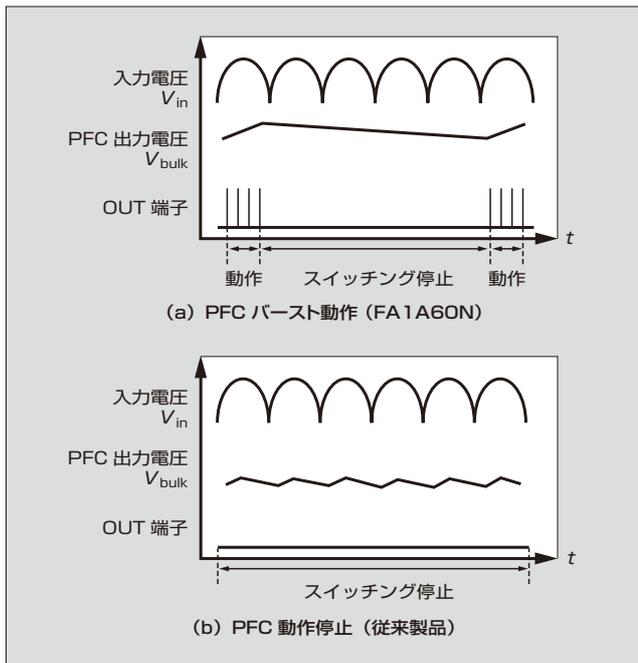


図3 PFC のスタンバイ時の動作

スイッチングを停止し、下限値以下になるとスイッチングを再開する。このように、PFC の出力電圧を維持しながらスイッチング損失を小さくすることで、スタンバイ状態での高効率と低待機電力を実現した。

3 LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」の特徴

3.1 概要

図 4 に FA6B20N のブロック図を、表 2 に FA6B20N と従来製品の機能比較を示す。

FA6B20N は、LLC 電流共振回路を制御する制御回路、

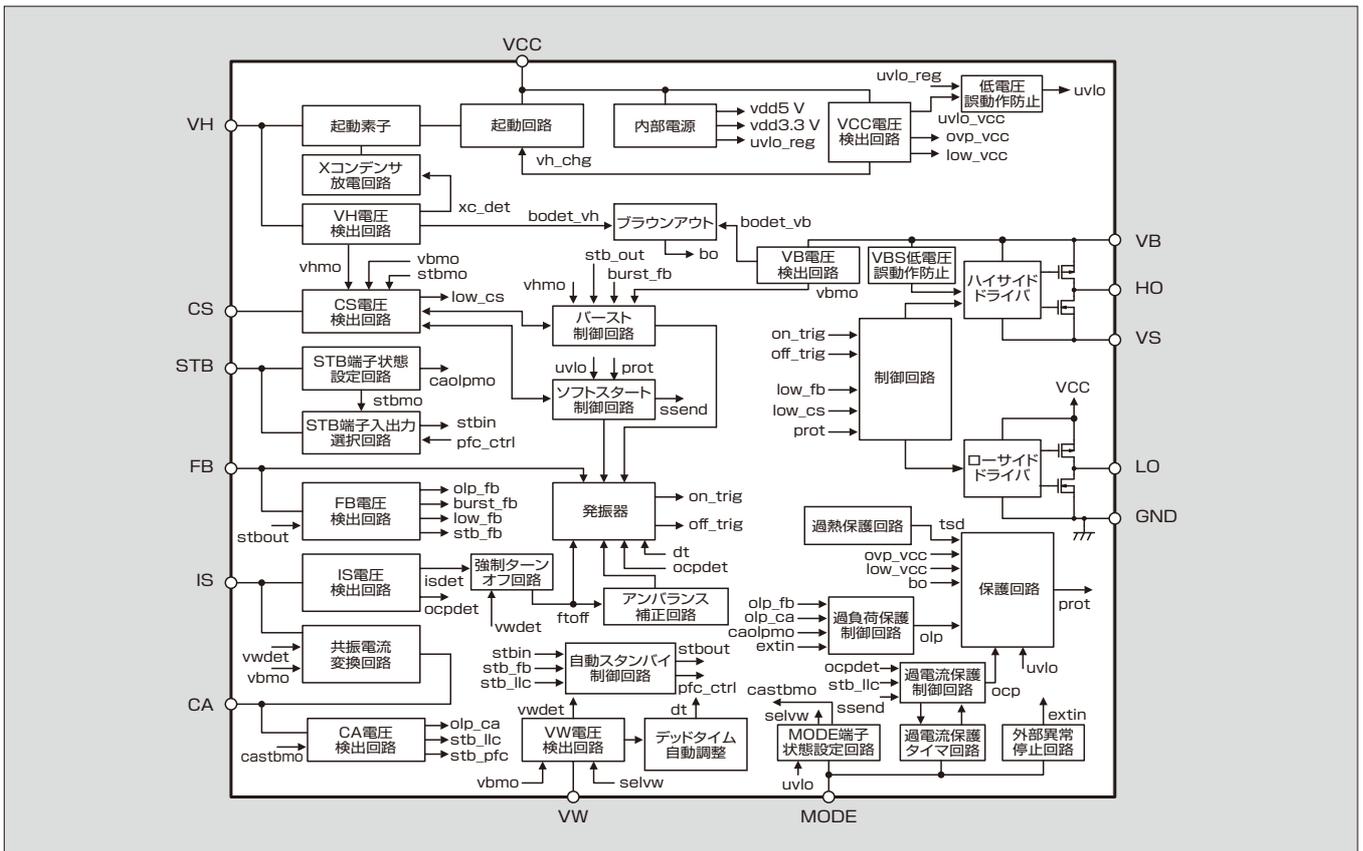


図4 「FA6B20N」のブロック図

表2 「FA6B20N」と従来製品の機能比較

項目	FA6B20N	従来製品
自動スタンバイ機能	あり	なし
スタンバイ状態の PFC 動作	動作	停止
軽負荷時の効率 (P _o =5 W)	75%	60%
待機電力 (V _{in} =230 V, P _o =125 mW)	260 mW	270 mW
PFC との連係機能	あり	なし

ハーフブリッジ回路のハイサイドとローサイドのスイッチ素子を直接駆動可能な 630 V 耐圧ドライバ回路、および低消費電力で IC 起動を実現する 600 V 耐圧起動素子で構成している。

また、3.2 節で詳述する自動スタンバイ機能の内蔵により、外部からのスタンバイ信号が不要になるため、従来製品では適用できなかった電源アダプタにも適用が可能である。さらに、スタンバイ状態でも PFC 回路を動作させながら、高効率と低待機電力を実現している。これに加えて、LLC 電流共振回路より先に PFC 回路を動作させる連係動作により、低入力電圧での重負荷起動が可能になった。パッケージは JEDEC 準拠の 16 ピン SOP を採用した。

3.2 自動スタンバイ機能

従来製品は、スタンバイ状態での待機電力を低減するためにバースト動作を行っていた。その際に、電源の二次側

からスタンバイ信号を受ける必要があるため、部品点数が増加してしまう、という問題があった。

FA6B20N は、一次側の LLC 電流共振回路の共振電流を IS 端子で検出し、CA 端子の電圧をコンデンサで平滑化することで、二次側の負荷情報を検出する機能を内蔵した。図 5 に、FA6B20N の負荷 P_o と CA 端子電圧の関係を示す。FA6B20N は、IC の動作の連続スイッチングを行うノーマル状態と、意図的にスイッチング停止期間を設けてバースト動作を行うスタンバイ状態があり、これらが自動で切り替わる自動スタンバイ機能を持つ。この機能により、ノーマル状態で CA 端子電圧が 0.3 V より低くなるとスタンバイ状態に切り替わり、スタンバイ状態で CA 端子

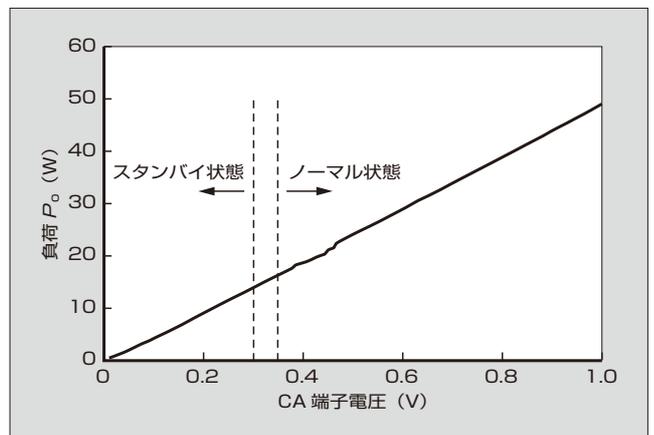


図5 「FA6B20N」の負荷 P_o と CA 端子電圧の関係

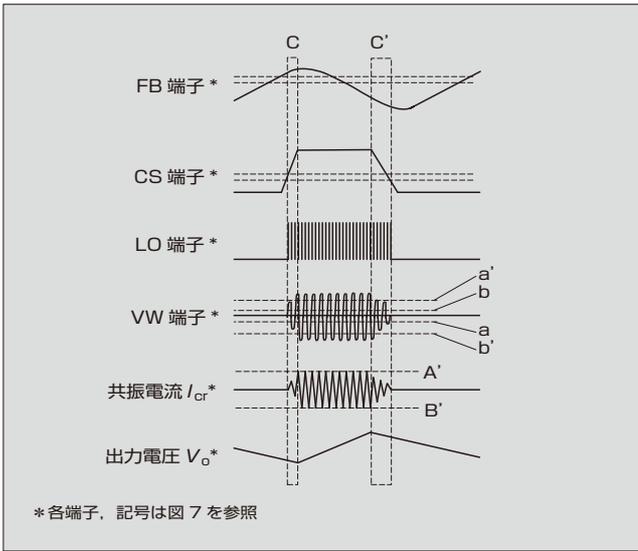


図6 「FA6B20N」バースト制御のシーケンス図

電圧が 0.35 V 以上になるとノーマル状態に切り替わる。

FA6B20N は、ユーザが MODE 端子に接続する抵抗を 3 段階の中から選択することで、スタンバイ状態とノーマル状態が切り替わる電圧を設定できる。切り替わる電圧にヒステリシスを設けることにより、スタンバイ状態とノーマル状態の混在による不安定な状態が発生しないようにしている。

3.3 高効率バースト制御

富士電機の LLC 電流共振制御 IC は、スタンバイ状態では、バースト制御によりスイッチング回数の削減を行うことでスイッチング損失を低減し、効率を向上している。バースト制御では、出力電圧が低下して FB 端子電

圧が高くなると、CS 端子コンデンサを充電するソフトスタートでスイッチングを開始し、出力電圧が上昇する。出力電圧が上昇して FB 端子電圧が低くなると、CS 端子コンデンサを放電するソフトエンドでスイッチング停止する。図 6 に、FA6B20N のバースト制御のシーケンス図を示す。VW 端子の強制ターンオフ電圧レベルをノーマル状態 (a-b) からスタンバイ状態 (a'-b') に切り替え、共振電流のピーク (A'-B') を抑えることで、出力電圧リップルや音鳴り、共振電流による損失を抑制している。さらに、ソフトスタート (C) とソフトエンド (C') の区間を短縮することで、無効スイッチング領域を削減して効率向上を図っている。

3.4 静電破壊耐量の向上

従来、LLC 電流共振制御 IC の VH 端子における、静電破壊耐量の HBM (Human Body Model) は +1kV であった。FA6B20N では、VCC 端子に電流を供給するために VH 端子に内蔵している起動素子を改良することで、+2kV を達成した。

4 電源への適用効果

4.1 回路部品点数の削減

FA1A60N と FA6B20N を搭載したアプリケーション回路例を図 7 に示す。PFC 制御 IC と LLC 電流共振制御 IC の関係は、FA1A60N の RT 端子と FA6B20N の STB 端子との間で行う (図 7 の A 部)。表 3 に、同等の機能を持つ電源において、従来製品を搭載したのものに対する電源部品の削減効果を示す。FA1A60N と FA6B20N を搭載した電源では、外部からスタンバイ信号を伝達する回路および

