

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2015
Vol.88 No.



特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

低炭素社会の実現に向けて、エネルギー利用の高効率化が非常に重要になっています。特に、電気エネルギーは、自動車、産業機械、社会インフラ、家電製品など多くの分野でなくてはならないものであり、電気エネルギーの高効率利用を実現するパワーエレクトロニクスの進展には大きな期待が寄せられています。富士電機では、パワーエレクトロニクス技術のキーデバイスであり、エネルギー変換効率が高く、低ノイズで使いやすいパワー半導体を開発しています。

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、All-SiC モジュール、3,300V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール



目次

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体	
〔特集に寄せて〕 出来そうもないこと, 思いも寄らぬこと 清水 敏久	233 (3)
〔現状と展望〕 パワー半導体の現状と展望 高橋 良和 ・ 藤平 龍彦 ・ 宝泉 徹	234 (4)
All-SiC モジュールのパッケージ技術 仲村 秀世 ・ 西澤 龍男 ・ 梨子田 典弘	241 (11)
1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール 小根澤 巧 ・ 北村 祥司 ・ 磯 亜紀良	245 (15)
3,300V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール技術 金子 悟史 ・ 金井 直之 ・ 辻 崇	249 (19)
第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール 川畑 潤也 ・ 百瀬 文彦 ・ 小野澤 勇一	254 (24)
第2世代小容量 IPM 荒木 龍 ・ 白川 徹 ・ 小川 裕貴	259 (29)
IPM 用 HVIC 技術 上西 顕寛 ・ 赤羽 正志 ・ 山路 将晴	264 (34)
車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール 荒井 裕久 ・ 樋口 恵一 ・ 小山 貴裕	269 (39)
車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術 郷原 広道 ・ 玉井 雄大 ・ 山田 教文	274 (44)
車載用 RC-IGBT 吉田 崇一 ・ 野口 晴司 ・ 向井 弘治	279 (49)
車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ 加藤 博文 ・ 芦野 仁泰 ・ 佐藤 栄亮	283 (53)
ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」 松本 晋治 ・ 山根 博樹 ・ 藪崎 純	287 (57)
第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」 渡邊 荘太 ・ 坂田 敏明 ・ 山下 千穂	292 (62)
高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」 原 幸仁 ・ 内藤 達也 ・ 加藤 由晴	296 (66)
新製品紹介論文	
アモルファスモルトラ 「FM-AT14」	301 (71)
サーキットプロテクタ 「CP30F シリーズ」	303 (73)
第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール	305 (75)
略語・商標	308 (78)
富士電機技報 vol.88 2015 (平成 27 年) 総目次	

Power Semiconductors Contributing in Energy Management

[Preface] Challenges for Difficulty of Realization and Unexpected Matter SHIMIZU, Toshihisa	233 (3)
Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook TAKAHASHI, Yoshikazu FUJIHIRA, Tatsuhiko HOSEN, Toru	234 (4)
All-SiC Module Packaging Technology NAKAMURA, Hideyo NISHIZAWA, Tatsuo NASHIDA, Norihiro	241 (11)
1,700-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module ONEZAWA, Takumi KITAMURA, Shoji ISO, Akira	245 (15)
3,300-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module Technology KANEKO, Satoshi KANAI, Naoyuki TSUJI, Takashi	249 (19)
7th-Generation "X Series" IGBT Module KAWABATA, Junya MOMOSE, Fumihiko ONOZAWA, Yuichi	254 (24)
2nd-Generation Small IPM ARAKI, Ryu SHIRAKAWA, Toru KOGAWA, Hiroki	259 (29)
HVIC Technology for IPM JONISHI, Akihiro AKAHANE, Masashi YAMAJI, Masaharu	264 (34)
3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications ARAI, Hirohisa HIGUCHI, Keiichi KOYAMA, Takahiro	269 (39)
Packaging Technology of 3rd-Generation Power Module for Automotive Applications GOHARA, Hiromichi TAMAI, Yuta YAMADA, Takafumi	274 (44)
RC-IGBT for Automotive Applications YOSHIDA, Soichi NOGUCHI, Seiji MUKAI, Koji	279 (49)
Relative Pressure Sensor for Automobile Fuel Tanks KATO, Hirofumi ASHINO, Kimihiro SATO, Eisuke	283 (53)
PWM Power Supply Control IC "FA8B00 Series" Capable of handling Peak loads MATSUMOTO, Shinji YAMANE, Hiroki YABUZAKI, Jun	287 (57)
2nd-Generation Low-Loss SJ-MOSFET "Super J MOS S2 Series" WATANABE, Sota SAKATA, Toshiaki YAMASHITA, Chiho	292 (62)
High-Speed Discrete IGBT "High-Speed W-Series" HARA, Yukihiro NAITO, Tatsuya KATO, Yoshiharu	296 (66)
New Products	
Amorphous MOLTRA "FM-AT14"	301 (71)
Circuit Protector "CP30F Series"	303 (73)
7th-Generation "X Series" IGBT Module	305 (75)
Abbreviations and Trademarks	308 (78)
Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOURNAL vol.88, 2015	

特集に寄せて

出来そうもないこと、思いも寄らぬこと

Challenges for Difficulty of Realization and Unexpected Matter

清水 敏久 SHIMIZU, Toshihisa

首都大学東京 理工学研究科 電気電子工学専攻 教授



エネルギー安定供給，地球環境保全，経済成長のトリレンマという困難な課題解決が，現在の人類に課せられている。パワーエレクトロニクス（パワエレ）はこの課題解決を支える技術としてこれまで以上に注目を集めている。その中で SiC パワーデバイスの実用化は，パワエレ分野に大きなインパクトを与えることは疑う余地はない。

HEV・EV，LED 照明，太陽光発電などは注目の的であるが，パワエレ技術を知る人は少ない。小生が以前に滞在したバージニア工科大学パワーエレクトロニクスセンターでは，パワエレは Enabling Technology（可能化技術・実現技術）と定義していた。パワエレの本質を見事に表現している。パワエレは目的を達成する“手段”と言ってもよいかもしれない。パワエレ装置という“もの”によって，価値ある“こと”の実現に貢献することである。

小生が学生時代の 40 年前では出来そうもなかったことが，パワエレ技術によって実現している。インバータ駆動の新幹線は旅行や出張の在り方を一変させた。HEV や EV はやがて自動運転と相まって移動手段に大変革をもたらすであろう。当時は変換効率 95% が精一杯だった絶縁形 DC-DC コンバータも，SiC パワーデバイスの登場によって 99% に到達しようとしている。パワエレ装置の可能化のポテンシャルは飛躍的に向上することは間違いない。では，パワエレ技術で何を実現するのか？ 現有製品の性能はもちろん向上するだろうが，それはパワーデバイス技術の恩恵であってパワエレ技術の貢献とは言い難い。

パワーデバイスの発達に伴ってパワエレ装置の性能は格段に向上したが，そこには回路トポロジー，受動部品，制御装置などの技術革新が欠かせなかった。SiC パワーデバイスの時代において，果たしてこれまでの手法が通用するのか。熱解析や信頼性はもとより，材料物性の限界値なども見据えて真剣に取り組みねば折角のパワーデバイスを生かすのは難しいかもしれない。

出来そうもない“こと”に挑戦するのがパワエレ技術・産業の醍醐味（だいごみ）ではないだろうか。無責任な思い付きではあるが，出来そうもないことの例を示そう。

(1) 電気室のない建築物

大切な居住空間を削ってしまう電気設備室は邪魔物である。ならば，超小型・長寿命の半導体変圧器や半導体遮断器を作って構造物の柱・床下・壁の空間に埋め込んでし

まって建物と一体化してしまう。コンクリート建築・構造物の寿命は 100 年以上まで伸びてはいるが，定期補修は不可欠である。パワエレ装置の寿命を無保守で 50 年以上にできれば，建築補修と併せて交換すればよい。大都市空間と電気エネルギーの双方を有効に使った新たな営み（こと）が生まれるかもしれない。

(2) 電気飛行機

機体操舵（そうだ）の電動化が手始めとなるであろうが，推進力の電動化についても小型飛行機で数百マイル飛行できるレベルまで達している。ハイブリッド方式や燃料電池・新型蓄電池によって航続距離は飛躍的に伸びるであろう。そのときは超長寿命に加えて超軽量・超高信頼なインバータが必要になる。

(3) 非接触給電で高速道路を長距離走行する電気自動車

これは韓国では真剣に検討されているようである。高速道路上に大きな電源は設置できないかもしれないが，ならば長寿命・超小型インバータとコイルを路面内に埋め込んでしまえばよい。地下にケーブルを埋設すれば電磁ノイズ障害の心配も緩和されるし，ISM（産業科学医療用）周波数を使う手もある。

突拍子もないことばかり言うてはいられないが，パワエレ技術によって出来そうもないことが可能になれば，SiC パワーデバイスを使いこなしパワエレ技術者の面目躍如である。

一方で，原発事故で経験したように，現代の科学技術でも思いも寄らぬ事故が発生している。新しいことへの期待とともに，思いも寄らぬ“こと”にも真正面から向き合う度量が欠かせない。われわれの研究グループでは，パワエレ機器と情報通信機器が融合した大規模統合システムの EMI（電磁障害）リスクの研究を進めている。パワエレ装置の電磁ノイズが通信機器の動作障害を引き起こせば，大規模システムは致命的な大事故となる。パワエレは今後ますます社会システムや市民生活の中で不可欠な技術に発展することは間違いないが，それだけに社会的責任も大きい。

SiC パワーデバイスの出現は，出来そうもないことへの挑戦の絶好の機会である。同時に，思いも寄らぬことへの洞察力も試されている。50 年後の社会でわれわれの Enabling Technology が合格点をもらえることを期待したい。楽しみでもあり，不安でもある。

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

高橋 良和 TAKAHASHI, Yoshikazu

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN, Toru

① まえがき

富士電機は、創業以来 90 年にわたり磨き上げてきた電気・熱エネルギー技術と、それを駆使したものづくり力で、地球規模の重要なテーマの一つであるエネルギー課題の解決に取り組んできている。

近年、ますます深刻となっている地球温暖化を防止し、地球環境との調和を図りつつ、安全・安心で持続可能な社会を実現する必要がある。そのため、太陽光発電などの再生可能エネルギーの普及と、エネルギーの効率的な利用を支えるパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術に対する世の中の期待は非常に大きい。

このような期待の中、富士電機では、省エネルギー（省エネ）で地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発し、製品化している。パワー半導体は、エネルギーと環境分野をはじめとした自動車、産業機械、鉄道車両および家電製品においてパワエレ技術のキーデバイスとして世の中に貢献している。

本稿では、パワーモジュール^{(*)1}、パワー IC^{(*)2}、パワーディスクリート^{(*)3}を中心に、パワー半導体の最新の技術および製品の現状と展望について述べる。

② パワーモジュール

図 1 に、パワーモジュール製品の応用例を示す。大容量市場向けには、SiC^{(*)4}ハイブリッドモジュール（1,700V, 3,300V, All-SiC モジュール^{(*)5}）と SiC-MOSFET^{(*)6}を搭載した All-SiC モジュールを開発した。また、SiC-SBD^{(*)7}と Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とを組み合わせた 1,700 V 耐

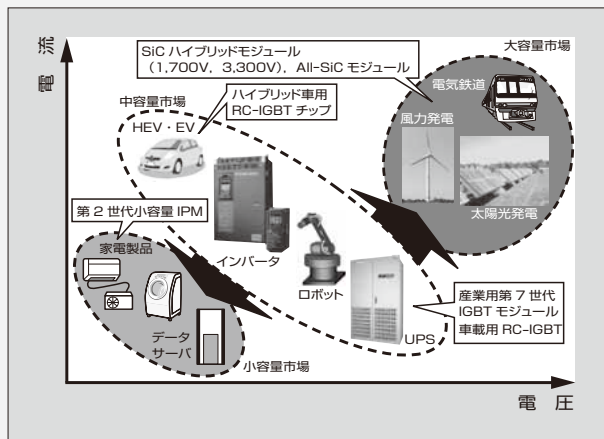


図 1 パワーモジュール製品の応用例

(*) 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) 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 1,200 V クラスまでのものが製品化されている。

(*) 3) 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。

(*) 4) 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。

(*) 5) 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、酸化物質絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。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。

(*) 6) 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。

(*) 7) IGBT

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

圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、製品化した。さらに、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、駆動用主変換装置（インバータ、コンバータ）に搭載して新幹線にて走行試験を実施中である。中容量市場では、産業用第 7 世代 IGBT モジュール、車載用 RC-IGBT^{(*)8} (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) モジュールを開発し、実用化した。小容量分野では、第 2 世代小容量 IPM^{(*)9} (Intelligent Power Module) を開発し、製品化した。

また、車載向けの直接水冷のためのパッケージ技術にも取り組んでいる。

2.1 All-SiC モジュールのパッケージ技術

近年、急速に普及している太陽光発電において、発電した電力をより効率的に供給するため、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パワーコンディショナ (PCS) の量産を 2014 年度に開始した。図 2 に PCS の外観と内蔵するパワーユニット、および All-SiC モジュールの外観を示す。All-SiC モジュールを搭載することで効率 98.8% を実現し、さらに装置の小型・軽量化も図っている⁽¹⁾。このモジュールは、従来の Si-IGBT モジュールと異なり、銅ピンとパワー基板を用いた三次元配線や、厚銅板と高熱伝導セラミックス基板 (Si₃N₄) を接合したセラミックス絶縁基板の採用により、小型、低インダクタンス、低熱抵抗化を図っている。また、これらをエポキシ樹脂で封止することによって、電氣的絶縁性を確保すると

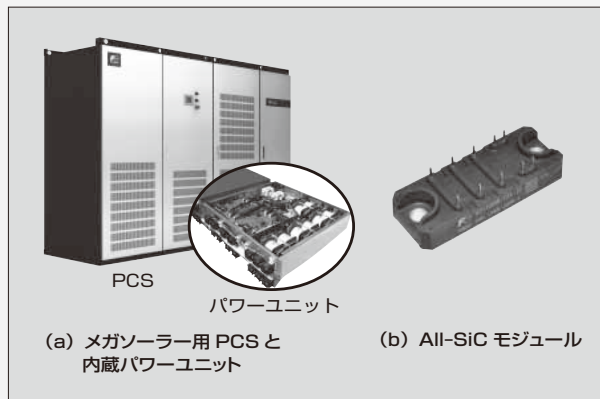


図2 メガソーラー用 PCS と All-SiC モジュール

もに、チップ接合部のひずみを緩和して信頼性を大きく向上させている (241 ページ “All-SiC モジュールのパッケージ技術” 参照)。

2.2 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

富士電機では、これまでに 600 V, 1,200 V, 1,700 V 耐圧の SiC-SBD の開発を完了しており、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。今回、系列の拡大を図るため、電気鉄道市場に向けた高信頼性 SiC ハイブリッドモジュールを開発し、製品化した。

1,700 V/1,200 A (2 in 1) 定格の SiC ハイブリッドモジュールは、高信頼性を確保するため、ベース材料に AlSiC (アルミニウムと炭化けい素の複合材料)、絶縁基板材料に高熱伝導率の AlN (窒化アルミニウム) を適用した高信頼性パッケージを採用している。また、電気鉄道市場では、キャリア周波数が約 0.5 kHz 以下という低いスイッチング周波数における運転が多いことから、定常損失が支配的となる。この SiC ハイブリッドモジュールでは、キャリア周波数が 0.3 kHz のとき、コレクターエミッタ飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ が低い仕様では、ターンオフ損失 E_{off} は増大するものの、発生損失は Si モジュールに対して 11%、標準仕様に対して 6% 低減する (245 ページ “1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール” 参照)。

2.3 3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

富士電機では、1,700 V を超える高耐圧化要求に応えるため、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発した。

図 3 に、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観・内部回路およびフットプリントサイズの比較を示す。FWD^{(*)10} (Free Wheeling Diode) には、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) と共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si-IGBT モジュールよりも発生損失を大幅に低減させた。2.4 節で述べる第 7 世代「X シリーズ」IGBT モジュールのために開発した Sn-Sb 系はんだをチップ下のはんだに適用することで、高信頼性を確保し、連続動作温度を Si-IGBT モジュールの 125 °C

(*) 8) 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 1 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。

(*) 9) 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。

(*) 10) 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。

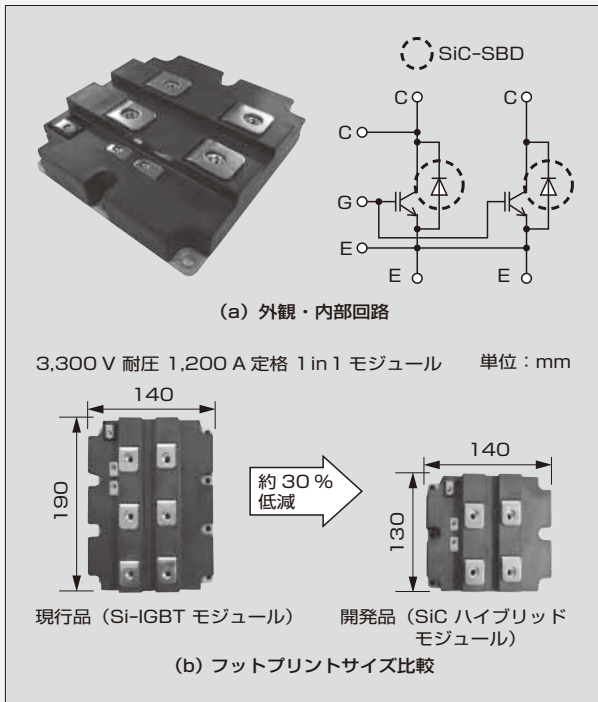


図3 3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュールの概要

から 150℃に向上させた。これら発生損失の低減および連続動作温度の向上によって高パワー密度化を実現し、図3(b)に示すとおり、現行品と比較してモジュールのフットプリントサイズを約30%低減した(249ページ“3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュール技術”参照)。

2.4 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール

富士電機では、IGBTモジュールのさらなる小型化、低損失化、高信頼性化を実現するために、新たなチップ技術およびパッケージ技術を開発し、これを適用して第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュールを開発した。本モジュールでは、チップ特性とパッケージの長期信頼性を向上することにより、チップ接合温度 T_j が175℃での連続動作を実現した。

チップの小型化、すなわちパワー密度の上昇に対しては、チップ接合温度の上昇とこれによる信頼性の低下が課題となる。新たに開発した薄型のAlN絶縁基板により放熱性を向上させるとともに、高強度はんだの採用とワイヤボンディング設計の最適化により、 ΔT_j パワーサイクル耐量も向上させた。

さらに、従来よりも耐熱性を向上させたシリコンゲルを採用することにより、XシリーズIGBTモジュールでは連続175℃動作が可能となった。また、放熱性も改善したことにより、同じ定格電流の第6世代「Vシリーズ」の製品と比べて、約35%の出力電流の増加が可能になった(図4)。従来製品からXシリーズIGBTモジュールに置き換えることによって電

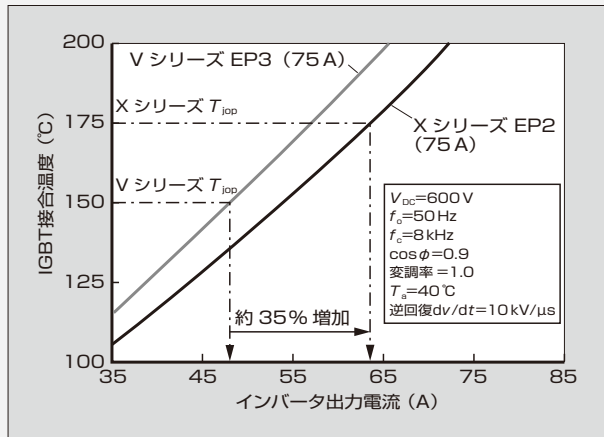


図4 インバータ出力電流とIGBT接合温度の関係

力変換装置が小型になり、今後の電力変換装置のさらなる普及と高効率化によって世界的なエネルギー問題の解決にも大いに貢献できる(254ページ“第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール”参照)。

2.5 第2世代小容量IPM

モータドライブシステムに必要となるパワーデバイスや制御ICなどを一つのパッケージに集積した小容量IPMを開発し、製品化してきた。小容量IPMには、三相インバータブリッジ回路、制御回路・保護回路を内蔵している。図5に製品の外観を、図6に回路構成を示す。

今回、さらなる省エネを図るため第2世代小容量IPMを開発した。第2世代小容量IPMは第1世代と同一の外形サイズ、ピン配置の互換パッケージ構造としている。ラインアップは600V/10~30Aであり、エアコンの入力電力1.5kVAのコンプレッサ用と、0.1~0.2kW出力の小容量の産業用インバータやサーボ向けに新たに10A定格を加え、系列拡充を行っている。

第2世代小容量IPMの特徴は次のとおりである。

- (a) 省エネ性能が向上する低損失特性
- (b) インバータの設計自由度向上と動作領域の拡大
- (c) 熱抵抗の低減

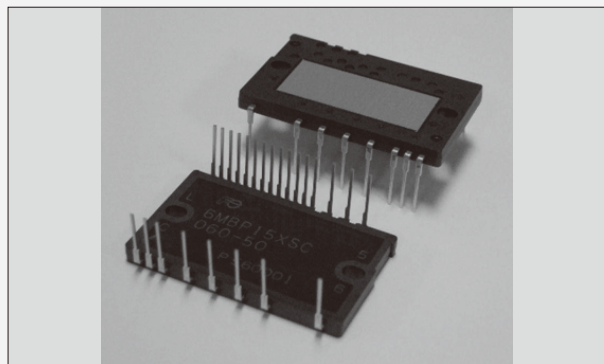


図5 第2世代小容量IPM

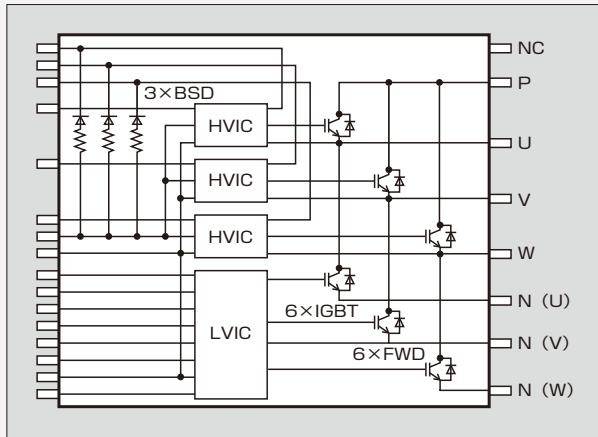


図6 内部等価回路の構成

通年エネルギー消費効率（APF：Annual Performance Factor）に対する省エネ性能として特に要求される中間負荷領域において、10%以上の損失を低減している。また、動作保証温度の拡大と熱抵抗の低減により、許容電流と適用容量を拡大し、システムの設計自由度が向上する製品となっている（259ページ“第2世代小容量IPM”参照）。

2.6 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術

車載用パワーモジュールには大幅な電力密度の向上が求められ、富士電機では、車載用アルミニウム直接水冷型パワーモジュールを開発し、製品化している。また、第1世代（2012年）の製品に対し、第2世代（2015年）、第3世代（2018年）と世代ごとに電力密度を20%以上向上する技術開発を行っている。図7に直接水冷構造を示す。今回、第3世代の直接水冷型パワーモジュールではIGBTとFWDを統合したRC-IGBTチップを採用することで、第2世代より30%の大幅なフットプリントの削減を行っており、冷却構造の最適化によって薄型化を実現している。

軽量なアルミニウム冷却器を用いた放熱性能の向上と高密度配線技術の技術展開に向けて、シミュレーションと信頼性予測技術を用いて次の設計技術を構築した。

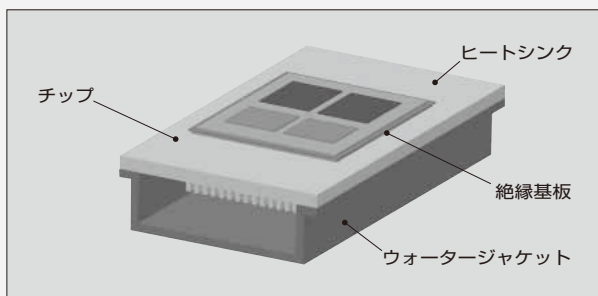


図7 直接水冷構造図

- (a) 高放熱冷却器の設計技術
- (b) 超音波接合の設計技術
- (c) 175℃連続動作保証技術

これを実現するため、冷媒の流れと熱伝がりを再現する高精度な熱流体シミュレーション技術、ならびに実機破壊モードに合わせたテストピースによる寿命予測技術により、高精度な製品設計技術を構築した。この設計技術を駆使して、要素技術の向上や製品開発期間の短縮を進め、早期の技術展開を実施している（274ページ“車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術”参照）。

2.7 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

富士電機では、ハイブリッド自動車（HEV）や電気自動車（EV）に搭載されるインバータの小型化や高効率化に貢献するために、車両内部の限られたスペースに搭載可能で、高電力かつ低損失な車載用第3世代標準モジュールを開発した。

図8に、車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの外観を示す。開発した製品は、カバー一体型のアルミニウム製の冷却ユニットを採用することで高い冷却性能を実現し、従来構造に比べて熱抵抗を30%低減した。また、新はんだを開発して信頼性を向上させ、175℃動作が可能となった。さらに、同製品に適用したRC-IGBTチップは、第7世代チップ技術を使用することで損失の低減を図った。RC-IGBTは、IGBTとFWDを一つのチップに収めたものである。従来のIGBTチップとFWDチップを組み合わせた場合の合計のチップ面積に比べて30%削減し、インバータ動作時の電力損失は20%以上低減した。

高放熱性能を実現した冷却システムの使用をはじめ、動作温度を175℃にし、RC-IGBTを搭載することにより、従来品に対して電力容量当たりの体積を40%削減した第3世代標準モジュールを実現した（269ページ“車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール”参照）。

2.8 車載用RC-IGBT

富士電機は、マイルドハイブリッド車用RC-IGBT

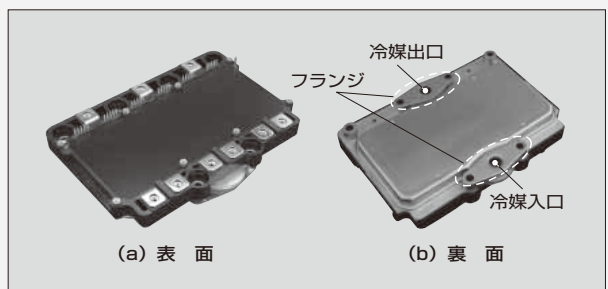


図8 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

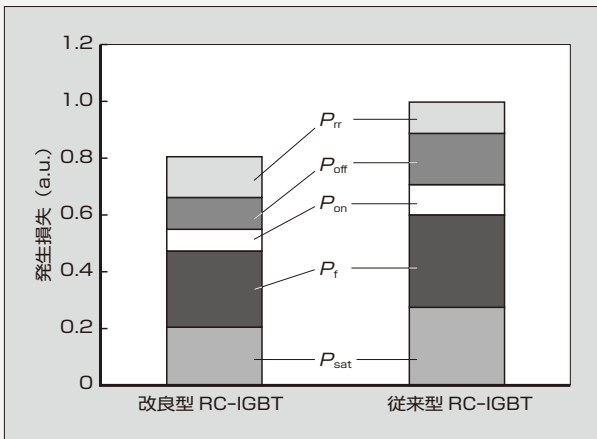


図9 車載用 RC-IGBT のインバータ動作時の発生損失

(従来型 RC-IGBT) を改良し、より低損失化した車載用 RC-IGBT (改良型 RC-IGBT) を開発した。フルハイブリッドやマイルドハイブリッドなどモータの各駆動方法に対応することができる。HEV のインバータ動作時を想定した発生損失では、図9に示すように定常損失 (P_{sat} , P_f) の低減が必須である。車載用 RC-IGBT では、表面構造の微細化、フィールドストップ (FS) 構造の最適化、ライフタイム制御方法の確立などで、低オン電圧化、低定常損失化、低スイッチング損失化を実現し、インバータ動作時の発生損失を約 20% 低減した (279 ページ “車載用 RC-IGBT” 参照)。

③ パワー IC ・ パワーディスクリートおよび車載用センサ

パワー IC ・ パワーディスクリート分野においては、ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」、第 2 世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」、高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」の製品化、およびインテリジェントパワーモジュール用 HVIC 技術の開発を行った。

また、自動車の環境負荷低減のために車載用燃料タンク圧検知相対圧センサを製品化した。

3.1 IPM 用 HVIC 技術

IPM は、システムにおける部品点数の削減や小型化、設計の簡素化などに貢献し、産業機械、エアコンなどの家電製品、サーバ用電源機器など幅広い用途で用いられている。

富士電機では、新たに 600 V/1,200 V 耐圧保証 HVIC

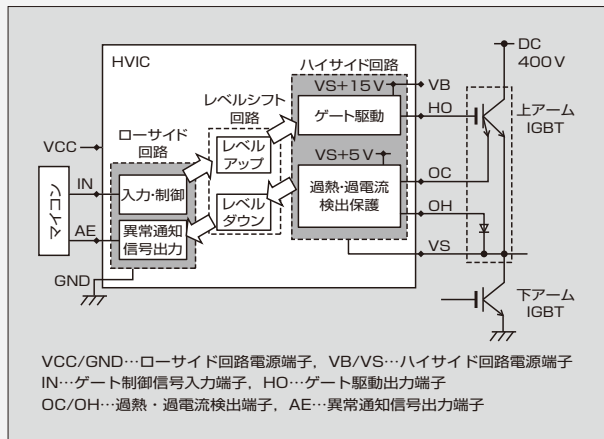


図10 1,200 V 耐圧保証 HVIC 回路および周辺回路ブロック図

技術を確立した。図10に、1,200 V 耐圧保証 HVIC 回路および周辺回路のブロック図を示す。上アーム側に過熱・過電流保護技術を導入することより素子保護機能を実現した。また、新規の省面積耐圧構造と高ノイズ耐量レベルシフト回路技術の導入により、20% の省面積化と高信頼性化を図った (264 ページ “IPM 用 HVIC 技術” 参照)。

3.2 ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」

富士電機では、以前から高効率、低待機電力、低ノイズカレントモード電源制御 IC を多数製品化している。ノート PC やインクジェットプリンタ分野において、新 CPU やモータの駆動負荷など最大出力電力の増大に対応するために PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」を新規に開発した。その特徴としては、高いスイッチング周波数に対応することによる 3 段電力出力、ライン電圧変動に強い過電流保護の高精度化やスイッチング周波数ジッタ拡大による EMI ノイズ低減効果の強化などがある。その結果、ピーク負荷対応を可能にしたほか、電源平均効率が 0.2 ~ 0.3% 向上できた (287 ページ “ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」” 参照)。

3.3 第 2 世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」

富士電機では、高効率な電力変換を実現可能とする優れた特性を持つ製品の開発に取り組んでいる。今回、素子の耐圧 BV_{DSS} と単位面積で規格化されたオン抵抗

(* 11) PWM

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

る。DC 入力に対し、一定周波数でオン・オフを繰り返す。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。

$R_{on} \cdot A$ とのトレードオフをさらに改善し、かつターンオフ時の跳ね上がり電圧を抑制することで誤オンを抑制し、使いやすさと電力変換機器の変換効率を向上した、第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」を開発し、製品化した。表1に、その製品系列を示す。

電源の CCM-PFC 回路部に搭載して、従来品と比較し、全負荷領域において高効率であることを確認した(292 ページ “第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」” 参照)。

3.4 高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」

無停電電源装置 (UPS) や PCS, 小型のインバータ溶接機では、スイッチングデバイスに対する小型・軽量化を可能とする高速スイッチングと低損失の要求が強い。今回、富士電機では、オン電圧とスイッチング特性のトレードオフを改善した高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」を開発し、製品化した。

従来品の「High-Speed V シリーズ⁽⁷⁾」に対して、High-Speed W シリーズでは、650 V および 1,200 V IGBT で、寄生容量を大幅に低減させた活性部構造と、FS 層の最適化、ホールの注入を抑制するコレクタ層、基板の薄化などを行い、高速駆動向けに E_{off} を約 40% 以上低減した。

5 kW 出力の UPS への適用を想定した発生損失のシミュレーションでは、1,200 V クラスの IGBT で、従来品に対してトータル損失を約 19% 低減した。ま

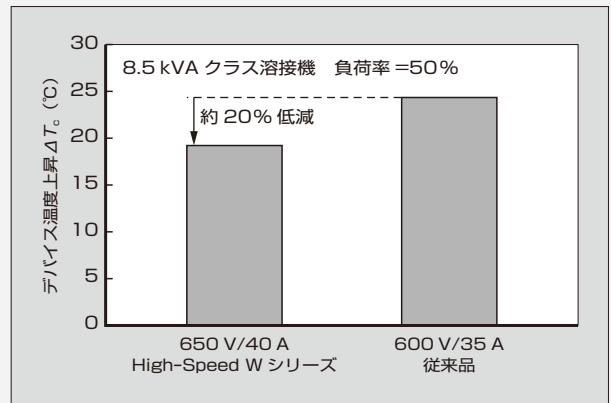


図11 600 V系 IGBT の溶接機評価結果

た、図11の600 V系 IGBT の溶接機評価結果に示すように、8.5 kVA クラスの溶接機では 600 V クラスの IGBT で、デバイスの温度上昇が従来品より約 5°C (約 20%) 低く抑えられる。1,200 V IGBT, 600 V IGBT とともに発生損失の大きな割合を占める E_{off} を低減させたことが、トータル損失の低減に大きく寄与している(296 ページ “高速ディスクリット IGBT 「High-Speed W シリーズ」” 参照)。

3.5 車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ

米国では、自動車の環境負荷の低減が求められ、その一環として気化燃料漏れの検出が義務化されている。この検出を実現するため、富士電機では、車載用燃料タンク圧検知相対圧センサを開発した。

図12にセンサセルの実装形態の例を示す。相対圧センサのパッケージに、燃料耐性を持つ O リングや車

表1 「Super J MOS S2 シリーズ」の製品系列

V_{DS} (V)	$R_{DS(on)max}$ (mΩ)	I_b (A)	製品系列			
			TO-247 パッケージ	TO-3P パッケージ	TO-220 パッケージ	TO-220F パッケージ
600	25.4	95.5	FMW60N025S2	—	—	—
	40	66.2	FMW60N040S2	—	—	—
	55	49.9	FMW60N055S2	—	—	—
	70	39.4	FMW60N070S2	—	—	FMV60N070S2
	79	37.1	FMW60N079S2	—	FMP60N079S2	FMV60N079S2
	88	32.8	FMW60N088S2	—	FMP60N088S2	FMV60N088S2
	99	29.2	FMW60N099S2	—	FMP60N099S2	FMV60N099S2
	125	22.7	FMW60N125S2	—	FMP60N125S2	FMV60N125S2
	160	17.9	FMW60N160S2	—	FMP60N160S2	FMV60N160S2
	190	15.5	FMW60N190S2	FMH60N190S2	FMP60N190S2	FMV60N190S2
	280	10.4	—	FMH60N280S2	FMP60N280S2	FMV60N280S2
	380	8.1	—	—	FMP60N380S2	FMV60N380S2

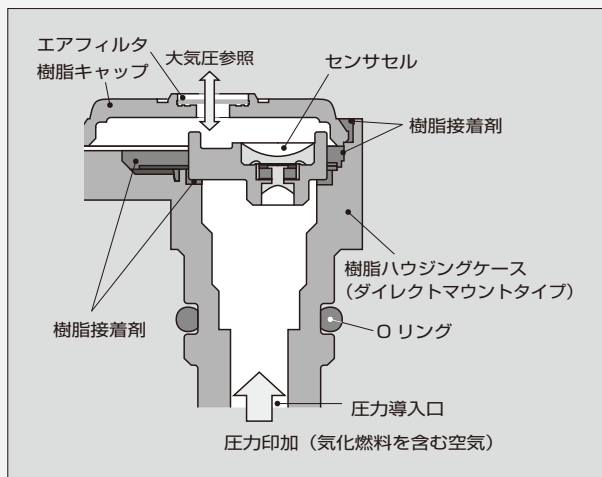


図 12 実装形態の例

載 IP 試験規格の耐じん性 (IP6KX) と耐水性 (IPX9K) をクリアしたエアフィルタを採用し、気化燃料を含んだ空気や外来異物に影響されにくい、高耐久性かつ高精度な圧力検知を実現した (283 ページ “車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ” 参照)。

4 あとがき

パワー半導体は、産業機器、鉄道車両、自動車、情報機器および新エネルギーなどの分野におけるパワーエレクトロニクス製品にとって必要不可欠なキーデバイスである。

IGBT、All-SiC モジュール、ハイブリッドモジュールおよびパワー IC・パワーディスクリートのパワー半導体の高性能化、高機能化および高信頼性化はさらに進み、これらパワー半導体製品を適用したパワーエレクトロニクス製品のエネルギーの高効率化もますます進展していくであろう。

富士電機では、パワー半導体の技術革新の追求により、エネルギーを最も効率的に利用できる製品をつくり出し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Momose, F. et al. “The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module”, PCIM Europe 2015.
- (4) Yamada, T. et al. “Novel Small Intelligent Power Module For RAC”, proc. 2012 PCIM Asia.
- (5) 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.
- (6) Higuchi, K. et al. “An intelligent power module with high accuracy control system”, Proceeding of PCIM Europe 2014, p.39-46.
- (7) 渡島豪人ほか. 高速ディスクリート IGBT 「High-Speed V シリーズ」 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.393-397.



高橋 良和

パワー半導体の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、エレクトロニクス実装学会会員、日本デザイン学会会員。



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兼技術開発本部電子デバイス研究所長。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。

All-SiC モジュールのパッケージ技術

All-SiC Module Packaging Technology

仲村 秀世 NAKAMURA, Hideyo

西澤 龍男 NISHIZAWA, Tatsuo

梨子田 典弘 NASHIDA, Norihiro

メガソーラー用パワーコンディショナに新型パッケージ構造の All-SiC モジュールを適用し、変換効率 98.8% を達成して省エネルギーを実現した。このパッケージ構造は、従来のワイヤに変わる銅ピンとパワー基板を用いた三次元配線や、熱硬化性エポキシ樹脂によるフルモールド構造を採用することにより、小型、低インダクタンス、高信頼性という特徴を持つ。設計に当たっては、構造設計によって性能の最適化を図るとともに、樹脂流動シミュレーションや樹脂流動の可視化によるモールドプロセス設計を行って、ボイドを抑制したフルモールド構造を実現した。

We applied the All-SiC (silicon carbide) module with new package structure to mega solar power conditioning sub-system (PCS), achieving 98.8% energy conversion efficiency and resulting in energy conservation. Key technologies are 3 dimensional wiring using Cu pins with power board instead of conventional Al wiring and full-mold structure using the thermosetting epoxy resin. These technologies lead to small package size, low inductance, and high reliability. We have optimized the package design to bring out the intrinsic performances of SiC device. Resin flow analysis and its visualization methods are carried out to design molding process, resulting in the full mold structure with free air void.

1 まえがき

地球温暖化などの環境問題への関心は年々高まっており、CO₂ などの温室効果ガスの排出量の削減が求められている。その実現に当たり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。従来主流であった Si（シリコン）デバイスが改良が進められ、既に物性限界に近づいている。このような中で、次世代半導体である SiC（炭化けい素）デバイスにより、さらなる低損失化が可能となり、省エネ化への貢献が期待される。

富士電機では、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）を使った All-SiC モジュールを開発し、メガソーラー用パワーコンディショナ（PCS）に適用している。本稿では、この All-SiC モジュールのパッケージ技術について述べる。

2 新型パッケージの特徴

メガソーラーなどの大容量太陽光発電において、発電した電力をより効率的に供給するため、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。図 1 に、メガソーラー用 PCS の外観と内蔵するパワーユニット、および All-SiC モジュールの外観を示す。昇圧回路部に All-SiC モジュールを採用し、98.8% と高効率化して省エネを実現し、さらに装置の小型・軽量化も図ったものである⁽¹⁾。

図 2 に、All-SiC モジュールに採用した新型パッケージ

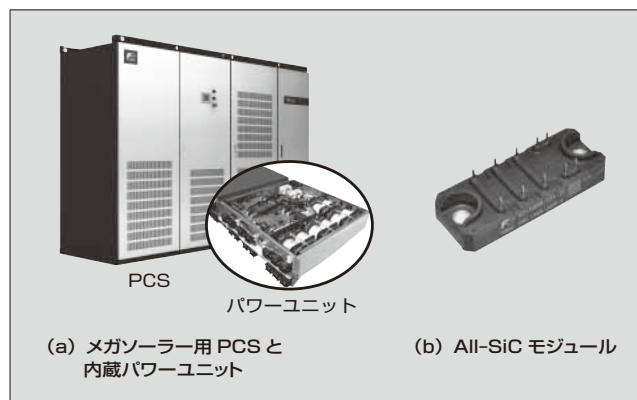


図 1 メガソーラー用 PCS と All-SiC モジュール

と Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールに採用していた従来パッケージの断面構造を、表 1 に代表的な特性の比較を示す。新型パッケージでは、サイズが小さい SiC チップを並列に接続し、しかも大電流を流すことができるように、チップ上の電気配線にはアルミニウムワイヤではなく、銅ピンとパワー基板を用いた三次元配線を採用している。これにより、フットプリントを従来品の約 40% まで削減している。この小型化と三次元配線の効果により、インダクタンスを従来品の 1/4 以下まで低減できた。また、厚銅板と高熱伝導セラミックス基板（Si₃N₄）を接合したセラミックス絶縁基板と金属ベースレス構造により、熱抵抗を約 50% に低減している⁽²⁾⁽³⁾。さらに、エポキシ樹脂を封止材料に使用することで、チップやセラミックス絶縁基板の電氣的絶縁性を確保するとともに、チップと銅ピンの接合部などにおけるひずみを抑制して信頼性を向上させている。このとき、エポキシ樹脂封止をトランスファーマールド成形で行うことにより、従来の樹脂ケースを不要にし、小型化と生産性の向上につなげることができ

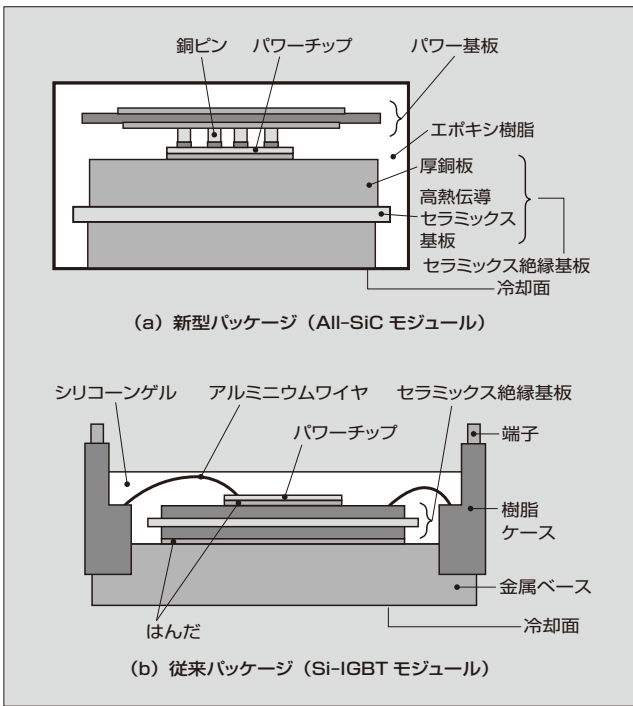


図2 パッケージの断面構造

表1 新型パッケージと従来パッケージの代表的な特性の比較 (1,200V/100A 定格における相対比較)

パッケージ特性	従来パッケージ	新型パッケージ
熱抵抗 (K/W)	0.469	0.209
インダクタンス (nH)	52	12
フットプリント	1	0.42

る。新型パッケージ構造では、エポキシ樹脂がモジュールの性能を左右する重要な構成材料となっている。

3 パッケージ構造設計

3.1 内部配線構造

SiC-MOSFET は、従来の Si-IGBT に比べて高速スイッチングが可能である。その性能を十分に活用するためには、スイッチング速度に比例して増加するサージ電圧を低減する必要があり、内部配線の低インダクタンス化が不可欠である。

新型パッケージでは、図2(a)のように、銅ピンとパワー基板を用いた三次元配線を採用することによって小型化している。これにより、配線距離が短くなり、自己インダクタンスを低減している。さらに、パワー基板とセラミックス絶縁基板を平行に配置し、かつ電流の変化 (di/dt) が逆方向になるように配線することでインダクタンスの低減を図っている⁽⁴⁾。この構造では、図3に示すように、二つの基板を近づけるほどインダクタンスが低減するので、絶縁性能や組立性に影響のない範囲で狭間隔に設定している。これらによって、新型パッケージのPN間インダクタンスは、従来パッケージの1/4以下(約12nH)となった⁽⁵⁾。

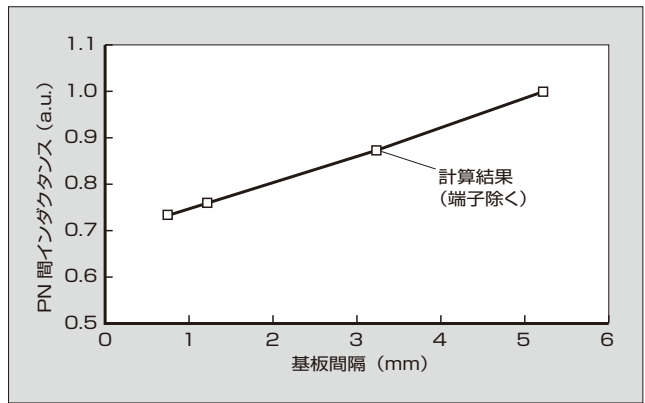


図3 基板間隔とインダクタンスの関係

メガソーラー用 PCS では大電流を扱うため、新型パッケージを採用した All-SiC モジュールを複数個並列に接続して使う。その際のインダクタンスは、モジュールの個数に反比例するため、従来のように大容量モジュールを少数使う場合よりも、さらに高速スイッチングに有利となる。

3.2 封止構造

新型パッケージでは、熱硬化性エポキシ樹脂によるフルモールド構造を採用し、チップ上の電極や銅ピン接合部などを樹脂で押さえ込むことで、そのひずみを低減した⁽⁶⁾。これにより、 $\Delta T_j=150^\circ\text{C}$ のパワーサイクル寿命は、従来パッケージに対して20倍以上に向上している⁽⁷⁾。

しかし、フルモールド構造では、線膨張係数が異なる部材を一体化するため、高温下で硬化したものを常温に戻すだけで、内部に応力が発生するとともに、モジュール全体の反りが生じる。反りは、冷却フィンに取り付ける際の応力増加や熱抵抗増加、さらには動作時の温度変化によるコンパウンドのポンプアウト現象^(注)につながる可能性があるため、極力小さくすることが望ましい。

