

# 富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2012  
Vol.85 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

持続可能社会を実現するために、太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーの普及や、そのエネルギーを効率的に利用するパワーエレクトロニクス技術への期待が非常に大きくなっています。この期待に応えるため、富士電機では、エネルギー変換効率が高く、低ノイズで地球環境にやさしいパワー半導体を開発してきました。パワー半導体は、エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラ、家電製品など多くの分野に適用されています。本特集では、パワーエレクトロニクス技術のキーデバイスである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

IGBT-IPM「Vシリーズ」



# 目次

## 特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

〔特集に寄せて〕 ネガワットコストとパワーエレクトロニクス 河村 篤男	391 (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	392 (4)
マルチレベル電力変換器用 1,700V RB-IGBT 魯 鴻飛 ・ 荻野 正明 ・ 中澤 治雄	398 (10)
All-SiC モジュール技術 梨子田 典弘 ・ 日向 裕一朗 ・ 堀尾 真史	403 (15)
IGBT モジュールの高信頼性実装技術 百瀬 文彦 ・ 西村 芳孝 ・ 望月 英司	408 (20)
IGBT モジュール開発におけるデバイス・回路・熱の 連携シミュレーション技術 山田 昭治 ・ 池田 晴信 ・ 仲村 秀世	413 (25)
〔V シリーズ〕 IPM の系列拡大 —高放熱タイプ「P630 パッケージ」— 本橋 覚 ・ 高橋 秀明 ・ 田岡 正裕	418 (30)
3.3kV IGBT モジュールの系列拡大 福知 輝洋 ・ 金子 悟史	422 (34)
〔V シリーズ〕 IGBT モジュールの系列拡大 —小型フレキシブル PIM— 小松 康佑 ・ 甲斐 健志 ・ 塩原 真由美	426 (38)
インバータエアコン用小容量 IPM 山田 忠則 ・ 傳田 俊男 ・ 白川 徹	430 (42)
車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術 安達 新一郎 ・ 小高 章弘 ・ 長畦 文男	435 (47)
車載用第4世代 IPS「F5100 シリーズ」 高坂 浩志 ・ 中川 翔 ・ 豊田 善昭	440 (52)
LLC 電流共振制御 IC「FA5760N」 山田谷 政幸 ・ 山路 将晴 ・ 山本 毅	445 (57)
第6世代 PWM 制御 IC「FA8A00 シリーズ」 藪崎 純 ・ 山根 博樹 ・ 小林 善則	452 (64)
略語	457 (69)
新製品・新技術紹介	458 (70)
富士電機技報 vol.85 2012 (平成 24 年) 総目次	

**Power Semiconductors Contributing in Energy Management**

<b>[Preface] Negawatt Cost and Power Electronics</b> KAWAMURA Atsuo	391 (3)
<b>Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook</b> TAKAHASHI Yoshikazu FUJIHIRA Tatsuhiko HOSEN Toru	392 (4)
<b>1,700 V Reverse-Blocking IGBTs for Multi-Level Power Converters</b> LU Hongfei OGINO Masaaki NAKAZAWA Haruo	398 (10)
<b>All-SiC Module Technologies</b> NASHIDA Norihiro HINATA Yuichiro HORIO Masafumi	403 (15)
<b>High Reliability Packaging Technologies of IGBT Modules</b> MOMOSE Fumihiko NISHIMURA Yoshitaka MOCHIZUKI Eiji	408 (20)
<b>Integrated Simulation Technology Combining Device, Circuit and Thermal Behavior in IGBT Module Development</b> YAMADA Shoji IKEDA Harunobu NAKAMURA Hideyo	413 (25)
<b>Expansion of the IPM “V Series” — High Heat Dissipation Type “P630 Package” —</b> MOTOHASHI Satoru TAKAHASHI Hideaki TAOKA Masahiro	418 (30)
<b>Expansion of the 3.3 kV IGBT Module Series</b> FUKUCHI Akihiro KANEKO Satoshi	422 (34)
<b>Expansion of the IGBT Module “V Series” — Flexible PIM —</b> KOMATSU Kosuke KAI Kenshi SHIOHARA Mayumi	426 (38)
<b>Compact Type IPM for Inverter Air Conditioners</b> YAMADA Tadanori DENTA Toshio SHIRAKAWA Toru	430 (42)
<b>Application Technology for Direct Water Cooling IGBT Modules in Automotive</b> ADACHI Shinichiro ODAKA Akihiro NAGAUNE Fumio	435 (47)
<b>4th Generation IPS “F5100 Series” for Automobiles</b> TOBISAKA Hiroshi NAKAGAWA Sho TOYODA Yoshiaki	440 (52)
<b>LLC Current-Resonant Control IC: “FA5760N”</b> YAMADAYA Masayuki YAMAJI Masaharu YAMAMOTO Tsuyoshi	445 (57)
<b>6th Generation PWM Controller IC: “FA8A00 Series”</b> YABUZAKI Jun YAMANE Hiroki KOBAYASHI Yoshinori	452 (64)
<b>Abbreviations</b>	457 (69)
<b>New Products and New Technology</b>	458 (70)
<b>Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOURNAL vol.85, 2012</b>	

特集に寄せて

# ネガワットコストとパワーエレクトロニクス

Negawatt Cost and Power Electronics

河村 篤男 KAWAMURA Atsuo

横浜国立大学大学院工学研究院教授 工学博士



ネガワットという言葉は、エネルギーの節約は新しく発電所を作るのと同じ効果があると考え、省エネルギー（省エネ）により生み出されるエネルギーをネガワット（Negawatt）と呼んだことに始まる<sup>(1)</sup>。さらに、少ない電力消費量でも収入と支出の差としての利益が大きくなるような経済活動を目指すことをネガワット革命と呼んだ。

一方で再生可能エネルギーの導入コストの計算として、キロワット時（kWh）当たりの単価を比較した文献<sup>(2)</sup>がある。装置の値段、稼働率、装置寿命、メンテナンス費用など詳しく調査して発電単価（セント/kWh）を予想している。

これにならって、ネガワットのコスト計算を行うことができ、次式で示すネガワットコストと呼ばれる<sup>(3)</sup> kWh 当たりの金額で評価するため直感的にわかりやすい。

$$\begin{aligned} \text{ネガワットコスト (円/kWh)} = & \\ & \left[ \text{省エネのための装置導入初期コスト (円)} + \right. \\ & \left. \text{維持費 (円)} \right] / \text{電力消費削減量 (kWh)} \cdots \cdots (1) \\ \text{電力消費削減量 (kWh)} = & \\ & \text{ネガワット (kW)} \times \text{全動作時間 (h)} \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

ただし、全動作時間（h）＝耐久年数相当時間（h）×稼働率、と考えると、式（1）の分母に稼働率の項が入り、稼働率が悪いものはネガワットコストが大きくなる。

インバータ駆動のモータドライブの例題を思考実験してみる<sup>(4)</sup>。コストに関しては実態とずれているが、計算をわかりやすくするための例と考えてほしい。仮定として、100kWのモータを稼働率30%で20年間使用、可変速駆動の用途のためインバータ導入で30%の省エネが可能、さらにチョッパ導入では10%の省エネが可能、インバータコストは1,000万円、チョッパは500万円とする。簡単な計算の後、インバータ導入のネガワットコストは10.1（円/kWh）、チョッパ導入のネガワットコストは、15.2（円/kWh）となる。電気料金が仮に、13（円/kWh）前後であれば、インバータを導入する場合のネガワットコストの方が低いのでインバータ可変速駆動を導入するほうが得であるが、チョッパ導入のネガワットコストは高いので、損となる。

ネガワットコストが下がる要因について式（1）を用いて

考察できる。初期導入コストの低減には、量産効果や技術革新による低コスト化の効果が大きいと考えられる。その一つの方向性が、パワーエレクトロニクス製品のコストダウンである。また、メンテナンスコストの低減、省エネ率の増加、稼働率の向上、減価償却年数の増加などの要因により、ネガワットコストは下がる。さらに、政府の補助金などで、電気料金の市場価格との差額が補償できれば、上記のチョッパの例では、導入が経済的に可能となる。もっと踏み込んで考察してみると、ネガワットの融通などに電力ネットワーク全体の省エネ効果や安定度向上の経済効果が期待できる場合は、ネガワットコストの計算式の修正が必要となろう。

単純に、発電単価（円/kWh）で比較すれば<sup>(4)</sup>、水力8.2～13.3、石油10.0～17.3、LNG5.8～7.1、石炭5.0～6.5、原子力4.8～6.2、太陽光46、風力10～14という値が公開されている。経済原理に従った発電コスト対ネガワットコストの大小関係と、成熟社会がネガワットを受け入れることができるかどうかの総合判断により、経済活動の方向性は決まる。パワー半導体を基本要素技術とするパワーエレクトロニクスによるネガワットの考えが浸透して、その結果、パワーエレクトロニクス技術の重要性が社会で認識され、さらに、パワーエレクトロニクス製品の広がりコストダウンにより、持続可能な社会が実現することを切に願っている。

## 参考文献

- (1) Amory Lovins, "The Negawatt Revolution", 1989, <http://www.ccnr.org/amory.html>, (参照 2012-08-20).
- (2) ESMAP Technical Paper 121/07, World bank, December 2007.
- (3) 河村篤男. "ネガワットの定義とその評価". 電気学会産業応用部門大会. シンポジウム. 2012年8月.
- (4) 経済産業省. エネルギー白書2008, 2008, <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2008/index.htm>, (参照 2012-08-20).

# 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、2012年7月に新しいブランドステートメント“**Innovating Energy Technology**”を掲げ、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することを経営方針の一つとしている。環境にやさしいクリーンエネルギーを創る“**創エネルギー**”，エネルギーの効率利用を実現する“**省エネルギー**”，エネルギーを最適な形でつなぐ“**エネルギーマネジメント**”の三つで構成されるエネルギー関連事業を展開している。その根幹を成すのが富士電機の強みであるパワーエレクトロニクス（パワエレ）であり、パワー半導体である。

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）では、長期的な世界の気温上昇を2℃以内に抑えるシナリオが議論されている。IEAは、毎年発行している『World Energy Outlook』で、世界発電総量に占める水力発電・風力発電・太陽光発電といった再生可能エネルギーの割合は、現在の約19%から2050年には約57%に達すると報告している。そのためには、日本をはじめとするエネルギー技術先進国が積極的にリードする必要がある。富士電機は、家電製品の省エネルギー（省エネ）の達成や、さらなる普及が期待される風力発電システムに必要なパワー半導体、太陽光発電システムに搭載されるパワーコンディショナ（PCS）といったパワエレ製品の開発を通して、その使命を果たしていく必要がある。

本稿では、富士電機の代表的なパワー半導体であるパワーモジュール<sup>(\*)1</sup>、パワーディスクリット<sup>(\*)2</sup>、パワーIC

ならびにこれらの開発を支える要素技術について、現状と展望を述べる。

## ② パワーモジュール

図1に、パワーモジュールの適用例を示す。富士電機の得意とする中容量市場では、ハイブリッド自動車（HEV）・電気自動車（EV）向けの車載用IGBT<sup>(\*)3</sup>（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールと、近年注目度が増しているマルチレベル電力変換器用の1,700V系RB-IGBT<sup>(\*)4</sup>（Reverse-Blocking IGBT：逆阻止IGBT）を開発した。また、大容量市場での3.3kV IGBTモジュールの製品系列を拡大し、さらには小容量分野にインバータエアコン用IPM（Intelligent Power Module）と小型フレキシブルPIM（Power

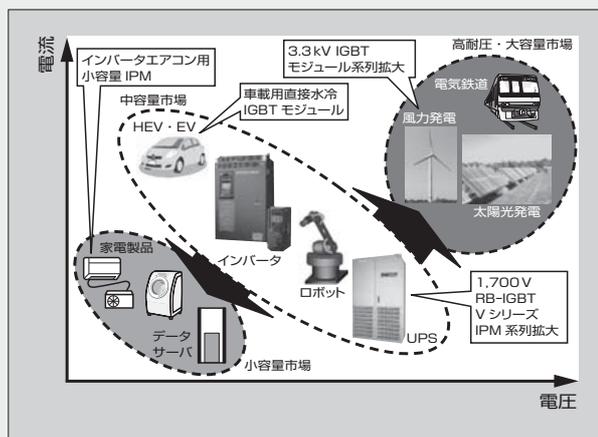


図1 開発したパワーモジュールの適用例

### (\*)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パワー素子を複数搭載したパワー半導体の一つである。構成する回路により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 パワーディスクリット

パワー素子のIGBTやMOSFETを1素子、もしくは

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、TO-220やTO-3Pなど汎用的にピンレイアウトが決まっている。

### (\*)3 IGBT

MOSFETのゲート制御性（高速スイッチング動作）とバイポーラトランジスタの大電力容量特性を併せ持つパワーデバイスであり、絶縁ゲート型バイポーラト

ランジスタ（Insulated Gate Bipolar Transistor）の略称である。600V以上のパワーエレクトロニクス機器において、現在主流となっている。

### (\*)4 RB-IGBT

逆方向（エミッターコレクタ間）の耐圧を持ったIGBTで、逆阻止（Reverse-Blocking）IGBTともいう。通常のIGBT素子は逆印加方向の耐圧を持たないが、RB-IGBTは順方向と同じレベルの耐圧を持っている。

Integrated Module)を開発し、製品化した。

これらの製品開発に加えて、シミュレーション、アセンブリ、デバイス技術などの要素技術の開発にも努めている。また、次世代パワー半導体として期待の大きいSiCデバイス<sup>(\*)5)</sup>を搭載したAll-SiCモジュールの技術開発も進めている。

### 2.1 インバータエアコン用小容量IPM

家電製品において温室効果ガスの削減やエネルギー利用の効率化を実現するため、さまざまな省エネ規制が行われている。この規制に対応するため、エアコンのコンプレッサモータの駆動回路にインバータを用いる方式が急速に拡大している。富士電機ではこのインバータ向けに、三相ブリッジ回路と制御回路・保護回路を内蔵した小容量IPMを開発した。これまで以上の省エネ性能と、小型、低ノイズ、高信頼性を実現した。

プリント板実装においてウェーブはんだ付け方式にするため、アルミニウムベース絶縁基板(IMS: Insulated Metal Substrate)を用いた<sup>(1)</sup>(図2)。IMSは、エポキシ系樹脂絶縁層を持ち、封止樹脂との高い接合強度を確保できる。軽負荷時の損失低減を実現するように、IGBTとFWD(Free Wheeling Diode)のデバイス設計を行った。また、ハイサイドのドライブ回路をHVIC(High Voltage Integrated Circuit)と内蔵BSD(Boot-Strap-Diode)回路で構成することにより、制御回路設計において、外部での絶縁回路やレベルシフト回路が不要になり、かつ最少の外付け部品で小容量IPMが動作できるようになった。

(430ページ“インバータエアコン用小容量IPM”参照)

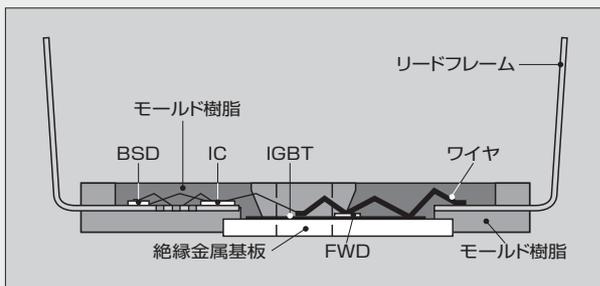


図2 インバータエアコン用小容量IPMの断面構造

### 2.2 小型フレキシブルPIM(「Vシリーズ」IGBTモジュールの系列拡大)

前述した家電製品用途に加え、産業用途のパワー半導体の製品群の中でも、半導体素子の小型化・高性能化により、従来は中容量帯のパッケージで対応していた定格電流の領域に対して、小容量帯のパッケージで対応する製品が増えてきている。このトレンドに合わせて、最新の第6世代「Vシリーズ」IGBTとFWDチップを搭載した小型フレキシブルPIMを開発した。銅ベースを使用しないことで大幅な小型化と軽量化を実現している。1,200V系は10~35Aの5型式、600V系は10~50Aの5型式を系列化している。それぞれ端子形状がソルダピンとプレスフィットピンの2種類があり、合計で20型式である。

(426ページ“「Vシリーズ」IGBTモジュールの系列拡大—小型フレキシブルPIM—”参照)

### 2.3 「Vシリーズ」IPMの系列拡大

既存のVシリーズIPM系列において、高放熱タイプIPMを新たな製品ラインアップとして予定している。絶縁基板にアルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を使用している既存製品に対して、高放熱タイプIPMでは、絶縁基板に窒化アルミニウム(AlN)を使用し、熱抵抗は既存製品よりも30%以上改善した。

また、絶縁基板下には、高いひずみ耐性を持つずーアンチモンベースのはんだ材を新たに適用した。これにより、信頼性指標の一つであるパワーサイクル耐量が大幅に改善した。

(418ページ“「Vシリーズ」IPMの系列拡大—高放熱タイプ「P630パッケージ」—”参照)

### 2.4 マルチレベル電力変換器用1,700V RB-IGBT

RB-IGBTをA-NPC(Advanced Neutral-Point-Clamped)3レベル方式コンバータへ適用するために、マトリクスコンバータ向けに開発された技術をベースに、チップを貫通する分離層の形成技術を高度化し、1,200V耐圧クラスまでRB-IGBTを開発してきている。

今回、さらに風力発電や車両分野などの大容量分野で、より高い電圧範囲のマルチレベル方式に適用するため、1,700V RB-IGBTデバイスとそのプロセス技術を開発した。シリコンを貫通する分離層を形成するために、1,200V RB-IGBTに適用した熱拡散とV溝の

#### (\*)5) SiC デバイス

SiC(炭化けい素)デバイスは、ワイドバンドギャップ半導体の一つである。現在主流のSi(けい素)デバイスと比較して、高耐圧、低損失、高熱伝導、高耐熱といった優れた特徴を併せ持つ半導体デバイスである。

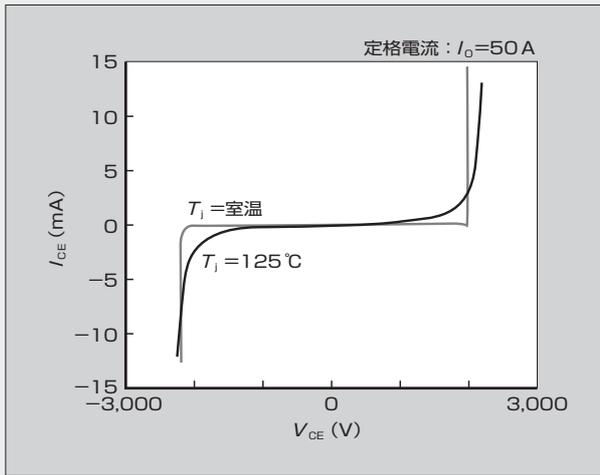


図3 1,700 V RB-IGBT のオフ状態の双方向 I-V 特性

エッチングを組み合わせる方法を高度化し、1,700 V RB-IGBT に対しても安定したプロセスによる分離層の形成が可能である。図3に、電流定格が50 AのRB-IGBTチップのオフ状態のI-V特性を示す。回路の動作モードに合わせ、順方向 ( $V_{CE} > 0 V$ ) の曲線はIGBTモードの特性、逆方向 ( $V_{CE} < 0 V$ ) の曲線はダイオードモードの特性を示した。いずれも十分な耐圧マージンを持っている。今後は、開発した1,700 V RB-IGBTを高周波アプリケーション向けのマルチレベルインバータに適用できるように、最適化を行っていく。

(398 ページ “マルチレベル電力変換器用 1,700 V RB-IGBT” 参照)

## 2.5 車載用直接水冷 IGBT モジュール

HEV や EV に搭載されるインバータシステムにおいて、バッテリー電力を効率良く利用するために IGBT モジュールが適用される。IGBT モジュールには、低損失化が求められるだけでなく、システムにおいて高いコスト比率や体積を占めるため、低コスト化と小型化も同時に求められる。富士電機はこれらの要求に応えるために、これまで直接水冷方式の IGBT モジュールの開発を行ってきた。HEV や EV は、小型車、スポーツタイプ多目的車、高級車といったさまざまな車種に広がっている。それぞれのモータ容量や仕様に対応するため、IGBT モジュールも幅広い容量帯のラインアップが必要であり、直接水冷方式を用いた製品系列の拡大を行っている。

今回拡大した製品系列は、定格電圧 650 V、定格電流は 400 A と 600 A のモジュールである (図4)。400 A 品は 20 ~ 30 kW、600 A 品は 40 ~ 50 kW クラスのモータ向けである。小型化を実現するために、直接水冷方式のフィンを一般的に広く用いられている丸型のピンではなく、角型のピンにして放熱性能を向上



図4 車載用直接水冷 IGBT モジュール

させている。

インバータは HEV や EV において動力源であり、その心臓部である IGBT モジュールの製品寿命を見積り、これを満足するよう設計することは非常に重要である。製品寿命を実際の走行実験により評価するためには、年単位の時間と多大な労力を必要とするため、設計ではパワーエレクトロニクス回路用シミュレータ PSIM を用いて、実車運転を想定したパワーサイクル寿命の推定を行っている。

(435 ページ “車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術” 参照)

## 2.6 3.3 kV IGBT モジュールの系列拡大

富士電機では、これまで大容量分野へ適用するために IGBT モジュールの製品を展開してきており、2010 年に 3.3 kV/800 A、1,200 A の製品を量産化している。ベース材料には、低耐圧モジュールでは銅を採用しているが、3.3 kV モジュールではより高い信頼性を確保するために AISiC を採用した。AISiC は熱膨張率が AlN 絶縁基板に近いため、銅ベースに比べ、ヒートサイクル寿命やパワーサイクル寿命が数倍向上する。今回、さらなる大電流化のニーズを受け、1,500 A 製品を系列に加えた。

(422 ページ “3.3 kV IGBT モジュールの系列拡大” 参照)

## 2.7 デバイス・回路・熱の連携シミュレーション技術

IGBT モジュールでは、小型化、高効率化、低ノイズ化などの要求が高まっている。これらの要素を総合的に満足する最適設計や、製品開発期間の短縮化のため、シミュレーション技術による製品の事前解析はこれまで以上にその重要性を増している。

IGBT モジュールのシミュレーション技術において、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの

間、および回路シミュレーションと熱シミュレーションの間の連携シミュレーションの構築を行った。これらの連携シミュレーションにより、IGBT チップの熱特性の誤差を約 10% から約 5% に、IGBT モジュール全体の電気特性の誤差を約 40% から約 10% に改善し、従来に比べて高精度な解析が可能になった。

(413 ページ “IGBT モジュール開発におけるデバイス・回路・熱の連携シミュレーション技術” 参照)

## 2.8 高信頼性実装技術

IGBT モジュールの適用範囲の広がりに伴い多様化した要求のうち高信頼性の要求に応えるため、IGBT モジュールパッケージの高信頼性実装技術と、それを支える設計技術の開発を行っている。実装工程もシミュレーションに反映し、IGBT モジュールの構成部品材に発生する塑性ひずみなどを材料の疲労特性データと整合させることにより、高精度な製品寿命予測を行っている。併せて、製品定格に応じた破壊耐圧および長期信頼性確保の観点から、部分放電開始電圧を考慮した最適設計も行っている。

また、良好な放熱性を得るために、冷却フィンと IGBT モジュールの間に塗布する熱伝導グリスに関して、実際の IGBT モジュールアプリケーションとその動作を考慮して、グリスの塗布厚み<sup>(3)</sup>や粘度、塗布方法、種類を選択することが重要であり<sup>(3)</sup>、そのための要素技術開発も行っている。

(408 ページ “IGBT モジュールの高信頼性実装技術” 参照)

## 2.9 All-SiC モジュール技術

パワー半導体材料として使われてきた Si デバイスは、性能限界に近づきつつある。そのため、高耐圧、低損失および高周波・高温動作が可能といった優れた特性を持つ SiC デバイスの製品開発が精力的に行われている。富士電機では、SiC デバイスが持つ性能を最大限発揮できるように All-SiC モジュールのパッケージ技術の開発を進めている<sup>(4)</sup>。

All-SiC モジュールは、パワーチップの接続に銅ピンを用いており、ワイヤボンディングレス構造である。また、従来の DCB 基板に代わり、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (窒化けい素) セラミック基板に厚い銅板を貼り合わせた放熱基板を用いることで、金属ベースレス構造でも低熱抵抗を実現している。これにより、パワーチップに大電流を供給してもチップ温度の上昇を抑えられるため、SiC デバイスの高密度実装が可能となり、モジュールの小型化が実現できる。さらに、封止材料としてエポキシ樹脂を用いることで、従来のシリコンゲル封止よりもパワーチップ接合部のひずみおよび応力が緩和され、信頼性が向上した。

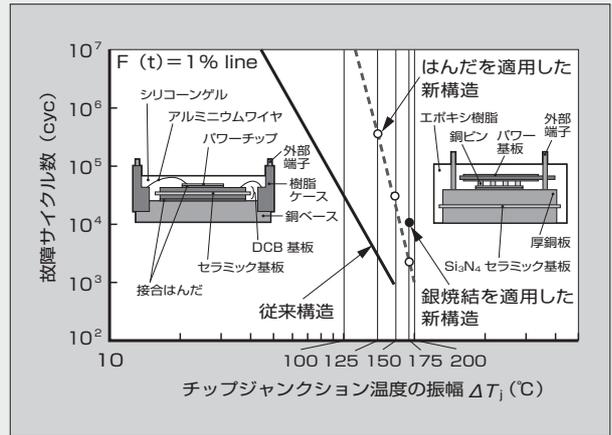


図5 200℃動作試験におけるパワーサイクル耐量

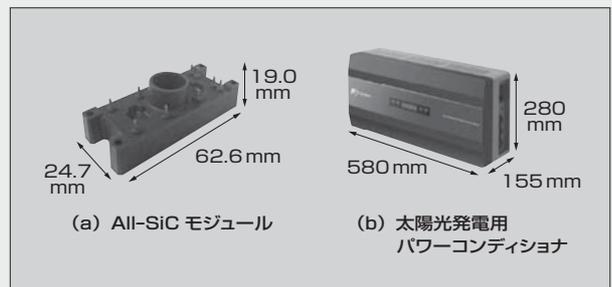


図6 All-SiC モジュールと搭載評価した太陽光発電用パワーコンディショナ

このほか、ガラス転移温度が 200℃ を超えるエポキシ樹脂を開発し、接合部には銀焼結材を適用してモジュール構造の高耐熱化を図っている。SiC デバイスの 200℃ 動作 ( $\Delta T_j = 175^\circ\text{C}$ ) を想定したパワーサイクル試験を実施し、従来のアルミニウムワイヤボンディング、シリコンゲル封止構造よりもチップ温度が 200℃ という高温域においても 10 倍以上の耐量を持つことを確認している (図5)。

All-SiC モジュールは、低インダクタンス構造を適用し、またフットプリントは従来の同定格の Si-IGBT モジュールの半分となった。三相 3 レベル回路を適用した太陽光発電用 PCS (出力 20 kW) に搭載したところ、装置全体の体積で従来機に比べて 1/4 の小型化を実現し (図6)、主回路部の変換効率は 99% まで向上することを確認した。今後は、All-SiC モジュールの PCS 以外のパワエレ製品への適用評価を進めていく。

(403 ページ “All-SiC モジュール技術” 参照)

## 3 パワーディスクリート、パワー IC

### 3.1 車載用第 4 世代 IPS 「F5100 シリーズ」

富士電機では、自動車電装システム向けにインテリジェントパワー MOSFET の開発を行ってきた。今回、出力段縦型パワー MOSFET を従来のプレーナゲート

型からトレンチゲート型に変更し、同時に回路部の要素デバイスの微細化を行ったハイサイド型の車載用第4世代IPS「F5100シリーズ」を開発した。主な特徴は、過電流・過熱検出機能による負荷短絡保護、低電源電圧動作、負荷状態・異常状態出力用ステータス端子の内蔵、インダクタンス負荷時の高速動作である。

(440 ページ “車載用第4世代IPS「F5100シリーズ」” 参照)

### 3.2 SJ-MOSFET の系列拡大

富士電機は、2011年にスーパージャンクション構造<sup>(\*)</sup>を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を両立した「Super J-MOSシリーズ」を開発し、系列化を行っている。比較的大容量の電源向けに、オン抵抗 40 mΩ、70 mΩ、125 mΩ、190 mΩ の製品をラインアップしている。現在は、低容量電源向けに、280 mΩ、380 mΩ、470 mΩ、580 mΩ の製品系列を開発している。

(458 ページ “新製品・新技術紹介「Super J-MOSシリーズ」の系列拡大” 参照)

### 3.3 LLC 電流共振制御 IC

富士電機はこれまで、高効率・低ノイズ・低待機電力を実現する独自の制御方式を採用して、複合共振型電流共振回路用マルチチップパワーデバイス「M-Powerシリーズ」を製品化している。また、600 V/800 V 高耐圧ドライバIC用プロセスを開発し、ブリッジ回路を直接駆動するドライバICも製品化している。これらの従来技術をベースに、新たに制御ICとドライバICとを一体化し、独自の制御方式を採用することにより、一つのコンバータで高効率、低消費電力かつ小型の電源システムを構成できる LLC 電流共振制御 IC「FA5760N」を製品化した。

図7に、FA5760Nのブロック図を示す。高耐圧ドライバIC用の半導体プロセスを適用し、600 V 耐圧起動

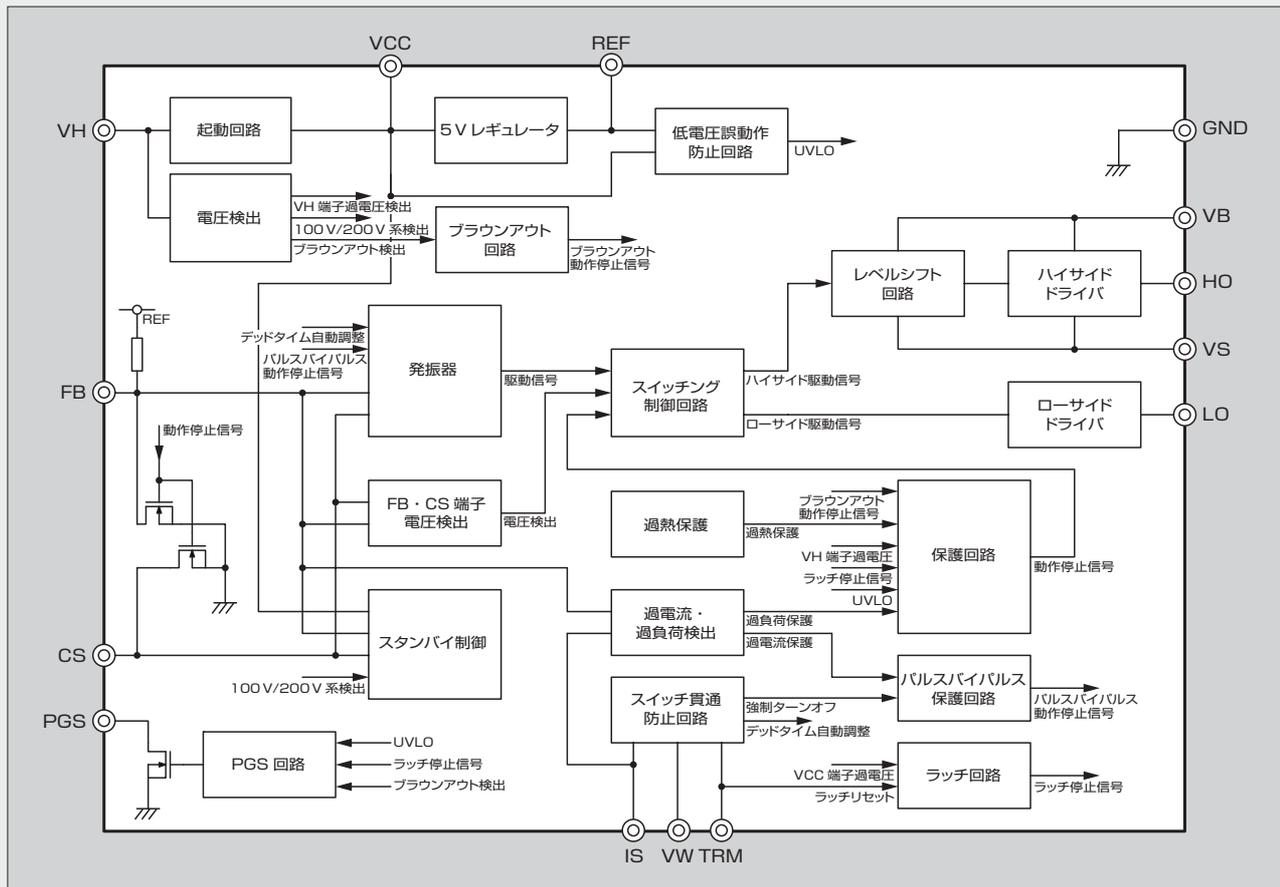


図7 「FA5760N」ブロック図

#### (\*) スーパージャンクション構造

従来構造では、材料が決まる理論限界がドリフト層の抵抗にあった。ドリフト層は、オフ状態で電圧を保持し、オン状態で電源を流す役割を果たす。このドリフト層内を p 形領域と n 形領域とが交互に並んだ構造

にすることで、耐圧を落とさずにオン抵抗を劇的に下げることができる。

素子を開発した<sup>(6)</sup>。FA5760Nは、LLC電流共振回路を制御する30V耐圧制御回路、ハーフブリッジ回路のハイサイドおよびローサイドのスイッチ素子を直接駆動可能な630V耐圧ドライバ回路を1チップで構成している。低消費電力でIC起動を実現する600V耐圧起動素子である。

ハイサイドとローサイドの両出力は、高精度に50%デューティで交互に動作し、動作周波数範囲は25~220kHzである。FA5760Nを用いたコンバータの定格出力100Wにおいて、最大効率90%、待機電力150mW以下を実現している。

(445ページ“LLC電流共振制御IC「FA5760N」参照)

### 3.4 第6世代PWM制御IC

富士電機では、AC100VやAC230Vの商用交流電源から起動電流を直接供給できる8ピンのスイッチング電源用制御ICを系列化している。今回、従来のICに比べて大幅に低待機電力性能を向上させ、電気機器に最適な保護機能を付加したカレントモードPWM(Pulse Width Modulation)電源IC「FA8A00シリーズ」を開発した。従来のICよりも低消費電力化、高精度化を実現するために、0.35μmプロセスを開発し、適用した。低耐圧デバイスの微細化と500V起動素子を融合させ、これまでアナログ回路で構成していた多くの回路ブロックをデジタル化することで、低消費電力化を可能にしている。

(452ページ“第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」参照)

## 4 あとがき

本稿では、パワー半導体の主要製品と、開発を支える要素技術について述べた。

富士電機は、パワーエレクトロニクス技術の革新とそのコアであるパワー半導体の製品開発により、再生可能エネルギーの普及や省エネルギー技術の発展に貢献してきた。

パワー半導体の高性能化、高信頼性化、低損失化を進め、創エネルギー・省エネルギー・エネルギーマネ

ジメント関連事業において富士電機の強みである電気・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を目指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) Wu, B et al. “High-power converters and AC drives”, IEEE Press 2006, ISBN-10 0-471-74171-4.
- (3) Momose, F. et al. “Thermal management of IGBT modules systems”, PCIM Asia 2012.
- (4) Ikeda, Y. et al. “Investigation on wirebond-less power module structure with high-density packaging and high reliability”, Proceedings of ISPSD 2011, p.272-275.
- (5) Matsumoto, Y. et al. “Characteristics of the power electronics equipments applying the SiC power devices”, Proceedings of ICPERE 2012.
- (6) Yamaji, M. et al. “A New 600 V-Class Power Management IC Realizing a System Downsizing for Current Resonant Type Converters”, PCIM Asia, 2012, p.207-212.



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、IMAPS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パワー半導体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長。電気学会正員。

# マルチレベル電力変換器用 1,700 V RB-IGBT

1,700 V Reverse-Blocking IGBTs for Multi-Level Power Converters

魯 鴻飛 LU Hongfei

荻野 正明 OGINO Masaaki

中澤 治雄 NAKAZAWA Haruo

変換効率の高い電力変換器の適用が広がっている。無停電電源装置や太陽光発電用パワーコンディショナなどでも、従来の2レベル変換方式から、より高効率なマルチレベル方式へ移行しつつある。富士電機では、マルチレベル変換回路に双方向スイッチとして使用される1,700 V RB-IGBTを他社に先駆けて開発した。熱拡散とV溝のエッチングを組み合わせるハイブリッド分離層方式を採用し、1,700 V デバイスへ適用した。高圧インバータの代表的なスイッチング周波数（～500 Hz）で中間素子がRB-IGBTの場合、導通損失の低減により、3レベルインバータの電力損失は18%減少した。

In a general trend to use highly efficient power converters, we are also observing a shift from conventional two-level converters toward multilevel converters of higher efficiency, in such applications as uninterruptible power supply (UPS) units and power conditioning system (PCS) units for solar power generation. Ahead of any other company, Fuji Electric has developed 1,700 V reverse-blocking insulated gate bipolar transistors (RB-IGBTs), used as bidirectional switches in multilevel converter circuits. For the 1,700 V device, we employed a hybrid isolation process that combines thermal diffusion and V-groove etching. When RB-IGBTs were used as neutral point clamping devices at a typical switching frequency for high-power inverters (up to 500 Hz), the decrease in conduction loss resulted in a reduction of energy loss by 18% in three-level inverters.