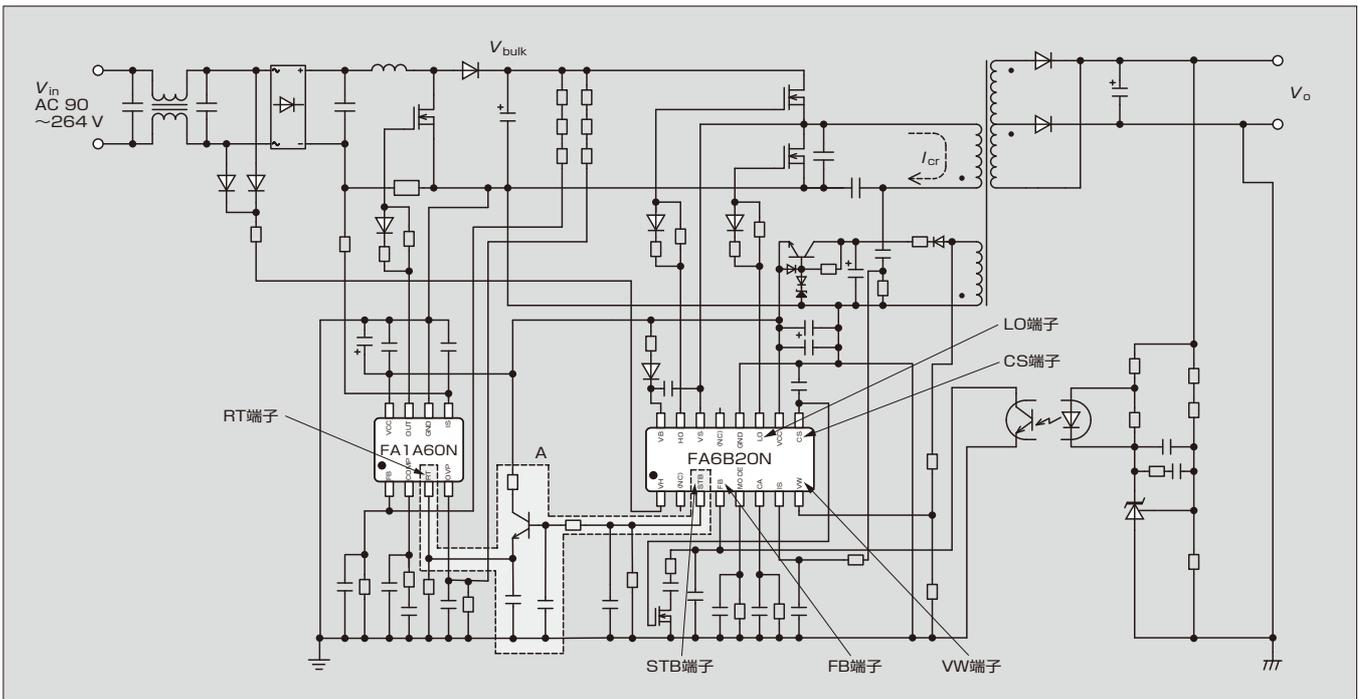


図7 「FA1A60N」 と 「FA6B20N」 のアプリケーション回路例

表 3 電源部品の削減例

機能	部品	点数
外部スタンバイ信号	フォトカプラ	- 1
	MOSFET	- 2
	抵抗	- 3
PFC の VCC 端子への電源供給用スイッチ	トランジスタ	- 1
	ダイオード	- 2
	ツェナーダイオード	- 1
	抵抗	- 2
PFC と LLC の関係	トランジスタ	1
	抵抗	2
	コンデンサ	2
合計		- 7

PFC 制御 IC の VCC 端子への電源供給用スイッチ回路が不要となり、RT 端子と STB 端子の関係用の回路が追加になる。この結果、電源全体の部品点数は従来製品の 102 個から 95 個になり、7 個の部品を削減できる。特に、故障しやすい部品であるフォトカプラの削減が可能となった。

4.2 軽負荷時の効率向上

図 8 に、入力電圧 AC240 V の軽負荷時の効率を示す。FA1A60N と FA6B20N を搭載した電源は、スタンバイ状態時に PFC 制御 IC を停止させる従来製品を搭載した電源と比べて、15 W 以下での効率が高く、負荷 P_o が 5 W のときの効率は 75% を達成した。

図 9 に、負荷 P_o が 125 mW のときの待機電力を示す。FA1A60N と FA6B20N を搭載した電源は、従来製品を搭載した電源に比べて、AC 入力電圧に対して待機電力の依存性が小さく、AC230 V 入力時の待機電力は 260 mW 以下を実現した。

4.3 重負荷起動対応の起動シーケンス

図 10 に、FA1A60N と FA6B20N を搭載した電源における低入力電圧時の重負荷起動波形を示す。評価条件は、入力電圧が AC90 V、出力電圧 V_o が 13 V、出力電流 I_o が 4.2 A である。FA1A60N と FA6B20N を搭載した電源は、

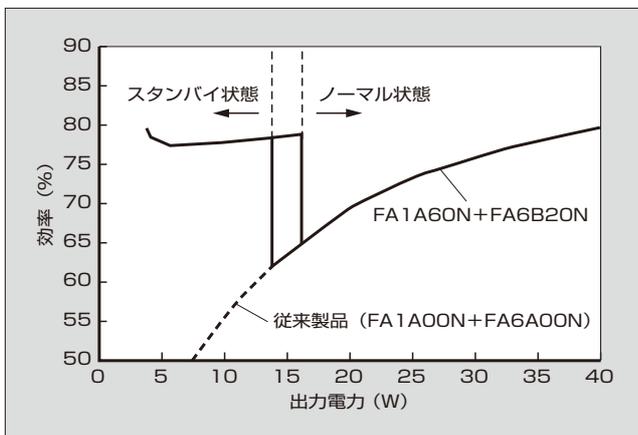


図 8 軽負荷効率 (入力電圧 AC240 V)

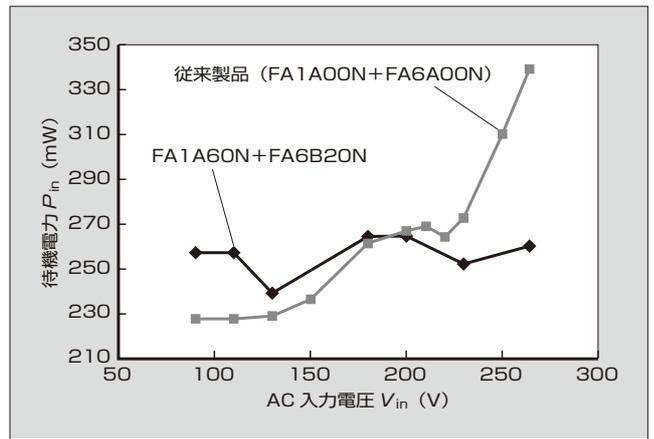


図 9 待機電力

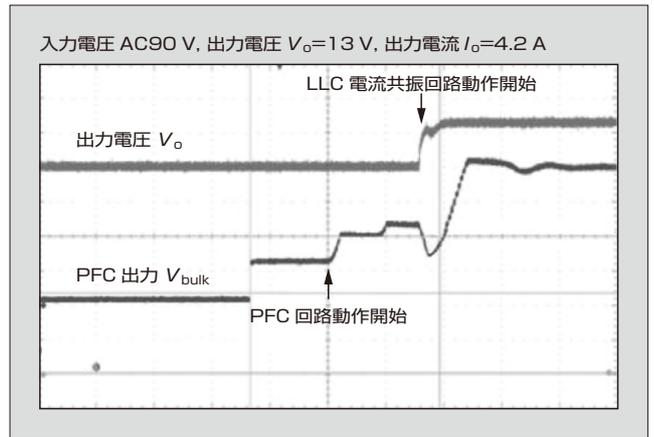


図 10 低入力電圧時の重負荷起動波形

電源投入後に PFC 回路が先に動作を開始する。PFC 回路の出力電圧 V_{bulk} が上昇した後、LLC 電流共振回路が動作を開始し出力電圧 V_o が上昇する。LLC 電流共振回路が動作を開始するとき、 V_{bulk} が上昇しているため、過負荷保護で停止することなく V_o が上昇し、低入力電圧時の重負荷起動が可能となる。このような起動シーケンスにより、電源アダプタに適用が可能である。

5 あとがき

高効率電源用の臨界モード PFC 制御 IC 「FA1A60N」と LLC 電流共振制御 IC 「FA6B20N」の特徴と電源への適用効果について述べた。これらの IC を搭載して電源を構成することで、電源の部品点数の削減、スタンバイ状態での高効率と低待機電力、電源アダプタへの適用が可能である。

富士電機では、今後もさらなる高効率化、低待機電力化、部品削減が可能な新技術の確立を図り、年々厳しくなる規格・市場要求に応える開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 山田谷政幸ほか. LLC電流共振制御IC「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.

- (2) 陳建ほか. 第2世代LLC電流共振制御IC「FA6A00シリーズ」.
富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.267-272.
- (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.
- (4) 川村一裕ほか. LLC電流共振電源の回路技術. 富士電機技報.
2014, vol.87, no.4, p.268-272.



矢口 幸宏

電源 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事業統括部ディスクリート・IC 技術部。



園部 孝二

電源 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事業統括部ディスクリート・IC 技術部。



北條 公太

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。



高速ダイオードを内蔵した第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」

2nd-Generation Low Loss SJ-MOSFET with Built-In Fast Diode “Super J MOS S2FD Series”

渡邊 荘太 WATANABE, Sota

坂田 敏明 SAKATA, Toshiaki

山下 千穂 YAMASHITA, Chiho

エネルギーを効率的に利用するために、電力変換機器にはよりいっそうの高効率化が求められており、搭載されるパワー MOSFET には、小型で低損失と低ノイズの製品が求められている。富士電機は、これまでにオン抵抗を低減し、かつターンオフスイッチング損失と跳ね上がり電圧のトレードオフを改善した製品を開発し、量産化してきた。今回、内蔵ダイオードを高速化して逆回復耐量を向上させ、低損失で使いやすい第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」を開発した。本製品を使用することで、電力変換機器の効率向上や小型化が期待できる。

In order to make efficient use of energy, there has been increasing demand for enhanced efficiency in power conversion equipment, and as such, the power MOSFET mounted on this equipment are required to be compact, low loss and low noise. Fuji Electric has been developing and manufacturing products that have reduced on-state resistance and improved trade-off between turn-off switching loss and surge voltage. We have recently developed the 2nd-generation low loss SJ-MOSFET “Super J MOS S2FD Series,” which features user-friendliness and low loss, by improving its reverse recovery withstand capability through a built-in fast diode. The use of this product is expected to improve the efficiency of power conversion equipment and facilitate product miniaturization.