図4は、新型パッケージの突起部を含まない主要部厚さ(樹脂厚さ)と反りの関係をFEM(Finite Element Method:有限要素法)解析と実測で調べた結果である。この結果から、特定厚さを境に、パッケージ厚さが薄くなっても厚くなっても反りが小さくなるのが分かる。これは、パッケージが薄くセラミックス絶縁基板の剛性が支配的になる領域では、樹脂厚さの減少とともにセラミックス絶縁基板にかかる応力が減って反りが減少し、パッケージが厚く樹脂剛性が支配的になる領域では、樹脂厚さの増加とともに樹脂剛性がさらに増してセラミックス絶縁基板の影響を受けにくくなり反りが低減するものと考えられる。ただし、セラミックス絶縁基板の厚さやチップ厚さ、パワー基板の積層などを考慮すると、現実的には樹脂剛性が支配的な領域でモジュールを製作することになる。したがって、新型パッケージで反りを抑制するためには、樹脂

〈注〉ポンプアウト現象：動作時の温度変化によりパッケージの変形が繰り返されることで、冷却フィンとの間にあるコンパウンドが外に押し出され、熱抵抗が増加する現象をいう。

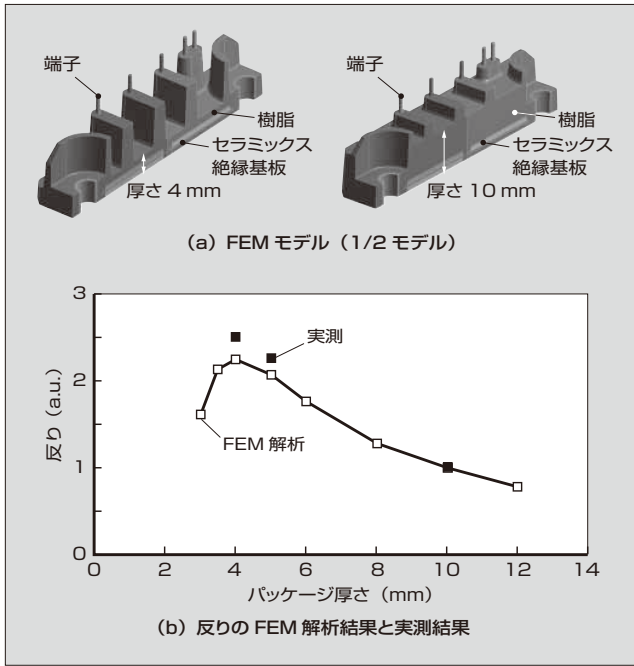


図4 新型パッケージのFEM モデルと反り解析結果および実測結果

厚さを厚くすることが効果的である。その際、樹脂を厚くするほど外部に取り出す端子が長くなり、インダクタンスが増加するため、樹脂厚さとインダクタンス値の最適化が重要である。さらには、端子の対地間絶縁距離（面内・空間距離）の考慮も必要である。

このように、低インダクタンス化のためにパワー基板とセラミックス絶縁基板を狭間隔で配置する一方で、反り低減の観点からモジュールの厚さを厚くする設計であるため、モジュールの内部構造は、冷却面側に集中した配置となっている。このような構造に対してトランスファーモールド成型を行う場合、樹脂の流動が不均衡となり、狭い部分に十分に充填（じゅうてん）されない懸念があるため、樹脂流動を正確に把握したモールドプロセス設計が必要である。

4 モールドプロセス設計

4.1 シミュレーション技術と金型設計

新型パッケージのトランスファーモールド成型における課題としては、パワー基板とセラミックス絶縁基板の間にあるチップや銅ピンなどの内部構造体が樹脂の流動や充填を阻害すること、ならびに狭間隔部とその他の部位の充填速度が異なることで、モジュール内にエアトラップによるポイドやウエルド（樹脂流動の会合部）が発生しやすいことなどがある。

そこで、金型設計に際して樹脂流動シミュレーションを行った。図5に、樹脂流動シミュレーションのモデルとシミュレーションの結果を示す。この結果から、流動速度やウエルド位置、充填状況など樹脂流動状態の把握をはじめ、エアトラップ発生ポイントや流動する樹脂に混入した気泡が滞留しやすい位置の推定を行い、金型設計に反映させた。

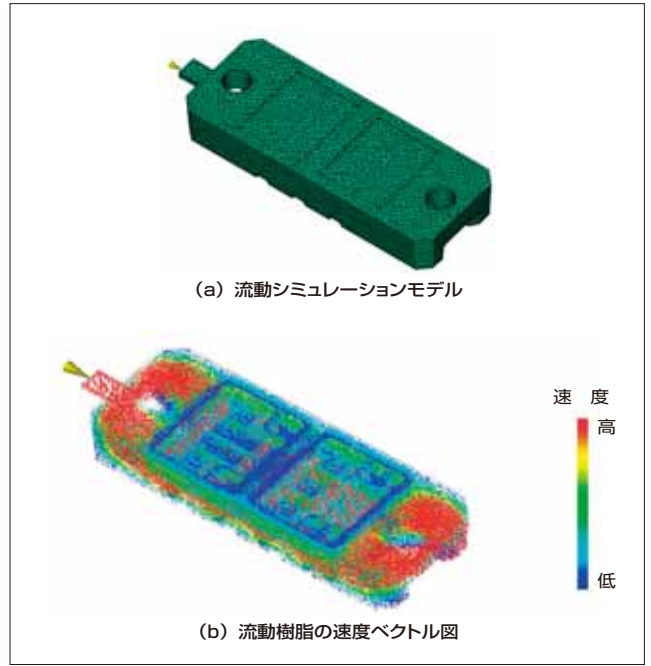


図5 樹脂流動シミュレーション

4.2 樹脂流動の可視化

製品品質や量産性の向上のためには、樹脂流動シミュレーションでは織り込めないエアバントの動作や気泡の流動と排出の挙動などを考慮した量産金型の設計とプロセス条件の調整が必要である。

そこで、図6に示すように、金型とガラスを組み合わせた実験用の型を製作し、樹脂流動の可視化実験を行った。その結果から、エアトラップが発生する部位に適正なエアバントを配置することに加え、ゲート形状の最適化や流動速度、温度、圧力など流動条件の調整を行って、ポイドの発生や滞留を抑えた。例えば、図6(b)では、モジュールの

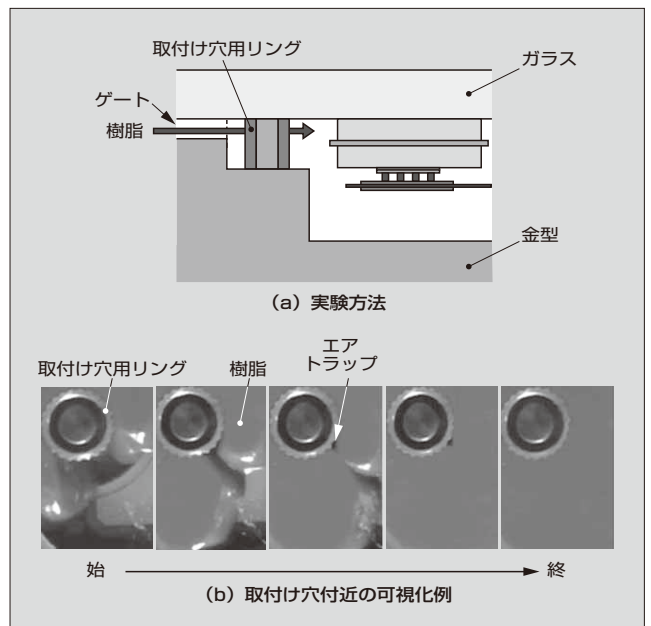


図6 樹脂流動可視化実験

取付け穴付近で発生したエアトラップによるボイドが、リングの内側に押し出されて消滅するまでの様子が見える。このような動作は、樹脂流動シミュレーションだけでは把握することが難しい。

前述のように、樹脂流動シミュレーションと樹脂流動の可視化を併用することで、モジュール内のボイド発生メカニズムとその動きなどを正確に捉え、金型設計と成型条件に反映できるモールドプロセス設計技術を開発した。これによって、フルモールド構造の All-SiC モジュールを実現した。

5 あとがき

All-SiC モジュールのパッケージ技術について述べた。このパッケージの設計においては、構造設計技術のみならず、樹脂流動シミュレーションや樹脂流動の可視化によるモールドプロセス設計技術が重要である。

今後も、小容量から大容量モジュールへの展開を通じて、さまざまなパワーエレクトロニクス機器に適用範囲を広げ、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) 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.
- (2) 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.
- (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) 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.
- (5) 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.
- (6) Hinata, Y. et al. “Full SiC Power Module with Advanced Structure and its Solar Inverter Application”, Proceedings of APEC, 2013, p.604-607.
- (7) Nashida, N. et al. “All-SiC Power Module for Photovoltaic Power Conditioner System”, Proceedings of ISPSD, 2014, p.342-345.



仲村 秀世

MEMS 機器の研究開発、パワー半導体用パッケージの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



西澤 龍男

パワー半導体用パッケージ組立の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



梨子田 典弘

パワー半導体用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

1,700-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module

小根澤 巧 ONEZAWA, Takumi

北村 祥司 KITAMURA, Shoji

磯 亜紀良 ISO, Akira

省エネルギーに貢献するインバータ用のパワーデバイスとして、電気鉄道市場に向けた 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールを開発した。IGBT には第 6 世代の IGBT チップを搭載し、FWD には SiC-SBD チップを搭載した。製品定格は、1,700 V/1,200 A (2 in 1) であり、損失を重視した標準仕様と低スイッチング周波数に適した低 $V_{CE(sat)}$ 仕様との 2 系列を持つ。標準仕様は、従来の Si モジュールに対して発生損失の 18% 低減を実現した。また、インバータにおける発生損失の比較において、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、低スイッチング周波数の条件において標準仕様に対して 6% の低減を実現した。

Fuji Electric has developed a SiC hybrid module with a 1,700-V withstand voltage. It is designed for use in the traction market as a power device that can be utilized in inverters that contribute to energy savings. This module is equipped with 6th-generation IGBT chips and applies SiC-SBD chips to its FWDs. It has a product rating of 1,700 V/1,200 A (2 in 1) and has 2 specifications: standard specifications that make much of power dissipation, and low $V_{CE(sat)}$ specifications suitable for low switching frequencies. The standard specifications reduce loss by 18% compared with conventional Si modules. Furthermore, the low $V_{CE(sat)}$ specifications achieve 6% loss reduction compared with the standard specifications at low switching frequency condition.

① まえがき

近年、地球温暖化の進行を抑制するため、CO₂をはじめとした温室効果ガスの排出量の低減が求められている。電力変換機器をはじめとするパワーエレクトロニクス機器に対してもその要求は例外ではなく、温室効果ガスの排出量をいっそう削減するために、さらなる省エネルギー（省エネ）を行う必要がある。電力変換機器は、電気鉄道をはじめとする社会インフラ向けやエアコンなどの消費者向けなど、社会生活全体に入り込んでおり、省エネ化による温室効果ガス削減への寄与が大きい。この電力変換機器に搭載されているインバータの省エネ化は、パワーデバイス、回路、制御などの構成要素の技術革新によって実現できる。パワーデバイスでは、さらなる低損失化を達成し続けていくことが重要な使命である。

現在、主流のパワーデバイスは Si（シリコン）の IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と FWD（Free Wheeling Diode）のチップを用いた IGBT モジュールである。しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつあり、今後、大幅な低損失化が期待できない。高耐熱性と高破壊電界耐量の特徴を持った SiC（炭化けい素）デバイスにより、Si デバイスでは実現困難な飛躍的な低損失化が可能になり、インバータ装置の高効率化や小型化が実現できる。

富士電機では、開発した 600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧の SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）チップと Si-IGBT チップとを組み合わせ搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。中でも電気鉄道の主電源向けの 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの製品開発に注力し、系列の拡大を図っている。この用途では、高耐圧、大容量化が必要不可欠であり、これまでに培ってきた大容

量 IGBT モジュール技術を継承した SiC ハイブリッドモジュールを開発している^{(1)~(4)}。

本稿では、1,700 V/1,200 A (2 in 1) 定格の SiC ハイブリッドモジュールについて述べる。

② 概要

図 1 に、1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観を示す。ベース材料に AlSiC（アルミニウムと炭化けい素の複合材料）を、絶縁基板材料に高熱伝導率の AlN（窒化アルミニウム）を使用した高信頼性パッケージである。AlSiC は、線膨張係数が $7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり AlN 基板の $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に近いいため、Cu（銅）ベースに比べてヒートサイクル寿命や、パワーサイクル寿命が向上する。

図 2 に等価回路を示す。IGBT には第 6 世代の IGBT チップを搭載し、FWD には 1,700 V 耐圧の SiC-SBD チップを搭載した。

電気鉄道向けでは、キャリア周波数が約 0.5 kHz 以下という低いスイッチング周波数における運転が多く、定常

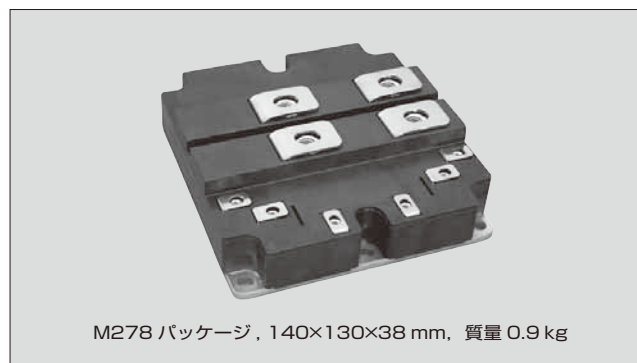


図 1 1,700 V耐圧SiCハイブリッドモジュール

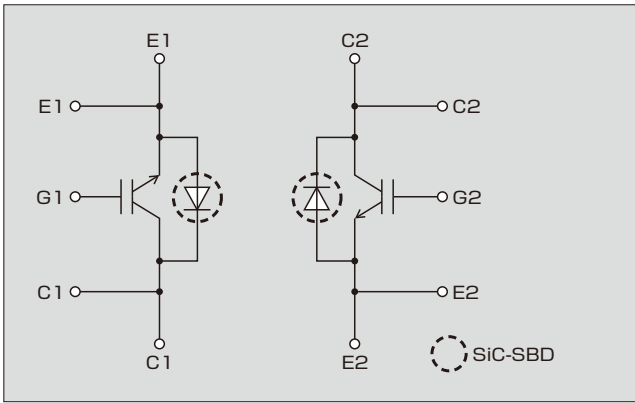


図2 1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの等価回路

損失が支配的である。したがって、低い飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ 特性が望ましい。また、大容量インバータの主回路では、小・中容量のものに比べて主回路インダクタンス L_s が大きくなる。式(1)で示すように、 L_s とターンオフ電流の傾き di/dt の影響によって発生するターンオフサージ電圧 V_{sp} が大きくなるため、 V_{sp} が低いものが望ましい。しかし、この V_{sp} を抑制するため、ターンオフ速度を遅くすると、損失が増大するという問題がある。このような観点から、低 $V_{CE(sat)}$ と低 V_{sp} という要求を満足するため、スイッチング損失を重視した標準仕様に加えて、定常損失と V_{sp} を重視した低 $V_{CE(sat)}$ 仕様を系列に加えている。搭載する IGBT のチップの厚さを最適化することで、 $E_{off}-V_{CE(sat)}$ のトレードオフを改善し、コレクタからのキャリア注入量を調整することによってトータル損失の最小化を実現した。

$$V_{sp} = V_{cc} + L_s \frac{di_c}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

- V_{sp} : ターンオフサージ電圧 (V)
- V_{cc} : 回路電圧 (V)
- L_s : 主回路インダクタンス (H)
- i_c : コレクタ電流 (A)

3 特性

3.1 標準仕様の 1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

(1) FWD の出力特性

今回、SiC ハイブリッドモジュールに搭載した 1,700V 耐圧の SiC-SBD の順方向電圧 V_F - 順方向電流 I_F 特性を図 3 に示す。並列に接続されたチップの一つに他のチップよりも大きな電流が流れようとするとき SiC-SBD の強い正の温度特性によって抵抗が増加し、電流の増加を抑制するよう自己調整を行うので、電流の不均衡は発生しにくくなる。そのため、チップの並列接続が多い大容量 IGBT モジュールにおいて、有効な特性である。

(2) スwitching 特性

図 4 に、SiC ハイブリッドモジュールと Si モジュールの逆回復波形の比較を示す。SiC ハイブリッドモジュールでは、逆回復電流のピーク値 I_{rp} が大幅に下がる。これは

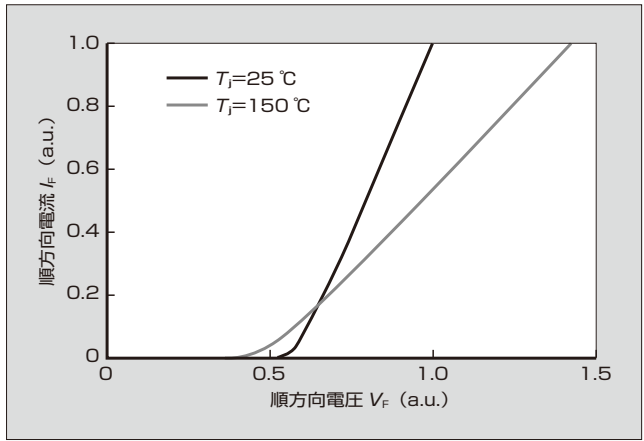


図3 $V_F - I_F$ 特性

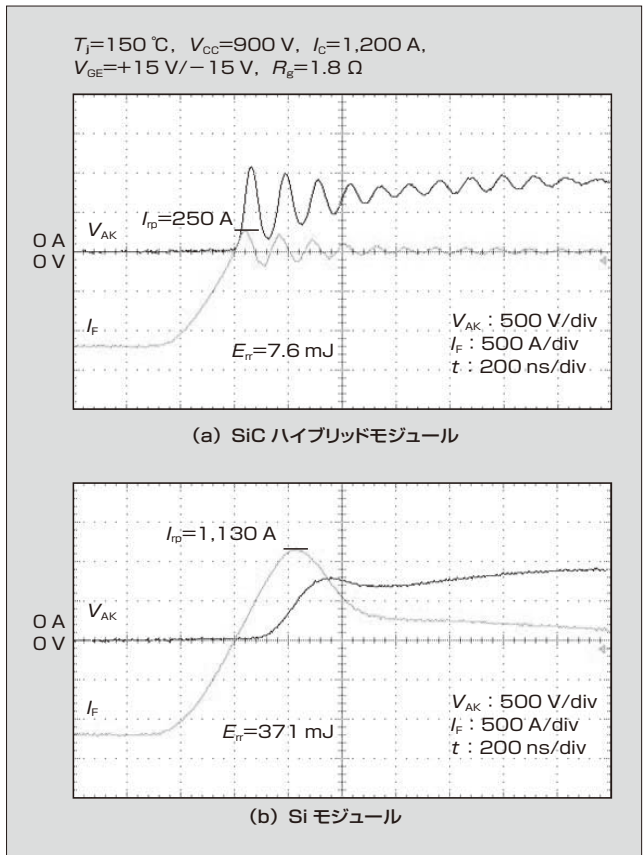


図4 逆回復波形

SiC-SBD がユニポーラデバイスであり、少数キャリアの注入と掃出しが起きないことによる。図 5 に、SiC ハイブリッドモジュールと Si モジュールのターンオン波形の比較を示す。SiC ハイブリッドモジュールは、前述のように逆回復電流を大幅に削減できるため、それを反映したターンオン電流のピーク値 I_{cp} も大幅に低減できる。

このように、Si モジュールでは、 E_{rr} が 371mJ であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールでは 7.6mJ となり、約 98% 低減した。さらに、 E_{on} は Si モジュールで 585mJ であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールで 315mJ となり、約 46% 低減した。

(3) インバータにおけるモジュールの発生損失

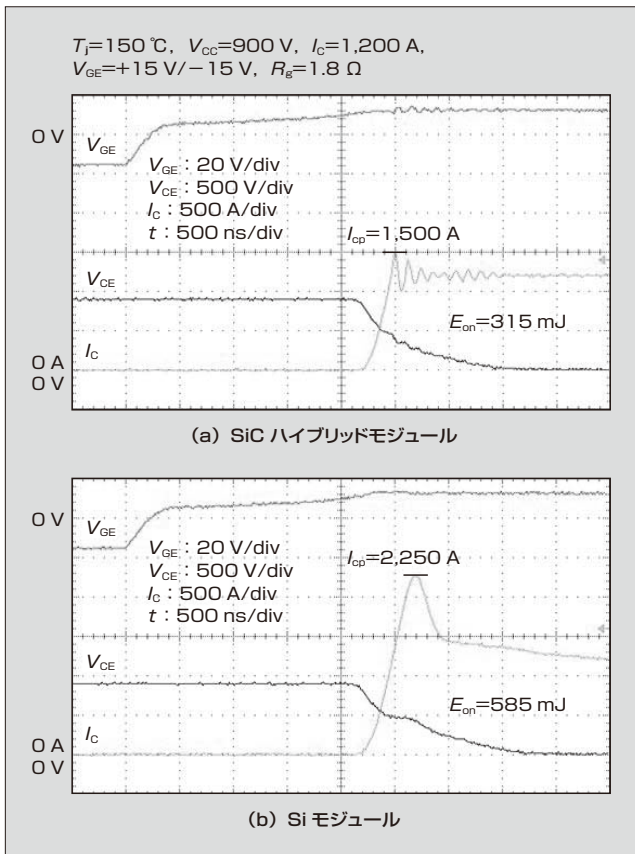


図5 ターンオン波形

図6に、インバータにおける発生損失のシミュレーション結果を示す。SiCハイブリッドモジュールの発生損失は、Siモジュールと比較してキャリア周波数が0.3kHz、1kHz、3kHzのとき、それぞれ5%、18%、32%低減できることが分かる。このように、キャリア周波数を高くすることで、損失低減率が大きくなることから、高周波動作においてSiCハイブリッドモジュールの適用が期待できる。

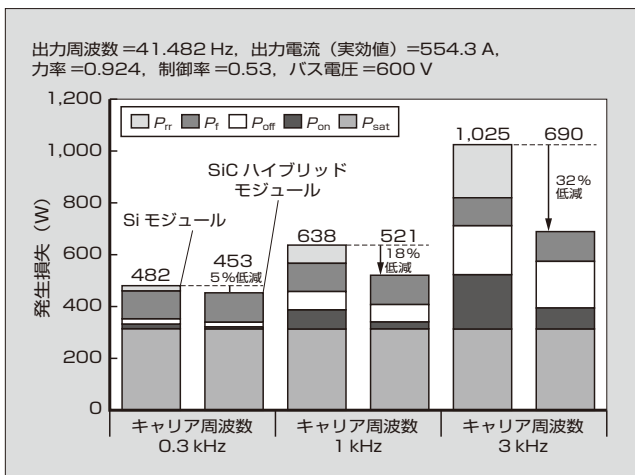


図6 インバータにおける発生損失のシミュレーション

3.2 低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

(1) IGBT の出力特性

図7に $V_{CE(sat)} - I_C$ 特性を示す。標準仕様と低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、共に正の温度特性を持つため、電流の不均衡は発生しにくくなり、容易に並列接続ができる。また、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様では、標準仕様に対して $T_j=25^\circ\text{C}$ で 0.20 V、 $T_j=150^\circ\text{C}$ で 0.22 V 低減している。

(2) スwitching特性

図8にターンオフ波形の比較を示す。標準仕様では V_{sp} が 1,420 V であるのに対し、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様では 1,260 V と

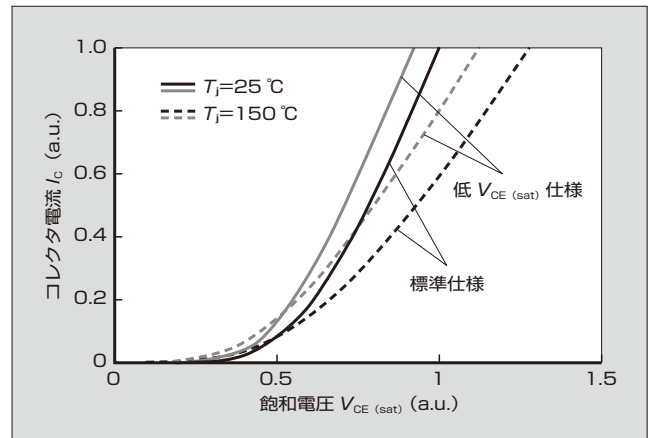


図7 $V_{CE(sat)} - I_C$ 特性

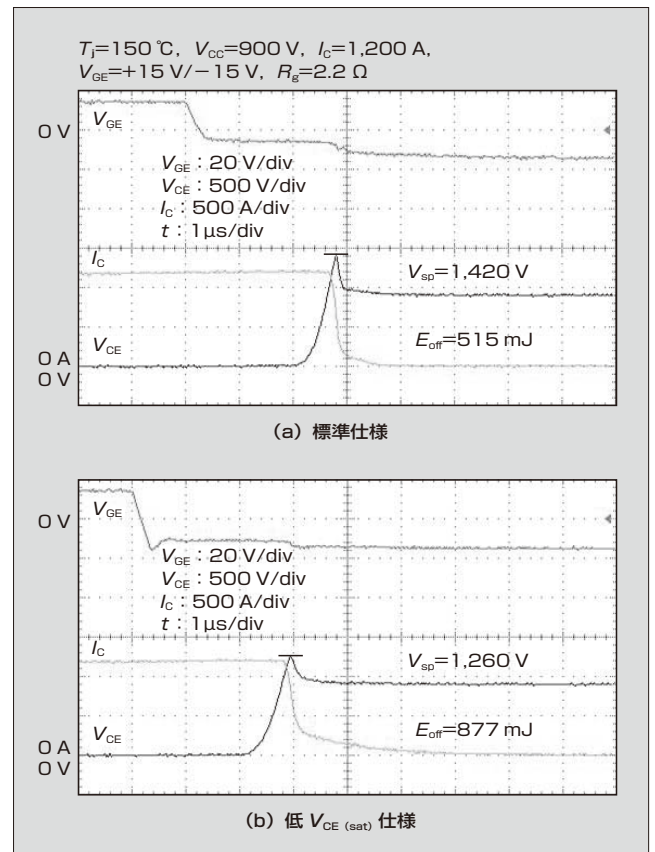


図8 ターンオフ波形

なり 160 V 低減した。図 9 に $V_{sp}-I_C$ 特性を示す。定格電流 1,200 A で約 10% 低減することが分かる。図 10 にターンオフ損失 $E_{off}-I_C$ 特性を示す。低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の E_{off} は、標準仕様と比較して定格電流で約 70% 増大することが分かる。これは、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様ではサージ電圧を抑制するために、コレクタ側からのキャリア注入量を最適化することにより、テール電流が大きくなっているためである。

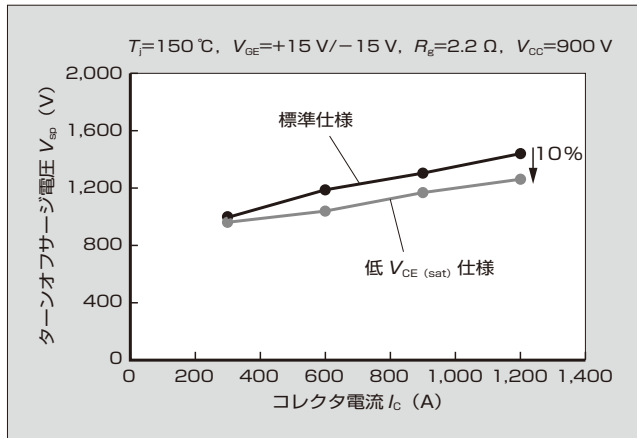


図 9 $V_{sp} - I_C$ 特性

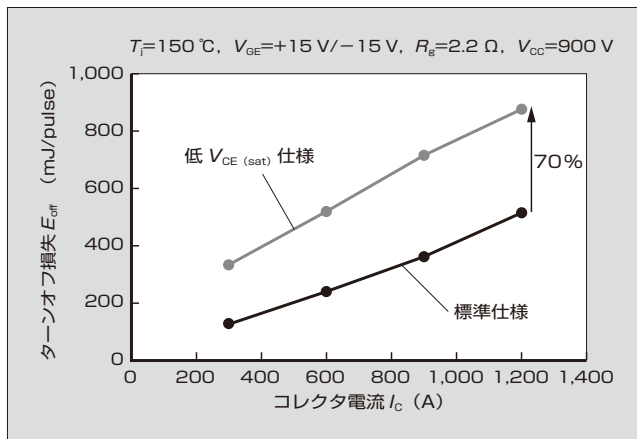


図 10 $E_{off} - I_C$ 特性

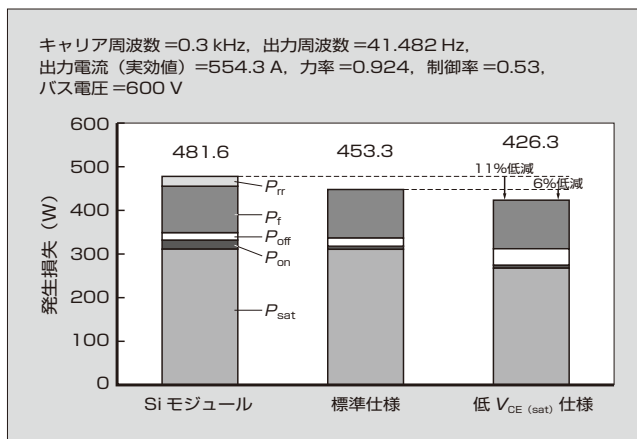


図 11 インバータにおける発生損失のシミュレーション結果

(3) インバータにおけるモジュールの発生損失

図 11 に、インバータにおける発生損失のシミュレーション結果を示す。キャリア周波数が 0.3 kHz のとき、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様の P_{off} は増大するものの、発生損失は Si モジュールに対して 11%、標準仕様に対して 6% 低減する。このように、低 $V_{CE(sat)}$ 仕様は、キャリア周波数が小さい領域において、 V_{sp} の低減とともに標準仕様よりも発生損失を低減できる。

4 あとがき

本稿では、1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールについて述べた。本製品は、デバイス自身の大幅な損失低減により、インバータの高効率・小型化に大きく貢献できると考える。今後、さらなる SiC ハイブリッドモジュールの系列化を推進するとともに、IGBT の代わりに SiC-MOSFET のチップを、FWD の代わりに SiC-SBD のチップを搭載した All-SiC モジュールの系列化を推進し、省エネルギー化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 木下明将ほか. “高温での V_T を特徴とした 600 V/1,200 V クラス SiC-SBD”. つくば市. 2010-10-21. 応用物理学学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 19 回公演.
- (2) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (3) 小林邦雄ほか. 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.240-243.
- (4) 小林邦雄ほか. 1,200 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.240-243.



小根澤 巧

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。



北村 祥司

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。



磯 亜紀良

IGBT モジュール開発のパッケージ設計に従事。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。

3,300V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール技術

3,300-V Withstand Voltage SiC Hybrid Module Technology

金子 悟史 KANEKO, Satoshi

金井 直之 KANAI, Naoyuki

辻 崇 TSUJI, Takashi

パワーエレクトロニクス機器には、省エネルギー化に加えて小型・軽量化、高出力化などの性能向上が強く求められている。富士電機は、これに応えるため、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。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と共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si モジュールと比較し、発生損失を 24% 低減した。また、Sn-Sb 系はんだを適用することで、高信頼性を確保して連続動作温度を 25℃ 向上させた。発生損失の低減効果と合わせることで高パワー密度化を実現し、フットプリントサイズを約 30% 低減した。

There has been increasing demand for electronics to achieve not only energy savings, but also be more compact, lightweight and improved performance such as high output. Fuji Electric is seeking to meet these demands by pursuing the development of a SiC hybrid module with a 3,300 V withstand voltage. By adopting the SiC-SBDs that we developed in partnership with the joint research body Tsukuba Power Electronics Constellation (TPEC), we have been able to reduce generated loss by 24% compared with current Si modules. In addition, we have also utilized Sn-Sb solder to ensure high reliability and have been able to improve continuous operation temperature by 25℃. Moreover, we made use of the reducing effect of generated loss to achieve improvements in power density while also reducing the footprint size by approximately 30%.

① まえがき

近年、世界で消費される資源・エネルギーは増大し、環境汚染や資源の枯渇が大きな問題となっており、省エネルギー（省エネ）化が強く求められている。これらの背景から、電力の輸送、変換、制御、供給において、省電力化を特徴とするパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器に注目が集まっている。

パワエレ機器に対する要求は、省エネ化による環境負荷を軽減させる社会要請によるものから、高信頼性、制御性、小型・軽量化、高出力化などの性能向上に関わるものまで多岐にわたる。これらの要求に応えるためには、パワエレ機器を構成するパワーデバイス、回路、制御などの技術向上が必要不可欠となる。特に、基幹部品であるパワーデバイスでは、小型で低損失なパワーモジュールが求められている。

現在の代表的なパワーデバイスは、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を用いたパワーモジュールであり、一般的に Si（シリコン）の IGBT および FWD（Free Wheeling Diode）のチップが搭載されている。しかし、Si チップの性能は物性に基づく理論値限界に近づいており、これまでのように飛躍的な特性改善を期待することはできない。そこで、Si よりも優れた特性を持つワイドバンドギャップ半導体が注目されている。この半導体の一つである SiC（炭化けい素）は従来の Si と比較して高耐圧かつ低損失であることに加え、高温動作や高周波動作が可能となり、パワーモジュールのさらなる高パワー密度化による小型化が可能となる。

本稿では、この SiC チップを搭載した 3,300 V 耐圧 1,200 A の SiC ハイブリッドモジュール技術について述べる。

② SiC ハイブリッドモジュールの構成

富士電機では、SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）と Si-IGBT を搭載した 600 V、1,200 V、1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。今回、さらなる高耐圧化の要求に応えるため、3,300 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールを開発した。

図 1 に、3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの外観・内部回路および Si-IGBT モジュールとのフットプリント

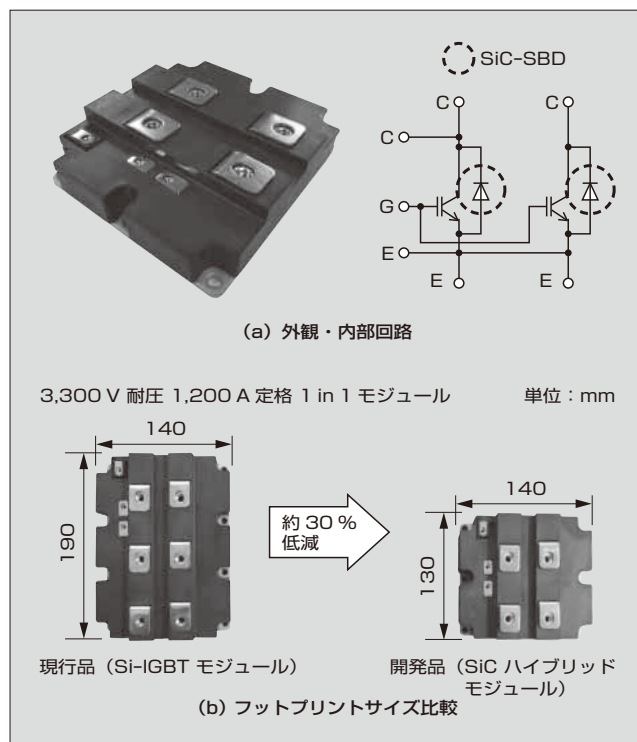


図 1 3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールの概要

ントサイズの比較を示す。FWD には、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と共同で開発した SiC-SBD を適用することで、現行の Si-IGBT よりも発生損失を大幅に低減させた。チップ下のはんだには、第7世代「X シリーズ」IGBT モジュールのパッケージ技術の一つである Sn-Sb 系はんだを適用することで、高信頼性を確保し、連続動作温度を現行 Si-IGBT の 125℃ から 150℃ に向上市させた。これら発生損失の低減および動作温度の向上により、高パワー密度化を実現し、図 1 (b) に示すとおり、現行品と比較してモジュールのフットプリントサイズを約 30% 低減した。

③ ハイブリッド化に伴うパッケージ技術課題

3.1 多並列接続構造の課題と検討

ハイブリッド化において 1,200 A 定格を実現するためには、多数のチップを並列に接続する必要がある。このような多並列接続を持つパッケージ構造の場合、チップ特性のばらつきによる電流の不均衡が生じ、長期信頼性を低下させる懸念がある。そこで、シミュレーションによる熱解析を行い、各チップの温度や熱応力の状態を検証した。この検証結果から、チップ特性のばらつきがチップ温度の変動に及ぼす影響を模擬できることを確認した。この解析方法を用い、本開発品のパッケージ構造に反映させ、信頼性向上に役立てた。

3.2 パワーサイクル耐量の向上

ハイブリッド化によって小型化を実現するためには、チップ温度の上昇に対応したパッケージ構造が必須となる。チップ温度の上昇に伴って構成部材にかかる熱応力が増大すると同時に、運転・停止による温度変化が大きくなるため、より高い熱疲労に対しての性能を保証する必要がある。そこで、この保証の指針となる ΔT_j パワーサイクル耐量を向上させるため、第7世代 X シリーズ IGBT モジュールのパッケージ技術における Sn-Sb 系はんだをチップ下に適用した。Sn-Sb 系はんだは高強度であり、熱疲労から生じるクラックの進展を抑制する効果がある。

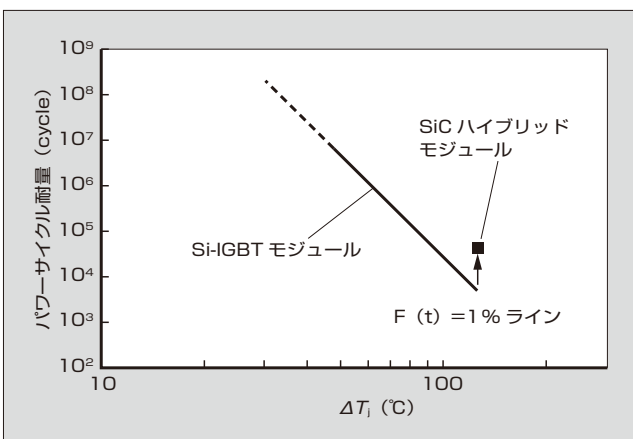


図2 ΔT_j パワーサイクル試験結果

図 2 に SiC ハイブリッドモジュールと Si-IGBT モジュールの ΔT_j パワーサイクル試験の結果を示す。SiC ハイブリッドモジュールは、Si-IGBT モジュールと比較して $\Delta T_j=125^\circ\text{C}$ 時に約 5 倍以上のパワーサイクル耐量がある。

④ 特性

4.1 順方向特性

図 3 に SiC ハイブリッドモジュールと Si-IGBT モジュールの順方向特性を、図 4 に 1,200 A 定格における順方向電圧 V_F の温度依存性を示す。図 4 に示すとおり、SiC ハイブリッドモジュールは、Si-IGBT モジュールと比較して、25℃ で、 V_F が 29% 程度小さいが、150℃ では逆転して 30% 程度大きくなる。しかし、Si-IGBT モジュールはチップ接合温度 T_j の上昇に伴い、 V_F が低下する負の温度特性であるのに対し、SiC ハイブリッドモジュールは正の温度特性を持っている。負の温度特性を持っているチップを多並列で接続すると、 T_j の上昇に伴って内部抵抗が小さくなるため電流がより流れやすくなり、一部のチップに電流が集中して電流の不均衡を起こしやすい。

これに対し、正の温度特性は T_j の上昇に伴って内部抵抗が大きくなるため、並列に接続されたチップ間で均一に電流を分担することになる。したがって、SiC ハイブリッド

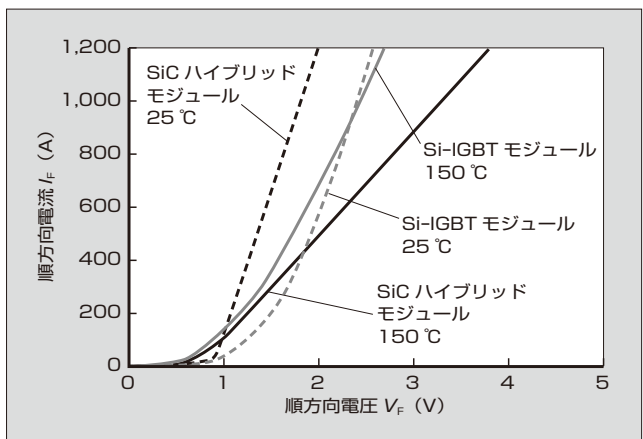


図3 順方向特性

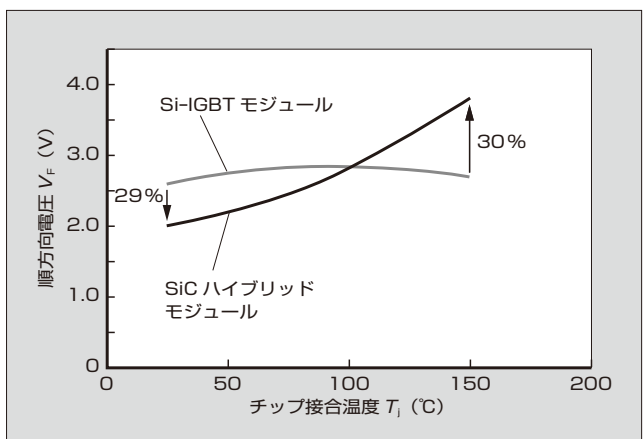


図4 順方向電圧の温度依存性

ドモジュールは、多並列接続に有利である。

4.2 漏れ電流特性

図5にSiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールの漏れ電流特性を、図6に漏れ電流の温度依存性を示す。125℃でコレクタ電圧3,300Vのとき、SiCハイブリッドモジュールの漏れ電流 I_{CES} は、Si-IGBTモジュールと比較して11%程度小さい。150℃ではさらに差が広がり44%程度小さくなる。図6に示すとおり、Si-IGBTモジュールの I_{CES} は、温度によって大きく変動する。これに対し、SiCハイブリッドモジュールはおおむね一定であり、温度依存性が小さいことが分かる。これは、Siよりもバンドギャップが3倍程度大きい T_j の上昇に伴うキャリアの励起が少ないことに起因する。したがって、SiCハイブリッドモジュールはSi-IGBTモジュールと比べて、高温動作が可能である。

4.3 スイッチング特性

(1) 逆回復特性

図7に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールの逆回復波形の比較を示す。Si-IGBTモジュールと比較して、SiCハイブリッドモジュールは逆回復時のピーク電流がほとんど発生しない。これはSiC-SBDが

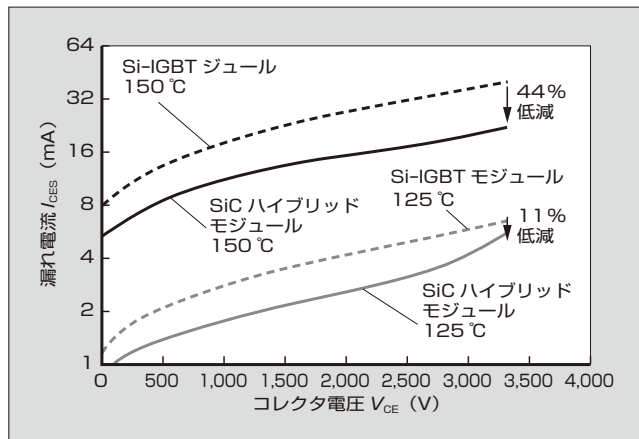


図5 漏れ電流の特性

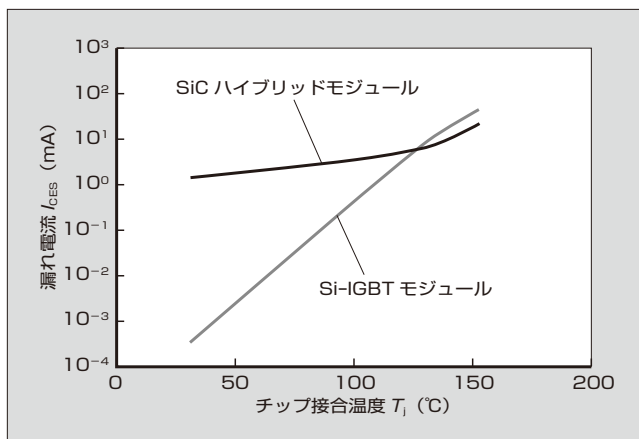


図6 漏れ電流の温度依存性

ニポーラデバイスであるため、少数キャリアによる蓄積効果がないことに起因する。図8に、逆回復損失 E_{rr} の電流依存性を示す。 E_{rr} は1,200A定格の場合、Si-IGBTモジュールと比較して発生損失を95%低減できる。さらに、300Aや1,800Aにおいても同様に、発生損失を同程度まで低減できる。したがって、低電流領域から大電流領域まで幅広く損失低減が可能である。

(2) ターンオン特性

図9に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールのターンオン波形の比較を示す。SiC-SBDの逆回復時のピーク電流は、対向アームのIGBTターンオン電流に反映されるため、ターンオンピーク電流も大幅に低減できる。図10に示すとおり、1,200A定格におけるターンオン損失 E_{on} は、Si-IGBTモジュールと比較して発生損失を28%低減できる。

(3) ターンオフ特性

図11に、SiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモジュールのターンオフ損失 E_{off} の電流依存性を示す。ター