## 1 まえがき

近年、低炭素社会の実現に向けた意識が高まり、パワーエレクトロニクス分野において、変換効率の高い電力変換器の適用が広がっている。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）などのアプリケーションでも、従来の2レベル変換方式から、より高効率なマルチレベル方式に移行し、3レベル中間点クランプ（NPC：Neutral-Point-Clamped）またはアドバンスド NPC（A-NPC）方式のコンバータへの置き換えが進んでいる<sup>(1)</sup>。RB-IGBT（Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor：逆阻止 IGBT）を A-NPC 回路へ適用することにより、さらなる高効率化が可能である。

本稿では、風力発電や車両分野などの大容量分野のマルチレベル電力変換器に適用するために開発した1,700 V 耐圧のRB-IGBTデバイスと、そのプロセス技術について述べる。さらに、A-NPC 3レベル回路を例に、RB-IGBTを適用することによるメリットを説明する<sup>(2)</sup>。

## 2 開発の背景

NPC方式では、使用する半導体素子の数が多く、制御が複雑になるなどの課題がある。また、A-NPC3レベル方式では、中間素子をIGBTとFWD（Free Wheeling Diode）との直列接続（以下、逆直素子という）で構成し、パワーコンバータの入出力を容量結合の中間点と接続する方式で変換効率を向上させている（図1(a)）。そして、その中間素子をRB-IGBTで置き換えることにより、さらなる部品点数削減によるオン抵抗の低減によって変換効率が向上する<sup>(3),(4)</sup>（図1(b)）。

当初、RB-IGBTはマトリックスコンバータ向けに開発

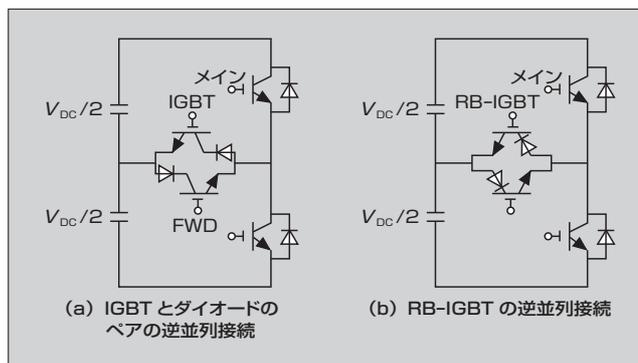


図1 A-NPC 3レベルインバータの回路構成

<sup>(5),(6)</sup>し、製品化したものである。これをベースに、A-NPC 3レベル方式コンバータへ適用するために、チップを貫通する分離層形成技術の完成度を高め、1,200 V 耐圧クラスまでのRB-IGBTを開発してきた<sup>(7)</sup>。さらに、風力発電や車両分野などの大容量分野に適用していくためには、より高い耐圧のデバイスが必要である<sup>(8)</sup>。

## 3 素子構造とプロセス

図2(a)に素子の終端構造の模式図を、図2(b)に分離層の断面の走査型電子顕微鏡（SEM）像を示す。チップ表面は、フィールドリミットリングの終端構造とプレーナゲートのセルで構成されている。コレクタ接合で逆阻止能力を持たせるために、その接合は外周部でチップを貫通するp+分離層で終端し、活性部の縦方向も電圧印加された際の空乏層が素子の表面に到達しないノンパンチスルー構造としている。

1,700 V RB-IGBTのチップ厚さは300 μmに近く、これまで報告された熱拡散による接合の最大深さ（200 μm<sup>(6)</sup>）

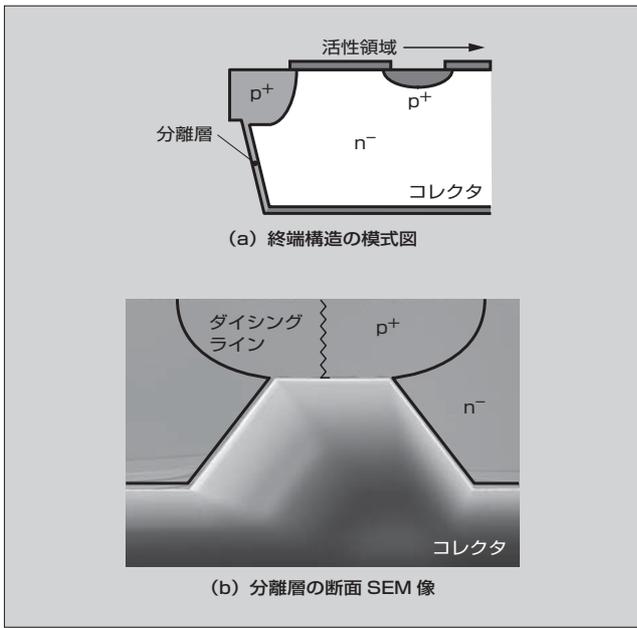


図2 素子の終端構造と分離層

を超え、熱拡散だけでの分離層形成は困難である。また、横拡散による分離層表面積が増大してしまう。これらの問題を解決するため、熱拡散とV溝エッチングを組み合わせるハイブリッド分離方式を採用した。図3にその概略プロセスフローを示す。

まず、表面セル構造を形成する前に、p+分離層をウェーハの表面側から形成する(図3(a))。表面構造を形成した後、ウェーハを薄くする工程において分離層形成領域に裏面からのV溝エッチングを行う(図3(b))。次に、裏面側から、p形イオンを注入してV溝の表面とコレクタのp層を形成する。このp層が表面の拡散層と接続し、分離

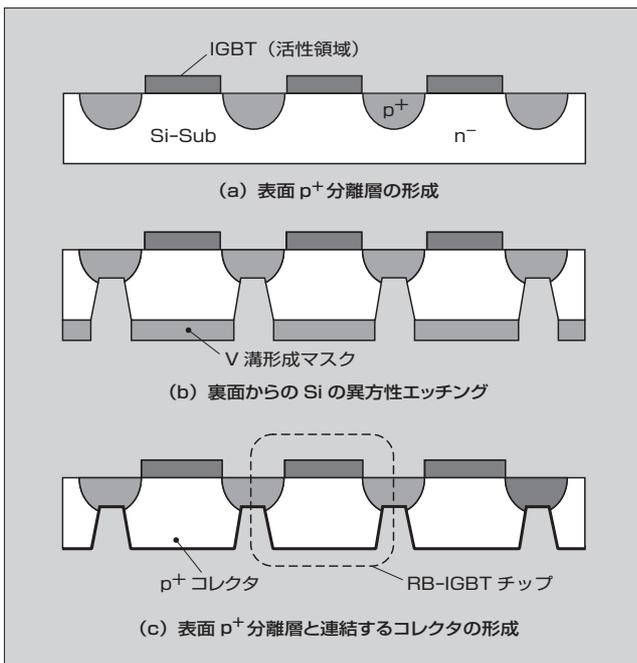


図3 ハイブリッド分離層を持ったRB-IGBTの概略プロセスフロー

層構造が形成される。最後に、裏面電極を形成する(図3(c))。

#### 4 素子の電気特性

##### 4.1 静特性

図4に、50A定格電流 $I_0$ チップの電圧阻止状態のI-V特性を示す。回路の動作モードに合わせ、順方向( $V_{CE} > 0V$ )の曲線はIGBTモードの特性、逆方向( $V_{CE} < 0V$ )の曲線はダイオードモードの特性を示した。いずれも十分な耐圧マージンを持っている。

図5に、RB-IGBT、従来の「Uシリーズ」IGBT(U-IGBT)とFWDからなる逆直素子のオン状態のI-V特性を示す。125℃、定格電流で、RB-IGBTの導通電圧 $V_{on}$ は1.9V低くなっている。

##### 4.2 スイッチング特性

###### (1) スイッチング損失

RB-IGBTのターンオフ、ターンオン、逆回復損失( $E_{off}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{rr}$ )と $V_{on}$ の関係を図6に示す。バス電圧 $V_{DC}$ は

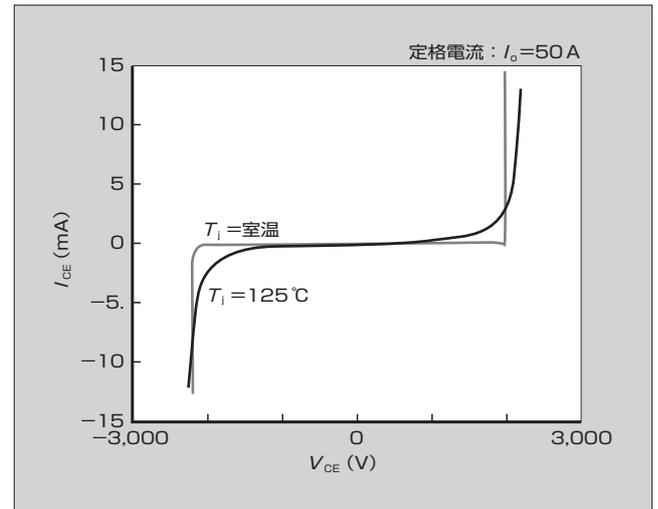


図4 オフ状態の双方向I-V特性

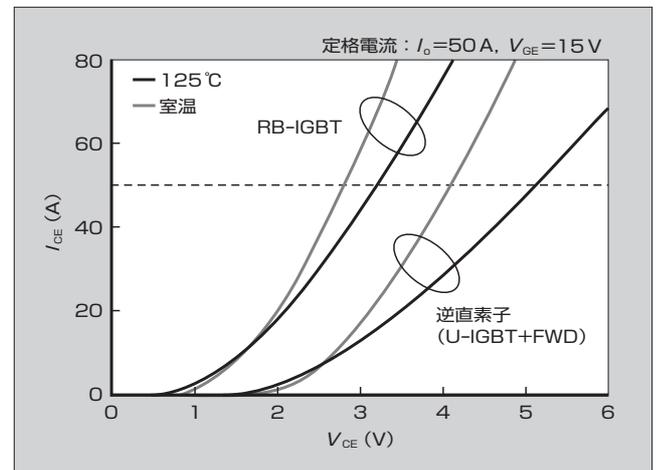


図5 RB-IGBTと逆直素子のオンI-V特性

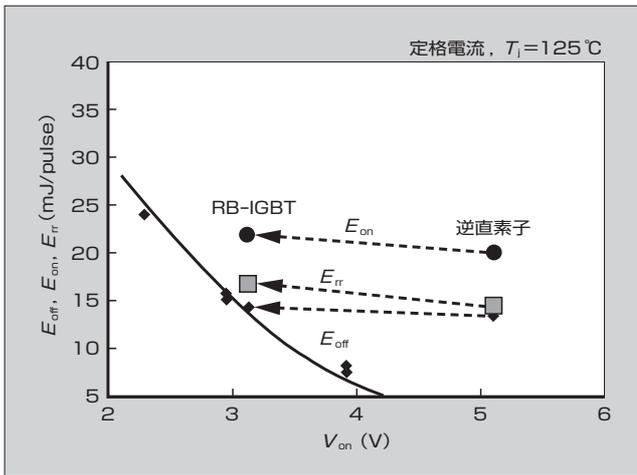


図6 RB-IGBTと逆直素子のスイッチング損失とオン電圧

850Vにした。逆直素子に比べ、RB-IGBTの $E_{on}$ 、 $E_{rr}$ はわずかに増加するが、 $E_{off}$ は同等レベルにある。代表的なターンオフ波形を図7に、特性一覧を表1に示す。強い耐量を保ちながら低 $V_{on}$ を達成している。

(2) ダイオードの逆回復特性

RB-IGBTは逆阻止耐圧を担うだけでなく、メイン素子の転流ダイオードとしても動作する(図1)。特に、EMIノイズの発生を抑えるため逆回復時のソフトネスが求められる。定格電流では、メイン素子の3.3kV U-IGBTのターンオン $di/dt$ が1.2kA/ $\mu$ sまでは逆回復波

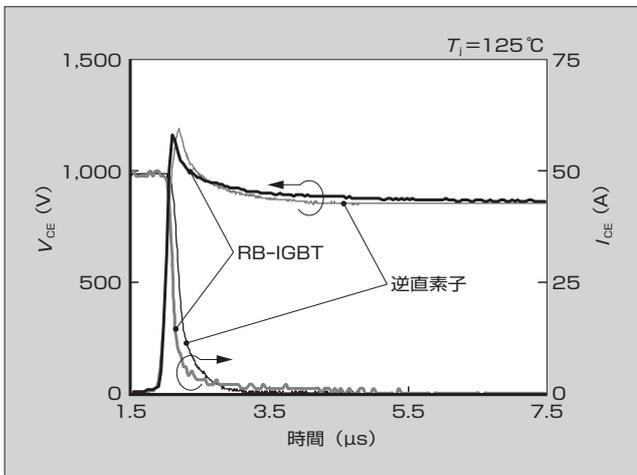


図7 RB-IGBTと逆直素子のターンオフ波形

表1 RB-IGBTと逆直素子の特性 ( $T_j=125^\circ\text{C}$ )

項目		RB-IGBT	逆直素子
基本特性	$V_{ON}$ (V)	3.2	5.1
	$E_{off}$ (mJ/pulse) F	14.3	14.5
	$E_{on}$ (mJ/pulse)	22.0	20.1
	$E_{rr}$ (mJ/pulse)	16.8	14.5
耐量	RBSOA	$7 \times I_o$	
	SCSOA ( $\mu$ s)	17.3	
	逆回復耐量 ( $\text{kW}/\text{cm}^2$ )	>197	

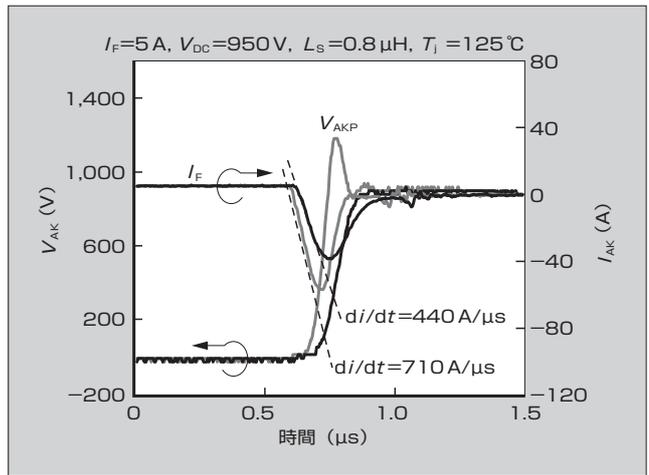


図8 二つの条件のメインIGBTターンオン $di/dt$

形に電圧の跳ね上がりはほとんど見られない。小電流では、跳ね上がりが顕著となる。

図8に、二つの条件のメインIGBTのターンオン $di/dt$ (710A/ $\mu$ sおよび440A/ $\mu$ s)に対応する逆回復波形を示す。電流のスルーレート $di/dt$ が440A/ $\mu$ s以下であれば、ダイオードの跳ね上がり電圧は生じなくなる。

4.3 スイッチング耐量

(1) IGBTの耐量

図9に、代表的な逆バイアス安全動作領域(RBSOA)の波形を示す。定格の7倍まで電流を流しても安全に遮断できる。図10に代表的な短絡安全動作領域(SCSOA)波形を示す。素子は非破壊である。図10のゲート信号のオン期間から分かる短絡耐量は、17 $\mu$ s以上にもなる。開発したRB-IGBTは、アプリケーション側が求める耐性を十分に備えている。

(2) ダイオード逆回復耐量

図11に、2倍の定格電流条件での非破壊大電流逆回復波形を示す。この図から求めたエネルギー密度は、197kW/ $\text{cm}^2$ になる。ダイオードは、これを越えるエネルギー耐量を持つことが分かる。

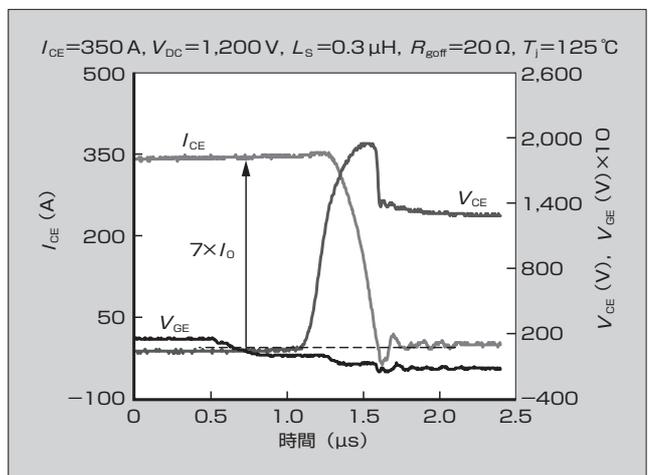


図9 代表的なRBSOA波形

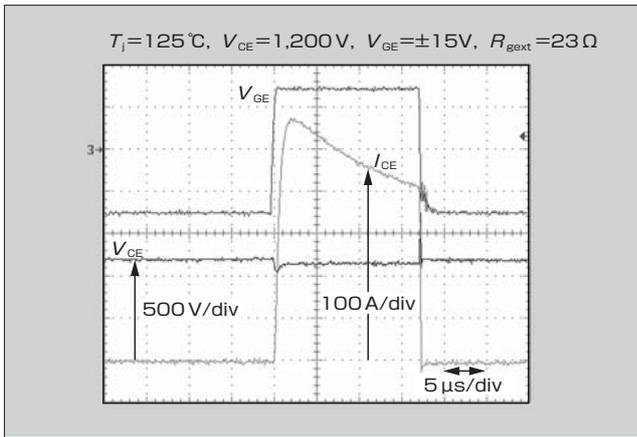


図10 代表的な SCSOA 波形



図12 1,700V 1,200A RB-IGBT モジュール

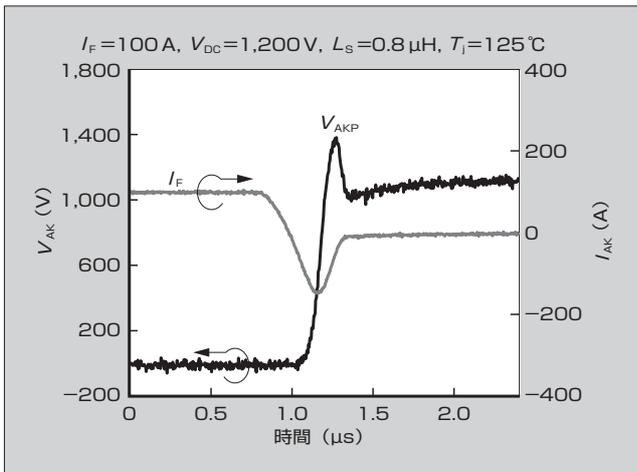


図11 非破壊大電流逆回復波形

コレクタ接合深さは、従来の FWD のアノード深さに比べて相対的に薄く、耐量の低下につながりやすいが、ノンパンチスルードリフト領域の採用とコレクタ注入効率を最適化することにより、高い耐量を維持できた。V 溝でコレクタの形状が非平面的になるが、コレクタ形状の最適化により、逆回復の耐量にマイナスの影響を及ぼしていないことが分かる。

4.4 3 レベル A-NPC インバータ回路におけるパワー損失

既存のハイパワーモジュールのパッケージ中に、50A のチップを 24 個並列して 1,200A 中間素子モジュールを構成した (図12)。メイン素子との関わりを調べるために、 $V_{on}$  が 3.1V (低定常損失) と  $V_{on}$  が 3.9V (低スイッチング損失) のチップで 2 種類のモジュールを作製した。おのおの RB-IGBT (A) と RB-IGBT (B) とし、図1(b)の 3 レベル A-NPC インバータの各動作モードにおけるスイッチング損失を測定した。メイン素子には、3.3kV U-IGBT と FWD を使用した。測定時、 $T_j$  を 125°C、バス電圧を 900V (図1の  $V_{DC}/2$ )、全ての IGBT の外付けのゲート抵抗は 3.3Ωにした。

図13 に、キャリア周波数  $f_c$  が 500 Hz と 1,000 Hz におけるインバータの電力損失の計算結果を示す。ただし、出力

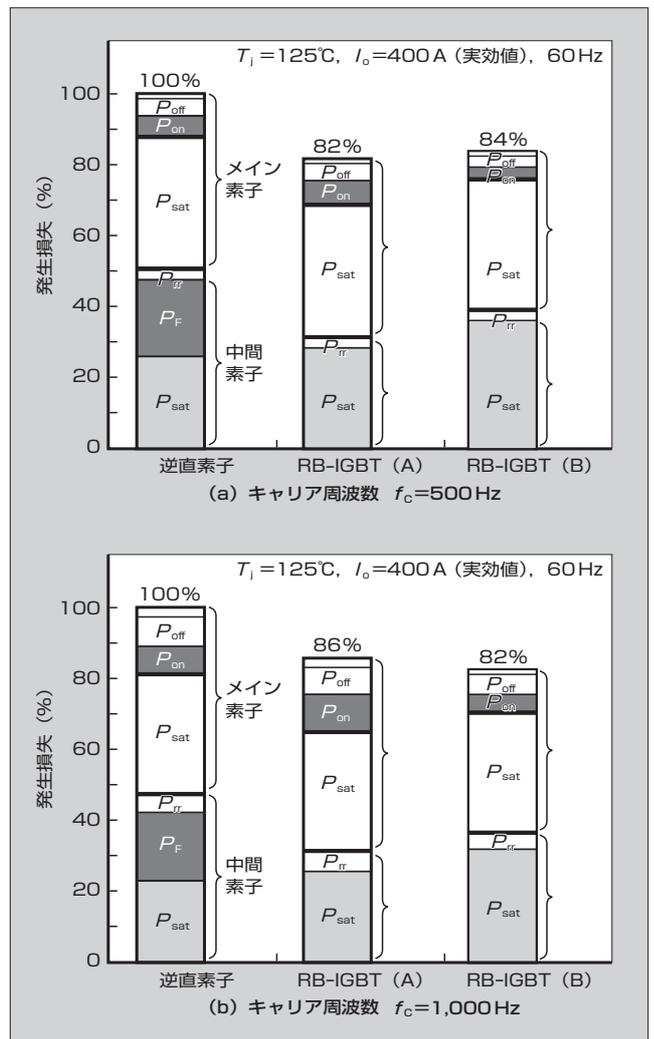


図13 RB-IGBT, 逆直素子を中間素子とする場合の 3 レベル A-NPC インバータの電力損失

電流を 400 A (実効値)、出力周波数を 60 Hz、力率を 0.8、変調比を 0.8 にした。RB-IGBT の逆回復損失  $P_{rr}$  は、メイン IGBT のターンオン損失  $P_{on}$  と一緒に最適化する必要がある。 $f_c$  が 1,000 Hz の場合、RB-IGBT の  $V_{on}$  を犠牲にして  $P_{rr}$  を低くすれば、メイン IGBT の  $P_{on}$  も低減できる。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

その結果、総電力損失を低減できる。 $f_c$ が500 Hzで、中間素子デバイスとして、RB-IGBT (A)とRB-IGBT (B)のモジュールを使用する場合、逆直素子に比べて、総電力損失はそれぞれ18%と16%削減できる。

## 5 あとがき

マルチレベルコンバータのアプリケーションにおける双方向スイッチとして使用される1,700 V RB-IGBTを、他社に先駆けて開発した。シリコンを貫通する分離層を形成するために、1,200 V RB-IGBTに応用した熱拡散とV溝のエッチングを組み合わせる分離層形成工程を高度化し、1,700 V RB-IGBTに対しても安定した分離層の形成を可能にした。開発した素子を用いて、十分な耐圧特性とスイッチング耐性を実証した。

50 A 定格プレーナゲートRB-IGBTのオン電圧は、同定格のU-IGBTとFWD逆直素子のオン電圧と比べ、同じターンオフスイッチング損失で、1.9 V低くなっている。ハイパワー、中電圧アプリケーション(高圧インバータ)の代表的なスイッチング周波数(～500 Hz)で、A-NPC 3レベル回路を用いて検討した結果、中間素子がRB-IGBTの場合、IGBTとFWDの逆直素子の場合に比べ、インバータのエネルギー損失は18%減少した。

今後は、開発した1,700 V RB-IGBTをマルチレベルインバータ向けに適用し、より高周波アプリケーションへ適用するために最適化していく所存である。

## 参考文献

- (1) Nabae, A. et al. "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans. on Industrial Applications. 1981, vol.1 A-17, no.5, p.518-523.
- (2) Lu, H. et al. "1700 V Reverse-Blocking IGBTs with V-Groove Isolation Layer for Multi-Level Power Converters", Proc. PCIM Europe 2012, p.815-821.
- (3) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using

Advanced Three-level Topology", Proc.PCIM Europe 2010, p.550-555.

- (4) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters", Proc. Int Pow. Ele. Conf. 2010, p.523-527.
- (5) Takei, M. et al. "The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter with Ultra Thin Wafer Technology", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2003, p.156-159.
- (6) Naito, T. et al. "1,200 V Reverse Blocking IGBT with Low Loss for Matrix Converter", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2004, p.125-128.
- (7) Nakazawa, H. et al. "Hybrid Isolation Process with Deep Diffusion and V-Groove for Reverse Blocking IGBTs", Proc. Int. Sym. on Power Semiconductor Dev. & IC's 2011, p.116-119.
- (8) Wu, B., "High-power converters and AC drives", IEEE Press 2006, ISBN-100-471-74171-4.



魯 鴻飛

パワー半導体デバイスの研究・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。工学博士。IEEE 会員。



荻野 正明

パワーデバイスのプロセス開発に従事。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。



中澤 治雄

マイクロマシンの研究、パワーデバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター次世代パワエレプロジェクト部。電気学会会員、応用物理学学会会員。



# All-SiC モジュール技術

All-SiC Module Technologies

梨子田 典弘 NASHIDA Norihiro

日向 裕一朗 HINATA Yuichiro

堀尾 真史 HORIO Masafumi

SiC（炭化けい素）デバイスなどの次世代パワー半導体には、高耐圧、低損失および高周波・高温動作可能という優れた特性がある。これらを最大限に発揮させるため、デバイスを銅ピンで接続し、エポキシ樹脂で封止する革新的なパワーモジュール構造を開発した。この構造により、温度サイクル耐量が向上し、銀焼結材料の適用により 200℃動作の高信頼性を確認した。また、新構造の特長を最大限に活用することで、モジュールの低インダクタンス設計が可能である。試作した All-SiC モジュールにより、太陽光発電用パワーコンディショナ的大幅な小型化・効率向上を実現した。

Next-generation power semiconductors such as silicon carbide (SiC) devices have the following superior features: high voltage tolerance, low loss and the capacity for high-frequency/high-temperature operation. In order to bring out the maximum potential of these features, we have developed a novel power module structure using copper pins to connect devices and using epoxy resin as a sealant. Through this structure, temperature cycle tolerance have been improved, and by using silver sintered materials, the high reliability of operation at 200°C was verified. Moreover, by fully utilizing the features of the new structure, it is possible to design low-inductance SIC modules. By using prototype all-SiC modules, we achieved significant size reduction and efficiency improvement of power conditioners for solar power generation.

## 1 まえがき

パワーモジュールは、効率的な電力変換を求められる分野で広く適用されている。例えば、近年注目を浴びている太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー分野、ハイブリッド自動車や電気自動車などの車載分野である。パワー半導体の主力である Si デバイスは、性能的に限界に近づきつつあり、SiC（炭化けい素）、GaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体の製品開発が精力的に行われている。この半導体デバイスは高耐圧、低損失および高周波・高温動作が可能という優れた特性を持っている。

本稿では、SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）や SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）などの SiC デバイスが持つ性能を最大限に発揮させる All-SiC モジュール技術について述べる。

## 2 All-SiC モジュール構造

図 1 に、パワーモジュールの従来構造と All-SiC モジュールの新構造を示す。従来構造では、パワーチップの配線はアルミニウムワイヤによって形成され、DCB（Direct Copper Bonding）基板と金属ベースがはんだで接合されている（図 1(a)）。

一方、図 1(b)に示す新構造では、パワーチップの配線を銅ピンで接続するワイヤボンディングレス構造を採用している。また、従来の DCB 基板に代わり、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ （窒化けい素）セラミック基板に厚銅板を貼り合わせた放熱基板を用いることで、金属ベースレス構造でも低熱抵抗<sup>(1)</sup>が可能になる。これにより、パワーチップに大電流を供給してもチップ温度の上昇を抑えられるため、SiC デバイスの高密度実

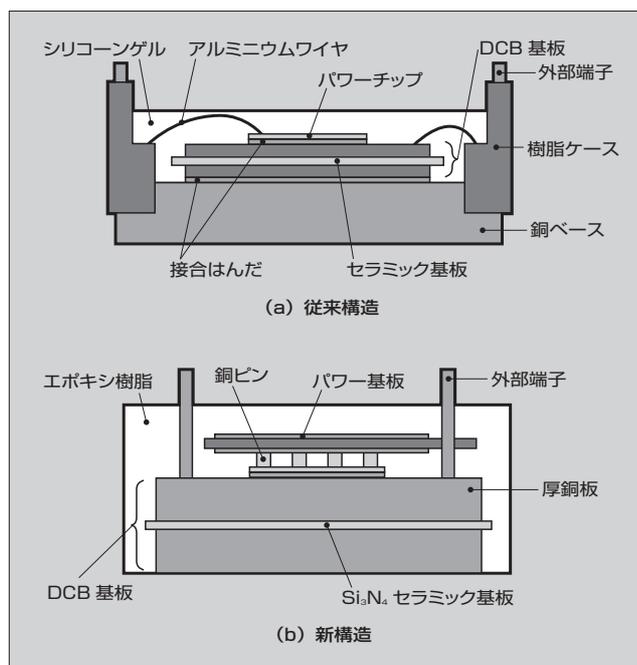


図 1 All-SiC モジュール実現のための新構造

装が可能となり、モジュールの小型化が実現できる。さらに、封止材料としてエポキシ樹脂を用いることで、従来のシリコンゲルと比較してパワーチップ接合部のひずみと応力が緩和され、信頼性が向上した。

## 3 All-SiC モジュール実現のための要素技術

開発における課題は、SiC デバイスの高温動作時における信頼性の確保と高速スイッチングの実現である。新構造において、モジュールの高温動作信頼性の一つであるパワーサイクル耐量は、チップ上下の接合材料の寿命が支配

的であると考えられる。そのため、高温信頼性を向上するためには、モジュールを構成する接合材料の高耐熱化が必須である。同時にデバイスとその接合部を保護する封止材料の高耐熱化も必要不可欠である。

また、SiC デバイスの高速スイッチングに対応するには、サージ電圧抑制のためにモジュール内部インダクタンスの低減が必要である。新構造では、ワイヤボンディングレス構造であるため、低インダクタンス化が実現できる。

### 3.1 高耐熱封止材料による信頼性向上

新構造では封止材料として、エポキシ樹脂を採用したため、モジュールの高温動作の実現にはエポキシ樹脂の高耐熱化が必要不可欠である。そこで、エポキシ樹脂のガラス転移温度  $T_g$  に着目して樹脂開発を行った。図 2 に、エポキシ樹脂を熱機械分析 (TMA: Thermal Mechanical Analysis) で測定した結果の模式図を示す。温度変化に対する試料長さの変化量を測定することで、線膨張係数 (CTE: Coefficient of Thermal Expansion) が求められる。 $T_g$  は耐熱性の指標の一つであり、 $T_g$  以上の温度領域  $\alpha 2$  ではエポキシ樹脂の CTE が急激に大きくなる。そのため、200℃動作で高信頼性を得るためには、 $T_g$  が 200℃以上の樹脂が必要である。ここで、モジュールに最適な樹脂物性を検証するため、樹脂の CTE に着目して応力解析を行った。図 3 (a) に示す三次元 1/4 モデルで、チップの上部と下部のはんだ接合部における相当ひずみおよび  $\text{Si}_3\text{N}_4$  セラミック基板における最大主応力を解析した。-40℃ ~ +200℃ の温度サイクル条件において、エポキシ樹脂の CTE を  $10 \sim 25 \times 10^{-6}/\text{K}$  で変化させたときのひずみと応力の最大値を図 3 (b) に示す。なお、縦軸の値はエポキシ樹脂の CTE が  $25 \times 10^{-6}/\text{K}$  のときのひずみおよび応力を 100 とした結果である。

はんだ寿命は新構造における温度サイクル耐量に影響を与えるもっとも大きな因子の一つである。一般的に、はんだ寿命は、はんだに発生する相当ひずみ範囲に反比例する。そのため、図 3 (b) に示すように高温の温度サイクル耐量を向上させるためには、エポキシ樹脂の CTE を小さくする必要がある。

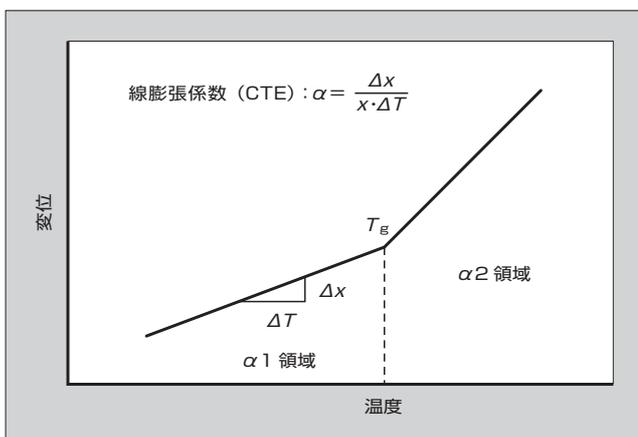


図 2 ガラス転移温度と線膨張係数 (TMA 法)

ここで、CTE を減少させる方法として、エポキシ樹脂に充填されるシリカなどのフィラー量を調整する手段がある。一般的に、フィラー増量は樹脂の弾性率、粘度増加などの問題が生じるため、CTE だけでなくトータルマッチングが必要となる。そこで新構造では、フィラー量を最適化して CTE を減少させるとともに、充填性を考慮した粘度を持つエポキシ樹脂を開発し適用した。さらに、この開発樹脂の硬化条件を最適化して、 $T_g$  が 200℃以上になることを確認した。これにより、高温時の温度サイクル耐量の向上と、ディスクリート製品と同様のトランスファーモールド成形の両立が可能となった。

高温信頼性を検証するため、開発したエポキシ樹脂封止構造の温度サイクル試験を実施した。従来のパワーモジュールの温度サイクル試験において、高温側の温度条件は、動作温度に対して 25℃低い条件で設定されているのが一般的である。そこで新構造においても同様に、まず従来の Si パワーモジュールより高温側を 50℃高い条件にした -40 ~ +175℃ で試験を実施した。

図 4 に、温度サイクル試験による熱抵抗変化の結果を示す。接合材劣化による熱抵抗増加を観測するため、500 サイクルまで初期からの熱抵抗変化率を測定した。その結果、熱抵抗の大きな上昇は認められなかった。

図 5 に、チップ銅板間のはんだ接合部の超音波探傷像を示す。新構造では初期像との比較から、500 サイクル経過しても接合部クラックが発生していないことが確認された (図 5 (a))。なお、図 5 (b) は別構造における熱抵抗不良の一例であるが、試験経過による接合部のひずみにより、チップ外周の接合部クラックが進展している状態である。これらの結果から、従来の試験条件より厳しい -40 ~ +175℃

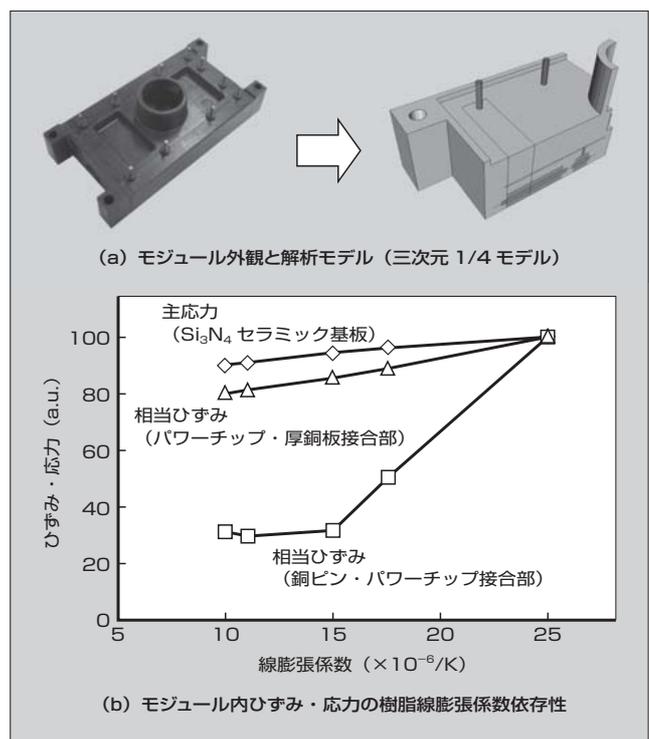


図 3 モジュール内部構造解析 (ひずみ・応力)

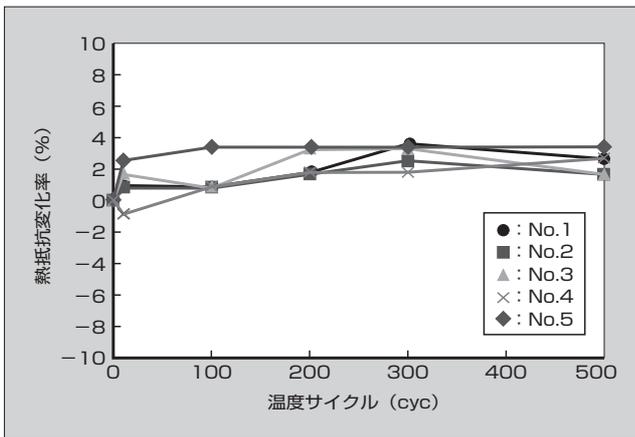


図4 温度サイクル試験結果

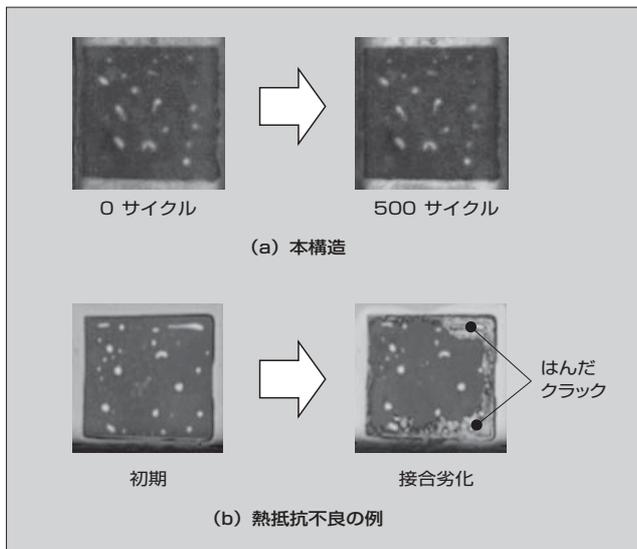


図5 温度サイクル試験における接合部劣化

の温度条件でも、開発したエポキシ樹脂封止構造では、接合材の劣化を抑制し、十分な温度サイクル耐量を確保していると考えられる。なお、高温側 200℃ 上限の温度サイクル試験については、検証を進めているところである。

### 3.2 高耐熱接合材料による 200℃ 動作信頼性

従来構造のパワーモジュールに使用されている接合材の主流は、融点が 250℃ 以下の鉛フリーのすず-銀系はんだである。しかしながら、SiC デバイスの優れた特徴を引き出すには、将来的に動作温度を 300℃ もしくはそれ以上にする必要があり、従来のはんだ材料では対応が困難である。そこで、銅ピン配線構造を採用し、より高い動作温度を実現するため銀焼結技術を適用した。銀焼結材料の大きな利点は 300℃ 程度と比較的低温で接合でき、焼結後は銀バルクと同じ融点を持つことである。図 6 に銀焼結材料を用い、銅ピンとパワーチップを接合した断面を示す。

これまで、はんだを用いた新構造においては、 $\Delta T_j = 150^\circ\text{C}$  までのパワーサイクル耐量について検証されている<sup>(2)</sup>。今回、銀焼結によるパワーサイクル耐量を評価するため、これまでより過酷な条件である 200℃ 動作試験 ( $\Delta T_j =$



図6 銀焼結技術を適用したパワーチップ接合部断面

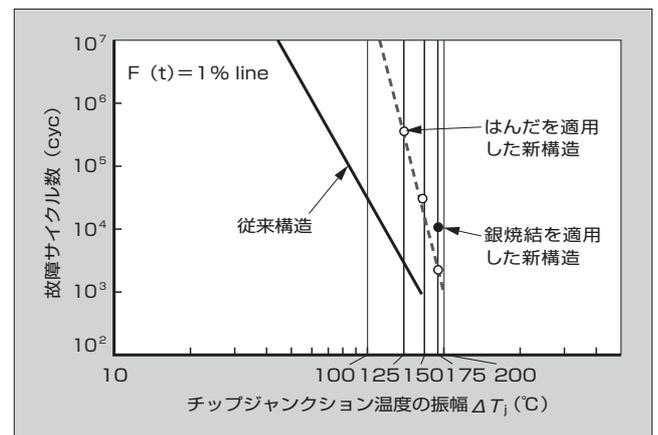


図7 200℃動作試験におけるパワーサイクル耐量

175℃) を実施した。

図 7 に示す試験結果において、実線は従来構造を、破線は、はんだを適用した新構造のパワーサイクル耐量を示している。モジュール構造が異なるため、故障メカニズムも異なり、これらの 2 直線は傾きが異なっている。 $\Delta T_j = 175^\circ\text{C}$  における新構造のパワーサイクル耐量は、従来構造より大幅に向上すると考えられる。一方、低い温度振幅条件ではパワーサイクル耐量がさらに大きく向上し、 $\Delta T_j = 125^\circ\text{C}$  では約 100 倍以上の耐量向上が見込める。ここで、銀焼結技術を新構造に適用した場合、 $\Delta T_j = 175^\circ\text{C}$  においてプロット (図中●) のパワーサイクル耐量となり、従来構造と比較して 10 倍以上の耐量向上が実現する。したがって、封止材料などの周辺材料の高耐熱化が実現されれば、銀焼結技術の適用によりパワーモジュールの 200℃ 以上高温動作においても、高い信頼性が期待できる。

### 3.3 低インダクタンス設計

SiC デバイスの特徴の一つである低スイッチング損失特性は、高周波で動作させることでその特性を最大限発揮することができる。その際、デバイスの耐圧以下にサージ電圧を抑制するために、スイッチング周波数が高くなる場合には、パワーモジュールの内部インダクタンスを小さくする必要がある。そこで、新構造では電流経路を短くし、モジュールを構成する基板を並行に配置した構造とすることで、内部インダクタンスが最小となる設計にした。図 8 に、定格 1,200 V、100 A の 2 in 1 モジュールにおける従来構造と新構造のフットプリントサイズを比較した結果を示す。

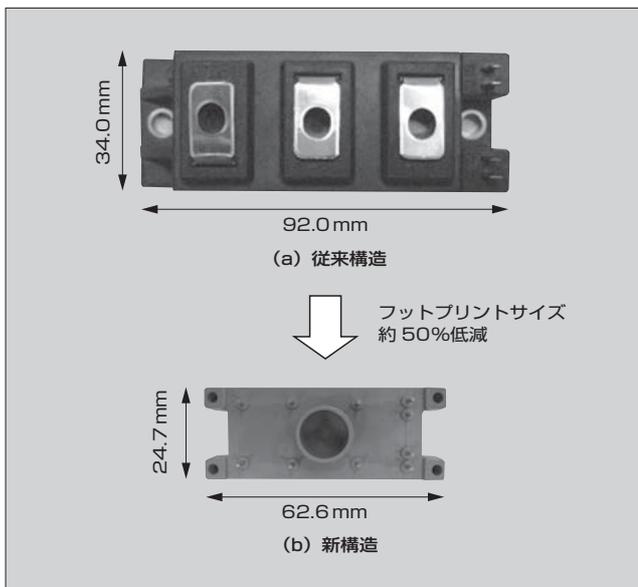


図8 2 in 1 モジュールのフットプリントサイズ

新構造は、従来構造と比べて約 50% のサイズとなり、電流経路の短縮が実現している。また、新構造では、パワー基板および厚銅板によりパワーチップの上面、下面に対向するように電流経路が形成されており、磁界の相互作用により内部インダクタンスの低下が実現する。内部インダク

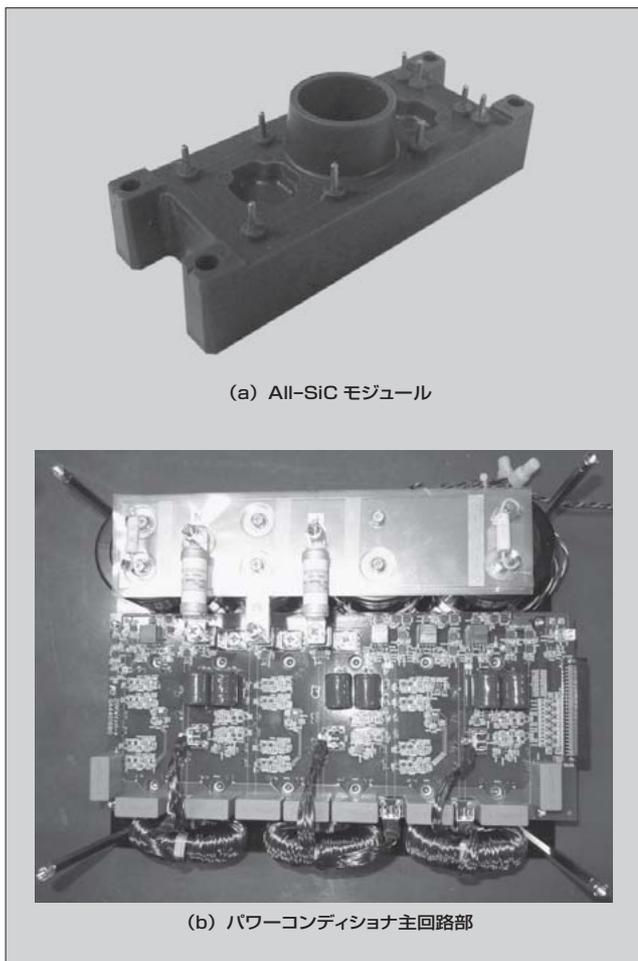


図9 太陽光発電用パワーコンディショナへの適用

タンスを解析した結果、従来構造は約 50 nH であるのに対し、新構造では約 12 nH となり、1/4 以下までインダクタンスを低減できた。

#### ④ All-SiC モジュールのアプリケーションへの適用

これまでに述べた All-SiC モジュール技術を適用し、SiC-MOSFET と SiC-SBD<sup>(4)</sup> を用いた All-SiC モジュール（定格 1,200 V, 100 A の 2 in 1 モジュール）の試作を行った（図 9 (a)）。なお、SiC-MOSFET には産業技術総合研究所と共同開発している IEMOS（Implantation and Epitaxial MOSFET）<sup>(3)</sup> を使用した。

この All-SiC モジュールのインバータ搭載による実機評価のため、三相 3 レベル回路を適用した太陽光発電用パワーコンディショナ（出力 20 kW）を試作した<sup>(5)</sup>。図 9 (b) に主回路部の外観を示す。All-SiC モジュールが 9 台組み込まれている。装置全体で従来機比 1/4 の小型化を実現するとともに、主回路部の効率は 99% まで向上することを確認した。

開発した All-SiC モジュールにより、アプリケーションを小型化でき、さらに高効率化することができる。

#### ⑤ あとがき

SiC デバイスの搭載に必要な高温動作、高信頼性、低インダクタンスを実現する All-SiC モジュール技術を構築した。この技術を適用し、SiC-MOSFET と SiC-SBD を搭載した試作モジュールで、太陽光発電用パワーコンディショナの小型化・高効率化を検証した。今後も、他のアプリケーションへの適用評価を進め、SiC デバイスの性能を最大限に生かすことでパワーエレクトロニクス分野の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 堀尾真史ほか. SiC パワーモジュールのパッケージ技術. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.336-339.
- (2) 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.
- (3) Harada, S. et al., "High performance SiC-IEMOSFET/SBD module", Proceedings of ICSCRM 2011, p.52-57.
- (4) Tsuji, T. et al., "Experimental demonstration of 1,200 V SiC-SBDs with lower forward voltage drop at high temperature", Proceedings of ICSCRM 2011, p.205-208.
- (5) Matsumoto, Y. et al., "Characteristics of the power electronics equipments applying the SiC power device", Proceedings of ICPERE 2012.



### 梨子田 典弘

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社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。エレクトロニクス実装学会会員。



### 堀尾 真史

パワー半導体パッケージング構造の研究開発に従事。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。電気学会会員。



### 日向 裕一郎

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社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。



# IGBT モジュールの高信頼性実装技術

High Reliability Packaging Technologies of IGBT Modules

百瀬 文彦 MOMOSE Fumihiko

西村 芳孝 NISHIMURA Yoshitaka

望月 英司 MOCHIZUKI Eiji

再生可能エネルギーの利用拡大に伴い、IGBT モジュール製品の用途が多様化し、さらなる信頼性の向上が求められている。製品の品質と信頼性を確保するためには、故障・劣化モードを特定し、破壊メカニズムに基づいた信頼性設計が必要である。富士電機では、高信頼性を実現するため、実機を模擬した熱疲労寿命、電界シミュレーションによる絶縁寿命および極低温動作保証の設計を行っている。また、製品の長寿命化を実現するため、実装技術として Sn-Sb はんだ接合と超音波端子接合を開発した。さらに、実装状態で良好な放熱性を確保するため、熱伝導グリスについて調査した。

With the expansion in use of renewable energy, the uses of insulated gate bipolar transistor (IGBT) module products have diversified and there is a demand for higher reliability. Ensuring the quality and reliability of products requires specification of failure/degradation modes and reliability design based on failure mechanisms. To achieve high reliability, Fuji Electric is creating designs for thermal fatigue lifetime based on simulation of actual device, insulation lifetime through electric field simulation, and ultra-low temperature operation assurance. In addition, to achieve longer product life, we have developed ultrasonic welding of terminal and Sn-Sb soldering as packaging technologies. Furthermore, to ensure good heat dissipation under the conditions of use, we have investigated thermal grease.