① まえがき

近年、地球温暖化防止や経済産業省が定めた長期エネルギー需給見通しなどを背景にして、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。一方で、社会インフラ、自動車、産業機械、IT 機器、家電製品などの分野でエネルギー消費量が增大しており、エネルギーをいっそう効率的に利用するために電力変換技術の重要性が増している。電力変換機器には、高効率、高電力密度、低ノイズといった要求があり、その電力変換部で使用されているパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) などの半導体スイッチング素子には小型で低損失と低ノイズ性が求められている。

富士電機はこのような要求に応えるため、2011 年からスーパージャンクション構造^{(1)~(5)}を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を両立した定格電圧 600 V の第1世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S1 シリーズ」(S1 シリーズ) と、S1 シリーズの内蔵ダイオードを高速化した「Super J MOS S1FD シリーズ」(S1FD シリーズ) の系列化を進めてきた^{(6)~(8)}。

さらに、S1 シリーズに対して素子の耐圧 BV_{DSS} と単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ とのトレードオフ関係を改善し、かつターンオフスイッチング時におけるドレインソース間電圧の跳ね上がり (V_{DS} サージ) を抑制した「Super J MOS S2 シリーズ」(S2 シリーズ) を開発した⁽⁹⁾。

本稿では、S2 シリーズの内蔵ダイオードを高速化した系列である第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2FD シリーズ」(S2FD シリーズ) について述べる。

② 設計コンセプト

スイッチング電源の電力変換効率を向上させるために、S2FD シリーズでは S2 シリーズの技術を適用し、S1FD シリーズに対して導通損失の低減と、ターンオフスイッチング損失 E_{off} の低減、さらには軽負荷時の回路損失低減のために、ゲート駆動損失および出力容量の充放電時に発生する損失 E_{oss} の低減を図っている。

また、通信・産業分野の比較的大きい容量の電源で広く使用されている電流共振などのフルブリッジ LLC 回路では、共振はずれ時に上・下アームの短絡が発生し、MOSFET の内蔵ダイオードが逆回復動作に入る。このとき MOSFET の内蔵ダイオードは高い電流変化率 $-di_{DR}/dt$ で逆回復動作に入るため、過大な逆回復ピーク電流が発生する。そして、その回復時にドレインソース間の電圧変化率 dv/dt が急峻(きゅうしゅん)に立ち上がり、MOSFET の寄生バイポーラトランジスタが動作し破壊に至ることがある。そのため、フルブリッジ回路では MOSFET が破壊しないように、逆回復耐量 ($-di_{DR}/dt$ 耐量) の強い製品が使用されている。S2FD シリーズは、現在これらの電源に採用されている S1FD シリーズよりも逆回復耐量の向上を図っている。

③ 特徴

3.1 導通損失の低減

高耐圧パワー MOSFET において導通損失を低減するためには、導通損失において支配的であるチップのオン抵抗 $R_{DS(on)}$ を低減することが必須である。パッケージに搭載できるチップサイズに制約があるため、チップサイズを大きくすることなくオン抵抗を低減する必要がある。S2FD

表1 搭載可能な最小オン抵抗

項目		TO-247 パッケージ	TO-220 パッケージ	TO-220F パッケージ
搭載可能な 最小 $R_{DS(on)}$	S1FD シリーズ	42 mΩ	132 mΩ	93 mΩ
	S2FD シリーズ (低減率)	27 mΩ (36%減)	84 mΩ (36%減)	75 mΩ (19%減)

シリーズでは、S2シリーズのスーパージャンクション構造の中にあるドリフト層の不純物拡散プロセスを改善し、n形領域の不純物濃度を高く保ち抵抗値を低減することで、 $R_{on} \cdot A$ をS1FDシリーズに比べて約25%低減させた。

表1に、定格電圧600VのS2FDシリーズとS1FDシリーズの各パッケージの最小 $R_{DS(on)}$ を示す。 $R_{on} \cdot A$ の低減により、パッケージTO-247では42mΩから27mΩに、TO-220Fでは93mΩから75mΩに、TO-220では132mΩから84mΩに低減したチップを搭載することが可能であり、電源の高効率化が期待できる。

3.2 スイッチング損失の低減と V_{DS} サージの抑制

電源基板の回路パターン設計を行う場合、従来の電源基板のパターン設計の流用や、部品レイアウトなどの制約から理想的な回路パターンにできないことが多い。その場合、使用するMOSFETを置き換えるだけでは、回路上の配線などの寄生インダクタンスなどにより、スイッチング時にゲート振動により誤オンしたり、 V_{DS} サージが大きくなったりする問題が発生することがある。

そこで、回路パターンの設計自由度を向上させるために、S2FDシリーズではS2シリーズと同様に、しきい値電圧の最適化によりスイッチング時のゲート振動による誤オンの対策を行い、内部ゲート抵抗の最適化により V_{DS} サージの対策を行っている。

この対策により、今まで使用していたMOSFETから新しいMOSFETに置き換えたときに、顧客が回路パターンを変更したり、部品定数を大きく変更したりする必要がなくなり、高効率の電源を容易に設計できるようになった。

チョッパ回路を使って、S1FDシリーズとS2FDシリーズにおける E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性の評価を行った。図1に、 E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性を示す。同一 V_{DS} サージ480Vにおいて、S2FDシリーズはS1FDシリーズよりも E_{off} が約18μJ低減し、 E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフを改善している。

3.3 軽負荷時の損失低減

電源が軽負荷のときには、MOSFETのドレインソース間に流れる電流が小さくなるため、電源全体の損失に占めるMOSFETの導通損失の割合が小さくなる。その結果、回路上のゲート駆動損失と E_{oss} の占める割合が増える。そこで、軽負荷時の電源の変換効率を改善するために、

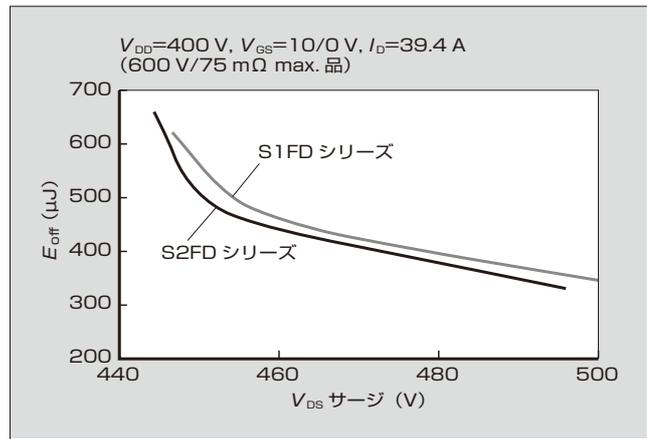


図1 ターンオフスイッチング損失 E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性

MOSFETの表面構造を最適化することでトータルゲートチャージ Q_G を低減し、ゲート駆動損失の低減を図っている。また、スーパージャンクション構造で形成されるドリフト層の不純物拡散プロセスを改善し、 E_{oss} も低減した。

図2に、 Q_G 特性を示す。S2FDシリーズは、S1FDシリーズに対してゲート電圧 V_{GS} が10Vのときに Q_G を約17%低減した。図3は E_{oss} のドレインソース間電圧 V_{DS} 依存性を示しており、S2FDシリーズは、S1FDシリーズ

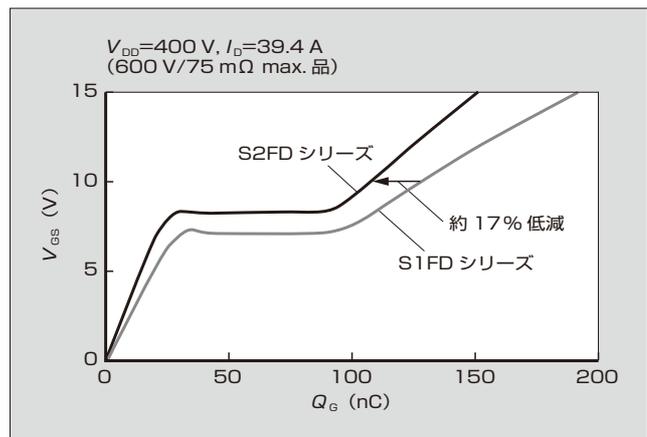


図2 トータルゲートチャージ Q_G 特性

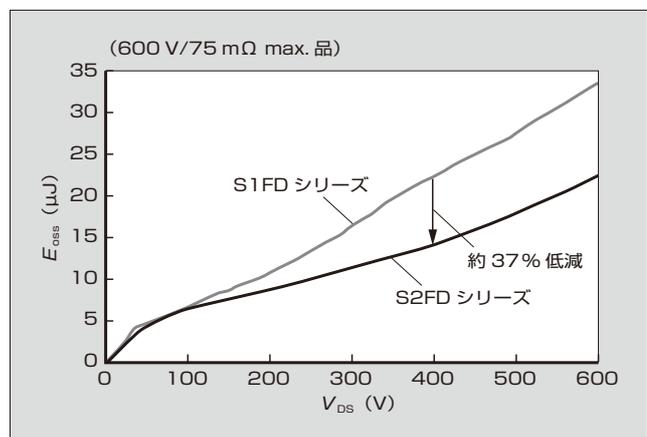


図3 充電時に発生する損失 E_{oss} 特性

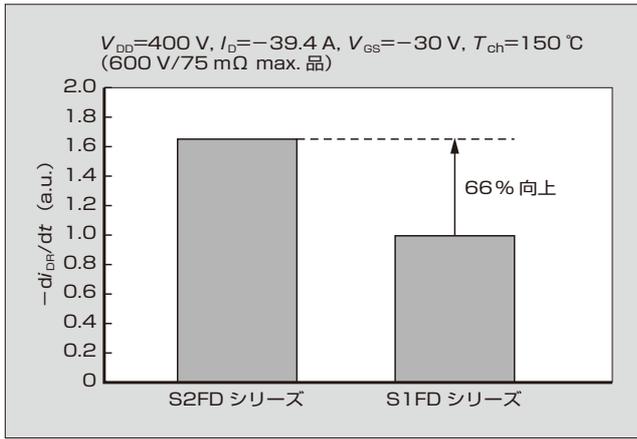


図4 逆回復耐量特性

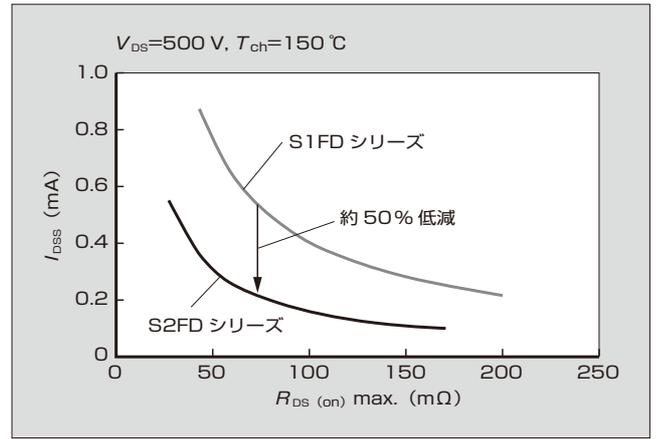


図6 ドレイン-ソース間漏れ電流 I_{DSS} 特性

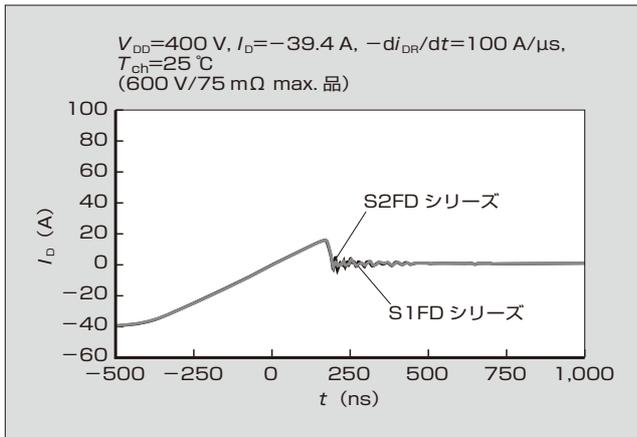


図5 逆回復特性

に対して V_{DS} が 400 V のときに E_{oss} を約 37% 低減した。

3.4 逆回復耐量の向上とオフ時の損失低減

内蔵ダイオードの逆回復耐量を向上させるために、ライフタイムキラーにより内蔵ダイオードの逆回復動作を高速化し、逆回復時間と逆回復ピーク電流を低減した。一方で、ライフタイムキラー濃度とオフ時の損失となるドレイン-ソース間漏れ電流 I_{DSS} はトレードオフの関係にあるため、ライフタイムキラー濃度を最適化し、S1FD シリーズと同