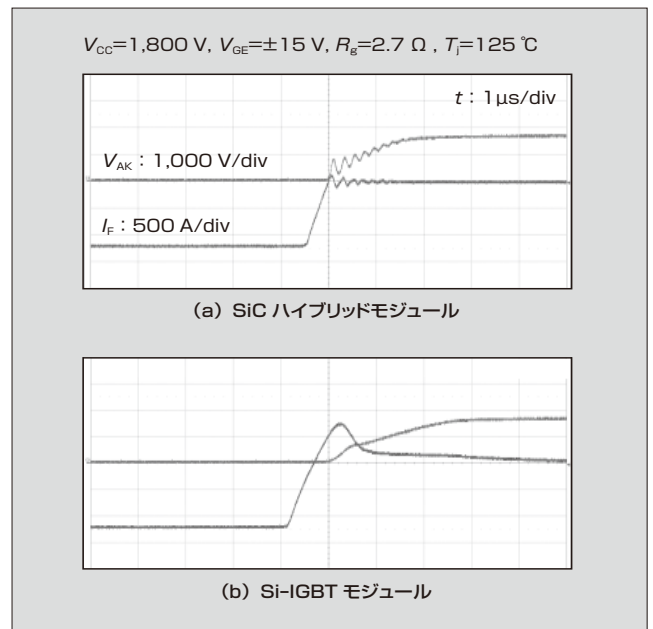


図7 逆回復波形

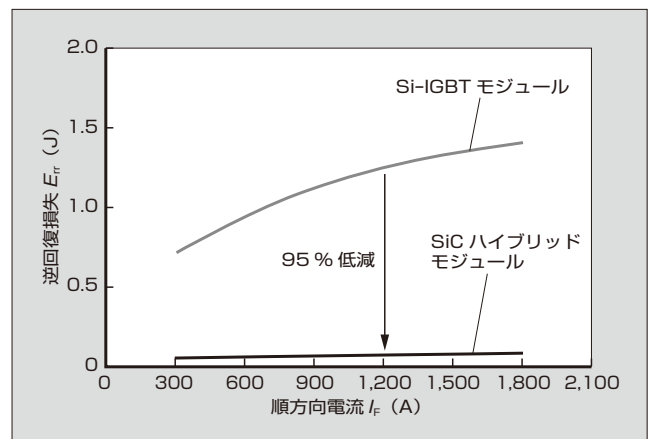


図8 逆回復損失の電流依存性

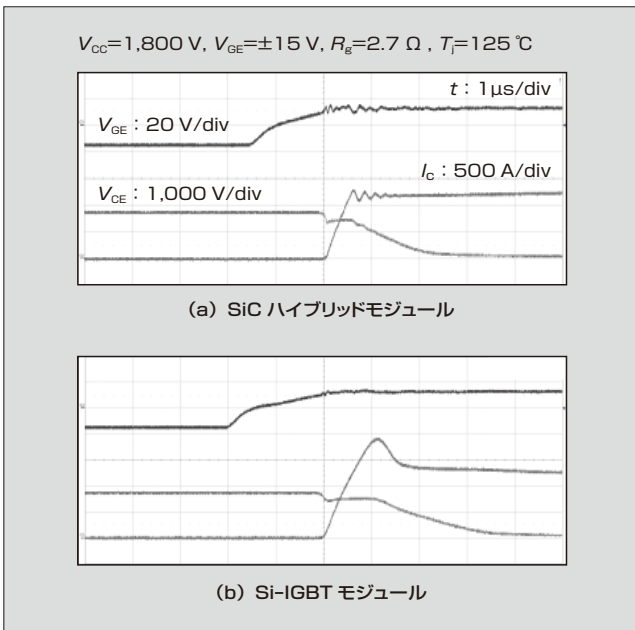


図9 ターンオン波形

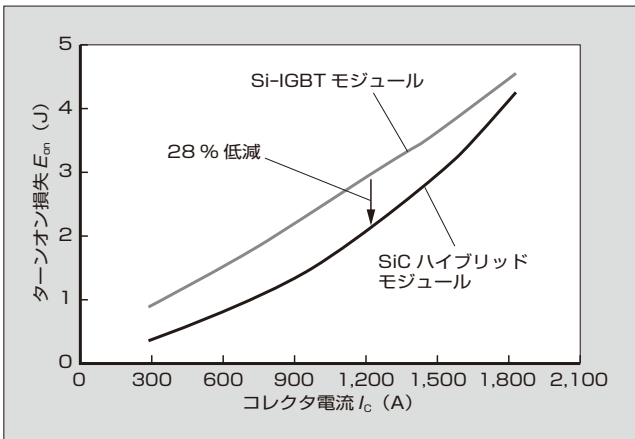


図10 ターンオン損失の電流依存性

ンオフ時に発生するサージピーク電圧は、一般的に式(1)で定義できる。IGBTの電流変化率 dI_c/dt と評価回路の主回路インダクタンス L_s が同等であれば、ダイオードの過渡オン電圧の値がサージピーク電圧の差として現れる。SiC-SBDはSiC-FWDと比較して、ドリフト層が低抵抗であるため、過渡オン電圧が低い。したがって、SiCハイブリッドモジュールはターンオフのサージピーク電圧が低く抑えられるため、 E_{off} も低減できる。

$$V_{sp} = V_{cc} + L_s \frac{dI_c}{dt} + V_{fr} \dots \dots \dots (1)$$

- V_{sp} : サージピーク電圧 (V)
- V_{cc} : 印加電圧 (V)
- L_s : 主回路インダクタンス (H)
- I_c : コレクタ電流 (A)
- V_{fr} : 過渡オン電圧 (V)

4.4 インバータ発生損失

図12にSiCハイブリッドモジュールとSi-IGBTモ

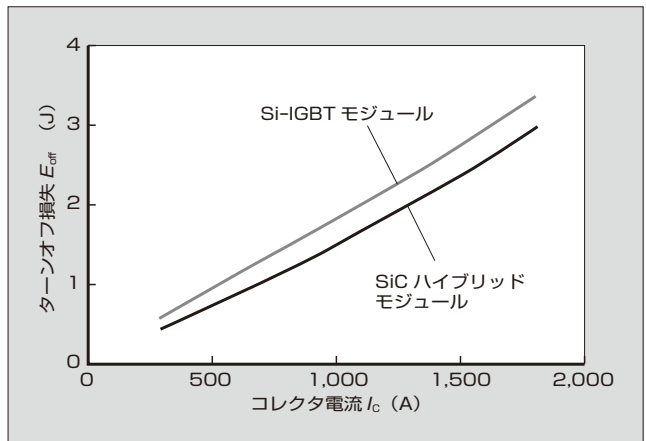


図11 ターンオフ損失の電流依存性

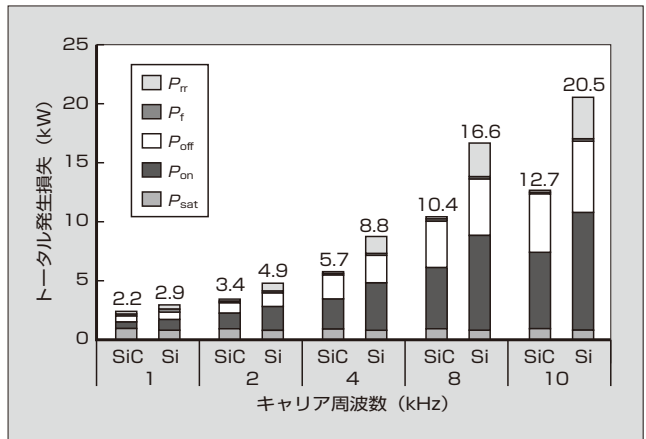


図12 インバータ発生損失の計算結果

ジュールのインバータ発生損失の計算結果を示す。キャリア周波数1kHzにおいて、SiCハイブリッドモジュールのトータル発生損失は、Si-IGBTモジュールと比較して24%低減できる。さらに、キャリア周波数を高くした場合、トータル発生損失の低減率は大きくなり、キャリア周波数10kHzでは38%低減できる。したがって、SiCハイブリッドモジュールは、高周波動作が必要な製品への適用が期待できる。

現在、本開発品を搭載した駆動用主変換装置（インバータ、コンバータ）を東海旅客鉄道株式会社向けに開発し、新幹線に搭載し走行試験を実施中である。

5 あとがき

本稿では、3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュール技術について述べた。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と共同で開発したSiC-SBDと、富士電機製Si-IGBTを適用した3,300V耐圧SiCハイブリッドモジュールに用いた技術である。本開発品は、SiC-SBDとSn-Sb系はんだを適用することで、高パワー密度化を実現し、パワーエレクトロニクス機器の高効率化、小型化に大きく貢献できる。今後、さらなる性能向上を実現するため、All-SiC化の開発検討を進め、省エネルギー

化を推進していく所存である。

SiC-SBDの開発にご協力いただいた共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーションの関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 百瀬文彦ほか. 175℃連続動作を保証するIGBTモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.249-252.
- (2) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (3) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (4) 小林邦雄ほか. 1,700V耐圧SiCハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.240-243.



金子 悟史

SiCモジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



金井 直之

SiCモジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。応用物理学会会員。



辻 崇

SiCデバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代デバイス開発センター SiC 開発部主査。応用物理学会会員。



第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール

7th-Generation “X Series” IGBT Module

川畑 潤也 KAWABATA, Junya

百瀬 文彦 MOMOSE, Fumihiko

小野澤 勇一 ONOZAWA, Yuichi

IGBT モジュールの市場において、近年、小型化、低損失化、高信頼性が強く求められている。これらの要求に応えるため、第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを開発した。IGBT・FWD チップの大幅な損失低減および高放熱・高耐熱・高信頼性パッケージの開発により、約36%のフットプリント低減、約10%の電力損失低減、長期信頼性を実現した。また、高温動作時の特性や耐量を向上させたことで、連続動作の最大温度を従来の150℃から175℃に向上させた。これにより、出力電流の大幅な増加が可能となり、電力変換装置のさらなる小型化と高パワー密度化を実現した。

In recent years, the IGBT module market has been seeing increasing demand for compact modules with low loss and high reliability. In order to meet these demands, we have developed the 7th-Generation “X Series” IGBT Module. By significantly reducing the loss of IGBT and FWD chips and developing a package characterized by its high heat dissipation, high heat resistance and high reliability, we have reduced the module’s footprint by approximately 36% and power loss by approximately 10% and achieved long-term reliability. Furthermore, by enhancing its withstanding and characteristics during high-temperature operation, we increased the maximum temperature for continuous operation to 175℃, from the conventional temperature of 150℃. These enhancements have enabled the module to significantly increase output current, and this further increase the power density and miniaturizes the size of power converters.

① まえがき

近年、化石燃料の枯渇や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いる。そのため、さまざまな分野にパワー半導体を用いた電力変換装置の適用が広がっており、その市場は急速に拡大している。パワー半導体としては、産業、民生、自動車および再生可能エネルギーなどの広い分野で、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールが主に用いられている。IGBT モジュールは市場に登場して以来、多くの技術革新によって大幅な小型化や低損失化が行われてきており⁽¹⁾、これにより電力変換装置の小型化（コストダウン）と高効率化に貢献してきた。しかし、IGBT モジュールの小型化はパワー密度の上昇によるチップ接合温度 T_j の上昇と、それに伴う信頼性の低下を招いてしまう。このため、今後ともIGBT モジュールの小型化を進めるためには、IGBT とFWDのチップ特性の向上のみならず、パッケージ技術の革新による放熱性と信頼性の向上が不可欠である。

富士電機ではIGBT モジュールのさらなる小型化、低損失化、高信頼性化を実現するために、新たに第7世代のチップ技術およびパッケージ技術を適用した第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを開発した。Xシリーズ IGBT モジュールでは小型化のみならず、チップ特性とパッケージの長期信頼性を向上することにより、 T_j が175℃での連続動作を実現した。そのため、最大で150℃連続動作であった従来の第6世代「Vシリーズ」IGBT モジュールと比較して、さらに高い出力電流での動作が可能となった。

② 第7世代チップ技術

Xシリーズ IGBT モジュールではIGBT およびFWD (Free Wheeling Diode) の損失を大幅に低減することで、低損失化とチップサイズの小型化を同時に達成した。さらには、高温動作時に懸念されるさまざまな耐量についても、十分な耐量を確保することで $T_j=175℃$ の連続動作を実現した。

2.1 第7世代 IGBT のチップ技術

IGBT の断面構造を図1に示す。第7世代 IGBT の基本構造は、第6世代 IGBT と同様に表面構造はトレンチゲート構造であり、裏面にフィールドストップ (FS) 層を適用した薄ウェーハ IGBT を採用した。第6世代 IGBT と比較して、ドリフト層の厚さを薄くすることでオン電圧 (コレクター-エミッタ間電圧) の低減を達成している。ま

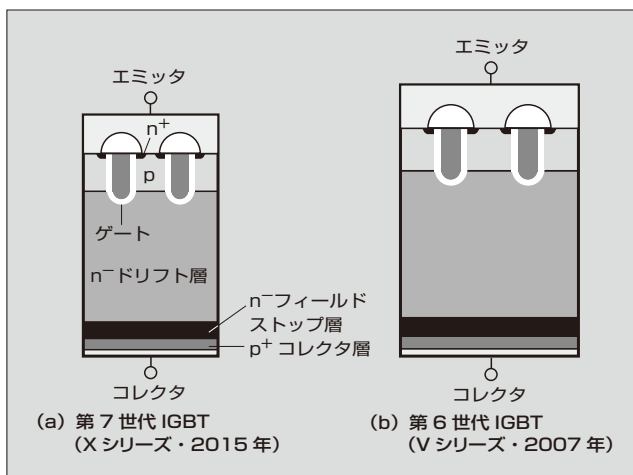


図1 IGBT の断面構造

た、表面のトレンチゲート構造を微細化・最適化することで、導通時のpチャネルからのホールの引抜きを抑制し、表面側のキャリア濃度を高めることでIE (Injection Enhanced) 効果を増強し、オン電圧とターンオフ損失のトレードオフ関係を大幅に改善した。一般的に、ドリフト層を薄くした場合はターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下が懸念されるが、FS層を最適化することによって電圧振動を抑制し、十分な耐圧を確保した。

第7世代IGBTの出力特性を図2に示す。第6世代IGBTの定格電流密度で比較した場合、 $T_j=150^\circ\text{C}$ においてオン電圧を約0.5V低減している。また、 175°C における動作時でも、第6世代IGBTの 150°C と比較して約0.45V低いオン電圧を実現している。

一般的に、IGBTのオン電圧とターンオフ損失はトレードオフの関係にあることはよく知られている。第7世代IGBTのオン電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を図3に示す。第7世代IGBTは、前述のとおりオン電圧の大幅な低減に加えて、ドリフト層の薄化によってターンオフ時のテール電流を大幅に低減することで、ターンオフ損失を10%低減した。この結果、第6世代IGBTと比べて、

ターンオフ損失とオン電圧のトレードオフ特性を大幅に改善した。

2.2 第7世代FWDのチップ技術

第7世代FWDは、ドリフト層の厚みを低減することで順方向電圧を低減するとともに、図4に示すように、ローカルライフタイムコントロールの最適化により、第6世代FWDと比較してより滑らかな逆回復波形を実現した。さらに、逆回復ピーク電流およびテール電流の低減によって、逆回復損失を大幅に低減した。図5に逆回復損失と順方向電圧のトレードオフ特性を示す。第6世代FWDと同一の順方向電圧で比較して、約30%の逆回復損失低減を達成した。

また、一般的に、ドリフト層を薄くすると逆回復時に空乏層が裏面に到達しやすくなるため⁽²⁾、逆回復サージ電圧と逆回復時の電圧振動が課題となる。第7世代FWDでは、裏面構造を最適化することによって逆回復動作時の空乏層の伸長を抑制し、空乏層が裏面に到達するのを防ぐことで、逆回復電圧振動および逆回復サージ電圧を第6世代FWDと同等以下に抑制した。

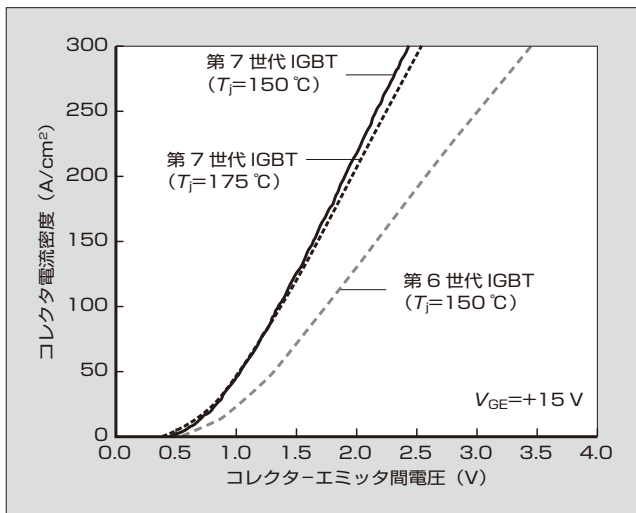


図2 第7世代IGBTの出力特性

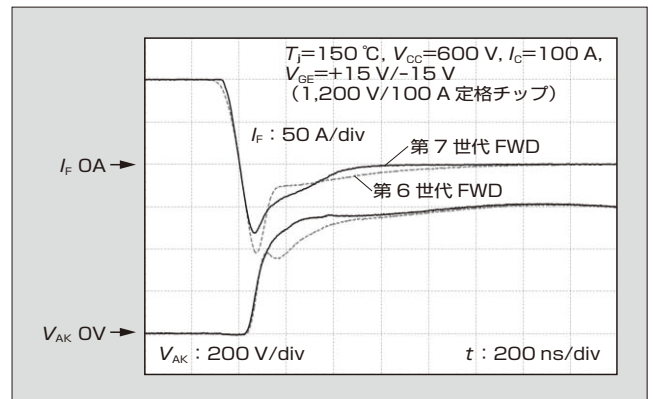


図4 第7世代FWDの逆回復波形

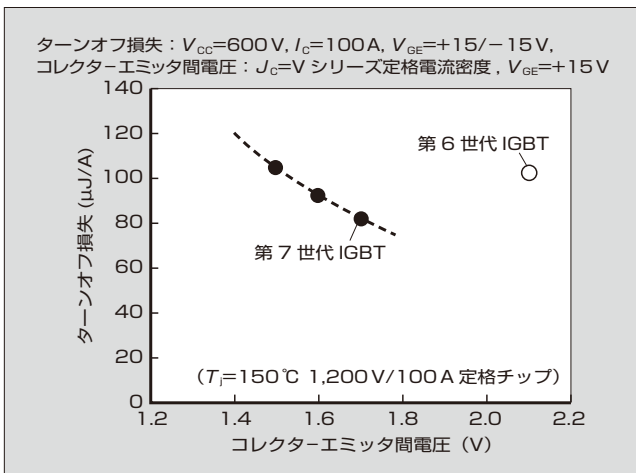


図3 第7世代IGBTのトレードオフ特性

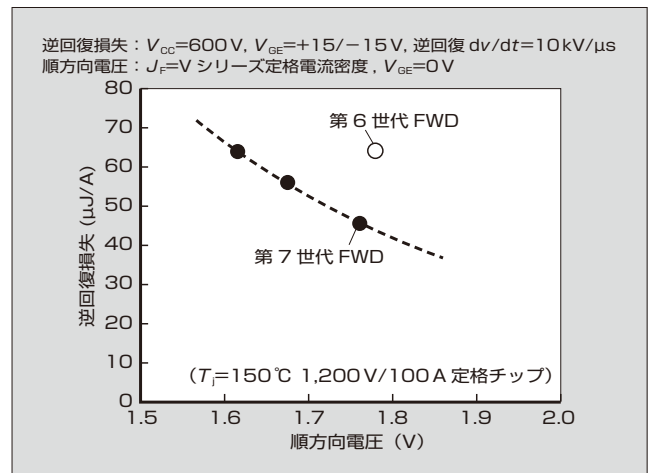


図5 逆回復損失と順方向電圧のトレードオフ特性

③ 第7世代パッケージ技術

IGBT モジュールの小型化を達成するためには IGBT および FWD の小型化が必要であるが、チップの小型化、すなわちパワー密度の上昇は、チップ温度の上昇とそれによる信頼性の低下が課題となる。そのため、Xシリーズ IGBT モジュールでは、高放熱パッケージの開発によりチップ温度の上昇を抑制するとともに、高信頼性・高耐熱パッケージの開発により 175℃連続動作を実現した。

3.1 新 AlN 絶縁基板

チップの放熱性を改善するために、Xシリーズ IGBT モジュールでは、チップから放熱フィンまでの熱抵抗のうち最も大きな部分を占める絶縁基板の熱抵抗を改善した。絶縁基板の材料としては、 Al_2O_3 (アルミナ) や熱伝導率の高い AlN (窒化アルミニウム) などが広く使われている。熱抵抗の改善のためには AlN 絶縁基板の適用が望ましいが、一般の AlN 絶縁基板ではセラミックスの板厚が厚いため剛性が高く、ケース温度が上昇した場合に基板下のはんだに加わる熱応力が高くなり、信頼性の低下が懸念される。この対策として、はんだに発生する応力を低減させる必要がある。そこでセラミックスの板厚を薄くすることで AlN 絶縁基板の剛性を低下させ、基板下のはんだに加わる熱応力を緩和させる手法を検討した。従来は、AlN 絶縁基板を薄化すると、モジュール製品の絶縁耐量の低下、顧客による実装工程でセラミックス基板に割れが発生する懸念があるため実用化できなかった。そのため、セラミックス焼結条件の最適化による高強度化、基板回路パターン設計の工夫による熱応力の分散、沿面距離の見直しによる絶縁設計の最適化を行い、薄型化した新 AlN 絶縁基板を開発した⁽³⁾。

このように高放熱かつ高信頼性を実現した新 AlN 絶縁基板を採用することで、IGBT モジュールの長期信頼性を確保しつつ熱抵抗を大幅に低減した。図6に、新 AlN 絶縁基板を適用した IGBT モジュールのジャンクション-ケース間熱抵抗を示す。現在、一般に広く適用されてい

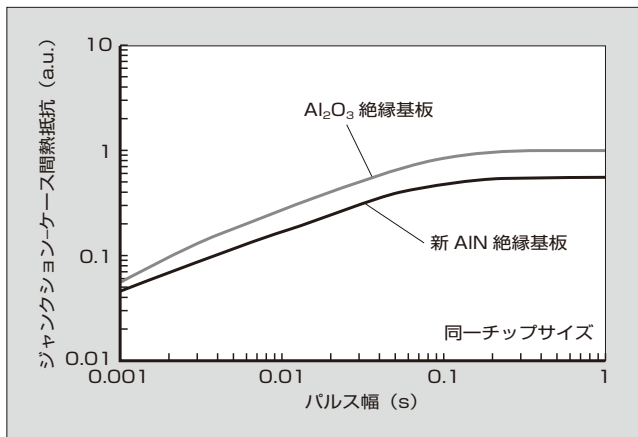


図6 ジャンクション-ケース間熱抵抗

る Al_2O_3 絶縁基板に対して、熱抵抗を同一チップサイズで約 45% 低減した。この新 AlN 絶縁基板を、パワー密度やチップ温度の上昇が特に厳しくなる製品などに適用することで、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。

3.2 ΔT_j パワーサイクル耐量の上向

電力変換装置の長寿命化を実現するために、IGBT モジュールの長期信頼性が強く求められている。特に、繰返しの熱ストレスに対する耐量 (ΔT_j パワーサイクル耐量) が重要な課題である。Xシリーズ IGBT モジュールでは、より高い出力電流での動作を実現するために、連続動作可能領域を従来の $T_j=150^\circ C$ から $175^\circ C$ に向上させた。一般に T_j が高くなると、チップ周辺の材料の劣化が加速されることにより、 ΔT_j パワーサイクル耐量が低下してしまう⁽⁴⁾。 ΔT_j パワーサイクル耐量は、チップ上のワイヤボンディング接点とチップ下のはんだが最も大きな熱応力を受けることで、製品寿命の低下に大きく影響を及ぼす。Xシリーズ IGBT モジュールでは、 $T_j=175^\circ C$ でも十分な ΔT_j パワーサイクル耐量を確保するため、ワイヤボンディングの設計を最適化し、これに加えて新たに開発した高強度のはんだを適用した。

図7に、同一サイクル後における ΔT_j パワーサイクル試験後のチップ下のはんだの断面観察結果を示す。従来はんだにはクラックが観察されたが、新はんだではクラックの発生が抑制されていることを確認した。図8に ΔT_j パワーサイクル耐量を示す。Xシリーズ IGBT モジュール

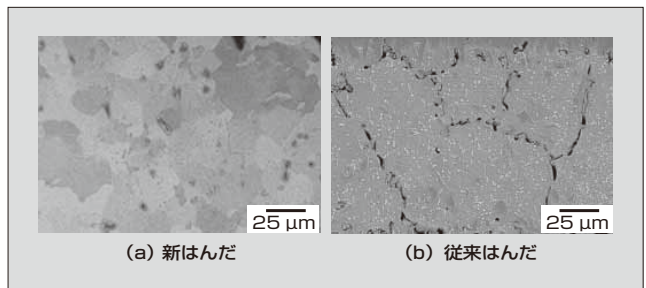


図7 ΔT_j パワーサイクル試験後のチップ下はんだ断面

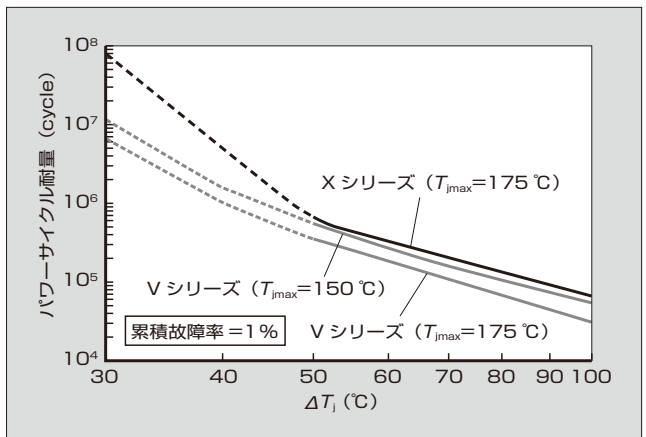


図8 ΔT_j パワーサイクル耐量

ルは、V シリーズ IGBT モジュールに対して約 2 倍の耐量を実現した ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_j=50^{\circ}\text{C}$)。これにより、 $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ 動作においても、従来と同等以上の ΔT_j パワーサイクル耐量があり長期信頼性を確保した。

3.3 高耐熱シリコンゲル

IGBT モジュールの長期信頼性を保証する上でもう一つ課題となるのが、高温動作におけるシリコンゲルの劣化である。一般にシリコンゲルは高温になるほど硬化しやすく、硬化したゲルはクラック（裂け）を生じる懸念がある。このクラックによってゲルの絶縁被覆が破壊されるため、絶縁性能が低下してしまう。そこで、 175°C の連続動作を実現するため、新たに高耐熱のシリコンゲルを開発した。高耐熱シリコンゲルは、材料組成を最適化することで高温下における硬化を抑制した。高温環境下における放置試験 (215°C , 2,000 時間) においても、従来シリコンゲルは硬化によってクラックが発生するのに対し、高耐熱シリコンゲルではクラックの発生がないことを確認した。

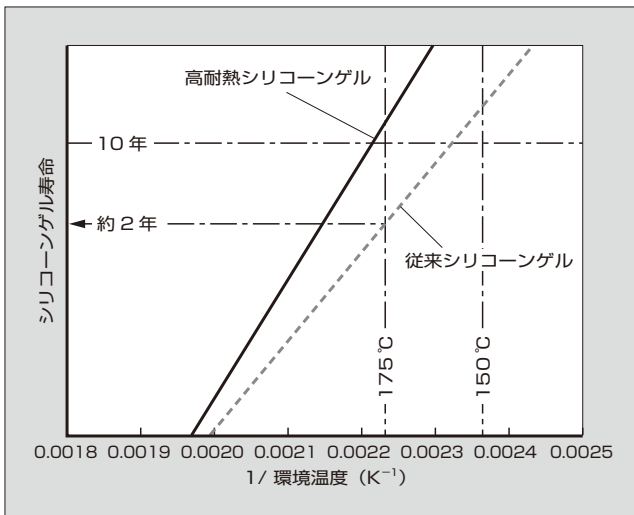


図9 環境温度とシリコンゲルの寿命の関係

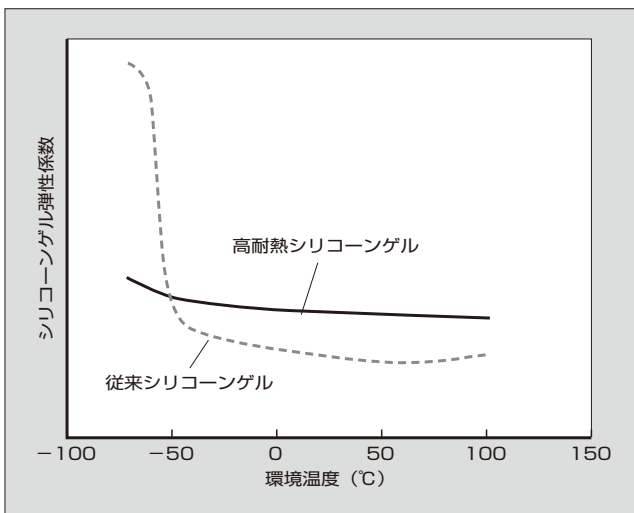


図10 環境温度とシリコンゲル弾性係数の関係

図9に、環境温度とシリコンゲルの寿命の関係を示す。 175°C における高耐熱シリコンゲルの寿命は、従来シリコンゲルに対して大幅に改善され、 150°C における従来シリコンゲルの寿命と同等の寿命となった。これにより、 175°C の連続動作においても、従来の 150°C と同等の絶縁性能を確保した。

また、図10に、環境温度とシリコンゲル弾性係数の関係を示す。従来のシリコンゲルは -50°C 以下で急激に硬くなる特性があることに対し、高耐熱シリコンゲルは低温でも弾性係数の上昇は抑えられており、低温環境下での絶縁性も改善されている。この高耐熱シリコンゲルによってさまざまな環境に対応できるようになり、IGBT モジュールの適用範囲の拡大も期待できる。

4 IGBT モジュールの小型化

第7世代のIGBTとFWDによる大幅な損失特性の改善と、さらにはパッケージ技術の革新による放熱性・信頼性の大幅な向上により、XシリーズIGBTモジュールは従来に比べて、さらなる小型化と高パワー密度化が可能となった。例として、 $1,200\text{V}$ 定格のEP2パッケージにおいて、VシリーズIGBTモジュールの最大電流定格は 50A までであったが、XシリーズIGBTモジュールでは新たに 75A 定格が実現した。従来のVシリーズIGBTモジュールのEP3パッケージ 75A 定格製品からの置換えにより、フットプリントを約36%低減することが可能である。

XシリーズIGBTモジュールは、小型化、高パワー密度化だけではなく、同時に低損失化している。図11に、XシリーズIGBTモジュールEP2パッケージ 75A 定格製品における通常運転時の電力損失とIGBT接合温度の計算結果を示す。VシリーズIGBTモジュールEP3パッケージ 75A 定格製品と比較して、約10%の電力損失の低減と、約 10°C のIGBT接合温度の低減を達成している ($f_c=8\text{kHz}$)。

前述のとおり、 ΔT_j パワーサイクル耐量の向上と、シリコンゲルの耐熱性の向上によって、XシリーズIGBT

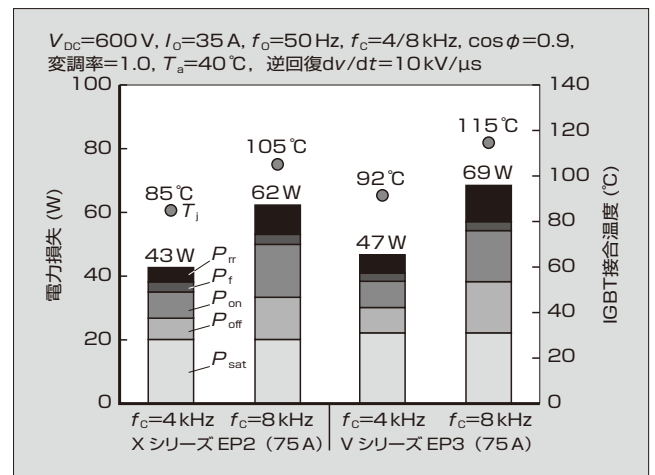


図11 通常運転時の電力損失と IGBT 接合温度

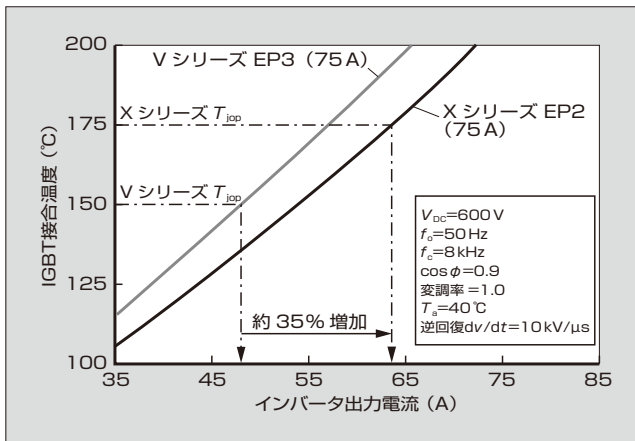


図12 インバータ出力電流とIGBT 接合温度

モジュールでは連続 175℃動作が可能となった。その結果、電力変換装置において、さらなるパワー密度の向上が可能となり、図12に示すように、VシリーズIGBTモジュールEP3パッケージ75A定格製品と比べて、約35%の出力電流の増加が可能である。

5 あとがき

第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュールでは、IGBTとFWDの大幅な損失低減と、高放熱・高信頼性パッケージの開発によって、小型化、低損失化、高信頼性を同時に達成することができた。従来製品から第7世代IGBTモジュールへの置換えにより電力変換装置の小型化、コストダウンが可能となるため、今後の電力変換装置のさらなる普及や高効率化に寄与でき、世界的なエネルギー問題の解決にも大いに貢献できる。

参考文献

(1) Kobayashi, Y. et al. "The New IGBT-PIM with the 6th generation V-IGBT chip technology", Proceeding of PCIM

Europe 2007.

(2) 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.
 (3) Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", PCIM Europe 2015.
 (4) Saito, T. et al. "New assembly technologies for $T_{jmax}=175^\circ C$ continuous operation guaranty of IGBT module", Proceeding of PCIM Europe 2013, p.455-461.



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。



百瀬 文彦

半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。日本機械学会会員。



小野澤 勇一

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。



第2世代小容量 IPM

2nd-Generation Small IPM

荒木 龍 ARAKI, Ryu

白川 徹 SHIRAKAWA, Toru

小川 裕貴 KOGAWA, Hiroki

富士電機は、モータドライブシステムの構築に必要なパワーデバイスや制御 IC などを1パッケージに集積した小容量 IPM を開発している。さらなる省エネルギー化を図るため、第7世代 IGBT 技術をベースに第2世代小容量 IPM を開発した。5.6kW のエアコンを想定した中間負荷領域において第1世代に対して10%以上の低損失化を実現し、定格・最大負荷領域においても20%以上の低損失化を実現した。回路基板のはんだ付け部の温度上昇も第1世代と比較して約20℃低減しており、省エネルギーの実現、出力電流の拡大、回路基板実装時の信頼性およびシステム設計の自由度が向上している。

Fuji Electric has been developing small intelligent power modules (IPMs) that integrate into a single package the power devices and control IC needed in the system construction of motor drives. We have now developed a 2nd-generation small IPM based on 7th-generation IGBT technology to achieve even more energy savings. The module reduces the loss by 10% or more in the intermediate load region, such as in the case of a 5.6kW air conditioner, and by 20% or more in the rated and maximum load region compared with the 1st-generation module. In addition, temperature rise in the soldering on the circuit board has also been reduced by approximately 20°C compared with the 1st-generation module. Overall, the module achieves enhanced energy savings, expands output current, and increase reliability during circuit board mounting and a greater degree of freedom during system design.

① まえがき

近年、地球環境問題への関心が高まる中、エアコン、洗濯機などの家電製品や産業用モータドライブシステムの省エネルギー（省エネ）に対する要求が強まっている。

家電製品においては、世界的に実使用に近いエネルギー消費効率を表す APF (Annual Performance Factor) による省エネ規制が強化され、定格・最大負荷時の高効率化だけでなく、より実使用に近い中間負荷時の損失改善が重要となっている。特に、日本市場や中国市場などはハイエンド機だけでなく、ボリュームゾーンとなる普及機でも省エネ性能の大幅な向上が必要となってきた。

また、産業用インバータやサーボにおいては、電力の高密度化による筐体（きょうたい）のダウンサイジングの要求が強まっている。

これらの要求に応えるため、富士電機はモータドライブシステムの構築に必要なパワーデバイスや制御 IC などを一つのパッケージに集積した小容量 IPM (Intelligent Power Module) を製品化してきた^{(1),(2)}。小容量 IPM 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、インバータ機器の小型化および省エネに貢献してきた。

今回、各アプリケーションにおいてさらなる省エネ化を図るため、第1世代小容量 IPM を継承し、薄ウェーハ化と微細化を融合した第7世代 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 技術をベースに、第2世代小容量 IPM を開発した。

② 製品概要

図1に第2世代小容量 IPM の外観を、表1に製品ラインナップと主要特性を示す。第2世代小容量 IPM は、外

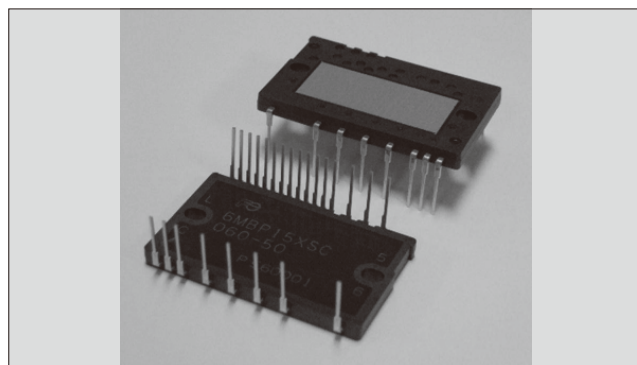


図1 第2世代小容量 IPM

形サイズとピン配置が第1世代品と同一の互換パッケージ構造としている。ラインアップは600V/10～30Aであり、エアコンの入力電力1.5kVAのコンプレッサ向けに、および0.1～0.2kW出力の小容量の産業用インバータやサーボ向けに新たに10A定格を加えた。温度保護機能がアナログ温度出力のみのもとの、過熱保護を加えたものの2種類がある。

図2に小容量 IPM の内部等価回路の構成を示す。小容量 IPM は、低損失 IGBT と高速 FWD (Free Wheeling Diode) からなる三相インバータブリッジ回路を絶縁金属基板上に搭載している。この三相インバータブリッジ回路のローサイドの IGBT を駆動するための LVIC (Low Voltage Integrated Circuit) と、ハイサイドの IGBT を駆動するための HVIC (High Voltage Integrated Circuit) を搭載している。また、ハイサイドのドライブ回路用に電流制限抵抗を内蔵した BSD (Boot-Strap-Diode) を搭載することにより、少ない外付け部品数で絶縁電源を構成することができる。

第2世代小容量 IPM は、第1世代に対して大幅に損

表1 製品ラインアップと主要特性

電圧	型式名	I_C	I_{CP}	$V_{CE(sat)}$ (typ.)	V_F (typ.)	温度保護機能
600V	6MBP10XSA060-50	10A	30A	1.40V	1.40V	温度センサ出力
	6MBP10XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP15XSA060-50	15A	45A	1.40V	1.40V	温度センサ出力
	6MBP15XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP20XSA060-50	20A	60A	1.40V	1.55V	温度センサ出力
	6MBP20XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護
	6MBP30XSA060-50	30A	90A	1.40V	1.45V	温度センサ出力
	6MBP30XSC060-50					温度センサ出力 & 過熱保護

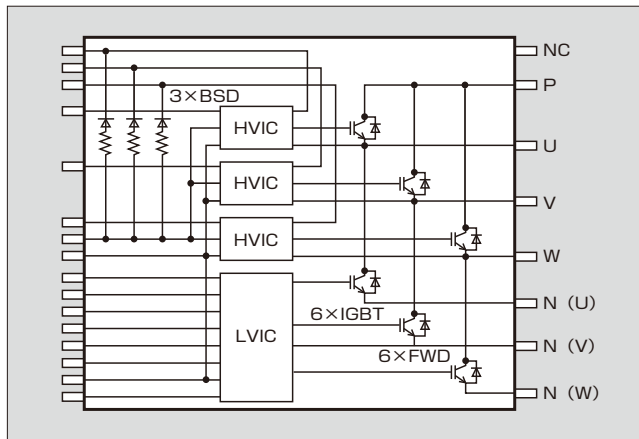


図2 内部等価回路の構成

失を低減するとともに、動作保証温度範囲を 125℃ から 150℃ に拡大した。さらに、過熱検知レベルの最適化と過電流検出精度の向上により、インバータの設計自由度の向上と動作領域の拡大を実現した。

3 特徴

表2 に第2世代小容量 IPM の特性を示す。特徴は次のとおりである。

(1) 低損失化による APF の向上

第7世代 IGBT 技術をベースにした低損失デバイスとドライブ能力の最適化により、大幅な低損失化を実現し、APF を向上することが可能となる。

(2) インバータの設計自由度向上と動作領域の拡大

動作保証温度 $T_{j(ope)}$ の高温化により許容電流を増やすことができ、動作領域の拡大が可能となる。また、ピークコレクタ電流の定格を拡大し、短絡検出を高精度にすることで、起動時など瞬時に大電流が流れる過負荷運転領域の拡大が可能となる。これにより、同定格にてワンランク上のモータ容量に対応することができる。

(3) 熱抵抗低減

熱伝導率を第1世代小容量 IPM の約 1.5 倍に向上させた高放熱アルミニウム絶縁基板を採用し、熱抵抗を低減した。これにより、ジャンクション温度の上昇を抑制し、低損失化と合わせて許容電流が拡大した。

表2 第2世代小容量 IPM の特性

項目	第2世代	第1世代
型式	6MBP15XSC060-50	6MBP15VSC060-50
V_{CE}	600V	600V
I_C	15A	15A
I_C (pulse)	45A	30A
$T_{j(ope)}$	-40 ~ +150℃	-40 ~ +125℃
$V_{CE(sat)}$ (typ.)	1.40V	1.80V
E_{off} (typ.)	0.26mJ	0.56mJ
V_F (typ.)	1.40V	1.65V
短絡保護検出精度	480 ± 25mV	480 ± 50mV
温度保護	温度センサ出力 & 過熱保護 (143 ± 7℃)	温度センサ出力 & 過熱保護 (125 ± 10℃)

3.1 デバイス設計における特徴

(1) 低損失パワーデバイス設計

図3 に IGBT 断面構造の比較を示す。第7世代 IGBT デバイスはこれまで培ってきたフィールドストップ (FS) 構造を基本とし、さらなる薄ウェーハ化と微細化技術を融合させている。

第2世代小容量 IPM 用に、この第7世代 IGBT 技術を

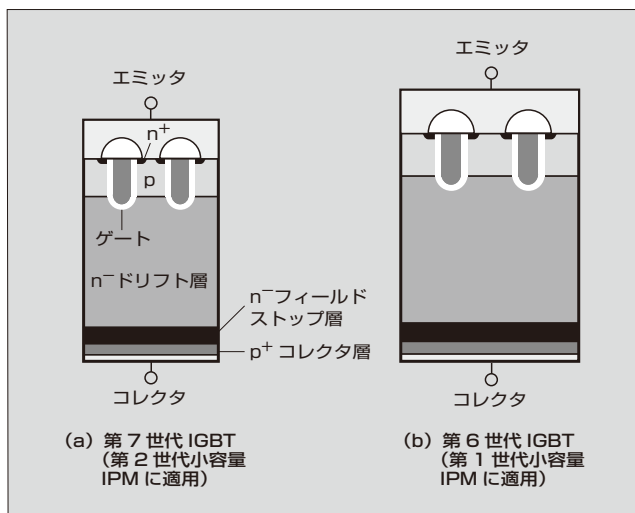


図3 IGBT 断面構造

ベースにドリフト層の比抵抗と厚さの最適化を行い、さらにFS層のプロファイルと、表面チャンネル密度および配置の最適化を行うことで、 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフを改善している。

図4に第1世代小容量IPMとの $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフの比較を、図5にターンオフ波形の比較を示す。 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフは、第1世代に対し、 $V_{CE(sat)}$ は約25%改善し、 E_{off} は薄ウェーハ化によるテール電流低減により約50%の低損失化を実現した。これにより、中間負荷時の損失低減による省エネ指標であるAPFの改善と、最大負荷時の大幅な損失低減による許容電流拡大を可能とした。

(2) 過電流検出精度向上

図6に、IPM (Interior Permanent Magnet) モータにおける過電流保護レベルの比較を示す。エアコンのコンプレッサで使用されるIPMモータでは、大出力時のモータの減磁耐量を確保する必要がある。このためには、過負荷領域での過電流保護が重要であり、動作領域を拡大するためには、過電流保護の検出ばらつき精度が大きく寄与する。

第2世代小容量IPMでは、過電流保護の検出精度の範囲を第1世代の10%から5%に半減することで、モータの特性を限界近くまで引き出して、最大負荷運転時の電流を約13%増加することができる。

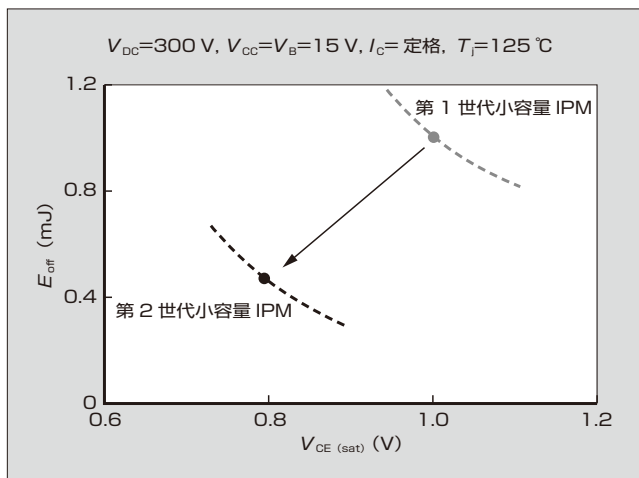


図4 $V_{CE(sat)}$ 特性と E_{off} 特性のトレードオフ

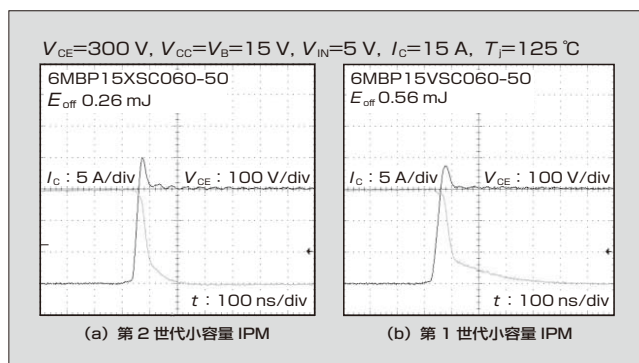


図5 ターンオフ波形

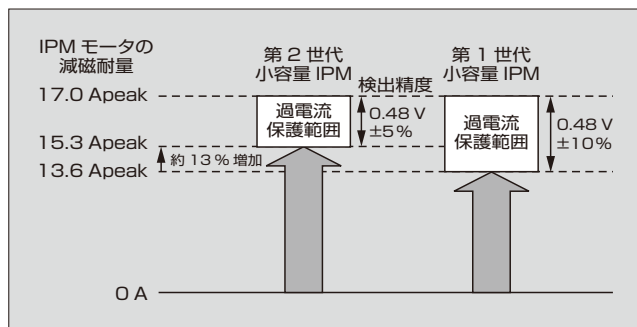


図6 過電流保護レベルの比較

3.2 パッケージ設計における特徴

(1) 高温動作保証

前述の動作保証温度 $T_{j(ope)}$ を高温化する上で、実使用を考慮したパワーサイクル耐量などの信頼性向上が必要である。

そのために、第2世代小容量IPMでは、高温動作におけるパッケージ構成部材の熱応力を抑制するため、ワイヤ接合部の熱疲労を抑制してパワーサイクル耐量の向上を図っている。これにより、 $T_{j(ope)}=150^{\circ}\text{C}$ を想定したパワーサイクル試験 ($\Delta T_j=100^{\circ}\text{C}$) において、15 kcycle 以上を満足している。

