

## 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、地球社会の良き企業市民として、地域、顧客、パートナーとの信頼関係を深め、誠実にその使命を果たすことを経営の基本理念としている。創業から90年の長い歴史の中で培った技術や経験を基に、電気・熱エネルギー技術の革新を追求し、エネルギーを最も効率的に利用できる、付加価値の高い、環境にやさしい製品づくりに取り組んでいる。

安全・安心で持続可能な社会を実現するために、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と、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（パワエレ）技術に対する世の中の期待は非常に大きい。これらのニーズが高まる中、富士電機では、エネルギー変換効率が高く低ノイズの、地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発している。これらの製品は、環境、エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラ、家電製品などの分野に広く適用され、世の中に貢献している。

本稿では、パワエレ技術のキーデバイスとしてのパワー半導体について、Si（シリコン）デバイスやSiC（炭化けい素）デバイス<sup>(\*)1</sup>を搭載したパワーモジュール<sup>(\*)2</sup>、パワーディスクリート<sup>(\*)3</sup>、パワーIC<sup>(\*)4</sup>を中心に、最新の製品およびその要素技術の現状と展望を述べる。

## ② パワーモジュール

図1に、パワーモジュール製品の応用例を示す。大容量市場では、次世代のパワー半導体として期待が大きいSiCのSBD<sup>(\*)5</sup>（Schottky Barrier Diode）とSiのIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とを組み合わせたSiCハイブリッドモジュール、およびAll-SiCモジュールを開発した。また、3レベル変換器用IGBTモジュールの開発も進めている。中容量市場では、ハイブリッド自動車（HEV）や電気自動車（EV）向けのインテリジェントパワーモジュール

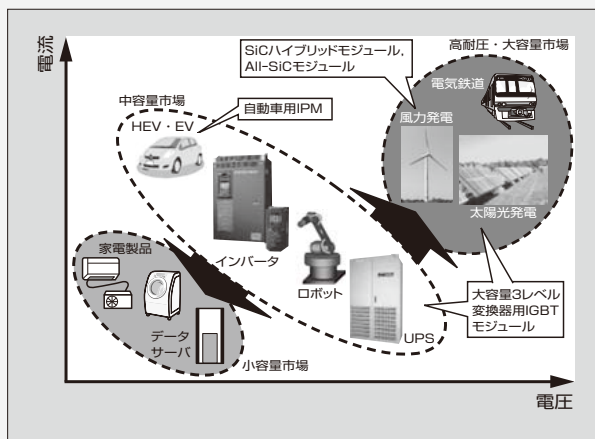


図1 開発したパワーモジュール製品の応用例

## (\*1) SiC デバイス

ワイドバンドギャップ半導体の一つであるSiC（炭化けい素）を用いた半導体デバイスである。現在主流のSi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。

## (\*2) 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、一つのモジュールの中の素子（通常はIGBT+逆並列接続FWD）の数に応じて、1in1、2in1、6in1などと呼ばれる。パワー素子を制御する駆動回路も搭載したものは、インテリジェントパワーモジュール（IPM）と呼ばれる。

## (\*3) パワーディスクリート

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

## (\*4) パワー IC

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

## (\*5) SBD

Schottky Barrier Diodeの略である。金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオードである。その優れた電気特性のため、SiCショットキーバリアダイオードのFWDへの適用検討が始まっている。多数キャリアと少数キャリアを利用したPiN（P-intrinsic-N）ダイオードと比較し、多数キャリアのみで動作するSBDは、逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。反面、逆バイアス印加時の漏れ電流が大きいという問題がある。

(<sup>(\*)6</sup>) (IPM : Intelligent Power Module) と TIM (Thermal Interface Material) プリペースト IGBT モジュールを開発した。そして、これらの製品開発を支える要素技術として、高温動作保証および直接水冷のためのパッケージ技術についても力を注いでいる。