等の逆回復特性を維持しつつ、 I_{DSS} 特性を改善し、さらに逆回復耐量を向上させた。

図4に、逆回復耐量特性の比較を示す。S2FD シリーズは、S1FD シリーズに対して逆回復耐量を66%向上した。

図5に、逆回復特性の比較を示す。S2FD シリーズは、S1FD シリーズに対して同等の逆回復特性を維持している。

図6に、 $R_{DS(on) \text{ max.}}$ と I_{DSS} 特性の関係を示す。 $R_{DS(on) \text{ max.}}$ が 75 mΩ において、S2FD シリーズは、S1FD シリーズに対して I_{DSS} を約 50% 低減した。

4 適用効果

電源の変換効率の向上を確認するために、図7に示す電源のフルブリッジ-LLC回路に、S2FD シリーズとS1FD シリーズの600 V/75 mΩ max. 品を搭載して電源の変換効率の比較評価を行った。図8に評価結果を示す。このときの入出力条件は、入力電圧が115 V、出力電圧が53.5 V、外付けゲート抵抗 R_g が5.1 Ωである。S2FD シリーズの場合は、これまでに述べた特性の改善や損失の低減により、全負荷領域においてS1FD シリーズの場合よりも高効率になり、平均変換効率は0.25ポイント向上している。このことからS2FD シリーズをスイッチング電源に適用することで、より高効率で高信頼性の電源設計が期待できる。

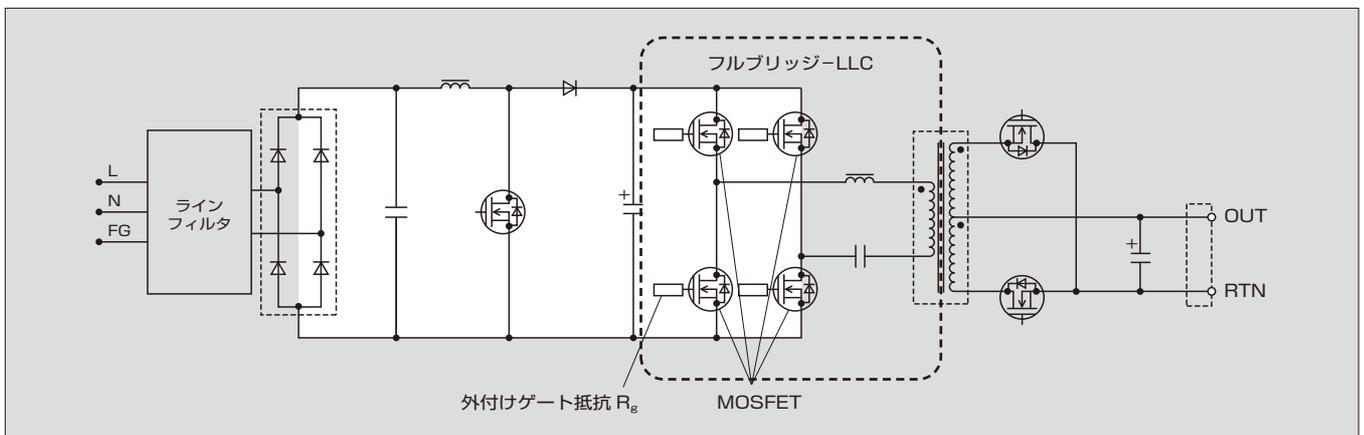


図7 電源のフルブリッジ-LLC回路

表2 「Super J MOS S2FDシリーズ」の製品系列と主要特性

V_{DS} (V)	$R_{DS(on)}$ max. (m Ω)	I_D (A)	製品系列		
			TO-247 パッケージ 	TO-220 パッケージ 	TO-220F パッケージ 
600	27	95.5	FMW60N027S2FD	-	-
	43	66.2	FMW60N043S2FD	-	-
	59	49.9	FMW60N059S2FD	-	-
	75	39.4	FMW60N075S2FD	-	FMV60N075S2FD
	84	37.1	FMW60N084S2FD	FMP60N084S2FD	FMV60N084S2FD
	94	32.8	FMW60N094S2FD	FMP60N094S2FD	FMV60N094S2FD
	105	29.2	FMW60N105S2FD	FMP60N105S2FD	FMV60N105S2FD
	133	22.7	FMW60N133S2FD	FMP60N133S2FD	FMV60N133S2FD
	170	17.9	FMW60N170S2FD	FMP60N170S2FD	FMV60N170S2FD

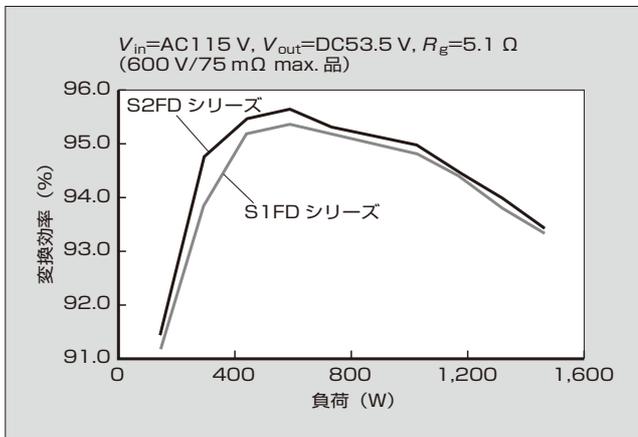


図8 変換効率の評価結果

5 製品系列

表2にS2FDシリーズの製品系列と主要特性を示す。

定格電圧 V_{DS} が600V、オン抵抗 $R_{DS(on)}$ が27～170 m Ω 、定格電流 I_D が95.5～17.9Aの製品を系列化し、電源容量に応じた選択が可能である。

6 あとがき

高速ダイオードを内蔵した第2世代低損失SJ-MOSFET「Super J MOS S2FDシリーズ」は、S1FDシリーズに対して低損失と V_{DS} サージの抑制を実現し、 $-di_{DR}/dt$ 耐量を向上した製品である。

S2FDシリーズは、フルブリッジLLC回路に搭載して行った比較評価から、S1FDシリーズよりも高効率の実現が可能であり、スイッチング電源の高効率化や小型化への貢献が期待できる。

今後は、市場ニーズのさらなる要求に応えるために、耐圧系列やパッケージ系列の拡大を進めるとともに、チップ

サイズの小型化やオン抵抗の低減などの性能向上に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) Fujihira, T. "Theory of Semiconductor Superjunction Devices". Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.
- (2) Deboy, G. et al. "A New Generation of High Voltage MOSFETs Breaks the Limit Line of Silicon". Proc. IEDM, 1998, p.683-685.
- (3) Onishi, Y. et al. "24 m \cdot cm² 680 V Silicon Superjunction MOSFET". Proc. ISPSD'02, 2002, p.241-244.
- (4) Saito, W. et al. "A 15.5 m \cdot cm²-680 V Superjunction MOSFET Reduced On-Resistance by Lateral Pitch Narrowing". Proc. ISPSD'06, 2006, p.293-296.
- (5) 大西泰彦ほか. Superjunction MOSFET. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.389-392.
- (6) 田村隆博ほか. 低損失SJ-MOSFET「Super-JMOS」. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.340-343.
- (7) Tamura, T. et al. "Reduction of Turn-off Loss in 600 V-class Superjunction MOSFET by Surface Design". PCIM Asia 2011, p.102-107.
- (8) Watanabe, S. et al. "A Low Switching Loss Superjunction MOSFET (Super J-MOS) by Optimizing Surface Design". PCIM Asia 2012, p.160-165.
- (9) 渡邊莊太ほか. 第2世代低損失SJ-MOSFET「Super J MOS S2シリーズ」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.292-295.
- (10) Sakata, T. et al. "A Low-Switching Noise and High-Efficiency Superjunction MOSFET, Super J MOS[®] S2". PCIM Asia 2015, p.419-426.



渡邊 荘太

パワー MOSFET 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事業統括部 ディスクリート・IC 技術部。



山下 千穂

電源デバイスの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。



坂田 敏明

パワー MOSFET 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。



屋外型 555 kVA パワーコンディショナ 「PVI600BJ-3/555」

Outdoor 555-kVA Power Conditioning Sub-System “PVI600BJ-3/555”

藤倉 政信* FUJIKURA, Masanobu

2012年7月に施行された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」(FIT)によって、国内の太陽光発電設備の導入が急激に拡大してきた。導入のピークは過ぎつつあるものの、2015年度末の段階における経済産業省のFIT認定設備容量に対して、高圧・特高案件の分野では未着工案件もいまだ多く、今後、2020年にかけてさらに導入が進むと考えられる。

富士電機は、独自の高効率パワー半導体を使って各種のパワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning Sub-system)を提供してきた。特に、1,000kVA PCS「PVI1000-3/1000」をはじめ、屋外型のPCSは、単体としても高効率でかつ空調を完全に不要としたことから、最高水準のシステム効率が可能な製品として好評を得ている。

今回、従来の屋外型PCSシリーズの拡充として、屋外型555kVAパワーコンディショナ「PVI600BJ-3/555」を開発し、発売した(図1)。

1 特徴

PVI600BJ-3/555の主な特徴は次のとおりである。

(a) 高効率: 98.1% (単体最高効率), 97.8% (EURO^{<注>}効率)



図1 「PVI600BJ-3/555」

<注> EURO 効率: 欧州の気候パターンに合致した評価条件に基づいて計算した効率値で、実稼動の変換効率に近いとされる。

* 富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部

空調を完全に不要としたため、通常発生する空調による2%の損失も防ぐことができ、最高水準のシステム効率が可能である。

(b) 力率90%運転での500kW出力

力率90%運転で500kW出力が可能である(装置容量555kVA)。なお、力率80%以上で運転が可能である。

(c) 小型軽量

質量は1,800kgであり、屋外型1,000kVAの7,500kgと比較して軽量である。さらに、小型なので4tトラックに積載して山間部の設置場所へ運ぶことができる。

(d) 外部からの制御電源の供給が不要

内部の制御電源やファン電源は、装置内部で降圧変圧器とダイオード整流器を使って構成している。このことから外部からの供給が不要である。

(e) 豊富なオプション

【2章】(3)で述べる従来の屋外型PCSのオプションはユーザから好評を得ており、本製品でもそのまま継承している。さらに、出力抑制機能を追加している。

2 仕様

(1) 装置回路

図2に単線結線図を示す。本製品は、従来のPCSと同様に、富士電機独自のパワー半導体であるRB-IGBT(Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用した二台のインバータ(PWU)で構成している。装置容量は555kVAである。直流回路の入力電圧範囲は600V、標準の直流分岐数は4分岐である。パネルが非接地系の場合に対応した地絡検出器を標準で内蔵している。