(2) 温度上昇抑制

動作領域の拡大に伴い、許容電流を拡大させるためには、パッケージの熱抵抗を低減してパワーデバイスの温度上昇を抑制することが必要である。

図7にパッケージの断面構造を示す。小容量IPMは、端子ケースに高放熱アルミニウム絶縁基板を採用した構造としており、その改良を行った。アルミニウム絶縁基板の低熱抵抗化と、絶縁耐圧の確保を両立することが課題である。そこで、パッケージ熱抵抗特性の大半を決めるアルミニウム絶縁基板内の絶縁層の厚みと、絶縁耐圧とのトレードオフに着目し、最適化を行った。

また、許容電流を拡大するに当たり、実装する回路基板のはんだ付け部の温度上昇の抑制も課題となる。そこで、第2世代小容量IPMは、はんだ付け部の温度上昇を抑制するためにパッケージ内部のワイヤの発熱をアルミニウム絶縁基板側にも放熱させる構造とした。電流通電時に発生

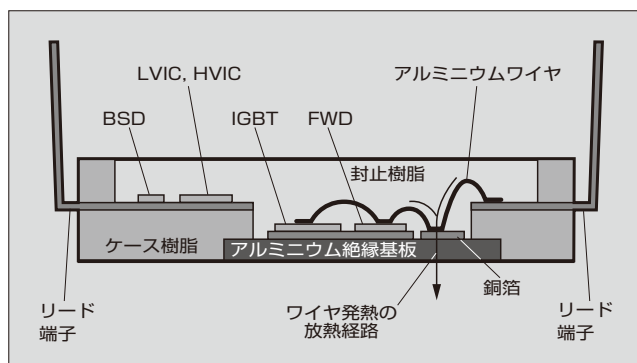


図7 パッケージの断面構造

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

するワイヤのジュール熱をアルミニウム絶縁基板側に放熱させることで、温度上昇を抑制している。

4 適用効果

図8に、0.75kWの産業用インバータを想定し、150%過負荷条件における損失を試算した結果を示す。第2世代小容量IPMは第1世代に対し、約20%低損失化している。これによりワンランク上の1.0kWインバータへの適用拡大が可能である。

また、図9に600V/15AのIPMを適用した5.6kW出力のエアコンを想定して、各動作モードにおける損失を試算した結果を示す。第2世代小容量IPMは全負荷範囲において、第1世代に対して低損失である。特にAPF性能に影響を与える中間負荷領域において、10%以上損失が低い。

さらに、定格・最大負荷領域においても、20%以上損失が低いので、15A定格においてワンランク上の7.2kWエアコンへの適用が可能となる。

図10に、エアコンの定常運転に相当するPWM動作時の温度上昇を評価した結果を示す。第2世代小容量IPMは、低損失と温度上昇の抑制に合わせて動作保証温度を拡大($T_{j(ope)}=150^{\circ}\text{C}$)したことにより、許容出力電流は第

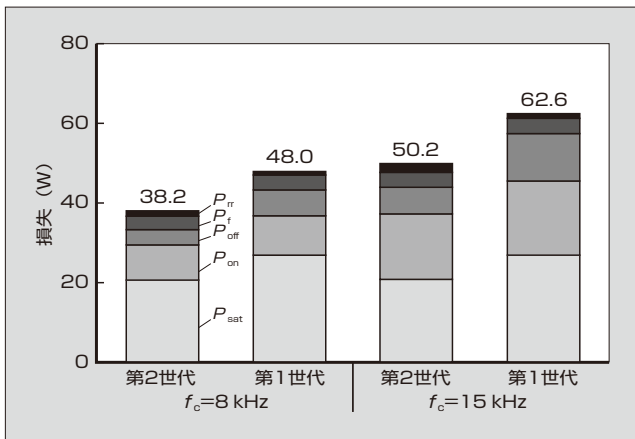


図8 0.75 kW 産業用インバータの損失試算結果

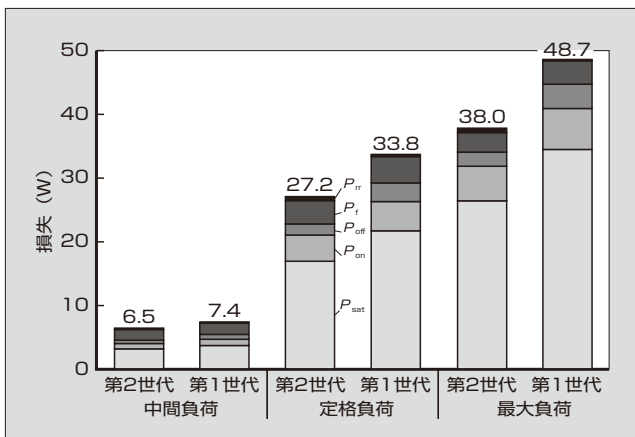


図9 5.6 kW エアコンの損失試算結果

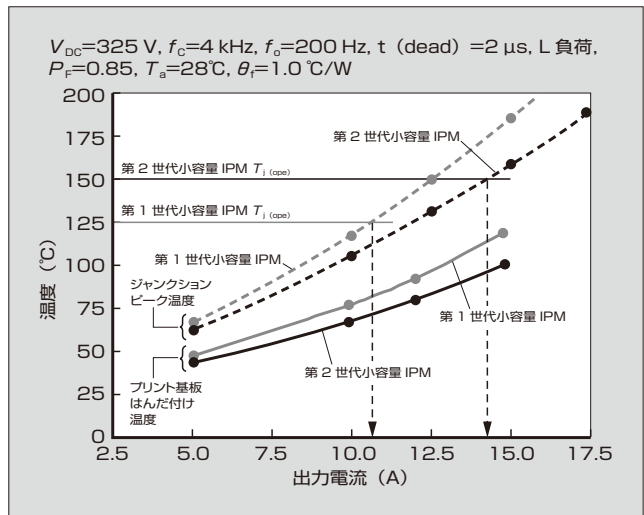


図10 PWM動作時の温度上昇の評価結果

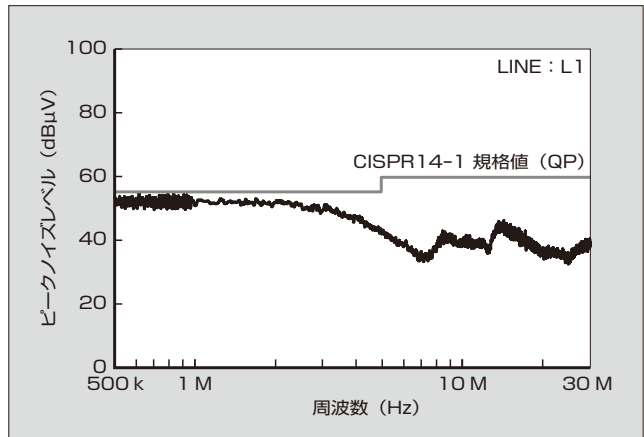


図11 5.6 kW エアコンの伝導ノイズ評価結果

1世代に対して約25%拡大した。

また、回路基板のはんだ付け部の温度上昇も第1世代と比較して約20°C低減しており、出力電流が拡大するとともに回路基板実装時の信頼性が向上し、設計自由度も向上する。

図11に、5.6kW出力のエアコンに実装した場合の伝導ノイズの評価結果を示す。500kHzから30MHzまでの周波数領域において、CISPR14-1規格のQP(準尖頭値)の許容値をクリアし、前述の損失低減と合わせて、低ノイズであることも確認している。

5 あとがき

本稿では、第2世代小容量IPMの特徴について述べた。第2世代小容量IPMは、第7世代IGBT技術をベースに最適化されたIGBTデバイスを適用することにより大幅な低損失化を実現し、システムの省エネルギー化に貢献する製品である。また、動作保証温度の拡大と熱抵抗の低減により許容電流が拡大する。これにより、適用容量の拡大にも寄与し、システムの設計自由度が向上できる製品である。

今後も、さらに差別化した製品ラインアップにて、シス

テム全体での省エネルギー化を実現す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.



荒木 龍

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パワー半導体事業統括部ディスクリート・IC技術部。



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。



小川 裕貴

ディスクリート、ICおよび小容量IPMのパッケージ開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部パッケージ実装開発部。



IPM 用 HVIC 技術

HVIC Technology for IPM

上西 顕寛 JONISHI, Akihiro

赤羽 正志 AKAHANE, Masashi

山路 将晴 YAMAJI, Masaharu

高耐压のゲートドライバICであるHVIC (High Voltage Integrated Circuit) は、IPM (Intelligent Power Module) の高機能化を実現するキーデバイスの一つである。富士電機は、小・中容量IPM向けに高機能・小型・高信頼性を特徴とする産業用600V/1,200V保証HVIC技術を開発した。省面積回路化、ならびに高耐压技術や高ノイズ耐量レベルシフト回路技術の採用により、20%のチップサイズ縮小と高耐压および高信頼性を同時に実現した。また、上アームIGBTの過熱・過電流の保護回路技術および異常通知信号のレベルダウン機能を実現した。

A high voltage integrated circuit (HVIC), which is a gate driver IC with a high breakdown voltage, is one of the key devices required in enhancing the functionality of intelligent power modules (IPMs). Fuji Electric has developed HVIC technology characterized by its advanced functionality, compactness, high reliability, and guaranteed industrial use at 600V/1,200V for small- and medium-capacity IPM. By reducing the circuit area and adopting high breakdown voltage technology and enhanced noise resistant level-shift circuit technology, we have reduced the chip size by 20% while improving the breakdown voltage and reliability. In addition, we have achieved over-current and over-heat protection circuit technology for upper-arm IGBT, as well as level-down functionality for alarm signals.

① まえがき

IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの電力スイッチング素子やFWD (Free Wheeling Diode) とともに、ゲート駆動機能・保護機能を備えるドライバICを一つのパッケージに集積した電力用半導体モジュールである。IPMは、システムの部品点数の削減や小型化、設計の簡素化などに貢献し、産業機械、エアコンなどの家電製品、サーバ用電源機器など幅広い用途で用いられている。

富士電機では、1986年にバイポーラトランジスタを用いた世界初のIPMを開発した。それ以降、1997年に世界で初めてIGBTチップ過熱保護機能を搭載したIPMを開発するなど、システムの高信頼性化・小型化に貢献する製品を積極的に開発してきている。2012年には高耐压のゲートドライバICであるHVIC (High Voltage Integrated Circuit) を搭載することにより、外部の絶縁回路やレベルシフト回路を不要としたインバータエアコン向けの小容量IPM⁽¹⁾を製品化した。さらに、産業向け中容量IPMへのHVIC搭載を目指して開発を進めている。

IPMに搭載するHVICには、IPMの耐压クラスに応じて600Vや1,200Vの耐压が求められると同時に、IGBTのスイッチングにより発生するノイズに耐えられる高信頼性や各種保護回路の内蔵、小型チップサイズが求められる。

富士電機は、2010年に開発した800V耐压保証HVIC⁽²⁾技術をベースに、1,200V/100Aクラスまでの小容量IPMと中容量IPM向けに、高機能・小型・高信頼性を特徴とする産業用600V/1,200V耐压保証HVIC技術を新たに開発した。本稿では、その中のデバイス・プロセス技術および要素回路技術について述べる。

② IPM 用 HVIC の特徴

図1に中容量IPM向けに試作した1,200V耐压保証HVICのチップを、図2にその回路および周辺回路ブロック図を示す。HVICの特徴は、接地電位を基準に動作するローサイド回路とともに、上アーム側IGBTのソース電位を基準に動作してゲート駆動機能を担うハイサイド回路と、制御信号のレベルアップ機能を担うレベルシフト回路の三つを一つのチップに内蔵している点である。上アーム側IGBTのソース電位はスイッチングに伴って-100V程度から+1,000V以上にまで変動する可能性があるため、ハイサイド回路とローサイド回路の間には高い分離耐压を持たせている。

HVICでは、ローサイド回路に入力された接地電位基準の制御信号は、レベルシフト回路を介してハイサイド回路内のゲート駆動回路に伝達され、上アーム側のIGBTが駆動される。このレベルシフト機能により、HVICを搭載したIPMでは上アームIGBTの駆動がフォトカプラなどの

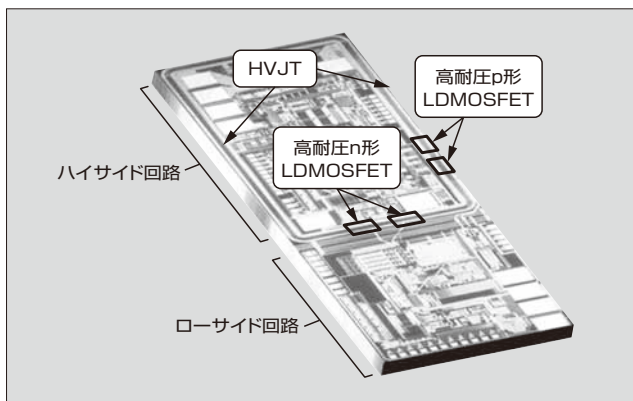


図1 1,200V 耐压保証 HVIC チップ

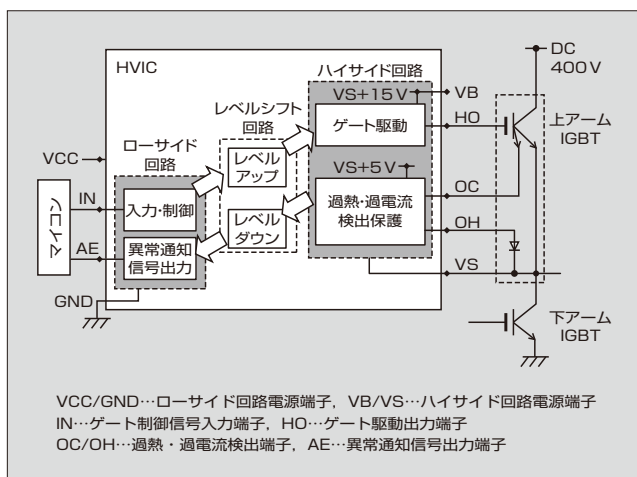


図2 1,200V耐圧保証HVIC回路および周辺回路ブロック図

絶縁素子を用いることなく行われている。

1,200V耐圧保証HVICの特徴は次のとおりである。

- (a) 保証耐圧1,200V、電源電圧最大24V対応（従来品は保証耐圧800V）
- (b) 上アームIGBT用の過熱・過電流検出保護機能の新規搭載
- (c) 異常通知信号のレベルダウン機能の新規搭載
- (d) 省面積回路化や高耐圧技術の採用（従来品はチップ内ワイヤボンディング高電位配線技術）
- (e) 高ノイズ耐量（ dV/dt ノイズ耐量 $\pm 50\text{ kV}/\mu\text{s}$ 以上）

3 デバイス・プロセス技術

高機能・小型・高信頼性のHVICを実現するため、新しいウェル構造および高耐圧技術を導入した600V/1,200V

高耐圧CMOSプロセスを開発した。素子分離には自己分離方式を採用している。

3.1 分割ハイサイドウェル構造による省面積回路化

図3にHVICの断面構造を示す。HVICはローサイド回路を形成するためのローサイドウェルと、ハイサイド回路を形成するためのハイサイドウェルを備えており、いずれもp形基板上的n形拡散層により形成されている。ハイサイドウェルは、HVJT（High Voltage Junction Termination：高耐圧終端構造）によりローサイドウェルと分離されており、HVJTによりハイサイド回路とローサイド回路の間の高耐圧が保たれる。

(1) 従来のハイサイドウェル構造の課題

図3(a)に示すとおり、ローサイドウェルは各回路の電源電圧に対応する複数の拡散層で構成されるのに対して、ハイサイドウェルは従来のHVICにおいて単一の拡散層で構成されていた。これは従来の技術では高耐圧を維持したままハイサイドウェルを分割するのが困難であったためである。このためハイサイド回路は電源電圧が1種類に限定され、回路設計の自由度が低かった。

(2) 分割ハイサイドウェル構造

上述の課題を解決するため新たに分割ハイサイドウェル構造を開発した。図3(b)に、分割ハイサイドウェル構造を用いたHVICの断面構造を示す。ハイサイドウェルが二つの電源電圧に対応する二つの拡散層で構成されている。二つの拡散層は、p-isolationと呼ばれる低濃度のn形拡散層とp形拡散層から成る構造により、ハイサイドウェルの高耐圧を維持したまま分離されている。これによりハイサイド回路においてもローサイド回路と同様に、複数の電源電圧の回路を用いて回路を構成できる。この設計自由

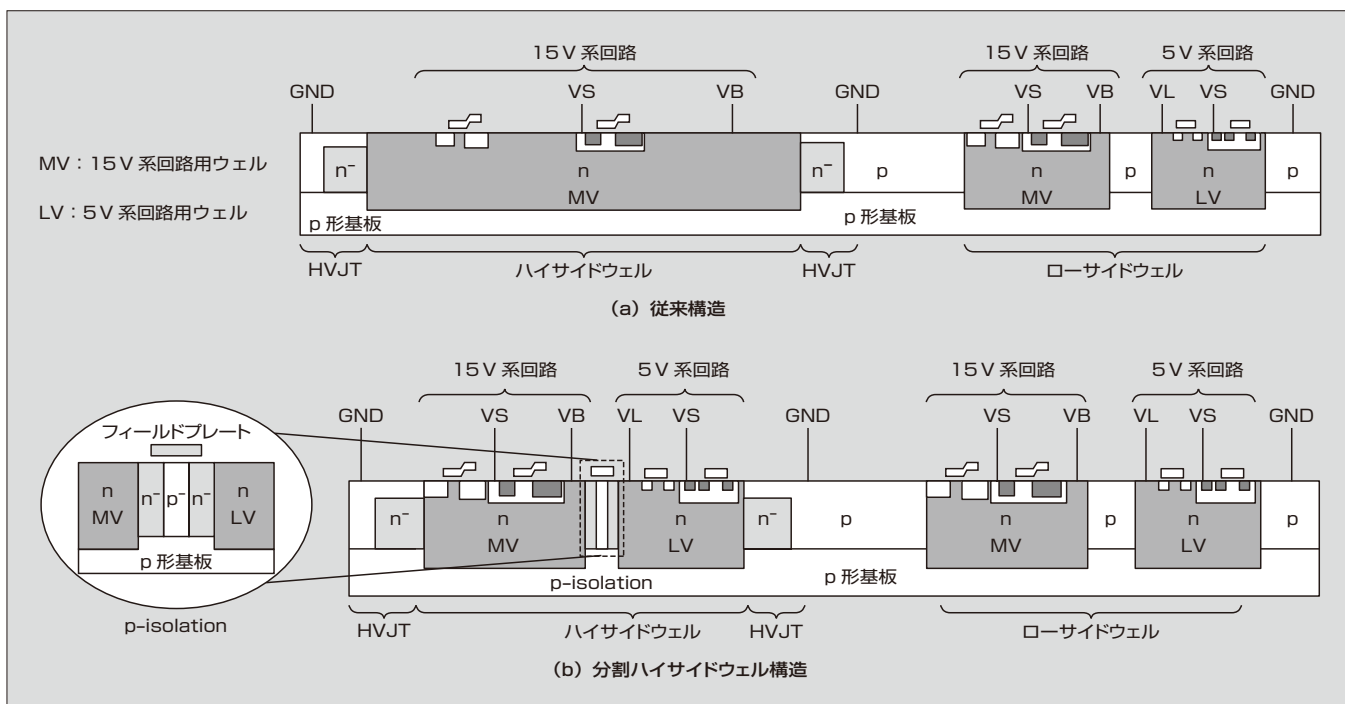


図3 HVICの断面構造

度の向上により、保護回路などのハイサイド回路を従来よりも約20%小さい面積で実現している。

3.2 省面積セルフシールド方式による高耐压技術

レベルシフト回路はローサイド回路からの信号をハイサイド回路に伝達する役目を持っており、ハイサイド回路が例えば400Vを基準に動作しているときには、レベルシフト回路は接地電位基準の信号を400V基準の信号に変換しなければならない。このレベルアップ機能は、高耐压のn形LDMOSFET (Laterally Diffused Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を用いることにより実現されている。図4に、600V耐压保証HVICチップのn形LDMOSFET部を示す。

(1) 従来の高耐压n形LDMOSFET

図4(a)はワイヤボンディングを用いた従来の高耐压n形LDMOSFETを用いた600V保証HVICのチップである。従来HVICでは高耐压n形LDMOSFETがチップ内で大きな面積を占めていた。

(2) セルフシールド方式高耐压n形LDMOSFET

今回、チップサイズを小型化するため、省面積で高耐压が実現できるセルフシールド方式を採用し、高耐压n形LDMOSFETを搭載した、600V保証HVICおよび1,200V保証HVICを開発した。図4(b)はセルフシールド方式高耐压n形LDMOSFETを用いた600V保証HVICのチップである。セルフシールド方式では、高耐压n形LDMOSFETとHVJTが一体で形成しており、独立した高耐压n形LDMOSFETが必要な従来方式よりも素子の占有面積を小さくできる。この技術により、従来品よりもチップサイズを20%縮小できた。

3.3 レベルダウン用高耐压素子技術

(1) レベルダウン機能

試作した1,200V耐压保証HVICは、異常通知信号のレベルダウン機能を備えている。これにより、上アームIGBTチップの過熱・過電流などの異常を通知する異常通知信号を、外部の絶縁素子やレベルシフト回路を用いることなく、外部のマイコンに伝達できる。

ハイサイド回路内の異常検知回路から出力された異常通知信号は、レベルシフト回路のレベルダウン機能によ

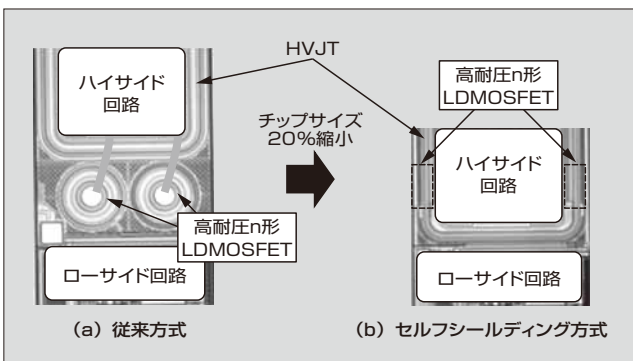


図4 600V 耐压保証 HVIC チップの n 形 LDMOSFET 部

り接地電位基準に変換され、ローサイド回路を介してマイコンに伝達する仕組みとなっている。レベルシフト回路のレベルアップ機能は高耐压n形LDMOSFETにより実現しているのに対し、レベルダウン機能は高耐压p形LDMOSFETにより実現している。

(2) 素子構造

図5に、今回新たに開発した1,200V耐压保証p形LDMOSFETの素子構造を示す。高耐压n形LDMOSFETと同様、セルフシールド方式によりHVJTと一体化した構造となっている。また、1,200V耐压を保証するため、ダブルリサーフ構造と呼ばれる高耐压構造およびRFP (Resistive Field Plate: 抵抗性フィールドプレート) 構造を採用している。ダブルリサーフ構造とは、p形基板、n形拡散層、表面のp形拡散層による三層構造からなり、高電圧印加時にn形拡散層と表面のp形拡散層が完全に空乏化することにより電界が緩和される。また、RFP構造は両端電極を高電位と接地電位に接続されたポリシリコン抵抗を高耐压領域に配置し、ポリシリコン抵抗部にできる均等な電位勾配により高耐压領域の電界を緩和する。これらの構造は、HVJTおよび高耐压n形LDMOSFETでも採用している。

(3) 特性

図6に1,200V耐压保証p形LDMOSFETの特性を示す。図6(a)はオフ耐压波形である。横型素子でありながら実耐压約1,640Vを実現している。1,700V以下の領域で見られるリーク電流は、RFP構造を流れる電流によるものである。RFP構造の抵抗値を最適化することにより、高耐压を維持しながら室温で5μA以下の低リーク電流を実現している。

図6(b)に、出力特性波形を示す。ゲート-ソース間電圧-15V、ドレイン-ソース間電圧-400Vにおいてドレイン電流5.4mAが得られており、オン耐压は約1,500Vを実現している。図6(b)の点線は開発初期に試作した素子の特性である。-800V付近での電流の低下は近年発見された基板リーク現象によるもので、これによりオン耐压が-800Vに制限されていた。富士電機ではこの現象の詳細な発生メカニズムを解明し、その結果に基づいて拡散層プロファイルを最適化した。これにより基板リーク現象の発

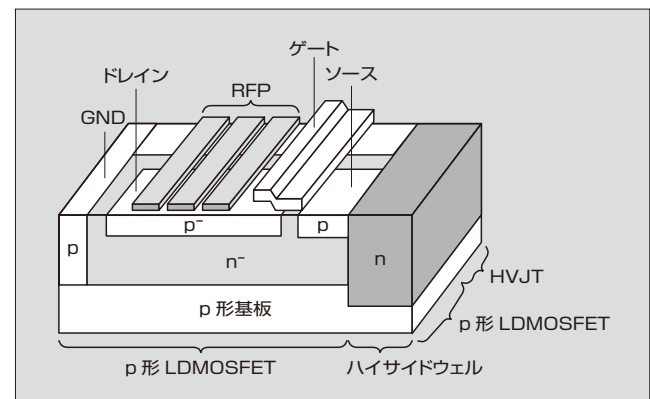


図5 1,200V 耐压保証 p 形 LDMOSFET の素子構造

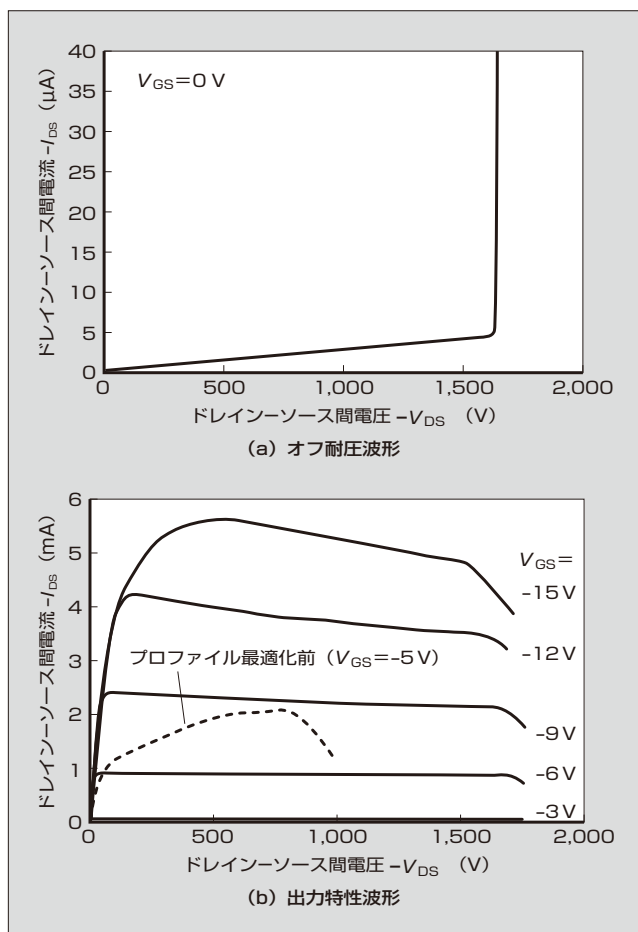


図6 1,200 V 耐圧保証 p 形 LDMOSFET の特性

生を -1,500 V まで抑制し、高いオン耐圧を実現した。

4 要素回路技術

4.1 高ノイズ耐量レベルシフト回路技術

(1) 従来のレベルシフト回路

図7に、従来のレベルアップ用レベルシフト回路を示す。レベルシフト抵抗と高耐圧 n 形 LDMOSFET を用いた二組のソース接地増幅回路およびハイサイド回路内のラッチ回路により構成している。

ソース接地増幅回路にローサイド回路からの制御信号を入力することにより、レベルシフト抵抗において制御信号に応じた電圧降下が生じ、ラッチ回路の出力が切り替わる。この動作によりローサイド回路からハイサイド回路への信号伝達が行われる。

(2) 従来回路の dV/dt ノイズによる回路誤動作

従来のレベルシフト回路では、 dV/dt ノイズに対して誤動作しやすいという課題があった。 dV/dt ノイズは、上アーム IGBT のスイッチングに伴い、ハイサイド回路の基準電位が急激に変動することにより発生する。この dV/dt ノイズによりレベルシフト抵抗にノイズ電流が流れて電圧降下が生じ、ラッチ回路の出力および後段のゲート駆動回路の出力が誤って反転することがあった。

(3) インピーダンス変換方式レベルシフト回路

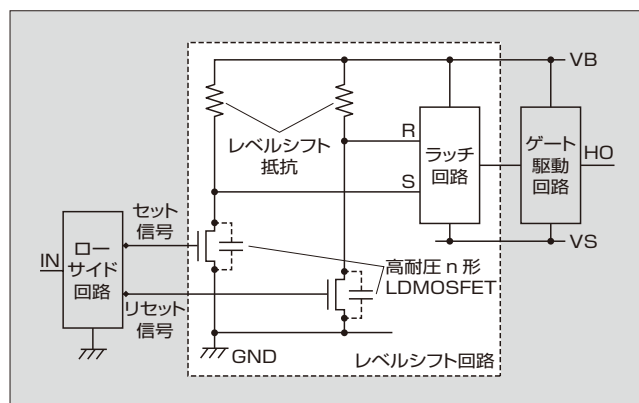


図7 従来のレベルアップ用レベルシフト回路

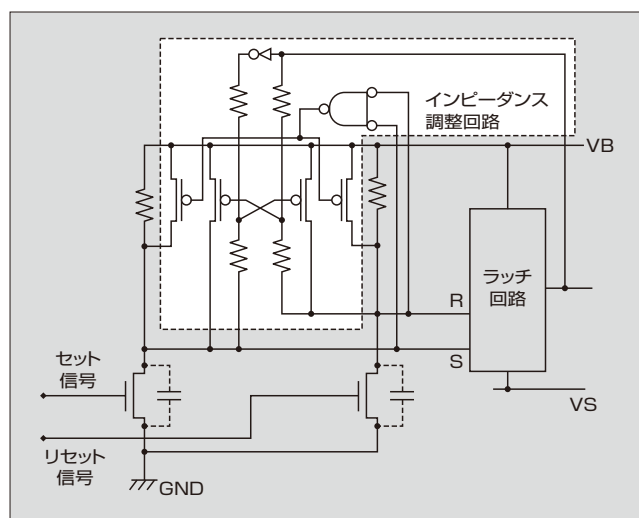


図8 インピーダンス変換方式レベルシフト回路

図8に、 dV/dt ノイズに対する耐量を高めるため新たに開発したインピーダンス変換方式レベルシフト回路を示す。レベルシフト抵抗に並列にインピーダンス調整用の MOSFET を接続している。ラッチ回路の出力状態に応じて、レベルシフト抵抗部のインピーダンスを動的に最適化する構成である。これにより dV/dt ノイズ電流によるレベルシフト抵抗での電圧降下をコントロールし、誤動作を防止する。

4.2 過熱・過電流保護回路技術

開発した HVIC は、上アーム IGBT の過熱・過電流からの保護のためハイサイドウェル内に過熱・過電流保護回路を形成している。

過電流検出は、IGBT に内蔵した電流センス IGBT に流れる電流を HVIC に内蔵したシャント抵抗を用いてモニタすることで行う。また、過熱検出は、温度検出用ダイオードの接合電圧をモニタすることで行う。

図9に試作した HVIC を搭載した 1,200 V/100 A クラス IPM の過電流試験の波形を示す。上アーム IGBT に 260 A 超の過電流が流れた直後、過電流を示す異常通知信号が出力され、HVIC のゲート出力がシャットダウンされている。過電流発生からシャットダウンまでの時間は $8\mu\text{s}$ 程度で

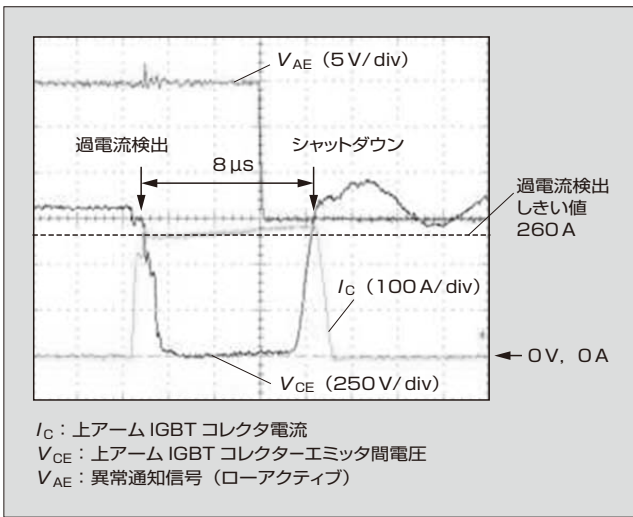


図9 HVIC 搭載 1,200 V/100 A クラス IPM の過電流試験波形

あり、IGBT を保護する上で十分な高速応答が可能である。

5 あとがき

本稿では、新たに開発した IPM 用 HVIC 技術について述べた。この技術は、IPM の高機能化・高信頼性化を実現し、電力変換システムの高信頼性化、小型化に寄与するものである。今後も電力変換システムの価値の向上に寄与するパワー IC 技術を開発していく所存である。

参考文献

(1) 清水直樹ほか. インテリジェントパワーモジュール「VシリーズIPM」. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.384-388.

(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) 山路将晴ほか. 800 V保証HVIC技術. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.398-404.
 (4) Yamaji, M. et al. A 600 V High-Voltage IC Technique With a New Self-Shielding Structure for High Noise Tolerance and Die Shrink. IEEE Trans. Electron Devices, 2015, vol.62, no.5, p.1524-1529.
 (5) 上西顕寛ほか. 1200 VクラスHVIC用高耐压Pch-LDMOS. 平成26年電気学会全国大会論文集. 2014, p.235.
 (6) Akahane, M. et al. A new level up shifter for HVICs with high noise tolerance. Proc. ECCE-ASIA, p.2302-2309.



上西 顕寛

パワー IC のデバイス・プロセ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デバイス開発部。IEEE 会員。



赤羽 正志

半導体集積回路技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。電気学会会員。



山路 将晴

パワー IC のデバイス・プロセ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デバイス開発部チームリーダー。IEEE 会員。電気学会会員。



車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

3rd-Generation Direct Liquid Cooling Power Module for Automotive Applications

荒井 裕久 ARAI, Hirohisa

樋口 恵一 HIGUCHI, Keiichi

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

富士電機は、ハイブリッド自動車および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。100kWクラスのモータ容量を想定した750V/800A定格のパワーモジュールである。車載用パワーモジュールに対する市場の要求は、高効率化と小型化である。これに応えるため、水冷フィンとカバーを一体化したウォータージャケットにより放熱性を改善するとともに、はんだの信頼性を向上させて連続動作温度175℃を実現した。また、IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTの適用により、パワーモジュールの小型化を実現した。

Fuji Electric has developed a 3rd-generation direct liquid cooling power module for hybrid and electric vehicles. The power module has a rated capacity of 750 V/800 A, which is designed for motor capacity of 100 kW. The market for automotive application based power modules has been requiring increased efficiency and module miniaturization. To meet these demands, we have improved exothermicity by adopting a water jacket for integrating the cooling fins and cover while also increasing the reliability of the solder, thus enabling the module to achieve continuous operation at 175 °C. Furthermore, we have miniaturized the power module by adopting an RC-IGBT that integrates IGBT and FWD.

① まえがき

地球温暖化を防止するためにCO₂削減が求められており、電気モータで走行するハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)はCO₂削減に大きな効果があると期待されている。HEVやEVに用いられるインバータは、車両内部の限られたスペースに搭載され、高電力・低損失であることが必要になる。したがって、インバータの主要な部品である車載用パワーモジュールにも小型化と高効率化が求められる。

富士電機は、次世代の車載用パワーモジュールとして車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールを開発した(図1)。このパワーモジュールは、最適化された流路デザインにより、従来よりも高い放熱性能を達成している。さらに、カバー一体型のアルミニウムウォータージャケットを採用するとともに、冷媒の出入り口にはフランジ構造を採用している。ユーザは出入り口に指定の流量の冷媒を流す配慮をするだけでよい。

また、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)には第7世代のチップ技術を適用して損失の低減を図るとともに、FWD(Free Wheeling Diode)が不要なRC-IGBT

(Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を使用してモジュールを小型化した。

② 特徴

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの特徴を次に示す。また、主な仕様を表1に示す。

(a) 高放熱性能を実現する冷却技術

水冷フィンとカバーを一体化したウォータージャケットにより放熱性を改善した。

(b) 連続動作温度175℃の保証

はんだの信頼性を向上させた。

(c) モジュールの小型化

IGBTとFWDを一体化したRC-IGBTを適用した。

本稿では、これらの特徴の中から冷却技術とRC-IGBTの適用技術について述べる。

③ 高放熱性能を実現する冷却技術

自動車の動力制御に用いるインバータは限られたスペースに搭載されるため、小型かつ搭載方法の自由度の高さと、低燃費を意識した軽量化と効率向上が求められる。イン

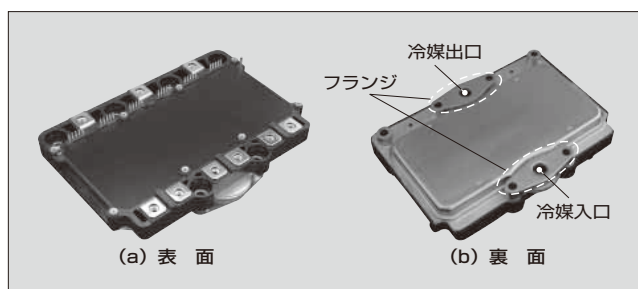


図1 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール

表1 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの主な仕様

項目	定格
コレクター-エミッタ間電圧	750V
定格電流	800A
最大動作温度	175℃
外形	162 × 116 × 24 (mm)
質量	520g

バータに搭載されるパワーモジュールにおいても、小型・軽量化、高効率化が必要であり、世代ごとに20%以上の小型・軽量化を行ってきた。特に、車載用パワーモジュールでは、直接水冷構造を用いた高放熱化やアルミニウム冷却器を用いた軽量化が進んでいる。

富士電機は、放熱性能を改善するためパワーモジュールの直接水冷構造においてアルミニウム冷却フィンの放熱性能を向上させ、熱抵抗を30%低減させた。

3.1 冷却技術の課題

図2に、第2世代アルミニウム直接水冷型IPM (Intelligent Power Module) における従来構造の断面図を示す。この構造は、モジュールとヒートシンクを直接はんだで接合している。ウォータージャケットはユーザが独自に設計するため、ヒートシンクとウォータージャケットが個別部品となり、流路設計だけでなく、水密性と公差を考慮した設計が必要である。そのため、座屈や変形に耐えられる材料の選択やベース厚さの確保が必要であり、熱抵抗上昇の要因となっていた。アルミニウム直接水冷構造における放熱能力の向上と高信頼性を同時に確保することが課題であり、これを解決するため、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化したアルミニウム冷却器を開発した。

3.2 第3世代の冷却設計技術

パワーモジュールの放熱性能は、熱抵抗と熱伝達係数の二つで示すことができる。熱抵抗と熱伝達係数には式(1)の関係がある。

$$h = \frac{1}{R_{th} \cdot A} \dots \dots \dots (1)$$

h : 熱伝達係数 [W/ (m² · K)]

R_{th} : 熱抵抗 (K/W)

A : フィン表面の面積 (m²)

また、熱伝達係数 h は冷媒とフィンの熱交換性能を示す。熱抵抗を下げるためにはフィンの熱交換性能を大きくすることが有効であり、フィン表面の流速が速いほど熱交換性能を示す熱伝達係数は大きくなる (式(2))。

$$h = \frac{0.664 k \times \frac{\eta C_p^{1/3}}{k}}{L} \times \frac{\rho L}{\eta} \times \frac{\rho \nu L^{1/2}}{\eta} \dots \dots \dots (2)$$

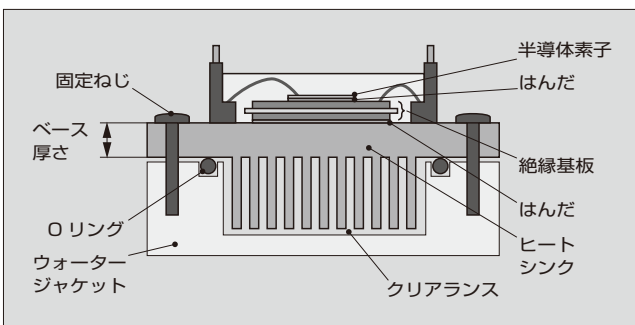


図2 従来構造の断面図

h : 熱伝達係数 [W/ (m² · K)]

k : 熱伝導率 [W/ (m · K)]

η : 冷媒の粘度 (Pa · s)

C_p : 比熱 [J/ (kg · K)]

L : フィンの代表長さ (m)

ρ : 冷媒の密度 (kg/m³)

ν : 冷媒の流速 (m/s)

シール材を用いた従来の冷却構造は、ウォータージャケットをユーザが設計し用意するため、フィンの先端とウォータージャケットの間にクリアランスが必要である。このクリアランスが放熱性能に与える影響について簡易モデルを用いて試算した。

フィン形状は厚さ1mm、間隔1mm、高さ10mmとし、冷媒は冷媒導入口に均等に1L/minが流れるように設定した。試算の結果、クリアランスが広がるほど熱抵抗は上昇し、悪化することが分かった。冷媒は圧力抵抗の低い部分を通るため、開口部の広いクリアランス部に流出し、放熱性能に寄与するフィン間の流速が低下する。さらに、モジュールが並列に接続されると、冷媒流速の低下が顕著になることが予想できる。ヒートシンクとウォータージャケットを一体化してクリアランスをなくすことは、フィン間の冷媒流速を上げて熱抵抗を下げるのに効果的である⁽²⁾。

図3に、車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールに採用した新構造の断面図を示す。新構造は、ウォータージャケットとフィン先端部を接合してクリアランスをなくすだけでなく、フィン形状にも工夫を加えた。これにより、冷媒を効率よく活用できる冷却構造とした。さらに、ベースに相当する部分の厚さも薄くしている。

図4に熱抵抗の比較結果を示す。新構造は、冷媒の活

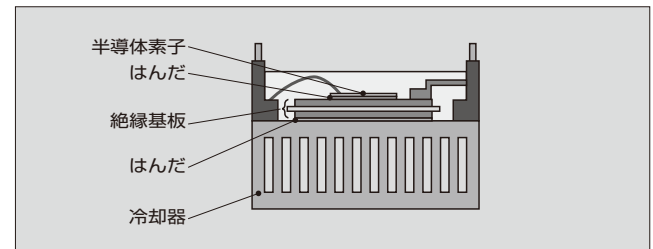


図3 新構造の断面図

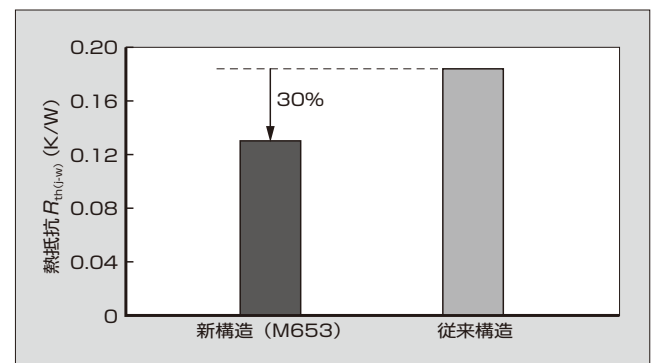


図4 熱抵抗

用と熱伝導性を考慮しており、従来構造よりも熱抵抗が30%低減した。

4 RC-IGBTの適用技術

富士電機では、750V/800Aクラスの車載用パワーモジュールの開発において、燃費向上のための低損失化に加え、モジュールの小型化の要求に応えるため、IGBTとFWDを一つのチップに統合した750V耐圧のRC-IGBTを開発した。RC-IGBTは家電向けの小容量チップでは実用化されているが、車載用として要求される大容量チップでは、これまで低損失化のための技術的ハードルが高く困難であった。ここではRC-IGBTの適用における設計技術と適用効果について述べる。

4.1 RC-IGBTの設計技術

図5にRC-IGBTの概略構造を示す。フィールドストップ(FS)型IGBTをベースに、ストライプ状に交互にIGBT領域とFWD領域を配置した構造である。このため、2チップを1チップにすることで、無効領域(ガードリングと呼ばれるチップ周辺部の耐圧保証のための領域)を削減し小型化が実現できる⁽⁴⁾。また、IGBT動作時の発熱がFWD部からも放熱し、FWD動作時にはIGBT部からも放熱するので、熱抵抗を低減できる効果がある。

750V/800Aクラスのパワーモジュールの電流容量はモータ容量によって異なるものの、電源電圧 V_{cc} は400~450V、キャリア周波数 f_{sw} は5~10kHzの範囲で動作することが一般的である。図6に、750V耐圧RC-IGBTをパワーモジュールに適用した場合のインバータ動作時の発生損失を示す。

スイッチング周波数が10kHzまで高くなるとスイッチング損失(P_{on} , P_{off} , P_{rr})が大きくなるものの、IGBTとFWDの定常損失(P_{sat} , P_f)は40%と大きな比率を占める。定常損失を低減するために、IGBT領域のトレンチピッチなどデバイス表面のデザインを工夫することで、定常損失を決めるパラメータであるコレクター-エミッタ間飽和電圧を最小限に抑えている。また、チップは薄いほど飽和電圧と順電圧を下げるができる。そこで、750V耐圧に必