### 2.1 SiCハイブリッドモジュール

インバータの高効率化に向け、パワー半導体の低損失への要求が強い。代表的なパワー半導体である IGBT モジュールは、これまで Si の IGBT チップおよび FWD (Free Wheeling Diode) チップを用いてきた。<sup>(\*)7</sup>しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつあり、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、適用装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。富士電機では、これまでに 600 V 耐圧と 1,200 V 耐圧の SiC-SBD の開発を完了し、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化してきた。<sup>(1)</sup>

現在、1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。このモジュールは、Si モジュールと同じ M277 パッケージを採用し、FWD に独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発した SiC-SBD チップを、IGBT に「V シリーズ」IGBT チップを適用した。このモジュールにおいて、順方向電圧と漏れ電流は Si モジュールと同等であり、かつスイッチング損失は大きく低減することを確認した。また、インバータでの発生損失は、Si モジュールに比べて 4 kHz 駆動において 26% 低減し、高周波動作では

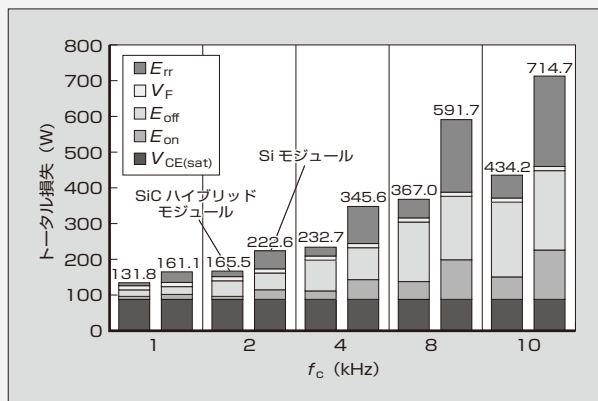


図2 インバータの発生損失

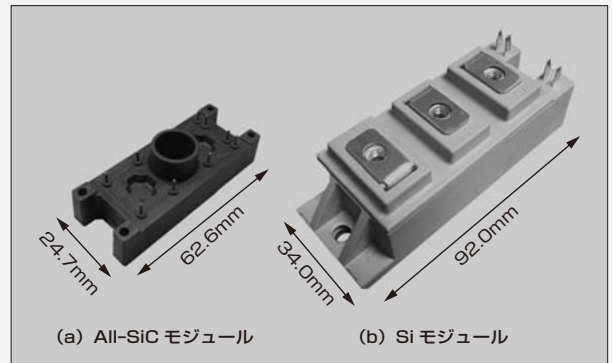


図3 All-SiCモジュールとSiモジュール

さらに優位であることを確認した (図2) (240 ページ “1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール” 参照)。

### 2.2 超小型・高信頼性All-SiCモジュール

富士電機では、SiC デバイスが持つ性能を最大限に発揮できるように All-SiC モジュールの開発を進めている。<sup>(2)</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。図3に、開発を進めている 1,200 V/100 A 定格の All-SiC モジュールと、同じ定格である従来の Si モジュールの外観を示す。All-SiC モジュールのフットプリントサイズは、従来に比べて 50% 以上小型化し、モジュールインダクタンスを 75% 低減させた。これにより、All-SiC モジュールの特性を最大限に引き出すことができ、特に高周波動作において低損失・小型化のメリットが大きい。この All-SiC モジュールを太陽光発電向けパワーコンディショナ (PCS) に適用し、効率 99% を達成している (244 ページ “超小型・高信頼性 All-SiC モジュール” 参照)。

### 2.3 175℃連続動作保証IGBTモジュールのパッケージ技術

汎用インバータは、その適用範囲が拡大しており、省エネルギー化と小型化の市場要求が強い。この要求に応え、中核部品である IGBT モジュールのさらなる小型化、高パワー密度化を実現するために、動作温度の上限を現行の 150℃ から 175℃ にさらに引き上げると、パワーサイクル寿命は約 30 ~ 50% 低下する。175℃ 連続動作を保証するために、従来の最大接合温