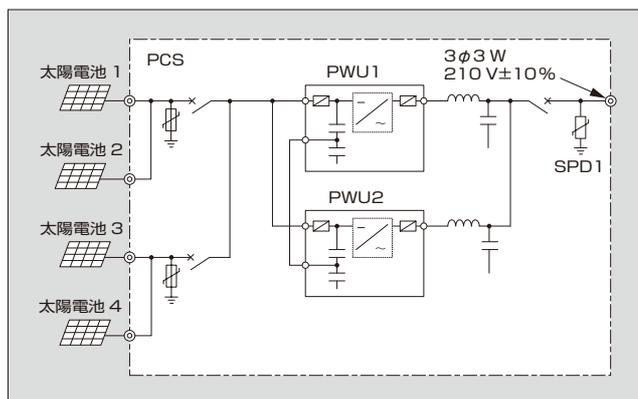


図2 「PVI600BJ-3/555」の単線結線図

交流回路は三相 3 線 210 V である。

(2) 装置仕様

表 1 に主な装置仕様を示す。

表 1 「PVI600BJ-3/555」の装置仕様

項目	仕様	
シリーズ名	PVI600BJ-3/555	
定格出力	555 kVA	
絶縁方式	トランスレス方式	
電気仕様 (DC入力)	直流入力電圧範囲	600 V
	直流入力電圧 (MPPT 範囲)	320 ~ 550 V
	直流入力分岐数 *1	4
電気仕様 (AC出力)	定格出力容量	555 kVA ($\rho_f=0.9$ 時は 500 kW)
	定格出力電圧	210 V $\pm 10\%$
	定格周波数	50/60 Hz $\pm 5\%$
	出力相数	3 ϕ 3W 非接地系対応
	定格出力電流	1,526 A
	出力力率	>0.99 (出力 1/8 ~ 定格出力時) (単独運転 Q 出力を除く)
	出力電流ひずみ率 (総合)	<5% (定格出力時)
	出力電流ひずみ率 (各次)	<3% (定格出力時)
	装置最高効率	98.1%
	装置効率 (EURO 効率)	97.8%
	過負荷耐量	100% 連続
	騒音	75 dB 以下
系統連系	系統保護	OV, UV, OF, UF
	単独運転検出方式 (受動)	電圧位相跳躍検出
	単独運転検出方式 (能動)	ステップ注入式周波数フィードバック方式
	電圧上昇・ 抑制機能	無効電流補償・有効電流出力抑制 (力率設定は -0.8 ~ +0.8)
	FRT	JET GR0003-1-6.0 (2016) に準拠
盤構造	設置方式 *2	屋外自立型
	適合 IP	IP55
	ケーブル引き込み	下部
	冷却方式	強制空冷
寸法	W2,000 × D950 × H1,960 (mm)	
質量	1,800 kg	
環境条件	保存温度	-20 ~ +50 °C
	動作温度 *3	-10 ~ +40 °C (40 °C 以上はパワーセーブ)
	相対湿度	5 ~ 90% (結露なし)
	標高	1,000 m 以下
準拠規格	JIS, JEM, JEC	
通信方式	RS-485	

* 1 : ヒューズ 16 分岐はオプション

* 2 : 耐塩、寒冷地仕様はオプション

* 3 : -25 °C 対応や -20 °C 対応の寒冷地仕様はオプション

本製品では、単独運転防止機能にステップ注入式周波数フィードバック方式を標準で採用している。これにより、常時フリッカ電圧が発生しない。また、PCS 間の同期信号を接続する必要がない。

従来品では、盤内部の温度センサが検知した温度が設定値を超えると、出力を急激に低下させていた。本製品では、周囲温度も測定して 40 °C を超えると、ゆるやかに出力を低減させる機能を盛り込んだ。

(3) 豊富なオプション

本製品では、従来の屋外型 PCS のオプションをそのまま継承するとともに、出力抑制機能を追加した。

(a) ヒューズ分岐

標準では直流回路分岐は 4 分岐であるが、16 分岐のヒューズを設置可能である。

(b) 耐塩仕様

湾岸近傍地域向けの耐塩仕様が可能である。

(c) 寒冷地仕様

北海道地域向けや山間地域向けの -20 °C 対応や -25 °C 対応が可能である。

(d) 直流ストリング電流検出

ヒューズ分岐の場合、そのストリング電流値を検出して外部に信号を送信するユニットを内蔵することが可能である。これにより、従来は接続箱に設置していたストリング電流検出器が不要になる。

(e) 地絡検出

標準品ではパネルが非接地系の場合の地絡検出器を内蔵しているが、一線接地系の場合にも検出可能な機器を用意している。

(f) 光伝送化

RS-485 などにおいて遠距離伝送用の光メディアコンバータの内蔵が可能である。

(g) 出力抑制機能

出力抑制機能を付帯した PCS は、電力会社のサーバにあらかじめスケジューリングされた抑制指令に従って、決められた日時や時間帯に PCS 出力を自動的に抑制できる。2015 年度に九州電力株式会社管内において実証検証が実施され、要求仕様を満足することが確認された。

発売時期

2016 年 3 月

お問い合わせ先

富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部
新エネプラント事業部太陽光・風力発電技術部
電話 (042) 585-6844

「MICREX-SX シリーズ」のモーションコントローラ「SPH3000D」

“MICREX-SX Series” Motion Controller “SPH3000D”

福島 幸治* FUKUSHIMA, Koji

下川 孝幸* SHIMOKAWA, Takayuki

モーションコントローラは、産業用ロボットをはじめとする産業用機械・装置のモーション制御を行うものである。産業用機械・装置では、複雑な動作や加工への対応、工程時間の短縮および高精度化の要求があり、モーションコントローラには、より多くの制御軸で、かつ、より高速な制御周期で同期制御を行える性能が求められている。また、モーション制御プログラムの複雑化と大規模化が進む中で、従来よりもエンジニアリング効率の高い開発環境が求められている。

富士電機は、これらの市場要求に応じて、統合コントローラ「MICREX-SX シリーズ」の新 CPU モジュールとして、モーション制御プログラムを従来に比べて2倍の速度で実行できるモーションコントローラ「SPH3000D」を開発した。また、MICREX-SX プログラミング支援ツール「SX-Programmer Expert」において、ユーザのエンジニアリング効率を向上するモーション制御プログラム自動作成機能とモーション FB アドイン機能を開発した。

① 「SPH3000D」

SPH3000D によるモーションシステムの構成例を図1に示す。SPH3000D は、次に示す特徴により、高速かつ高精度なモーション制御を実現できる。

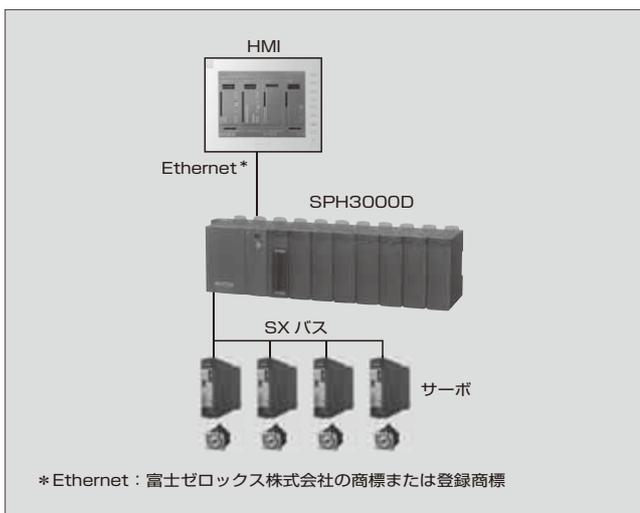


図1 「SPH3000D」によるモーションシステムの構成例

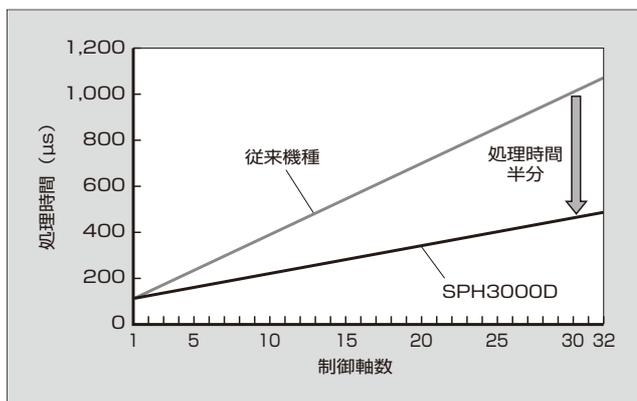


図2 比率同期モーション制御軸数

1.1 モーション制御周期の高速化

制御プログラムは、一定の機能をまとめたファンクションブロック (FB) を組み合わせることによって構成できる。FB には、あらかじめ支援ツールに組み込んであるシステムファンクションブロック (システム FB) と、ユーザが独自で作成するユーザファンクションブロック (ユーザ FB) がある。

モーション制御ファンクションブロック (モーション FB) は、モーション制御を実行するプログラムの核となるものである。モーション FB は、これまでユーザ FB として登録する必要があったが、今回、市場の高速化の要求に応じてシステム FB で標準機能として搭載した。モーション FB をシステム FB として使用することで、従来機種「SPH3000」を用いて同等の処理を行った場合と比較し、モーション制御の実行時間を半分にできる (図2)。同一制御周期であれば、制御軸数が倍になる。例えば、制御周期 2ms 時の比率同期 FB の制御軸数は、従来機種が 17 軸であったのに対し、SPH3000D は 32 軸 (SX バスに搭載可能な最大軸数) である。

1.2 モーション制御専用命令と高精度演算命令の実行

モーション FB (10 種類) に加え、64 bit 整数演算命令 (93 種類) と型変換命令 (8 種類) を搭載した。これらの命令を使用することで、高精度な演算処理を単純な命令の組合せで行うことができ、プログラムの作成工数の削減および可視性やメンテナンス性の向上が実現する。

1.3 高速メモリ領域の拡大

ユーザ FB とシステム FB を高速に演算するための作

* 富士電機株式会社パワエレ機器事業本部開発センター

業用メモリに当たるのがファンクションブロックインスタンスメモリ（FB インスタンスメモリ）である。この高速メモリの容量を、従来機種の 32 K ワードから 7 倍の 224 K ワードに拡大した。

さらに、支援ツールは、従来機種の場合と同様の仕組みにより、FB インスタンスメモリを拡大した高速のメモリへ優先して割り付ける。これにより、ユーザ FB とシステム FB の使用数およびデータ容量の多い制御プログラムでは、従来機種と比較して 2 倍の高速化を実現できる。

② モーション FB の高速化

従来機種では、モーション FB をユーザ FB として登録し、使用していた。このモーション FB は、支援ツールによって、制御プログラムの実行エンジンであるプロセッサが解釈可能なプログラムコードに変換する。モーション FB の処理の高速化には、プログラムコードの容量の最小化が効果的である。そこで、次に示す方法でシステム FB として組み込んだ。

- (a) SPH3000D のプロセッサに合わせ、プログラムコードの容量を最小化できるコンパイラを使用する。
- (b) モーション FB はプログラムコントローラ命令（PLC 命令）の組合せによるものであり、コンパイラが認識可能な C 言語で作成する。

従来方式で作ったユーザ FB の利点は、ユーザ FB が PLC 命令の組合せであるため、機械の動作に合わせたユーザ FB のアレンジが支援ツールにより柔軟に対応でき、機械を動作させながらユーザ FB をデバッグできることである。しかし、システム FB として組み込んでしまうと、支援ツールでの変更ができなくなる。

これに対して、富士電機がユーザ FB として開発したモーション FB は、既に広く使用されて信頼性が高く、機械ごとの要求に入力パラメータの変更のみに対応でき、かつ、デバッグ済であるため新たなデバッグが不要である。このモーション FB を、機能、動作について完全互換なシステム FB とした（図 3）。

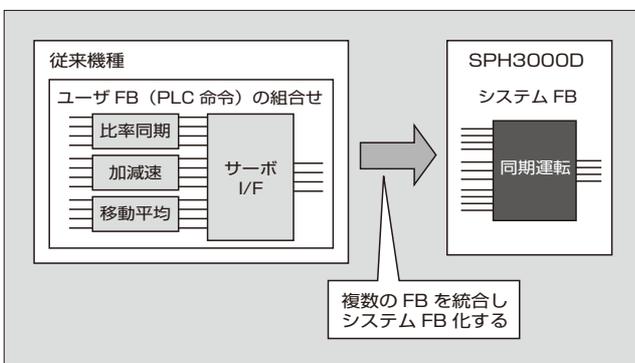


図 3 モーション FB の高速化

③ モーション制御プログラムの開発環境

モーション制御プログラムの作成効率を大幅に改善する次の機能を開発し、支援ツールに搭載した。

3.1 モーション制御プログラム自動作成機能

モーション制御プログラムの核となるモーション FB を支援ツール内に標準命令として搭載し、自動的にプログラミングできる機能を追加した。ユーザは、次に示す手順で簡単にモーション制御プログラムを作成できる（図 4）。