## 1 まえがき

近年、地球温暖化の防止に向けて、化石燃料の使用による CO<sub>2</sub> の排出を削減するため、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの利用拡大、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の普及促進が図られている。さらに、従来の電力システムは、大規模集中電源に大きく依存しているため、再生可能エネルギーをはじめとした多様な供給力の最大活用によるリスク分散と効率性を確保する分散型の次世代システムが検討されている<sup>(1)</sup>。

そのため、電力変換やモータ制御において IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール製品の使用と、その用途は従来に増して広がっている。

本稿では、市場要求に応える IGBT モジュールの高信頼性実装技術とそれを支える設計技術について述べる。

## 2 IGBT モジュールへの高信頼性要求

再生可能エネルギー分野では、砂漠のメガソーラーや洋上の風力発電など、メンテナンス時のアクセスが容易でないことが多いため、製品のメンテナンスフリー化が求められている。このような場合、要求される製品寿命は 30 年ほどあり、一般の産業製品に比べて長い。したがって、パワーサイクル耐量、温度サイクル耐量などの高い信頼性が要求される<sup>(2)</sup>。

車載向け電子部品は、炎天下から寒冷地に至るまでさまざまな環境下で安全性を確保する必要がある。自動車特有の信頼性のため、動作環境に対する耐久性は他の民生用途に対し 2～3 倍以上と高い<sup>(3)</sup>。さらに、HEV や EV では、燃費改善の視点から小型・軽量化が求められ、IGBT モジュールの高密度実装化 (高電流密度化) 要求を満足し

なければならない。

鉄道車両分野では、電力変換装置に大容量のパワー半導体素子が用いられている。使用電圧が高いため、高絶縁の材料・設計技術と高耐圧信頼性の確保が重要である。また、シベリアなどの極寒地での耐久性も要求されている。

## 3 高信頼性設計技術

### 3.1 熱疲労寿命設計

IGBT モジュールの典型的な故障に、熱疲労によるものがある。モジュール構造部材の温度変化が繰り返すことにより、線膨張係数の違いから各部材間の接合部に繰返し応力が加わることで発生する。主な故障箇所を図 1 に示す。<sup>(4)</sup>

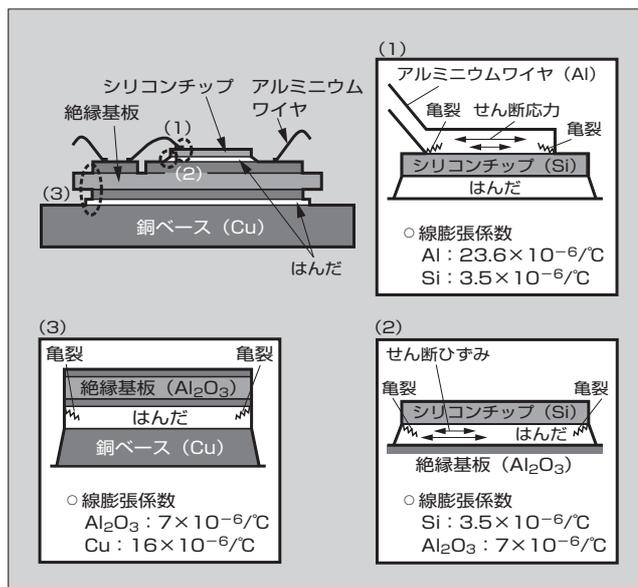


図 1 IGBT モジュールの故障箇所

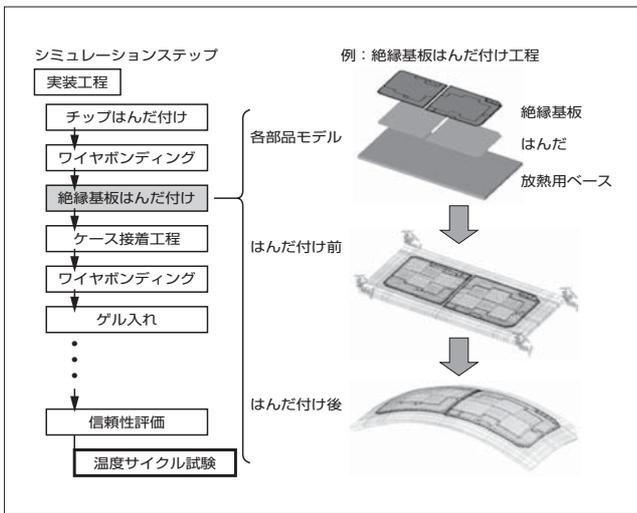


図2 実装工程を反映したシミュレーション

接合箇所の金属材料への繰返し応力による破壊であることから、一般に疲労寿命には塑性ひずみが大きく影響し、次式に示す Coffin-Manson 式で表される。

$$N_f = \alpha \Delta \epsilon^{-n} \dots \dots \dots (1)$$

$N_f$  : 破断までの繰返し数  
 $\epsilon$  : 塑性ひずみ範囲  
 $\alpha, n$  : 材料によって決まる定数

富士電機では、疲労寿命の予測精度を向上させるため、IGBT モジュールに用いる各材料の金属組織の変化までを考慮した、材料の疲労特性を取得している<sup>(5)</sup>。

また、IGBT モジュールの接合箇所には、実装工程における残留応力や累積ひずみが存在する。そこで実装工程を反映したシミュレーション (図2) を実施し、IGBT モジュールに発生する塑性ひずみなどを整合させることで、設計段階から高精度な製品寿命の予測を可能にした。

### 3.2 絶縁設計

IGBT モジュールにおける絶縁設計においては、製品定格に応じた絶縁破壊耐圧および長期信頼性を確保するため、部分放電開始電圧を考慮する必要がある。部分放電開始電圧が低いと、動作時の印加電圧により放電が発生し、シリコンゲル部が絶縁劣化して破壊に至る。

図3に IGBT モジュールにおける絶縁破壊の例を、図4に銅回路端部における電界強度解析の結果を示す。

絶縁破壊は銅回路の端部から発生し、セラミックスとシリコンゲル界面が破壊経路になっている。電界強度は銅回路の端部近傍で最大になっており、絶縁破壊の起点となっていることが分かる。したがって、絶縁設計では、この最大電界強度をいかに小さくするかが重要である。

富士電機では、シミュレーションを活用した絶縁設計により、製品定格に応じた破壊耐圧および長期信頼性確保の観点から、部分放電開始電圧を考慮した最適設計を行っている。

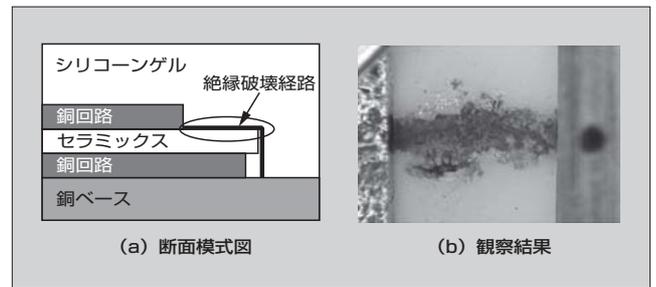


図3 IGBT モジュールにおける絶縁破壊

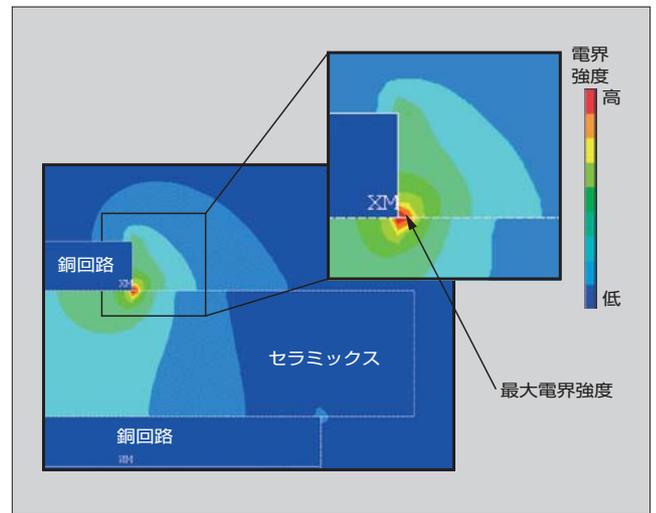


図4 銅回路端部における電界強度解析の結果

### 3.3 極低温動作技術

一般の IGBT モジュールにおける最低動作保証温度は  $-40^{\circ}\text{C}$  であるが、シベリアなどの極寒地で IGBT モジュールを使用したいという要求に応えるため、極低温 ( $-55^{\circ}\text{C}$ ) での IGBT モジュールの破壊モードについて調査した。

IGBT モジュールの動作時の信頼性寿命を示すパワーサイクル試験を、周囲温度  $-55^{\circ}\text{C}$ 、IGBT チップ温度  $\Delta T_j = 80^{\circ}\text{C}$  ( $T_j = -55 \sim +25^{\circ}\text{C}$ ) で実施した。通常、パワーサイクル試験では、チップ下のはんだ、もしくはアルミニウムワイヤ部で破壊する<sup>(6)</sup>。しかし、周囲温度  $-55^{\circ}\text{C}$  でのパワーサイクル試験では、通常温度と比較して少ないサイクル数で絶縁破壊が生じた。図5に、 $\Delta T_j$  パワーサイクル試験を 5,000 サイクル行った後の IGBT モジュールの状態を示す。シリコンゲルにはクラックが発生し、クラック部と絶縁破壊位置が整合した。

周囲温度の変化に対する耐量を示す温度サイクル試験 (試験温度  $-55 \sim +150^{\circ}\text{C}$ ) でも、破壊モードは  $\Delta T_j$  パワーサイクル試験と同様に、シリコンゲルのクラック部の絶縁破壊であった。極低温 ( $-55^{\circ}\text{C}$ ) での破壊モードがシリコンゲルのクラックによるものであることから、ゲルの脆化 (ぜいか) を抑制する特殊な分子構造に変更することで、 $-55^{\circ}\text{C}$  で使用可能なシリコンゲルを開発した。

図6に、周囲温度  $-55^{\circ}\text{C}$  で 75 時間放置したシリコンゲルの状態を観察した結果を示す。通常のシリコンゲル

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

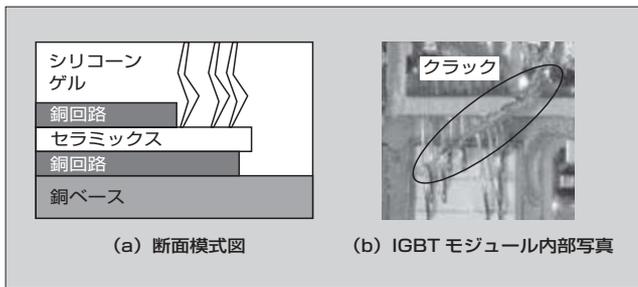


図5 周囲温度 $-55^{\circ}\text{C}$ における $\Delta T_j$ パワーサイクル試験 5,000 サイクル後の状態

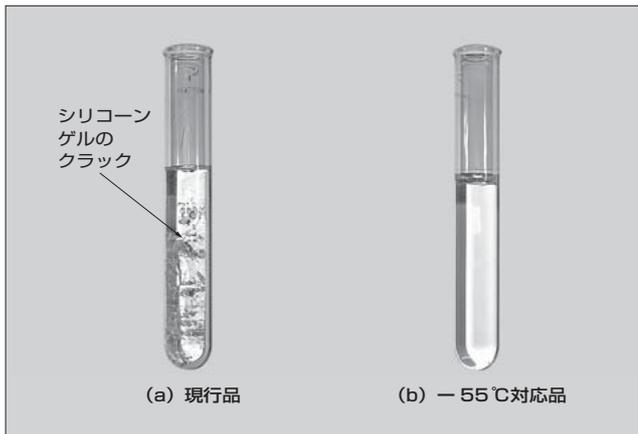


図6 周囲温度 $-55^{\circ}\text{C}$ における放置試験の結果

ではクラックが発生したが、 $-55^{\circ}\text{C}$ 対応シリコンゲルでは、極低温でも弾性が保持されるためクラックが発生しない。このシリコンゲルを用いることにより、 $\Delta T_j$ パワーサイクル、温度サイクル試験でシリコンゲルのクラックによる絶縁破壊は発生せず、従来と同等の信頼性寿命を確保することができる。

#### 4 高信頼性実装技術

##### 4.1 はんだ接合

IGBT モジュールの組立において、はんだは主にチップと絶縁基板、絶縁基板と銅ベース、および端子と絶縁基板の接合に用いられる。IGBT モジュールは使用時の環境やチップ発熱によって繰り返し温度変化を受け、はんだ接合部には熱膨張係数差による応力が生じる。これにより、はんだ層の応力集中部にクラックが発生・進展する場合があるため、はんだの信頼性を確保することが重要となる。

図7に、従来の代表的な鉛フリーはんだであるSn-Ag はんだとSn-Sb はんだの高温時効後の引張強度を示す。どちらも初期強度は変わらないが、 $150^{\circ}\text{C}$ および $175^{\circ}\text{C}$ での1,000h保持後ではSn-Ag はんだの強度が大きく減少するのに対し、Sn-Sb はんだでは初期の強度を維持している。

図8に、IGBT モジュールの基板下に適用したSn-Ag はんだおよびSn-Sb はんだの温度サイクル( $-40 \sim +150^{\circ}\text{C}$ )試験前後の超音波探傷像を示す。300サイクル後では従来のSn-Ag はんだにクラックが発生しているのに

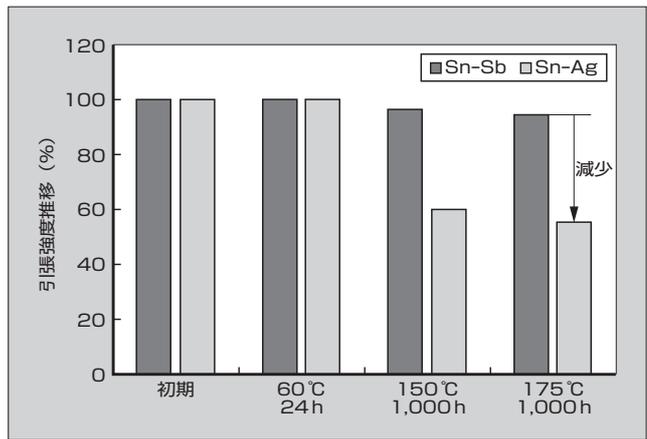


図7 Sn-Sb はんだおよびSn-Ag はんだの高温時効後の引張強度

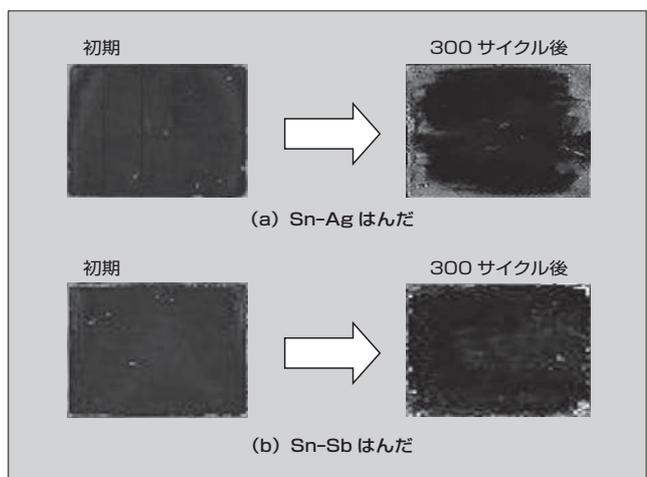


図8 温度サイクル後の基板下はんだクラック進展(超音波探傷像)

対して、Sn-Sb はんだではクラックの進展はほとんど見られない。Sn-Sb はんだは耐熱性が高く、温度サイクルでの疲労特性も優れ、絶縁基板と銅ベースの間に適用することにより高信頼性を実現している。

##### 4.2 超音波接合

IGBT モジュールの端子と内部絶縁基板の接合には、以前からはんだを用いている。製品の大電流化に伴う大型化およびIGBT モジュールへ接続されるブスバーの大型化のため、IGBT モジュールの端子部への応力の増大によるはんだ接合部での破壊が懸念される。そこで、端子と内部回路基板の接合に超音波接合を適用している<sup>(8),(9)</sup>。図9に、超音波接合部の外観および断面写真を示す。超音波接合を用いて、端子と基板の銅回路が固相拡散により直接接合しているため、強固で線膨張係数差のない接合部が得られる。図10に、製品における温度サイクル後の端子の最大引張荷重を示す。Sn-Ag はんだ接合による端子接合部は300サイクルにおいて強度が50%まで低下しているが、超音波接合を用いた端子は1,000サイクルまで強度の低下は確認されていない。超音波接合では、端子と基板の接合強度が

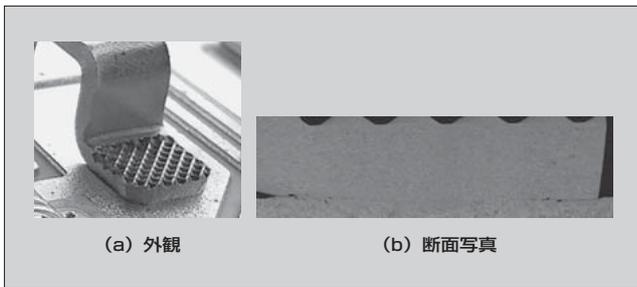


図9 超音波接合部

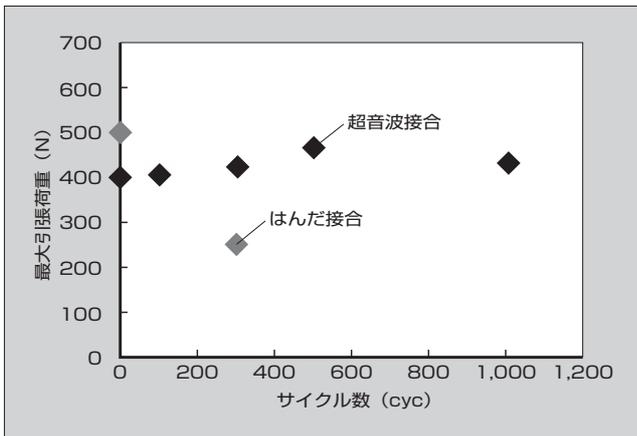


図10 温度サイクル後の端子の最大引張荷重

高いだけでなく、端子と基板が同じ銅系の材料なので線膨張率の差による応力が発生しない。このため、非常に高い信頼性を得ることができた。

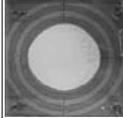
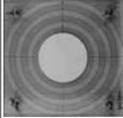
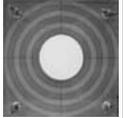
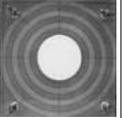
### 5 信頼性向上アプリケーション技術

IGBT モジュールは、良好な放熱性を得るために熱伝導グリースを介して冷却フィンに搭載される。グリースの不足や枯渇は放熱性を低下させるため、IGBT チップ温度が過度に上昇し熱破壊に至る。

表1に、熱伝導グリースの特性を示す。粘度が低いグリースは広がりがやすく、より薄く塗布することが可能である。IGBT モジュールと冷却フィンのシステム設計では、熱抵抗を小さくする必要があるので、寿命の観点も含めてグリースの厚さを最適にすることは機器として非常に重要である。

IGBT モジュールと冷却フィン、常に水平に搭載されているとは限らない。例えば、キャビネットではIGBT モジュールは垂直に搭載されているため、動作中のグリースの流出も合わせて考慮する必要がある。そこで実際にグリースの流出について調査を行った。具体的には、まず冷却フィンを模擬したアルミニウムプレートに粘度の異なるグリース(表1)を塗布し、温度サイクル(-40~+125℃)試験を実施した。実動作でのグリースの挙動を模擬するために試験サンプルは垂直に設置し、グリースの流出を観察した。図11に観察結果を示す。サンプルA、B

表1 熱伝導グリースの特性

	サンプルA	サンプルB	サンプルC	サンプルD
粘度 (Pa・s)	38	54	195	110
広がり性	 12cm	 8cm	 7.5cm	 7.5cm
最薄膜(BLT) (μm)	5	19	11	8
熱伝導率 [W/(m・K)]	0.76	0.66	0.58	2
ベースオイル	シリコーン	非シリコーン	非シリコーン	非シリコーン

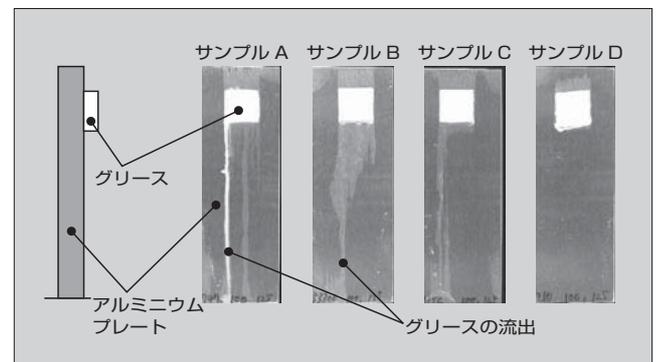


図11 温度サイクル試験後のグリースの観察結果

ではグリースの流出が顕著にみられるのに対し、サンプルDではグリースは形状を保持している。これらの結果から、グリース流出は粘度に依存していると考えられ、粘着性が高いグリースは温度サイクルにおいて安定した形状保持性を持っていることが分かる。

次に、IGBT モジュールに実際にグリースを塗布して、グリースの特性とIGBT モジュールの信頼性との関係を調査した。IGBT モジュールは、銅ベースレス構造で冷却フィンに垂直に搭載し、温度サイクル(-40~+125℃)試験を実施した。初期と試験後の熱抵抗の変化を測定することで、グリースの安定性を確認した。図12に、温度サイクル後の熱抵抗変化を示す。低粘度のサンプルAの熱抵抗上昇率は25%であり、高粘度のサンプルC、Dではそれぞれ10%、9%であった。サンプルBは図11の結果から実施しなかった。

これらの結果から、低粘度のグリースは薄く塗布でき、初期熱抵抗を下げるのが可能だが、動作中に流出の影響で熱抵抗が上昇し、高粘度のグリースに比べて短寿命化するリスクがあると考えられる。また、グリースの塗布厚みは、粘度だけでなく塗布方法にも影響する。このため、熱伝導グリースの選定は、実際のIGBTアプリケーションとその動作および塗布方法に基づいて行うことが重要である。

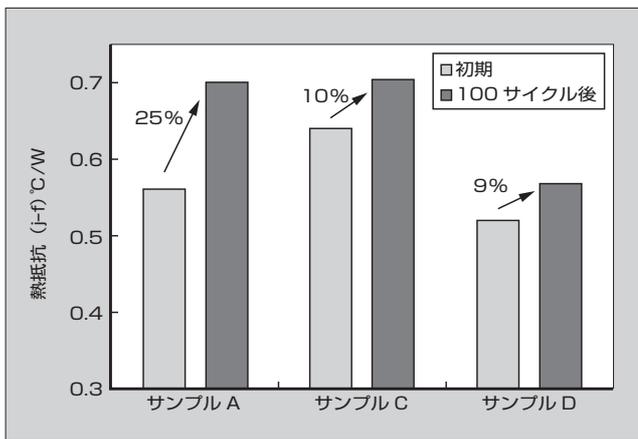


図 12 温度サイクル試験後の熱抵抗変化

## 6 あとがき

本稿では、IGBT モジュールにおける高信頼性実装技術について述べた。これらの技術を基に、高信頼性の要求を満足する IGBT モジュールの開発を行い、装置の高効率化、省エネルギー化に貢献していく所存である。

### 参考文献

- (1) 資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会基本問題委員会. 新しい「エネルギー基本計画」策定に向けた論点整理. 2011.
- (2) エネルギーエレクトロニクス実装における信頼性の課題. 信頼性解析技術委員会. エレクトロニクス実装学会誌. 2010, vol.13, no.1, p.17-19.
- (3) 山口浩二ほか. 車載用半導体製品の品質・信頼性の作り込み. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.127-131.
- (4) 両角朗ほか. パワー半導体モジュールにおける信頼性設計技術. 富士時報. 2001, vol.74, no.2, p.145-148.
- (5) 塩川国男ほか. 製品の品質・信頼性を支える評価技術. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.157-162.
- (6) Morozumi, A. et al. IEEE Trans on Industry Applications. 39, 2003, p.665-671.
- (7) 福田恭平ほか. “IGBTモジュールのリードフレーム配線構造における鉛フリー接合信頼性に関する研究”. 平成20年溶接学会秋季全国大会予稿集, no.83, p.420-421.
- (8) 木戸和優ほか. “IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第一報)”. Mate2010予稿集, p.335-338.
- (9) 木戸和優ほか. “IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第二報)”. Mate2011予稿集, p.197-200.
- (10) 西村芳孝ほか. IGBTモジュールのサーマルマネジメント技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.423-427.
- (11) Momose, F. et al. “Thermal management of IGBT modules systems”. PCIM Asia 2012.



### 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。日本機械学会会員。



### 西村 芳孝

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チームリーダー。工学博士。日本材料学会会員、エレクトロニクス実装学会会員。



### 望月 英司

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社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マネージャー。エレクトロニクス実装学会会員、IMAPS 会員。



# IGBT モジュール開発におけるデバイス・回路・熱の連携シミュレーション技術

Integrated Simulation Technology Combining Device, Circuit and Thermal Behavior in IGBT Module Development

山田 昭治 YAMADA Shoji

池田 晴信 IKEDA Harunobu

仲村 秀世 NAKAMURA Hideyo

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの設計において、小型化、高効率化、低ノイズ化などの要求を満足するため、シミュレーションによる事前解析の重要性が増している。富士電機では、従来、IGBT モジュールの構成要素ごとに行っていたデバイスや熱のシミュレーションを、回路シミュレーションをベースにして連携させ、モジュール全体の解析ができる連携シミュレーションを構築した。これにより、従来に比べて、熱特性で約 10% から約 5% に、電気特性で約 40% から約 10% に誤差が低減した精度の高いシミュレーションを実現している。

To meet the various demands for insulated gate bipolar transistor (IGBT) module design such as miniaturization, high efficiency, and low noise, the importance of preanalysis through simulation has increased. Heretofore, Fuji Electric has performed device and thermal simulations separately for each component of IGBT module; now we have linked these simulations with a circuit simulation as a base, and established an integrated simulation that enables analysis of the IGBT module as a whole. Through this we have improved the accuracy of simulations from approximately 40% to 10% for electrical properties and from approximately 10% to 5% for thermal properties, as compared to previous simulations.

## 1 まえがき

近年、地球温暖化は大きな社会問題となっており、それを防止するために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や、エネルギーを効率的に利用するパワーエレクトロニクス技術のいっそうの普及が、世の中で広く期待されている。これらの普及には、キーデバイスであるパワー半導体製品の果たす役割が非常に大きい。

富士電機では、この期待に応えるため、産業、自動車、情報電源を中心としたエネルギー分野に、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールなどの各種パワー半導体製品をラインアップしている。IGBT モジュールでは、小型化、高効率化、低ノイズ化などの要求が高まっている。これらの要求を総合的に満足する最適設計や、製品開発期間の短縮が求められる中、シミュレーションによる製品の事前解析が重要性を増している。

## 2 IGBT モジュールの開発におけるシミュレーション

IGBT モジュールは、IGBT や FWD (Free Wheeling Diode) といった半導体チップおよび半導体チップを実装するパッケージで構成されている。図 1 に、この IGBT モジュールの開発で使用するシミュレーションを示す。

### 2.1 従来のシミュレーション

IGBT や FWD チップの開発ではプロセスやデバイスのシミュレーションを行い、パッケージの開発では熱や応力のシミュレーションを行うというように、従来は対象を IGBT モジュールの各構成要素に限定してシミュレーションを行っていた (図 1 (a))。

また、シミュレーション間の連携もチップの開発においてはプロセスとデバイスのシミュレーションの連携、パッケージの開発においては熱と応力のシミュレーションの連携<sup>(1)</sup>というように、IGBT モジュールの各構成要素の中だけに限定されていた。

### 2.2 連携シミュレーション

小型化、高効率化といった IGBT モジュールに要求さ

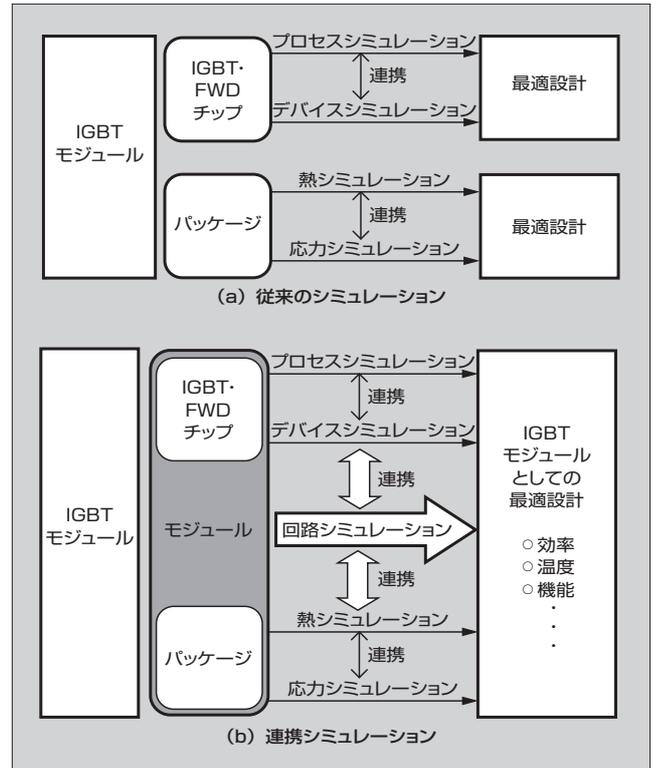


図 1 IGBT モジュール開発におけるシミュレーション

れる特性の向上には、IGBT や FWD チップの特性とパッケージの特性が相互に密接に影響する。そのため、各要素を最適設計したにもかかわらず、IGBT モジュールを評価したときに要求項目を満足できないこともある。

そこで、各要素のシミュレーションを連携し、IGBT モジュール全体の要求特性を事前に解析することが必要になってくる。富士電機ではこの課題を解決するために IGBT モジュール全体の特性を解析できる連携シミュレーションの構築に取り組んできた。

図 1 (b) に、構築した連携シミュレーションを示す。IGBT モジュールの電気特性を解析する回路シミュレーションをベースに、各要素の解析に用いるシミュレーションを連携して、IGBT モジュール全体の解析を行う連携シミュレーションを構築した。

本稿ではその一例として、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションとの間、および回路シミュレーションと熱シミュレーションとの間の連携について述べる。

### ③ デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの連携

#### 3.1 概要

デバイスシミュレーションでは、半導体デバイスのプロセスフローに基づきデバイスの構造モデルを構築し、デバイスの電気特性を解析する。また、回路シミュレーションでは、これらの半導体デバイスの回路シミュレーション用モデルを用いて IGBT モジュールの電気特性を解析する。

この回路シミュレーション用 IGBT モデルには、一般的に回路シミュレータの標準 IGBT モデルや等価回路モデルが使用されている。これらのモデルのパラメータ値は、特性を決定するデバイス構造やデバイス内部の電子およびホールの挙動とは無関係に、デバイスごとに波形フィッティングから決定していたため精度の向上が難しかった。

一方、デバイス構造を基にしたモデルとして、Hefner モデルや Kraus モデルが提案されているが、これらのモデルは過去の IGBT 構造を対象としており、現在のトレンチゲート構造の IGBT には合致しない。

上述の課題を解決するため、デバイス構造やデバイス内部の挙動をパラメータ値に反映させ、かつトレンチゲート構造の IGBT に合致した新たな IGBT モデルを構築した。この IGBT モデルのパラメータをデバイスシミュレーションの結果から導出することで、デバイスシミュレーションと回路シミュレーションの連携を実現している。

#### 3.2 デバイスシミュレーション

図 2 に、デバイスシミュレーション用 IGBT モデルの例を示す。プロセスフローに基づき形成される IGBT の構造および Si 内部の不純物分布がモデル化されている。

図 3 に、デバイスシミュレーションの解析結果の例を示す。デバイスシミュレーションでは IGBT の電流・電圧特性だけでなく、内部の挙動（電子・ホールの分布や電界分

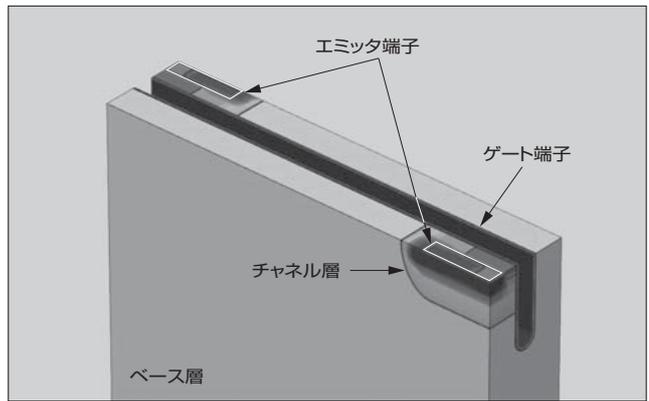


図 2 デバイスシミュレーション用 IGBT モデルの例

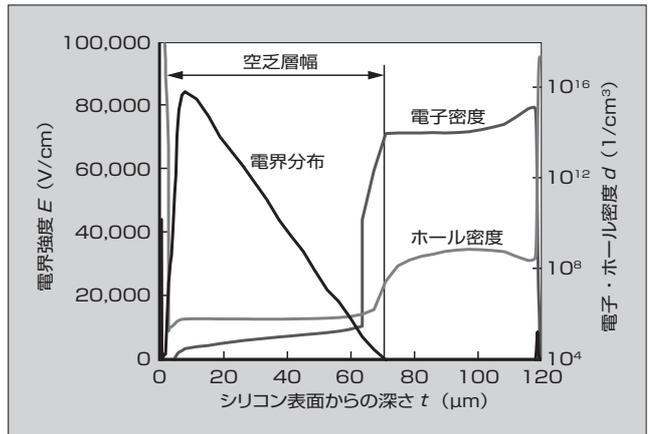


図 3 デバイスシミュレーションによる解析結果の例

布) を解析できる。これらの結果を使用して、回路シミュレーション用 IGBT モデルのパラメータ値を導出する。

#### 3.3 回路シミュレーション

図 4 に、構築した回路シミュレーション用 IGBT モデルを示す。この IGBT モデルは、Kraus モデルをベースにした等価回路モデルであり、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) モデル (MOS)、ダイオードモデル (D1, D2)、端子間容量モデル (CGC, CCE, CGE), および電流源モデル (I1, I2) で構成されている。

この端子間容量モデルおよび電流源モデルのパラメータ

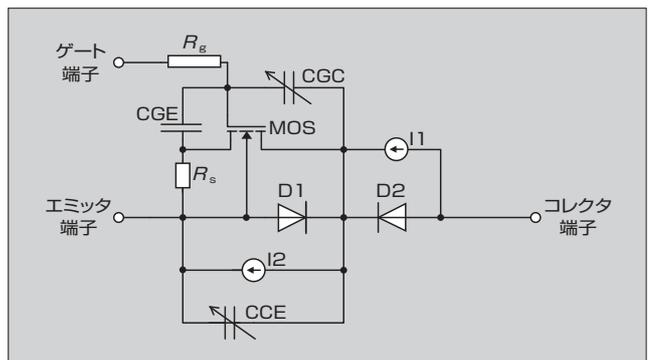


図 4 回路シミュレーション用 IGBT モデル

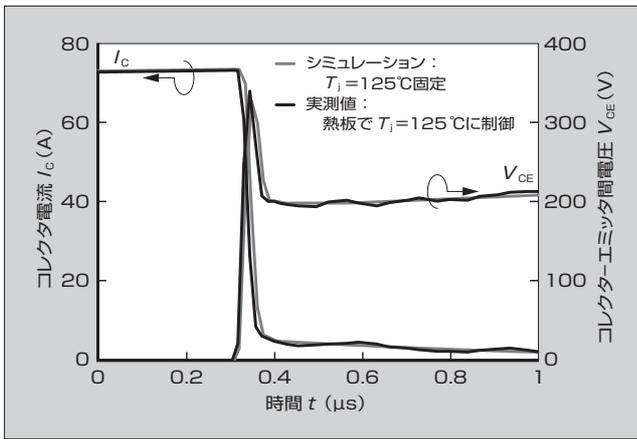


図5 チップ温度固定時のIGBT チップ単独でのターンオフ波形

値に、3.2節のデバイスシミュレーションの結果を反映する。例えば容量モデルの容量値は、図2のデバイスシミュレーション用モデルから抽出されるデバイス構造、および図3のデバイス内部の電界強度分布から求められる空乏層幅を使用して導出する。

図5に、チップ温度固定時のIGBT チップ単独でのターンオフ波形を示す。IGBT チップ単独で測定したターンオフ波形 ( $T_j=125^\circ\text{C}$ ) と、図4のモデルを使用して回路シミュレーションで解析した結果との比較である。ターンオフ損失の誤差は約8%であり、従来の標準IGBTモデル使用時の誤差30%に比べ精度が向上した。

このように、回路シミュレーション用のIGBTモデルを使用することで、デバイスシミュレーションの結果を反映させた回路シミュレーション、および回路シミュレーションで検討したIGBTモデルのパラメータ値をフィードバックさせたデバイスシミュレーションが可能になる。

#### 4 回路シミュレーションと熱シミュレーションの連携

##### 4.1 概要

IGBT モジュールのパッケージの開発では過渡熱シミュレーションを行っている。従来は、発熱源をチップからの発熱（チップ発熱）のみとし、さらにその値をデバイス動作中は一定としていた。

実際は、IGBT モジュールでは、ボンディングワイヤや

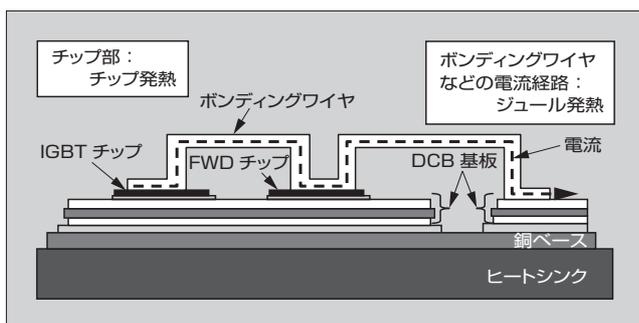


図6 IGBT モジュールにおける発熱源

DCB 基板などパッケージの電流経路も発熱源（ジュール発熱）となる（図6）。また、チップ発熱も回路動作やパッケージ構造、周囲温度条件などに影響を受ける。これらの影響を考慮して精度良くチップ温度を解析するためには、回路シミュレーションと熱シミュレーションを組み合わせた解析が必要となる。

##### 4.2 回路シミュレーション

回路シミュレーションでは、3.3節のIGBTモデルを用いて、各チップでの発熱量およびパッケージに流れる電流値を求める。この結果を熱シミュレーションに反映させる。

##### 4.3 熱シミュレーション

図7は熱シミュレーション用の解析モデルである。本モデルにおいて、チップ発熱と、ボンディングワイヤなどに流れる電流によるジュール発熱を考慮している。

図8に、考慮する発熱源を変えて連続動作させたときの熱シミュレーションの結果を示す。チップ発熱のみの場合にはチップ表面の温度が上昇し（図8(a)）、ジュール発熱のみの場合にはボンディングワイヤおよび主端子の温度が上昇している（図8(b)）。両方とも発熱する場合には、ジュール発熱によるボンディングワイヤ部の温度上昇の影響を受けて、チップ発熱のみの場合に比べチップ表面の温度がさらに上昇している（図8(c)）。

#### 5 連携シミュレーションによるIGBTモジュール全体の特性解析

これまでに述べたシミュレーションを連携し、IGBTモジュール全体の特性を解析した。この連携解析は、次の手順で行う。

まず、回路シミュレーションでIGBTモジュールを過渡的に動作させたときの解析を各温度で実施する。この解析結果から、熱シミュレーションへの入力データとして、各温度でのチップ発熱量と電流値の平均値を自動で計算し、次にこの入力データを使用して、熱シミュレーションでIGBTモジュールの温度解析を行う。

図9に、この連携シミュレーションを使用して連続動作させたときのIGBTモジュール内のIGBTチップ温度の解

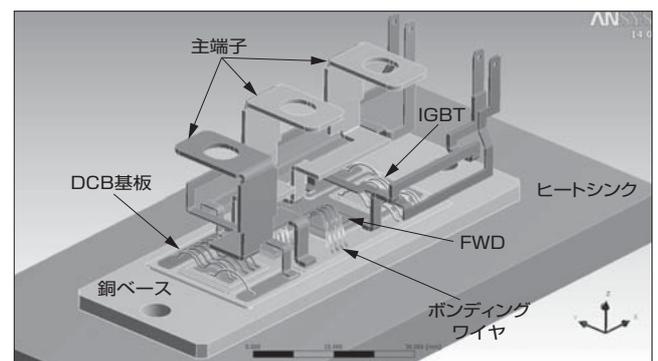


図7 熱シミュレーション用IGBTモジュールモデル

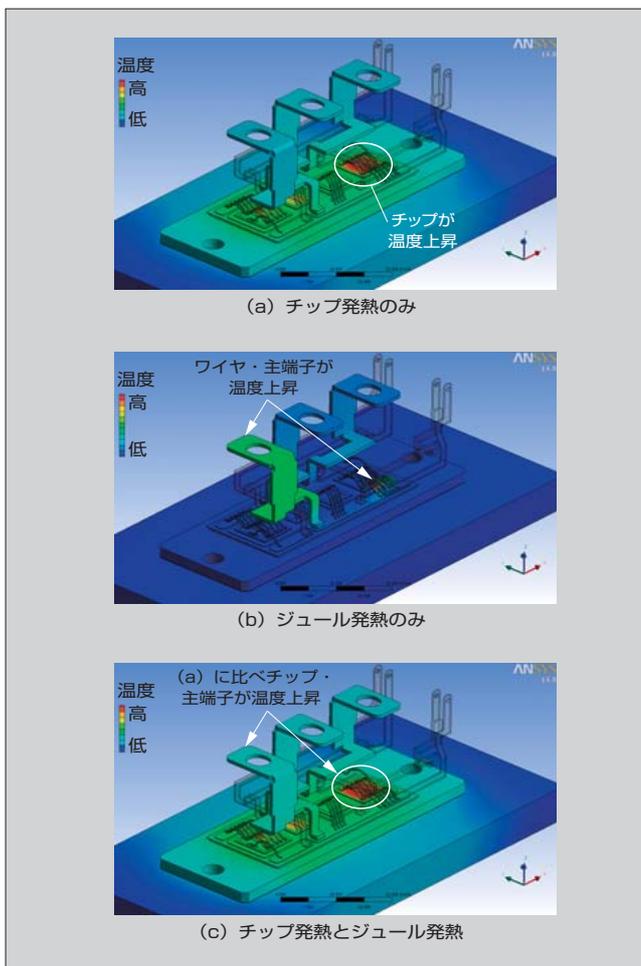


図8 熱シミュレーションによる解析結果の例

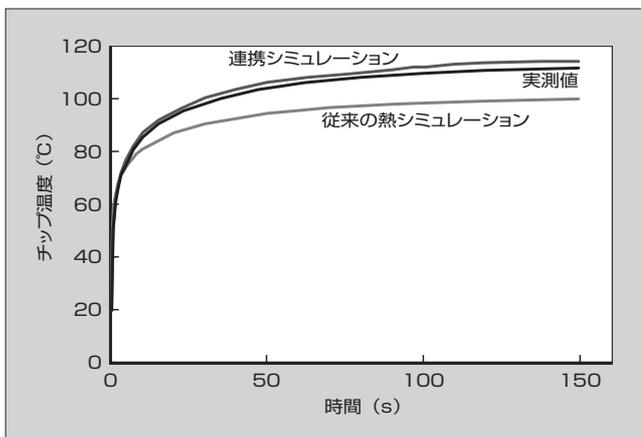


図9 IGBT モジュール内の IGBT チップ温度

析結果を示す。従来行っていた一定のチップ発熱だけを考慮した熱シミュレーションに比べ、実測値との誤差が約10%から5%以下に低減している。今後、さらなる実測値との誤差低減のため、複雑な冷却フィンの構造を考慮した解析を検討する。

図10に、時間150s時点でのIGBTモジュールのターンオフ特性を比較した結果を示す。3.3節で述べたIGBTチップモデルでのターンオフ損失の誤差低減と、熱シミュレーションでのIGBTチップ温度の誤差低減が反映された

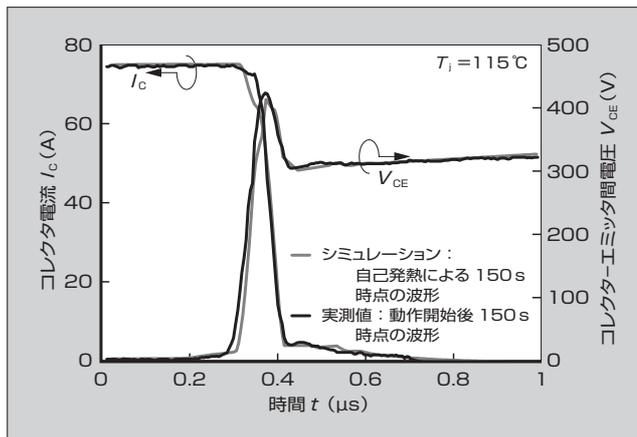


図10 自己発熱による温度上昇を考慮したIGBTモジュールのターンオフ波形(時間150s時点)

結果、実測との誤差を従来の約40%から約10%に低減できた。

上述のように、回路シミュレーションと熱シミュレーションを連携させることで、IGBTモジュール全体の特性が高精度に解析できた。

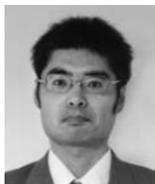
## 6 あとがき

本稿では、IGBTモジュールの連携シミュレーションについて述べた。この連携シミュレーションにより、IGBTチップの熱特性とIGBTモジュール全体の電気特性について従来に比べて高精度な解析が可能になった。

今後は、今回構築した連携シミュレーションを基に、IGBTモジュールにICなどを組みこんだIPM (Intelligent Power Module) などに対象を広げる。さらに、ノイズシミュレーションやSPICEシミュレーションなど、ほかのシミュレーションとの連携を図ることで高度な設計環境を構築し、パワー半導体の最適設計や開発期間短縮に貢献していく所存である。

## 参考文献

- (1) 山田教文ほか. パッケージシミュレーション技術による熱設計精度の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.179-182.
- (2) 山田昭治ほか. IGBTデバイスの電気特性解析用モデルによる設計精度の向上. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.174-178.
- (3) 岡田有功ほか. インバータシミュレーションプログラムの開発(その2). 電力中央研究所報告, 研究報告: R07016.