#### (\*)6 TIM

Thermal Interface Material の略である。パワーモジュールなどで発生した熱を効率良くヒートシンクに伝えるため、IGBT モジュールとヒートシンクの間に見える隙間を埋める材料である。グリスやコンパウンド、放熱シート、グラファイトなどがあり、使用環境に合わせて適切な材料を選択する。

#### (\*)7 FWD

Free Wheeling Diode の略である。還流ダイオードともいう。インバータなどの電力変換回路において、IGBT と並列に接続され、IGBT をオフした際にインダクタンスに蓄えられたエネルギーを電源側へ還流させる役割を担うデバイスである。Si デバイスでは、PiN ダイオードが主流である。多数キャリアと少数

キャリアの双方を用いたバイポーラタイプであるため、順方向電流通流時の電圧降下を小さくできるが、その分、逆回復損失が大きくなる。

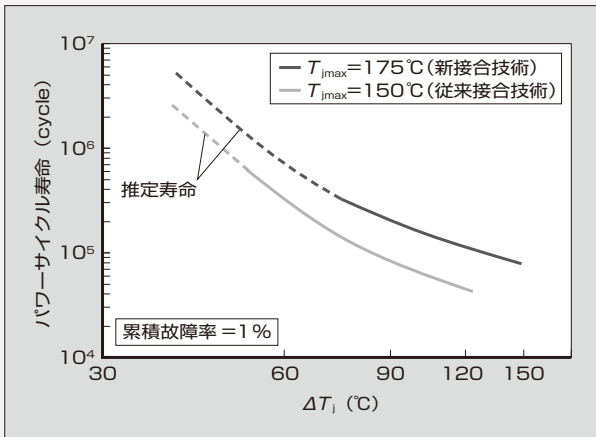


図4 パワーサイクル試験 ( $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ ) 結果

度  $T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$  と同等以上のパワーサイクル寿命を持つ高信頼性パッケージの技術を開発した。

高温環境における組織変化を抑制し、強度低下を防ぐために、従来のアルミニウムワイヤに代わり高耐熱性を持つ新アルミニウムワイヤを開発した。また、チップと絶縁基板間のはんだは、従来の Sn-Ag はんだに代わって高温で高強度を持つ新しいはんだ合金を開発した。さらに、チップの表面電極に発生する応力を低減し、アルミニウムよりも Si に近い線膨張係数を持つ Ni をアルミニウム電極上に成膜した構造を開発した。

これら三つの新技術を適用することにより、 $175^{\circ}\text{C}$  連続動作を可能にし、従来よりも高寿命の IGBT モジュールを開発した (図4)。これらの技術は、現行の製造プロセスをそのまま使用できるため、容易に  $175^{\circ}\text{C}$  連続動作を保証する製品の量産が可能である。IGBT モジュールのさらなる高パワー密度化により、汎用インバータの最大出力を向上させることが期待できる (249 ページ “ $175^{\circ}\text{C}$  連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術” 参照)。

#### 2.4 3レベル電力変換器用大容量IGBTモジュール

電力エネルギーの効率的な利用を可能にするパワエレ技術は、発電時の  $\text{CO}_2$  排出量の抑制や再生可能エネルギーの有効活用につながる。富士電機では、大容量変換装置用に 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。

UPS や太陽光発電 (メガソーラー) を大容量にするためには、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並



図5 3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

列に接続して使用することが多い。しかし、IGBT モジュールの並列使用は、モジュール間や、モジュールと主回路間の配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。また、冷却フィンの面積が大きくなる傾向もある。これらの課題を解決するため、大容量 IGBT モジュールが市場から期待されている。