- (a) システム構成定義画面からモーション支援メニューを表示する（図 4 ①）。
- (b) 適用するモーション FB を選択する（図 4 ②）。
- (c) モーション FB の各パラメータを設定する（図 4 ③）。

また、モーション FB の入出力パラメータに接続する変数の定義（種別、データ形式、コメントなど）も自動的に作成できるため、ユーザのエンジニアリング効率を大幅に向上でき、作成ミスも防止できる。

3.2 モーション FB アドイン機能

モーション制御の内容は複雑化・多様化しており、ユーザは独自のモーション FB を作成し、ユーザ FB として登録している。これは、ユーザのソフトウェア資産である。

このユーザ独自のモーション FB をシステム FB として登録できるアドイン機能を追加した。ユーザは、登録したモーション FB を、標準命令として搭載されている他のモーション制御用のシステム FB と同様に扱うことができ、自動プログラミングにおいて使用できる。

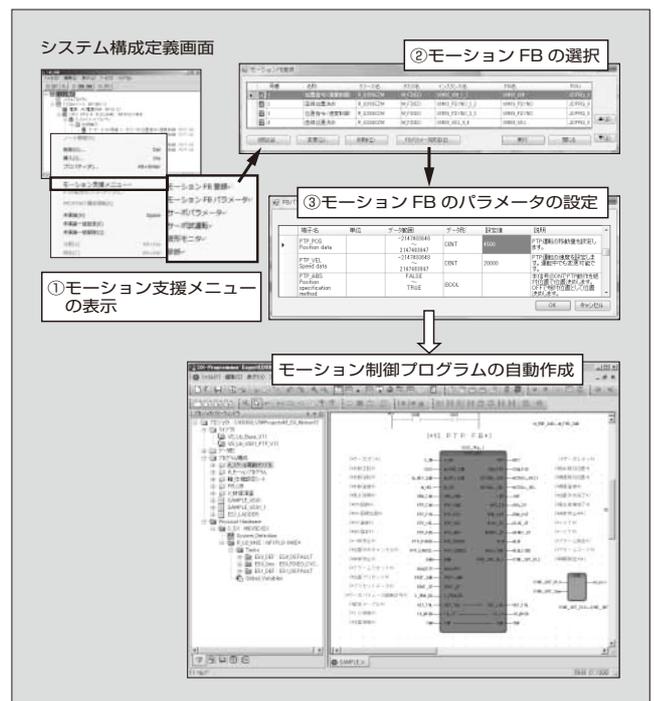


図 4 支援ツール「SX-Programmer Expert」の自動プログラミング機能

これにより、支援ツールをユーザのモーション制御に適したものにカスタマイズでき、エンジニアリング効率を向上できる。

発売時期

2016年11月

お問い合わせ先

富士電機株式会社

パワエレ機器事業本部ドライブ事業部FA部

電話 (03) 5435-7190



縮小型 72-145 kV ガス絶縁開閉装置「SDH714」

72- to 145-kV Compact Gas-Insulated Switchgear “SDH714”

小穴 秀之* OANA, Hideyuki

1960年代末以降、変電所の主要な機器である開閉装置として、設置スペースの縮小や信頼性の向上などの観点から、金属容器内に構成機器をSF₆ガスで絶縁した上でコンパクトに収納したガス絶縁開閉装置（GIS：Gas-Insulated Switchgear）が普及してきた。

富士電機は、1970年に72kV GISの初号器を納入し、72kVから300kVまでのGISをラインアップとして取りそろえ、多数納入してきている。72-145kV GISの従来品は、開発後15年以上が経過しており、さらなる小型・軽量化やメンテナンスフリー化などの要望に応えるため縮小型72-145kV GIS「SDH714」を開発し、発売した。

1 特徴

図1にSDH714の断面イメージを、図2に従来品との外形寸法の比較を、表1に概略仕様を示す。SDH714は、国際規格であるIEC 62271シリーズに準拠しており、ガス漏れ率は規格（0.5%/年）よりも厳しい0.1%/年を満たしている。また、オプションにより、部分放電検出用のセンサの内蔵、CT容器を独立ガス区画にすること、および遮断器の両側にCTを配置することに対応している。

(1) 小型・軽量化

SDH714は、従来品と比較して1回線当たりの標準的な幅寸法を1,200mmから900mmに縮小し、据付面積を70%に、質量を65%に低減した。さらに、ドライコンテナで輸送できるように輸送時の高さを抑え、最大2,650mmとした。

(2) アルミニウム合金製容器の全面採用

従来品では、母線容器にのみアルミニウム合金を採用していた。SDH714は、GIS容器に対して全面的に採用することにより、質量を低減するとともに、容器に生じる渦電流損を減らして損失も低減した。

(3) 電動ばね方式の採用

従来品の遮断器の操作には、遮断電流が31.5kAでは電動ばね方式を、40kAでは油圧方式を採用していた。SDH714は、必要とする操作力を低減することにより、40kAでも電動ばね方式で対応できるようにし、保守性を向上させた。

(4) 三位置形開閉装置の採用

* 富士電機株式会社産業インフラ事業本部変電システム事業部電力変電技術部

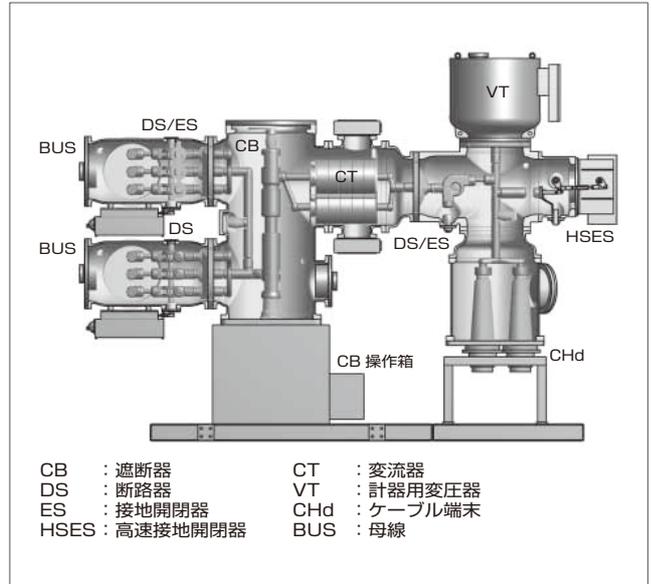


図1 「SDH714」の断面イメージ

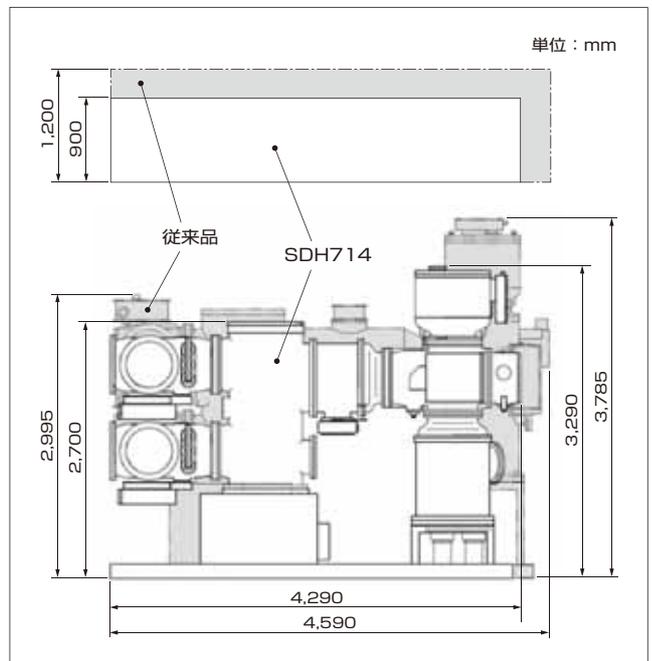


図2 外形寸法の比較

遮断器のメンテナンスのための接地開閉器と断路器を一つの三位置形開閉装置にまとめ、縮小化を図るとともに、機械的インタロックによって安全性を向上させた。

(5) IEC規格のクラスM2対応

表1 「SDH714」の概略仕様

項目	縮小型 GIS	従来品	
		SDH314	SDHa314
型式	SDH714	SDH314	SDHa314
定格電圧	72~145 kV	72~145 kV	
周波数	50 Hz	50/60 Hz	
定格電流	3,150 A (40℃のとき) 2,500 A (55℃のとき)	3,150 A (40℃のとき)	
定格遮断電流	40 kA	31.5 kA	40 kA
定格短時間耐電流	40 kA (3s)	31.5 kA (3s)	40 kA (3s)
定格ピーク耐電流	100 kA	80 kA	100 kA
遮断器の操作方式	電動ばね	電動ばね	油圧
定格遮断時間	3 サイクル	3 サイクル	
定格ガス圧 (ゲージ圧)	0.6 MPa	0.6 MPa	
ガス漏れ率	0.1% / 年	0.5% / 年	
容器の材質	アルミニウム合金	母線室: アルミニウム合金 その他: 鉄	
三位置形開閉装置の適用	あり	なし	
連続開閉試験回数 (IEC クラス)	10,000 回 (M2)	2,000 回 (M1)	
1 回線当たりの標準的な幅寸法	900 mm	1,200 mm	
据付面積比	70%	100%	
質量比	65%	100%	
適用規格	IEC 62271-203 ほか	IEC 60517 ほか	

メンテナンスフリー化を志向し、形式試験における連続開閉試験は、従来 2 千回であったものを 1 万回に増やし、1 万回連続開閉試験を実施するクラス M2 に対応した。

2 背景となる技術

2.1 直列熱パuffa方式の適用

以前は、遮断器の消弧には、機械力で圧縮した SF₆ ガスを開極部の電流アークに吹き付けて消弧させる単一パuffa方式が用いられていた。最近の消弧方式の主流は、操作器の操作力低減を目指した直列熱パuffa方式である。

図 3 に直列熱パuffa方式消弧室の構造を示す。この方式では、機械パuffa室と直列に熱パuffa室を設け、その間に逆止弁を設けている。大電流アークによってガス圧が上昇し、熱パuffa室内のガス圧が、機械パuffa室のガス圧より大きいときには、熱パuffa室から機械パuffa室へのガスの逆流を防ぐことにより、操作器に無用な負担をかけない。このため、従来の単一パuffa方式より操作力を低減できる。大電流は主に熱パuffa室からのガス吹付けによって消弧を行い、小電流は主に機械パuffa室からのガス吹付けによって消弧を行い、電流を遮断する。

この方式を適用する上で、消弧室ノズルの形状および逆止弁の形状と動作設定値の決定が重要であり、富士電

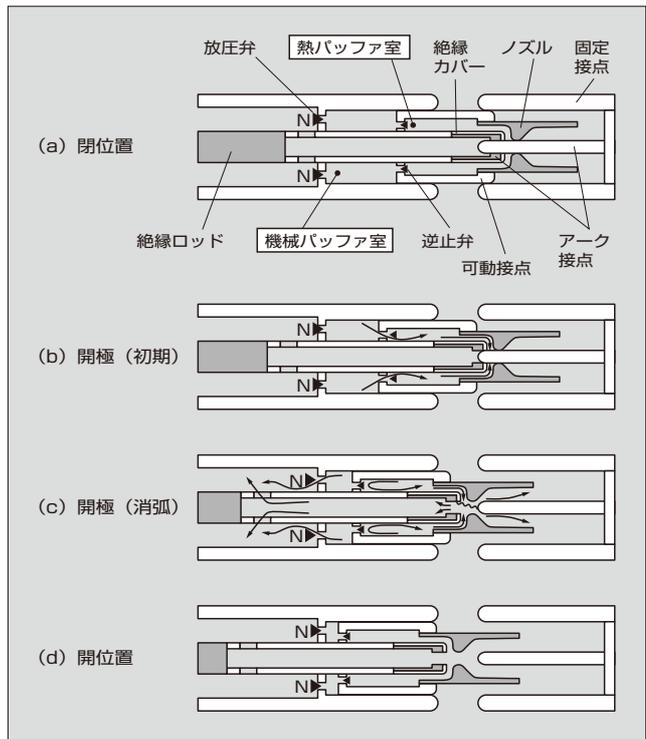


図 3 直列熱パuffa方式消弧室の構造

機では最新の解析技術を駆使して、これを最適化している。

2.2 熱流体解析と機構解析

大電流アークの熱により、遮断器の消弧室ノズル内側の表面は気化（アブレーション）して熱パuffa室内のガス圧上昇に寄与する。この現象を熱流体解析によって定量的に評価し、消弧室ノズルの形状を最適化した。