山田 昭治

パワー半導体素子のCAE, CAD技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体開発統括部デバイス開発部。電気学会会員。



**池田 晴信**

パワー半導体素子の CAE, CAD 技術の開発に従事。現在, 富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体開発統括部デバイス開発部。



**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。



# 「Vシリーズ」IPMの系列拡大 —高放熱タイプ「P630パッケージ」—

Expansion of the IPM “V Series”  
— High Heat Dissipation Type “P630 Package” —

本橋 覚 MOTOHASHI Satoru

高橋 秀明 TAKAHASHI Hideaki

田岡 正裕 TAOKA Masahiro

アルミナ絶縁基板を適用した既存「P630パッケージ」に加えて、窒化アルミニウムを適用した高放熱タイプ「P630パッケージ」を開発した。既存パッケージに対して、熱抵抗を30%以上低減しており、高負荷条件下で $\Delta T_{jc}$ を抑制できる。また、絶縁基板下はんだ材の見直しにより、窒化アルミニウムと鉛はんだを用いた前世代のIPM (Intelligent Power Module) に対して、 $\Delta T_c$ パワーサイクル耐量が大幅に向上している。機械的・電気的特性および外形は、既存パッケージと同等であり、負荷条件・放熱系の設計条件に応じて使い分けが可能である。

In addition to the conventional “P630 package” that uses alumina insulating substrate, we have developed the high heat dissipation type “P630 package” that uses aluminum nitride. This new package reduces thermal resistance by more than 30% compared to the previous package and can suppress  $\Delta T_{jc}$  under high load conditions. In addition, by reassessing the use of insulating substrate solder materials, we have greatly improved  $\Delta T$  power cycle capacity compared to the previous generation of intelligent power modules (IPMs) that used aluminum nitride and lead solder. The mechanical and electronic features and external form are the same as the conventional package, and the package is capable of various uses corresponding to load conditions and heat dissipation system design.

## 1 まえがき

富士電機は、1988年にIPM (Intelligent Power Module) を他社に先駆けて製品化した。それ以来、市場ニーズに応えるためさまざまな製品系列を展開してきた。<sup>(1)~(8)</sup> IPMは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) とFWD (Free Wheeling Diode) からなるスタンダードモジュールに、損失とノイズのトレードオフを最適化した制御機能、種々の異常に対する保護動作およびアラーム出力機能などを付与してインテリジェント化を図ったものである。このIPMを適用すると、顧客装置側のドライブ設計を省略でき、装置設計が容易になるとともに、低損失・高信頼性を実現できる。IPMは主に、モータ駆動装置 [NC (Numerical Control) 工作機、汎用インバータ、サーボ、エレベータなど] やエアコン、無停電電源装置 (UPS)、太陽光発電用パワーコンディショナ (PCS) などで用いられ、産業用電力変換素子として幅広く使用されている。

こうした中、富士電機は、最新世代であるトレンチゲート構造のフィールドストップ (FS) 型「Vシリーズ」IGBTチップを採用した「Vシリーズ」IPM (V-IPM) を開発することで、さらなる低損失および装置の小型化を行ってきた。<sup>(9)~(14)</sup> 近年、低損失化の要求に加えて、装置筐体 (きょうたい) の小型化または出力容量アップに伴うチップ温度上昇の抑制が強く求められている。そこで、チップ温度の上昇を抑えた高放熱タイプIPMを、新たな製品ラインアップとして予定している。本稿では、高放熱タイプ「P630パッケージ」の概要と特徴について述べる。

## 2 高放熱タイプ「P630パッケージ」の概要

### (1) 熱抵抗の低減

高放熱タイプP630パッケージは、既存のP630パッケージの絶縁基板で採用しているアルミナ ( $Al_2O_3$ ) よりも熱伝導率が高い窒化アルミニウム (AlN) を採用している。表1に、絶縁基板の熱伝導率を示す。熱伝導率の大幅な改善により、ジャンクション-ケース間の熱抵抗  $R_{th(j-c)}$  の大幅な改善が見込まれ、既存パッケージと比べて熱抵抗は30%以上改善した。さらに、IGBTジャンクション温度  $T_j$  とケース温度  $T_c$  の差  $\Delta T_{jc}$  は、前世代のP612パッケージとの比較では、発生損失の17%低減との相乗効果で、30%以上の低減を実現した。

### (2) 高信頼性

高放熱タイプP630パッケージは、絶縁基板と銅ベース間の接合材に、すず-アンチモンベースのはんだ材を新たに適用している。これにより、ケース温度の $\Delta T_c$ パワーサイクル耐量の大幅改善につながった。

### (3) 外形とラインアップ

図1にP630パッケージの外形図を、表2にラインアップを示す。絶縁基板とはんだ材のみを変更し、外形・端子配列は既存パッケージと同じである。また、主な電気的・機械的特性も既存パッケージと同等である。定格の範囲は50~200 A/600 V および25~100 A/1,200 V であり、6 in 1, 7 in 1 のいずれにも対応している。既存パッケージと高放熱タイプP630パッケージで、装置筐体の共通化および負荷条件によるパッケージの使い分けが可能である。

表1 絶縁基板の熱伝導率

項目	高放熱タイプP630パッケージ	既存P630パッケージ
絶縁基板	窒化アルミニウム	アルミナ
熱伝導率 [W/(m・K)]	170.0	21.0

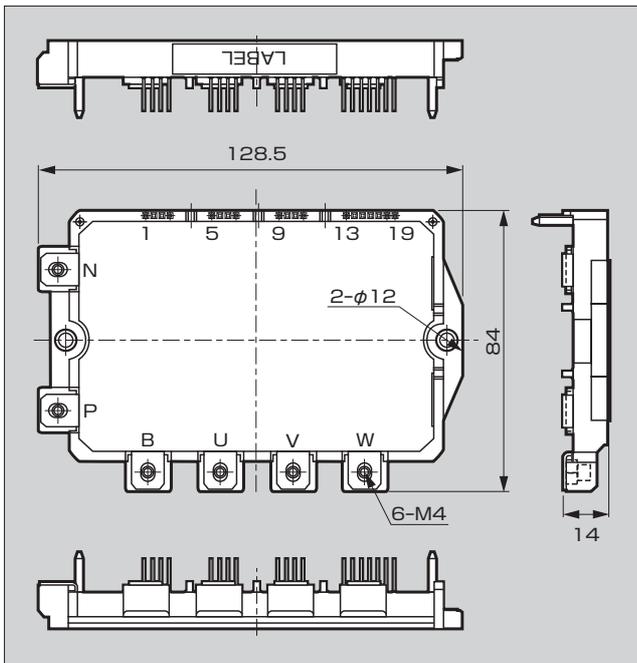


図1 「P630 パッケージ」の外形図

表2 パッケージのラインアップ

電圧	電流	高放熱タイプ P630パッケージ		既存P630 パッケージ	
		6 in 1	7 in 1	6 in 1	7 in 1
600V	50A	○	○	○	○
	75A	○	○	○	○
	100A	○	○	○	○
	150A	○	○	○	○
	200A	○	○	○	○
1,200V	25A	○	○	○	○
	35A	○	○	○	○
	50A	○	○	○	○
	75A	○	○	○	○
	100A	○	○	○	○

IPM 製品系列の拡大により、装置設計の自由度が大きくなった。

(4) 装置筐体の小型化・高効率化

(1)~(3)に示したように、窒化アルミニウム絶縁基板の採用により、熱抵抗を既存パッケージに比べ30%以上改善した。これにより、チップ温度の上昇が抑制され、装置筐体の放熱系の小型化が可能となり、装置全体でのコストメリットを得ることが可能になった。また、チップ温度の低減は、電流量拡大によるトルクアップならびにキャリア周波数を上げることにより装置能力の向上に直結し、装置の高効率化に寄与している。

③ 高放熱タイプ「P630 パッケージ」の特徴

3.1 熱抵抗の低減

図2に200A/600V定格相当品の既存パッケージと高放

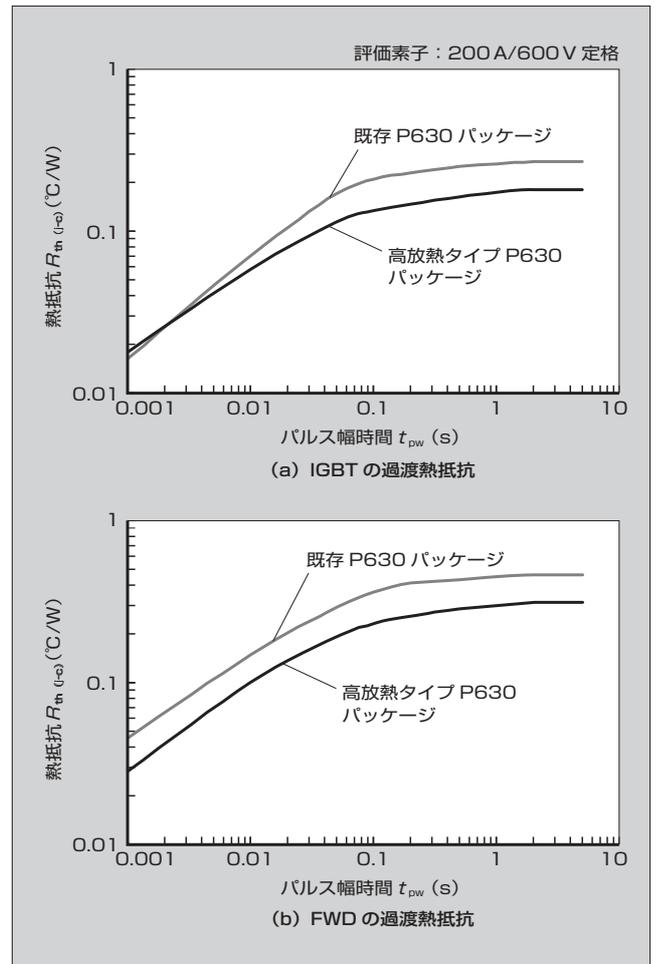


図2 過渡熱抵抗

表3 定常熱抵抗

	高放熱タイプP630 パッケージ		既存P630 パッケージ	
	IGBT	FWD	IGBT	FWD
熱抵抗 (°C/W) (max.)	0.18	0.30	0.27	0.46
低減率 (%)	33	35	—	—

評価素子：200A/600V定格

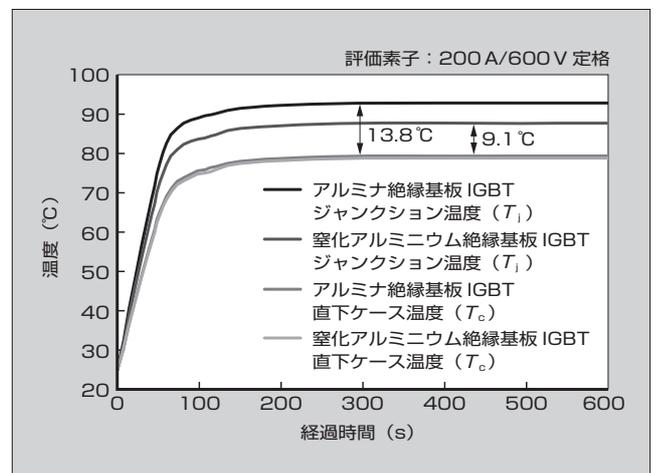


図3 FEMによる温度上昇シミュレーションの結果

熱タイプ P630 パッケージの過渡熱抵抗を、表 3 に定常熱抵抗値を示す。窒化アルミニウム絶縁基板の適用により、既存パッケージに対して熱抵抗の低減を実現している。特に定常熱抵抗では、30% 以上改善した。

図 3 に、有限要素法 (FEM) を用いたジャンクション温度  $T_j$  の温度上昇シミュレーションの結果を示す。高放熱タイプ P630 パッケージでは、熱抵抗の 30% 以上の低減により、連続動作 [ $I_c=100$  A (実効値)] でのチップ温度飽和時のジャンクションケース間温度  $\Delta T_{jc}$  は、アルミナ絶縁基板適用の既存パッケージの 13.8℃ に対して 9.1℃ となっている。既存パッケージと比較して、 $\Delta T_{jc}$  は 30%

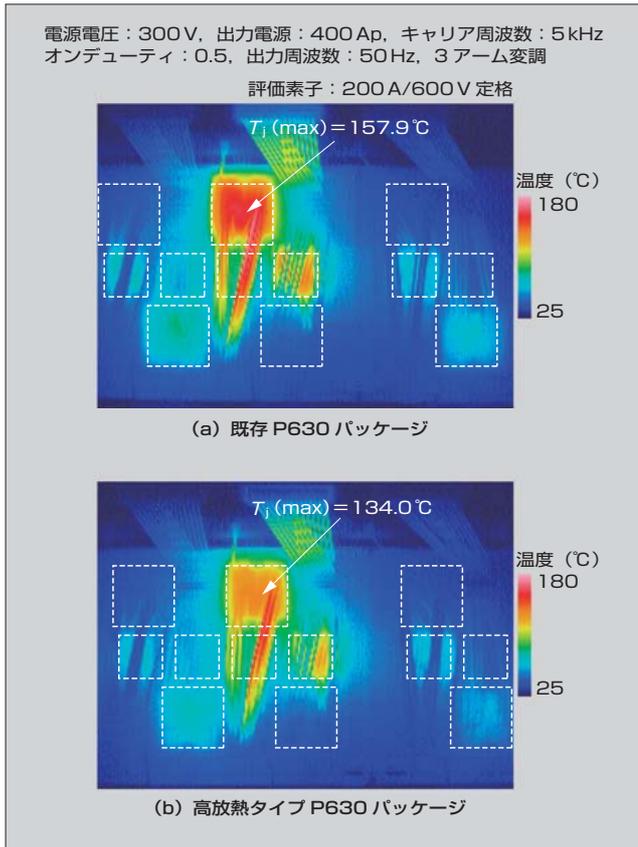


図 4 チップ表面の温度分布

以上低減している。

図 4 に、モータロック動作を模した条件の下、赤外線カメラによるジャクション温度  $T_j$  の比較を示す。これは 200 A/600 V 素子における、室温 (25℃) から定格電流でロック動作させた際の 5 秒経過時のチップ表面の温度分布である。ロック動作などの高負荷条件での適用に際しても、既存パッケージと比較して  $T_j$  は低下しており、高負荷などの厳しい条件下での使用が可能である。同じ負荷を印加した場合、 $\Delta T_{jc}$  は既存パッケージよりも 30% 以上低減しており、これにより、 $T_j$  は、157.9℃ から 134.0℃ に低減した。

表 4 に示すように、最新世代の V-IPM は、前世代の R-IPM3 に比べて、トータルの発生損失を 17% 以上低減している。トータル発生損失の低減と熱抵抗の低減の相乗効果により、IGBT チップの  $\Delta T_{jc}$  の温度上昇は、高放熱タイプ P630 パッケージでは前世代のパッケージに対して、34.6% 低減している。

### 3.2 高信頼性の実現

高放熱タイプ P630 パッケージの  $\Delta T_c$  パワーサイクル耐量は、機械的強度に優れている鉛フリーはんだの適用に

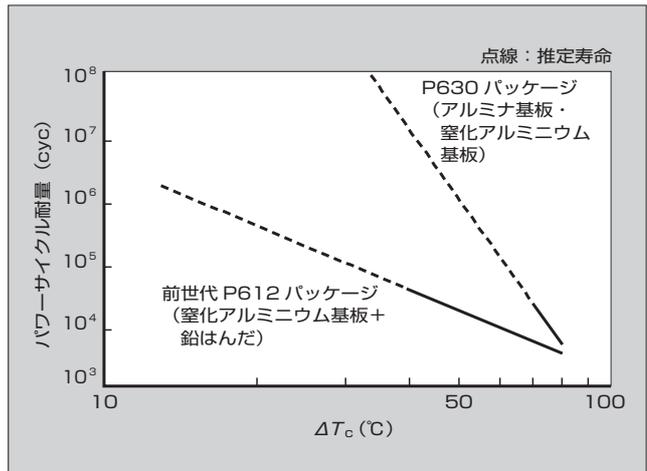


図 5  $\Delta T_c$  パワーサイクル耐量

表 4 V-IPM の特性

シリーズ (パッケージ)	型式 (150 A/600 V)	IGBT			FWD		
		発生損失 (W)	熱抵抗 (°C/W)	$\Delta T_{jc}$ (°C)	発生損失 (W)	熱抵抗 (°C/W)	$\Delta T_{jc}$ (°C)
R-IPM3 (前世代P612)	7MBP150RTB060-50	47.26	0.29	13.71	7.97	0.47	3.74
V-IPM (高放熱P630)	7MBP150VDN060-50	38.97	0.23	8.96	7.56	0.37	2.8
低減率 (%)		17.5	20.7	34.6	5.1	21.3	25.1

電源電圧：300 V，出力電流：75 A (実効値)，キャリア周波数：8 kHz，力率：0.8，制御率：1.0，出力周波数：50 Hz，3アーム変調

〈注〉モータロック動作：モータ動作の一種で、モータ軸が特定の位置で固定されトルクが維持された状態における動作をいう。ロック動作の期間中は、モータ電流は直流電流として流れ、IPM 内部のチップはチョッパ動作となる。この場合、チップの責務は厳しくなり、チップ温度の上昇につながる場合がある。

より、前世代のP612パッケージ（窒化アルミニウム+鉛はんだ）に比べて大幅に向上した（図5）。例えば、前世代のパッケージに比べて、 $\Delta T_c=50^\circ\text{C}$ での耐量は約50倍（推定）になっている。 $\Delta T_c$ パワーサイクル耐量は、エレベータなどに代表されるケース温度の変化が比較的大きいアプリケーションにおいて、装置寿命に関わる重要な指標である。

#### 4 あとがき

「Vシリーズ」IPMの系列拡大として加わった、絶縁基板に窒化アルミニウムを適用した高放熱タイプ「P630パッケージ」について述べた。高放熱タイプのラインアップにより、装置放熱フィンの小型化・適用電流条件の拡大など装置設計の自由度の拡大に寄与できる。また、併せて実施した絶縁基板下はんだ材の見直しにより、 $\Delta T_c$ パワーサイクル耐量の向上も実現した。今後とも、市場の要求に応える製品開発および系列拡大に注力していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 渡辺学, 梶原玉男. インテリジェントパワーモジュール. 富士時報. 1994, vol.67, no.5, p.268-274.
- (2) 山口厚司, 市川裕章. 新型IGBT-IPM (Rシリーズ) の開発. 富士時報. 1997, vol.70, no.4, p.237-242.
- (3) 山口厚司ほか. 中・大容量RシリーズIGBT-IPM. 富士時報. 1998, vol.71, no.2, p.101-105.
- (4) 梶原玉男ほか. 小容量民生用IGBT-IPM. 富士時報. 1998, vol.71, no.2, p.106-111.
- (5) 梶原玉男ほか. 汎用小容量インテリジェントパワーモジュール. 富士時報. 1999, vol.72, no.3, p.199-202.
- (6) 渡辺学ほか. インテリジェントパワーモジュール「R-IPM3, Econo IPMシリーズ」. 富士時報. 2002, vol.75, no.10, p.572-576.
- (7) 関川貴善ほか. UシリーズIGBT-IPM (600V). 富士時報. 2004, vol.77, no.5, p.317-320.
- (8) 森貴浩ほか. IPM用小型ドライバIC. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.395-398.
- (9) 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.
- (10) 清水直樹ほか. 大容量「Vシリーズ」IPMの系列化. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.322-326.
- (11) Motohashi, S. et al. "The 6th Gen. Intelligent Power Module", in Proc. 2011 PCIM Asia. 2011, p.161-166.
- (12) Momose, M. et al. "A 600 V Super Low Loss IGBT with Advanced Micro-P Structure for the next Generation IPM", in Proc. 2010 ISPSD.
- (13) M. Zhan, et al. "The 6th gen. Intelligent Power Module for Large Capacity Type", in Proc. 2012 PCIM Asia.
- (14) Takaku, T. et al. "Development of the New Generation Intelligent Power Module", in Proc. 2012 PCIM South America. (in press).



**本橋 寛**

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。工学博士。日本物理学会会員。



**高橋 秀明**

インテリジェントパワーモジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。



**田岡 正裕**

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。

# 3.3 kV IGBT モジュールの系列拡大

## Expansion of the 3.3 kV IGBT Module Series

福知 輝洋 FUKUCHI Akihiro

金子 悟史 KANEKO Satoshi

近年、再生可能エネルギーの市場が急速に伸びており、大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールのニーズは急激に拡大している。富士電機ではこれに応えるため、3.3 kV の IGBT モジュールで定格電流を 25% 向上した新製品を系列化した。0.8 kA 品と同じパッケージの 3.3 kV/1.0 kA と、1.2 kA 品と同じパッケージの 3.3 kV/1.5 kA の製品である。チップ配置をシンメトリーにしたことにより、高スイッチング耐量を確保している。また、絶縁基板には放熱能力向上のため AlN 基板を、ベース材料には高い信頼性を確保するため AlSiC ベースを採用している。

In recent years, there has been a rapid growth in the market for renewable energy, and the needs for high-capacity insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules have expanded quickly. To answer these needs, Fuji Electric has arranged a new line of products that have a 25% higher current rating into 3.3 kV modules. These are 3.3 kV/1.0 kA products of the same package as 3.3 kV/0.8 kA devices, and 3.3 kV/1.5 kA products of the same package as 1.2 kA devices. By reappraising chip configuration and using a symmetric configuration, we can ensure high switching capacity. Also, to improve the heat-dissipation capability, we use an AlN substrate as the insulating substrate, and to ensure reliability, we use an AlSiC base plate as the base material.

### 1 まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、その低損失性・高破壊耐量・駆動回路の設計の容易さから広く普及している。高耐圧・大容量分野においても、これまで広く適用されてきた GTO (Gate Turn-off) サイリスタから IGBT モジュールに置き換えられてきており、大容量インバータや高圧インバータ装置などに広く応用されている。特に近年、地球温暖化防止のため再生可能エネルギー (風力発電・太陽光発電) の市場が急速に伸びており、この分野で適用されるインバータ装置の大容量化が進み、大容量 IGBT モジュールのニーズは急激に拡大している。

富士電機では、これまで大容量分野への適用を狙った IGBT モジュールの製品展開を行ってきた。1,200 V・1,700 V 製品をラインアップ<sup>(1)~(4)</sup>するとともに、2010 年には、産業・電鉄分野向けに 3.3 kV/0.8 kA、3.3 kV/1.2 kA を量産化<sup>(5),(6)</sup>している。

今回、さらなる大電流化のニーズを受けて新しいチップを開発し、0.8 kA 品と同じパッケージの 3.3 kV/1.0 kA と、1.2 kA 品と同じパッケージの 3.3 kV/1.5 kA の製品を系列化した。どちらも定格電流を 25% 向上させている。本稿では、その概要・性能について述べる。

### 2 製品系列

図 1 に、3.3 kV IGBT モジュールの外観を示す。パッケージは、130×140 (mm) と、190×140 (mm) の 2 種類があり、他社モジュールとの互換性を持っている。1 in 1 3.3 kV/1.5 kA モジュールを例として、最大定格および特性を表 1 に示す。

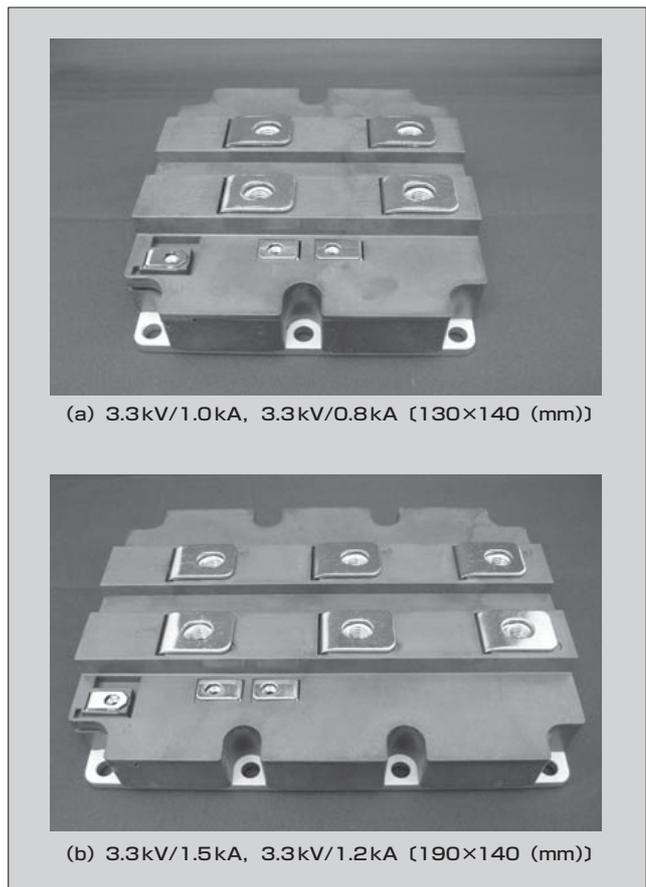


図 1 3.3 kV IGBT モジュール

### 3 電気的特性

#### 3.1 I-V 特性

図 2 にモジュールの飽和電圧-コレクタ電流特性を、図

表1 最大定格および特性 (型式: 1MBI1500UE-330)

(a) 最大定格 (指定なき場合は,  $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件	定格	単位
コレクター-エミッタ電圧	$V_{CES}$	$V_{GE}=0\text{V}$	3,300	V
ゲート-エミッタ間電圧	$V_{GES}$	—	$\pm 20$	V
コレクタ電流	$I_C$ (DC)	連続 $T_c=95^\circ\text{C}$	1,500	A
	$I_C$ (Pulse)	1 ms	3,000	A
最大損失	$P_c$	—	15.6	kW
最大接合温度	$T_{j\max}$	—	150	$^\circ\text{C}$
保存温度	$T_{stg}$	—	$-40 \sim +125$	$^\circ\text{C}$
絶縁耐圧	$V_{iso}$	AC: 1 min	6.0	kV
部分放電消滅電圧	$V_e$	AC, $Q \leq 10\text{pC}$	2.6	kV

(b) 電気的特性 (指定なき場合は,  $T_j = T_c = 25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	試験条件	最小	標準	最大	単位	
コレクター-エミッタ間 漏れ電流	$I_{CES}$	$V_{GE}=0\text{V}, V_{CE}=3,300\text{V}$	—	—	1.0	mA	
ゲート-エミッタ間 漏れ電流	$I_{GES}$	$V_{GE}=\pm 20\text{V}$	—	—	4.8	$\mu\text{A}$	
ゲート-エミッタ間 しきい値電圧	$V_{GE(th)}$	$V_{CE}=20\text{V}, I_C=1.5\text{A}$	6.0	6.75	7.5	V	
飽和電圧 (chip)	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE}=+15\text{V}$ $I_C=1,500\text{A}$	$T_j=25^\circ\text{C}$	—	2.46	2.96	V
			$T_j=150^\circ\text{C}$	—	3.43	—	
入力容量	$C_{ies}$	$V_{GE}=0\text{V}, V_{CE}=10\text{V}, f=1\text{MHz}$	—	300	—	nF	
ターンオン時間	$t_{on}$	$V_{CC}=1,800\text{V}, I_C=1,500\text{A}$ $V_{GE}=\pm 15\text{V}, T_j=150^\circ\text{C}$ $R_g=\pm 1.6\Omega, L_m=160\text{nH}$	—	3.1	—	$\mu\text{s}$	
	$t_r$		—	2.2	—		
ターンオフ時間	$t_{off}$		—	2.6	—		
	$t_f$		—	0.5	—		
順電圧 (chip)	$V_F$	$V_{GE}=0\text{V}$ $I_F=1,500\text{A}$	$T_j=25^\circ\text{C}$	—	2.35	2.95	V
			$T_j=150^\circ\text{C}$	—	2.61	—	
逆回復時間	$t_{rr}$	$V_{CC}=1,800\text{V}, I_F=1,500\text{A}, T_j=150^\circ\text{C}$	—	1.0	—	$\mu\text{s}$	

(c) 熱的特性

項目	記号	条件	最小	標準	最大	単位
熱抵抗	$R_{th(j-c)}$	IGBT	—	—	8.0	$^\circ\text{C}/\text{kW}$
		FWD	—	—	15.0	

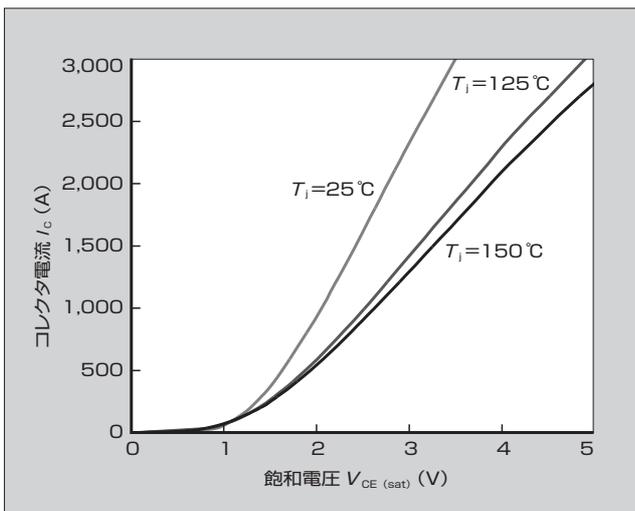


図2 飽和電圧-コレクタ電流特性

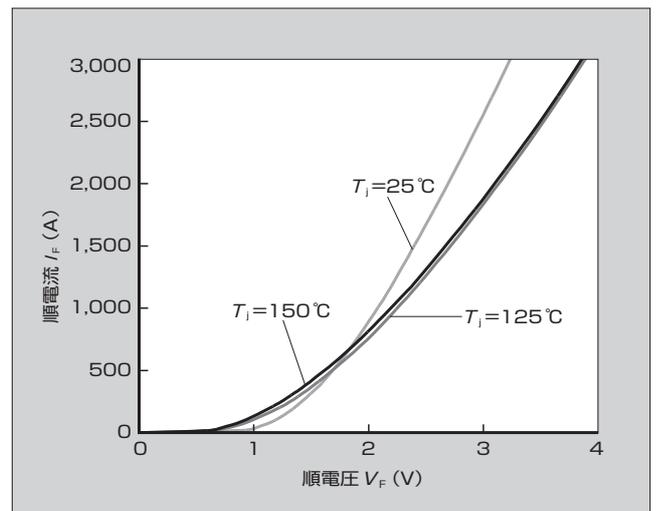


図3 順電圧-順電流特性

3 に順電圧-順電流特性を示す。IGBT および FWD(Free

Wheeling Diode) チップは、ともに飽和電圧および順

電圧が正の温度係数を持つ。正の温度係数を持つチップは、接合温度が高くなると内部抵抗が高くなり、電流が流れにくくなる。そのため、チップの並列接続数の多い大容量 IGBT モジュール内部でチップ間の接合温度  $T_j$  を均一化するように働き、電流バランスを自動的に調整する。1.2kA モジュールは、IGBT チップ（定格 50 A）24 個・FWD チップ（定格 100 A）12 個を並列に接続している。1.5kA モジュールでは、IGBT チップ（定格 62.5 A）24 個・FWD チップ（定格 62.5 A）24 個を同一モジュールに配置できるように絶縁基板内に配置し、定格電流を 25% 向上させた。

### 3.2 スイッチング特性

図 4 に、 $V_{CC}=1,800\text{ V}$ 、 $R_g = \pm 1.6\ \Omega$ 、 $T_j=150^\circ\text{C}$  における定格電流（1,500 A）でのスイッチング特性を示す。発振などのノイズや大きなサージ電圧は発生しておらず、良好な波形である。

また、高耐压モジュールは、その適用用途から高い信頼性が求められ、高スイッチング破壊耐量を持つことが必須

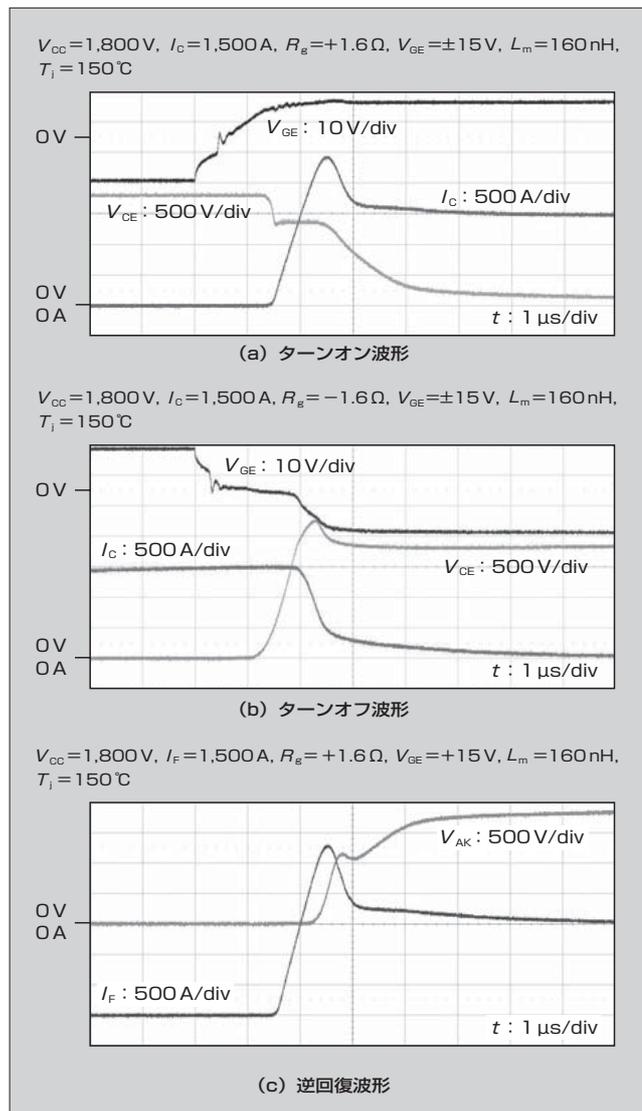


図 4 定格電流でのスイッチング特性

である。

図 5 (a) に、 $V_{CC}=2,500\text{ V}$ 、 $R_g = -1.6\ \Omega$ 、 $T_j=150^\circ\text{C}$  におけるターンオフ波形を示す。 $I_C=4,700\text{ A}$ （定格の 3 倍以上）を遮断できる能力を持っている。図 5 (b) に、 $V_{CC}=2,300\text{ V}$ 、 $R_g = +1.6\ \Omega$ 、 $T_j=150^\circ\text{C}$  における短絡波形を示す。20  $\mu\text{s}$  以上の短絡でも正常にターンオフできる。図 5 (c) に、

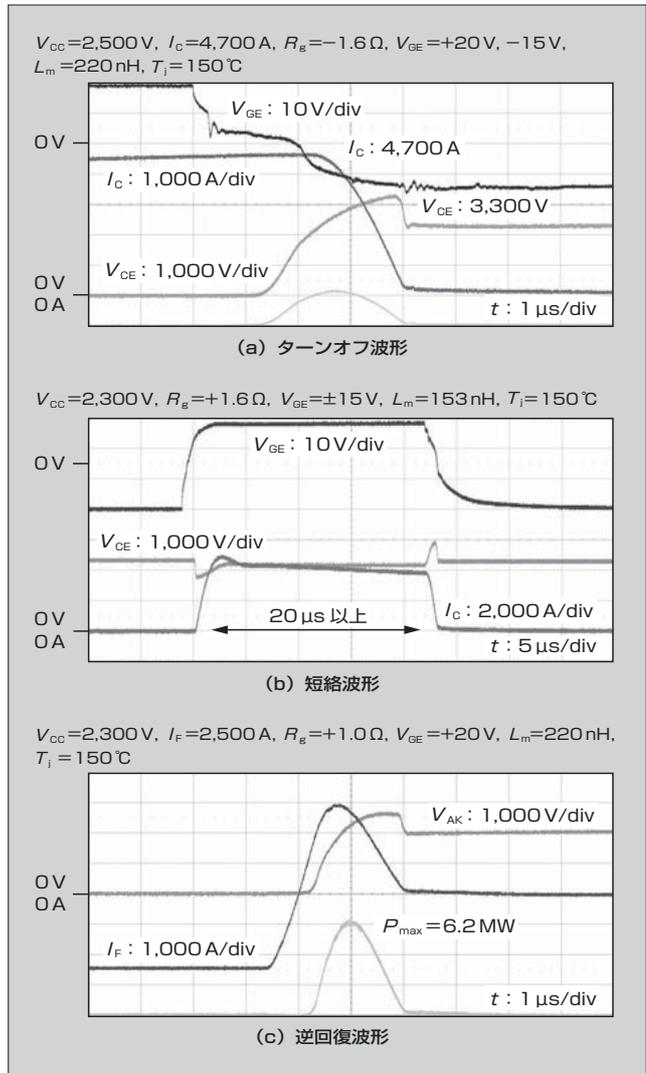


図 5 大電流でのスイッチング特性

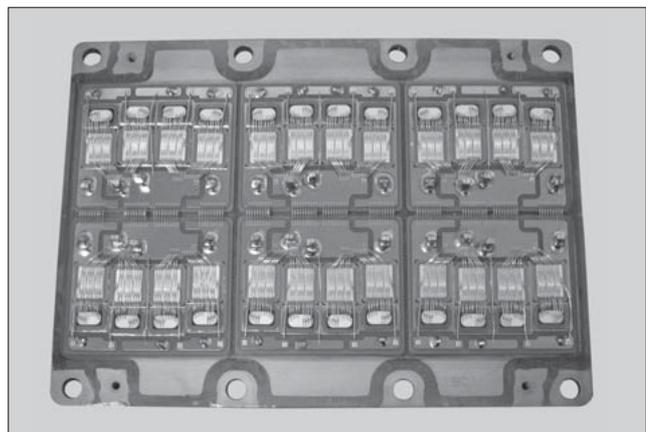


図 6 1.5kA モジュールの製品内部構造

$V_{CC}=2,300\text{ V}$ ,  $R_g=+1.0\ \Omega$ ,  $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ における逆回復波形を示す。 $P_{max}$  (電流×電圧の瞬時パワー最大値)が6.2MWでも、正常に逆回復動作が可能である。

大容量モジュールは、チップの並列接続数が多く、電流のアンバランスを発生しやすい。図6に、1.5kAモジュールの製品内部構造を示す。チップ配置をシンメトリーにしたことにより、電流のアンバランスを可能な限り小さくし、高スイッチング耐量を確保している。

#### 4 パッケージ構造

大容量インバータ装置に使用されるIGBTモジュールには、高信頼性、高放熱能力(低熱抵抗)が求められる。3.3kV IGBTモジュールでは、絶縁基板の放熱能力向上のため、低耐圧モジュールで一般に採用されているアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )や窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )より熱伝導率が2.5~8倍高い窒化アルミニウム( $\text{AlN}$ )絶縁基板を採用した。その結果、表1(c)に示す低い熱抵抗を実現した。ベース材料は、低耐圧モジュールでは一般に銅ベースが採用されているが、3.3kV IGBTモジュールでは、高い信頼性を確保するために $\text{AlSiC}$ ベースを採用した。 $\text{AlSiC}$ はAlとSiCの複合材料であり、熱膨張率が $\text{AlN}$ 絶縁基板に近い。このため、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数倍向上する。また、ベースの初期形状を適切に管理することにより、マウント時の平坦(へいたん)性も向上させている。

#### 5 あとがき

本稿では、3.3kV IGBTモジュールの系列拡大について述べた。本モジュールは、電気的特性や熱的特性に優れており、再生可能エネルギー分野および車両分野で貢献でき

る製品と確信している。

今後は、素子のさらなる高性能化・高信頼性化に取り組み、期待に応える製品開発を行っていく所存である。

#### 参考文献

- (1) 西村孝司ほか. IGBTハイパワーモジュール. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.390-394.
- (2) 西村孝司ほか. 3レベルインバータ対応 大容量IGBTの系列化—高絶縁パッケージ—. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.370-374.
- (3) 山本拓也, 吉渡新一. 新型大容量2 in 1 IGBTモジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.388-392.
- (4) 山本拓也ほか. 大容量第6世代IGBTモジュールの系列拡大. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.317-321.
- (5) 古閑丈晴ほか. 3.3kV IGBTモジュール. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.397-401.
- (6) 古閑丈晴ほか. 3.3kV IGBTモジュール. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.371-374.
- (7) Minghui Zhan, et al. "3.3kV IGBT Modules with Trench Gate FS Structure." PCIM Asia 2011.



#### 福知 輝洋

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パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。



#### 金子 悟史

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パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。

# 「V シリーズ」 IGBT モジュールの系列拡大 — 小型フレキシブル PIM —

Expansion of the IGBT Module “V Series”  
— Flexible PIM —

小松 康佑 KOMATSU Kosuke

甲斐 健志 KAI Kenshi

塩原 真由美 SHIOHARA Mayumi

富士電機は、産業機器の省エネルギーを実現するための IGBT モジュールを設計・開発し、社会に供給してきた。その適用範囲は多岐に渡っている。今回、小容量帯（～ 50 A）機器の高効率化・小型化・軽量化を目的として、小型フレキシブル PIM（Power Integrated Module）を開発し、系列化した。IGBT・FWD（Free Wheeling Diode）素子に第 6 世代「V シリーズ」を適用し、銅ベースレスのパッケージにより、取付け面積で 45% の小型化、質量で 75% の軽量化を達成した。ピン端子の形状は、顧客のニーズに応じてプレスフィットピンとソルダピンから選択できる。

Fuji Electric has been engaged design and development of insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules for society to achieve energy efficiency in industrial machinery. These modules have a wide range of applications, and we have now developed a lineup of flexible power integrated modules (PIMs) for the purpose of increasing the efficiency and reducing the size and weight of low power devices (up to 50 A). For the IGBT free-wheeling diode (FWD), we have used the 6th generation “V series” and have reduced by 45% in footprint size and by 78% in weight by use of a copper baseless package. As for the pin terminal configuration, customers can choose between press-fit pins and solder pins according to their needs.