3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールは、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped<sup>(4)</sup>) 方式の回路とサーミスタをワンパッケージ化したものである。富士電機は、AT-NPC 方式で  $1,200\text{V}/900\text{A}$  の V シリーズチップと RB-IGBT<sup>(5)</sup> チップを使用した大容量 IGBT モジュールを開発した (図5)。また、電磁相互誘導作用を利用して、IGBT モジュールの内部インダクタンスを最大で  $30\text{nH}$ 、最小で  $18\text{nH}$  に抑えた。さらにワンパッケージ化により、IGBT モジュールの実装面積が省スペースで、冷却フィンの面積が小さくなり装置の小型化が期待できる (253 ページ “3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール” 参照)。

#### 2.5 ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術

自動車業界では、電力を動力源とした HEV や EV の開発と普及が加速している。このような環境下において富士電機は、2012 年 12 月に HEV 用 IPM の量産を開始した (図6)。

本 IPM は、二つのモータを制御するインバータ部と昇降圧コンバータ部を内蔵し、HEV に必要とされる高出力をコンパクトかつ軽量で実現するものである。

従来の IPM は、インバータ部や昇降圧コンバータ部がおのおの機能別にモジュールを構成し、搭載され

##### (\*8) 3 レベル電力変換

電源やインバータをはじめとする電力変換装置の電力損失を大幅に低減させた、新しいマルチレベル変換回路の一つである。詳細は、277 ページ解説 1 “3 レベル電力変換方式” を参照。

##### (\*9) RB-IGBT

Reverse-Blocking Insulating Gate Bipolar Transistor の略である。逆阻止 IGBT ともいう。逆方向 (エミッタ-コレクタ間) の耐圧を持った IGBT である。通常の IGBT 素子は逆印加方向の耐圧を持たないため、

ダイオードを挿入する必要があるが、RB-IGBT は順方向と同じレベルの耐圧を持っているため、ダイオードが不要になる。

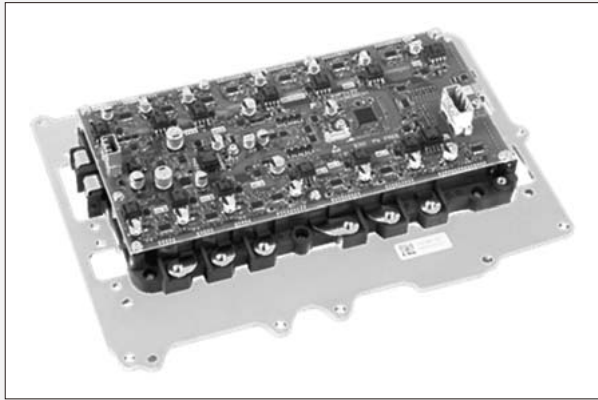


図6 HEV用IPM

ることが一般的であった。本IPMは、この三つの機能とコントローラを統合したオールインワン・パッケージを実現したことで、富士電機の従来製品に対して、体積を30%削減し、質量を60%削減した。

集積密度の向上と軽量化を両立するため、熱効率の高いアルミニウムヒートシンクによる直接水冷構造を採用した。熱膨張率の大きいアルミニウムと絶縁基板のはんだ接合を可能とする高強度はんだ技術および放熱設計技術の二つの新技術を開発した。また、ドライブ回路は、IGBTの保護機能に加えて、高精度昇降圧制御機能や高精度チップ温度通信機能を備えている。

本IPMは、高出力HEV車の業界最高の燃費効率達成に貢献している(258ページ“ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術”参照)。

## 2.6 TIMプリペーストIGBTモジュール

IGBTモジュールは、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラなど、幅広い分野で適用されている。適用に当たっては、動作の際に発熱するため、適用機器のサーマルマネジメントが重要な課題となる<sup>(6)</sup>。

一般的に、空冷や水冷方式の冷却フィンとIGBTモジュールの間に、熱伝達用のサーマルグリースを塗って取り付ける。富士電機では、あらかじめIGBTモジュールにサーマルグリースを塗布したTIMプリペーストIGBTモジュールを開発した。