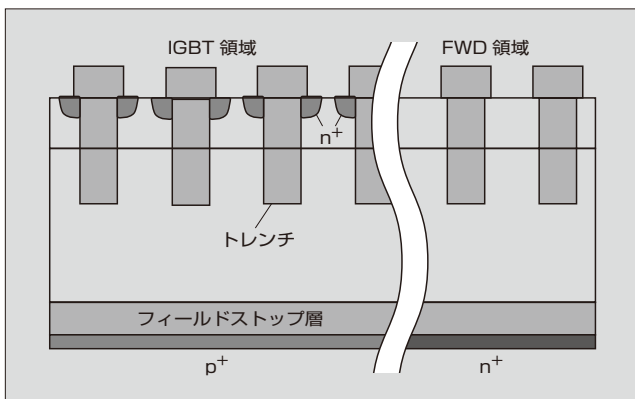


図5 RC-IGBTの概略構造

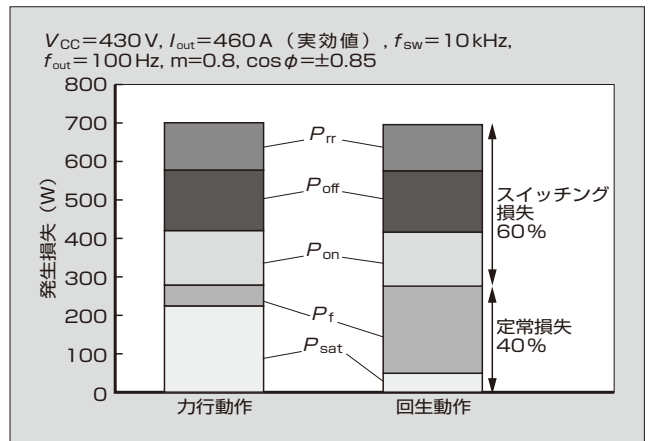


図6 インバータ動作時の発生損失

要な最小限の厚さまでウェーハを薄くし、低損失化を図った。また、IGBTのコレクタp形層とFWDのカソードn形層を同一チップの裏面に形成した。IGBTとFWDのスイッチング損失は、定常損失とトレードオフの関係にある。そこで、キャリアライフタイム制御を行って、このトレードオフを最適化した。

4.2 RC-IGBTの損失改善

IGBTとFWDを組み合わせた通常の場合と同じ活性面積におけるRC-IGBTの電気特性について述べる。

(1) IGBT特性

図7に、RC-IGBTと通常のIGBTの飽和電圧出力特性を示す。RC-IGBTでは、薄ウェーハ化と表面デザインの最適化により、通常のIGBTよりも低い飽和電圧を実現している。また、RC-IGBTでは低飽和電圧領域において伝導度変調^(注)が起りにくく、電流-飽和電圧曲線にスナップバック⁽⁶⁾が起こることが報告されている。そこで、IGBTとFWDの各領域の構造を最適化して伝導度変調を起しやすくし、スナップバックを抑制するようにした。

図8に、RC-IGBTと通常のIGBTのターンオフ特性を

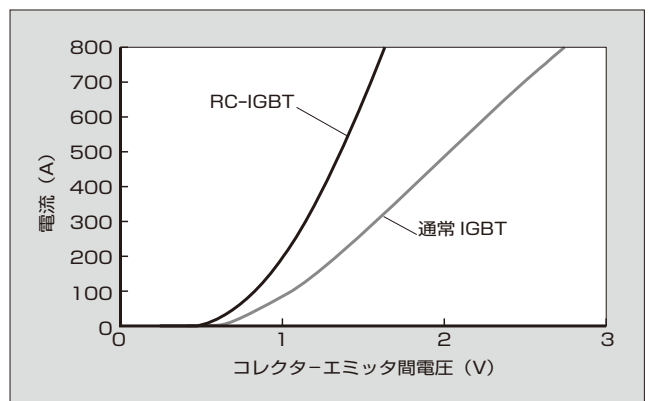


図7 IGBTの飽和電圧出力特性

<注> スナップバック：電流と飽和電圧が途中で減少した後に増加に転じる現象をいう。

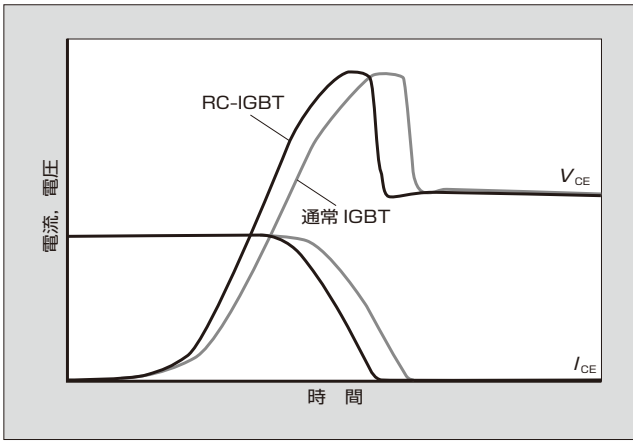


図8 IGBTのターンオフ特性

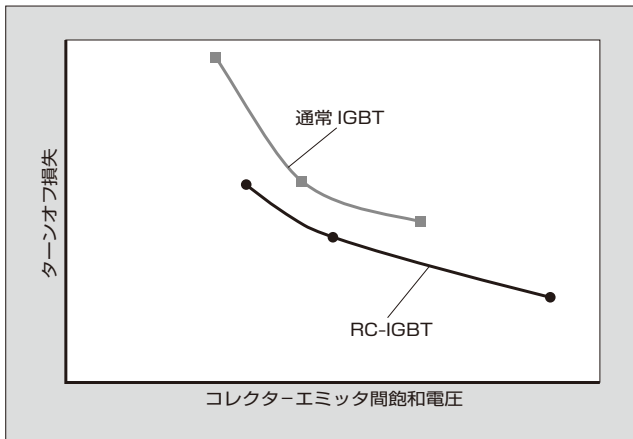


図9 IGBTのトレードオフ特性

示す。RC-IGBTの方が通常のIGBTに比べてターンオフ時の dv/dt が大きく、キャリアの排出速度が大きいことが分かる。これは、RC-IGBTでは裏面のp形層（IGBT領域）とn形層（FWD領域）が短絡しているコレクタショートの状態となっていることにより、ターンオフ時に電子がコレクタp形層に加えて、隣接するFWD領域のカソードn形層からも排出されるためである。この結果、RC-IGBTは通常のIGBTに比べてターンオフ損失が低減される。RC-IGBTでは、定常損失を改善する方向（低飽和電圧化）に調整しても、通常のIGBTよりもターンオフ損失を抑制することができ、トレードオフ特性を大きく改善することができた（図9）。

(2) FWD特性

図10に、RC-IGBTと通常のFWDの順方向出力特性を示す。IGBTの定常損失と同様に、RC-IGBTでは薄ウェーハ化および表面構造の最適化の効果により、通常のFWDに比べて順方向電圧の降下を低減させた。

4.3 放熱特性

RC-IGBTでは、IGBTとFWDを一体化することによりチップの面積とモジュールの面積を縮小した。また、RC-IGBTにおいては、FWD領域からの発熱をIGBT領域の部分も介して放熱するため、通常のFWDよりも大幅

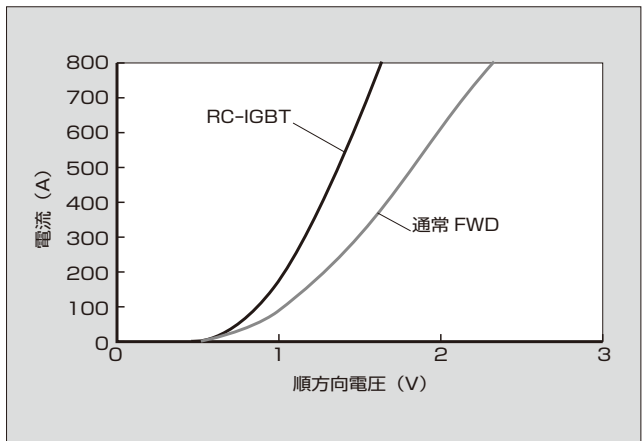


図10 順方向出力特性

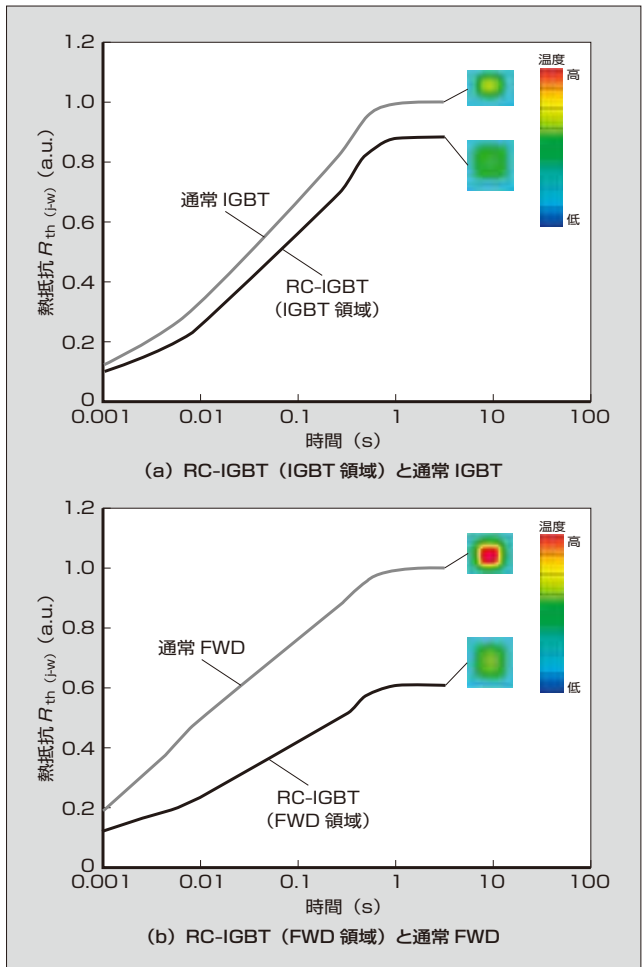


図11 同一活性面積における熱抵抗

に熱抵抗が低い。直接水冷構造のモジュールを想定し、同一活性面積におけるRC-IGBTと通常のIGBT・FWDの熱抵抗を比較した（図11）。RC-IGBTのIGBT領域の熱抵抗は通常のIGBTに比べて12%、FWD領域の熱抵抗は通常のFWDに比べて40%低くなっている。

4.4 達成した性能

図12に、通常のIGBT・FWD、これと活性面積が同じRC-IGBT、および30%小型化したRC-IGBTについてイ

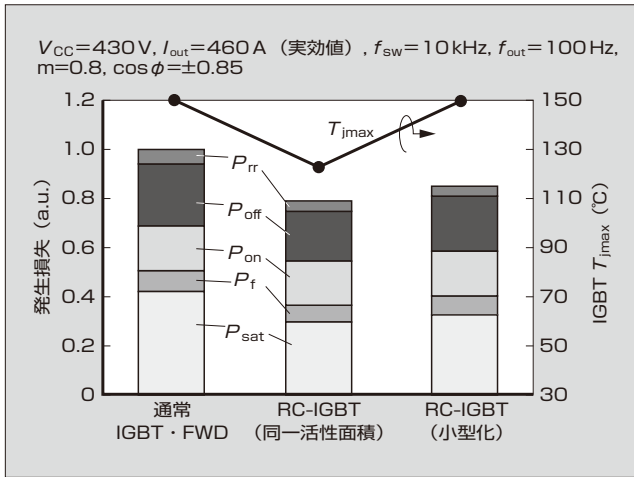


図12 インバータ動作時の発生損失と温度の計算結果

ンバータ動作時の発生損失と温度を計算した結果を示す。

通常のIGBT・FWDに比べて、飽和電圧、順電圧、ターンオフ損失を低減したことで、RC-IGBTはインバータ動作時の電力損失を20%以上低減できる。低損失化に加え、放熱性に優れるのでチップ最高温度は28℃程度低減できる。モジュールのチップサイズは動作時の最大温度で決まるため、この結果は、RC-IGBTは通常のIGBT・FWDより小さいチップサイズで同定格のインバータ動作が可能であることを意味する。30%小型化したRC-IGBTで通常のIGBT・FWDと同程度の温度となっており、モジュールの面積は15%低減が可能である。

5 あとがき

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールについて述べた。高放熱性能と連続動作温度175℃を実現しつつ、RC-IGBTの適用によって従来に比べて、電流容量当たりの体積で40%の削減を達成した。

今後、さらなる技術革新を実施し、小型・低損失の製品を開発していく所存である。

参考文献

(1) 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.
 (2) Gohara, H. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation". Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.
 (3) Takahashi, K. et al. "New Reverse-Conducting IGBT (1,200 V) with Revolutionary Compact Package". Proceedings of ISPSDS 2014, p.131-134.
 (4) Laska, T. et al. "The Field Stop IGBT (FS IGBT) - A New Power Device Concept with a Great improvement Potential". Proceedings of ISPSD 2000, p.355-358.
 (5) Momota, S. et al. Plated Chip for Hybrid Vehicles. FUJI ELECTRIC REVIEW. 2008, vol.54, no.2, p.49-51.
 (6) M, Rahimo. et al. "The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications". Proceedings of ISPSD 2009, p.283-286.



荒井 裕久

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。



樋口 恵一

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。



小山 貴裕

ハイブリッド自動車用IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部輸送パワエレ事業部EVモジュール開発部。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術

Packaging Technology of 3rd-Generation Power Module for Automotive Applications

郷原 広道 GOHARA, Hiromichi

玉井 雄大 TAMAI, Yuta

山田 教文 YAMADA, Takafumi

近年、ハイブリッド車や電気自動車の開発と普及が加速しており、燃費向上につながる小型・軽量化、低損失化かつ高出力化したパワーモジュールが求められている。富士電機は、直接水冷構造用高放熱冷却器、銅端子配線と電極の超音波接合技術および析出強化と固溶強化を組み合わせて複合強化した高寿命の新しいんだなどを開発した。この技術を RC-IGBT チップを適用した車載用第3世代パワーモジュールに適用し、高信頼性とフットプリントの30%削減と薄型化を実現した。

The development and popularization of hybrid and electric vehicles has been accelerating in recent years. These new vehicles demand miniaturized, light-weight and higher-output power module in order to improve fuel efficiency. Fuji Electric has developed high heat dissipating cooling unit for direct water-cooled structures, an ultrasonic bonding technology for electrodes and copper terminal, and new long-life solder that applies both precipitation strengthening and solid-solution strengthening. By applying these technologies, the 3rd-generation power modules for automotive applications that utilize RC-IGBT dies achieve greater reliability, about 30% smaller footprint and thinner structure compared to the previous generation.

1 まえがき

近年、省エネルギーの推進とCO₂排出規制の強化により、自動車業界では電力を動力源としたハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)の開発と普及が加速している。HEVやEVの動力制御に用いるインバータは限られたスペースに搭載され、低燃費を意識した軽量化と効率向上が必要である。また、電池やモータの出力に合わせたパワーモジュールが求められている。

この要求に応えるため、富士電機では、大幅な電力密度の向上を実現するパワーモジュールの技術開発を進めている。車載用アルミニウム直接水冷型パワーモジュールでは、2012年の第1世代、2015年の第2世代と電力密度を世代ごとに20%以上向上する製品を開発してきた⁽¹⁾。さらなる高電力密度化・高出力化に対応するため、第3世代のアルミニウム直接水冷モジュールでは、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とFWD(Free Wheeling Diode)を統合したRC-IGBT(Reverse-Conducting IGBT:逆導通IGBT)チップを採用し、冷却フィンによる高放熱化を実現した。これにより、30%という大幅なフットプリント削減と冷却構造の最適化により薄型化を実現している。

本稿では、車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術、すなわち高放熱冷却器の設計技術、超音波接合の設計技術およびんだ寿命設計技術について述べる。

2 高放熱冷却器の設計技術

直接水冷構造の設計においては、熱流体解析技術を用いており、冷媒の流れと熱の移動を考慮したシミュレーションを実施している。冷却器の冷却性能が冷媒流速に依存することに着目し、限られた冷媒をどのように流すかをポイ

ントとして設計している。

2.1 設計の高精度化

シミュレーションを用いた熱設計においては、解析精度が設計の精度に直結する。そこで、赤外線カメラを用いた温度分布の実測結果をシミュレーションにフィードバックし、メッシュ条件を最適化することで解析精度を向上させた。この改善効果を反映した最適化モデルによる製品設計の結果、熱抵抗において設計値と実測結果の誤差は10%未満を達成し、シミュレーションを用いた設計を可能としている。

2.2 設計課題と性能改善

直接水冷構造の冷却部には二つの構造がある。一つは、ヒートシンクとウォータージャケットが分離している開放型構造、もう一つは、これらが一体化した密閉型構造である。図1に、チップ温度特性を評価するためのシミュレーションモデルを示す。

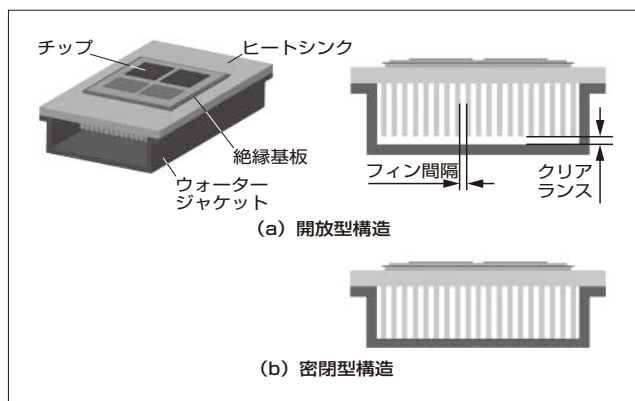


図1 シミュレーションモデル

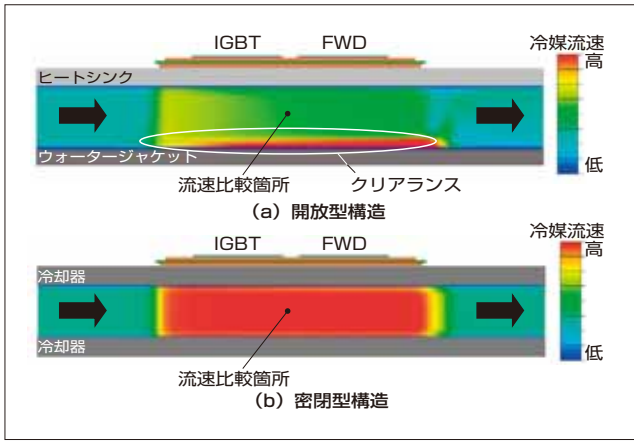


図2 断面流速分布

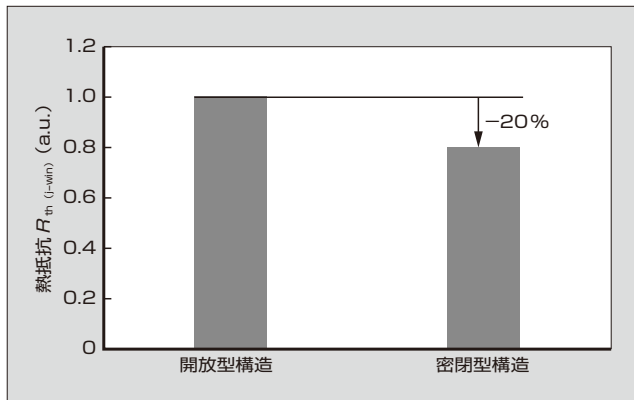


図3 熱抵抗

開放型構造は、Oリングやガスケットでヒートシンクとウォータージャケットを密閉する。そのため、おのおの設計公差や熱変形を考慮してフィン先端とウォータージャケットとの間にクリアランスを設ける必要がある。このクリアランスにより冷媒が流れる流路断面積が広がり、フィンとフィンの間隔よりもクリアランスが大きくなると、フィン間の通水抵抗は相対的に増加することからフィン間流速が低下し、冷却性能は低下する。一方、密閉型構造は、ヒートシンクとウォータージャケットが一体になっているので、開放型構造のようなクリアランスがない。

図2にシミュレーションで得られた断面流速分布を示す。開放型構造では、クリアランスに冷媒が流出するのに対し、密閉型構造ではクリアランスがないので流速分布がほぼ均一となり、流速は約2倍まで上昇する。図3に開放型構造と密閉型構造における熱抵抗の比較を示す。密閉型構造は、ヒートシンクの薄化による効果と併せ、開放型構造に比べて熱抵抗が20%低減する⁽³⁾。

③ 超音波接合の設計技術

車載用パワーモジュールの電流密度の上昇に伴い、パワーモジュール内部における配線容量の増大と配線エリアの省スペース化が求められている。

図4に、従来のアルミニウムワイヤ配線構造、銅ワイ

配線技術	アルミニウムワイヤ ボンディング	銅ワイヤ ボンディング	銅端子 超音波接合
断面構造			
外観			
通電容量	△ (1.0)	○ (1.7)	◎ (3.5)

図4 配線構造

ヤ配線構造、銅端子配線構造の比較を示す。端子ケース内に成型された銅端子と絶縁基板上の銅パターンは、配線で接続される。主電流をつかさどるこの配線に超音波接合を適用した銅端子配線は、通電容量が従来のアルミニウムワイヤ配線に対して約3.5倍となり、実装面積の削減につながった。

3.1 パワーモジュールにおける端子の超音波接合

図5に超音波接合の概要を示す。超音波接合は、超音波振動と圧力によって接合面の表面酸化膜を破り、金属面同士が接触・拡散する固相拡散接合であり、溶融点以下の温度で母材同士を接合することができる。この超音波接合によって、絶縁基板回路上の銅回路パターンに銅端子を接合材料を介さずに直接接合し、電流経路を形成する。

超音波接合部の金属組織について、銅端子、接合部、銅回路パターンの断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した (図6)。超音波接合部は、加工硬化により銅端子よりも微細な組織 (結晶粒径) になっている。強度は結晶サイズに依存し、微細なほど高い強度が得られる傾向があり、結晶サイズの違いが寿命予測精度を低下させる恐れがある。そこで、超音波接合部の結晶粒が微細であることを考慮し、実機により近い端子形状のテストピースを用いて銅端子の金属固相拡散接合部の寿命予測技術を確立した。

3.2 疲労試験と寿命予測の検討

超音波接合部を評価するための銅端子部寿命評価モデル (図7) を作製し、負荷を繰り返し与える疲労試験を行った。まず、適用製品の変形をフルモデル解析で求め、銅端子部

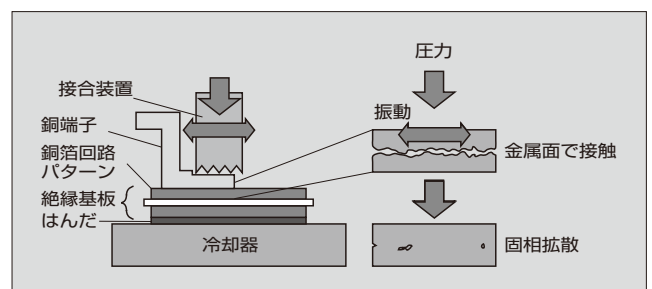


図5 超音波接合の概要

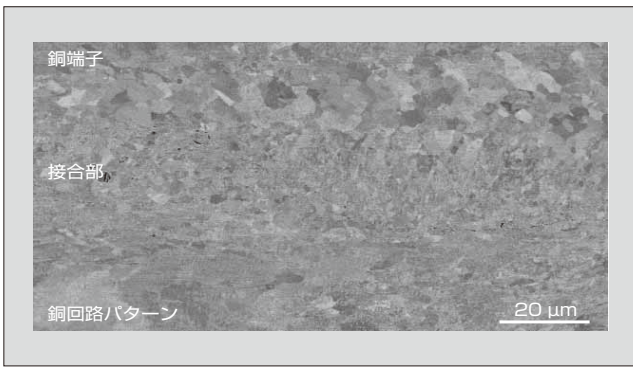


図6 超音波接合部の断面 SEM 像

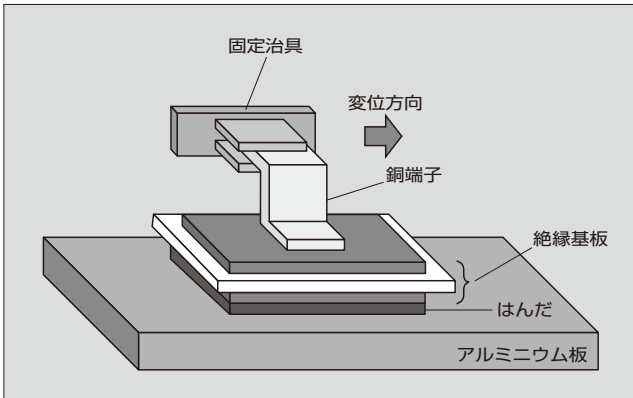


図7 銅端子部寿命評価モデル

に発生する負荷方向を確認した。この負荷方向に一致する強制変位を条件として、要素モデルによる応力シミュレーションと実機による疲労試験を行った。

応力シミュレーションの結果から、銅端子の接合界面に局所的な応力が発生することを確認した。また、端子部の疲労試験の結果から、発生する応力によって接合界面に沿ってクラックが進展し、接合界面で破断することを確認した。シミュレーションと疲労試験の結果において破壊の起点が一致することから、これらの結果を基に寿命予測方法を検討した。

応力解析から算出した全ひずみを縦軸に、端子が破断した際の繰返し試験回数を横軸にとり、銅端子と銅材試験片の疲労寿命曲線を得た(図8)。銅材試験片は、一般的な銅材(C1100, 1/2H)をダンベルの形状に加工したものである。寿命予測にはこの疲労寿命曲線を使用することが一般的であるが、超音波接合を行った銅端子と銅材試験片では、疲労寿命曲線の傾きが一致していないため使用できない。傾きが一致しないのは接合部の結晶粒サイズが異なることに起因すると考えられる⁽⁴⁾。そこで、実製品について疲労試験を行い、要素モデルの寿命疲労曲線の妥当性を検証した。

実製品における寿命評価結果を疲労寿命曲線と照らし合わせた結果、超音波接合を行った銅端子の疲労寿命曲線上に、実製品の寿命評価結果が一致することが分かった。端子部寿命評価モデルを用いた場合に接合界面で破断する破壊モードが再現し、試験結果と合うことから寿命推定が可

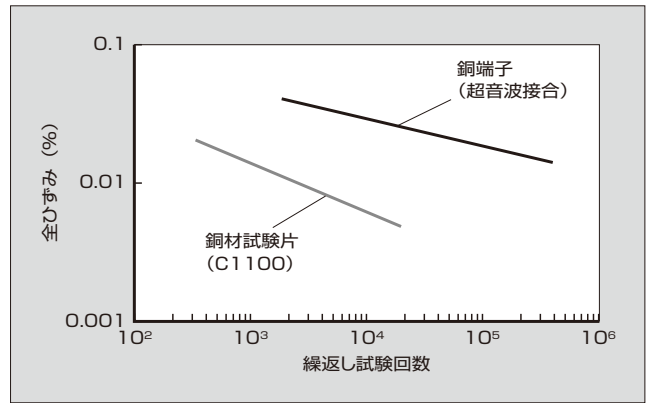


図8 銅材試験片と銅端子の疲労寿命曲線

能であることを確認した。

4 はんだ寿命設計技術

動作保証温度を拡大することで、モジュールは高電力密度化に対応することができる。一方、モジュールは動作温度範囲の拡大によりモジュールの最も故障しやすい箇所である絶縁基板の下のはんだの寿命も低下する。従来のはんだは、熱時効^(注)による物性変化が強度を低下させ、寿命が低下する。また、この熱時効の影響を受けるはんだは、コフィンマンソン則による寿命設計だけでは精度が得られず、設計が複雑になる。これらに対応するため、高温下における強度低下を抑制する新はんだを開発した。

図9に構成を示すテストピースを用いて、従来のはんだと新はんだの比較評価を行った。評価結果として、図10にクラック進展速度を、図11に温度サイクル試験前後のはんだ組織のSEM像を、図12に175℃で1,000時間加熱した後の引張強度を示す。

(1) 従来のはんだ

従来のはんだ(Sn-Ag系はんだ)は、温度サイクルにおける温度変化量 ΔT の増大に伴ってクラック進展速度が

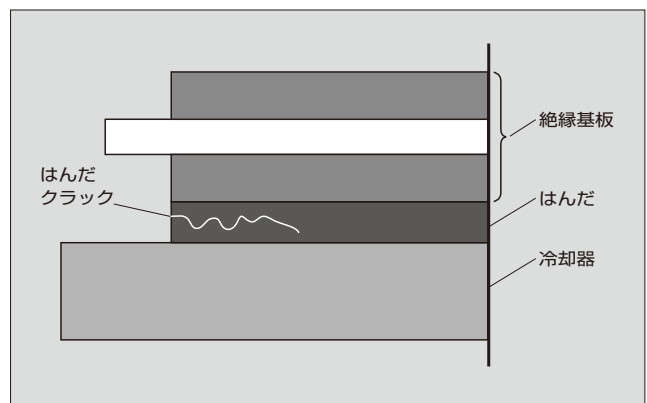


図9 テストピースの構成

<注> 時効：時間の経過に伴い金属の性質(例えば、硬さなど)が変化する現象をいう。

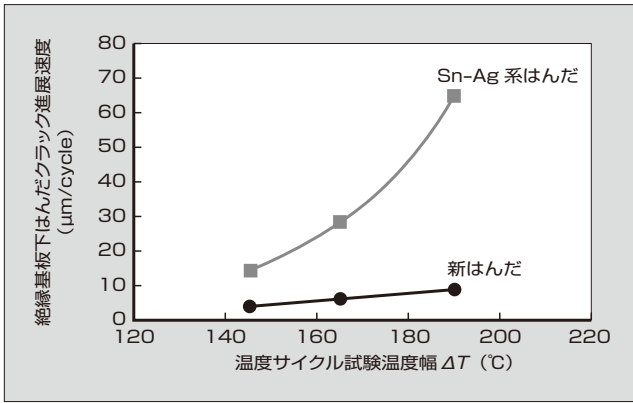


図10 はんだのクラック進展速度

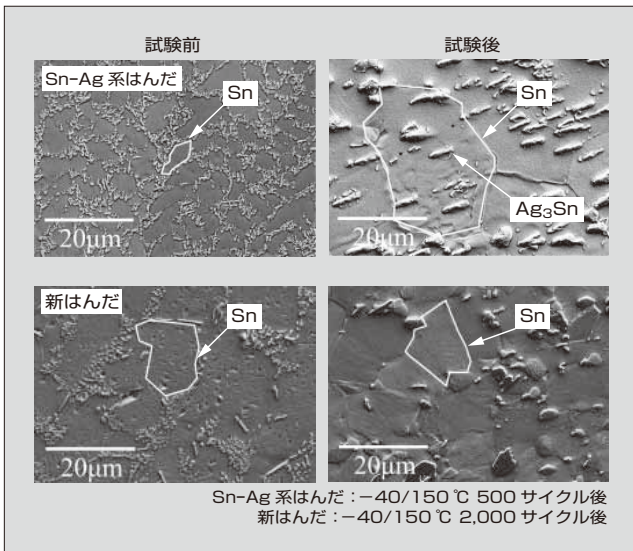


図11 はんだ組織のSEM像

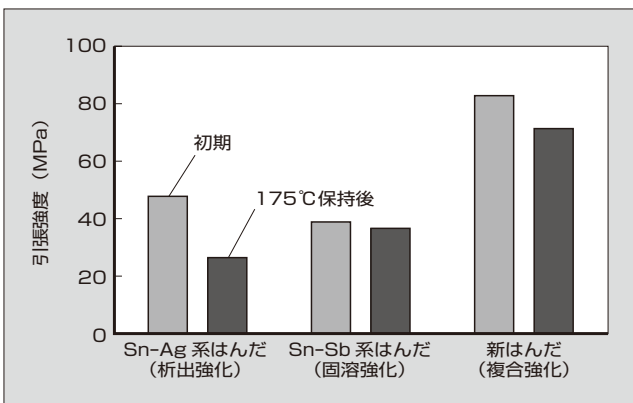


図12 はんだの引張強度

加速度的に増加する(図10)。はんだ組織のSEM像を観察すると、試験前は、Snマトリクスの粒界に金属間化合物が析出してネットワークを形成している(図11)。試験後は、この金属間化合物のネットワークが消失し、Ag₃Sn相が析出しSnマトリクスが粗大化している。温度サイクルによって、はんだ組織が熱劣化し強度低下を起すため、ΔTの上昇に伴ってクラック進展速度が大きくなっていくと考えられる⁽⁵⁾。

(2) 新はんだ

Sn-Ag系はんだがΔTの上昇に伴ってSnマトリクスが粗大化するのに対して、Sn-Sb系はんだはSbが固溶することでSnマトリクスの粗大化が抑制される⁽⁶⁾。この固溶強化に加え、従来の析出強化を組み合わせた新はんだは、高温にさらされた場合でもSn-Ag系はんだに比べて強度の低下が小さく、高い強度を維持していることが特徴である(図12)。

新はんだのクラック進展速度は、ΔTの上昇に対して変化は小さく、加速度的でなくほぼ線形に増加する。このため、コフィンマンソン則を使った寿命予測技術がそのまま適用でき、予測精度の向上と信頼性の向上を両立することができる。また、新はんだは、ΔTが190°Cに上昇した場合においてもSn-Ag系はんだの1/5以下であり、さらなる高温化が可能になる(図10)。

5 あとがき

車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術について述べた。原理に基づく評価に加え、実機とシミュレーションの整合性を高めることで高精度な設計技術を構築した。この設計技術を駆使し、要素技術の向上、製品開発期間の短縮を進めていく所存である。

参考文献

- 郷原広道ほか. ハイブリッド車用インテリジェントパワーモジュール. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- Gohara, H. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation" Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.
- Nishimura, Y. et al. "Power Module Technology for automotive power-electronics" Proceedings of APE 2015, April 14-15, Paris.
- 玉井雄大ほか. "IGBTモジュール用の端子超音波接合技術の開発" 第29回エレクトロニクス実装学会春季大会, サーマルマネジメント&パワーエレクトロニクス実装(4), 18B3-3, p.492-494.
- Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", Proceedings of PCIM Europe 2015, May 19-21, Nuremberg, p.772-778.
- 玉井雄大ほか. "高強度はんだ材料の車載用直接冷却パワーモジュールへの適用" 第25回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 秋季大会, MES2015, [2A1] パワエレ-2, No.1.



郷原 広道

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。日本機械学会会員。



山田 教文

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



玉井 雄大

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。エレクトロニクス実装学会会員。



車載用 RC-IGBT

RC-IGBT for Automotive Applications

吉田 崇一 YOSHIDA, Soichi

野口 晴司 NOGUCHI, Seiji

向井 弘治 MUKAI, Koji

地球温暖化防止などの環境保護の観点から、CO₂ 排出量を低減するためにハイブリッド車や電気自動車の普及が進んでいる。これらの自動車では、燃費向上のために車載半導体素子の低損失化およびインバータの小型化が求められている。富士電機は、これに応じて IGBT と FWD を 1 チップ化した RC-IGBT の製品化を進めている。今回、車載用 RC-IGBT において、トレンチゲート間隔の最適化、フィールドストップ層の最適化、ライフタイム制御の最適化の改良を行った。これにより、従来の車載用 RC-IGBT を適用した場合に比べてインバータ動作時の発生損失を約 20% 低減した。

The number of hybrid electric vehicles and electric vehicles in use on the road has been increasing as a measure to reduce CO₂ emissions in order to protect the environment from phenomena such as global warming. In order to improve fuel efficiency for these types of vehicles, they need to reduce loss in mounted semiconductor devices, while also decreasing the size of the inverter. To meet these needs, Fuji Electric has been working to develop an RC-IGBT that integrates an IGBT and FWD into one chip. Moreover, we have optimized trench gate spacing, a field stop layer and lifetime control for the RC-IGBT for automotive applications. As a result, the inverter achieves an about 20% reduction in generated loss during the operation compared to using conventional RC-IGBTs for automotive applications.

1 まえがき

地球温暖化の防止などの環境保護に対する意識が世界的に高まる中、CO₂ 排出量を低減するためにエンジンとモータの双方を利用するハイブリッド車 (HEV)、さらにはモータのみで駆動する電気自動車 (EV) の普及が進んでいる。

富士電機は、HEV や EV の燃費向上のための車載半導体素子の低損失化およびインバータの小型化の要求に応えるため、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD (Free Wheeling Diode) を 1 チップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT: 逆導通 IGBT) を開発した。RC-IGBT は家電向けの小容量チップでは既に実用化されているが、車載用の大容量のチップでは低損失化のための技術的ハードルが高く、実用化がなかなか困難であった。⁽¹⁾ 富士電機はこの技術的ハードルを乗り越え、マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT にて低損失のチップを開発した。⁽²⁾⁽³⁾

今回、マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT (従来型 RC-IGBT) を改良し、より低損失化した車載用 RC-IGBT (改良型 RC-IGBT) を開発した。改良型 RC-IGBT は、フルハイブリッドやマイルドハイブリッドなどモータの各駆動方法に対応することができる。

2 課題と対策

図 1 に RC-IGBT の概略構造を示す。HEV 向けの RC-IGBT は、富士電機で量産しているフィールドストップ (FS) 型 IGBT⁽⁴⁾ をベースとし、ストライプ状に IGBT ユニットと FWD ユニートを交互に配置した構造である。IGBT ユニットと FWD ユニートの大きさは、相互干渉に

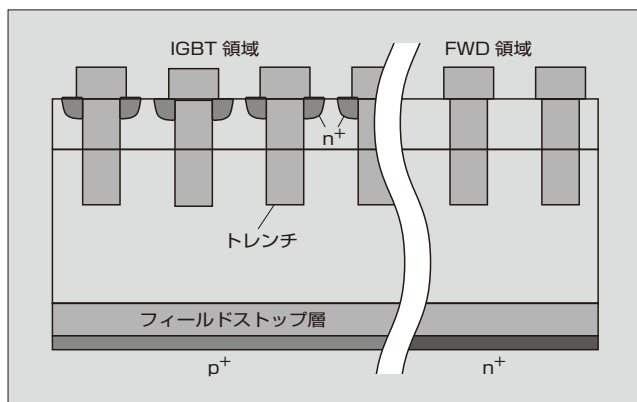


図 1 RC-IGBT の概略構造

よる特性への悪影響が出ない範囲で決定している。図 2 に、HEV 向けインバータにおける発生損失の構成例を示す。発生損失は電流をオン・オフさせる際に発生するスイッチング損失 (P_{on} , P_{off} , P_{rr}) および IGBT と FWD の定常損失 (P_{sat} , P_f) によって決まる。HEV の燃費を低減するためには、定常損失の低減が必須である。そこで、改良型 RC-IGBT では定常損失の低減を主目的とした設計を行っ

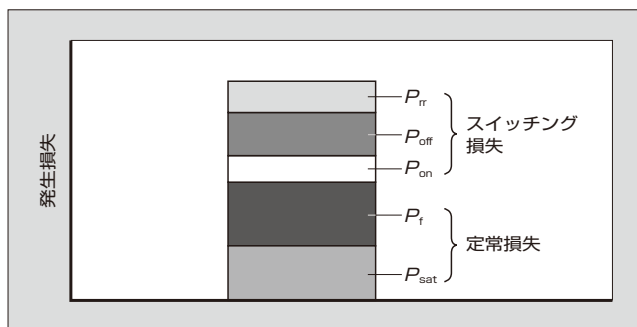


図 2 インバータの発生損失の例

た。損失を低減すると素子の発熱を抑制できるため、素子を小さくして IGBT モジュールやインバータが小型化できる。改良型 RC-IGBT は、次に示す改良を行った。

(1) IE 効果の利用による導通損失の低減

IGBT では、IE (Injection Enhanced : 電子注入促進) 効果と呼ばれる現象により、ドリフト層中に少数キャリア (n チャネル IGBT の場合はホール) を蓄積することで飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を低減し、導通損失を低減できることが知られている。IE 効果をもよほす効果的な方法の一つは、素子表面に形成するトレンチゲートの間隔を微細化することである。改良型 RC-IGBT では、従来型 RC-IGBT に対してトレンチゲートの間隔を最適化するなど、IE 効果をもよほす改良を行った。

(2) 薄ウェーハ化による導通損失の低減

チップ厚は薄いほど飽和電圧および順電圧を抑制して定常損失を低減できるため、できるだけ薄い方が望ましい。しかしながら、チップ厚を薄くすると IGBT および FWD のスイッチングオフ動作時に発振現象が生じやすくなるため、従来型 RC-IGBT では十分な薄ウェーハ化ができていなかった。改良型 RC-IGBT では、FS 層を最適化することで、IGBT、FWD ともに発振を抑制できるようになり、薄ウェーハ化が可能となって導通損失の低減を実現した。また、FS 層の最適化により高温でのコレクター-エミッタ間漏れ電流 I_{CES} の低減も同時に可能となった。

(3) ライフタイム制御による導通損失とスイッチング損失の低減

ライフタイム制御を最適化する改良を加え、IGBT の導通損失および FWD のスイッチング損失を低減した。また、高温における I_{CES} が低減して高温特性の改善にもつながった。

3 損失特性

3.1 電気的特性

RC-IGBT は IGBT と FWD を 1 チップ化したものであり、本節では RC-IGBT の IGBT 特性と FWD 特性について述べる。

(1) IGBT 特性

図 3 に IGBT の飽和電圧出力特性を示す。改良型 RC-IGBT では、2 章で述べた工夫により従来型 RC-IGBT よりも飽和電圧が低い。

図 4 に IGBT のターンオフ特性を示す。改良型 RC-IGBT の波形は、従来型 RC-IGBT の波形に比べてターンオフ時のテール電流が小さく、ターンオフ時間も短いので、ターンオフ損失が低減していることが分かる。これは、改良型 RC-IGBT では飽和電圧を低下させて、コレクタ部の不純物濃度を最適化した結果である。また、ターンオフ時の発振現象についても、コレクタ部や FS 層などを最適化することにより抑制している。

このように、改良型 RC-IGBT では、ターンオフ損失を低減しても低飽和電圧が維持できるという特長を生かす

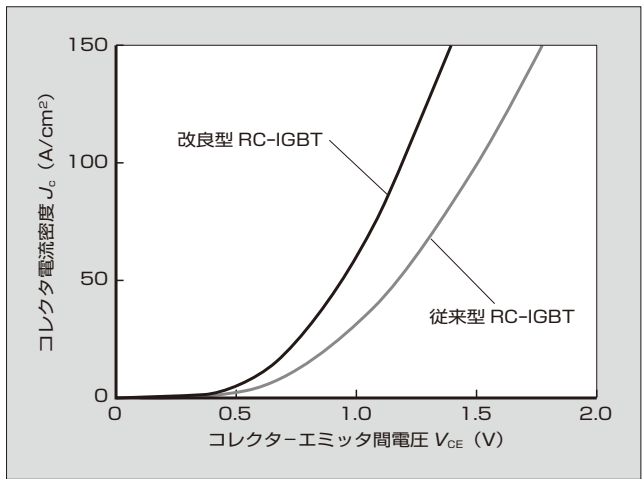


図 3 IGBT の飽和電圧出力特性

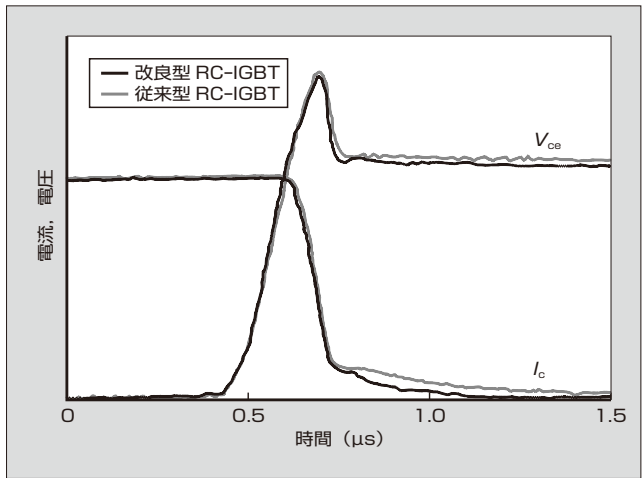


図 4 IGBT のターンオフ特性

ことにより、トレードオフ特性が大きく改善した (図 5)。ターンオフ損失については従来型の損失を 1 として規格化した数値としている。

図 6 にケース (パッケージ) 温度 $T_c=150^\circ\text{C}$ の高温条件下での I_{CES} 特性を示す。FS 層の最適化およびライフタイム制御の最適化の結果、改良型 RC-IGBT は従来型 RC-

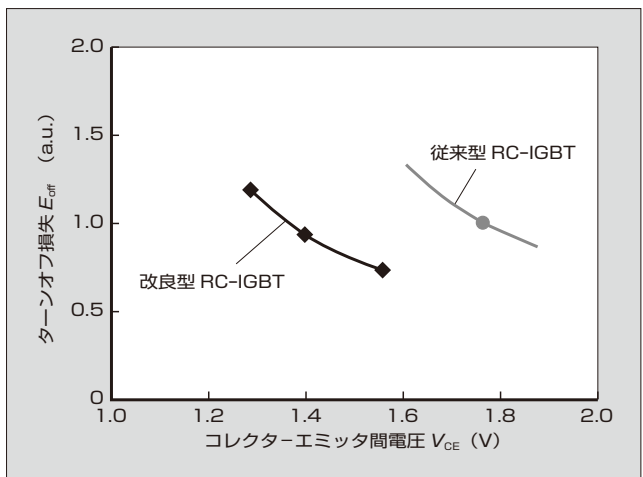


図 5 IGBT のトレードオフ特性

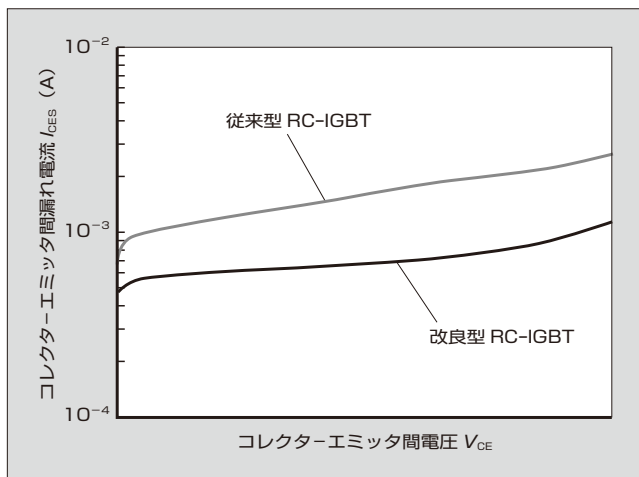


図6 I_{CES} 特性 ($T_c=150^\circ\text{C}$)