また、最新の機構解析によって三次元動作シミュレーションを行い、操作器各部の形状や寸法を最適化するとともに、熱流体解析との連成解析によって、最適動作設定値を決定した。

2.3 三位置形開閉装置の安全構造

三位置形開閉装置には、動作安定性および耐久性に優れた機構を採用し、1 万回の連続開閉試験（クラス M2）に合格した。

また、断路器“入”の状態から、断路器と接地開閉器が共に“切”の中間位置を経て、接地開閉器“入”の状態に操作できるが、中間位置では必ず操作モータが一時停止し、次の操作指令がなければ動作を開始しないようにしている。さらに、断路器が“入”から“切”に動作が完了したときに、万が一、モータが停止せずにオーバーランしても、機械的ロックにより、意図せずに接地開閉器“入”に至ることがない構造とし、安全性を確保している。

発売時期

2016年11月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
産業インフラ事業本部変電システム事業部
電話 (0436) 42-8562



冷凍保冷庫「WALKOOL（フローズン）」

Frozen Storage Container “WALKOOL”

隠塚 将二郎* ONZUKA, Shojiro

菅原 章* SUGAWARA, Sho

倉 馨* KURA, Kaoru

近年、ライフスタイルの変化や家族構成の変化により、冷凍食品の需要が伸長している。また、冷凍食品の流通も多様化し、小口で頻度の高い配送が激増している。一方で、流通インフラはこのような需要や流通形態に応える設備や機材が十分ではない。温度管理を徹底するために、ドライアイスを用いた個包装の輸送や冷凍車を所有する運輸会社への外注委託などが行われており、これがコストアップの要因の一つとなっている。

富士電機は、これらの問題を解決し、配送業務の効率化を図るため、冷凍機ユニットを内蔵した冷凍保冷庫「WALKOOL（フローズン）」を開発した（図1）。

なお、本製品は、機能・性能、デザイン性などが評価され、2016年度グッドデザイン賞を受賞した。

1 製品概要

WALKOOL（フローズン）は、冷蔵車に混載して輸送することができる冷凍用コンテナである。冷凍車を用意したり、冷蔵車への混載時に大量のドライアイスを用意したりする必要はなく、温度管理とローコストオペレーションを同時に実現できる。また、あらかじめ蓄冷材を9時間冷却することで、8時間以上、 -20°C 以下での安定保冷が可能である。外観はステンレス製で清潔さと丈夫さを兼ね備えている。食品輸送用のかご台車と同じ寸法



図1 「WALKOOL（フローズン）」

* 富士電機株式会社食品流通事業本部生産統括部三重工場設計第二部

‡ 富士電機株式会社食品流通事業本部生産統括部三重工場新分野製品開発プロジェクト部

なので、混載するトラックの荷台への積み込みやラッシングベルトなどで容易に固定できる。有効内容積は400Lを確保しており、複数の場所に配送する商品を一度に保管できるサイズである。

また、WALKOOL（フローズン）は家庭用の100V電源に対応しているため、特別な電源敷設工事は不要である。このため、手軽に導入できるとともに、輸送先でも再冷却が容易である。

2 仕様と特徴

(1) 製品仕様

WALKOOL（フローズン）は顧客からの要望を受け、商品の積載・搬出が楽に行えるように扉を長手方向に配置して開口部を広くした。開口部は庫内容積が同じクラスの他社品より約1.5倍広い。一般的に開口部が広がると熱侵入量が増加しやすくなるが、真空断熱材やマグネットガスケットを採用して熱侵入量の低減を図った。表1に、WALKOOL（フローズン）の仕様を示す。

(2) 保冷性能

WALKOOL（フローズン）は、庫内の天面と背面に蓄

表1 「WALKOOL（フローズン）」の仕様

項目	仕様
型式	FMB0400F1KT
外形寸法	W850 × D650 × H1,700 (mm)
有効内寸法	W730 × D520 × H1,060 (mm)
有効内容積	400L
保冷温度	-20°C 以下（庫内温度）
保冷時間	8時間以上（周囲温度 10°C 環境下）
保冷環境温度	$-5 \sim +20^{\circ}\text{C}$
冷却時間	最大9時間（周囲温度 10°C 環境下／初期冷却）
冷却環境温度	$5 \sim 25^{\circ}\text{C}$
製品質量	180kg
最大積載荷重	150kg
扉	1枚扉（扉開角度： 100° 、右ヒンジ）
キャスタ	4輪自在（前側2輪ストップ付）
電源	単相100V、15A
電源コード長さ	2m
冷媒	R404a
その他	冷凍機ユニット内蔵

冷材を配置している。これにより、庫内で温度差が生じて循環流が生まれる。この効果により庫内の空気を均一に拡散し、庫内の上部から下部までの庫内温度平均に対する温度差を±3℃以内に維持する。一般的に、高い保冷性能を実現するためには、蓄冷材と庫内空気との熱交換の効率向上や庫内温度のばらつきの低減を同時に満足する必要がある。庫内ファンを利用する製品の場合は、その分、庫内スペースが減少してしまっていたが、WALKOOL（フローズン）では蓄冷材の配置を工夫することで、このような機能部品を必要とせず、400Lの庫内容積を確保しつつ、高い保冷性能を実現した。

併せて、自動販売機で実績のある断熱技術を利用し、真空断熱材とウレタン発泡断熱材の併用により庫内への熱侵入量を大幅に低減している。

WALKOOL（フローズン）の保冷性能を図2に示す。商品の積載を想定した10分間の扉の開放によって庫内温度が上昇するものの、その後-20℃以下にリカバリーし、8時間を経過しても、その保冷温度を保持している。

(3) 冷却性能

先に述べた保冷性能を実現するために、フローズン帯の蓄冷材を搭載している。従来、フローズン帯の蓄冷材を凍結するには、-50～-40℃程度に冷却する冷凍機が必要であった。また、冷却温度が低いほど、長時間の凍結時間が必要であった。

WALKOOL（フローズン）では、9時間以内という短時間で凍結するため、融解温度と凍結温度（過冷却温度）の差が非常に小さい蓄冷材を採用した。これにより、標準的な冷凍庫用のコンパクトな冷凍機で凍結できるようにした。また、蓄冷材の容器をWALKOOL（フローズン）専用に設計し、熱交換用の配管との接触面積を拡大したことも、短時間凍結に大きく貢献している。

(4) 耐振動・耐衝撃性能

WALKOOL（フローズン）は、毎日の商品輸送において受けるさまざまな振動と衝撃に耐えられる構造を持つ。

振動への対策として、WALKOOL（フローズン）に加えらるる振動と筐体（きょうたい）自体の固有振動数に

よる共振を避けるため、キャストのタイヤ材質の硬度を最適なものに選定した上で、筐体構造の高剛性化を図った。

衝撃への対策として、構造解析による部品形状の最適化設計を行った。また、物流機材は過酷な取扱いを受けるので、外装部の破損は避けられない。そこで、外装は交換可能なパネル構造としている。一方で、トラック内部での固定に用いるラッシングベルトに対しても十分な強度を持った構造としている。

(5) 外装

外装は部品などの突起を最小限に抑え、搬送中の引っかかりなどによる転倒や破損が生じないような構造にしている。例えば、取っ手や扉ロックなどは埋込み式のものを採用している。

(6) 電源コード

WALKOOL（フローズン）は、家庭用100V電源を専用の電源コードを介して製品上部のコネクタに接続して使用する（図3）。電源コードとコネクタは高い耐久性を持っている。輸送先などでの再冷却には、家庭用の100V電源さえあればよい。

(7) デザイン

WALKOOL（フローズン）は、“確実な冷凍保冷および配送業務の効率化の実現、信頼感の表現”をコンセプトに、筐体にステンレス鋼板を採用し、操作部を黒色のアクセントで引き締め、バックヤード機材に求められるストイックさの中に“安全・安心”を表出したデザインとした。その結果、機能・性能、デザイン性に加え、運送のローコストオペレーション化だけでなく、さまざまな利用可能性を感じさせる点も評価され、2016年度グッドデザイン賞を受賞した。

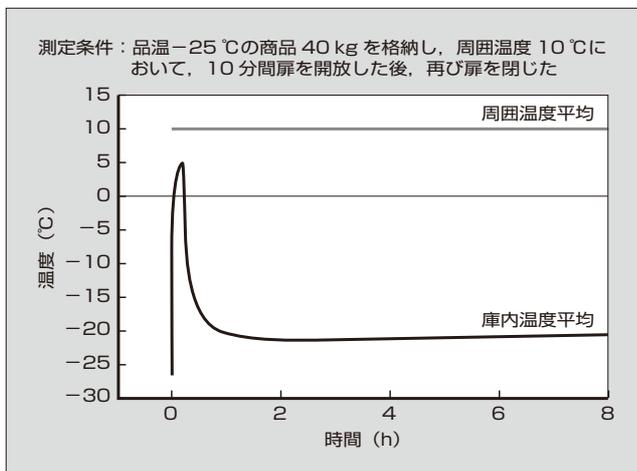


図2 「WALKOOL（フローズン）」の保冷性能

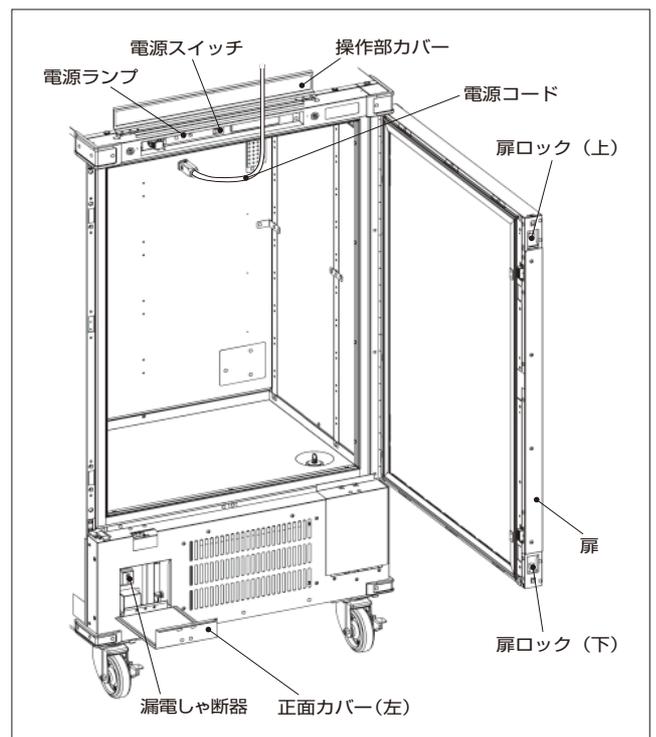


図3 「WALKOOL（フローズン）」の正面側の構造

発売時期

2016年9月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
食品流通事業本部営業統括部営業第六部
電話（03）5435-7078

略語（本号で使った主な略語）

APF	Annual Performance Factor	通年エネルギー消費効率
BSD	Boot-Strap-Diode	
CT	Computed Tomography	
CTE	Coefficient of Thermal Expansion	線膨張係数
CTI	Comparative Tracking Index	比較トラッキング指数
DCB	Direct Copper Bonding	
ECU	Electronic Control Unit	
EPE	European Power Electronics	
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FRED	Fast Recovery Diode	
FWD	Free Wheeling Diode	
GIS	Gas-Insulated Switchgear	ガス絶縁開閉装置
GTO	Gate-Turn Off	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
HVIC	High Voltage Integrated Circuit	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
JFET	Junction Field-Effect Transistor	接合形電界効果トランジスタ
LVIC	Low Voltage Integrated Circuit	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
MRI	Magnetic Resonance Imaging	
PAT	Part Average Testing	
PCS	Power Conditioning Sub-system	パワーコンディショナ
PDEV	Partial Discharge Extinction Voltage	部分放電消滅電圧
PDIV	Partial Discharge Inception Voltage	部分放電開始電圧
PFC	Power Factor Correction	力率改善
P-HEV	Plug-in HEV	プラグインハイブリッド自動車
PV	Photovoltaic	
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RB-IGBT	Reverse-Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
RC-IGBT	Reverse-Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
SCR	Silicon-Controlled Rectifier	
SMD	Surface Mount Device	
SOP	Small Outline Package	
SST	Solid-State Transformer	
THB	Temperature Humidity Bias	高温高湿試験
TMA	Thermomechanical Analysis	熱機械分析
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

PrimePACK	Infinion 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。

訂正：富士電機技報・2016, vol.89, no.2, p.109.