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクスの分野では、従来、インバータ・コンバータ回路が電力の効率的変換に使用されてきた。現在、電力変換素子の主流は IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）である。

富士電機は、IGBT・FWD（Free Wheeling Diode）など複数の素子を 1 パッケージ化した IGBT モジュールを開発してきた。これをインバータ・コンバータ回路システムに用いて、主に産業分野の機器の省エネルギー化に貢献している。最近では、その応用分野は産業分野だけでなく、家電製品から電気鉄道に至るまで多岐にわたっている。各分野の顧客からは、高効率化・小型化・低価格化が強く求められている。家電製品のなかでは、特にエアコン市場などからその要求が強い。一方、半導体素子の小型化・高性能化により、従来は中容量のパッケージで対応していた定格電流の領域が、さらに小型のパッケージで対応できるようになってきている。このように、小型で小容量の IGBT モジュールの需要は、家電製品に加えて産業用途においても拡大している。

これらの需要に対し、富士電機では新しい小容量 IGBT モジュールとしてプレーキ付きインバータ・コンバータ用モジュール“小型フレキシブル PIM（Power Integrated Module）”を開発し、系列化した。

電気特性面では、最新の第 6 世代「V シリーズ」IGBT チップ・FWD チップを搭載し、低損失・小型化を実現している。構造面では、従来の IGBT モジュール製品とは異なり、銅ベースを使用しないことにより大幅な小型化・軽

量化を実現した。また、環境規制の RoHS 指令<sup>(注)</sup>に対応した鉛フリーパッケージである。

## 2 定格・外形

小型フレキシブル PIM の製品系列を表 1 に、外観を図 1 に示す。1,200 V 系は定格電流 10 ～ 35 A の範囲で 5 型式、

表 1 小型フレキシブル PIM の製品系列

定格電圧	定格電流	端子形状	パッケージ	型式名
1,200 V	10 A	プレス フィット ピン	M726	7MBR10VKA120-50
	15 A			7MBR15VKA120-50
	15 A		M727	7MBR15VKB120-50
	25 A			7MBR25VKB120-50
	35 A			7MBR35VKB120-50
	10 A	ソルダ ピン	M728	7MBR10VKC120-50
	15 A			7MBR15VKC120-50
	15 A		M729	7MBR15VKD120-50
	25 A			7MBR25VKD120-50
	35 A			7MBR35VKD120-50
600 V	10 A	プレス フィット ピン	M726	7MBR10VKA060-50
	15 A			7MBR15VKA060-50
	20 A			7MBR20VKA060-50
	30 A			7MBR30VKA060-50
	50 A		M727	7MBR50VKB060-50
	10 A	ソルダ ピン	M728	7MBR10VKC060-50
	15 A			7MBR15VKC060-50
	20 A			7MBR20VKC060-50
	30 A			7MBR30VKC060-50
	50 A		M729	7MBR50VKD060-50

〈注〉 RoHS 指令：電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

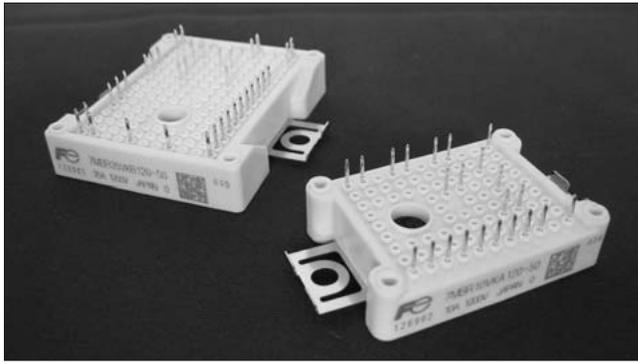


図1 小型フレキシブル PIM

600 V 系は定格電流 10 ～ 50 A の範囲で 5 型式を系列化した。さらに、端子形状が 2 種類あるため計 20 型式である。パッケージは容量に応じて、M726, M728, M727, M729 の 4 種類がある。

系列の製品は、いずれも三相コンバータ部、三相インバータ部、ブレーキ部および NTC (Negative Temperature Coefficient) サーミスタで構成されている。サーミスタによってモジュール内部のケース温度をリアルタイムにモニタすることで、異常時の確実な検出と保護を可能にしている。

また、顧客の組立工程に応じてモジュール端子の先端形状が選択できるように、プレスフィットピンのパッケージ (M726, M727) と、ソルダピンのパッケージ (M728, M729) の 2 種類を用意している。

### 3 電気的特性

インバータ部およびブレーキ部には、最新の V シリーズ IGBT および FWD を採用している<sup>(1)~(4)</sup>。

V シリーズは、これまでの「U シリーズ」で開発したフィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲート構造を進化させている。小容量帯の製品に搭載するために、V シリーズの IGBT や FWD のチップ厚さを薄くし、かつ、チップ内のキャリア濃度分布を最適化することにより、チップの小型化と損失低減を達成した。V シリーズの特徴を次に示す。

- (a) FS 構造とトレンチゲート構造の最適化によるオン電圧  $V_{CE(sat)}$  とスイッチング損失の低減
- (b) 最高ジャンクション温度 175℃保証
- (c) 損失とノイズのトレードオフ改善<sup>(3)</sup>
- (d) ゲート抵抗  $R_g$  によるターンオン  $di/dt$  の制御性向上

図 2 に、7MBR35 VKD120-50 の  $V_{CC}=600V$ 、 $I_C=35A$ 、 $R_g=12\Omega$ 、 $T_j=150^\circ C$  におけるスイッチング波形を示す。ターンオフでは定格電圧を超える電圧サージは観察されず、逆回復では発振のないソフトリカバリー波形を実現している。

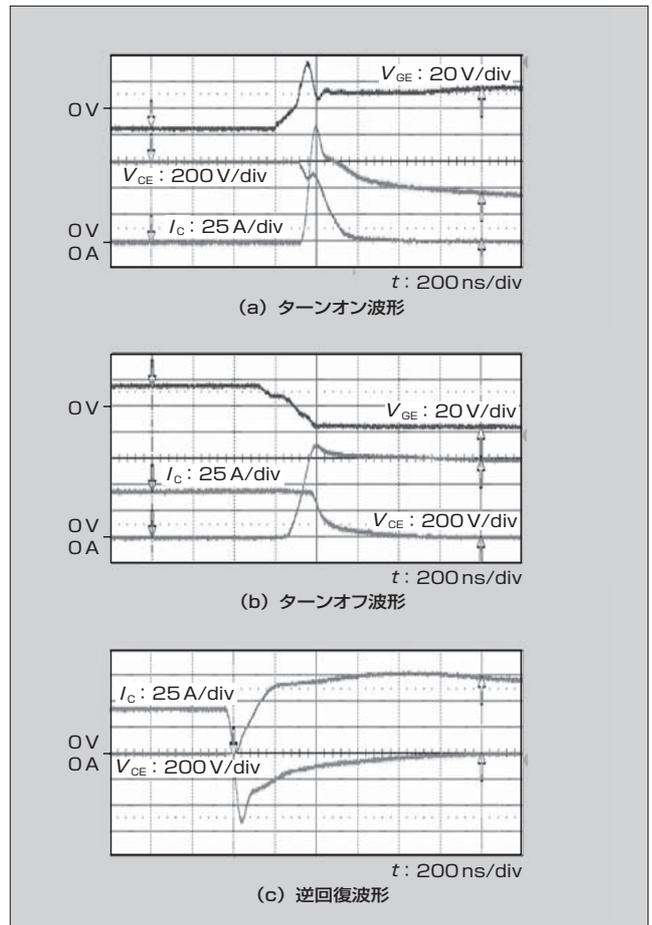


図2 スwitching波形 (「7MBR35VKD120-50」)

### 4 パッケージ構造

#### 4.1 小型化・軽量化

小型化・軽量化を達成するために、DCB (Direct Copper Bonding) 基板の外周部の寸法および回路パターン間の寸法を最適化した。外周部は、端子ケースとの嵌合 (かんごう) を考慮するとともに、回路パターンを最大限確保できるように設計した。また、回路パターン間は、絶縁性能の維持と回路パターンの最大化を両立する寸法にした。この結果、従来品と同等の絶縁耐量・信頼性を確保しつつ、銅ベースを不要にした。これにより、従来品に比べて大幅な小型化・軽量化に成功した。また、モジュールをクランプで放熱フィンに取り付ける構造を採用したことで、モジュールが小型・軽量になった。さらに、DCB 基板への締め付け時の応力も緩和している。

表 2 に、小型フレキシブル PIM の外形と質量を示す。M727, M729 パッケージは、50 A/600 V、15 ～ 35 A/1,200 V に対応している。従来品で同じ定格電流の M711 パッケージと比較すると、小型フレキシブル PIM は、取付け面積で 45%、質量で 75% 削減した。これにより、顧客装置の小型化・低コスト化に大きく貢献できる。

さらに、製品表示と製品管理のために DMC (Data Matrix Code) のレーザ捺印を行っている。長期保管や過

表 2 小型フレキシブル PIM の外形と質量

シリーズ名	小型フレキシブル PIM		EP2 (従来品)
パッケージ名	M726, M728	M727, 729	M711
定格電流/定格電圧	10A, 15A, 20A, 30A/600V 10A, 15A/1,200V	50A/600V 15A, 25A, 35A/1,200V	50A, 75A, 100A/600V 25A, 35A, 50A/1,200V
外形図			
寸法	M726: L62.8×W33.8×H16.4 (mm) M728: L62.8×W33.8×H15.5 (mm)	M727: L56.7×W62.8×H16.4 (mm) M729: L56.7×W62.8×H15.5 (mm)	L107.5×W45×H20.5 (mm)
質量	25 g	45 g	180 g

酷な環境下の保管でも、高いトレーサビリティが期待できる。

#### 4.2 端子配置, 端子形状

図 3 にピン端子の配置を、図 4 にピン端子の先端形状を示す。小型フレキシブル PIM は、ピン端子がモジュール上面から出る構造を採用している。ピン端子配置はモジュール上面内のほぼ全面から任意に選択できるので、ピン端子とアース間の絶縁距離を十分確保しつつ、さまざまな端子配置の要求に応えられる。

端子の先端形状は、顧客の組立工程に合わせてソルダピンとプレスフィットピンの 2 種類から選択できる。従来品のプレスフィットピンは、比較的定格電流が大きい従来パッケージの製品で、はんだフリーの組立工程に対応している<sup>(5)</sup>。小型フレキシブル PIM では、小型化するために最適な形状のプレスフィットピンを開発し、従来品と同等の

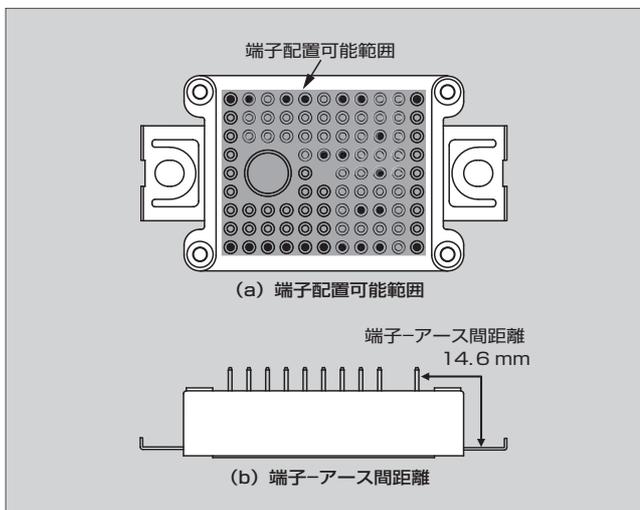


図 3 ピン端子の配置

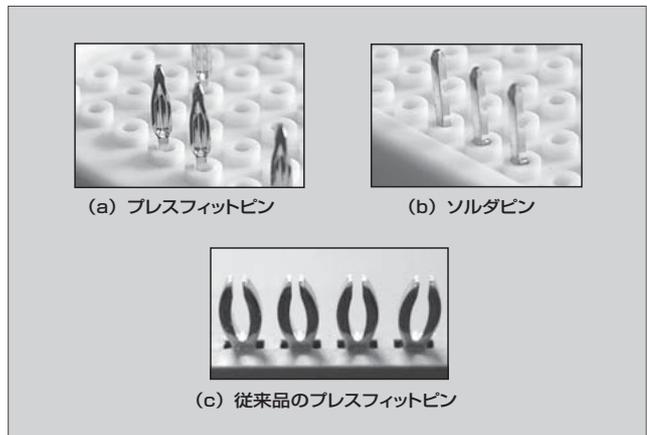


図 4 ピン端子の先端形状

接合信頼性を確保している。

パッケージは、環境対策として RoHS 指令に対応した鉛フリーパッケージとしている。

#### 5 回路構成

図 5 に、小型フレキシブル PIM の回路構成を示す。三相のコンバータ部、三相のインバータ部、ブレーキ部および NTC サーミスタを 1 パッケージに収めているため、1 台で三相交流インバータを構成できる。これにより、インバータシステムの小型化および顧客の設計の効率化が期待できる。

さらに、従来の PIM 製品と異なり、直流中間電圧マイナス側 (N ライン) を分離している。これにより、顧客装置においてシャント抵抗や電流コアなどで各相の電流検出を行うことができ、簡易ベクトル制御や、より確実な過電流保護が可能になる。

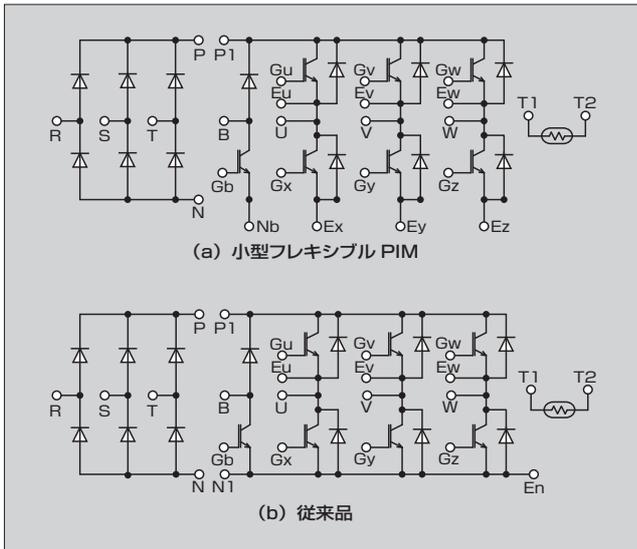


図5 小型フレキシブル PIM の回路構成

6 あとがき

ベースレス構造による小型化・軽量化ならびにお客さまの適用が容易な簡易パッケージをコンセプトとした小容量 IGBT モジュール“小型フレキシブル PIM”の製品系列と、その特徴について述べた。本製品は、最新の第 6 世代「V シリーズ」IGBT および FWD を採用して電気特性を最適化しており、小容量インバータ装置に求められる高効率・小型・軽量に大きく貢献できるものと確信する。

今後も、素子の高性能・高信頼性を確保しつつ、市場要求を満足する小容量 IGBT モジュールの開発・系列化を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 仲野逸人ほか. 第6世代IGBTモジュール「VシリーズPIM」. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.388-392.
- (2) 高橋孝太ほか. IGBTモジュール「Vシリーズ」の系列化. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.380-383.
- (3) Igarashi, S. et al. Low EMI Techniques for New Generation IGBT Modules. Proc. PCIM. Europe. 2007 Powermodule p.13-17.
- (4) Kobayashi, Y. et al. The New concept IGBT-PIM with the 6th generation V-IGBT chip technology.
- (5) 関野裕介ほか. 「Vシリーズ」チップ搭載のPIM・6in1 IGBTモジュール系列. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.379-383.



小松 康佑

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パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。



甲斐 健志

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。



塩原 真由美

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パワー半導体事業統括部産業モジュール技術部。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



# インバータエアコン用小容量 IPM

Compact Type IPM for Inverter Air Conditioners

山田 忠則 YAMADA Tadanori

傳田 俊男 DENTA Toshio

白川 徹 SHIRAKAWA Toru

省エネルギー規制（APF 準拠）に適したインバータエアコン向けに、省エネルギー性能をさらに向上させた小容量 IPM を開発した。フィールドストップ型トレンチゲート構造の IGBT を、高速 FWD と組み合わせることで、エアコンにとって重要な軽負荷動作時の損失を約 25% 低減している。さらに、高熱伝導の絶縁基板を適用することで熱抵抗を低減し、損失低減による効果と合わせて温度上昇を抑制している。また、制御回路には、過電流保護機能や温度センシング機能、低電圧保護機能などの保護機能を内蔵している。

We have developed a compact type intelligent power module (IPM) that achieves greater improvement of energy-saving performance for inverter air conditioners that meet energy-saving regulations, conformable to the annual performance factor (APF) specifications. By combining the insulated gate bipolar transistor (IGBT) of the field-stop type trench gate structure with high-speed free-wheeling diodes (FWDs), we have reduced loss during light-load operation, which is an important factor for air conditioners, by about 25%. Moreover, using an insulated metal substrate with high thermal conductivity reduces thermal resistance, thereby suppressing temperature rise by incorporating the effect by the loss-reduction. Moreover, the control circuits incorporate several protective features such as an overcurrent protection function, a temperature sensing function, and a low-voltage protection function.

## 1 まえがき

最近の世界経済は、欧州市場を中心とした金融危機により停滞感はあるものの、アジア地域などの新興国市場においては堅調に成長している。生活水準の向上に伴う家庭用の電気製品の増加により、エネルギー消費は世界規模で上昇を続けている。これに伴い、家庭用の電気製品においても温室効果ガスの削減、エネルギー消費の効率化に向けてさまざまな省エネルギー（省エネ）規制が制定され、地球環境保護の意識がますます高まっている。

家庭用の電気製品別のエネルギー消費比率は、先進国の場合、エアコンが全体の約 1/3～1/4 と非常に大きな割合を占めており、新興国も生活水準の向上により同様の構成比率に向かうものと考えられる。エアコンの省エネ規制としては、主に冷房運転でのエネルギー消費効率を示す COP がこれまで用いられており、消費者が製品を購入する際には、重要な選択基準の一つとなっていた。さらに、この省エネ規制の動向は、1 年間の実使用状態での省エネ性能を表示する APF<sup>(注2)</sup> に切り替わりつつある。これらの省エネ規制に適合するために、エアコンのコンプレッサモータの駆動回路としてインバータ方式が急速に拡大している。

富士電機は、インバータエアコン向けに、省エネ性能の

さらなる向上と小型、低ノイズ、高信頼性を実現した三相インバータブリッジ回路と制御回路・保護回路を内蔵した小容量 IPM (Intelligent Power Module) の開発を行った。

## 2 小容量 IPM の概要

図 1 に小容量 IPM の外観を、表 1 にラインアップと主要特性を示す。製品の外形は W43 × D26 × T3.7 (mm) と小型であり、AC240 V 系のパッケージ絶縁規格である UL508 に適合している。また、パッケージの左右に出ているリード端子は、はんだめっき処理をしているので直接プリント基板に実装することができ、エアコン装置などの小型化が可能である。

ラインアップは、三相インバータブリッジ回路の IGBT/FWD 定格が 600 V/15 A であり、過熱保護機能の違いにより 3 種類ある。

図 2 に小容量 IPM の回路構成を、図 3 に断面構造を示

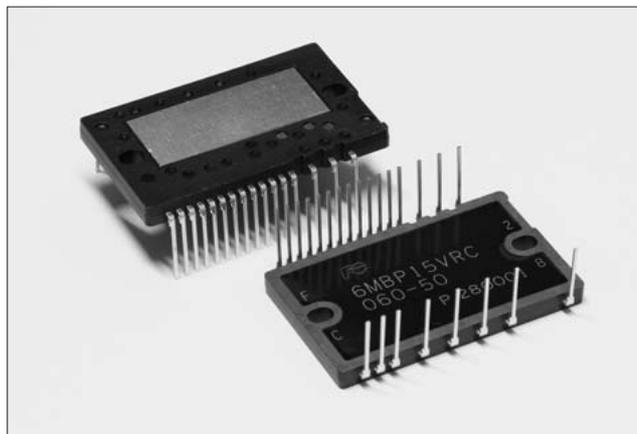


図 1 インバータエアコン用小容量 IPM

<注 1> COP (Coefficient of Performance: エネルギー消費効率): エアコンなどのエネルギー消費効率を表す指標の一つで、使ったエネルギーの何倍 (冷房・暖房) の仕事ができるかを示す値である。数値が大きいほど効率が良い。

<注 2> APF (Annual Performance Factor: 通年エネルギー消費効率): 年間を通じてエアコンを使用したときに、1 年間に必要な冷暖房能力を、1 年間でエアコンが消費する電力量 (期間消費電力量) で除したものである。数値が大きいほど効率が良い。

表1 小容量 IPM のラインアップと主要特性

項目	仕様		
型式	6MBP15VRA 060-50	6MBP15VRB 060-50	6MBP15VRC 060-50
$V_{CE}$	600V		
$I_C$	15 A		
$I_F$	15 A		
$V_{CE(sat)}$	1.8 V (typ.)		
$V_F$	1.65 V (typ.)		
$V_{iso}$	AC 1.5 kVrms		
$T_j$	-40 ~ +150 °C		
温度保護	LT	OH	LT+OH
保護機能	過電流保護, 低電圧保護, 異常アラーム出力		

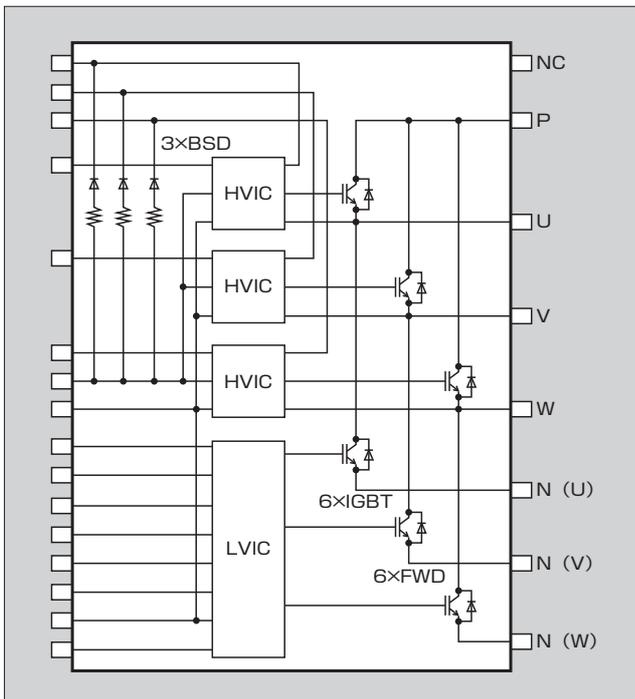


図2 小容量IPMの回路構成

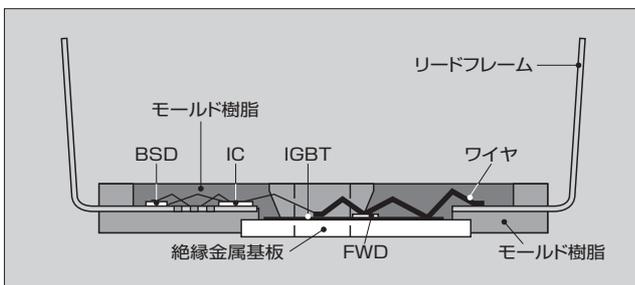


図3 小容量IPMの断面構造

す。小容量 IPM は、低損失 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と高速 FWD (Free Wheeling Diode) からなる三相インバーブリッジ回路が絶縁金属基板上に搭載されている。この三相インバー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) が 1 チップならびにハイサイドの

IGBT を駆動するための HVIC (High Voltage Integrated Circuit) が 3 チップ必要である。これらを銅リードフレーム上に直接搭載している。

また、ハイサイドのドライブ回路用に BSD (Bootstrap Diode) が必要となる。相ごとに絶縁された電源を容易に構成するために、電流制限抵抗を内蔵した 3 チップの BSD を銅リードフレーム上に直接搭載している。

### 3 製品設計

#### 3.1 パッケージ設計

産業用途向けの一般的なパワーモジュールおよび IPM の場合、IGBT などのパワーデバイスの搭載用絶縁基板としては、アルミナ ( $Al_2O_3$ ) DCB (Direct Copper Bonding) 基板が一般的である。小容量 IPM のターゲットアプリケーションであるエアコンなどの家庭用の電気製品では、プリント基板への実装はウェーブはんだ付け方式またはリフローはんだ付け方式が用いられる。これらのはんだ付けを可能にするためには、高いはんだ耐熱性が求められる。チップの封止樹脂としてはエポキシ系樹脂が必須である。しかし、エポキシ系樹脂は、アルミナ DCB 基板のアルミナセラミックスとの接着強度が低く、はんだ耐熱性に対して低いという課題がある。

小容量 IPM では、絶縁層にエポキシ系樹脂を適用したアルミニウムベース絶縁基板を用いることで封止樹脂との高い接着強度を確保し、ウェーブはんだ付け方式を可能にしている<sup>(1)</sup>。また、アルミナ DCB 基板に比べて低価格なアルミニウムベース絶縁基板を用いることにより、家庭用の電気製品の重要なポイントでもある低価格というニーズにも対応できる。図 4 に、アルミニウムベース絶縁基板とアルミナ DCB 基板の断面構造の比較を示す。

このアルミニウムベース絶縁基板の絶縁材料として、エポキシ樹脂材料とフィラー粒径、形状を最適化した製品を適用することにより、一般的なアルミニウムベース絶縁基板に比べて約 3 倍の高熱伝導率と高い絶縁信頼性を実現した。図 5 に、このアルミニウムベース絶縁基板の絶縁信頼性を示す V-t 特性を示す。一般的な家庭用の電気製品の製品寿命と考えられる 10 年に相当する期間において、絶縁耐圧 1.5 kV の実力があることを確認している。

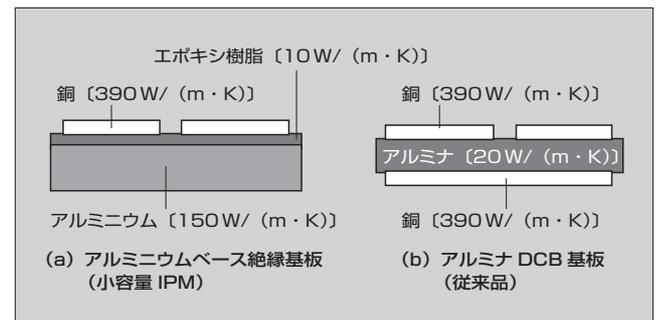


図4 絶縁基板の断面構造

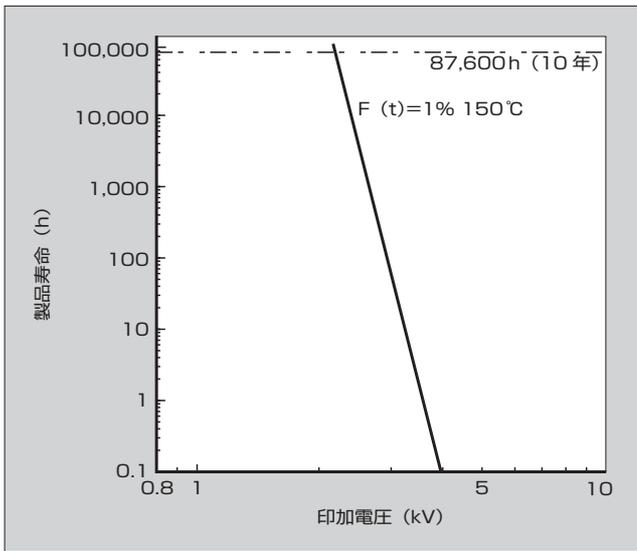


図5 アルミニウムベース絶縁基板のV-t特性

### 3.2 デバイス設計

先にも述べたように、エアコンの省エネ性能は、APFが主流となっている。エアコンの年間の約79%は軽負荷状態での動作となっており、IGBTとFWDの設計としては、APFに適合した低負荷動作時の損失低減がポイントとなる。

#### (1) IGBT設計

図6に、IGBTの断面構造の比較を示す。小容量IPMでは、オン電圧とターンオフ損失のトレードを改善するために、従来構造であるノンパンチスルー(NPT)型のプレーナ構造IGBTに代えて、第6世代の技術であるフィールドストップ(FS)型のトレンチゲート構造IGBTの技術を適用している。

図7に、IGBTの常温と高温下におけるオン電圧とコレ

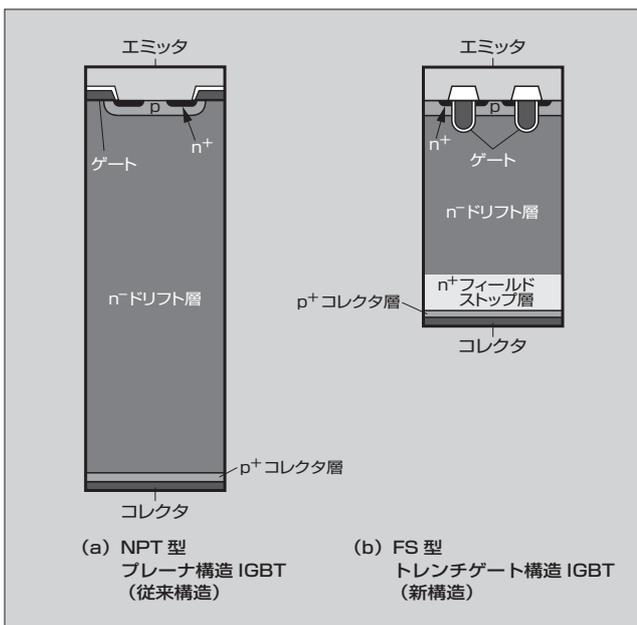


図6 IGBTの断面構造

クタ電流特性を示す。FS型トレンチゲート構造のIGBTでは、標準の第6世代IGBTをベースに表面構造を最適化することにより、APFで重要となる軽負荷領域でのオン電圧を従来品に比べて約0.3V低減している。

図8に、従来品とFS型トレンチゲート構造におけるIGBTのオン電圧とターンオフ損失を示す。前述の表面構造の最適化を行うと同時にライフタイム制御の最適化を行うことで、同一スイッチング損失におけるオン電圧を約30%低減し、トレードオフを改善している。ターンオフ損失のコレクタ電流依存性としては、FS型トレンチゲート構造のIGBTは従来品に比べ、定格電流領域では約30%損失が低く、エアコンの軽負荷動作となる3A以下の電流領域では約50%の低損失化を実現している。

#### (2) FWD設計

FWDを設計する上でのポイントは、FWDのVF特性ならびにIGBTのターンオン損失として全体損失に大きな影響を与えるリカバリースイッチング特性の改善である。

図9にFWDのVF特性の温度依存性を、図10にFWD

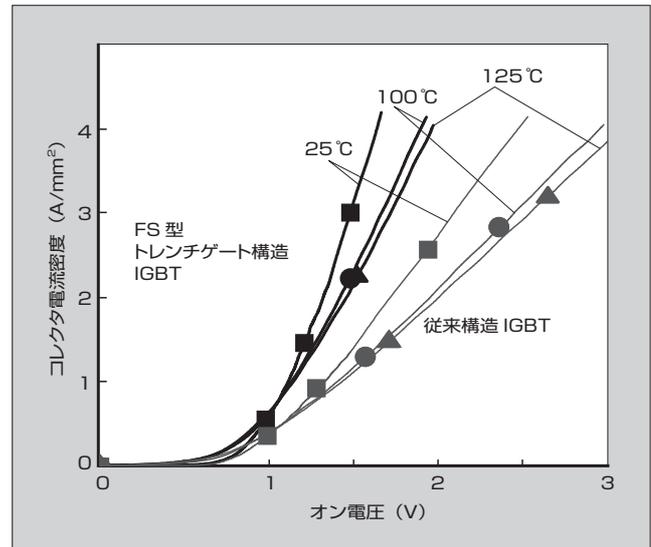


図7 オン電圧とコレクタ電流特性

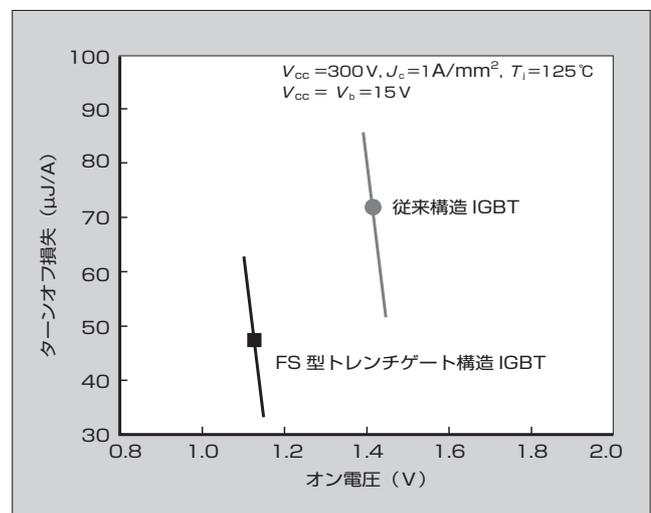


図8 オン電圧とターンオフ損失

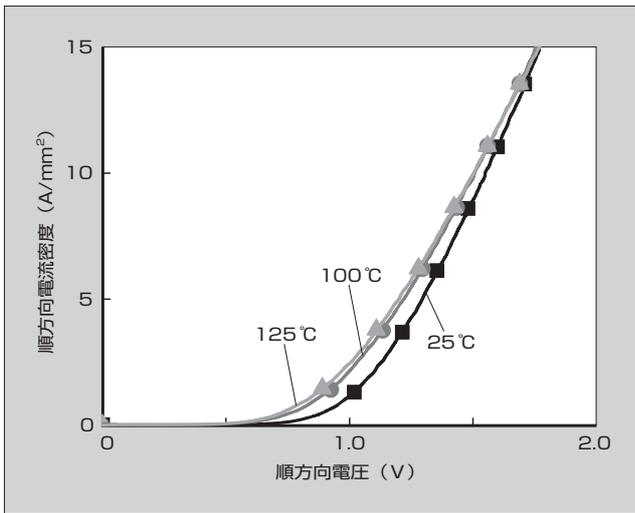


図9 FWDのVF特性の温度依存性

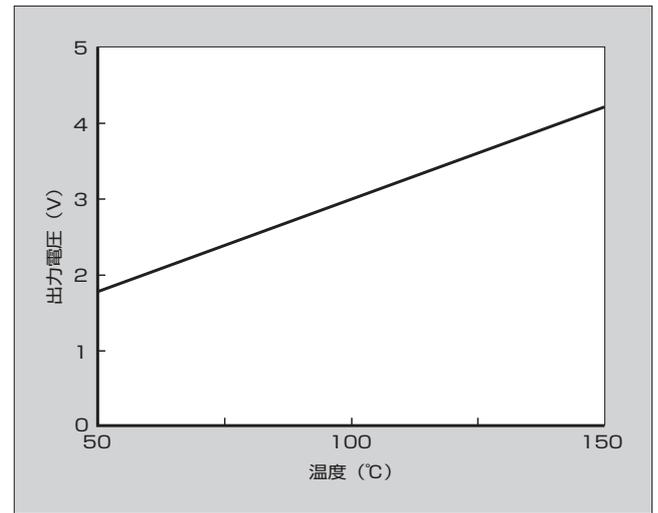


図11 リニア温度センサの出力電圧特性

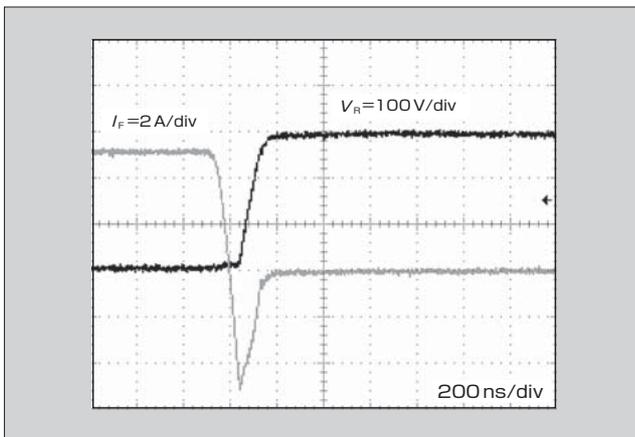


図10 FWDのリカバリースイッチング特性

のリカバリースイッチング特性を示す。FWDは、アノード拡散プロファイルの最適化およびライftime制御を最適化することにより、温度依存性が少なく低いVF特性と、高速かつ低ノイズのリカバリースイッチング特性とを実現している。

### 3.3 制御回路設計

家庭用の電気製品では、IPMなどのパワーデバイスをマイコンや制御ICからの制御信号で直接駆動することが一般的である。そこで、小容量IPMも、インバータの入力端子は3.3Vまたは5Vのマイコンから直接駆動できる仕様となっている。

また、ハイサイドのドライブ回路はHVICと内蔵BSD回路によって構成されており、外部での絶縁回路やレベルシフト回路が不要であり、かつ最小の外付け部品で小容量IPMを動作させることが可能である。

小容量IPMに搭載されている保護機能としては、過電流保護(OC)、低電圧動作保護(UV)、リニア温度センサ(LT)、過熱保護(OH)および異常アラーム出力(FO)である。LTとOHの組み合わせにより3種類の製品をラインアップしている。

図11に、リニア温度センサの出力電圧特性を示す。このリニア温度センサは、LVICに内蔵のセンサによりケース温度を常温からチップ温度の最高値150°Cまでを直線かつ高精度に測定できる。高度な温度ディレーティング制御などのアプリケーションの実現が可能になる。

## 4 小容量IPMの適用効果

図12に、4kW出力の家庭用エアコンを想定した小容量

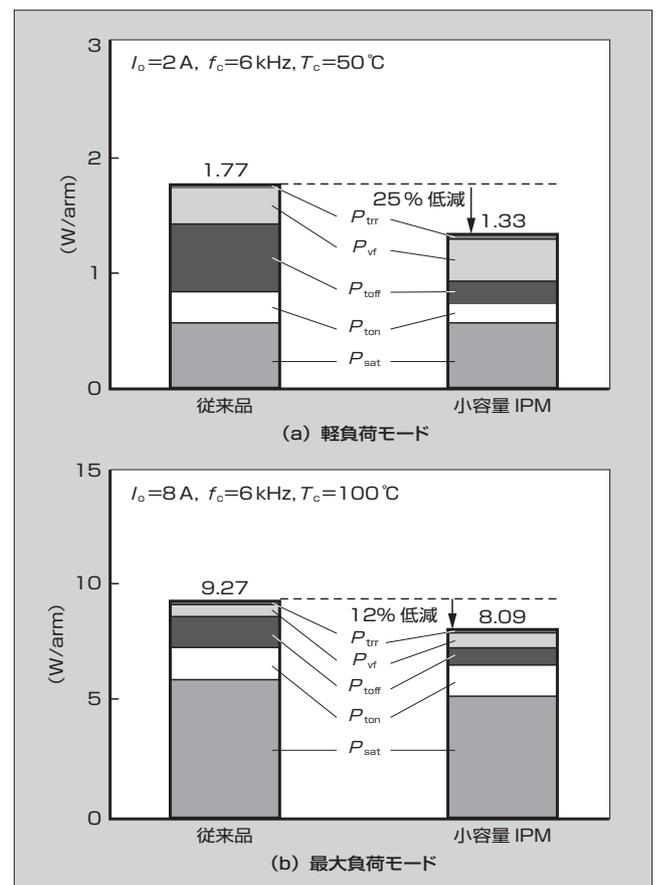


図12 損失シミュレーションの結果(4kW出力エアコン)

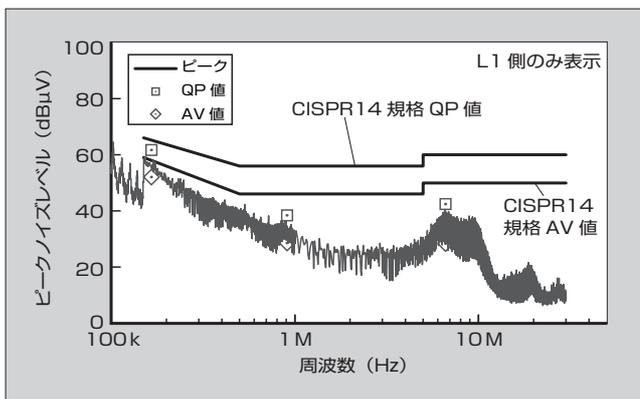


図13 伝導ノイズ測定結果 (2.6 kW 出力エアコン)

IPM における IGBT および FWD の損失シミュレーションの結果を示す。

③章に示す IGBT および FWD の設計を行うことにより、APF で支配的となる軽負荷モードでは損失を約 25%、最大負荷モードにおいても約 12% 低減している。

また、伝導ノイズは、国際無線障害特別委員会の定める CISPR14 規格にのっとり評価を行った。図13に、2.6 kW 出力タイプのルームエアコンに実装した場合の伝導ノイズの測定結果を示す。単相入力の L1 側と L2 側の測定結果は同等であり、ここでは L1 側のみを示している。150 kHz から 30 MHz の周波数領域において、QP 値と AV 値のいずれも規格値をクリアしている。

## ⑤ あとがき

家庭用の電気製品であるエアコンをメインターゲットに開発した小容量 IPM の特徴と、その設計について述べた。小容量 IPM を使用することにより、三相インバータブリッジ回路部の損失を従来品に比べて 12% から 25% 低

減することが可能であり、APF などの省エネルギー性能の向上に貢献する。また、伝導ノイズは、CISPR14 規格に適合しており、装置設計を効率化できる。

小容量 IPM は、エアコンだけでなく自動販売機やエコキュートなどのヒートポンプを内蔵した機器への適用も可能であり、さらに電流ラインアップの拡充と他のアプリケーションを狙った製品化を進めていく所存である。

## 参考文献

- (1) Yamada, T et al. "Novel Small Intelligent Power Module For RAC" proc. 2012 PCIM Asia.
- (2) Onozawa, Y. et al. "Development of the next generation 1,200 V trench-gate FSIGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss" proc. 2007 ISPSD, p.13-16.



### 山田 忠則

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。



### 傳田 俊男

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パワー半導体開発統括部パッケージ実装開発部。



### 白川 徹

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パワー半導体開発統括部デバイス開発部。



# 車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術

Application Technology for Direct Water Cooling IGBT Modules in Automotive

安達 新一郎 ADACHI Shinichiro

小高 章弘 ODAKA Akihiro

長睦 文男 NAGAUNE Fumio

自動車メーカーは、ハイブリッド自動車や電気自動車などの開発を積極的に進めている。富士電機では、車載用のインバータユニットの小型化に貢献するため、直接水冷方式を用いた IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの開発を行っている。また、顧客のインバータユニットの開発を支援するため、高い放熱性能と低い圧力損失を両立するための車載用 IGBT モジュールの水冷ジャケットの構造を検討するとともに、車両運転パターンに基づいた信頼性設計などの応用技術の開発を行った。

Car manufacturers are proactively engaged in the development of hybrid vehicles and electric vehicles. To contribute to the miniaturization of in-car inverter units, Fuji Electric is developing insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules that use direct water cooling. In addition, to support customers' inverter developments, we have studied water cooling jacket structure for IGBT modules for use in automotive for realizing both high radiation performance and low pressure loss. Moreover, we have developed application technologies such as reliability design based on driving patterns of vehicles.