今回採用したTIMはフェイズチェンジタイプであり、TIMが固化した状態で輸送できるとともに、使用する際には温度が上昇することで液化し、均一にぬれ広がるという特徴がある。また、フェイズチェンジタイプTIMの熱伝達率は従来のサーマルグリースの3倍以上あり、熱抵抗も従来の1/3に低減できること

を確認した(263ページ“TIMプリペーストIGBTモジュール”参照)。

## 3 パワーディスクリット・パワーIC

### 3.1 第2世代LLC電流共振制御IC

富士電機はこれまでに、高耐圧IC用プロセスでブリッジ回路を直接駆動するドライバICと制御ICとを一体化し、独自の制御方式によるLLC電流共振制御IC「FA5760N」を製品化した<sup>(7)</sup>。これにより、高効率・低ノイズ・低待機電力かつ小型の電源システムを構成できる。今回は、その特徴を継承しながら、さらなる低待機電力化、保護機能の充実、より低いシステムコスト、かつ設計自由度の高いLLC電流共振電源を実現する第2世代LLC電流共振制御IC「FA6A00Nシリーズ」を開発した(図7)。

低損失バースト制御の最適化を行い、無効領域と変換効率が低い領域を削減し、待機電力をFA5760Nに比べて約20%削減した。さらに、補助巻線電圧を高精度に検出することにより、専用の過負荷保護回路が無くとも高精度の過負荷保護機能を構築することができ、電源の部品点数を30点以上削減することを可能にした。また、過電流保護回路の検出遅延時間を外付け部品で調整できるようにし、電源の設計自由度を高めた(267ページ“第2世代LLC電流共振制御IC「FA6A00Nシリーズ」”参照)。

### 3.2 ワンチップリニア制御用IPS

近年、自動車電装分野では、広い室内空間を確保するため、ECU(Electronic Control Unit)には小型化、高性能化が求められている。

富士電機では、トランスミッション、エンジン、ブレーキなどに用いられる自動車電装システム向けにIPS(Intelligent Power Switch)製品の開発を行ってきた。IPSはECUの回路部品数や実装面積の低減を可能とし、ECUの小型化に貢献している。

また、排出ガス低減や燃費向上のために、油圧を電流値に応じてリニアに変更できるリニアソレノイドバルブを用いたリニア制御では、負荷であるリニアソレノイドに流れる電流を高精度に検出する必要がある。

今回、高精度電流検出アンプを搭載したワンチップリニア制御用IPS「F5106H」を開発した。これにより、システムのさらなる小型化、高精度なりニア制御が可能となった(273ページ“ワンチップリニア制御用IPS「F5106H」”参照)。