IGBT に対して 30% 以下に低減している。

(2) FWD 特性

図7にFWDの順方向特性を示す。改良型RC-IGBTでは、従来型RC-IGBTに対して薄ウェーハ化の効果により、順方向電圧の降下を低減させた。

図8に逆回復動作時のスイッチング波形を示す。改良型

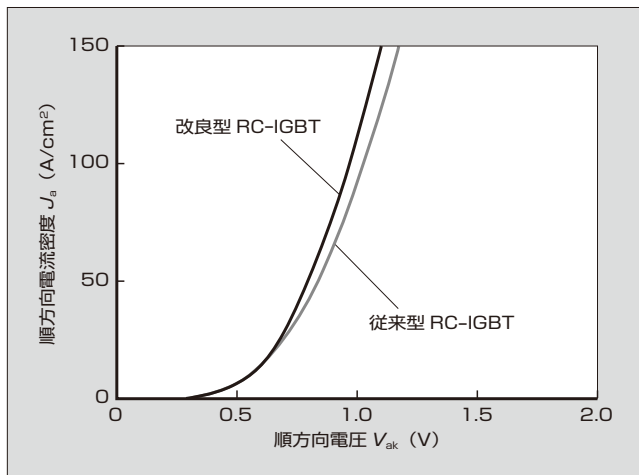


図7 FWDの順方向特性

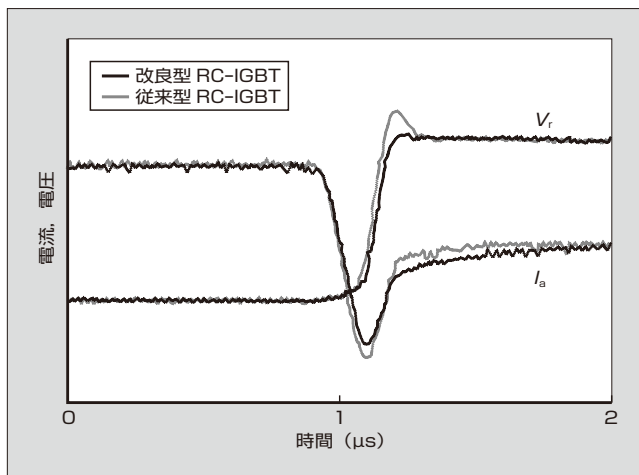
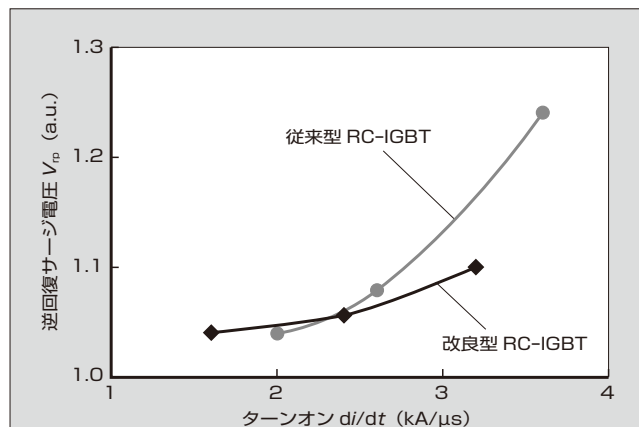


図8 逆回復動作時のスイッチング波形

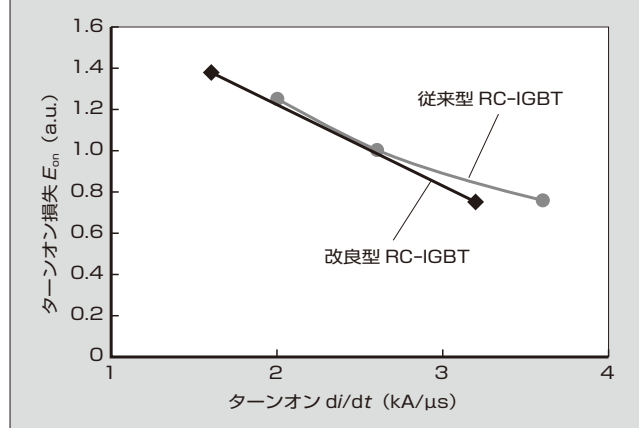
RC-IGBTでは、薄ウェーハ化してもソフトリカバリー特性となって逆回復サージ電圧が低減できるように、FS層の最適化およびライフタイム制御の最適化を行っている。

図9にターンオン時の特性を示す。図9(a)の逆回復サージ電圧は電源電圧を1として規格化した数値である。ターンオン di/dt と逆回復サージ電圧の関係およびターンオン di/dt とターンオン損失の関係から分かるように、改良型RC-IGBTでは高速ターンオン時において逆回復サージ電圧を抑制している。ターンオン時のスイッチング速度の向上はターンオン損失の改善に効果的であり、より低いゲート抵抗で駆動することで高速スイッチング時のターンオン損失を低減した。

図10に、FWDにおける順方向電圧と逆回復損失+ターンオン損失のトレードオフ特性を示す。逆回復特性とターンオン特性は同じ過渡期間の現象であり、電圧分担比の違いで逆回復損失とターンオン損失の大きさが決まるため、縦軸は合算した損失としている。また、従来型の損失を1として規格化した数値としている。薄ウェーハ化による順方向電圧の降下に伴う損失の低減、ならびに高速スイッチング化によるターンオン損失の低減により、トレードオフ特性を改善した。



(a) ターンオン di/dt と逆回復サージ電圧



(b) ターンオン di/dt とターンオン損失

図9 ターンオン時の特性

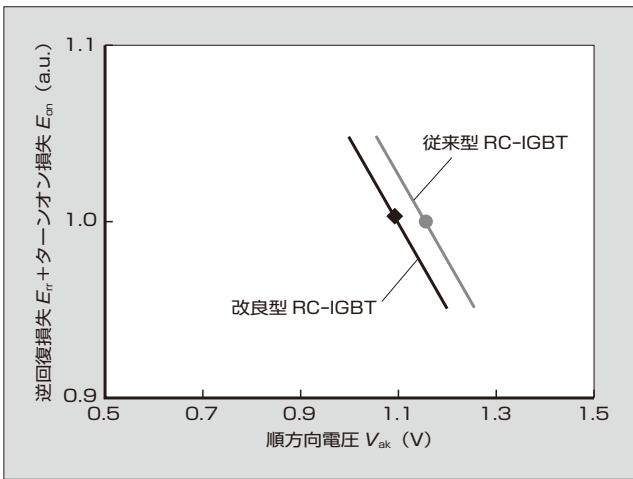


図10 FWDのトレードオフ特性

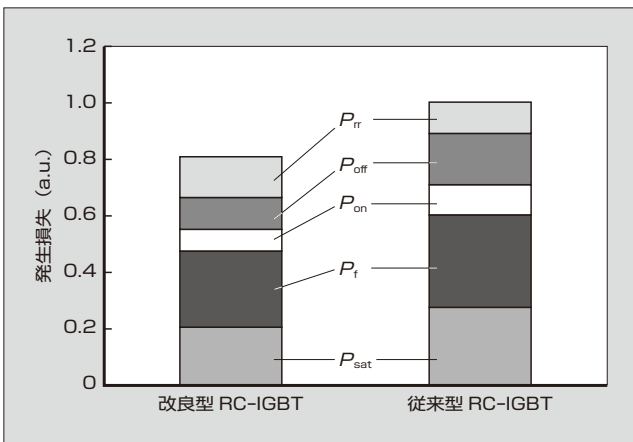


図11 インバータ動作時の発生損失

3.2 インバータ動作時の発生損失

改良型 RC-IGBT のインバータ動作時の発生損失を図11に示す。損失計算の条件として、一般的な HEV の走行モードを想定している。改良型 RC-IGBT は、従来型 RC-IGBT に比べて IGBT 特性を大幅に向上したことにより、発生損失が約 20% 低減した。発生損失の低減により素子の発熱温度が低下するため、より小さい素子を使用できるようになり、インバータの体積の低減が期待できる。

4 あとがき

本稿では、車載用 RC-IGBT について述べた。環境問題

への対応から、ハイブリッド車や電気自動車は今後も大きな発展が見込まれる。その中で、車載機器の小型化の重要性がさらに増すと考えられ、これを実現する RC-IGBT は非常に効果的であると考えられる。今後も、デバイスの改善や新材料のデバイスの開発などにより貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Takahashi, K. et al. “New Reverse-Conducting IGBT (1200 V) with Revolutionary Compact Package”, Proceedings of ISPSD 2014, p.131-134.
- (2) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (3) Higuchi, K. et al. “New standard 800 A/750 V IGBT Module technology for Automotive Applications”, Proceedings of PCIM Europe 2015, p.1137.
- (4) Laska, T. et al. “The Field Stop IGBT (FS IGBT) — A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential”, Proceedings of ISPSD 2000, p.355-358.



吉田 崇一

パワー半導体素子の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。



野口 晴司

IGBT チップの開発設計に従事。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。



向井 弘治

車載用パワー半導体の開発に従事。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。博士(工学)。

車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ

Relative Pressure Sensor for Automobile Fuel Tanks

加藤 博文 KATO, Hirofumi

芦野 仁泰 ASHINO, Kimihiro

佐藤 栄亮 SATO, Eisuke

近年、自動車には環境負荷の低減が強く求められるようになり、一例として、米国では燃料漏れの検出が義務化されている。富士電機は、気化燃料を回収してシリンダで焼却処理を行う気化燃料排出抑制装置の制御用途として、エンジンルーム内の配管に直接取り付けることが可能な車載用燃料タンク圧検知相対圧センサを開発した。第6世代小型圧力センサの技術をベースに、気化燃料への耐性の向上、保護機能の向上および EMC (Electromagnetic Compatibility : 電磁両立性) の強化を行うことで、耐久性の確保と高精度な検知を両立させた。

In recent years, there has been increasing regulation to reduce the environmental burden of automobiles. One example of such regulation is the requirement to detect fuel leaks in the United States. Fuji Electric has developed a relative pressure sensor for automobile fuel tanks capable of being directly mounted to a pipe inside the engine room. The sensor is used for controlling vaporized fuel exhaust suppression devices that recover vaporized fuel to incinerate it in the cylinder. Based on our 6th-generation compact pressure sensor technology, we have successfully improved resistance to vaporized fuel, enhanced protective functions and reinforced EMC to both ensure durability and achieve high-precision detection.

1 まえがき

自動車には安全性や快適性に加えて、環境負荷の低減が強く求められるようになってきた。一例として、米国市場での OBD (On-Board Diagnostics) 規制による、燃料漏れに対する検出の義務化が挙げられる。気化燃料が大気中に放出されると、静電気による引火の危険性や化学反応による大気汚染物質への変化が生じる。この規制は、危険性や環境負荷を低減するために気化燃料漏れを抑制することを目的としている。富士電機は、この OBD 規制に対応するため、燃料タンク漏れ検出用に 1 チップで 2 点間の差圧を検知する車載用相対圧センサを開発⁽¹⁾し、2007 年に製品化した。

今回、気化燃料を回収してシリンダで燃焼処理を行う燃料蒸発ガス排出抑制装置^(注)の制御用に、エバポラインに直接取付けが可能な車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ (タンク圧センサ) を開発した。

2 タンク圧センサの特徴

図 1 にタンク圧センサの外観を示す。従来、富士電機の圧力センサは、1 チップ技術の特長を最大限生かして小型・高信頼性の製品を基本コンセプトとしている。タンク圧センサでは、新たに次に示す特徴を盛り込んでいる。

(1) 気化燃料への耐性の向上

気化燃料は、圧力センサを構成する部材中のチップ用ダイボンド材の変質や、それに起因した破壊故障を引き起こす恐れがある。タンク圧センサでは、気化燃料に触れても

〈注〉エバポライン：気化燃料を回収してシリンダに送るための燃料搬送ライン

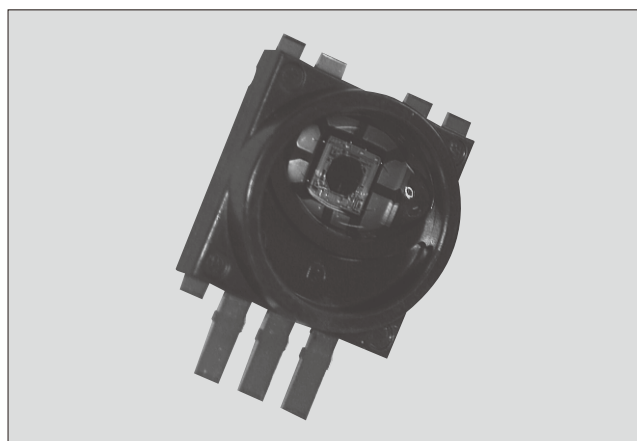


図 1 タンク圧センサ

変性しない材料を選定し、従来の高信頼性を確保しつつ、気化燃料を含んだ圧力媒体にも対応させている。

(2) 保護機能の向上

エンジン内部に取り付けられるタンク圧センサは、大気圧と燃料配管圧力の差圧を検知する相対圧センサであるため、常に車内外からの外来異物の影響が懸念される。そこで、双方の受圧面をゲル状の保護材で覆うことにより、センサチップの異物からの保護と高精度圧力検知を両立させている。さらに、センサセルの大気圧受圧面側にエアフィルタを搭載することで、外部からの異物に対する保護機能をよりいっそう向上させている。

(3) EMC の強化

昨今、自動車にはさまざまな電子機器が搭載されており、それらから発生する電磁ノイズに対する EMC (Electromagnetic Compatibility : 電磁両立性) の強化が求められている。センシング部、信号処理部およびサージ保護素子を 1 チップ化する従来の技術を踏襲しつつ、チッ

ブコンデンサを新たに搭載することで、寸法を維持したまま EMC を向上させている。

③ タンク圧センサの構造

3.1 圧力検出ユニット

図2に圧力検出ユニットの概要を示す。Si基板の一部をエッチングにより薄膜に加工してダイヤフラムを形成する。ダイヤフラム上には拡散配線からなるピエゾ抵抗を配置し、四つのピエゾ抵抗によりホイートストンブリッジを構成している。富士電機が得意とする三次元エッチング技術により、高精度かつ丸みのある等方性の形状のダイヤフラムを形成することができ、高感度と過大耐圧性を確保している。

ダイヤフラム式の圧力センサは、ダイヤフラム両面の圧力差（差圧）によって生じた変形量を表面に形成したピエゾ抵抗の抵抗変化として検知する。従来の富士電機の圧力センサは、真空を基準に圧力を測定する絶対圧センサであり、静電接合プロセスによってガラス台座を接合して真空基準室を設けている。一方、タンク圧センサは大気圧との差圧を測定できるようにするために、ガラス台座に圧力媒体導入孔を設けた。

3.2 信号処理回路

図3に信号処理回路の基本構成を示す。信号処理回路は、2010年度に開発して量産化した第6世代低圧センサ（100～400kPa）の技術⁽²⁾をタンク圧用（-80～+5kPa）に最適化したものである。ホイートストンブリッジから出力される電圧信号を増幅する高精度増幅器と、センサ特性を補

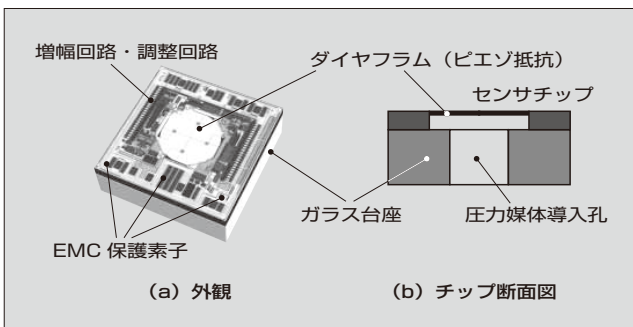


図2 圧力検出ユニットの概要

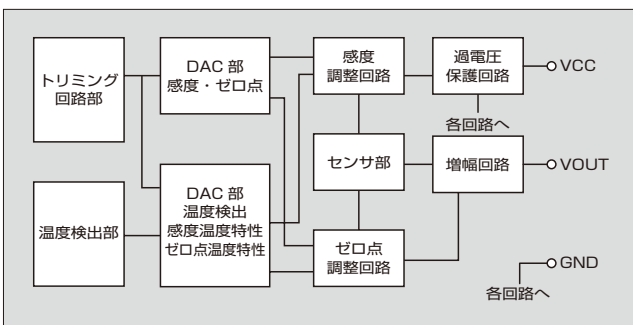


図3 信号処理回路の基本構成

正する調整回路を備えている。また、自動車のエンジン制御系から発生するサージ波形やアセンブリ工程内の静電気、さらには外部からの電磁波などから内部回路を保護するための保護素子も備えている。

3.3 センサセルの構造

図4に、圧力センサ（絶対圧センサ）とタンク圧センサ（相対圧センサ）におけるセンサセルの断面構造を示す。いずれのセンサセルにおいても、EMCを向上するためのチップコンデンサを搭載している。タンク圧センサでは、相対圧を測定できるようにするため圧力導入口を設けている。また、従来品と容易に置き換えられるようにするため、多くの箇所の外形寸法を合わせている。

富士電機のセンサセルでは、センサチップをダイボンド材によって固定している。タンク圧センサは燃料タンク内部の圧力の測定用であるため、燃料に対して耐性も併せ持つダイボンド材を新たに選定した。

加えて、図5に示すように、センサチップ全体をゲル状の保護材で覆うことによってセンサチップやワイヤボンディングなどの内部構造を外来異物から保護しながら、印

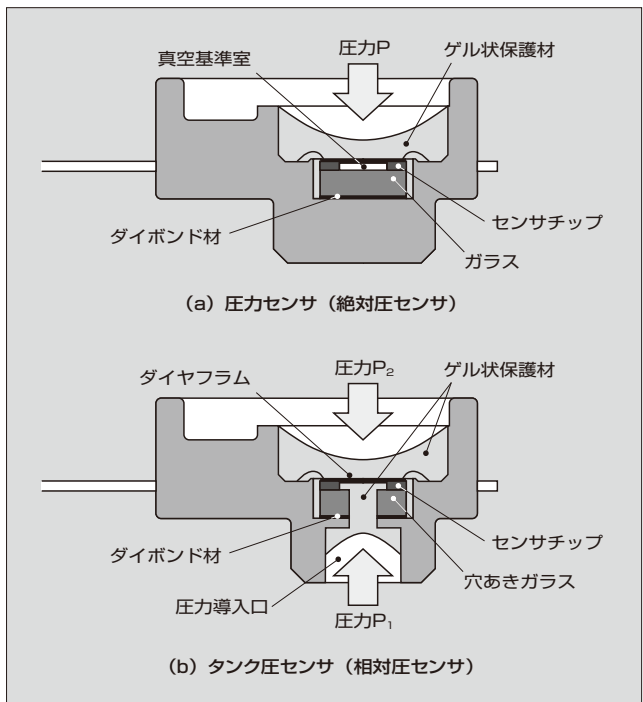


図4 センサセルの断面構造

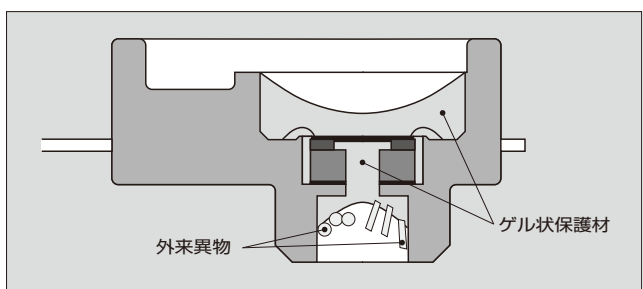


図5 ゲル状の保護材による異物からの保護

加圧力を検知できる構造としている。これにより圧力検知の高精度化と製品の長寿命化を両立している。

3.4 外装パッケージ構造

図6に、ダイレクトマウントタイプの樹脂ハウジングケースにセンサセルを樹脂接着剤により固定したパッケージの断面構造を示す。この構造はエバポラインへの直接取付けが可能なので、富士電機では“外装パッケージ構造”と呼んでいる。センサセルを固定している樹脂接着剤は気密を確保する役割も担っており、圧力導入口から入った気化燃料を含んだ空気が大気圧受圧面側へ流れ込まないようにしている。また、圧力センサでは温度特性を考慮したOリングを使用し、圧力導入口の気密を確保しているのに対し、タンク圧センサでは温度特性に加えて燃料耐性を持つOリングを採用し、世界各国32種類の燃料に対する耐久性を確認している。

この外装パッケージは、エンジン内部に直接取り付けることができ、内部のセンサセルを変更することでさまざまな圧力レンジに対応することができる。また、外装パッケージの形状が同一であるため、取付け部周辺のレイアウトやワイヤハーネスを流用することができる。

タンク圧センサの片面は大気圧に解放されている。圧力センサはエンジンルーム内の配管上に取り付けられているので、粉じんや雨水、泥水などにさらされる。異物や水分が容易に入り込む環境では、それらに起因した断線や短絡による故障、ならびに結露や氷結の発生などによるセンサ特性異常が生じることが想定される。

この課題に対応するため、センサセルについてゲル状の保護材により内部構造を保護するとともに、外装パッケージにエアフィルタ付きの樹脂キャップを取り付けている。図7にエアフィルタ取付け周辺部の断面図を示す。

このエアフィルタは熱溶着により樹脂キャップに取り付けられており、エンジンルーム内の使用で想定されるエアフィルタへの最大荷重以上の耐久性を確保している。また、フィルタ自身の耐久性としてISO 20653, JIS D 5020によ

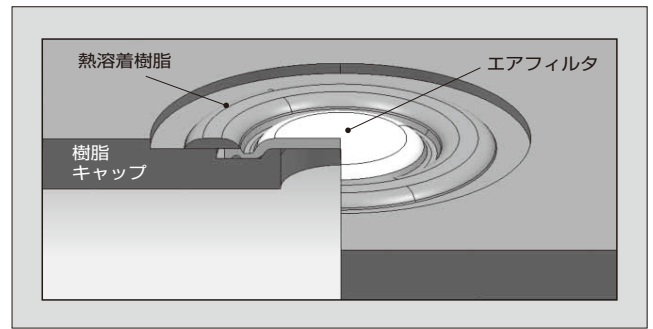


図7 エアフィルタ取付け周辺部の断面図

り規定される車載IP試験規格の耐じん性 (IP6KX) と耐水性 (IPX9K) を満足している。

エアフィルタは粒径の大きな粉じんや液体は通さず、空気のみ透過させる性質を持ち、はっ水性と防水性もある。このエアフィルタ付きの樹脂キャップを大気圧受圧面側に取り付けることによって、粉じんや泥水が容易に侵入するエンジンルーム内においても汚染の影響を受けることなく安定した圧力検知を実現している。

3.5 EGR・DPFへの適用

タンク圧センサは、これまでに述べたセンサチップやセンサセルの構造および外装パッケージ構造によって、気化燃料を含んだ空気や外来異物に影響されにくい高耐久性と高精度な検知性能を持っている。また、センサチップに対する耐腐食処理を組み合わせることによって、排ガス中の浮遊粒子状物質 (SPM: Suspended Particulate Matter) や窒素酸化物、硫黄酸化物などの環境負荷物質の発生・排出を抑制するためのEGR (Exhaust Gas Recirculation: 排気再循環) およびDPF (Diesel Particulate Filter: ディーゼル微粒子捕集フィルタ) といった、より搭載環境が厳しいアプリケーションへの適用も可能である。

4 仕様

タンク圧センサの圧力-出力特性を図8に、基本仕様を

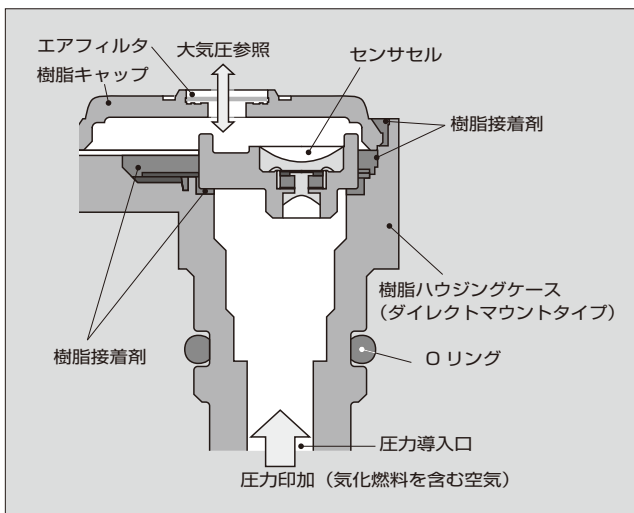


図6 外装パッケージ構造

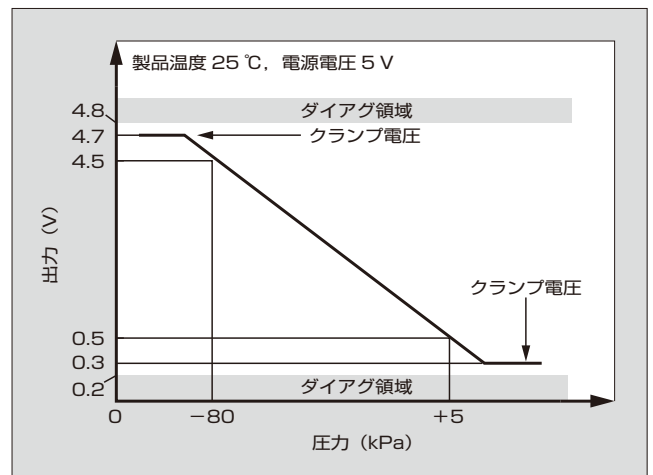


図8 タンク圧センサの圧力-出力特性

表1 タンク圧センサの基本仕様

項目	単位	仕様
使用温度範囲	℃	-40 ~ +135
使用圧力範囲 *1	kPa	-80 ~ +5
センサ出力範囲	V	0.5 ~ 4.5
インタフェース	kΩ	Pull Up=300 もしくは Pull Down=100
クランプ領域	V	<0.3 / >4.7
ダイアグ領域 *2	V	<0.2 / >4.8
シンク電流	mA	1
ソース電流	mA	0.1
圧力誤差	%F.S.	<1.5
温度誤差	倍	2.0 (max.)
対応 EMC 規格		ISO 11452-2 (100 V/m, CW, 10kHz ~ 2 GHz) ISO 11452-4 (100 m, CW, 1 ~ 400 MHz) ISO 7637 (Level IV)
対応燃料		ガソリン ディーゼル軽油 (DIN EN 590) E10, E25, E85, M15, M100 バイオディーゼル (DIN EN 14214)
フィルタ耐じん性		IP6KX
フィルタ耐水性		IPX9K
端子配列		(出力) - (GND) - (電源)

* 1 : 圧力導入口より圧力を印加した場合の値
* 2 : 電源配線の断線, 出力配線の断線の検知

表1に示す。製品形態は外装パッケージ構造である。

5 あとがき

車載用燃料タンク圧検知相対圧センサについて述べた。今後、世界各国の環境規制や安全規制に伴って、自動車用

途の圧力センサへのニーズはますます高まることが予想される。一方、製品に要求される精度、品質、環境適合性およびコストはこれまで以上に厳しくなることも予想されている。これらの要求に応えるために富士電機として常に世界のトップレベルの技術開発と、お客さまに喜ばれる製品開発を目指す所存である。

参考文献

- (1) 植松克之ほか, 自動車用燃料タンク漏れ検出用圧力センサ. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.372-374.
- (2) 西川睦雄ほか, 第6世代小型圧力センサ. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.420-424.



加藤 博文

半導体圧力センサの設計・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。



芦野 仁泰

半導体圧力センサの設計・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。



佐藤 栄亮

半導体圧力センサの設計・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。



ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」

PWM Power Supply Control IC “FA8B00 Series” Capable of handling Peak loads

松本 晋治 MATSUMOTO, Shinji

山根 博樹 YAMANE, Hiroki

藪崎 純 YABUZAKI, Jun

近年、ノート PC やインクジェットプリンタの分野では、新 CPU への対応やモータ駆動負荷などに向けた最大出力電力の増大が要求されている。富士電機では、これらの要求に応えたピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」を開発した。この IC は、FB 端子電圧の上昇に合わせてスイッチング周波数を最大で 130 kHz まで上昇させることができるため、トランスの体積を増やすことなく電源の最大出力電力を増大することができる。さらに、スイッチング周波数ジッタの拡大機能により、変動する負荷に対しても低 EMI ノイズ特性を実現した。

In recent years, the notebook computer and inkjet printer market requires increasing the maximum output power for new CPUs and motor drive loads. To meet these requirements, Fuji Electric has developed the “FA8B00 Series” of pulse width modulation (PWM) power supply control IC capable of handling Peak loads. This IC can increase the switching frequency up to 130 kHz in accordance with rise in FB terminal voltage, allowing it to increase the maximum output power of a power supply without increasing the volume of a transformer. Furthermore, the IC comes equipped with an expansion function for switching frequency jitter that enables it to achieve low EMI noise characteristics even against varying loads.

① まえがき

近年、深刻な問題となっている地球温暖化を防止するために、低炭素社会をつくることはますます重要となっている。現代社会を支える各種電子機器においても、省エネルギー化と EMC (Electromagnetic Compatibility) の観点から、高効率、低待機電力、低ノイズが求められている。富士電機では、このような社会的な要求に応えるため高効率で、かつ低待機電力機能を内蔵したカレントモード電源制御 IC を多数製品化している。一方で、ノート PC やインクジェットプリンタの分野においては、新 CPU への対応やモータ駆動負荷などに向けたピークパワー出力が要求されている。

富士電機は、これらの要求に応えたカレントモード PWM (Pulse Width Modulation) 制御 IC として、ピークパワー対応 PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」を開発した。

② 製品概要

図 1 に FA8B00 シリーズの外観を示す。この IC は、電源のピーク負荷に対応した 3 段階のスイッチング周波数特性を持ち、電源の部品サイズを変更することなく最大出力電力を増大させることができる。また、電源システムに最適な各種保護機能を持つため、電源の安全性が確保できるものである。さらに、スイッチング周波数ジッタ^(注)の拡大機能により、変動する負荷に対しても低 EMI (Electro-

〈注〉スイッチング周波数ジッタ：スイッチング周波数を一定の間隔と幅で変化させることにより、EMI ノイズ、特に伝導ノイズを低減する IC の機能をいう。

magnetic Interference) ノイズ特性を実現した。

表 1 に FA8B00 シリーズの機能概要を、図 2 にブロック図を示す。

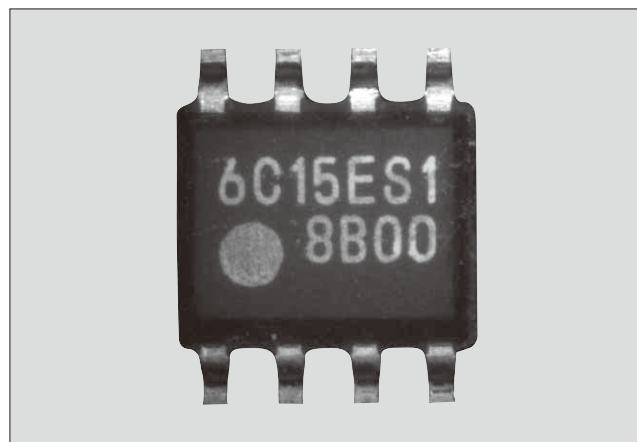


図 1 「FA8B00 シリーズ」

表 1 「FA8B00 シリーズ」の機能概要

項目	FA8B00 シリーズ		FA8A00 シリーズ (従来機種)	
スイッチング周波数特性	3 段階の周波数特性 (25kHz - 65 kHz - 130kHz)		2 段階の周波数特性 (25kHz - 65kHz)	
OCP ライン補正	± 3.7%		± 6.5%	
IC の出力電圧	出力電圧のクランプあり		出力電圧のクランプなし	
スイッチング周波数ジッタ	拡大機能あり		固定	
待機電力	25.7 mW		29.0 mW	
電源平均効率	90.0% (V _F =AC115V)	90.7% (V _F =AC230V)	89.7% (V _F =AC115V)	90.5% (V _F =AC230V)

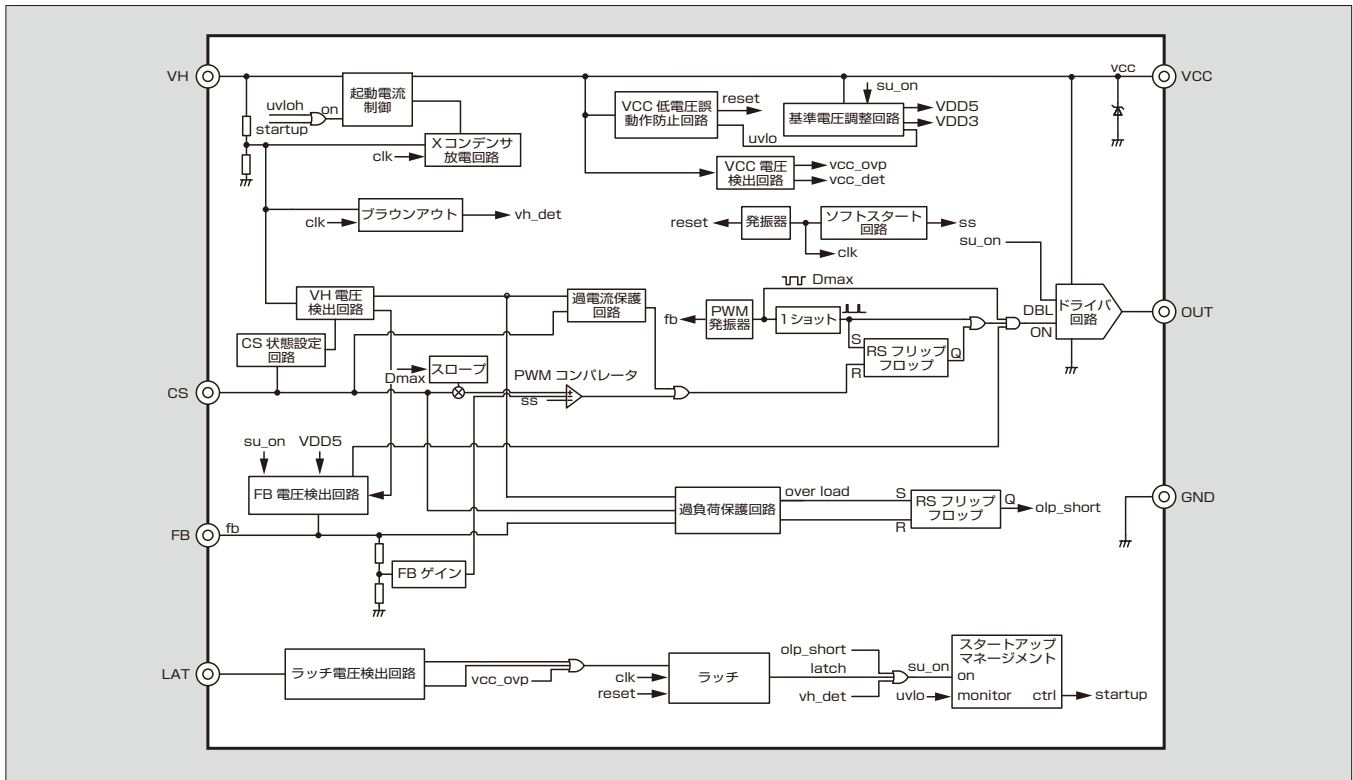


図2 「FA8B00 シリーズ」のブロック図

3 主な特徴

3.1 ピーク負荷対応のスイッチング周波数特性

FA8B00 シリーズでは、電源のピーク負荷に対応するため、新たに3段階のスイッチング周波数特性 (25 kHz-65 kHz-130 kHz) を持っており、FB 端子電圧の上昇に合わせてスイッチング周波数も最大 130 kHz まで上昇する (図3)。従来機種「FA8A00 シリーズ」では、スイッチング周波数が 65 kHz までしか上昇しないため、より大きな最大出力を得るためには、トランスの体積の増加が不可欠となりコストアップとなっていた。これに対して、FA8B00 シリーズでは、スイッチング周波数の高周波化が可能のため、トランスの体積を変更することなく最大出力を増大することができる。

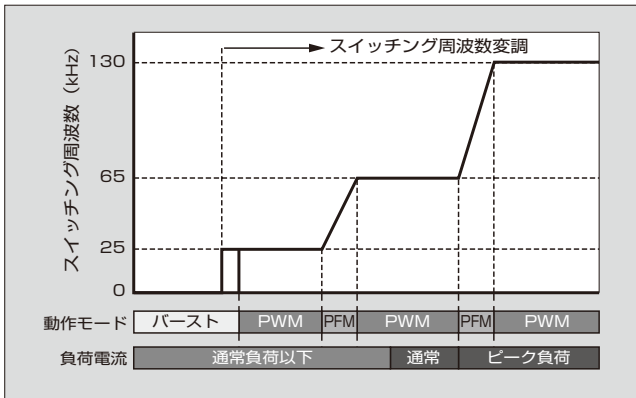


図3 3段階のスイッチング周波数特性

3.2 OCP ライン補正の高精度化

過負荷時における出力電流は、交流入力電圧に比例して大きくなる特性を持っている。このため、低入力時 (AC100 V 近辺) と高入力時 (AC230 V 近辺) とでは、電源回路が過負荷を検出する電流値に大きな差が生じてしまう。従来機種では、交流入力電圧により変化してしまう CS 端子しきい値電圧の調整を行う OCP (Over Current Protection) ライン補正機能を内蔵し、交流入力電圧 90 ~ 265 V の範囲内で、過負荷時の出力電流変動幅を ±6.5% まで狭めていた。

FA8B00 シリーズでは、この機能をさらに交流入力電圧に対してフラットな特性となるように、制御の高精度化を図った。図4は、従来機種との過負荷時出力電流の比較を示しており、FA8B00 シリーズでは出力電流変動幅を

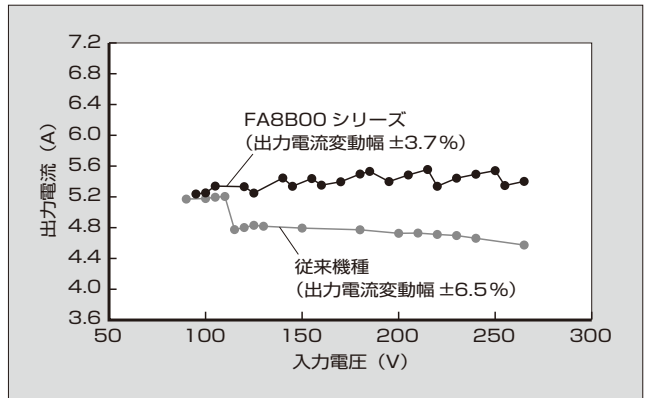


図4 過負荷時出力電流の比較

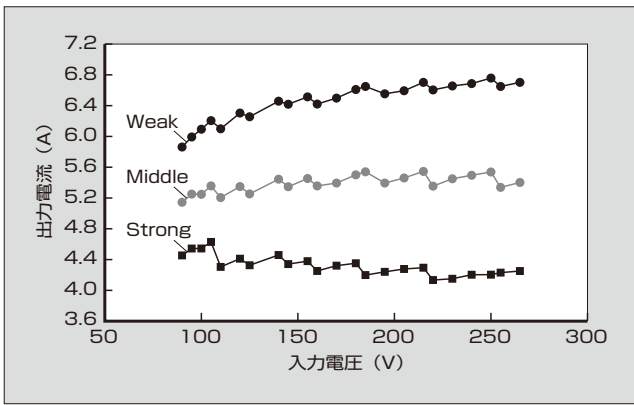


図5 OCP ライン補正の選択

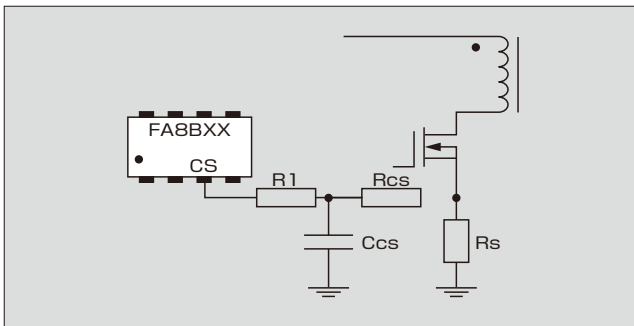


図6 CS 端子の回路構成例

表2 補正量の調整

入力電圧依存性補正量	抵抗値
Strong (大)	$0.3\text{ k}\Omega \leq R_{cs}$ または $R1 + R_{cs} \leq 0.5\text{ k}\Omega$
Middle (中)	$1.4\text{ k}\Omega \leq R_{cs}$ または $R1 + R_{cs} \leq 2.1\text{ k}\Omega$
Weak (小)	$3.9\text{ k}\Omega \leq R_{cs}$ または $R1 + R_{cs} \leq 5.2\text{ k}\Omega$

±3.7% まで低減した。また、この OCP ライン補正については、3 種類の補正量 (Weak, Middle, Strong) からの選択を可能にし、設計の自由度をより向上させた。補正量の選択は CS 端子に接続する外付け抵抗の値によって行う (図 5, 図 6, 表 2)。

3.3 各種保護機能

FA8B00 シリーズは、電源システムに最適な各種保護機能を内蔵しており、少ない外部部品で安全かつ安定した電源を実現できる。

(1) 負荷短絡保護機能

電源出力の短絡時における MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) の破壊を防止する負荷短絡保護機能を内蔵した。この機能は負荷短絡状態における検出方法において 2 タイプあり、用途により使い分けができる。VCC 端子電圧で検出するタイプでは、過負荷状態において、VCC 端子電圧があるしきい値まで低下した場合、即座にスイッチングを停止する。また、FB 端子電圧で検出するタイプでは、FB 負荷短絡保護検出電圧を超える状態が一定時間以上継続した場合にスイッチ

ングを停止する。

(2) ブラウンイン・ブラウンアウト機能

交流入力電圧の低下時に電源回路の誤動作を防ぐためにブラウンイン・ブラウンアウト機能を内蔵した。この機能は交流入力電圧が VH ブラウンアウトしきい値電圧まで低下し、一定時間を経過すると OUT 端子からの出力パルスを停止する。また、交流入力電圧が VH ブラウンインしきい値電圧に達すると、スイッチングを開始する。

(3) 過電圧保護機能

VCC 端子電圧を監視する過電圧保護機能を内蔵した。VCC 端子電圧が過電圧保護しきい値電圧以上まで上昇し、一定時間以上継続するとスイッチングを停止する。

(4) 低電圧誤動作防止機能

IC の電源電圧である VCC 端子電圧が低下したとき、IC の誤動作を防止するための低電圧誤動作防止機能を内蔵した。VCC 端子電圧がオフしきい値電圧まで低下すると動作を停止し、VCC 端子電圧がオンしきい値電圧に達すると動作を開始する。

4 電源回路への適用効果

4.1 EMI 対策

従来機種には EMI 対策として、スイッチング周波数 65kHz に対し、±7% の周波数変動を行うジッタ機能が内蔵されていた。この機能によりスイッチングのノイズエネルギーを固定周波数方式に比べて分散できるため、伝導ノイズの低減が可能であった。しかしながら、スイッチング周波数が 130kHz から 65kHz 間、65kHz から 25kHz 間で変動する領域内 (周波数低減領域) においては、実質ジッタ幅は 7% 以下に低減してしまうため、ノイズ低減効果が弱くなるという問題があった。これは、ジッタによる周波数変化分を FB 端子電圧による周波数変動分が打ち消し合うことにより、ジッタ振幅が小さくなるためである。そこで、FA8B00 シリーズでは、周波数低減領域でのジッタ幅を、7% から 14% に拡大させるスイッチング周波数ジッタ拡大機能を新たに内蔵した。図 7 にスイッチング周波数ジッタ拡大機能の概要を、図 8 にスイッチング周波数ジッタ拡大機能の評価結果を、図 9 に伝導ノイズの電源評価結果をそれぞれ示す。周波数低減領域内でのジッタ効果

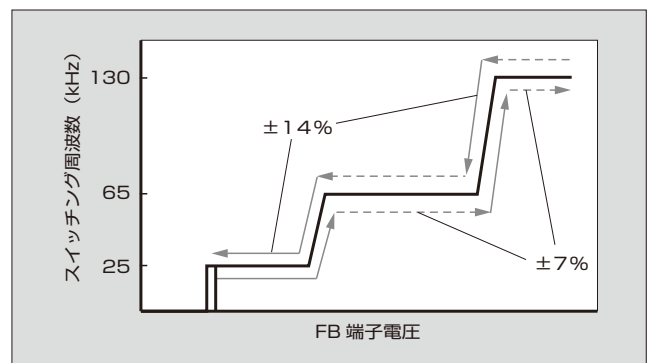


図7 スwitchング周波数ジッタ拡大機能の概要

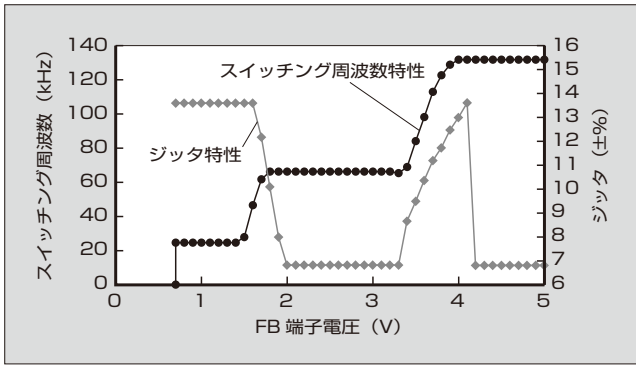


図 8 スイッチング周波数ジッタ拡大機能の評価結果

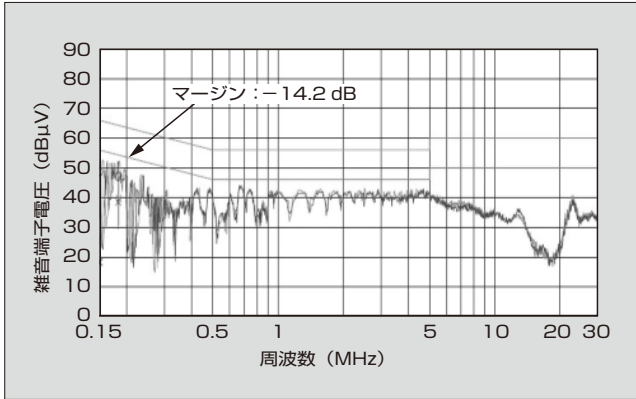


図 9 電源の伝導ノイズの評価結果

を維持でき、規格に対するノイズマージンを約 10 dB 以上確保することができる。

4.2 電源部品削減効果

電源から発生する伝導ノイズを低減するため、電源の入力部分にノイズフィルタとして共通モードチョークコイル

やコンデンサを挿入する。FA8B00 シリーズは、4.1 節で説明したスイッチング周波数ジッタ拡大機能を新たに内蔵しており、従来機種と比べて伝導ノイズを低減できるため、入力フィルタの小容量化や削減が可能である。

4.3 電源安全性の向上

FA8B00 シリーズでは、IC の OUT 端子電圧クランプ機能を内蔵しており、VCC 端子電圧が 20 V 以上印加された場合でも、IC の出力電圧はおよそ 18 V でクランプされ、それ以上 OUT 端子電圧が上昇することを防ぐことができる。この機能により、ゲート保護やゲート電圧仕様が 20 V 以下のパワー MOSFET が使用できるため、電源安全性の向上および部品のコストダウンが可能となる。図 10 に評価用電源ボードの回路を示す。また、この電源ボードを用いて従来機種と比較した待機電力および電源効率の測定結果を図 11、図 12 に示す。FA8B00 シリーズは、従来機種と比べて 3.3 mW の待機電力低減を達成しており、電源効率においても従来機種と同等以上の実力を持っている。

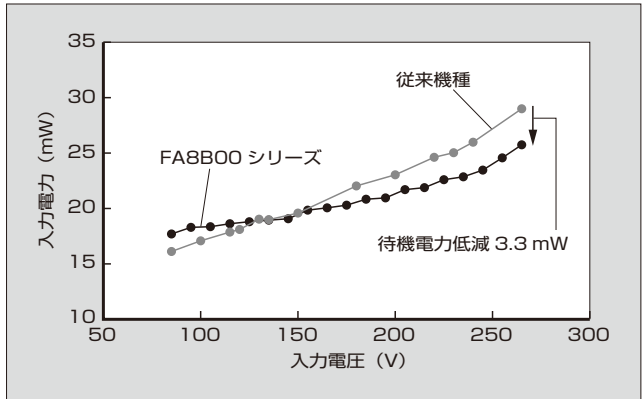


図 11 待機電力

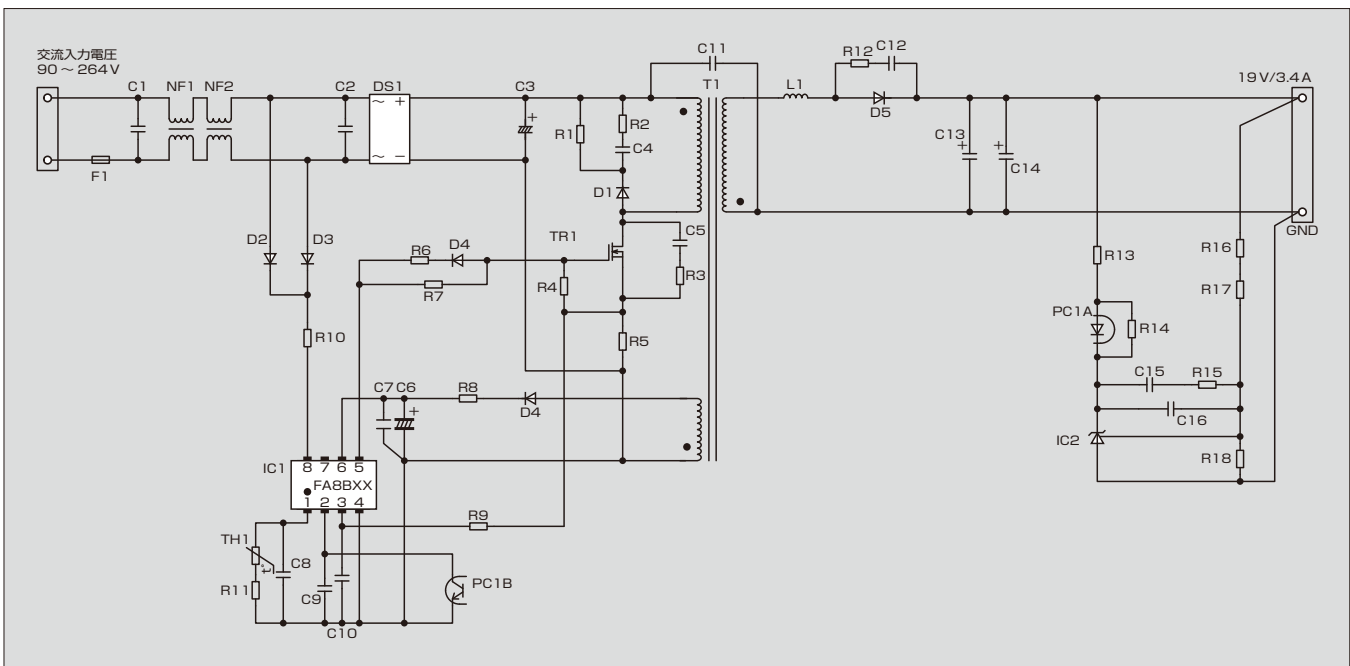


図 10 評価用電源ボードの回路

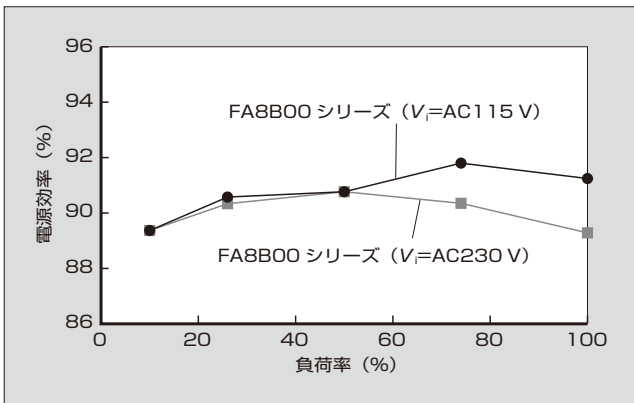


図 12 電源効率

5 あとがき

本稿では、スイッチング電源回路のピークパワーに対応した PWM 電源制御 IC 「FA8B00 シリーズ」について述べた。

今後もさらなる高効率化，低待機電力化，低ノイズ化を実現する新技術の確立を図り，市場のニーズにマッチした製品開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 藪崎純ほか. 第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.452-456.