## 1 まえがき

CO<sub>2</sub> 排出量の削減や資源の節約に向けて、世界各国が取り組みを加速している。自動車メーカーは、電力も動力源としたハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの開発を積極的に進めている。HEV や EV ではモータを動作させるために、インバータなどのパワーエレクトロニクス (パワエレ) 技術が用いられている。その中で重要なキーコンポーネントの一つが、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールである。インバータシステムにおいて IGBT モジュールは、バッテリー電力を効率良く利用するために低損失化が求められるだけでなく、低コスト化と小型化も求められる。

富士電機では、これらの要求に応えるために、直接水冷方式を用いた IGBT モジュールを開発した。HEV や EV 化は、小型車、スポーツタイプ多目的車、高級車といったさまざまな車種に広がっている。それぞれのモータ容量・仕様に対応するため、IGBT モジュールも幅広い容量帯のラインアップが必要となり、製品系列の拡大を行っている。

本稿では、車載用直接水冷 IGBT モジュールについて説明し、これを適用する際の冷却体設計技術や信頼性設計技術について述べる。

## 2 車載用直接水冷 IGBT モジュール

### 2.1 概要

車載用直接水冷 IGBT モジュールの定格・寸法などの概要を表 1 に示す。定格電圧は 650 V、定格ピーク

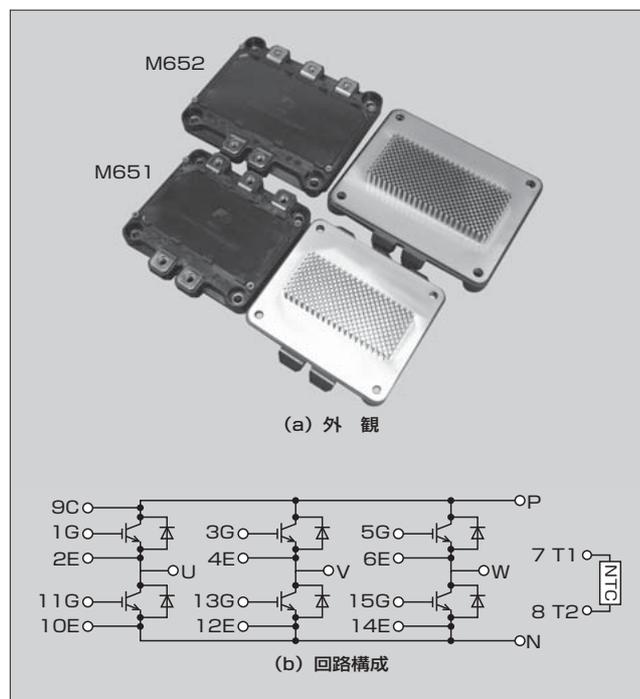


図 1 車載用直接水冷 IGBT モジュール

表 1 車載用直接水冷 IGBT モジュールの概要

パッケージ構成	製品型式	パッケージ型式	パッケージ寸法 (フィン部含む)	適用モータ容量
6 in 1	6MBI400VW-065 V	M651	L108×W105×H34 (mm)	20 ~ 30 kW
	6MBI600VW-065 V	M652	L131×W113×H34 (mm)	40 ~ 50 kW

電流は 400 A と 600 A の二つである。適用されるモータ容量は、6MBI400VW-065 V で 20 ～ 30 kW, 6MBI600VW-065 V で 40 ～ 50 kW クラスを想定している。図 1 に、外観および回路構成を示す。本製品は三相インバータ回路への適用を想定している。インバータ回路三相分の IGBT と FWD (Free Wheeling Diode), ならびに温度検出用サーミスタで構成している。

## 2.2 適用素子

パワーチップは、650 V 定格の「V シリーズ」IGBT および FWD を採用している。V シリーズは、フィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲート構造を最適化して、オン電圧とスイッチング損失を低減している。また、ゲート抵抗によるターンオン  $di/dt$  の制御性の向上を図っている<sup>(2),(3)</sup>。

## 2.3 パッケージ

小型化を実現するためには、放熱性能を向上させることが必須である。そのため、直接水冷方式のフィンを構成する個々のピン形状は、一般的に広く用いられている丸型のピンではなく、角型を用いている。図 2 に、丸ピンと角ピンでの流速分布と、1 ピン当たりの表面積比較結果を示す。ピンは 3mm, 45° のピッチで高密度に配置している。角ピンは丸ピンに比べ、ピン周辺の流速を早くできるだけでなく、1 ピン当たりの表面積を大きくできることから、冷媒を介した熱交換を効率良く行うことができる。

また、絶縁基板には従来のアルミナ ( $Al_2O_3$ ) 基板ではなく、熱伝導率が高い窒化けい素 ( $Si_3N_4$ ) 基板を用いることで、放熱性の向上を図っている。窒化けい素は、ベース材に用いている銅との線膨張係数の差がアルミナに比べて大きい。そのため、信頼性試験の一つである温度サイクル試験時には、窒化けい素基板と銅ベースの接合材であるはんだに大きなひずみが発生し、アルミナ基板に比べてはんだの劣化が速い。高い温度サイクル耐量を持つはんだ材

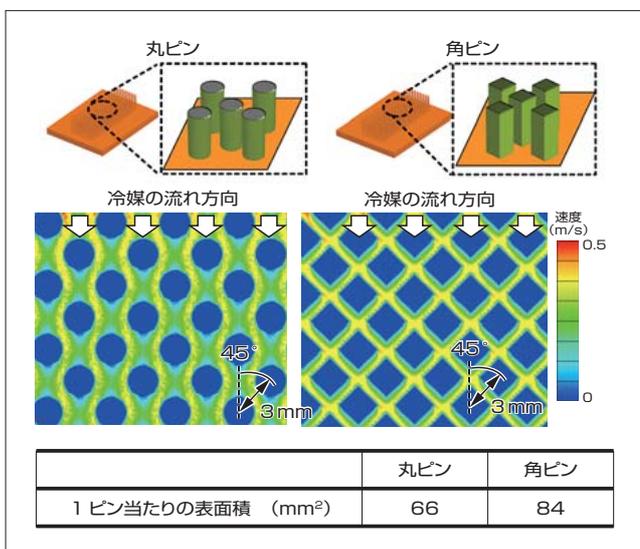


図 2 丸ピンと角ピン

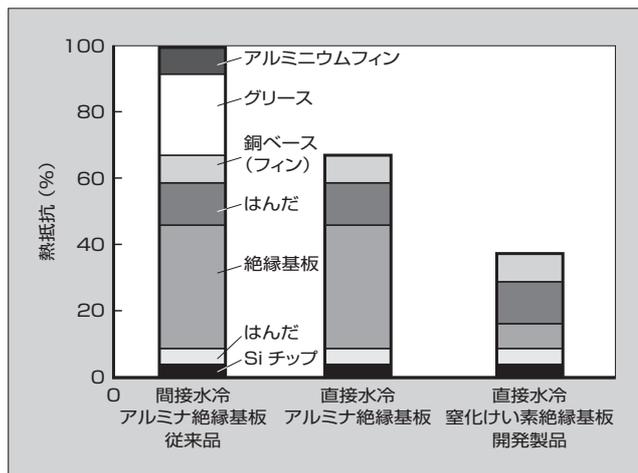


図 3 従来構造と直接水冷構造の熱抵抗比較

を開発して適用することで、高い放熱性能を実現できる窒化けい素基板を採用できるようにした。

図 3 に、従来品の間接水冷 IGBT モジュールとアルミナ基板および窒化けい素基板を用いた場合の、直接水冷 IGBT モジュールの熱抵抗を比較した結果を示す。直接水冷にすることでサーマルグリスが不要になり、その熱抵抗を排除した。さらに、角ピンと高熱伝導率の窒化けい素基板を採用することで、従来品の間接水冷アルミナ絶縁基板に比べて熱抵抗を 60% 低減している<sup>(4),(5)</sup>。

## 3 冷却体設計技術

直接水冷方式において、高い放熱性能と低圧力損失を両立できるように、IGBT モジュールを取り付ける水冷ジャケット構造を最適化する必要がある。また、IGBT モジュールはシール材を介して水冷ジャケットに取り付けるため、温度や水圧が変化した場合でも水漏れを防止するシール技術が必要である。これらは、間接水冷方式を採用していたユーザにとって新たな検討課題である。

富士電機では、ユーザが冷却体を設計するための技術支援として、高放熱性能と低圧力損失化を実現するための水冷ジャケットの構造と、その気密性能について検討した。

### 3.1 水冷ジャケット構造

水冷ジャケットには、通常、アルミニウム材が用いられる。銅フィンには腐食を防ぐためのニッケルめっきを施している。しかし、フィンと水冷ジャケットを接触させた場合、熱変形によってニッケルめっきと水冷ジャケットがこすれることでめっきが剥がれ、異種金属接触によるアルミニウムの腐食などが懸念される。そこで、フィン先端と水冷ジャケット底面には隙間を設ける必要がある。しかし、フィンとジャケットの接触を避けるため、過剰に隙間を設けた場合、圧力損失は下げることができものの、放熱性能が大きく低下してしまう。また、冷媒をフィン全体に均一に流すためには、導入口に拡散壁を設けることが重要であるが圧力損失が上昇してしまう。そこで、圧力損失と熱

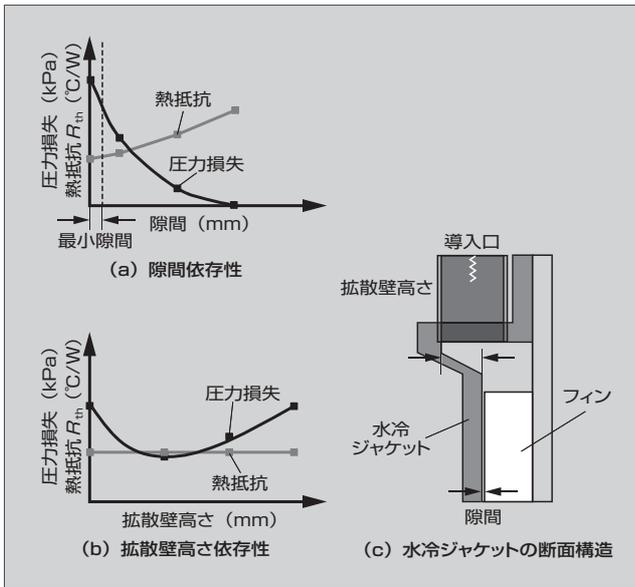


図 4 熱抵抗と圧力損失の関係

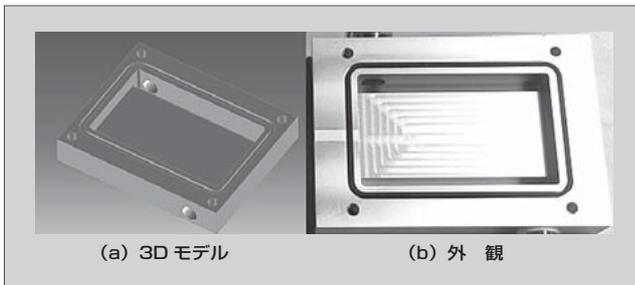


図 5 推奨水冷ジャケット構造

抵抗の関係を調査するに当たり、フィン先端と水冷ジャケット底面部の隙間、冷媒の導出入口の拡散壁高さをパラメータとし、熱流体解析を用いて検討した。検討結果を図 4 に示す。

隙間を変えた場合、熱変形時にもフィンと水冷ジャケットが接触しない最小隙間（図 4 (a)破線）を超えた領域においてもトレードオフの関係がある。また、拡散壁高さには、最も圧力損失が小さくなる高さが存在することが分かる（図 4 (b)）。この解析結果を反映した推奨水冷ジャケット構造（図 5）により、圧力損失が小さく、かつ高い放熱性能を得ることができる。

### 3.2 水冷ジャケットの気密性能

最適化した水冷ジャケット構造において気密性能を検討するため、図 5 に示す水冷ジャケットとシール材である Oリングを用いた気密試験を実施した（図 6）。水冷ジャケットの出口を封止し、加圧装置でジャケット内の空気圧を高め、水没させることで、空気漏れの有無を確認した。自動車のインバータの気密性能は、最大 200 kPa まで要求されることが多い。試験結果から、250 kPa においても空気漏れは発生しておらず、市場要求を満足する仕様となっていることを確認した。

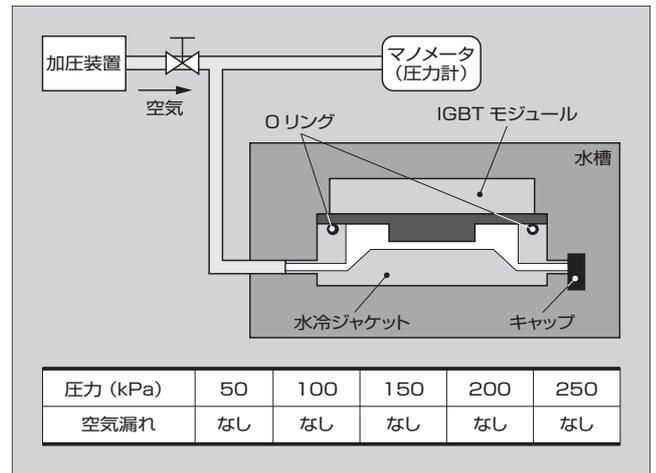


図 6 気密試験

## 4 信頼性設計技術

車載用 IGBT モジュールの使用環境は、産業用 IGBT モジュールと比べて、外気温度の変化や振動などが大きく、過酷な環境下で使用される。特に、外気温度の変化は、IGBT モジュールのパワーサイクル寿命に大きく影響する<sup>(6)</sup>。パワーサイクル寿命とは、電流の断続が繰り返されることで生じる温度変化  $\Delta T$  によって、チップ下はんだの劣化が進むことで熱抵抗が上昇するまでの時間、または内部配線のワイヤ破断が発生するまでの時間であり、製品寿命に相当する。インバータは HEV や EV においては動力源であり、その心臓部である IGBT の製品寿命の設計は重要である。しかしながら、実際の走行実験により製品寿命を評価するためには、年単位の時間と多大な労力を要する。

富士電機では、パワエレ回路シミュレータ PSIM を用いて、実車運転を想定したパワーサイクル寿命の推定を行った。

### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーションを実施するためには、デバイス特性、インバータ動作条件および車両条件を設定する必要がある。

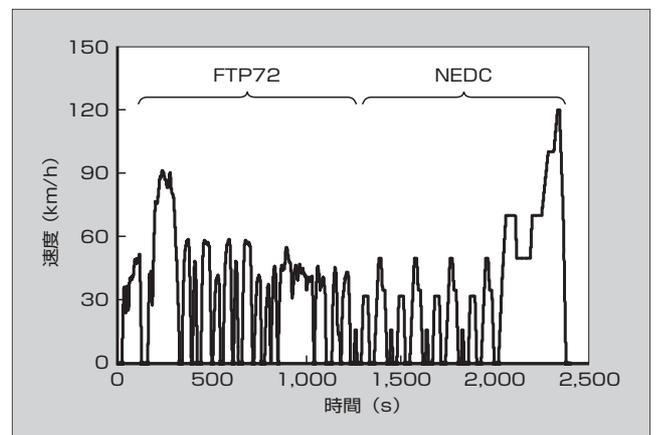


図 7 シミュレーションに用いた車両運転パターン

本シミュレーションは、6MBI600VW-065Vのデバイス特性を用い、最大出力40kWのモータを搭載し、質量1,200kg、最高速度145km/hの小型EVを想定した。また、インバータ動作条件は加速動作（力行動作）だけでなく、減速時のブレーキ動作（回生動作）も全てインバータのみで動作させており、温度サイクルとしては厳しい条件で実施した。

EVの車両運転パターンを図7に示す。運転パターンには、アメリカの都市（ロサンゼルス）走行の実運転パターンであるFTP（Federal Test Procedure）72と、欧州の市街・郊外走行パターンであるNEDC（New European Drive cycle）を組み合わせ設定した。一般的に車載用IGBTには、使用年数10～15年間、走行距離200,000～300,000km、稼働時間8,000～10,000時間という製品寿命が求められる。そのため、寿命推定を実施するための温度変化 $\Delta T$ の発生頻度の算出は、図7に示すドライブサイクルが1日3サイクル、15年間継続するものと仮定した。この場合、15年での走行距離は370,000km、稼働時間は12,000時間となる。図8に、余寿命推定までのシミュレーションのフローチャートを示す。

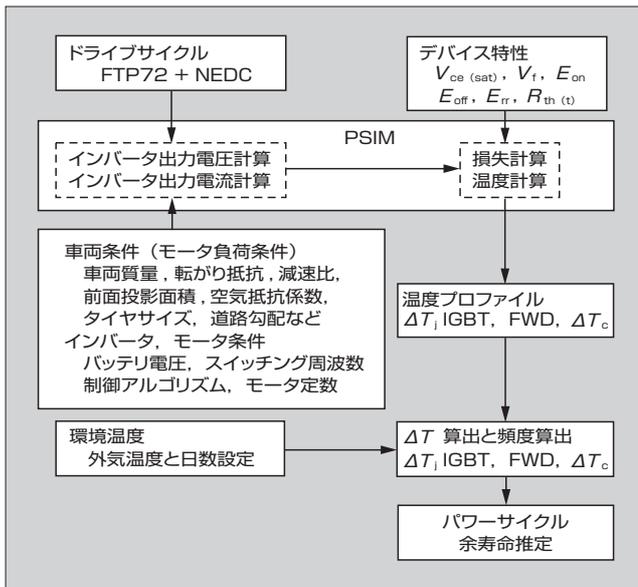


図8 シミュレーションのフローチャート

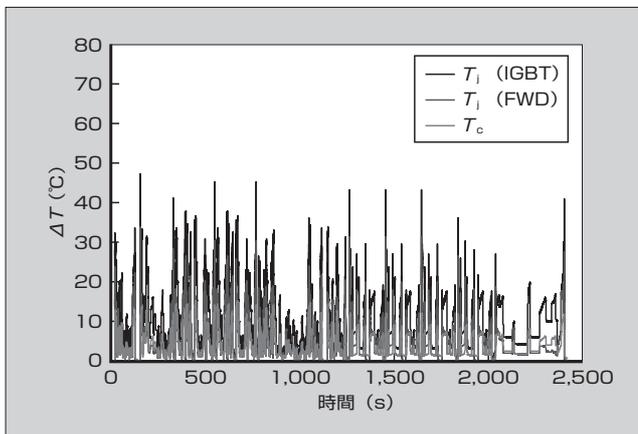


図9 1サイクルにおける素子およびケース温度変化

#### 4.2 実車運転パターンを基にした余寿命推定の結果

図9に、1サイクルにおける素子温度 $T_j$ およびケース温度 $T_c$ の変化を示す。これは自己発熱によって発生する温度の変化である。前述したように、自動車においては外気温度変化によっても $\Delta T$ が発生する。外気温度変化による $\Delta T$ を算出するため、まず図10に示すように、1年の外気温度と日数を設定した。また、外気温度にかかわらず冷媒温度は、1サイクルごとに運転開始時に65℃まで上昇し、運転終了時には外気温度 $T_a$ まで下降するものとし、外気温度変化による $\Delta T_j$ および $\Delta T_c$ は、ケース平均温度 $T_{c,avg}$

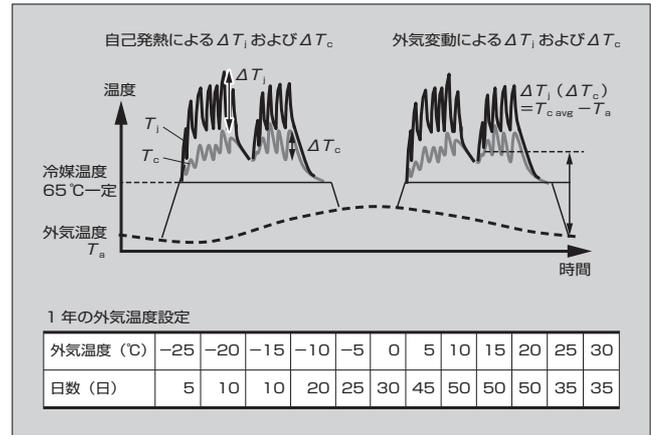


図10 自己発熱による $\Delta T$ と外気温度変化による $\Delta T$

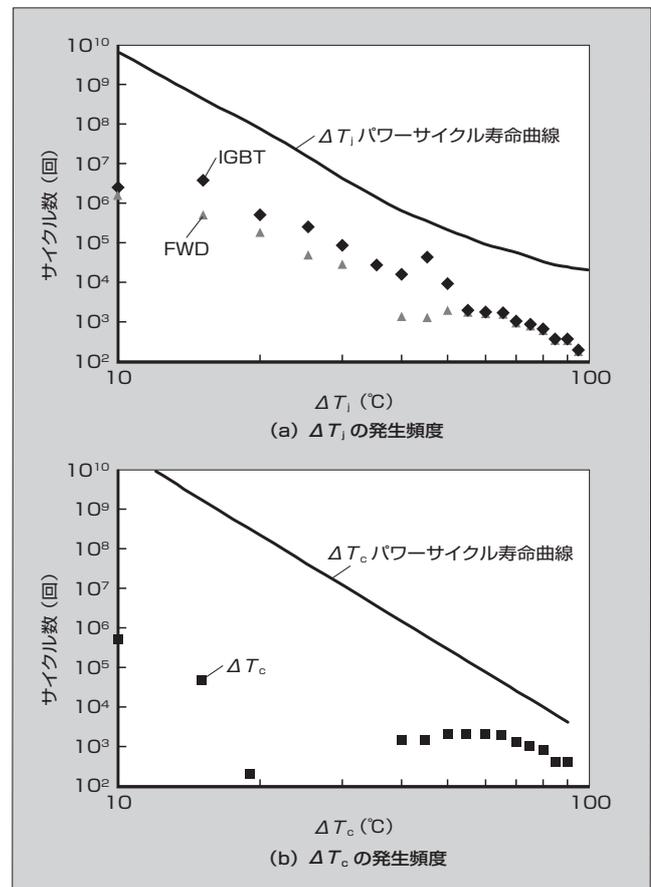


図11 15年走行時の $\Delta T_j$ および $\Delta T_c$ とサイクル数

と外気温度  $T_a$  との差として算出した (図10)。

15年走行時の  $\Delta T_j$  および  $\Delta T_c$  は、自己発熱によって発生するものと外気温度変化によるものを加算して求めた。

図11に、15年間で自己発熱と外気温度変化による  $\Delta T_j$  および  $\Delta T_c$  と発生回数を、パワーサイクル寿命曲線と併せて示す。IGBTのパワーサイクル寿命の推定方法はLESIT<sup>(7)</sup>、CIPS 2008<sup>(8)</sup>モデルなどが提案されているが、このシミュレーションではマイナー則<sup>(9)</sup>を用いて、余寿命推定を行った。

マイナー則は、ある  $\Delta T$  における実際の発生回数を  $N_{cycle}$ 、パワーサイクル寿命を  $N_{PC\ cycle}$  とした場合、 $N_{cycle}/N_{PC\ cycle}$  だけ寿命が消費され、それぞれの負荷すなわち  $\Delta T$  に対する損傷の累積値が1になったときに破壊するという考え方である。この方法により余寿命推定を行った結果、IGBT、FWDの  $\Delta T_j$  および  $\Delta T_c$  パワーサイクルは50%程度の余寿命があることを確認した。したがって、本シミュレーションで仮定した運転パターンと環境温度においては、製品寿命15年を満足できると考える。また、本手法を用いることで、これら以外の運転パターンにおいてもシミュレーションを用いて余寿命を推定することができる。

## 5 あとがき

本稿では、車載用標準IGBTモジュールの製品系列と車載用直接水冷IGBTモジュールの適用技術について述べた。今後は、大電流容量品および高耐圧品のラインアップを充実していく。

冷却体設計技術や信頼性設計技術は、ユーザのインバータ開発設計を支援するものであり、今後も製品とともに周辺技術を充実させ、より使いやすい製品を提供していく所存である。

## 参考文献

- (1) 日達貴久ほか. 車載用直接水冷IGBTモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.308-312.
- (2) 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.

- (3) Nakano, H. et al. "600 V trench-gate IGBT with Micro-P structure", Proc. of ISPSD 2009, p.132-135.
- (4) Nagaune, F. et al. "High thermal conductivity and reliability, downsized IGBT module for automotive application", Proc. of EVS 26.
- (5) Adachi, S. et al. "High thermal conductivity technology to realize high power density IGBT modules for electric and hybrid vehicles", Proc. of PCIM Euro 2012, p.1378-1384.
- (6) A. Christmann et al. "Facing high thermal loads on Power modules in Hybrid Electrical vehicles", Proc. of PCIM 2010, p.432-438.
- (7) Held M, et al "Fast power cycling test for IGBT modules in traction application", Proc. of PEDS 1997, p.425-430.
- (8) Ciappa M. : "Lifetime Modeling and Prediction of Power Devices", Proc. of CIPS 2008, p.27-36.
- (9) Miner M A : "Cumulative Damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, v01.12 (1945), p.159-164.



安達 新一郎

ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・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EVモジュール技術部。



小高 章弘

パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所EVプロジェクト部主査。電気学会会員。



長畦 文男

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



# 車載用第4世代 IPS 「F5100 シリーズ」

4th Generation IPS “F5100 Series” for Automobiles

鷹坂 浩志 TOBISAKA Hiroshi

中川 翔 NAKAGAWA Sho

豊田 善昭 TOYODA Yoshiaki

自動車電装システムに使用される半導体製品では、小型化、高信頼性化、低価格化の要求が高まっている。これを受けて、出力段パワー MOSFET をプレーナ型からトレンチ型にし、制御・保護回路の微細化や多層配線技術を適用した第4世代 IPS 「F5100 シリーズ」を開発した。製品のラインアップは、従来の SOP-8 パッケージに搭載した1チャンネル品ならびに同一サイズのパッケージの2チャンネル品がある。主な特徴は次の四つである。過電流や過熱検出機能による負荷短絡保護、低電源電圧動作、状態出力用ステータス端子の内蔵およびインダクタンス負荷時の高速ターンオフである。

There is an increased demand for small, highly reliable, low-cost semiconductor devices in the automotive application.

Accordingly, we have developed the 4th generation IPS “F5100 series” by changing the power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) in the output stage from a planar structure into a trench structure, as well as by employing minute circuits for control and protection circuits and applying multi metal layer technology. The product lineup contains 1-channel devices mounted in existing SOP-8 packages and 2-channel devices of the same package size. These devices have the following four main features: short-circuit protection by functions of detecting overcurrent and overtemperature, low power-supply voltage operation, status signed output and high speed turn-off function for inductive load.

## 1 まえがき

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

富士電機では、エンジンやトランスミッション、ブレー

キなどの自動車電装システム向けに、インテリジェントパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 製品の開発を行ってきた。これらの製品は、出力段として用いる縦型パワー MOSFET と、制御・保護回路を構成する横型 MOSFET とを同一のチップ上に集積化している。製品群には、電源側に半導体デバイスを配置し、グランド側に負荷を配置するハイサイド型

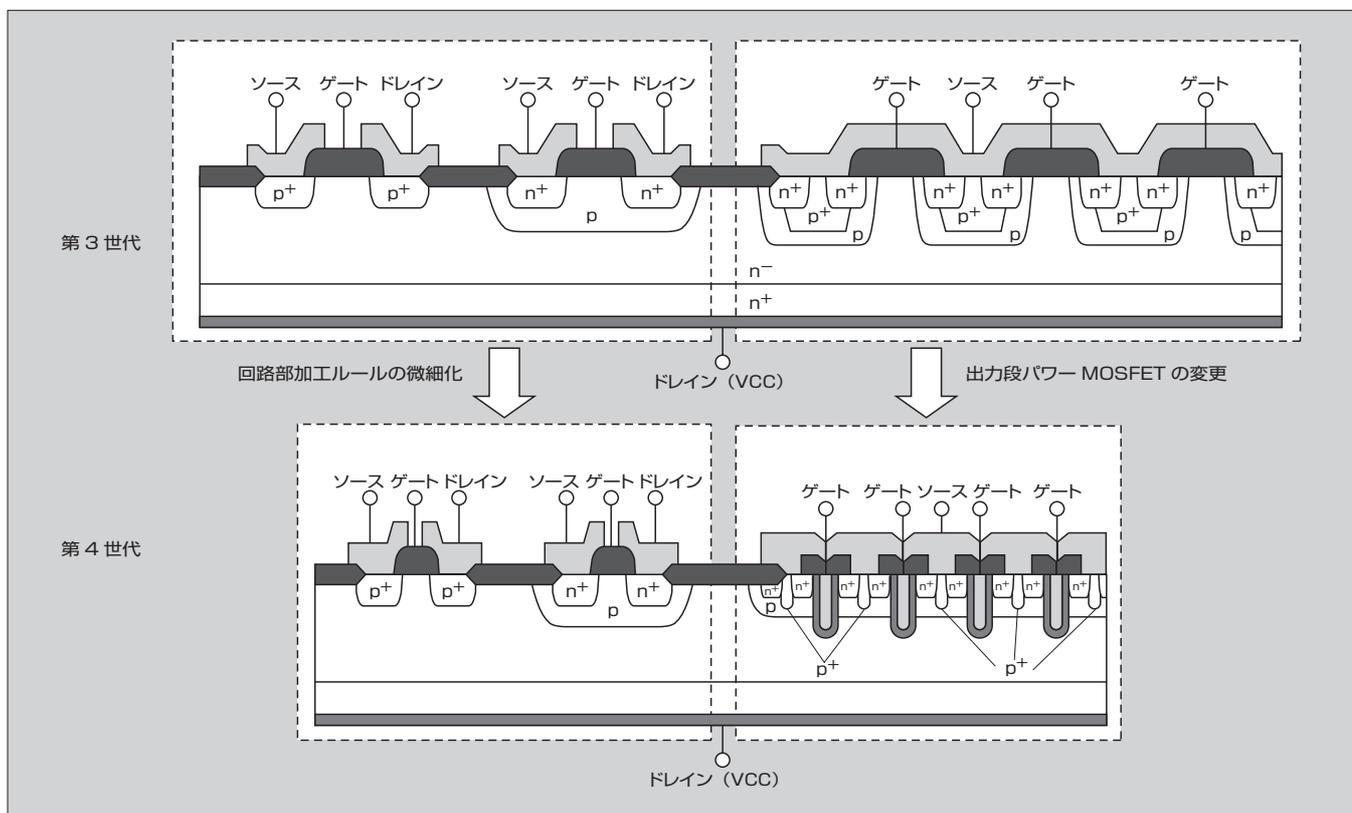


図1 第4世代 IPS デバイス・プロセス技術の特徴

IPS (Intelligent Power Switch) と、この配置を逆にしたローサイド型 IPS とを、系列化している。本稿では、上述の集積化を行うために開発した第4世代 IPS のデバイス・プロセス技術、ならびにその技術を適用したハイサイド型の車載用第4世代 IPS 「F5100 シリーズ」について述べる。

② 第4世代 IPS デバイス・プロセス技術の特徴

富士電機では、インテリジェントパワー MOSFET を自己分離型 CMOS/DMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor/Diffusion MOSFET) プロセス構造を用いて実現してきた。出力段パワーデバイスには、プレーナゲート型の MOSFET を採用し、QPJ (Quasi Plane Junction) 技術を適用して  $R_{on} \cdot A$  (単位面積当たりのオン抵抗) の低減を推進し、顧客製品の小型化に貢献してきた<sup>(2)</sup>。

第4世代 IPS デバイス・プロセス技術の特徴は、出力段縦型パワー MOSFET を、従来のプレーナゲート型 MOSFET からトレンチゲート型 MOSFET に変更した点である (図1)。これにより、従来の出力段 MOSFET と比較して、 $R_{on} \cdot A$  を約 55% 低減させることができた。

(1) 回路部

従来の自己分離型統合パワー IC 技術<sup>(3)</sup>や IPS デバイス技術<sup>(4)</sup>を基に、各要素デバイスの微細化を行った。また、要素デバイス自体の微細化に加えて、要素デバイス間を接続する配線が占める面積を低減する多層配線技術を適用した。

(2) 主な要素デバイス

回路用 5V 系 CMOS に加え、60V 系 CMOS を用意している。ハイサイド型デバイスではチップ裏面電位が電源直結端子となり、自動車用 12V 系バッテリーで発生し得るロードダンプサージ<sup>(注1)</sup>などに対してサージ耐性を満たすために、60V 系 CMOS を用意した。ローサイド型ではデバイスのオン時に裏面電位がほぼ 0V となり、60V 系の CMOS は使用できないため、ロードダンプサージに対しては出力段パワー MOSFET でサージ耐性を満たしている。

(3) 回路用の MOSFET

ゲート酸化膜として、薄膜と厚膜の2種類を用意した。薄いゲート酸化膜の MOSFET は、しきい値電圧が低いので、バッテリー電圧低下時に駆動を要求される製品の回路に使用できる。一方、厚いゲート酸化膜の MOSFET は、しきい値電圧は高くなるがゲート耐圧が高いため、例えば外部電源電圧  $V_{cc}$  で直接駆動するような、高電圧でのゲート駆動が必要な回路にも使用できる。

さらに、寄生動作の心配のないポリシリコンデバイスやトリミングデバイスも備えている。

これらを組み合わせることにより、富士電機の現行品に対していっそうの高集積化・高精度化が実現でき、素子自

身の小型化および周辺部品の取込みによる顧客ユニットの小型化といった市場要求に応える製品群が創出できる。

③ ハイサイド型の第4世代 IPS 製品の特徴

第4世代 IPS のデバイス・プロセス技術を適用することにより、既に量産化している SOP-8 パッケージに搭載しているハイサイド型 IPS のチップの小型化が実現可

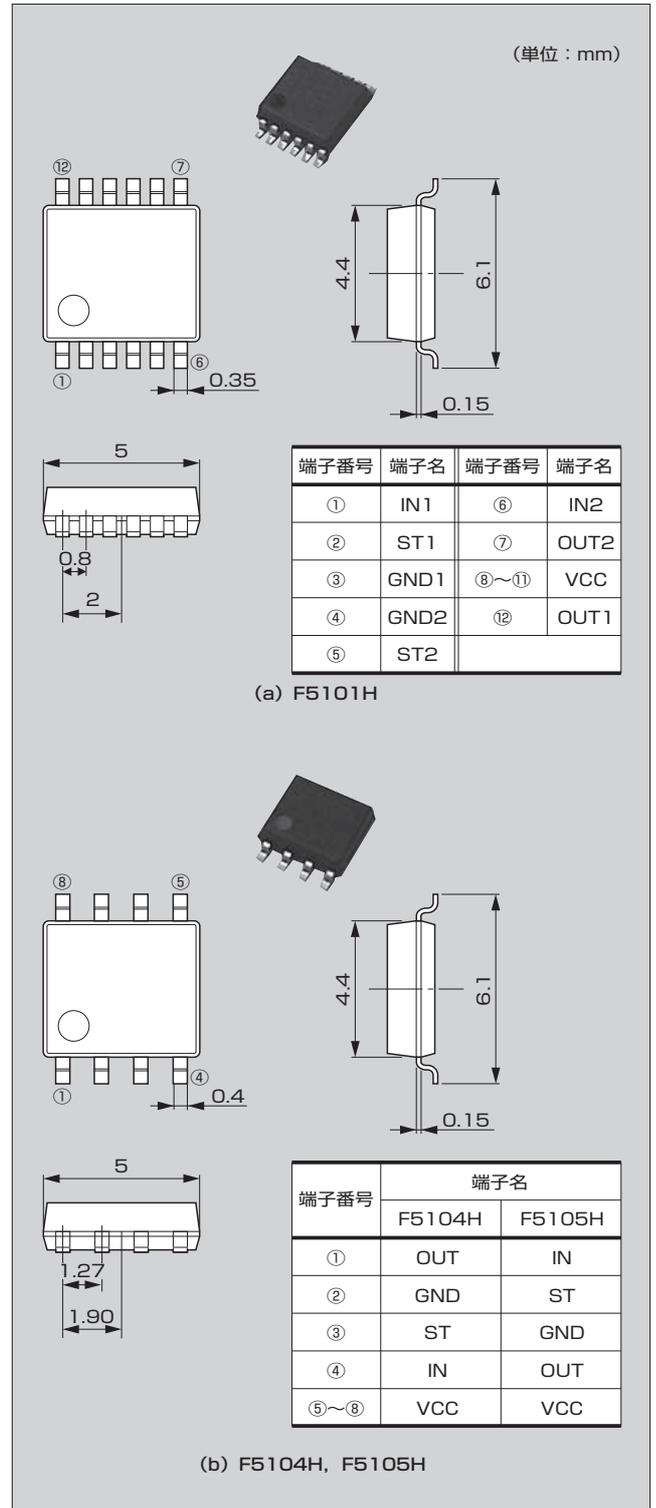


図2 「F5100 シリーズ」の外観、外形図、端子配列

〈注1〉ロードダンプサージ：オルタネータ（発電機）が結線外れした場合などに発生するサージで、時定数が 200ms の長いサージをいう。

表1 「F5100 シリーズ」のラインアップ

新製品型式名	F5101H	F5104H	F5105H
類似現行品型式名	—	F5044H	F5049H
搭載チャンネル数	2チャンネル	1チャンネル	
パッケージ	SSOP-12	SOP-8	

能となった。さらに、同一パッケージサイズで2チャンネルを搭載したハイサイド型 IPS が開発できるようになった。図2に、外観、外形図および端子配列を、表1に本稿で紹介する製品ラインアップおよび対応する現行品を示す。F5101Hは、2チャンネルのハイサイド型 IPS を搭載した製品である。従来、SOP-8パッケージにハイサイド型 IPS を1チャンネル内蔵していたが、同一外形サイズのSSOP-12パッケージを新規に開発したものである。

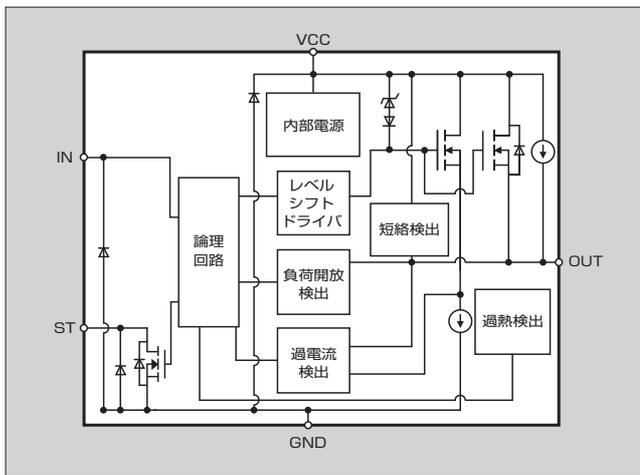


図3 「F5100 シリーズ」の回路ブロック図

また、F5100シリーズの回路ブロック図を図3に、最大定格を表2に、電気的特性を表3に、論理表を表4に示す。いずれもF5101Hでは、1チャンネル当たりのものである。

F5100シリーズの特徴を次に示す。

- (a) 過電流、過熱検出機能による負荷短絡保護
- (b) 低電源電圧動作（現行品：6V、F5100シリーズ：4.5V）
- (c) 負荷状態・異常状態出力用ステータス端子の内蔵
- (d) インダクタンス負荷の高速動作（ターンオフ時の逆起電圧に対する電圧クランプ回路の内蔵）

F5100シリーズにおいても、従来のハイサイド型 IPS と同様に出力段 MOSFET に過電流が流れた場合は、システムや負荷と素子自身を保護するための過電流検出機能を搭載している。図4に、過電流検出状態から出力発振モードに至るまでの動作波形を示す。出力発振状態でのピーク電流を12A程度にクランプしており、過大な電流が流れる

表2 「F5100 シリーズ」の最大定格 ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件	定格		単位
			最小	最大	
電源電圧	$V_{CC1}$	DC	-0.3	36	V
	$V_{CC2}$	250ms	—	50	V
出力電流	$I_D$	—	—	3	A
入力電圧	$V_{IN}$	DC	-0.5	7	V
ステータス電圧	$V_{ST}$	DC	-0.3	7	V
ステータス電流	$I_{ST}$	—	—	5	mA
消費電力	$P_D$	—	—	1.5	W
接合部温度	$T_J$	—	-40	150	$^\circ\text{C}$
保存温度	$T_{STG}$	—	-55	150	$^\circ\text{C}$

表3 「F5100 シリーズ」の電気的特性 ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )

項目	記号	条件	対象機種	規格値		単位
				最小	最大	
動作電源電圧	$V_{CC}$	$T_J=-40\sim+150^\circ\text{C}$	3機種*	4.5	28	V
静止電源電流	$I_{CC}$	$V_{CC}=13\text{V}, R_L=10\Omega, V_{IN}=0\text{V}$	3機種	—	3	mA
入力しきい値電圧	$V_{IN(H)}$	$V_{CC}=13\text{V}$	3機種	3.0	—	V
	$V_{IN(L)}$	$V_{CC}=13\text{V}$	3機種	—	1.5	V
入力電流	$I_{IN(H)}$	$V_{CC}=13\text{V}, V_{IN}=5\text{V}$	3機種	10	50	$\mu\text{A}$
オン抵抗	$R_{DS(on)}$	$I_L=1.25\text{A}$	F5101H	—	0.09	$\Omega$
			F5104H, F5105H	—	0.12	$\Omega$
出カリーク	$I_{OL}$	$V_{CC}=13\text{V}$	3機種	—	0.5	mA
過電流検出	$I_{OC}$	$V_{CC}=13\text{V}$	3機種	3	—	A
過熱検出	$T_{trip}$	$V_{CC}=13\text{V}$	3機種	150	200	$^\circ\text{C}$
ターンオン時間	$t_{on}$	$V_{CC}=13\text{V}, R_L=10\Omega$	3機種	—	120	$\mu\text{s}$
ターンオフ時間	$t_{off}$	$V_{CC}=13\text{V}, R_L=10\Omega$	3機種	—	70	$\mu\text{s}$
負荷クランプ電圧	$V_{clamp}$	$V_{CC}=13\text{V}, I_L=1.25\text{A}, V_{IN}=5\text{V}, L=10\text{mH}$	3機種	$-(50-V_{CC})$	$-(60-V_{CC})$	V
負荷開放検出	$R_{LOPEN}$	$V_{CC}=13\text{V}, V_{IN}=0\text{V}$	3機種	6	36	k $\Omega$

\*3機種：F5101H, F5104H, F5105H

表4 「F5100 シリーズ」の論理表

	IN	ST	OUT	備考
正常動作	L	L	L	—
	H	H	H	
	Open	L	L	
負荷開放検出	L	H	H	自己復帰
過熱検出	L	L	L	自己復帰
	H	L	L	
過電流検出	L	L	L	自己復帰 出力発振モード
	H	L	L	

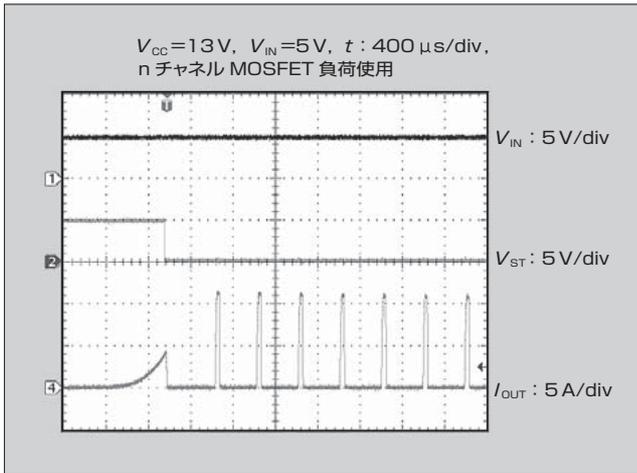


図4 「F5100 シリーズ」の過電流動作時波形 (過電流検出～出力発振モード)

異常状態においてもデバイスが発生するノイズを低く抑えている。また、本ピーク電流のクランプにより、ECU配線の微細化およびワイヤハーネスの細線、軽量化に貢献できる。

現行品は、電源電圧  $V_{CC}$  が5V以下になると、オン抵抗が大きくなって素子が動作しなくなった。F5100シリーズでは、内部回路のゲート酸化膜厚を薄くすることにより、低電源電圧時の動作を改善した。 $V_{CC}$  が4.5Vにおいても、 $V_{CC}$  が13Vの時とほぼ同等のオン抵抗を維持できる(図5)。このため、バッテリーに直結した負荷を駆動する際に電源電圧が低下しても、F5100シリーズの性能を落とすことなく使用できる。

また、回路構成を現行品と同様にして、 $V_{CC}$  が13V時で-41Vと大きなクランプ電圧を確保しているので、インダクタンス負荷の高速ターンオフ動作を可能にしている(図6)。

F5101Hは、2チャンネルが同時に駆動することによる発熱量の増加を避けるために、オン抵抗を低下させている。これにより、1チャンネル品と同様に1Aの通電能力を確保した。また、内部電源回路やGNDワイヤを各チャンネルにそれぞれ配置して、万が一、片チャンネルが破壊しても、もう片方のチャンネルへの影響が少なくなるように配慮した。SSOP-12パッケージの開発には、端子幅、ピッチが

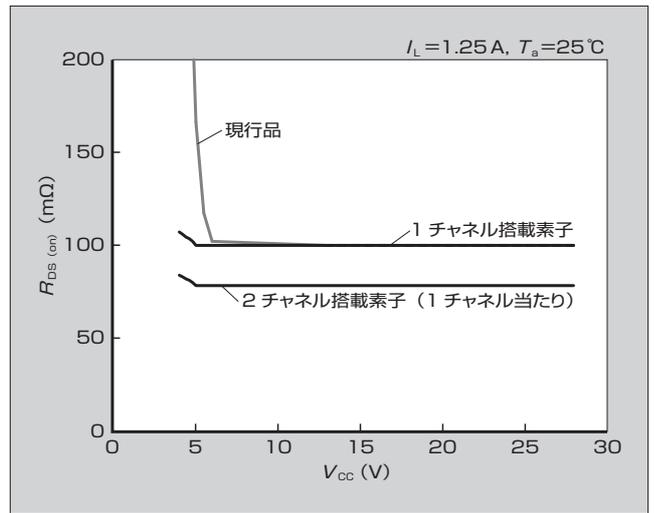


図5 「F5100 シリーズ」のオン抵抗の電源電圧依存性(代表値)

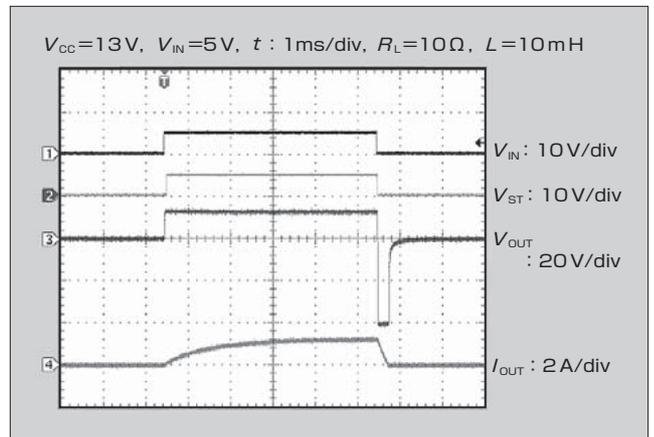


図6 「F5100 シリーズ」のL負荷クランプ動作波形

<sup>(注2)</sup> JEITAに準拠したSSOP-20の寸法を踏襲した。なお、端子めっきには、現行品と同様に鉛フリーはんだ(Sn-Ag)を使用している。

#### 4 あとがき

本稿では、ハイサイド型の車載用第4世代IPS「F5100シリーズ」について述べた。 $R_{DS(on)} \cdot A$ を55%低減したトレンチゲート型MOSFETを搭載し、回路部を微細化し、多層配線を適用したことで小型化・低コスト化に貢献できる。今後、第4世代IPSで培った技術を用いてさまざまなパワーIC製品を開発し、自動車分野の発展に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 岩田英樹ほか. インテリジェントパワー MOSFET. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.410-414.
- (2) 岩水守生ほか. リニア制御用IPS「F5064H」. 富士時報.