#### (\*10)IPS

Intelligent Power Switchの略である。駆動・保護・状態出力などの制御回路を同一チップ内に搭載したパ

ワー半導体である。用途に応じてハイサイドタイプとローサイドタイプがある。主にオン抵抗の違いで系列化しており、許容損失ごとにパッケージを変えている。

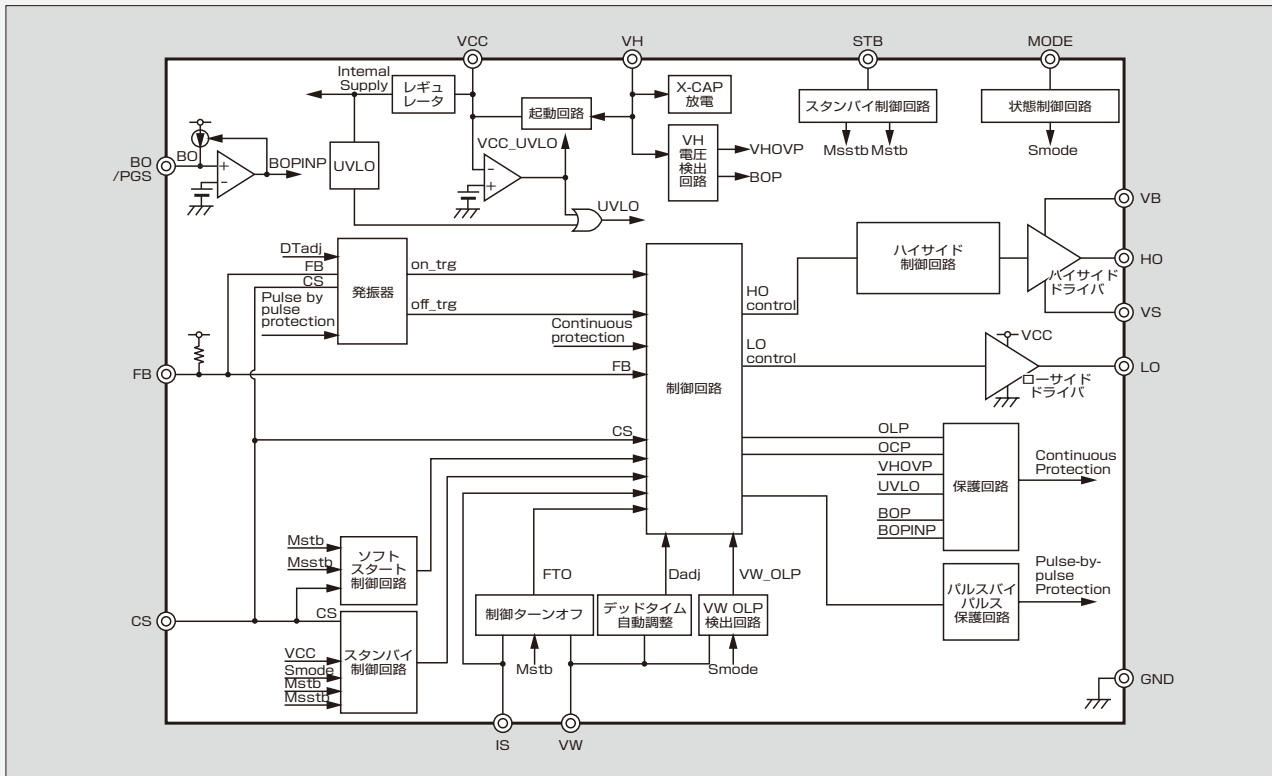


図7 「FA6A00N シリーズ」のブロック図

#### 4 あとがき

本稿では、パワー半導体の最新の主要製品とそれを支える技術について述べた。今後、Si や SiC を用いたデバイスでは、回路技術と結びついた IPM 化や高温動作に対応した技術開発が進むものと思われる。

富士電機はこれまで、IGBT をはじめ、SiC モジュール、パワーディスクレットおよびパワー IC などのパワー半導体を開発し、パワーエレクトロニクス技術の革新を担ってきた。これが、高性能化・小型化・高集積化・高信頼性化を加速させ、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。これからも、地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発し、持続可能な社会の実現を目指していく。

#### 参考文献

- (1) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (2) 梨子田典弘ほか. All-SiCモジュール技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.403-407.
- (3) Morozumi, A. et al. Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications, Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa. May 26-30, 2013.
- (4) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for

Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters". IPEC'10 proceedings. 2010, p.523-527.

- (5) Wakimoto, H. et al. "600 V Reverse Blocking IGBTs with Low On-state Voltage". IPCIM '11 Europe, Proceedings. 2011, p.317-322.
- (6) Fumihiko, M. Thermal management of IGBT module systems, PCIM Asia'.
- (7) 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.
- (8) 鷹坂浩志ほか. 車載用第4世代 IPS 「F5100シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.440-444.



高橋 良和

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



**藤平 龍彦**

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



**宝泉 徹**

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





\*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。