松本 晋治

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在，台湾富士電機社パワー半導体製品設計。



山根 博樹

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在，台湾富士電機社パワー半導体製品設計。



藪崎 純

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在，台湾富士電機社パワー半導体製品設計。



第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」

2nd-Generation Low-Loss SJ-MOSFET “Super J MOS S2 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、これらに搭載されるパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 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、単位面積で規格化されたオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ を低減し、かつターンオフスイッチング損失 E_{off} とターンオフスイッチング時の V_{DS} サージのトレードオフ特性を改善した、低損失で使いやすい第2世代 低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 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が期待できる。

In order to use energy efficiently, there has been increasing demand for enhanced efficiency in power conversion equipment, and power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) that are equipped with it have been required to be compact, low loss and low noise. Fuji Electric has developed the easy-to-use 2nd-generation low-loss SJ-MOSFET “Super J MOS S2 Series” that reduces on-resistance $R_{on} \cdot A$, which is standardized by unit area, and improves the trade-off characteristic between turn-off switching loss E_{off} and the V_{DS} surge at turn-off switching. The adoption of this product is expected to improve the efficiency of power conversion equipment.

① まえがき

近年、地球温暖化対策などを背景にして、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増加している。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。さまざまな機器の電力変換部にはパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) などの半導体スイッチング素子を使用されている。この電力変換機器には、高効率、高電力密度、低ノイズといった要求があり、半導体スイッチング素子には、小型で低損失、低ノイズが求められている。

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た低オン抵抗と低スイッチング損失を両立した第1世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S1 シリーズ」(S1 シリーズ)を開発し、系列化を進めてきた^{(1)~(3)}。

本稿では、素子の耐圧 BV_{DSS} と単位面積で規格化されたオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ とのトレードオフ関係をさらに改善し、かつターンオフスイッチング時の跳ね上がり電圧 (V_{DS} サージ) を抑制することで、使いやすさと電力変換機器の変換効率を向上した第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」(S2 シリーズ)について述べる。

② 設計

2.1 設計方針

スイッチング電源の電力変換効率を向上させるためには、パワー MOSFET の導通損失とスイッチング損失、およびドライブ損失の低減が必要である。スイッチング損失を下

げるために、スイッチング速度を上げようとする、ターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが大きくなり、ノイズが発生して誤動作するという背反する関係がある。信頼性の観点からも V_{DS} サージを最大定格電圧の80%以下に抑えることが望ましい。

そこで、S2 シリーズは従来の S1 シリーズよりも $R_{on} \cdot A$ を低減しつつ、ターンオフ時のスイッチング損失 E_{off} の低減と V_{DS} サージの抑制、およびノイズの抑制を両立させることを目的に開発を行った。

2.2 導通損失の低減

導通損失を低減するためには、 $R_{on} \cdot A$ を低減する必要がある。図1に示すようにスーパージャンクション構造は、ドリフト層に p 形領域と n 形領域をそれぞれ交互に配置することで、電圧印加時に各 pn 接合の空乏層が横方向でつながり、全面で耐圧を確保する構造である^{(4)~(8)}。

$R_{on} \cdot A$ を低減するには n 形領域の不純物濃度を高くし、

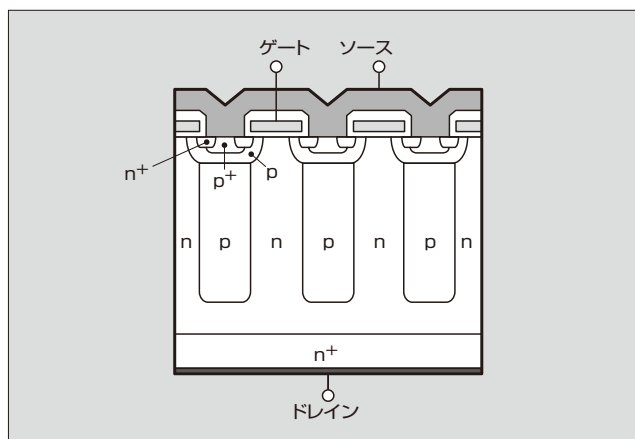


図1 SJ-MOSFET のスーパージャンクション構造

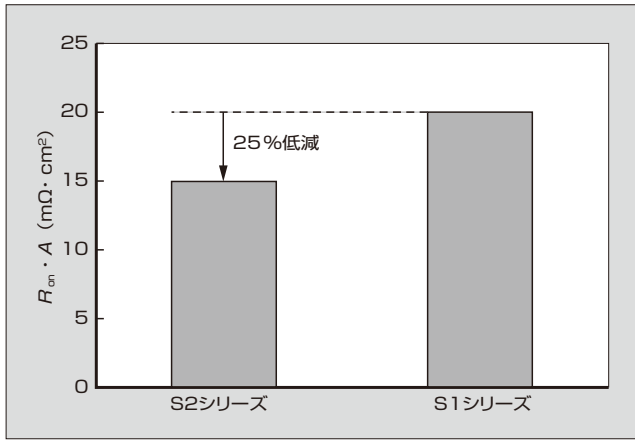


図2 600V 定格品における $R_{on} \cdot A$ 特性

抵抗値を下げる必要がある。S2 シリーズでは不純物拡散プロセスを改善して、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を可能にした⁽⁹⁾。

図2 に、S1 シリーズと S2 シリーズの 600V 定格品の $R_{on} \cdot A$ 特性を示す。S1 シリーズの 20 mΩ · cm² から S2 シリーズでは 15 mΩ · cm² にまで 25% 低減させた。その結果、TO-247 パッケージにおいて、S1 シリーズは 600V/40mΩ までのチップの搭載にとどまっていたが、S2 シリーズでは 600V/25.4mΩ まで搭載が可能である。

2.3 スイッチング損失の低減と V_{DS} サージの抑制

図3 に示す電源において、電流連続モードのための力率改善回路 (CCM-PFC 回路) の MOSFET に、S1 シリーズと S2 シリーズの 600V/70mΩ 品を搭載して評価を行った。入力電圧 100V、出力 50V/18A 時の外付けゲート抵抗 R_g に対する電源の変換効率を図4 に示す。通常は、 R_g を小さくした場合に電源効率は高くなるが、S1 シリーズは、低下していることが分かる。これはソースの配線インダクタンスが大きいことによる誤オンが原因であり、一般的にこの誤オンを抑制して損失を防ぐことが要求されている。

電源の回路パターンは、以前の設計パターンを流用する場合があります。また部品レイアウトなどの制約からソースの配線インダクタンスを完全になくすことはできない。そこ

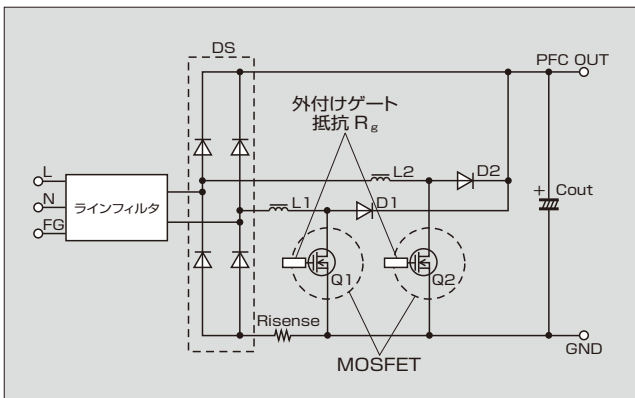


図3 電源の CCM-PFC 回路

で、パターン設計や部品回路定数の変更の手間を掛けなくて済むようにデバイス側での対策を行った。S2 シリーズはしきい値電圧 $V_{GS(th)}$ を上げることで誤オンの抑制を図っている。このとき、 $V_{GS(th)}$ を上げるだけではターンオフ速度が速くなり、ゲート振動による誤オンとターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが懸念される。そこで、 $V_{GS(th)}$ の最適化と R_g の最適化などの対策を行った。

S1 シリーズと S2 シリーズの R_g が 2 Ω のときのターンオフ波形を図5 に示す。S2 シリーズは S1 シリーズに対し、ゲート振動と V_{DS} サージが小さく、ゲート誤オンを抑制している。これにより、顧客での R_g を変更せずに電源効率の向上が可能となる。

図6 に E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性を示す。同

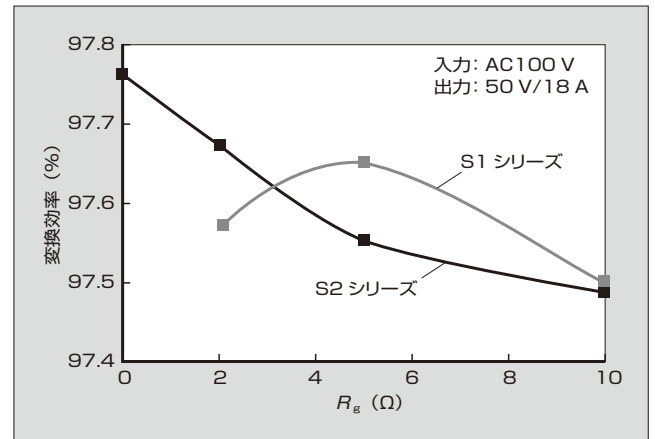


図4 外付けゲート抵抗 R_g に対する電源の変換効率

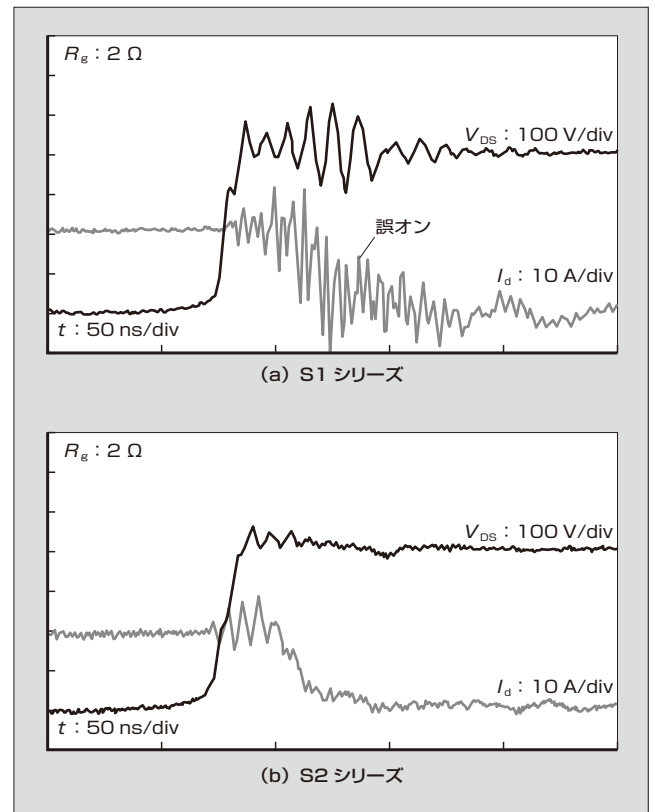


図5 ターンオフ波形

— V_{DS} サージにおいて、S2 シリーズは S1 シリーズよりも E_{off} が小さく、 E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性を改善している。このように、 V_{DS} サージとゲート誤オンを

抑制した S2 シリーズを、電源の CCM-PFC 回路部に搭載したときの R_g に対する電源の変換効率を図 4 に示す。S1 シリーズでは R_g が小さいときに変換効率が低下していた

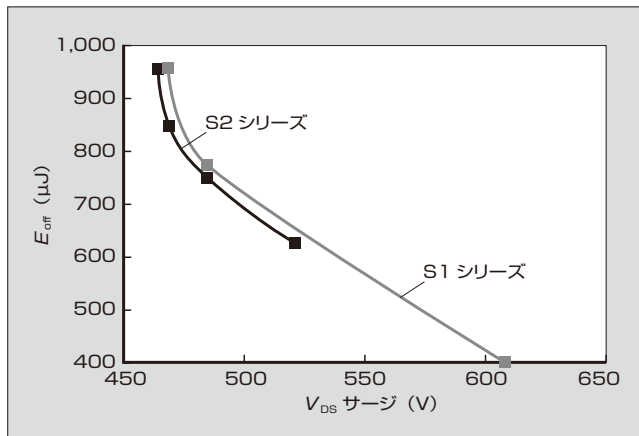


図 6 E_{off} - V_{DS} サージのトレードオフ特性

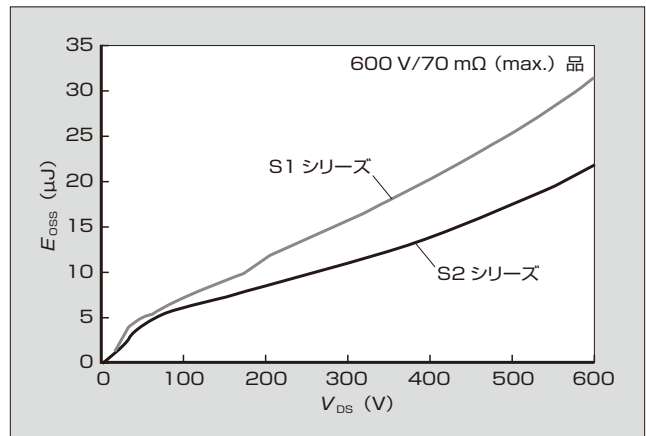


図 8 E_{oss} 特性

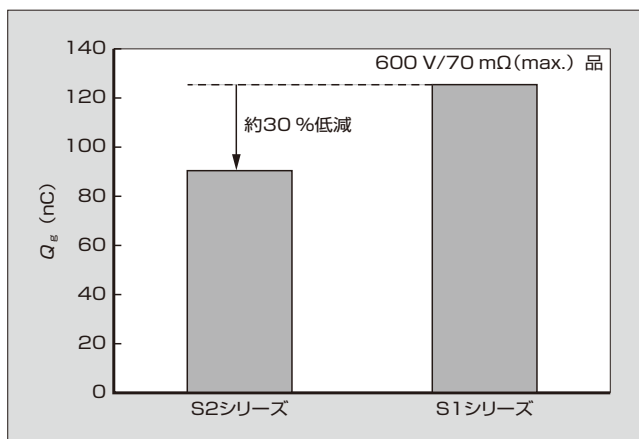


図 7 Q_g 特性

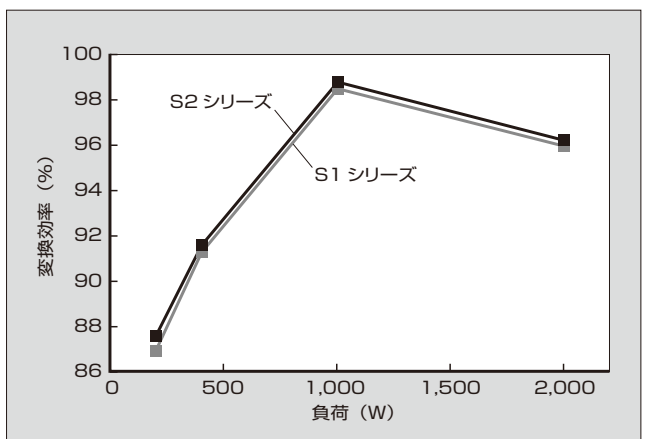


図 9 変換効率-負荷特性

表 1 「Super J MOS S2 シリーズ」の製品系列と主要特性

V_{DS} (V)	$R_{DS(on)}$ max. (mΩ)	I_D (A)	製品系列			
			TO-247 パッケージ	TO-3P パッケージ	TO-220 パッケージ	TO-220F パッケージ
600	25.4	95.5	FMW60N025S2	—	—	—
	40	66.2	FMW60N040S2	—	—	—
	55	49.9	FMW60N055S2	—	—	—
	70	39.4	FMW60N070S2	—	—	FMV60N070S2
	79	37.1	FMW60N079S2	—	FMP60N079S2	FMV60N079S2
	88	32.8	FMW60N088S2	—	FMP60N088S2	FMV60N088S2
	99	29.2	FMW60N099S2	—	FMP60N099S2	FMV60N099S2
	125	22.7	FMW60N125S2	—	FMP60N125S2	FMV60N125S2
	160	17.9	FMW60N160S2	—	FMP60N160S2	FMV60N160S2
	190	15.5	FMW60N190S2	FMH60N190S2	FMP60N190S2	FMV60N190S2
	280	10.4	—	FMH60N280S2	FMP60N280S2	FMV60N280S2
	380	8.1	—	—	FMP60N380S2	FMV60N380S2

が、S2 シリーズでは R_g を小さくすると変換効率が向上している。

2.4 軽負荷時の損失低減

電源が軽負荷のときには MOSFET に流れる電流が小さく、全体損失に占める導通損失の割合が小さくなるため、ドライブ損失と出力容量 C_{oss} の充放電時に発生する損失 E_{oss} の占める割合が増える。そこで、ドライブ損失の指標であるトータルゲート電荷量 Q_g を表面構造の最適化により、S1 シリーズに対して約 30% 低減し、 $R_{on} \cdot Q_g$ を約 20% 低減した。図 7 に S1 シリーズと S2 シリーズの Q_g を比較した結果を示す。また、図 8 に S1 シリーズと S2 シリーズの V_{DS} に対する E_{oss} の比較結果を示す。 V_{DS} が 400 V のときは、S1 シリーズに対して E_{oss} を約 30% 低減した。

3 適用効果

図 3 に示す電源の CCM-PFC 回路に、S1 シリーズと S2 シリーズの 600 V/70 mΩ 品を搭載して比較評価を行った (図 9)。このときの入出力条件は入力電圧 200 V、出力 53.5 V、 R_g は 2 Ω である。S2 シリーズは、ゲート振動による誤オンを抑制し、 E_{off} と V_{DS} サージのトレードオフ特性を改善し、 Q_g と E_{oss} を低減したことで、全負荷領域において S1 シリーズよりも高効率となっている。このことから S2 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見込まれる。

4 製品系列

表 1 に S2 シリーズの製品系列と主要特性を示す。比較的大容量の電源向けに $R_{DS(on)}$ 25.4 ~ 160 mΩ、小容量の電源向けに 190 ~ 380 mΩ の製品を系列化している。

5 あとがき

第2世代低損失 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2 シリーズ」は、低損失と V_{DS} サージの抑制を両立した製品である。CCM-PFC 回路部に搭載した実機評価において従来製品よりも高効率を実現可能であり、スイッチング電源の高効率化・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要求に応えるために、耐圧系列の拡大、内蔵ダイオードの高速スイッチング系列の拡大を進めるとともに、 $R_{on} \cdot A$ 低減などの性能向上を進

めていく所存である。

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) 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。



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。



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、富士電機株式会社営業本部半導体統括部応用技術部。

高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」

High-Speed Discrete IGBT “High-Speed W-Series”

原 幸仁 HARA, Yukihito

内藤 達也 NAITO, Tatsuya

加藤 由晴 KATO, Yoshiharu

無停電電源装置（UPS）や太陽光発電用パワーコンディショナ（PCS）においては、電力の変換効率が重要な性能であるため、使用するスイッチングデバイスに対して低損失化が求められている。また、小型のインバータ溶接機においては、持ち運びを容易にするため、使用するデバイスには高速スイッチングが可能で低損失であることが求められる。開発し、製品化した高速ディスクリート IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）は、活性部における寄生容量の低減、フィールドストップ層の最適化などにより、従来品に対して 650 V 品で約 10%、1,200 V 品で約 19% の低損失化を達成した。

Since power conversion efficiency is an important factor for uninterruptible power systems (UPSs) and power conditioning sub-systems (PCSs) for photovoltaic power generation, switching devices used in the equipment are required to reduce the power loss. For compact inverter welding machines, utilized devices are required to have low-loss characteristics and high-speed switching to make conveyance easier. The high-speed discrete insulated-gate bipolar transistor (IGBT) that we have developed and released reduces parasitic capacitance in active parts and optimizes the field stop layer, thereby achieving a 10% reduction in loss for 650 V products and a 19% reduction in loss for 1,200 V products when compared to the previous product.

① まえがき

近年、世界のエネルギー需要は増加の一途をたどっている。インターネット社会を支えるサーバやデータセンターなどでは、信頼性の高い電源が必要である。一方で、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーの普及により、エネルギー供給の分散化が進み、電力変換の需要が増えている。サーバやデータセンターでは省電力化が、エネルギー供給では電力変換効率の向上が求められ、パワーエレクトロニクス技術に寄せられる期待は非常に大きい。

世界的にデータ使用量が増える中、データを保障するためサーバやデータセンターには無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）が導入されている。以前は、100 kVA 以上の用途では、大容量 UPS を 1 台導入することが一般的であった。しかし、サーバやデータセンターでは高い信頼性を確保するため冗長構成が必要であり、最近では 10～50 kVA 程度の中容量ユニットを組み合わせて並列冗長動作としている。また、太陽光発電では、発電した直流電力を交流電力に変換するパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning Sub-system）が使用されている。これら UPS や PCS では電力の変換効率が重要な性能であるため、スイッチングデバイスに対する低損失化の要求が強い。いずれも IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を 20～40 kHz でスイッチングさせることが多いため、高速スイッチングによるスイッチング損失の低損失化が求められる。

一方、建設現場などで使用される小型のインバータ溶接機においては、持ち運びを容易にするため小型・軽量化が求められる。使用するデバイスを高速スイッチングで低損失にし、かつ高周波で駆動させることにより、トランスやコイルが小型化できるため、溶接機本体の小型・軽量化に

貢献できる。

今回、UPS、PCS、インバータ溶接機を高性能化するために、オン電圧とスイッチング特性のトレードオフを改善した高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」を開発し、製品化した。本稿では、最大定格電圧が 650 V と 1,200 V の High-Speed W シリーズについて、製品の概要とその適用効果について述べる。

② 「High-Speed W シリーズ」の概要

図 1 に High-Speed W シリーズの外観を、図 2 に主な用途を示す。表 1 に、High-Speed W シリーズの主要最大定格と電気的特性を示す。

650 V 系は 40～60 A の IGBT チップと 20～60 A の FWD（Free Wheeling Diode）チップを、1,200 V 系は 25、40 A の IGBT チップと 12、20、40 A の FWD チップを、ディスクリート製品として一般的なパッケージである TO-247 に搭載したものである。系列をそろえて、装置の

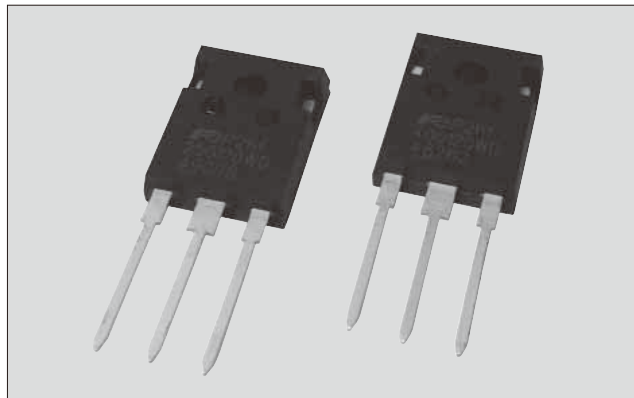


図 1 高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」

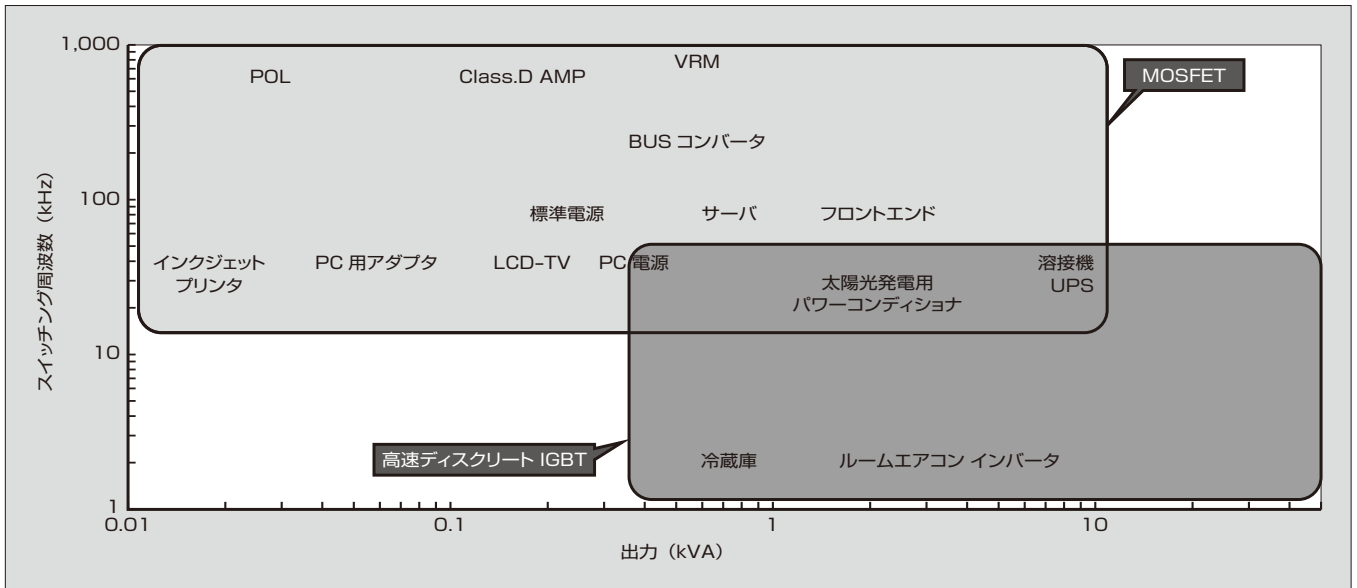


図2 「High-Speed W シリーズ」の主な用途

表1 「High-Speed W シリーズ」の主要最大定格と電気的特性

型 式	タイプ	パッケージ	最大定格				電気的特性			
			IGBT			FWD	IGBT		FWD	
			V_{CES}	I_C ($T_J=100^\circ\text{C}$)	I_{CP}	I_F ($T_J=100^\circ\text{C}$)	$V_{CES(sat)}$ ($T_J=25^\circ\text{C}$ typ)	$V_{CES(sat)}$ ($T_J=125^\circ\text{C}$ typ)	V_F ($T_J=25^\circ\text{C}$ typ)	V_F ($T_J=125^\circ\text{C}$ typ)
			(V)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(V)
FGW40N65WD	Ultra Fast FWD	TO-247	650	40	160	20	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW50N65WD	Ultra Fast FWD	TO-247	650	50	200	25	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW60N65WD	Ultra Fast FWD	TO-247	650	60	240	30	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW40N65WE	Ultra Fast FWD	TO-247	650	40	160	40	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW50N65WE	Ultra Fast FWD	TO-247	650	50	200	50	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW60N65WE	Ultra Fast FWD	TO-247	650	60	240	60	1.80	2.05	2.5	1.9
FGW40N65W	w/o FWD	TO-247	650	40	160	-	1.80	2.05	-	-
FGW50N65W	w/o FWD	TO-247	650	50	200	-	1.80	2.05	-	-
FGW60N65W	w/o FWD	TO-247	650	60	240	-	1.80	2.05	-	-
FGW25N120WD	Ultra Fast FWD	TO-247	1,200	25	100	12	2.0	2.4	2.2	2.05
FGW40N120WD	Ultra Fast FWD	TO-247	1,200	40	160	20	2.0	2.4	2.2	2.05
FGW40N120WE	Ultra Fast FWD	TO-247	1,200	40	160	40	2.0	2.4	2.4	2.2
FGW25N120W	w/o FWD	TO-247	1,200	25	100	-	2.0	2.4	-	-
FGW40N120W	w/o FWD	TO-247	1,200	40	160	-	2.0	2.4	-	-

電源容量や適用される回路に応じた選択肢を設けている。

③ ディスクリート IGBT の課題

図3にUPSにおけるディスクリート IGBT の適用例を、図4にPCSにおける適用例を示す。

UPSでは電力損失を最小限に抑えること、PCSでは太陽光パネルで発電した直流電力を交流電力に変換する際の損失を最小限に抑えることが重要である。

UPSやPCSの数kVA～数十kVAの容量帯では、インバータ部の電力効率を改善するため、3レベル電力変換技

術が広く採用されており、ディスクリート IGBT のスイッチング周波数は20～40kHz程度で動作させることが多い。

溶接機では、本体の小型・軽量化のため、体積と質量の占有率の高いトランスを小さくすることが求められている。このため、スイッチング周波数を高周波化する傾向が近年高まっている。一部では、50kHz以上の周波数でディスクリート IGBT のスイッチングを行う溶接機が市場に展開されている。

図5に、5kVAクラスのUPSおよび8.5kVAクラスの溶接機のインバータにおけるディスクリート IGBT の損失分析結果を示す。損失全体のうち、IGBTのスイッチング

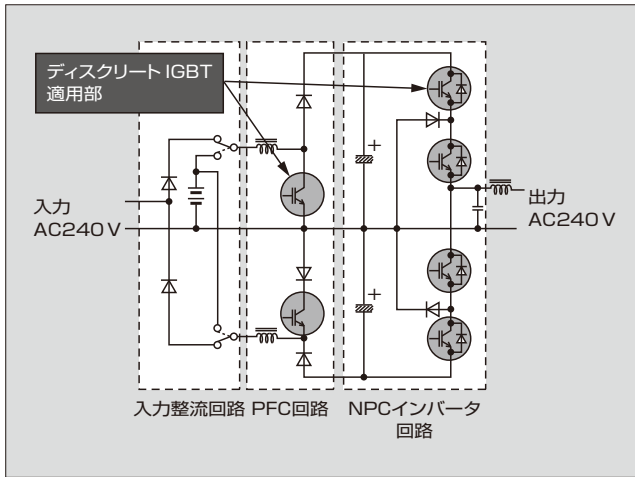


図3 UPSにおけるディスクリート IGBT 適用例 (3レベルI-Type)

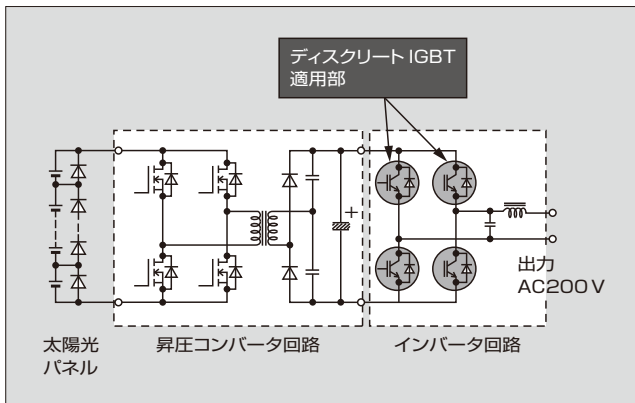


図4 PCSにおけるディスクリート IGBT の適用例

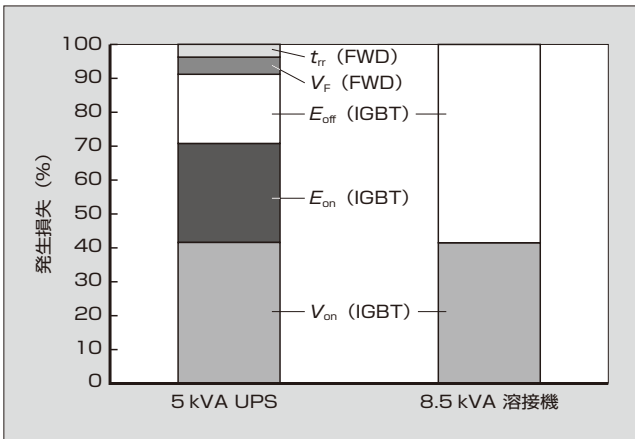


図5 ディスクリート IGBT の損失分析結果 ($f_c = 40$ kHz)

損失 $E_{on} + E_{off}$ の割合は UPS で約 50%, 溶接機で約 60% を占めている。また, IGBT のオン電圧損失 V_{on} はいずれも約 40% である。このことから, 高速スイッチング動作により低損失なディスクリート IGBT を実現するためには, $V_{CE(sat)} - E_{off}$ のトレードオフを改善し, 低スイッチング損失と低 V_{on} を両立させることが重要である。特に今回は, 駆動周波数のさらなる高周波化にも対応できるように, 低 E_{off} 特性に重点を置いている。また, FWD においても高周

波化対応として, リカバリ損失の低減を重点課題とした。

4 「High-Speed W シリーズ」の特徴

ディスクリート IGBT は, IGBT チップと FWD チップを1つのパッケージに搭載したデバイスである。IGBT, FWD チップのそれぞれの特徴について次に述べる。

4.1 650 V 系列 IGBT チップの特徴

従来品の「High-Speed V シリーズ」の定格電圧は 600 V であった。今回, 電圧マージンを確保したいという市場要求に応えるため定格電圧を 650 V とした。

図 6 に, 650 V IGBT チップの断面構造を示す。従来品は, モジュール用の V シリーズ IGBT をベースに $V_{CE(sat)} - E_{off}$ のトレードオフを改善する設計であった。これに対して High-Speed W シリーズでは, 寄生容量を大幅に低減させた活性部構造とフィールドストップ (FS) 層の最適化, ホールの注入を抑制するコレクタ層, 基板の薄化などにより, $V_{CE(sat)} - E_{off}$ のトレードオフを改善する設計施策を新たに取り入れた。

図 7 に, 600 V 系 /50 A IGBT チップの $V_{CE(sat)} - E_{off}$ 特性を示す。High-Speed W シリーズでは, 従来品に対して

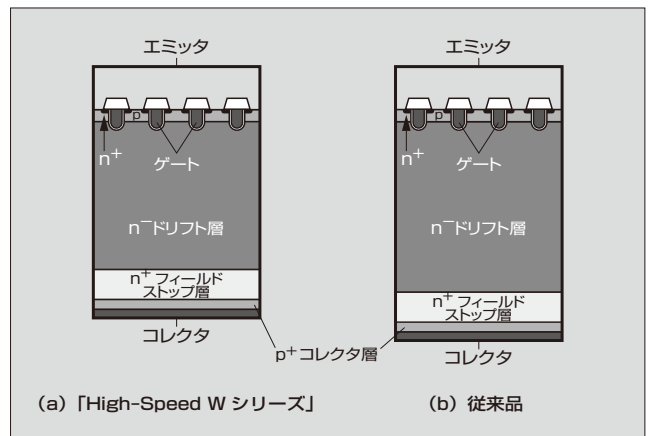


図6 IGBT チップの断面構造

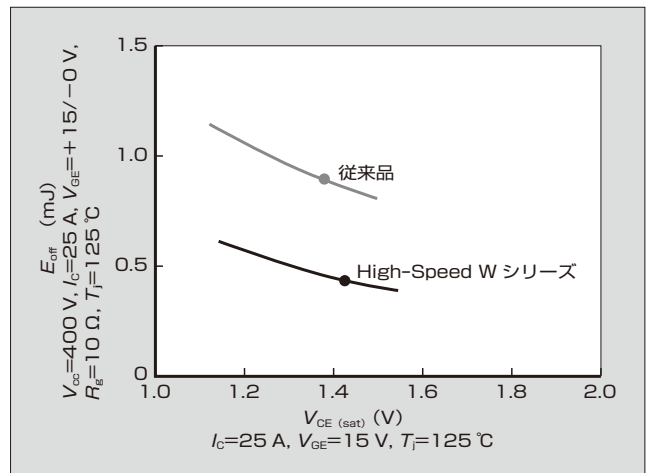


図7 600 V 系 /50 A IGBT チップの $V_{CE(sat)} - E_{off}$ 特性

$V_{CE(sat)}$ の悪化を最小限に抑えつつ、 E_{off} を約 48% 低減している。

4.2 650 V 系列 FWD チップの特徴

従来品の FWD は高速スイッチングに特化した設計である。High-Speed W シリーズでは、この FWD をベースにドリフト層の厚さを最適化することで、低リカバリ損失特性を維持したまま、650 V 保証の FWD とした。

4.3 1,200 V 系列 IGBT チップの特徴

前述の 650 V 系列 IGBT チップと同様の施策を行い、1,200 V 系列では、活性部における寄生容量の低減、コレクタ層におけるホールの注入の抑制、基板の薄化などを行った。図 8 に、1,200 V/40 A IGBT のターンオフ波形を示す。High-Speed W シリーズでは、ターンオフ時のテール電流を大幅に改善し、 E_{off} を大幅に低減した。図 9 に、 $V_{CE(sat)}-E_{off}$ 特性を示す。High-Speed W シリーズでは、 E_{off} を約 40% 低減している。

4.4 1,200 V 系列 FWD チップの特徴

High-Speed W シリーズの FWD は、従来品と同様に低リカバリ損失特性を持った FWD を使用している。

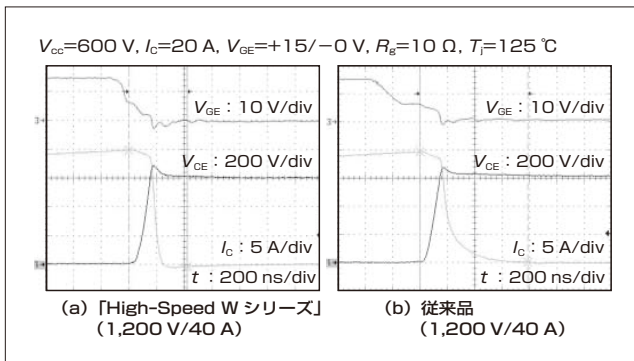


図 8 1,200 V/40 A IGBT のターンオフ波形

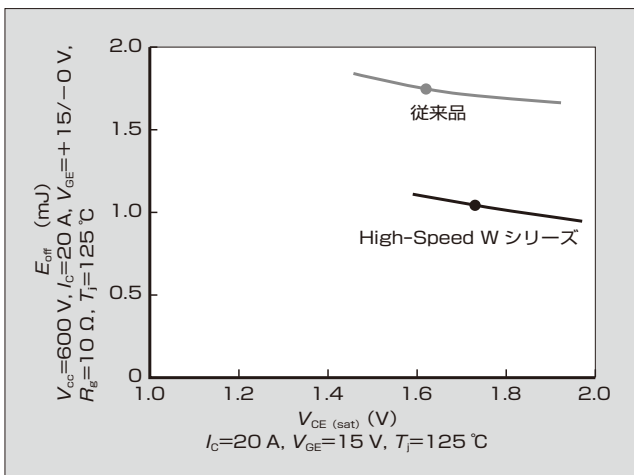


図 9 1,200 V/40 A IGBT の $V_{CE(sat)}-E_{off}$ 特性

5 「High-Speed W シリーズ」の適用効果

図 10 と図 11 に、5 kW 出力の UPS を想定した発生損失のシミュレーション結果を示す。スイッチング周波数は 40 kHz のフルブリッジ回路 PWM (Pulse Width Modulation) を模擬している。

図 10 の 600 V 系の IGBT では、High-Speed W シリーズは、従来品と比べてトータル損失が約 10% 低減することが見込まれる。また、図 11 の 1,200 V 系 IGBT では、約 19% の損失低減が見込まれる。いずれの発生損失においても、約 30% を占めている E_{off} を大きく低減させたことが、トータル損失の低減に大きく寄与している。

図 12 に、8.5 kVA クラスの溶接機に 600 V 系の IGBT を搭載した際のデバイス温度の評価結果を示す。一般的に溶接機では、温度保護機能が働くと溶接機としての動作を止めるため、温度の上昇幅が小さい IGBT が強く要求されている。図 5 に示したように、溶接機においては損失全体の約 60% を E_{off} による損失が占めている。そのため、従来品より大幅に E_{off} を低減させた High-Speed W シリーズの適用効果は大きく、デバイスの温度上昇分が従来品より約 5 $^\circ\text{C}$ (約 20%) 低く抑えられている。このため、High-Speed W シリーズは、従来品より溶接機の連続運転時間

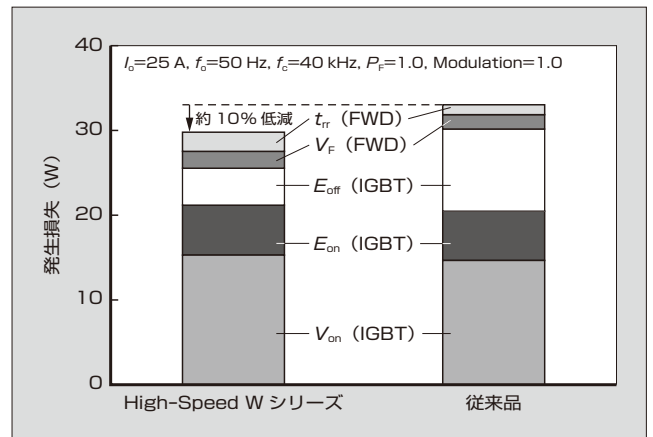


図 10 600 V 系 / 50 A IGBT の損失シミュレーション

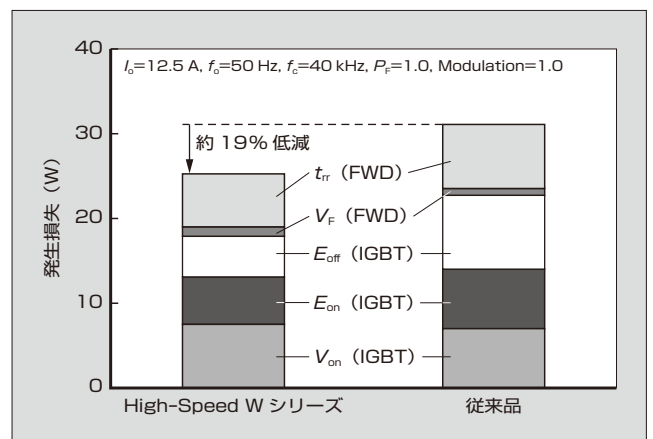


図 11 1,200 V 系 / 25 A IGBT の損失シミュレーション

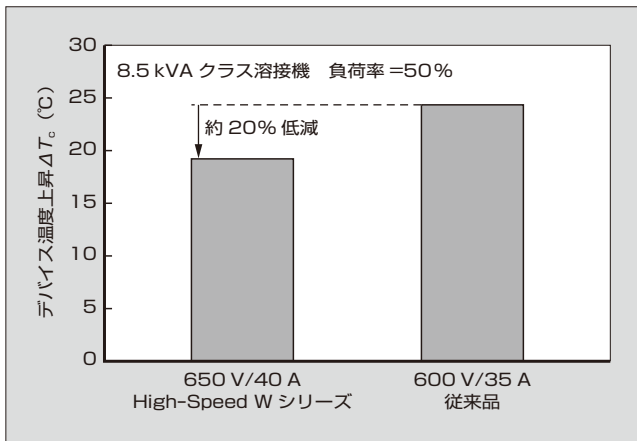


図 12 600 V 系 IGBT 搭載の溶接機のデバイス温度評価結果

を長くとることが可能となった。

⑥ あとがき

本稿では、650 V と 1,200 V の高速ディスクリート IGBT 「High-Speed W シリーズ」の概要とその適用効果について述べた。本製品は、UPS、PCS、溶接機を主な対象として開発したが、スイッチング電源の PFC (Power Factor Correction) 回路や産業機器向けなどにも広く適用が可能である。

今後もさらなる低損失化を進め、市場の要求に応える製

品を供給していくことで、省エネルギー化、電力変換の高効率化、装置の小型・軽量化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 渡島豪人ほか. 高速ディスクリート IGBT 「High-Speed V シリーズ」富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.393-397.