(正)

(2) ダイレクトパラ接続方式で出力 450 kW, 最大 4 台による並列接続 (1,700 kW/690 V 系列) が可能である。

(誤)

(2) ダイレクトパラ接続方式で出力 450 kW, 最大 4 台による並列接続 (1,700 kW/1,690 V 系列) が可能である。

主要事業内容

発電・社会インフラ

環境にやさしい発電プラントとエネルギーマネジメントを融合させ、スマートコミュニティの実現に貢献します。

創エネルギー

高効率火力発電設備、地熱発電設備、太陽光発電システム、水力発電設備、燃料電池

エネルギーマネジメント

地域エネルギーマネジメント、スマートメータ

産業インフラ

生産ライン・インフラ設備に関わる、エネルギーの安定供給、省エネルギー、安全・安心を提供します。

生産設備

駆動制御機器、監視制御システム、計測機器、工場電熱

変電設備

受変電設備、大容量整流器、変圧器

設備工事

建築、空調

パワーエレクトロニクス機器

エネルギーの効率化や安定化に寄与するパワーエレクトロニクス応用製品を提供します。

エレベータ、搬送ライン

汎用インバータ、モータ

データセンター

無停電電源装置

メガソーラー

パワーコンディショナ

配電盤

電磁開閉器

電子デバイス

産業、自動車、電源分野および新エネルギー分野に欠かせないパワー半導体をはじめとする電子デバイスを提供します。

インバータ、ロボットなど（産業・新エネルギー分野）

IGBT モジュール、SiC モジュール

自動車電装など（自動車分野）

車載用 IGBT、圧力センサ

サーバなど（電源分野）

電源制御 IC、MOSFET

食品流通

冷熱技術をコアに、メカトロニクスや IT を融合し、最適な製品とソリューションを提供します。

自販機

缶・ペット自販機、カップ自販機、食品・物品自販機

店舗流通

冷凍・冷蔵ショーケース、自動釣銭機、店舗省エネシステム

流通システム

要冷・冷蔵設備、次世代保冷コンテナ

次号予定

富士電機技報 第90巻 第1号

特集 持続可能な社会の実現に貢献する創エネルギーと社会インフラソリューション

富士電機技報企画委員会

企画委員長 江口 直也

企画委員幹事 瀬谷 彰利

企画委員 荻野 慎次 斎藤 哲哉 片桐 源一 根岸 久方

八ツ田 豊 奥田 善久 竹野入俊司 久野 宏仁

吉田 隆 橋本 親 眞下 真弓 大山 和則

特集委員 竹野入俊司 井川 修 太田 裕之

事務局 木村 基 小野 直樹 山本 亮太 柳下 修

富士電機技報 第90巻 第4号

平成28年12月20日印刷 平成28年12月30日発行

編集兼発行人 江口 直也

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

定価 756円(本体700円・送料別)

*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) http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW(英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

*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。

© 2016 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

No.1 特集 製品開発を支えるシミュレーション技術

[特集に寄せて] “実測と違う” から “実測をしてみよう” へ	古山 通久	3 (3)
[現状と展望] 製品開発を支えるシミュレーション技術の現状と展望	渡邊 雅英 長安 芳彦 保川 幸雄	4 (4)
シミュレーションによる SiC トレンチ型 MOSFET の特性予測	小林 勇介 木下 明将 大西 泰彦	11 (11)
シミュレーションを用いた SiC バイポーラデバイスの開発	松永慎一郎 武井 学	16 (16)
シミュレーションを活用した SiC デバイスの原子レベルの解析	広瀬 隆之 森 大輔 寺尾 豊	21 (21)
分子シミュレーションを活用した樹脂材料の密着性の解析	小笠原美紀 立岡 正明	26 (26)
熱硬化性樹脂成形品の残留応力分布・接着界面強度解析	雁部 竜也 浅井 竜彦 岡本 健次	30 (30)
パワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズシミュレーション技術	玉手 道雄 林 美和子 市瀬 彩子	35 (35)
製品の低騒音化を実現する流体騒音シミュレーション技術	金子 公寿 松本 悟史 山本 勉	40 (40)
配電盤の内部アーク故障における圧力上昇の解析	浅沼 岳 恩地 俊行 外山健太郎	45 (45)
オープンショーケースの省エネルギーを実現する熱流体シミュレーション技術	中島 正登 浅田 規	50 (50)
射出成形の品質向上を支えるシミュレーション技術	矢島あす香 菅田 好信 横森 則晴	54 (54)
解説		
SiC の結晶の種類・結晶面, MOSFET におけるキャリアの散乱		58 (58)
新製品紹介論文		
静音電磁接触器「SL シリーズ」		59 (59)
アジア向け空調用インバータ「FRENIC-eHVAC シリーズ」		61 (61)

No.2 特集 2015 年度の技術成果と展望

[特集に寄せて] “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”	北澤 通宏	68 (2)
[特別対談] “IoT, M2M で進む社会・産業インフラの変革”		
—— 暗黙知を形式知に変え, お客さまに新しい価値を提供する ——	森川 博之 江口 直也	70 (4)
[成果と展望] “強いコンポーネントをコアにした顧客価値を創出するソリューション”	江口 直也	74 (8)
ハイライト		80 (14)
発電システム □火力・地熱プラント □原子力 □再生可能エネルギー・電力安定化 □燃料電池		88 (22)
社会インフラ □エネルギーマネジメント		92 (26)
産業インフラ □変電システム □産業プラント □産業計測機器		96 (30)
パワエレ機器 □駆動システム □電源システム □輸送システム □受配電・開閉・制御機器コンポーネント		108 (42)
電子デバイス □パワー半導体 □感光体 □ディスク媒体		113 (47)
食品流通 □自動販売機 □店舗 □流通システム		120 (54)
基盤・先端技術 □基盤技術 □先端技術		122 (56)

No.3 特集 IoT 新時代の計測・制御ソリューション

[特集に寄せて] IoT とオープンイノベーション 新 誠一 137 (3)
 [現状と展望] IoT 新時代の計測・制御ソリューションの現状と展望 近藤 史郎 福住 光記 138 (4)
 鉄鋼プラント向け操業最適化ソリューション..... 富田 嘉文 吉川 肇 鳴海 克則 146 (12)
 プラントを最適に運用する計測・制御システムソリューション..... 吉川 譲 朱 剣云 小野 健一 153 (19)
 物流センター効率化ソリューション..... 高木 秀記 158 (24)
 計測・制御技術を活用した植物工場ソリューション..... 長瀬 一也 白木 崇志 岩崎 秀威 163 (29)
 設備の安定稼働を支援するサービスソリューション..... 北谷 保治 藤田 史彦 大頭 威 167 (33)
 燃料費を削減するボイラ燃焼ソリューション..... 稲村 康男 小澤 秀二 赤尾 幸造 172 (38)
 「エアロゾル複合分析計」を用いたPM2.5発生源推定ソリューション 小泉 和裕 武田 直希 中村 裕介 177 (43)
 新型電子式個人線量計によるリアルタイム遠隔監視システム..... 中島 定雄 前川 修 安部 繁 182 (48)
 進化する監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」..... 永塚 一人 佐藤 好邦 笹野喜三郎 186 (52)
 統合EMSと容易に連携可能な設備監視システム
 「MICREX-VieW PARTNER」 鈴木 健浩 堀口 浩 白田 拓史 193 (59)
 IoTソリューションを支える数理応用技術 松井 哲郎 村上 賢哉 丹下 吉雄 198 (64)

解説
 SIL 204 (70)

新製品紹介論文

SiCハイブリッドモジュールの製品系列(600V・1,200V・1,700V) 205 (71)
 新デジタル形送電線保護リレー装置(DUJ形) 208 (74)
 屋外設置が可能なデジタルサイネージ型自動販売機..... 211 (77)
 第2世代低損失SJ-MOSFET「Super J MOS S2シリーズ」「Super J MOS S2FDシリーズ」..... 213 (79)
 高速ディスクリットIGBT「High-Speed Wシリーズ」 216 (82)

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] SiC-MOSFETの本格的な普及を期待して 赤木 泰文 225 (3)
 [現状と展望] パワー半導体の現状と展望 藤平 龍彦 宝泉 徹 栗原 俊治 226 (4)
 1.2kV SiCトレンチゲートMOSFET 辻 崇 岩谷 将伸 大西 泰彦 234 (12)
 All-SiC 2in1モジュール 蝶名林幹也 大友 良則 唐沢 達也 238 (16)
 All-SiCモジュールの高耐圧化 日向裕一郎 谷口 克己 堀 元人 242 (20)
 All-SiCモジュール用封止樹脂の高耐熱性化 仲俣 祐子 立岡 正明 市村 裕司 247 (25)
 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール「Dual XT」 吉田 健一 吉渡 新一 川畑 潤也 251 (29)
 第2世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール..... 山野 彰生 高橋 美咲 市川 裕章 256 (34)
 第2世代小容量IPMの系列化 手塚 伸一 鈴木 啓久 白川 徹 261 (39)
 RC-IGBTを搭載した車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの
 高速動作化..... 高下 卓馬 井上 大輔 安達新一郎 266 (44)
 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..... 佐藤憲一郎 榎本 一雄 長畦 文男 270 (48)
 車載用ハイサイド2in1IPS「F5114H」..... 森澤 由香 鳶坂 浩志 安田 貴弘 275 (53)
 車載用第2世代SJ-MOSFET「Super J MOS S2Aシリーズ」 田平 景輔 新村 康 皆澤 宏 279 (57)
 高効率電源用の臨界モードPFC制御IC「FA1A60N」と
 LLC電流共振制御IC「FA6B20N」 園部 孝二 矢口 幸宏 北條 公太 283 (61)
 高速ダイオードを内蔵した第2世代低損失SJ-MOSFET
 「Super J MOS S2FDシリーズ」 渡邊 荘太 坂田 敏明 山下 千穂 289 (67)

新製品紹介論文

屋外型555kVAパワーコンディショナ「PVI600BJ-3/555」..... 294 (72)
 「MICREX-SXシリーズ」のモーションコントローラ「SPH3000D」..... 296 (74)
 縮小型72-145kVガス絶縁開閉装置「SDH714」..... 299 (77)
 冷凍保冷庫「WALKOOL(フローズン)」 302 (80)

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

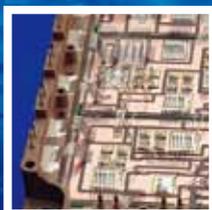
Innovating Energy Technology

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

FE 富士電機