〈注2〉 JEITA:社団法人 電子情報技術産業協会。SSOP-12パッケージは、JEITA規格のEDR-7314Aに準拠している。

2010, vol.83, no.6, p.415-419.

- (3) 熊谷直樹ほか. 自動車用自己分離型統合パワー IC技術. 富士時報. 2003, vol.76, no.10, p.622-625.
- (4) 豊田善昭ほか. 自動車用IPSデバイス技術. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.450-453.



**鷹坂 浩志**

半導体デバイスの開発に従事。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自動車電装技術部。



**中川 翔**

半導体デバイスの開発に従事。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自動車電装技術部。



**豊田 善昭**

半導体のデバイス開発・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パワー半導体開発統括部デバイス開発部チームリーダー。



# LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」

LLC Current-Resonant Control IC: “FA5760N”

山田谷 政幸 YAMADAYA Masayuki

山路 将晴 YAMAJI Masaharu

山本 毅 YAMAMOTO Tsuyoshi

スイッチング電源の高効率化、低ノイズ化、薄型化に有利な LLC 電流共振回路が注目されている。しかし、安定した動作を得るためにコンバータが別途必要であることなど電源回路の規模が大きくなる課題がある。富士電機は、LLC 電流共振回路が一つのコンバータで構成でき、待機電力の低減も実現した LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」を開発した。630 V 高耐圧ドライバと 600 V 耐圧起動素子を 1 チップとし、ハーフブリッジ回路の貫通現象を回避する保護回路と間欠動作モードにより、従来の LLC 電流共振回路の持っていた欠点を解消し、広範囲に適用できる。

LLC current-resonant circuits have attracted attention as useful circuit systems for achieving a highly efficient, low-noise and thin structure of switching power supply; but there are problems that the power circuit scale becomes larger due to the need to include separate converters for stable operation. Fuji Electric has developed the LLC current-resonant control IC “FA5760N”, which can be used to construct an LLC current-resonant circuit with a single converter and which enables operation on low standby power. A 630 V high voltage driver and a 600 V start-up device are built into one chip. The new product gets rid of the problems with previous LLC current-resonant circuits by using protecting circuits and an intermittent operation mode to avoid the short circuit of the half-bridge circuit. This product is capable of a wide range of applications.

## ① まえがき

スイッチング電源は、現代社会を支える各種電子機器に用いられる。省電力化や省スペース化の社会的な要求に応えるため、高効率化、低消費電力化、小型化が急速に進んでいる。特に大電力帯の効率が良く、トランスの薄型化が実現できる LLC 電流共振回路が注目されている。

LLC 電流共振回路はこうした利点がある一方で、一般的にブリッジ回路において貫通現象が発生しやすく、入出力電圧の範囲に制約がある。このため、力率改善 (PFC: Power Factor Correction) の要否にかかわらず PFC コンバータを設けて入力電圧を安定化させる必要がある。また、この回路は原理的に軽負荷時に効率が低下する課題を抱えている。待機電力低減のために補助電源回路を別に設けるなど、電源システム全体で三つのコンバータが必要となり、電源回路の規模が大きくなる欠点がある。

富士電機は、これまで、複合共振型電流共振回路用マルチチップパワーデバイス「M-Power シリーズ」を製品化してきた<sup>(1),(2)</sup>。高効率・低ノイズ・低待機電力を実現する独自の制御方式を採用したものである。また、600 V/800 V 高耐圧ドライバ IC 用プロセスを開発し、ブリッジ回路を直接駆動するドライバ IC も製品化している。

これらの従来技術をベースに、LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」を製品化した。制御 IC とドライバ IC を一体化し、独自の制御方式を採用することでコンバータ 1 個で高効率、低消費電力かつ小型の電源システムの構成が可能である。

## ② 「FA5760N」の概要

FA5760N の外観を図 1 に、ブロック図を図 2 に、主な定格を表 1 に示す。高耐圧ドライバ IC 用プロセスを使用し、新たに 600 V 耐圧起動素子の開発を行った。FA5760N は、次の回路・素子を 1 チップで構成している。

- LLC 電流共振回路を制御する 30 V 耐圧制御回路
  - ハーフブリッジ回路のハイサイドおよびローサイドスイッチ素子を直接駆動可能な 630 V 耐圧ドライバ回路
  - 低消費電力で IC 起動を実現する 600 V 耐圧起動素子
- パッケージには、JEDEC 準拠の 16 ピン SOP (Small Outline Package) を採用した。

ハイサイドとローサイドの両出力は交互に 50% のデューティ比で高精度に動作し、動作周波数範囲は 25 ~ 220 kHz である。FA5760N を用いたコンバータの定格出力 100 W において、最大効率 90%、待機電力 150 mW 以下を実現している。FA5760N の主な機能と関係する端子を表 2 に示す。

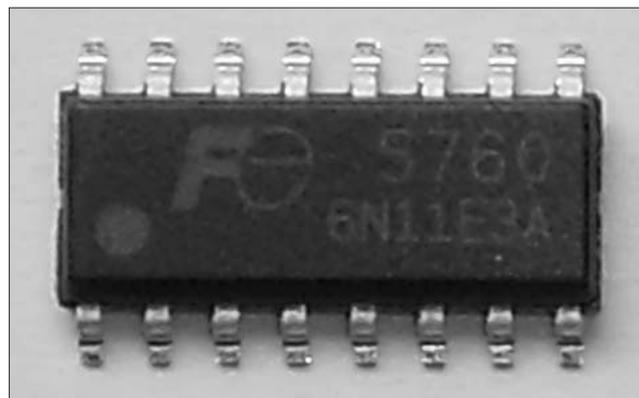


図 1 「FA5760N」

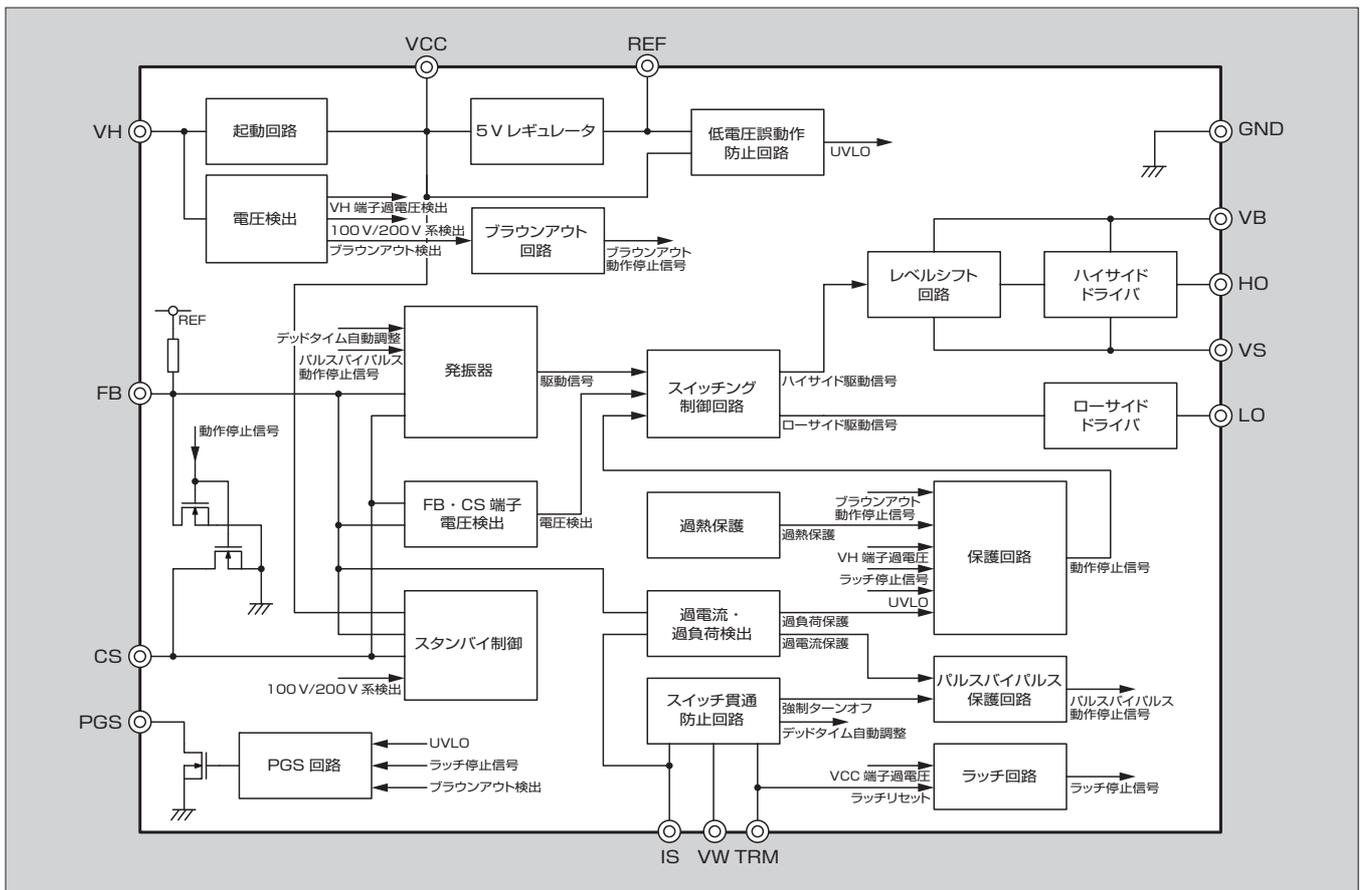


図2 「FA5760N」のブロック図

表1 「FA5760N」の主要定格

項目名	定格値
ハイサイド電源対地電圧	-0.3 ~ +630 V
ハイサイド電源電圧 (V <sub>BS</sub> )	-0.3 ~ +30 V
ローサイド電源電圧 (V <sub>CC</sub> )	-0.3 ~ +30 V
VH端子入力電圧	-0.3 ~ +600 V
最大許容オフセット電源電圧dv/dt	±50 kV/μs (max)
全損失	0.83 W
動作ジャンクション温度	-40 ~ +150 °C

表2 「FA5760N」の主な機能と関係する端子

機能	端子
起動回路	VH, VCC
低電圧誤動作防止回路	VCC, VB, REF
ブラウンイン・ブラウンアウト	VH
過電圧保護	VH, VCC
過電流保護	IS
過負荷保護	FB
過熱保護	(なし)
外部ラッチ信号入力	TRM
強制ターンオフ機能	VW, IS,
デッドタイム自動調整機能	VW, IS
低待機動作モード	VCC, CS, VH
パワーグッド信号	PGS

### 3 主な特徴

#### 3.1 スイッチ貫通現象の防止機能

(1) ブリッジ回路のスイッチ貫通現象

図3に、一般的なLLC電流共振回路の等価回路を示す。ブリッジ回路の上下に対向するMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) のオン-オフを交互に切り替えて正弦波状の共振電流を生成する。このとき適切なタイミングでMOSFETのオン-オフを切り替えないと、スイッチの貫通現象が発生し、場合によってはMOSFETを破壊する。

図4に、ブリッジ回路のスイッチ貫通現象を示す。片方のMOSFETのボディ・ダイオードに共振電流が流れてい

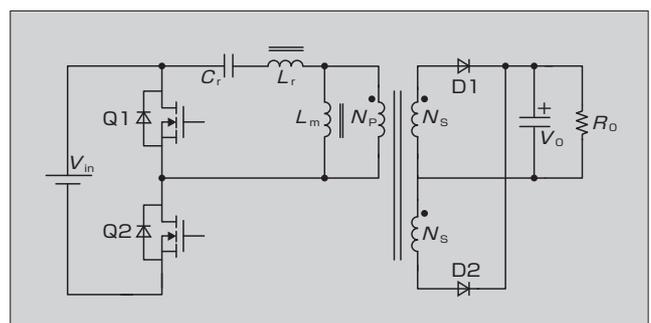


図3 LLC電流共振回路の等価回路

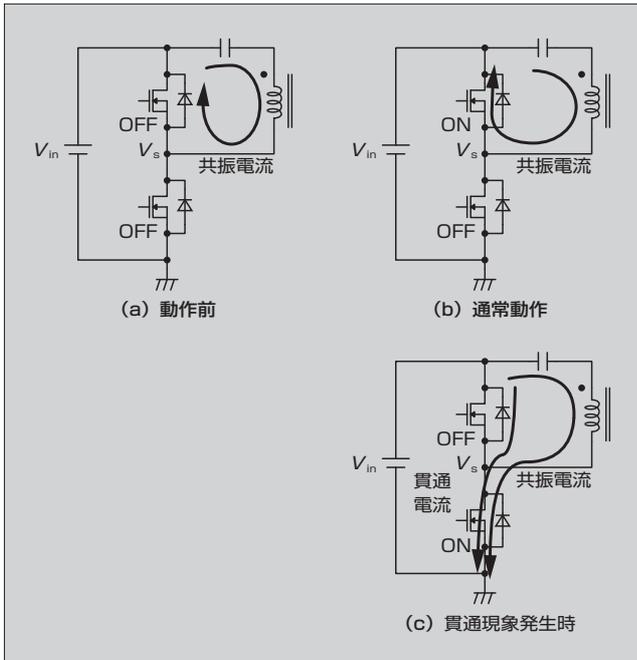


図4 ブリッジ回路のスイッチ貫通現象

る(図4(a)) 場合、この MOSFET がオンする際は ZVS (Zero Voltage Switching) 動作となり本来の望ましい動きとなる(図4(b))。しかし、対向する MOSFET がオンする(図4(c)) と、前者のボディ・ダイオードのリカバリー期間に少数キャリアが一気に引き抜かれることで過大なリカバリー電流が発生し、ブリッジ回路が貫通する。この場合、貫通電流による急激な電流変化により MOSFET がアバランシェ破壊を起こしたり、過大なサージによる異常動作により MOSFET の安全動作領域を超えて破壊したりすることがある。したがって、MOSFET のボディ・ダイオードに共振電流が流れている場合、対向の MOSFET をオンさせてはならない。そのため、FA5760N は、次に述べる二つのスイッチ貫通現象の発生条件にそれぞれ対応する二つの防止機能を備えている。

(2) 強制ターンオフ機能

FA5760N は、スイッチ貫通現象を防止する機能として、強制ターンオフ機能を備えている。図5にFA5760Nにおけるスイッチ貫通現象を防止する外部回路構成を、図6に強制ターンオフ機能の有無による動作波形の比較を示

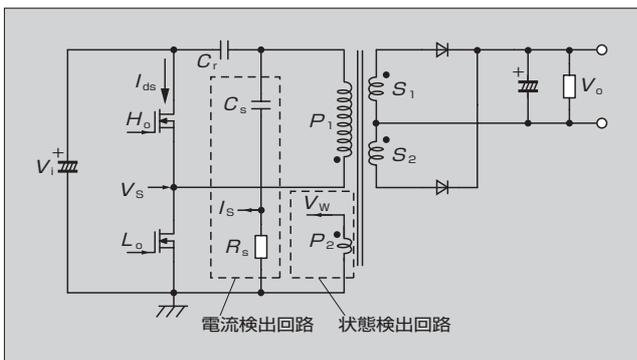


図5 スイッチ貫通現象を防止する外部回路構成

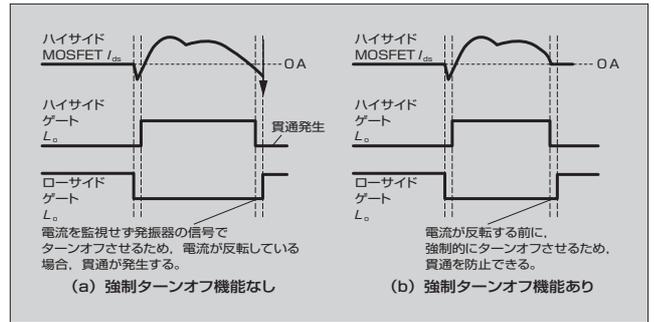


図6 強制ターンオフ機能の有無による動作波形

す。図6(a)において、オン期間が長い、すなわち動作周波数が低い場合、ハイサイドの MOSFET に流れる共振電流  $I_{ds}$  が正から負に反転することがある。このとき、図4に示すとおりスイッチの貫通現象が発生してしまう。この現象は特に周波数が低い状態、すなわち、低入力電圧、過負荷状態、高出力電圧の場合に発生しやすい。これが従来の LLC 電流共振回路が入出力電圧変動に弱く、入力安定化用の PFC 回路が欠かせない一因となっている。

この貫通現象を防止するためには、ハイサイドの MOSFET に流れる電流が正から負に反転する前にハイサイドの MOSFET を強制的にオフし、そのボディ・ダイオードに  $I_{ds}$  を流すことなくローサイドの MOSFET をオンさせることが必要である。これを強制ターンオフ機能と呼ぶ。これは、ローサイド側でも同様である。

FA5760N は、図5に示す電流検出回路と状態検出回路により、電流  $I_s$  と補助巻線  $P_2$  の電圧  $V_w$  を検出し、強制ターンオフ機能を実現している(図7)。

$V_w$  が反転した時点から共振電流の監視を開始し、その電流が反転する直前に設けられた電流しきい値に到達した時点で強制的にターンオフする。強制ターンオフ後は通常のターンオンとなり、再び監視状態に戻るため、動作周期ごとにこの機能は有効となる。

実際の動作波形を図8に示す。低入力電圧かつ重負荷の条件であるが、MOSFET に流れる共振電流が正から負へ反転する前に確実に強制ターンオフが動作し、貫通現象が発生しないことが確認できる。

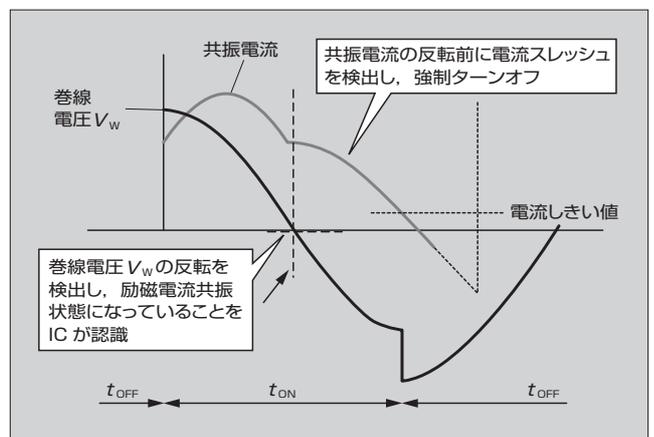


図7 強制ターンオフ機能の実現方法

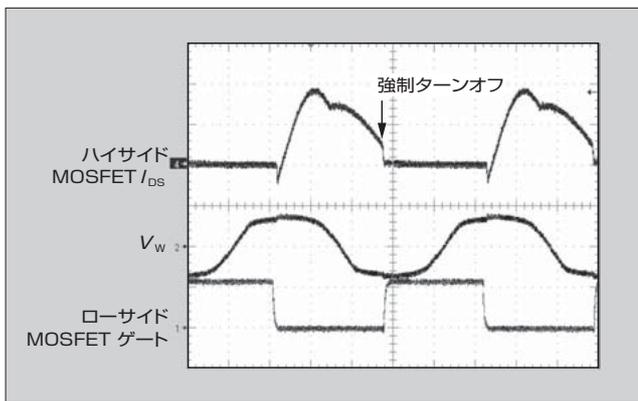


図8 強制ターンオフ機能の動作波形

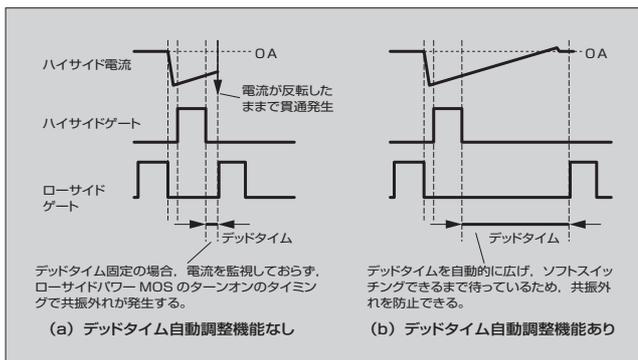


図9 デッドタイム自動調整機能

(3) デッドタイム自動調整機能

電源起動時などの初期状態や間欠動作などの長いスイッチング停止期間直後の再起動時で、共振電流が確立していない状態において、周波数が高い、すなわち、オン期間が短い場合、一方の MOSFET のボディ・ダイオードに共振電流が流れた状態から脱する前にターンオフし、対向する MOSFET がターンオンして貫通する場合がある。これを図 9 (a) に示す。貫通を回避するためには、ソフトスイッチングが可能になるまで対向する MOSFET のオンを待つ、すなわち共振電流がゼロレベルに到達するまでデッドタイムを拡張することが有効である。この拡張機能をデッドタイム自動調整機能と呼ぶ。

通常、デッドタイムは効率向上のため極力短い 380 ns (標準値) に設定されているが、FA5760N は、図 5 の補助巻線  $P_2$  の電圧  $V_W$  の時間変化を監視し、共振電流がゼロレベルに到達していないと判断した場合は、最大 20  $\mu$ s (標準値) までデッドタイムを拡張する (図 9 (b))。

このデッドタイム自動調整機能は、スイッチの貫通だけでなく、ハードスイッチングを回避する効果も大きく、電源品質を向上させる重要な機能である。

3.2 低待機動作モード

LLC 電流共振回路は、動作時に共振電流と励磁電流が発生する。このうち励磁電流による励磁損は、負荷には無関係な損失であるため、軽負荷動作時はこの励磁損が支配的となり、急激に効率が悪化する。原理的に励磁損の削減

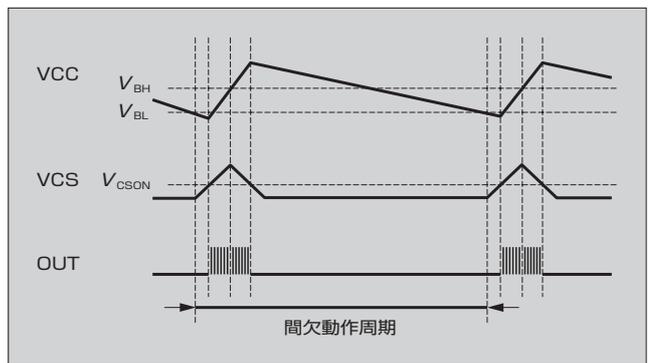


図10 低待機動作モードの動作波形

は難しいため、この対策には間欠動作が有効である。

FA5760N は、従来品のマルチチップパワーデバイス「M-Power2B」の低待機動作方式を引き続き採用し、外部からの待機信号を受けて通常動作モードから低待機動作モードに切り替え、スイッチングを間欠動作させることで励磁損を削減している。その方法は図10に示すように、CS 端子の充放電によりスイッチング周期を変化させることで、VCC 端子電圧を二つのしきい値電圧  $V_{BH}$  および  $V_{BL}$  にて検出する一次側制御で間欠動作を実現している。なお、CS 端子電圧とスイッチング周波数はほぼ反比例の関係に設定しており、CS 端子電圧が一定の電圧レベル  $V_{CSON}$  以上でスイッチング動作するように設定している。

FA5760N はさらなる待機電力削減のため、CS 端子の充放電時間、CS 端子のスイッチング動作点  $V_{CSON}$  および VCC 端子の電圧維持レベル ( $V_{BH}$ ,  $V_{BL}$ ) を電源電圧の高低に応じて切り替える最適化機能を追加し、音鳴りを防止しつつ、電源電圧に応じて待機電力を最も低く抑えるように間欠周期の最適化を図っている。

3.3 共振電流検出

図 5 に示すとおり、共振コンデンサを分流するコンデンサを設け、抵抗を挿入することにより、共振電流を検出している。この方法は、共振電流本体の流れる経路に電流検出用の抵抗を挿入する必要がなく、損失が発生しないため、高効率動作が可能である。

3.4 パワーグッド信号 (PGS 端子)

FA5760N は、異常状態を検出し動作停止する場合、PGS 端子の n チャンネル MOSFET のオープン・ドレイン出力より信号を送出する。これを利用することで、異常状態での電源システムの遮断シーケンスの構成などが可能である。

4 新規 600V 耐圧起動素子

ブリッジ回路のスイッチ素子、特にハイサイド側のドライバ IC は、サージに対して特に注意深い対策が必要である。富士電機は既に 800V 耐圧ドライバ IC の量産実績があり、FA5760N はこのプロセスを採用した。しかし、低

待機電力化のために必須である起動素子がなかったことから、今回、600 V 耐圧起動素子を開発し FA5760N に適用した。

図 11 に、起動回路を示す。商用電源入力の手端から起動素子 S2 とスイッチ M1 を経て、IC 電源入力の手端へ電流を供給する。必要に応じて M1 で起動電流をオン・オフすることで、電力損失を大幅に抑えることができる。また、起動素子 S1 は起動回路を制御する電源として機能する。

600 V 耐圧起動素子には、JFET (Junction Field Effect Transistor) を採用した。平面図を図 12 に示す。図 11 の起動素子 S1 と S2 は中心部のドレインを共通とし、複数に分割された外周部のソースで区分された一体デバイスである。

起動素子は、耐圧に加えてカットオフ特性が重要である。これは、電流供給先の手端の耐圧以下で起動素子からの電流供給を遮断できなければ、制御回路とスイッチ M1 に過大な電圧が印加され、破壊に至るためである。

起動素子の耐圧を維持しつつ、目標とするカットオフ特性を得るためには、PN 接合部の空乏層を制御する必要がある。そこで、三次元デバイスシミュレーションを用いて

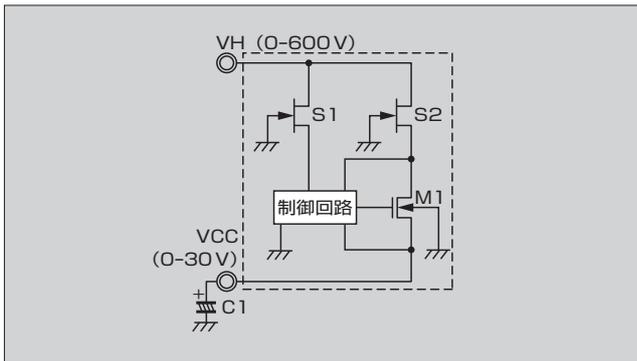


図 11 起動回路

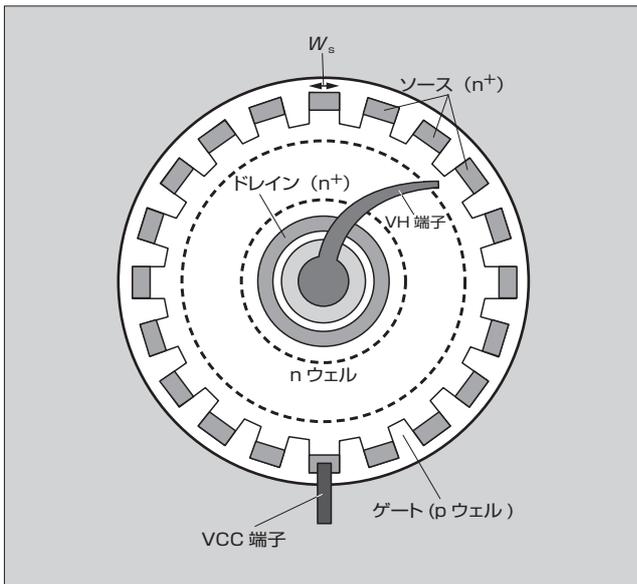


図 12 600 V 耐圧起動素子の平面図

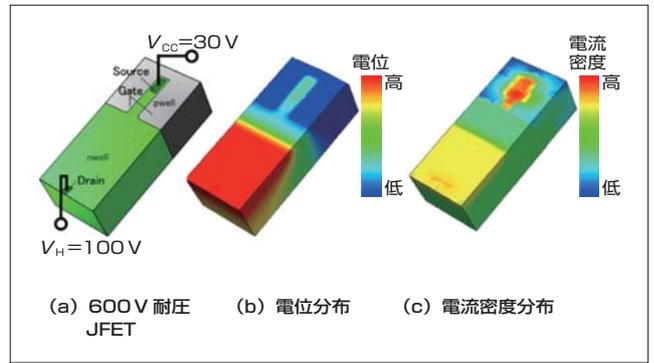


図 13 三次元デバイスシミュレーションの結果

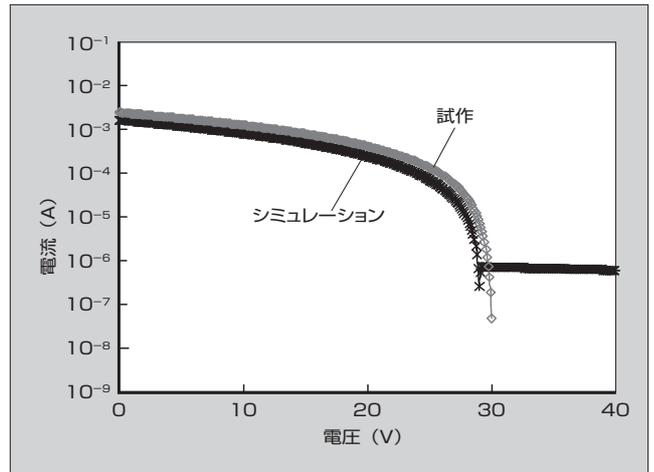


図 14 600 V 耐圧 JFET カットオフ特性

600 V J-FET 構造の設計を行った。図 13 に、ドレイン電圧 100 V、ソース電圧 30 V の場合の電位分布と電流密度分布を示す。ソース領域の幅  $W_s$  を最適化し、デバイス試作を実施した。

図 14 に、600 V 耐圧 JFET カットオフ特性におけるシミュレーション結果と試作結果の比較を示す。その結果、設計どおりのカットオフ特性を実現でき、FA5760N の製品開発に適用している。

### 5 適用アプリケーション例

図 15 に、出力電力 100 W を一つのコンバータで構成するアプリケーション回路の例を示す。一般的に、LLC 電流共振回路を用いたシステムに必要な入力安定化用 PFC 回路と待機用補助電源は、FA5760N を用いることにより不要となる。

アプリケーション回路の例について表 3 に仕様を、表 4 に主な半導体部品を示す。二次側巻線出力は、24 V、12 V の 2 出力である。待機動作時にも動作を継続するマイコンなどに電源を供給する 5 V 出力は、低待機動作時の出力電圧リップルの影響を抑えるため、降圧型 DC/DC コンバータを使用している。なお、出力電圧リップルが許容範囲の場合は、DC/DC コンバータは不要である。

図 16 に、通常動作モードにおける電源効率特性を示す。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

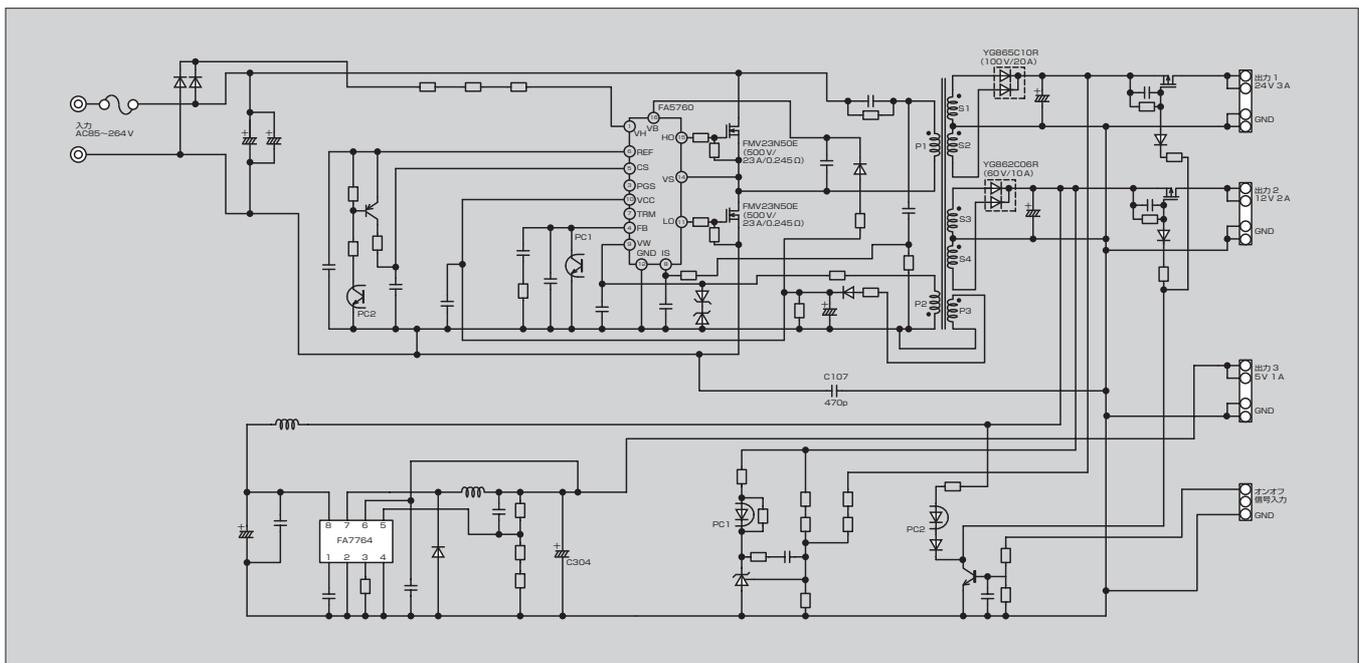


図 15 アプリケーション回路例

表 3 アプリケーション回路例の仕様

項目	特性など
入力電圧	AC85 ~ 264 V
出力電圧/電流	24 V/3 A, 12 V/2 A, 5 V/1 A
出力電力	100 W (max)

表 4 アプリケーション回路例の主な半導体部品

部品名	型式名
制御IC	FA5760N
ブリッジ部MOSFET	FMV23N50E (500 V/23 A/0.245 Ω)
ダイオード (24 V)	YG865C10R (100 V/20 A)
ダイオード (12 V)	YG862C06R (60 V/10 A)
5V DC/DCコンバータ	FA7764 AN

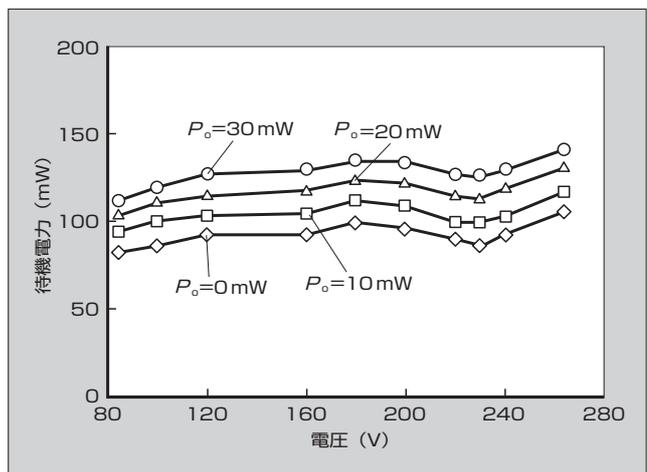


図 17 低待機動作モードにおける待機電力特性

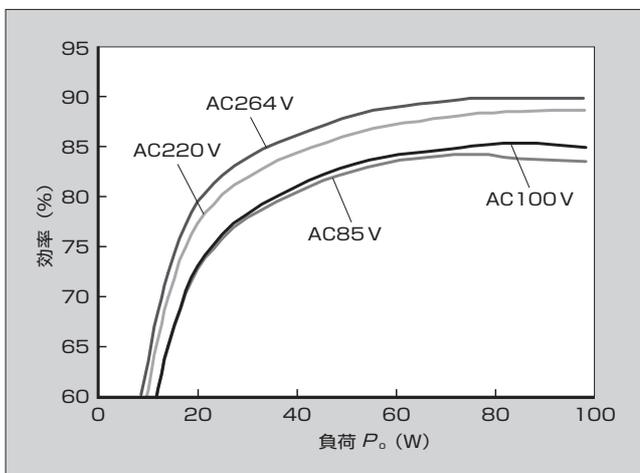


図 16 通常動作モードにおける電源効率特性

スイッチ貫通現象の防止機能の効果により、入力電圧の

AC85 ~ 264 V の間で安定した動作を実現し、AC100 V 入力時は 85%、AC220 V 入力時は 89% の電源効率を達成しており、世界各国の商用電源電圧において適用できる。

図17に、低待機動作モードにおける待機電力特性を示す。新たな低待機動作モードの効果により、世界各国の商用電源において、出力無負荷時は従来品の 165 mW に対して約 100 mW の待機電力を、また、30 mW 負荷時にも従来品の 200 mW に対して 150 mW 未満を実現している。なお、5 V 生成用の DC/DC コンバータに低待機電力対応品を適用すれば、さらに 30 mW 前後の待機出力削減が可能である。

## 6 あとがき

LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」の特徴について述べた。この IC に適用した新技術によって、これまでの大き

な技術的制約が解消され、LLC 電流共振回路は新たな進化の段階に入ったと考えている。

今後も、さらなる高効率化と低待機電力化を実現する新技術の確立を図り、電源回路の設計の省力化と高機能化に寄与するお客さまが使いやすい電源制御 IC の開発を進めていく所存である。

#### 参考文献

- (1) 太田裕之, 寺沢徳保. 電源用マルチチップパワーデバイス「M-Power 2シリーズ」. 富士時報. 2002, vol.75, no.10, p.585-588.
- (2) 島藤貴行ほか. マルチチップパワーデバイス「M-Power 2Aシリーズ」. 富士時報. 2006, vol.79, no.5, p.386-389.
- (3) Yamaji, M. et al. A New 600 V-Class Power Management IC Realizing a System Downsizing for Current Resonant Type Converters, PCIM Asia. 2012, p.207-212.
- (4) 陳建. PFC及び待機用コンバータ無しで広入力電圧範囲に対応したLLC共振コンバータ. 第27回スイッチング電源技術シンポジウム. 2012, D2-2.



#### 山田谷 政幸

電源 IC の開発に従事。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。博士（工学）。電気学会会員。



#### 山路 将晴

パワー IC 用デバイスの設計やプロセスインテグレーション業務に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体開発統括部デバイス開発部。電気学会会員。



#### 山本 毅

スイッチング電源制御 IC のフィールドアプリケーションエンジニアに従事。現在、富士電機株式会社海外事業本部半導体営業統括部応用技術部。



# 第6世代 PWM 制御 IC 「FA8A00 シリーズ」

6th Generation PWM Controller IC: "FA8A00 Series"

藪崎 純 YABUZAKI Jun

山根 博樹 YAMANE Hiroki

小林 善則 KOBAYASHI Yoshinori

「FA8A00 シリーズ」は、新開発の 0.35 μm プロセス技術を適応した第6世代 PWM (Pulse Width Modulation) 電源制御 IC である。パッケージは SOP-8 ピンであり、500 V 保証の起動回路を内蔵している。新開発の X キャパシタの放電機能により、従来必要であった放電抵抗をなくし、抵抗損失を約 20 mW 削減した。さらに、IC の消費電流を従来品の 30% まで削減したことで、電源全体で 30 mW 以下の待機電力を実現した。また、周波数低減特性の最適化により平均効率 89% 以上を実現しており省エネルギーと電源システムのコストダウンに貢献できる。

"FA8A00 series" is the 6th generation pulse width modulation (PWM) power supply control IC, which utilizes the newly developed 0.35 μm process technology. The package is a small outline package (SOP) 8-pin and builds in a 500 V-capable startup circuit. Through a newly developed X capacitor discharge function, the discharge resistance which was formerly necessary is reduced and about 20 mW of resistance losses are reduced. Furthermore, by reducing the IC current consumption to 30% of the conventional products, the standby power of a whole power supply is realized 30 mW or less. Moreover, through optimization of frequency reduction properties, the average efficiency realizes 89% or more. This can contribute to energy efficiency and cost reduction of power source systems.

