

# パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

高橋 良和 TAKAHASHI, Yoshikazu

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN, Toru

## ① まえがき

富士電機は、創業から90年の長い歴史の中で、エネルギー技術を革新し、産業・社会のインフラ分野で、広く世の中に貢献してきている。

地球温暖化を防止し、変化し続ける地球環境との調和を図り、安全・安心で持続可能な社会を実現する上で、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、そのエネルギーの効率的な利用を支えるパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術に対する世の中の期待は非常に大きい。

このような期待の中、富士電機では、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製品を開発している。パワー半導体は、エネルギーと環境分野の製品や、自動車、産業機械、社会インフラおよび家電製品に量産品として適用され、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であるパワー半導体について、パワーモジュール<sup>(\*)1</sup>、パワーディスクリート<sup>(\*)2</sup>、パワーIC<sup>(\*)3</sup>を中心に最新の技術および製品の現状と展望について述べる。

## ② パワーモジュール

図1に、パワーモジュール製品の応用例を示す。大容量市場においては、<sup>(\*)4</sup> SiC（炭化けい素）を用いた<sup>(\*)5</sup> SBD（Schottky Barrier Diode）とSiの<sup>(\*)6</sup> IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とを組み合わせた1,200V耐圧SiCハイブリッドモジュール、およびメガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiC モジュールを開発した。中容量市場においては、マイルドハイブリッド

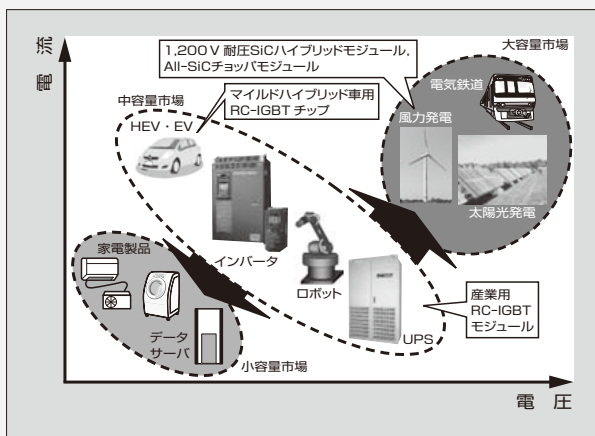


図1 パワーモジュール製品の応用例

### (\*)1) パワーモジュール

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

### (\*)2) パワーディスクリート

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

### (\*)3) パワーIC

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

### (\*)4) SiC

けい素（Si）と炭素（C）の化合物である。3C、4H、6Hなど多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって2.2~3.3eVのバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとして実用化が進められている。

### (\*)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整流作用を持つダイオードである。その優れた電気特性により、SiC-SBDのFWDへの適用検討が始まっている。少数キャリアも利用するPiN（P-intrinsic-N）ダイオードと比較して、多数キャリアのみで動作するSBDは逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。

### (\*)6) IGBT

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

ド車用 RC-IGBT (Reverse-Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor: 逆導通 IGBT) チップや新型パッケージの技術を採用した産業用 RC-IGBT モジュールを開発した。そして、ハイブリッド車用の直接水冷のためのパッケージ技術についても取り組んでいる。

### 2.1 1,200V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

富士電機では、これまでに 600V 耐圧または 1,200V 耐圧の SiC-SBD を適用した EP パッケージや PC パッケージのハイブリッドモジュール、ならびに 1,700V 耐圧 SiC-SBD を適用した 2in1 パッケージのハイブリッドモジュールを製品化してきた。

現在、FWD<sup>(\*)7</sup> (Free Wheeling Diode) に 1,200V 耐圧 SiC-SBD を適用した 2in1 パッケージのハイブリッドモジュールを開発している。SiC-SBD チップ<sup>(i)</sup>は、独立行政法人 産業技術総合研究所と共同で開発し、富士電機で量産している。IGBT チップには、富士電機製の第 6 世代「V シリーズ」を適用している。このハイブリッドモジュールにおけるターンオン損失は、Si モジュールに比べて 35% 低減し、逆回復電流がほとんど発生しないため、逆回復損失はほぼ 0 であった。また、SiC ハイブリッドモジュールは、Si モジュールと

比較したインバータ発生損失の低減率が、キャリア周波数が高くなるにつれて 12% から 28% と大きくなり (図 2)、高周波動作に有利であることを確認した (240 ページ “1,200V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール” 参照)。