原 幸仁

ディスクリート半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部ディスクリート・IC 技術部。



内藤 達也

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。



加藤 由晴

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。



アモルファスモルトラ「FM-AT14」

Amorphous MOLTRA “FM-AT14”

渡辺 賢治* WATANABE, Kenji

地球温暖化防止を背景に、受変電設備においては節電対策が重要な課題となっており、省エネルギー（省エネ）性の高い電気機器のニーズが高まっている。現在、国内には約 260 万台の高圧配電用変圧器が設置されており、製造年代ごとの損失特性、総出荷台数、平均容量を基に試算すると、エネルギー損失の総量は約 165 億 kWh/y (CO₂ 換算で約 62 億 kgCO₂/y) という膨大な量になる。したがって、効率の高い変圧器への置換えは大きな省エネ効果をもたらすことになる。モールド変圧器においては、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）の特定機器として 2014 年度から第二次トッランナー^{〈注1〉}基準が導入された。

富士電機は、2013 年 6 月に「トッランナーモルトラ 2014」を単相 10～500 kVA、三相 20～2,000 kVA のラインアップで発売した。従来の製品に比べて変圧器の発生損失を 40% 低減し、第二次トッランナー基準を満足させた。さらに、2015 年 6 月には第二次トッランナー基準の目標効率に対して 130% の達成率^{〈注2〉}となるアモルファスモルトラ「FM-AT14」を発売した（図 1）。本稿では、変圧器の鉄心材料に採用したアモルファス合金の特徴と FM-AT14 について述べる。

1 アモルファス合金の特徴

FM-AT14 に、変圧器の鉄心材料として従来の方向性



図 1 「FM-AT14」

* 富士電機株式会社産業インフラ事業本部千葉工場設計第一部

電磁鋼帯に代えてアモルファス合金を採用した。アモルファス合金と方向性電磁鋼帯の特徴を図 2 に、特性を図 3 に示す。アモルファスとは非結晶の意味であり、アモルファス合金は、原子が周期的に配列された結晶構造ではなく、不規則な状態のまま凝固したものである。変圧器の損失には、負荷に関係なく発生する無負荷損（鉄損）および負荷電流の 2 乗に比例して発生する負荷損（銅損）がある。アモルファス合金は、無負荷損の大きな割合を占めるヒステリシス損失と渦電流損失を小さく抑える特徴を持つ素材であり、これを用いた変圧器は無負荷損を非常に小さく抑えることができる。

このような特徴を持つアモルファス合金であるが、変圧器の鉄心材料に採用する場合は、体積の増大への対策

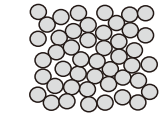
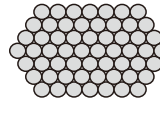
項目	アモルファス合金	方向性電磁鋼帯
原子配列	 不規則（非結晶） →ヒステリシス損失小	 規則的（結晶） →ヒステリシス損失大
板厚	0.025 mm →渦電流損失小	0.23～0.35 mm →厚さに比例して渦電流損失大

図 2 アモルファス合金と方向性電磁鋼帯の特徴

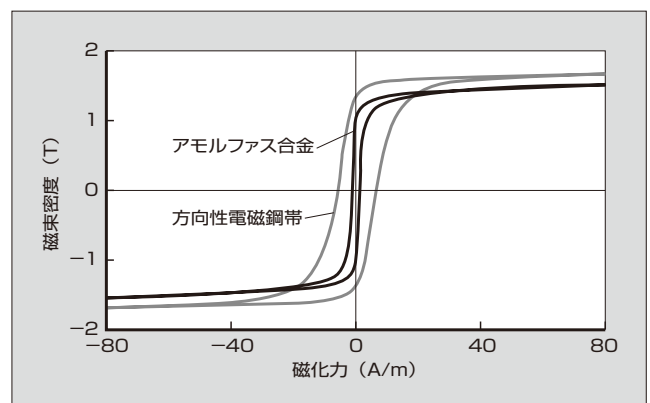


図 3 アモルファス合金と方向性電磁鋼帯の特性

〈注 1〉 第二次トッランナー基準：トッランナー変圧器第二次判断基準を指す。JIS C 4306 配電用 6kV モールド変圧器で規定される。

〈注 2〉 達成率：トッランナー変圧器第二次判断基準の基準エネルギー消費率 (W) に対する抑制割合を指す。

および剛性や加工性などに関する課題を解決する必要がある。

② 「FM-AT14」の概要

2.1 特徴

- (a) トップランナーモルトラ 2014 に対して待機電力を 1/3 に低減した。
- (b) 第二次トップランナー基準の目標効率に対して 130% の達成率となる省エネを実現した。
- (c) 全容量において巻線に真空注型を採用し、絶縁信頼性の高いモールド巻線を実現した。
- (d) 高い難燃性を実現し、IEC 60076-11 の形式認定を取得した。
- (e) JEM-TR 252 準拠の優れた耐震性を実現した。

2.2 仕様

表 1 に FM-AT14 の仕様を示す。

2.3 製作上の課題と対策

アモルファス合金は、方向性電磁鋼帯よりも飽和磁束密度が低く、通すことができる磁束密度も低い。このため、アモルファス合金を使った FM-AT14 は、方向性電磁鋼帯を使ったトップランナーモルトラ 2014 よりも鉄心の体積が大きくなる。また、板厚が方向性電磁鋼帯の 1/10 であり強度が低いため、変圧器の鉄心として自立させる構造上の工夫が必要である。さらに、アモルファス合金に掛かる荷重の大きさや分布によって騒音や特性に悪影響を及ぼさないように、剛性や加工性を考慮した構造上の工夫も必要である。

モルトラは配電用変圧器として配電盤内に設置されるため、省スペース化を考慮する必要がある。FM-AT14 は、設置面積がなるべく大きくならないように、高さ方向への拡大によって体積の増加に対応した。しかし、高さ方向への拡大は剛性への悪影響や変圧器の温度上昇を招く。

今回の開発に当たっては、これらの課題を次に示す対策により解決し、製品化を果たした。

- (a) 特性への影響を考慮したアモルファス合金の固定方法の最適化
- (b) 耐震性を考慮した変圧器全体の剛性の強化

表 1 「FM-AT14」の仕様

項目	仕様	
相数	単相	三相
周波数	50, 60 (Hz)	
定格容量	50, 75, 100, 150, 200, 300 (kVA)	75, 100, 150, 200, 300, 500 (kVA)
一次電圧	R6600-F6300-6000 (V) (単相50kVAのみ) F6750-R6600-F6450-F6300-6150 (V)	
二次電圧	210-105 (V)	210, 420, 440 (V)
耐熱クラス	F	

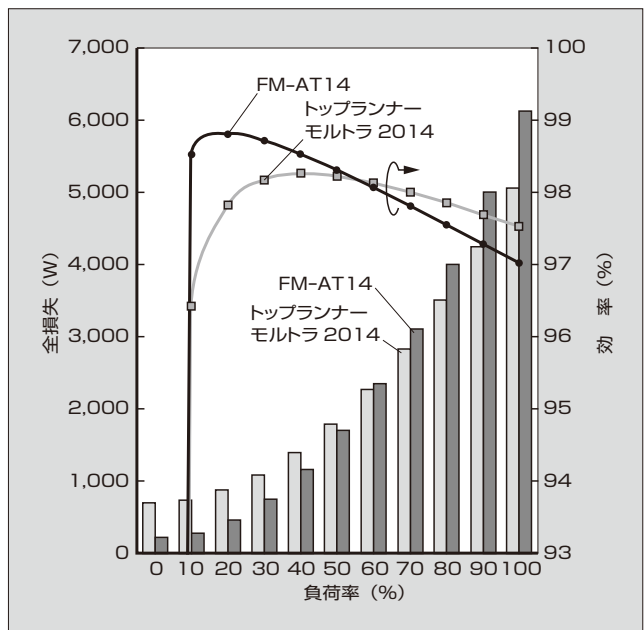


図 4 「FM-AT14」と「トップランナーモルトラ 2014」の全損失・効率

- (c) 変圧器の最適な組立方法
- (d) 最適な巻線設計と冷却構造の適用

③ 変圧器の種類と容量の選定

FM-AT14 とトップランナーモルトラ 2014 において、負荷率を変化させて全損失と効率を比較した結果を図 4 に示す。FM-AT14 は、低負荷率での効率が特に優れている。しかし、負荷率が高くなると FM-AT14 は体積が大きく巻線長が長いために、負荷損が全損失に大きく影響し、トップランナーモルトラ 2014 の方が効率において優位に立つ。

工場、ビル、ショッピングモールなどにおける使用電力量とその時間帯はさまざまである。したがって、変圧器の種類と容量の選定に当たっては、電力会社の時間帯別電力料金の設定も加味し、適切な変圧器を選択してむだなエネルギーとコストを抑えて運用することが肝要である。

富士電機は、FM-AT14 とトップランナーモルトラ 2014 のラインアップを取りそろえ、ユーザに最適なモルトラを提供できる体制を整えている。

発売時期

2015 年 6 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千葉工場設計第一部モルトラ課
電話 (0436) 42-8130

(2015 年 10 月 15 日 Web 公開)

サーキットプロテクタ「CP30F シリーズ」

Circuit Protector “CP30F Series”

江村 武史* EMURA, Takeshi

サーキットプロテクタは、機器内の回路を保護するための過電流保護機能と、スイッチとしての機能を併せ持つ遮断器であり、近年のFA 機器、OA 機器、コンピュータおよび周辺機器の進展とともに普及が拡大している。

富士電機は、制御回路用サーキットプロテクタとして、1983年に「CP-D シリーズ」を、1993年に「CP-F シリーズ」を発売し、好評を得てきた。発売当時に比べてユーザーのニーズは多様化し、かついっそう高度化してきている。富士電機は、こうしたニーズを踏まえ、安全性と配線時の作業性を向上させたサーキットプロテクタ「CP30F シリーズ」を開発した(図1)。本稿では、CP30F シリーズの特徴について述べる。

1 開発の狙い

制御回路用サーキットプロテクタをはじめとする制御盤用のコンポーネントに対するユーザーの主な要求は、次のとおりである。

- (a) 制御盤の小型化に対応したコンポーネントの小型化
- (b) 高機能化、複雑化する機械に対する安全性の向上
- (c) 配線時の作業性の向上などによる、トータルコストダウンを可能とする製品構成
- (d) 国内向けと輸出向けの同一設計が可能な仕様

2 製品の特徴

図2に製品の内部構造を示す。主な特徴は次のとおり

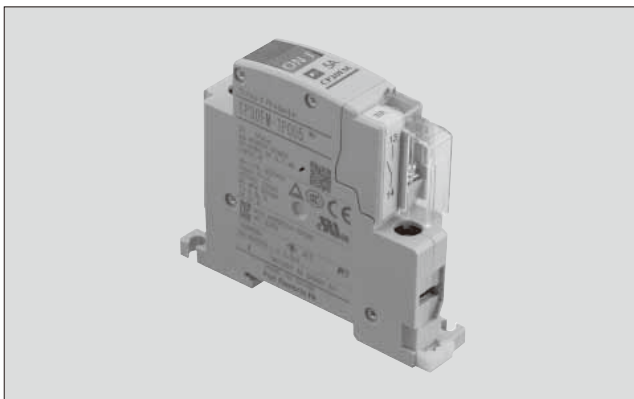


図1 「CP30F シリーズ」

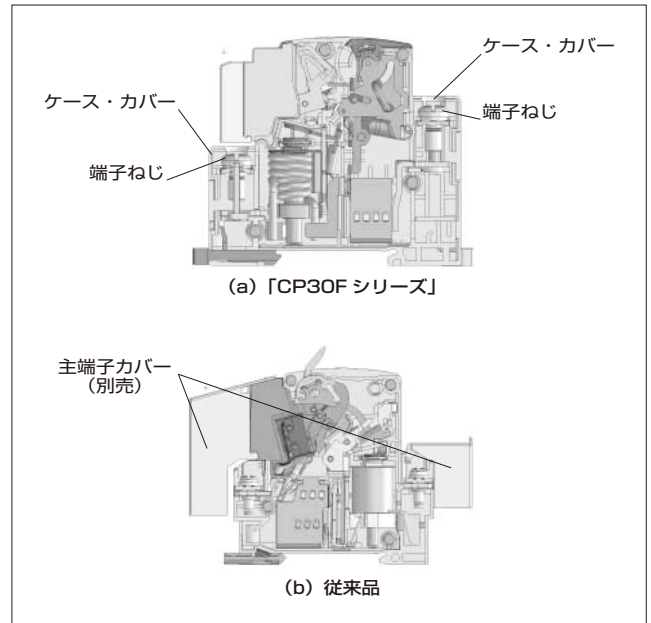


図2 製品の内部構造

である。

- (a) 主回路の端子カバーの機能を本体に一体化して製品を小型化し、体積は20%減、専有面積は20%減を達成した。
- (b) 指が充電部に触れないようにIP20構造を標準で採用して、安全性を確保した。
- (c) ねじを外さずに丸型圧着端子を配線できるねじアップ構造を採用した。また、端子配列を見直して主端子と補助端子の配線作業の順序をなくしたことで、主端子と補助端子の増し締めが個別に可能となり、配線時の作業性が向上した。
- (d) 国内と海外で同一仕様のサーキットプロテクタで対応できるようにするため、主要な国内・海外規格に適合させた。IEC, CCC, UL/SCA, KC, PSE (JIS) を標準で取得している。

3 仕様

表1にCP30Fシリーズの主な仕様を示す。サーキットプロテクタの仕様は、対象となる装置や機器によってさまざまなものが必要である。CP30Fシリーズは、従来品と同じ極数、定格電流、動作特性のバリエーションを持ちながら、端子部の構造を刷新して安全性と配線時の作

* 富士電機機器制御株式会社開発本部受配電開発部

表1 「CP30F シリーズ」の主な仕様

	CP30Fシリーズ	CP-Fシリーズ (従来品)
極数	1, 2, 3	
外形寸法 (幅×縦×奥行)	17.5×73×66 (mm)	17.5×92.6×65 (mm)
主端子構造	ねじアップ構造	ねじ
主端子カバー	ケース・カバーに統合	別売
定格電流	0.1 ~ 30 A	
定格使用電圧	AC250V DC65V	AC240V DC60V
動作特性	低速, 中速, 瞬時	
遮断容量	2.5kA	
補助端子	ねじ端子	
補助端子カバー	付属	別売

業性が大幅に向上した。

④ 端子部の構造と配線作業性の向上

従来品では、増し締め時に端子カバーを取り外す必要があり、配線時にねじを誤って紛失する恐れがあった。CP30F シリーズでは、図3に示すように端子ねじの座金にスプリングを配置し、端子ねじを緩めると座金と一緒に端子ねじが持ち上がるねじアップ構造を採用した。これにより、端子ねじを取り外すことなく丸型圧着端子の付いた電線を接続できるようにした。また、図4に示すように、端子ねじの外側をケース・カバーで覆い、指が

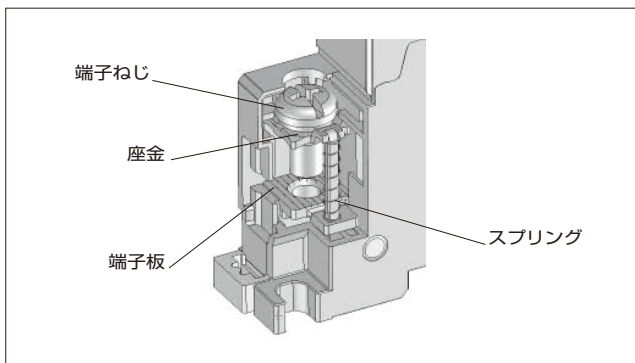


図3 ねじアップ構造

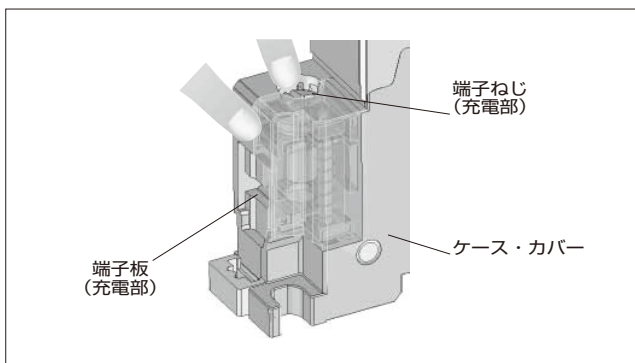


図4 IP20 構造

表2 主端子の配線に必要な作業

	CP30Fシリーズ	CP-Fシリーズ (従来品)
ねじを緩める	—	○
ねじを外す	—	○
ねじを圧着端子と合わせる	—	○
圧着端子を端子板に合わせる	○	○
ねじを締める	○	○
主端子カバーを付ける	—	○

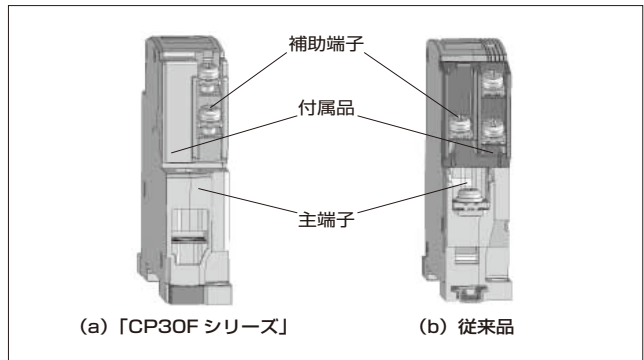


図5 主端子と補助端子の位置関係

充電部に触れない IP20 構造とした。

このねじアップ構造と IP20 構造の二つを組み合わせることにより、表2に示すように CP30F シリーズは従来品に比べて必要な作業が少なく、配線時の作業性が向上している。

さらに、図5に示すように主端子と補助端子の位置関係を見直している。従来品では、補助端子が左右両方にあるために、主端子、補助端子の順に接続する必要があり、また、保守作業で主端子を増し締めする際は、付属品の配線が邪魔になっていた。CP30F シリーズでは、補助端子の位置を右側にまとめることにより、主端子と補助端子の順序を問わず配線できるようになるとともに、主端子の増し締めだけを行うことができる。

発売時期

2015年7月

お問い合わせ先

富士電機機器制御株式会社
事業統括本部業務部受配機器課
(03) 5847-8060

(2015年11月13日 Web 公開)

第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール

7th-Generation "X Series" IGBT Module

川畑 潤也* KAWABATA, Junya

百瀬 文彦** MOMOSE, Fumihiko

小野澤 勇一** ONOZAWA, Yuichi

近年、エネルギー消費量の増加に伴うエネルギー資源の枯渇や、CO₂ 排出量の増加による地球温暖化の加速が世界的に深刻な問題となっている。このような中、産業、民生、自動車、再生エネルギーなどのさまざまな分野でパワー半導体デバイスを用いた電力変換装置の適用が広がっており、ここにはIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールが主に用いられている。電力変換装置の今後のさらなる普及のためには、装置の小型化 (コストダウン) や高効率化 (低損失化)、高信頼性が不可欠である。

富士電機では電力変換装置のさらなる小型化・高効率化・高信頼性化を実現するために、新たなチップ技術およびパッケージ技術を適用した第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールを開発した (図1)。XシリーズIGBT モジュールでは、IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) のチップの小型化・低損失化のみならず、高温動作時に低下が懸念される種々の特性を向上させることにより信頼性の向上も実現させた。パッケージの放熱性、耐熱性ならびに信頼性の向上により、IGBT の連続動作時の最高温度 T_{jop} を第6世代「Vシリーズ」IGBT モジュールよりも25℃高い175℃に向上させた。

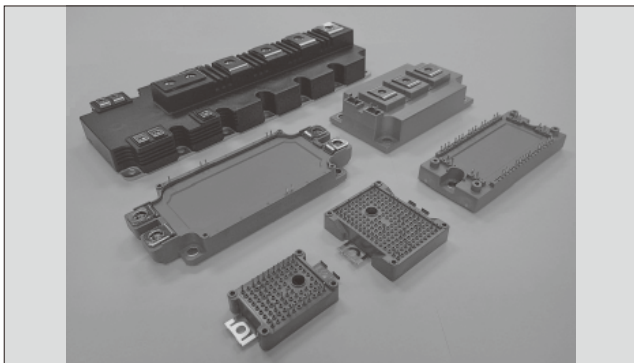


図1 第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール

* 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

** 富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部

** 富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部

1 特徴

IGBT モジュールの小型化・低損失化と $T_{jop}=175℃$ の実現により、図2に示すようにVシリーズIGBT モジュールに比べて出力電流が約35%増加し、電力変換装置のさらなる高パワー密度化による小型化を可能にした。

1.1 IGBT モジュールの小型化・低損失化

XシリーズIGBT モジュールは、IGBT と FWD の低損失化、ならびにパッケージの高放熱化と高信頼性化により、さらなる小型化・低損失化を達成した。

例として、EP2パッケージを適用した1,200V・75A定

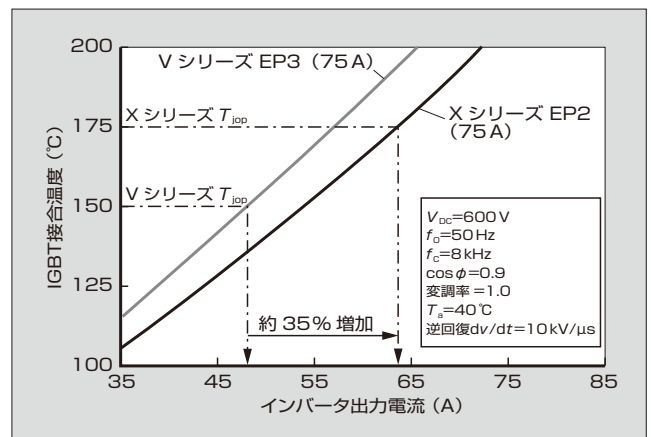


図2 インバータ出力電流と IGBT 接合温度

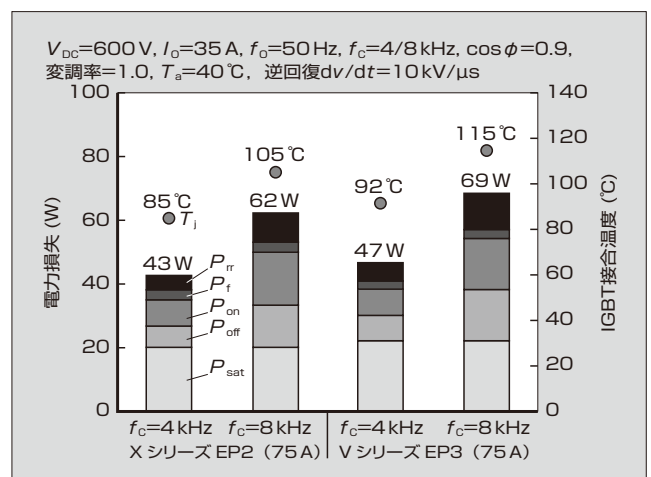


図3 通常運転時の電力損失と IGBT 接合温度

表1 第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールのラインアップ

パッケージ	回路構成	外形 W×D (mm)	定格電流		
			650 V定格製品	1,200 V定格製品	1,700 V定格製品
Small PIM1	PIM	33.8×48	10, 15, 20, 30 A	10, 15 A	—
Small PIM2		56.7×48	50 A	25, 35 A	—
EconoPIM*2		45×107.5	50, 75, 100 A	35, 50, 75 A	—
EconoPIM3		62×122	100, 150 A	75, 100, 150 A	—
EconoPACK*	6 in 1	62×122	—	100, 150, 200 A	—
Std. 2in1	2 in 1	34×94	100, 150, 200 A	100, 150, 200 A	75, 100, 150 A
		45×92	300, 400 A	200, 300 A	—
		62×108	400, 600 A	300, 400, 450, 600 A	150, 200, 300, 400 A
		80×110	600 A	450, 600 A	300, 400 A
Dual XT		62×150	—	300, 450, 600, 800 A	300, 450, 600, 800 A
EconoPACK+	6 in 1	150×162	—	300, 450, 600 A	300, 450 A
PrimePACK*2	2 in 1	89×172	—	600, 900, 1,200 A	650, 1,200 A
PrimePACK3		89×250	—	1,400, 1,800 A	1,000, 1,400, 1,800 A

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

格製品について述べる。VシリーズIGBTモジュールの最大電流定格は50Aであったが、XシリーズIGBTモジュールは、IGBTとFWDの低損失化とパッケージの高放熱化によってチップサイズを小型化し、同一パッケージで75Aまで拡大した。同じ電流定格で比較すると、従来はEP3パッケージを使用していたところでEP2パッケージに置き換えることによって、フットプリントを約36%低減した。図3に通常運転時の電力損失とIGBT接合温度の比較を示す。VシリーズIGBTモジュールに比べて、電力損失は約10%、接合温度は10℃低下し、小型化と低損失化が可能になった。

1.2 $T_{jop}=175^{\circ}\text{C}$ の実現

XシリーズIGBTモジュールでは、電力変換装置のさらなる高出力電流化を可能とするため、高温動作時の特性や耐量、ならびにパッケージの耐熱性や信頼性を向上させたことで、 T_{jop} を従来の150℃から175℃に向上した。

1.3 製品ラインアップ

表1にXシリーズIGBTモジュールのラインアップを示す。

2 背景となる技術

2.1 IGBTとFWDの低損失化

IGBTモジュールを小型化するためには、IGBTとFWDの損失を大幅に低減してチップサイズを小型化することが不可欠である。IGBTとFWDのオン電圧とスイッチング損失の関係を示すトレードオフ特性を図4に示す。第7世代IGBTはドリフト層の薄化、ならびに表面ゲート構造の最適化によってオン電圧を大幅に低減するとともに、ミラー容量の低減によってターンオフ損失を低減した。

また、第7世代FWDにおいても、ドリフト層の薄化

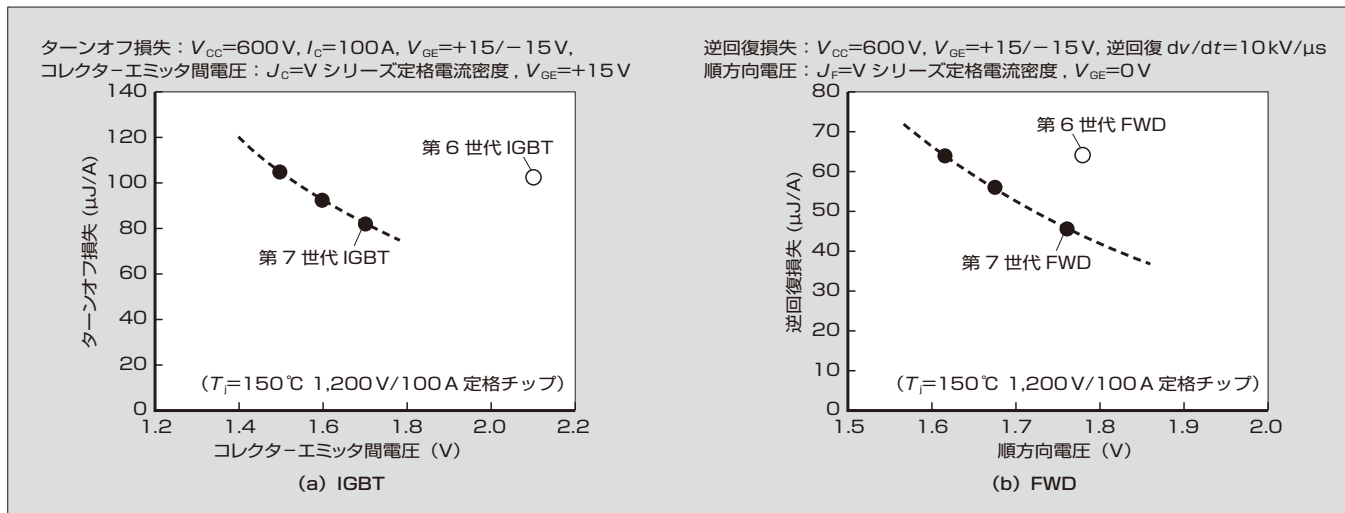


図4 トレードオフ特性

による順方向電圧の低減に加えて、少数キャリアライフタイムコントロールの最適化によって、逆回復損失の低減と滑らかな逆回復波形を実現した。このような大幅な損失低減などにより、第7世代のIGBTとFWDはチップサイズの小型化を実現した。

2.2 高放熱のAlN絶縁基板

チップサイズと製品の小型化によるパワー密度の上昇は、IGBT接合温度の上昇や熱集中を引き起こす。この課題を解決するために、高放熱の新しいAlN（窒化アルミニウム）絶縁基板を開発した。AlNは高放熱のセラミックスとしてよく知られており、XシリーズIGBTモジュールでは長期信頼性のさらなる向上と低熱抵抗化を実現した。開発したAlN絶縁基板は、セラミックスの焼成条件の見直しにより曲げ強度を向上させたことで、従来のAlN絶縁基板に比べて大幅に薄くしたことにより、熱ストレスが緩和し、温度サイクル耐量が大幅に向上した。また、熱抵抗も約45%低減し、小型化に伴うIGBTの接合温度の上昇という課題を解決した。

2.3 高信頼性・高耐熱パッケージ

$T_{jop}=175^{\circ}\text{C}$ の実現に当たって課題となるのが、熱ストレスの繰返しに対するパッケージの寿命（ ΔT_j パワーサ

イクル耐量）の低下とシリコーンゲルの長期絶縁性能の低下である。XシリーズIGBTモジュールでは、チップ上のアルミニウムワイヤとチップ下はんだの材料や接合方法を最適化し、 ΔT_j パワーサイクル耐量がVシリーズIGBTモジュールに比べて約2倍向上した（ $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_j=50^{\circ}\text{C}$ ）。また、従来のシリコーンゲルは 175°C の環境下では硬化しやすく、ゲルが裂けて絶縁性能が低下することが課題であった。開発したシリコーンゲルは、組成を見直して 175°C 環境下での硬化を抑制し、長期的な絶縁性能を確保した。これらの新技術によって、XシリーズIGBTモジュールでは $T_{jop}=175^{\circ}\text{C}$ が可能となり、さらなる高信頼性化を実現した。

発売時期

2015年8月から順次サンプル展開

2016年4月から順次量産

お問い合わせ先

富士電機株式会社

営業本部半導体統括部営業第1部

電話 (03) 5435-7152



略語（本号で使った主な略語）

APF	Annual Performance Factor	
BSD	Boot-Strap-Diode	
DPF	Diesel Particulate Filter	ディーゼル微粒子捕集フィルタ
EGR	Exhaust Gas Recirculation	排気再循環
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
EMI	Electromagnetic Interference	電磁障害
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FEM	Finite Element Method	有限要素法
FWD	Free Wheeling Diode	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
HVIC	High Voltage Integrated Circuit	
HVJT	High Voltage Junction Termination	高耐圧終端構造
IE	Injection Enhanced	電子注入促進
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IP	International Protection	
IPM	Intelligent Power Module	
LDMOSFET	Laterally Diffused MOSFET	
LVIC	Low Voltage Integrated Circuit	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
OBD	On-Board Diagnostics	
OCP	Over Current Protection	過電流保護
PCS	Power Conditioning Sub-system	パワーコンディショナ
PFC	Power Factor Correction	力率改善
PIN	P-intrinsic-N	
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RC-IGBT	Reverse-Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
SEM	Scanning Electron Microscopy	走査型電子顕微鏡
SPM	Suspended Particulate Matter	浮遊粒子状物質
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）

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

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。

訂正：富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.81.

富士電機技報. 2015, vol.88, no.3, p.216, p.219, p.222, p.224, p.227.

(正) フッターに記載

(誤) フッターに記載漏れ

- no.1, p.81. (2015年3月20日 Web 公開)
- no.3, p.216. (2015年4月10日 Web 公開)
- no.3, p.219. (2015年4月24日 Web 公開)
- no.3, p.222. (2015年4月24日 Web 公開)
- no.3, p.224. (2015年7月21日 Web 公開)
- no.3, p.227. (2015年9月18日 Web 公開)

訂正：富士電機技報. 2015, vol.88, no.3, p.176.

(正) ハイブリッド ZERO：圧縮機+補機

(誤) ハイブリッド ZERO：電気ヒータ

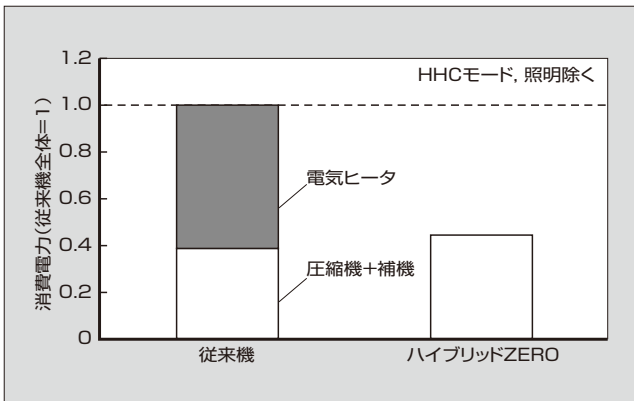


図 11 従来機と「ハイブリッド ZERO」の消費電力

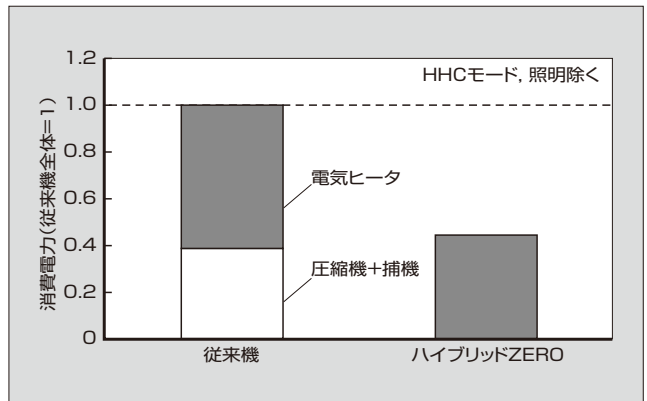


図 11 従来機と「ハイブリッド ZERO」の消費電力

訂正：富士電機技報. 2015, vol.88, no.3, p.185.

(正) 一定速圧縮機

(誤) 一定過圧縮機

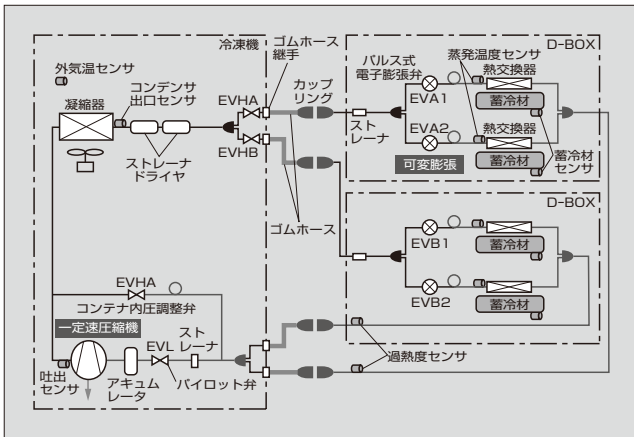


図 10 冷却回路図

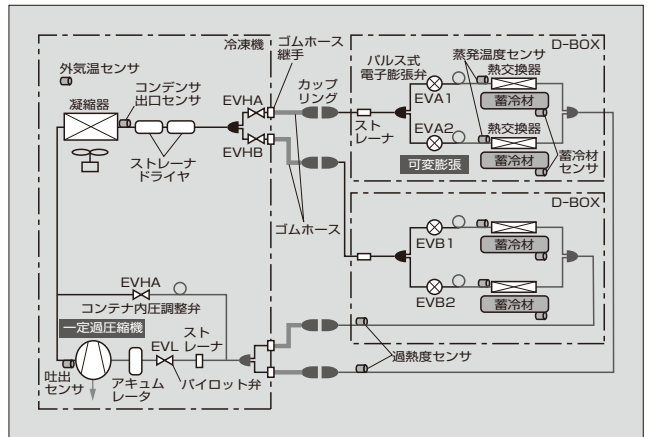


図 10 冷却回路図

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。

発電プラント

火力・地熱・水力発電設備、原子力関連機器、太陽光発電システム、燃料電池

社会システム

エネルギーマネジメントシステム、電力量計、スマートメーター

社会情報

情報システム

産業インフラ

産業分野のさまざまなお客様に、生産ライン・インフラ設備に関わる「省エネ化」「ライフサイクルサービス」を提供します。

変電

変電設備、産業電源設備

機電システム

産業用ドライブシステム、加熱・誘導炉設備、工場エネルギーマネジメントシステム、データセンター、クリーンルーム設備

計測制御システム

プラント制御システム、計測システム、放射線管理システム

設備工事

電気・空調設備工事

パワーエレ機器

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。

ドライブ

インバータ・サーボ、モータ、EV（電気自動車）システム、輸送システム

パワーサプライ

無停電電源装置、パワーコンディショナ

器具

受配電・制御機器

電子デバイス

産業機器・自動車・情報機器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。

半導体

パワー半導体、感光体

ディスク媒体

ディスク媒体

食品流通

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

自販機

飲料・食品自販機

店舗流通

流通システム、ショーケース、通貨機器

次号予定

富士電機技報 第89巻 第1号

特集 製品開発を支えるシミュレーション技術と製品デザイン

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 尾崎 覚 鶴田 芳雄 久野 宏仁
須藤 晴彦 吉田 隆 橋本 親 真下 真弓
安納 俊之 大山 和則
特集委員 鶴田 芳雄
事務局 木村 基 小野 直樹 山本 亮太 柳下 修

富士電機技報 第88巻 第4号

平成27年12月20日 印刷 平成27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。

© 2015 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

No.1 特集 パワーエレクトロニクス機器

[特集に寄せて] パワーエレクトロニクス機器の特集に寄せて	Johann W. Kolar	3 (3)
[現状と展望] パワーエレクトロニクス機器の現状と展望	友高 正嗣	7 (7)
All-SiC モジュール搭載のメガソーラー用 PCS 「PVI1000 AJ-3/1000」	大島 雅文 前田 哲也 村津 宏樹	13 (13)
北米向け 3 レベル適用大容量高効率 UPS 「7000HX-T3U」	川崎 大介 濱田 一平 佐藤 篤司	18 (18)
三相 200V 系大容量 UPS 「6000DX シリーズ」	玉井 康寛 木水 拓也 松永 和喜	22 (22)
グローバル対応の汎用インバータ「FRENIC-HVAC/AQUA シリーズ」 「FRENIC-Ace シリーズ」	河野 博之 三垣 巧 皆見 崇之	27 (27)
SiC ハイブリッドモジュールを搭載した 690V 系列インバータ 「FRENIC-VG スタックシリーズ」	佐藤 和久 高野 信 野村 和貴	32 (32)
富士電機のトップランナーモータ ——「プレミアム効率モータ」の損失低減技術——	舘 憲弘 鯉渕 博文 高橋 和利	36 (36)
インバーター体型モータ	宇津野 良 松井 康平	41 (41)
鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の小型・軽量化技術	滝沢 将光 西嶋 与貴	46 (46)
鉄道車両用ドアの最新動向と安全・信頼性技術	梅澤幸太郎 寺崎 富雄 稲玉 繁樹	50 (50)
北陸新幹線新黒部変電所向け電力補償装置	尾曾 弘 金子 知実 鈴木 明夫	56 (56)
港湾および造船所向け多機能陸電設備	宮下 勉 梅沢 一喜 城市 洋	62 (62)
パワーエレクトロニクス機器のシミュレーション技術	松本 寛之 玉手 道雄 吉川 功	66 (66)
パワーエレクトロニクス機器の国際標準化活動	高橋 弘 吉岡 康哉 佐藤以久也	71 (71)
解説 機能安全、パワーデバイスの駆動条件、パワーデバイスの発生損失、IP, SIL, 3レベル電力変換方式		76 (76)
新製品紹介論文 国内向け高性能コンパクト型インバータ「FRENIC-Ace」		79 (79)

No.2 特集 2014 年度の技術成果と展望

[特集に寄せて] “電気、熱エネルギー技術の革新により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献”	北澤 通宏	86 (2)
[特別対談] “パワー半導体とパワーエレクトロニクスを核に、ネットワーク化、 標準化の時代をどう進むか” —— IoT, M2M から始まるものづくりの大変革—— …	新 誠一 江口 直也	88 (4)
[成果と展望] “強いコンポーネントをコアにしたエネルギーソリューションの提供”	江口 直也	96 (12)
ハイライト		102 (18)
発電システム □火力・地熱プラント □再生可能エネルギー・電力安定化 □燃料電池 □原子力		110 (26)
社会インフラ □系統・配電 □エネルギーマネジメント □社会環境		114 (30)
産業インフラ □変電システム □産業プラント □産業計測機器		120 (36)
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		133 (49)
電子デバイス □パワー半導体 □感光体 □ディスク媒体		140 (56)
食品流通 □自動販売機 □店舗 □流通システム		145 (61)
基盤・先端技術 □基盤技術 □先端技術		148 (64)

No.3 特集 食品流通の冷熱技術とグローバルソリューション

[特集に寄せて] 食品流通技術の発展への期待 大越 ひろ 161 (3)

[現状と展望] 食品流通の冷熱技術とグローバルソリューションの現状と展望 杉本 幸治 162 (4)

エジェクタ冷凍サイクル適用のCO₂冷媒ヒートポンプ式自動販売機 鶴羽 健 山上 雄平 松原 健 168 (10)

ヒータ電力 ZERO 自動販売機「ハイブリッド ZERO」..... 石田 真 173 (15)

オフィス向け超小型カップ式自動販売機「FJX10」 畔柳 靖彦 伊藤 修一 西川 洋平 178 (20)

保冷コンテナ「チルドタイプ D-BOX」 隠塚将二郎 石野 裕二 富樫 大 182 (24)

インバータ冷凍機搭載のドリンク用ショーケース..... 村林 謙次 影山 利之 張 軼広 187 (29)

冷凍冷蔵倉庫向け省エネルギー制御システム..... 加藤 博志 白木 崇志 191 (33)

自動販売機のグローバル対応商品搬出機構..... 福田 勝彦 岩子 努 中島 規朗 196 (38)

IEC 規格対応グラスフロント自動販売機「Twistar」 阪 光広 松本 雅弘 渡辺 忠男 200 (42)

グローバル対応貨幣識別装置「FGC シリーズ」「FGB シリーズ」..... 大岩 武 田中 伸幸 山根 拓也 205 (47)

高温・高湿環境に対応したグローバル自動販売機の冷却技術..... 村瀬 孝夫 210 (52)

解説

エジェクタ..... 214 (56)

新製品紹介論文

操作性およびネットワークの利便性を追求したプログラマブル表示器「MONITOUCH V9 Advanced」 215 (57)

グローバルスタンダード温度調節計「PXF シリーズ」..... 217 (59)

IEC 規格適合 7.2kV スイッチギヤ..... 220 (62)

トップランナー基準を満足したギヤードモータ「MGX シリーズ」

「MHX シリーズ」とプレーキモータ「MKS シリーズ」 223 (65)

常時商用給電方式小容量 UPS「UX100 シリーズ」..... 225 (67)

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] 出来そうもないこと、思いも寄らぬこと 清水 敏久 233 (3)

[現状と展望] パワー半導体の現状と展望 高橋 良和 藤平 龍彦 宝泉 徹 234 (4)

All-SiC モジュールのパッケージ技術 仲村 秀世 西澤 龍男 梨子田典弘 241 (11)

1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール 小根澤 巧 北村 祥司 磯 亜紀良 245 (15)

3,300 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール技術 金子 悟史 金井 直之 辻 崇 249 (19)

第7世代「X シリーズ」IGBT モジュール 川畑 潤也 百瀬 文彦 小野澤勇一 254 (24)

第2世代小容量 IPM 荒木 龍 白川 徹 小川 裕貴 259 (29)

IPM 用 HVIC 技術 上西 顕寛 赤羽 正志 山路 将晴 264 (34)

車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール..... 荒井 裕久 樋口 恵一 小山 貴裕 269 (39)

車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術..... 郷原 広道 玉井 雄大 山田 教文 274 (44)

車載用 RC-IGBT 吉田 崇一 野口 晴司 向井 弘治 279 (49)

車載用燃料タンク圧検知相対圧センサ..... 加藤 博文 芦野 仁泰 佐藤 栄亮 283 (53)

ピーク負荷対応 PWM 電源制御 IC「FA8B00 シリーズ」..... 松本 晋治 山根 博樹 藪崎 純 287 (57)

第2世代 低損失 SJ-MOSFET「Super J MOS S2 シリーズ」..... 渡邊 荘太 坂田 敏明 山下 千穂 292 (62)

高速ディスクリット IGBT「High-Speed W シリーズ」 原 幸仁 内藤 達也 加藤 由晴 296 (66)

新製品紹介論文

アモルファスモルトラ「FM-AT14」 301 (71)

サーキットプロテクタ「CP30F シリーズ」..... 303 (73)

第7世代「X シリーズ」IGBT モジュール 305 (75)

未来の集積。

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



富士電機のパワー半導体

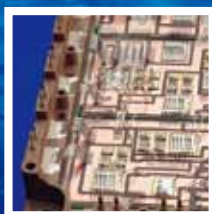
Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

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



耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
IGBTパワー半導体



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



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

F 富士電機