## 1 まえがき

低炭素社会に向けて省電力の要求が高まる中、さまざまな機器に使われるスイッチング電源についても待機電力や平均効率の規格化が進められ、数年ごとに改訂されてきている。

特に近年、待機電力の削減の要求が大きくなってきており、ある調査では、一世帯当たり年間消費電力の約 6% が待機電力であると報告されている。これは実に年間消費量の 3 週間分に当たる。今後、機器の高機能化や、ネットワークの利用が拡大して常時稼働のシステムが増えることにより、待機電力のさらなる増加が予想されており、対策が急務となっている。

富士電機では、100 V や 230 V の商用交流電源から直接、起動電流を供給できる 8 ピンのスイッチング電源用制御 IC を系列化している。今回、従来品に比べて大幅に低待機電力性能を向上させ、電気機器に最適な保護機能を付加した第6世代 PWM (Pulse Width Modulation) 制御 IC 「FA8A00 シリーズ」を開発した。

## 2 「FA8A00 シリーズ」の概要

FA8A00 シリーズはカレントモード PWM 制御 IC である。外観を図 1 に示す。この IC は、軽負荷時にスイッチング周波数を低減させることで、軽負荷でも高効率を達成することができるスイッチング制御 IC である。500 V 耐圧の起動素子と、起動電流の定電流制御を行う回路からなる起動回路を備えている。また、負荷電流が減少してある一定以下になると、スイッチングを停止してバースト動作を行い、消費電力を極限まで下げることが可能である。これにより、電源として待機電力は 28 mW、平均効率

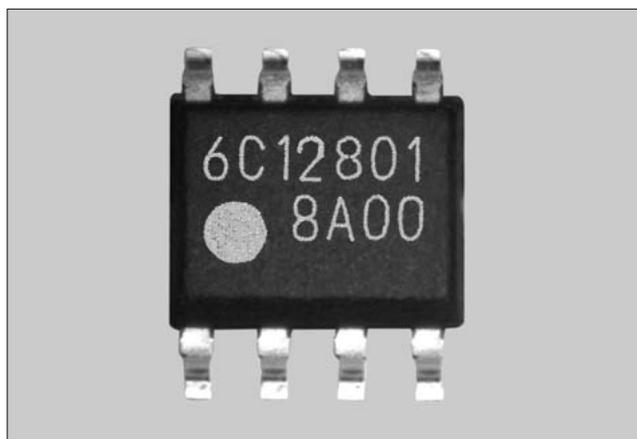


図 1 「FA8A00 シリーズ」

表 1 「FA8A00 シリーズ」の機能概要

項目	「FA8A00シリーズ」	従来品
周波数低減動作	リニア低減+バースト	リニア低減
過負荷保護 交流入力電圧補正	内蔵	なし
Xキャパシタ放電	内蔵	なし
IC消費電流	400 μA	1.35 mA
待機電力 (電源動作時)	30 mW以下	87 mW

89.2% を達成した。表 1 に FA8A00 シリーズの機能概要を、図 2 に FA8A00 シリーズのブロック図を示す。

## 3 0.35 μm 500 V プロセス・デバイス技術

今回、従来品よりもいっそうの低消費電力化、制御回路の高精度化を実現するため、新たに 0.35 μm プロセスを開発した。低耐圧デバイスの微細化と 500 V 起動素子を融合させ、これまでアナログ回路で構成していた多くの回路ブ

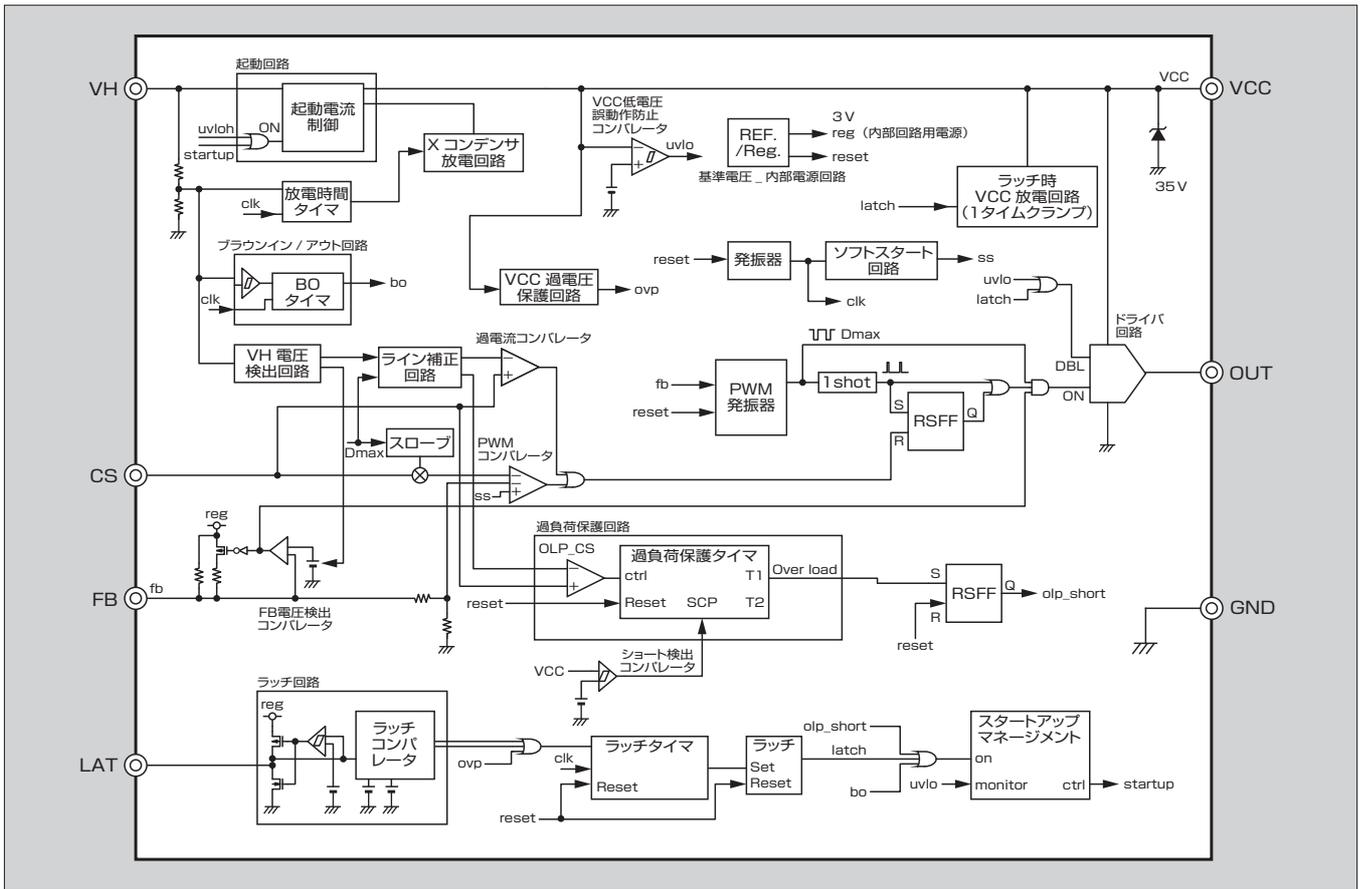


図 2 「FA8A00 シリーズ」のブロック図

ロックをデジタル化することで、低消費電力化が可能になった。

#### 4 主な特徴

##### 4.1 X キャパシタの放電機能

スイッチング電源で発生する伝導ノイズの交流ラインへの流出を低減するため、X キャパシタを接続することが一般的である。ただし、X キャパシタによる感電を防止するため UL60950 などの国際安全規格では、交流電圧遮断後 1 秒以内に、初期値の 37% 以下までその両端電圧を下げる事が定められている。図 3 に従来の放電抵抗 Rx による X キャパシタ Cx の放電回路を、図 4 に Rx による損失 (3MΩ) を示す。従来は、Cx と並列に接続した Rx により放電を行っていた。1 秒間に 37% 以下まで放電するには、Cx を 0.33μF とした場合、Rx は 3MΩ 以下にする必要がある。これにより、交流入力電圧 264V では 20mW 以上の損失が発生してしまう。30mW 以下の低待機電力を実現する上では、Rx での損失を削減することが不可欠とな

〈注 1〉 X キャパシタ : X コンデンサとも呼ばれ、ノイズ除去を目的としたコンデンサである。X キャパシタは、交流電源ライン間に挿入する。蓄積電荷による感電の危険性があるため、国際安全規格 UL60950 などに放電電圧と放電時間が規格化されている。

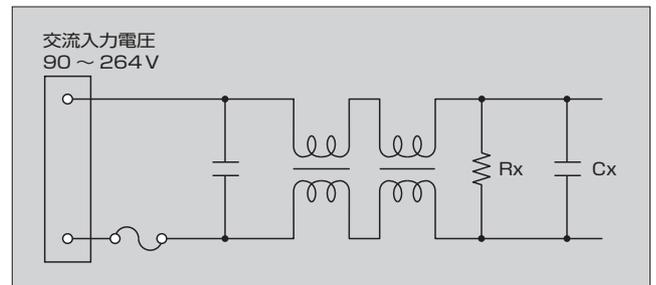


図 3 Rx による Cx の放電回路 (従来)

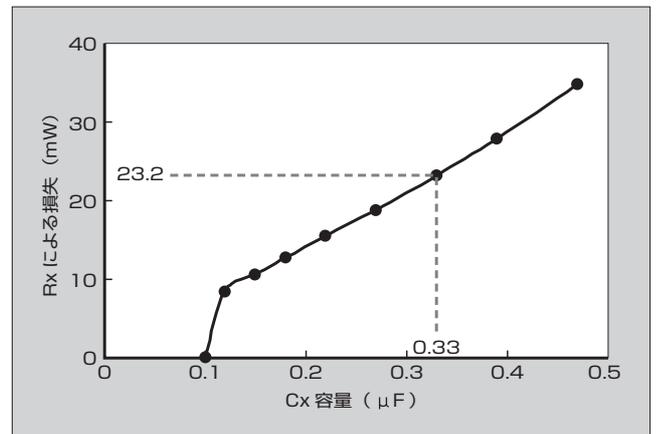


図 4 Rx による損失 (3MΩ)

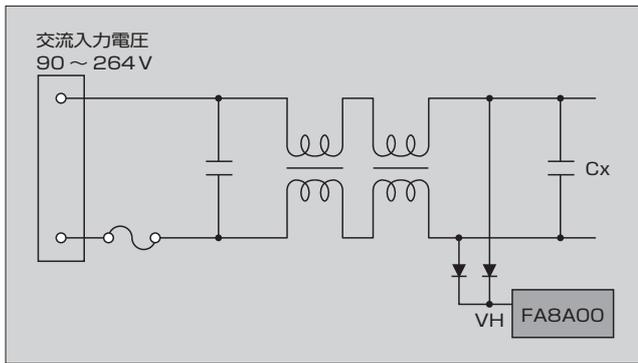


図5 FA8A00シリーズを使ったときの放電回路

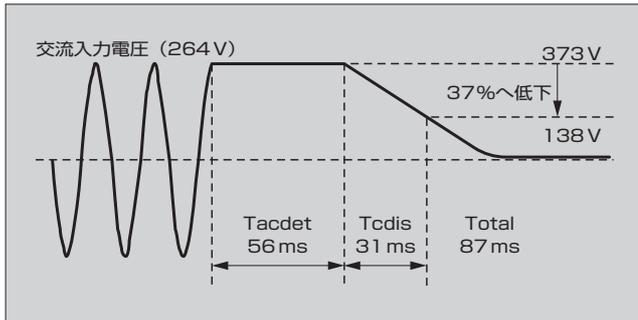


図6 Cx 放電時の動作波形

そこで、FA8A00シリーズではXキャパシタ放電の機能を取り込み、Rxをなくして20mWの損失削減を可能にした。図5にFA8A00シリーズを使ったときの放電回路を、図6にCx放電時の動作波形を示す。ICのVH端子で交流入力電圧の遮断を検出し、ICに内蔵したスイッチを制御してCxの電荷を引き抜く。Cxを交流入力電圧遮断時の37%以下にするまでに要する時間は、遮断検出時間（Tacdet）を含め、Cxが0.33μFのときに平均87msとなる。

本機能を使った場合、Cxを1μFとしても放電までに要する時間は最大310msであり、安全規格に対し十分余裕を持った設計が可能になる。

#### 4.2 保護機能

FA8A00シリーズは、電源システムに最適な保護機能を内蔵しており、少ない外部部品で安全で安定した電源を実現できる。

##### (1) 外部ラッチ機能（過熱保護）

サーミスタTHを接続し、過熱保護として使うローサイド側アクティブラッチ機能は、より高精度・低消費電力化を行った。さらに、VCC過電圧保護の調整などに使えるハイサイド側アクティブラッチ機能を追加した。

##### (2) 低交流入力電圧保護（ブラウンアウト）

交流入力電圧が低い場合、出力電圧が不安定になることや起動が遅くなることがあり、過負荷保護機能により停止してしまう場合がある。このような動作を防ぐため、VH端子で検出された交流入力電圧がしきい値電圧以下の場合に、動作を停止する低交流入力電圧保護機能を内蔵した。

この機能には30ms以上の遅延があるため、瞬時電圧低下が起きても動作停止をしない仕様である。

##### (3) 過負荷保護機能

CS端子電圧をカウント周期500μsごとに検出するアップダウンカウンタを持ち、CS端子電圧があるしきい値以上になるとカウントアップを始め、所定数カウント後に過負荷と判断し、動作を停止する過負荷保護機能を内蔵した。過負荷保護機能によりラッチ停止するタイプと再起動（自動復帰）するタイプがある。さらに、ラッチタイプには、モータ駆動などのピーク負荷に対応しカウント周期を860msと長くしたタイプも系列化した。また、CS端子電圧がさらに高くなるとON幅を狭め、CS端子電圧があるしきい値を超えないようにするリミット機能も併せ持つ。

##### (4) 負荷短絡保護機能

過負荷状態でカウントアップしているときにVCC電圧があるしきい値以下まで低下した場合、負荷短絡状態とみなし即座にスイッチングを停止する機能を持たせた。この機能により負荷短絡時のパワーMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）の破壊を防ぐことができる。ただし、出力電圧を切り替えるタイプの電源では、出力電圧を下げたときにVCC電圧が通常動作より低くなり、負荷短絡を誤検出しやすくなってしまふ。そこで、負荷短絡状態をFB端子電圧で検出するタイプも系列化した。このタイプであれば、VCC電圧に依存しない負荷短絡保護が実現できる。

## 5 電源回路への適用効果

### 5.1 30mW待機電力と平均効率

FA8A00シリーズは、従来品と比較して消費電流を大幅に低減した。内部回路のデジタル化と内部回路用電源の低電圧化を行い、消費電流は従来品の約30%となった。これにより、Xキャパシタ放電機能の追加によってRxでの損失をなくしたこと（4.1節）と合わせ、スイッチング電源システムでの待機電力を30mW以下にできた（図7）。

また、待機時は25kHzのスイッチング周波数でバースト動作を行う。一般的に、バースト動作ではスイッチング

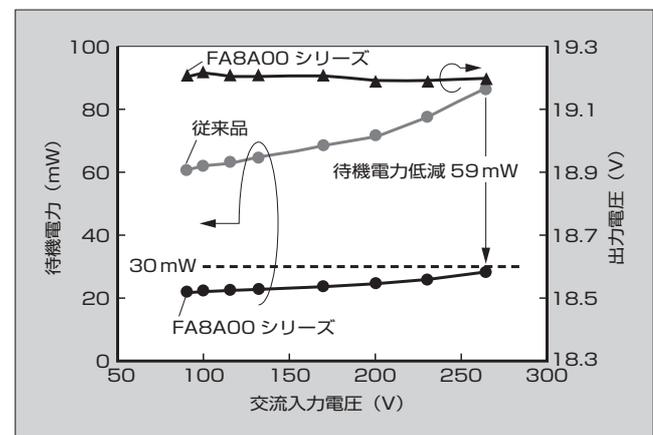


図7 待機電力の低減

休止期間を長くすることで消費電力の低減を行うため、出力電圧が大きく変動してしまうことが問題となっていた。FA8A00シリーズでは、FB端子の出力電流を最適化することで待機電力30mW以下を実現しつつ、バースト動作時の出力電圧変動を±5%以下にできた。

図8に示すように、平均効率は従来品に比べて0.4%向上した。スイッチング周波数の低減特性を最適化することで、負荷率が低いときに大きく効率が向上した。交流入力電圧230Vでの平均効率は89.2%となり、EPA5.0<sup>(注2)</sup>で定められている平均効率87%以上に対して2%の余裕を持つことができた<sup>(1)</sup>。

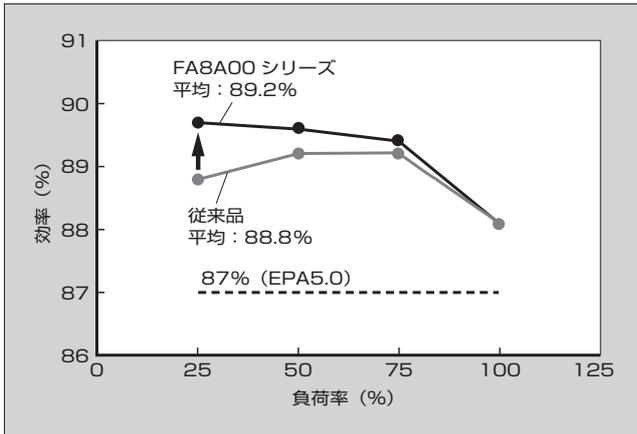


図8 効率の向上

図9に、これらの評価に用いた評価用電源ボードの回路図を示す。

### 5.2 過負荷時出力電流の交流入力電圧依存性改善

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ってしまいうため、従来品ではCS端子と一次側平滑電圧(C3プラス電圧)の間に抵抗を挿入して補正する必要があった(図9)。この方法では、交流入力電圧90~264Vの範囲内で、過負荷時の出力電流幅が±10%程度と大きな値になっていた。

今回、交流入力電圧補正機能をICに内蔵することで、

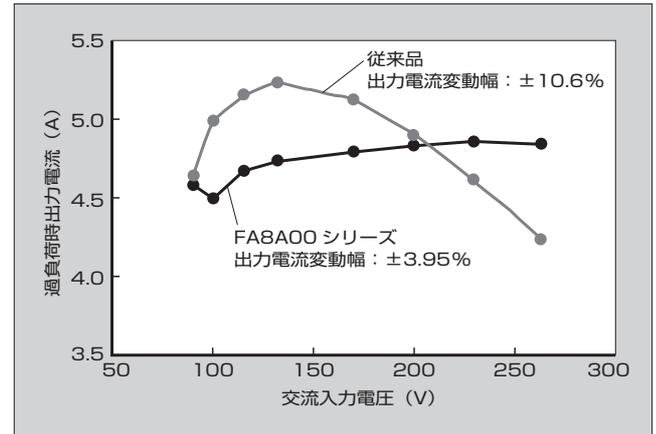


図10 過負荷時出力電流のフラット化

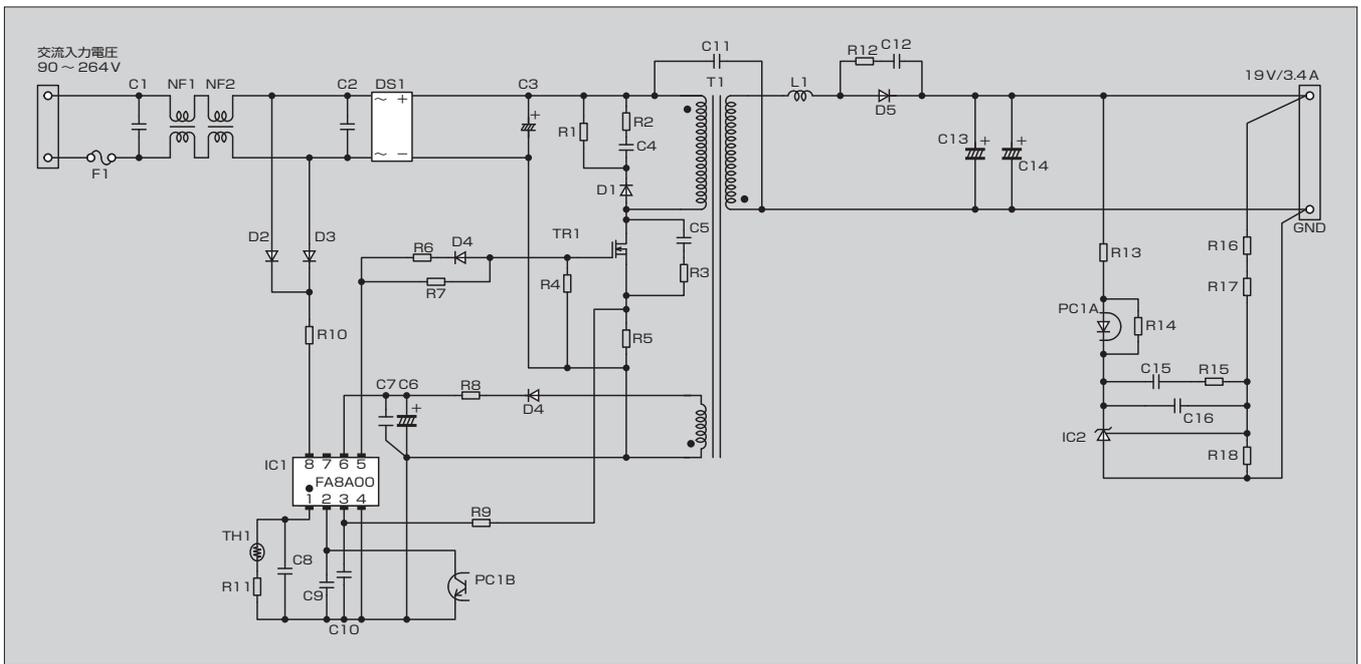


図9 「FA8A00シリーズ」評価用電源ボード回路(19V/3.4A 65W)

〈注2〉 EPA5.0: 国際エネルギー省プログラム(IEEC)の外部電源装置(EPS)基準である。国際エネルギー省プログラムは、OA機器の省エネルギーのための国際的な環境ラベリング制度であり、経済産業省と米国環境保護庁の相互承認の下で運営している。

補正用の外付け部品を不要にし、さらに精度を向上して $\pm 4\%$ 以下の出力電流変動幅を実現した。図10に示すように、従来は交流入力電圧100V以下で出力電流が急激に減少する特性を持っていた。このため、交流入力電圧150V付近に出力電流のピークがくるように調整を行い、交流入力電圧が高いときには出力電流が下がる傾向となっていた。FA8A00シリーズでは、交流入力電圧100V以下での出力電流低下を抑えるために、CS端子電圧しきい値の切替えを行う。これにより、入力電圧の全範囲で出力電流がフラットな特性を実現できた。

### 5.3 電源部品削減効果

電源から発生するEMI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コモンモードチョークコイルやコンデンサを挿入する。最大のノイズ発生源はパワーMOSFETのスイッチングであるが、スイッチング周波数を変動(周波数拡散)させることでノイズの周波数を分散することができる。FA8A00シリーズは、周波数変動周期を従来品の $1/4$ とすることで最適化を図り、規格に対するノイズマージンを11dB以上確保することが可能となった。

この機能により、入力フィルタの小容量化や削減が可能である。

## 6 あとがき

本稿では、第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」について述べた。カレントモードPWM制御ICには、多

くの機能を内蔵する要求が増えている。今後、小型8ピンパッケージでこれを実現し、さらに各特性の調整が簡単にできるICの開発を行い、市場のニーズにマッチした製品を提供していく所存である。

### 参考文献

- (1) 朴虎岡ほか. EPA5.0規格対応カレントモードPWM制御IC「FA5592シリーズ」. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.403-407.



#### 藪崎 純

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部ディスクリート・IC技術部。



#### 山根 博樹

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部ディスクリート・IC技術部。



#### 小林 善則

スイッチング電源制御ICの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部パワー半導体事業統括部ディスクリート・IC技術部。



## 略語（本号で使った主な略語）

APF	Annual Performance Factor	通年エネルギー消費効率
BSD	Boot-Strap-Diode	
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor	
COP	Coefficient of Performance	エネルギー消費効率
CTE	Coefficient of Thermal Expansion	線膨張係数
DCB	Direct Copper Bonding	
DMC	Data Matrix Code	
DMOS	Diffusion MOSFET	
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FEM	Finite Element Method	有限要素法
FTP	Federal Test Procedure	
FWD	Free Wheeling Diode	
GTO	Gate Turn-off	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
HVIC	High Voltage Integrated Circuit	
IEMOS	Implantation and Epitaxial MOSFET	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IMS	Insulated Metal Substrate	
IPM	Intelligent Power Module	
JFET	Junction Field-Effect Transistor	接合形電界効果トランジスタ
LVIC	Low Voltage Integrated Circuit	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ
NC	Numerical Control	
NEDC	New European Drive cycle	
NPC	Neutral-Point-Clamped	
NTC	Negative Temperature Coefficient	
PCS	Power Conditioner	パワーコンディショナ
PFC	Power Factor Correction	力率改善
PIM	Power Integrated Module	
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
QPJ	Quasi Planer Junction	擬平面接合
RB-IGBT	Reverse-Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
SOP	Small Outline Package	
TMA	Thermal Mechanical Analysis	熱機械分析
UPS	Uninterruptible Power Supply	無停電電源装置
ZVS	Zero Voltage Switching	

「Super J-MOS シリーズ」の系列拡大

パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) は、アダプタなどの小型製品をはじめ、サーバ、産業・通信電源、無停電電源装置 (UPS)、パワーコンディショナ (PCS) などの大型製品に至るまで、さまざまな電力変換機器のスイッチング素子として使用されています。近年、電力不足により省エネルギー (省エネ) 志向が強まる中、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います。さらには、高電力密度・低ノイズといった要求もあり、パワー MOSFET には、これまで以上に小型で低損失・低ノイズの製品が求められています。

富士電機は、2011 年に「Super J-MOS シリーズ」を開発し、系列化を進めてきました。これは、従来のパワー MOSFET と比べ、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大幅に改善したものです。

特長

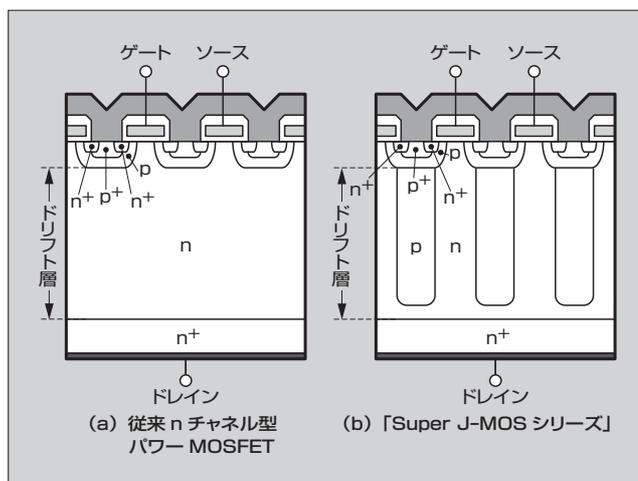
Super J-MOS シリーズは、ドリフト層に p 形領域と n 形領域を交互に配置したスーパージャンクション構造を採用しています。この構造は、従来の MOSFET よりもドリフト層領域の不純物濃度を高くすることができ、 $R_{on} \cdot A$  を 70% 以上低減しています。また、ゲート・ドレイン間容量  $C_{GD}$  とゲートしきい値電圧  $V_{th}$  を最適化することで、スイッチング損失の低減も実現しています。これらの性能向上により、電力変換機器の導通損失とスイッチング損失を大幅に低減することができます。

製品系列

Super J-MOS シリーズの製品系列と主要特性を表に示します。600 V/190 mΩ に加え、40 mΩ、70 mΩ、125 mΩ のオン抵抗系列を拡充しました。低容量電源向けの 280 mΩ、380 mΩ、470 mΩ、580 mΩ のオン抵抗系列と面実装パッケージ (D2-Pack) も現在開発中です。

主な用途

- サーバ、UPS、放送機器などの情報通信機器
- PCS など新エネルギー分野向け電力変換装置
- 薄型テレビ、アダプタ、パソコンなど



パワー MOSFET の断面構造

「Super J-MOS シリーズ」の製品系列と主要特性

型 式	パッケージ	$V_{DS}$ (V)	$I_D$ (A)	$R_{DS(on)max}$ (mΩ)	$V_{GS(th)}$ (V)	$P_D$ (W)
FMV20N60S1	TO-220F	600	20	190	3±0.5	53
FMP20N60S1	TO-220					150
FMH20N60S1	TO-3P					140
FMW20N60S1	TO-247					140
FMV30N60S1	TO-220F	600	30	125	3±0.5	90
FMP30N60S1	TO-220					250
FMH30N60S1	TO-3P					220
FMW30N60S1	TO-247					220
FMH47N60S1	TO-3P	600	47	70	3±0.5	390
FMW47N60S1	TO-247		390			
FMW79N60S1	TO-247		68	40		545

□ : 新製品

## 国内メガソーラー用 PCS 「PVI750-3/500」

市場が拡大している国内メガソーラー（太陽光発電所）用として 500 kW パワーコンディショナ（PCS）「PVI750-3/500」を開発し、PCS の容量系列を拡充しました。

本 PCS は、先に開発した 1 MW 品「PVI1000-3/1000」（DC1,000 V、最高効率 98.5%、屋外設置専用）の小規模メガソーラー<sup>(注)</sup>用で、屋内設置タイプです。

### 特長

#### (1) エネルギーの効率利用

独自技術である新 3 レベル変換回路を適用し、スイッチング損失とフィルタ損失を大幅に低減しました。これにより最高効率 97.7% を実現しました。

#### (2) 入力電圧の引き上げ

直流の入力電圧範囲を 750 V まで引き上げることで、直流配電ロスを低減します。

#### (3) 直流入力の 5 分岐受け

直流の入力分岐を標準で 5 分岐受けとし、集電箱を削減してコストダウンを実現します。

〈注〉小規模メガソーラー：発電能力 2 MW 未満



「PVI750-3/500」

## スーパーマーケット向け省エネ型ショーケース

スーパーマーケット業界では、店舗機器の消費電力削減のニーズが高まっています。これに応じて、省エネルギー（省エネ）性能を強化した冷蔵冷凍ショーケース「エコマックス S シリーズ」を開発しました。オープンショーケースは、前面エアカーテンの外気遮断性能が消費電力に大きく影響します。前面エアカーテンの風速分布と庫内温度分布の最適化を図り、冷却性能を改善し、現行機種に対して 1 店舗当たり（ショーケース 24 台のモデル店舗）の消費電力量を 30% 低減しました。

### 特長

(1) 独自技術である棚先端のエアカーテン気流ガイド構造により、冷気風量バランスの最適化を図り、前面エアカーテンの乱れを抑制することで外気遮断性能を向上しました。外気巻き込みによる熱交換器への着霜量を大幅に低減し、冷却性能を向上しました。

(2) 冷凍多段タイプは、3 層あるエアカーテンの風速バランスの最適化と冷気吹出し構造の見直しにより、防露ヒータ容量を 18% 削減しました。

(3) 省エネに優れた LED を業界で初めて全機種に標準搭載し、従来の蛍光灯照明に対して消費電力を 48% 削減しました。



「エコマックス S シリーズ」

## 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社会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

#### 社会インフラ

エネルギーマネジメントシステム、送变电設備、電力量計、放射線管理システム、輸送システム

### 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、「省エネルギー化」「ライフサイクルサービス」を提供します。

#### 産業プラント

産業用ドライブシステム、プラント制御システム、計測システム

#### ファシリティ

産業電源、民電向け受変電設備

### パワーエレクトロニクス機器

エネルギーの品質や効率利用が求められる市場にパワーエレクトロニクス製品を提供し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。

#### ドライブ

インバータ・サーボ、モータ、EV用システム

#### パワーサプライ

無停電電源装置（UPS）、パワーコンディショナ（PCS）

#### 器具

受配電・制御機器

### 電子デバイス

エネルギー・環境分野をはじめ、自動車・情報機器・産業機器に欠かせないパワー半導体、太陽電池、感光体、ディスク媒体を供給します。

#### 半導体

パワー半導体、感光体、太陽電池

#### ディスク媒体

ディスク媒体

### 食品流通

コア技術である冷熱技術に加え、メカトロ技術、ITを融合したシステム技術を生かし、最適な商材・ソリューションを提供します。

#### 自販機

飲料・食品自動販売機

#### 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86巻 第1号

技術成果と展望

### 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	森岡 崇行	石田 康弘	渡辺 哲仁	小峯 繁	
	富永 保隆	戸澤 克弘	前田政一郎	澤田 睦美	
	植野 利男	保川 幸雄	荻野 慎次	繁田 雅信	
	吉田 隆	上住 洋之			
特集委員	鶴田 芳雄	井川 修	多田 元		
事務局	柳下 修	木村 基	小野 直樹	山本 亮太	

### 富士電機技報 第85巻 第6号

平成24年10月30日印刷 平成24年11月10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	735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](http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html)  
FE 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。

© 2012 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

## No.1 技術成果と展望

新しい年を迎えて	2
年頭特別鼎談	4
成果と展望	12
ハイライト	17
研究開発の取り組み	26
環境にやさしいエネルギーを創る“創エネルギー”	42
効率的にエネルギーを使う“省エネルギー”	48
エネルギーをスマートにつなぐ“エネルギーマネジメント”	57
電気を自在に操るパワーエレクトロニクス	67
共通技術・先端技術・その他	82
略語	96
商標	98

## No.2 特集 受配電・制御機器コンポーネント

【特集に寄せて】再生可能エネルギー利用と受配電・制御機器	松村 年郎	105 (1)
<b>最新機器の特徴技術</b>		
受配電・制御機器コンポーネントの現状と展望	浅川 浩司	106 (2)
ミニコンタクタ「SK シリーズ」	大久保幸治 堤 貴志 秦 淳一郎	113 (9)
サーマルリレー「TK12 シリーズ」の小型化技術	森下 文浩 古畑 幸生	119 (15)
小型 32～63 AF 低圧遮断器	浜田 佳伸	124 (20)
データセンター向け低圧遮断器	佐藤 佑高	129 (25)
ドライエア密閉形キュービクル用真空遮断器	大澤 雪雄 白井 英人 藤城 智	133 (29)
高圧受配電用デジタル形保護継電器「QHA シリーズ」	國分多喜雄	138 (34)
設備監視およびエネルギー監視システム用機器 —「F-MPC シリーズ」の拡充—	田澤 勇治 谷 敏明 町田 悟志	144 (40)
<b>機器を支える基盤技術・生産技術</b>		
受配電・制御機器コンポーネントにおける技術の変遷と動向	高橋 龍典	148 (44)
直流配電システムの開閉保護技術	恩地 俊行 工藤 高裕 外山健太郎	154 (50)
直流高電圧用ブレーカの遮断技術	森合 浩	158 (54)
受配電・制御機器コンポーネントの環境対応材料技術	吉澤 利之 関口 潔 古川 雅晴	164 (60)
受配電・制御機器コンポーネントの設計を支えるシミュレーション技術	坂田 昌良	169 (65)
受配電・制御機器コンポーネントのものづくりを支える生産技術	涌井 正平	175 (71)
<b>解説</b>		
EC 指令, CCC 強制認証		180 (76)
略語・商標		181 (77)

**No.3 特集 パワーエレクトロニクス機器**

【特集に寄せて】 Power Electronics

— A Key Enabling Technology for Modern Society

パワーエレクトロニクス — 現代社会の鍵となる実現技術 — ..... Rik W. De Doncker 184 (2)

パワーエレクトロニクス機器技術の現状と展望 ..... 河野 正志 廣瀬 順 藍原 隆司 188 (6)

汎用インバータ・サーボシステムの最新技術 ..... 酒井 利明 井本 博幸 194 (12)

高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」 ..... 田中 正男 山本 健 木内 忠昭 199 (17)

高効率 IPM モータ「GNS シリーズ」「GNP シリーズ」 ..... 廣瀬 英男 中園 仁 205 (23)

水冷大容量高圧インバータ「FRENIC4800VM5」 ..... 木谷 昌史 花澤 昌彦 安達 昭夫 210 (28)

電気自動車用急速充電器「FRCM シリーズ」 ..... 川浦 正人 島中 伸治 守山 亨 215 (33)

鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器 ..... 梅澤幸太郎 220 (38)

80 PLUS 適合の高効率フロントエンド電源 ..... 軽部 邦彦 多和田信幸 中原 智喜 226 (44)

UPS 用電源管理プラットフォーム「FCPOP」 ..... 岩井 一博 木村 照道 231 (49)

UPS における新型電池の評価・適用技術 ..... 中澤 浩志 濱田 一平 235 (53)

データセンター向けニッケル水素電池搭載ミニ UPS「LX シリーズ」 ..... 大島 雅文 森藤裕治郎 椎名 啓順 241 (59)

メガソーラー向け屋外設置型高効率 PCS「PV11000」 ..... 藤井 幹介 藤倉 政信 菊池 貴之 245 (63)

データセンター向け A-NPC 3 レベル適用大容量高効率 UPS  
「UPS 7000HX シリーズ」 ..... 山方 義彦 川崎 大介 高橋 昇 250 (68)

SiC デバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器 ..... 松本 康 近藤 靖 木村 浩 255 (73)

**解説**

80 PLUS, 電池容量と放電レート・充電レート, PUE, MPPT ..... 260 (78)

**略語・商標** ..... 262 (80)

**No.4 特集 感光体・太陽電池・磁気記録媒体**

**感光体**

【特集に寄せて】有機デバイス研究者雑感 ..... 市川 結 268 (4)

【現状と展望】感光体の現状と展望 ..... 会沢 宏一 石井 英行 大日方 孝 269 (5)

有機感光体用材料技術 ..... 鈴木信二郎 朱 豊強 北川 清三 274 (10)

プリンタ用有機感光体 ..... 池田 豊 小林 広高 田中 靖 279 (15)

複写機用有機感光体 ..... 小川 祐治 上野 貴志 中村 友士 285 (21)

有機感光体の評価技術 — 潜像評価と材料設計 — ..... 寺崎 成史 長谷川知貴 会沢 宏一 289 (25)

**太陽電池**

【特集に寄せて】これからの太陽電池 ..... 近藤 道雄 294 (30)

【現状と展望】太陽電池の現状と展望 ..... 成田 満 安田 耕治 295 (31)

フィルム型アモルファス太陽電池「FWAVE 太陽電池セル」 ..... 藤掛 伸二 佐藤 広喜 下沢 慎 300 (36)

フィルム基板太陽電池のモジュール化技術 ..... 横山 尚伸 中村 哲郎 304 (40)

フィルム基板太陽電池の高効率化技術 ..... 松山 秀昭 和田 雄人 澤柳 悟 308 (44)

**磁気記録媒体**

【特集に寄せて】HDD のさらなる高密度化に向けて ..... 岡本 好弘 313 (49)

【現状と展望】磁気記録媒体の現状と展望 ..... 松尾 壮太 上住 洋之 原 直毅 314 (50)

垂直磁気記録媒体の磁性関連技術 ..... 渡辺 貞幸 大山 浩永 穂積 康彰 320 (56)

垂直磁気記録媒体の HDI 関連技術 ..... 二村 和男 永田 徳久 渡邊 武 324 (60)

熱アシスト磁気記録媒体関連技術 ..... 内田 真治 稲葉 祐樹 由沢 剛 329 (65)

**略語** ..... 333 (69)

**新製品・新技術紹介** ..... 334 (70)

**No.5 特集 自動販売機の省エネルギー・新機能技術**

【特集に寄せて】社会に貢献する自動販売機技術への期待 ..... 丸山 直樹 339 (3)

【現状と展望】自動販売機の省エネルギー・新機能技術の現状と展望 ..... 北出雄二郎 340 (4)

ハイブリッドヒートポンプ飲料自動販売機 ..... 滝口 浩司 高松 英治 345 (9)

自動販売機の高効率熱交換器 ..... 土屋 敏章 倉 馨 350 (14)

カップ式飲料自動販売機の省エネルギー技術 ..... 江利川 肇 中島 規朗 牧野 道彦 355 (19)

低 GWP 冷媒の自動販売機への適用 ..... 石田 真 起 賢一 361 (25)

多品種対応 清涼飲料ディスペンサ ..... 遠藤 伸之 365 (29)

汎用型食品・物品自動販売機「FNX118NR」 ..... 市原 史基 堀口 剛史 富樫 大 369 (33)

デジタルサイネージ自動販売機「JX34」 ..... 横田 義剛 武藤 健二 後藤 友宏 374 (38)

セールスプロモーションマシン ..... 柴田 義人 吉野 正洋 石原 雄大 378 (42)

**解説**

“庫”と“室”，ハイブリッドヒートポンプ方式，GWP と TEWI，BIB (Bag in Box) ..... 383 (47)

**略語・商標** ..... 385 (49)

**新製品・新技術紹介** ..... 386 (50)

**No.6 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】ネガワットコストとパワーエレクトロニクス ..... 河村 篤男 391 (1)

【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 392 (4)

マルチレベル電力変換器用 1,700 V RB-IGBT ..... 魯 鴻飛 荻野 正明 中澤 治雄 398 (10)

All-SiC モジュール技術 ..... 梨子田典弘 日向裕一郎 堀尾 真史 403 (15)

IGBT モジュールの高信頼性実装技術 ..... 百瀬 文彦 西村 芳孝 望月 英司 408 (20)

IGBT モジュール開発におけるデバイス・回路・熱の  
 連携シミュレーション技術 ..... 山田 昭治 池田 晴信 仲村 秀世 413 (25)

「V シリーズ」IPM の系列拡大  
 — 高放熱タイプ「P630 パッケージ」— ..... 本橋 覚 高橋 秀明 田岡 正裕 418 (30)

3.3 kV IGBT モジュールの系列拡大 ..... 福知 輝洋 金子 悟史 422 (34)

「V シリーズ」IGBT モジュールの系列拡大  
 — 小型フレキシブル PIM— ..... 小松 康佑 甲斐 健志 塩原真由美 426 (38)

インバータエアコン用小容量 IPM ..... 山田 忠則 傳田 俊男 白川 徹 430 (42)

車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術 ..... 安達新一郎 小高 章弘 長畦 文男 435 (47)

車載用第 4 世代 IPS 「F5100 シリーズ」 ..... 鷹坂 浩志 中川 翔 豊田 善昭 440 (52)

LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」 ..... 山田谷政幸 山路 将晴 山本 毅 445 (57)

第 6 世代 PWM 制御 IC 「FA8 A00 シリーズ」 ..... 藪崎 純 山根 博樹 小林 善則 452 (64)

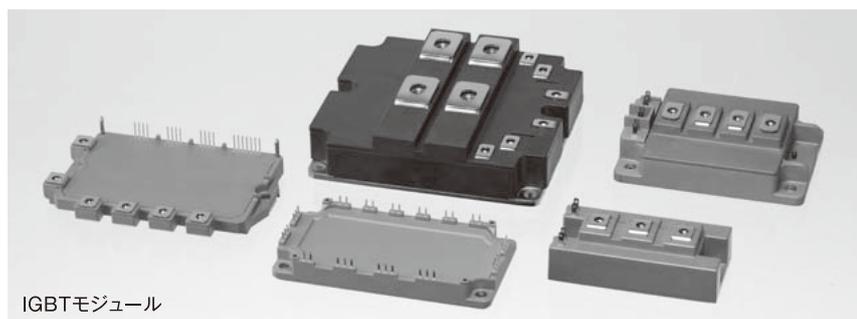
**略語** ..... 457 (69)

**新製品・新技術紹介** ..... 458 (70)



# 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・風力発電などの創エネルギー分野、各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・電気自動車ほかの次世代交通システムなど、様々な場面で貢献しています。その先には、スマートコミュニティをはじめ資源循環型持続可能社会の実現という、未来の目標が。人の営みと地球が共生していくために、エネルギー関連事業を通じた富士電機の挑戦はこれからも続きます。



IGBTモジュール

---

## 富士電機のパワー半導体

---