### 2.2 メガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiC モジュール

富士電機は、松本工場において次世代半導体である SiC-MOSFET<sup>(\*)8</sup> (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と SiC-SBD を量産しており、併せてこの SiC デバイスが持つ性能を引き出す All-SiC モジュールも開発している。

All-SiC モジュールは、銅ピンでパワーチップに接続するワイヤボンディングレス構造と低熱抵抗絶縁基板を適用した新型パッケージを採用している。図 3 に、新型パッケージの断面図を示す。従来は、ワイヤボンディングと DCB (Direct Copper Bonding) 基板上の銅パターンによってチップと各端子間の配線を行っていた。新型パッケージでは、ワイヤボンディングの代わりに銅ピンが形成されたパワー基板によって配線を行っている。これにより、1,200V/100A 定格の All-SiC モジュールのフットプリントサイズは、従来パッ

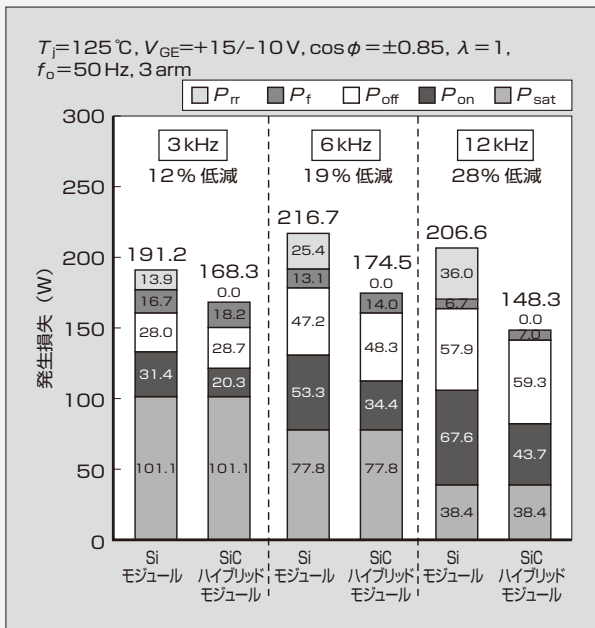


図 2 インバータ発生損失の比較

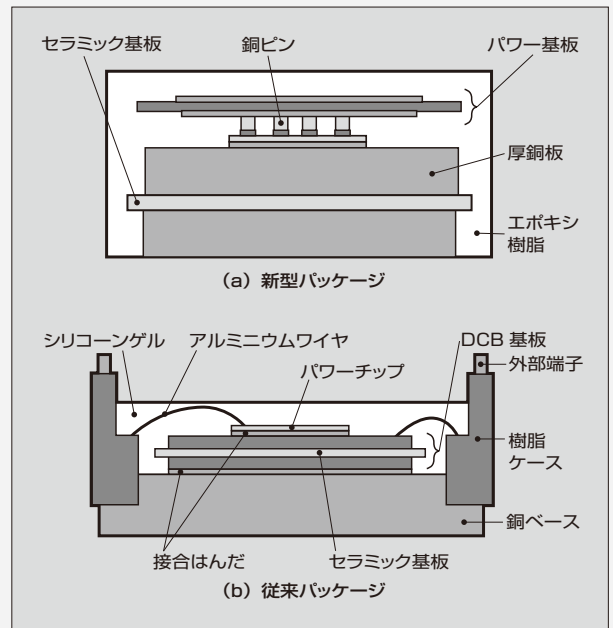


図 3 新型パッケージの断面図

**(\*) 7) FWD**

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

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

**(\*) 8) MOSFET**

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor の略である。電界効果トランジスタの一つであり、電

化物絶縁膜で絶縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。LSI では最も一般的な構造である。ユニポーラ動作であるため高速動作が可能であるが、耐圧に応じてオン抵抗も上昇するため低耐圧・高周波デバイスとして用いられる。

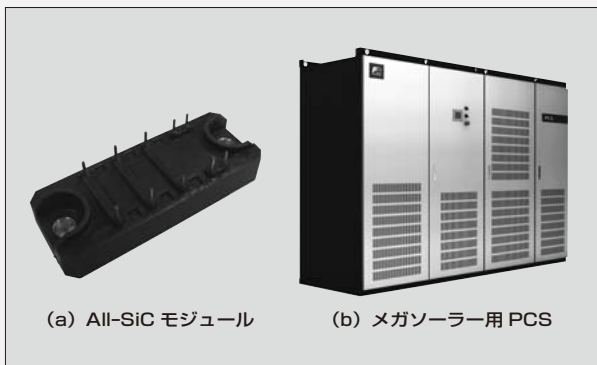


図4 All-SiC モジュールとメガソーラー用パワーコンディショナ

ケージの IGBT モジュールと比較し、約 40% まで小型化している。

また、SiC デバイスの高速スイッチングに必要な不可欠となるモジュール内部の低インダクタンス化に関して、新型パッケージは従来パッケージから約 80% 低減した。その結果、新型パッケージではスイッチング損失が低減し、特に高周波数動作における損失低減に有利である。さらに、モジュールの信頼性に関しても、樹脂封止構造を採用した新型パッケージは従来パッケージより高寿命である<sup>(2)</sup>。

この新型パッケージ技術を適用した All-SiC モジュールを搭載し、出力容量 1,000 kW のメガソーラー用パワーコンディショナ (PCS) を開発し、量産を開始した (図 4)。All-SiC モジュールを昇圧回路に適用することで、PCS の変換効率として世界最高レベルの効率 98.8% を実現している (244 ページ “メガソーラー用パワーコンディショナ向け All-SiC モジュール” 参照)。

### 2.3 新型パッケージを採用した産業用 RC-IGBT モジュール

電力変換装置の小型化と低コスト化のために、IGBT モジュールには従来にも増して高パワー密度化が求められている。この要求に応えるために、富士電機では IGBT と FWD を一体化した産業用 RC-IGBT<sup>(3)</sup> を開発し、低熱抵抗と高信頼性を両立した新型パッケージ (図 3) と組み合わせることにより、高い信頼性を持つ小型モジュールを実現した。ワイヤボンディングエリアおよび銅パターンの面積を削減することができ、58% もの設置面積を低減し、従来モジュールとほぼ同等のインバータ損失、および大幅な IGBT 接合温度の低下を実現した (249 ページ “新型パッケージを採用した産業用 RC-IGBT モジュール” 参照)。

### 2.4 マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT

地球温暖化防止に代表される世界的な環境保護に対

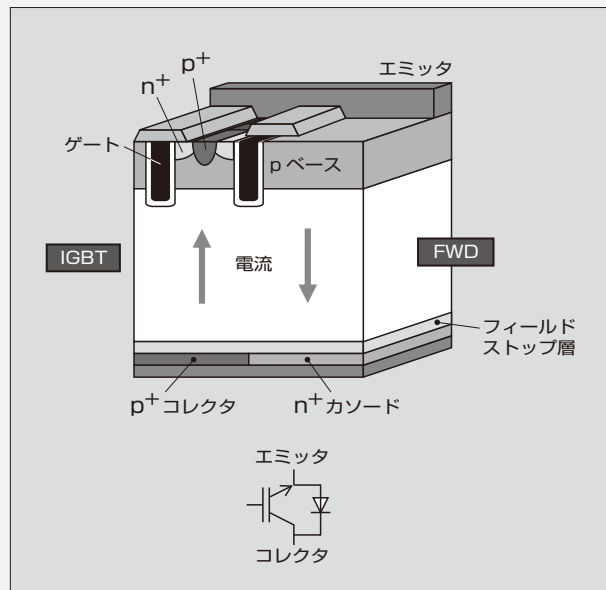


図5 RC-IGBT の概略構造

する意識の高まりの中、自動車分野においても CO<sub>2</sub> 排出量低減に向けてエンジンとモータの双方を利用するハイブリッド車 (HEV)、さらにモータのみで駆動する電気自動車 (EV) の普及が進んでいる。

富士電機では、マイルドハイブリッド車向けのインバータへの要求である低損失化と小型化の両立に対応するため、IGBT と FWD を 1 チップ化した 650 V 耐圧の RC-IGBT を開発した<sup>(4)</sup>。図 5 に RC-IGBT の概略構造を示す。RC-IGBT と従来の IGBT + FWD について、パッケージ内のチップ発熱を比較したところ、RC-IGBT ではチップ全体に熱が行き渡っており、チップからの発熱を 50℃ 以上抑制することができた。この発熱の制御により、25% 小型化した RC-IGBT で従来 IGBT・FWD と同程度の温度となっており、これにより、モジュール面積は 20% 低減が可能である (254 ページ “マイルドハイブリッド車用 RC-IGBT” 参照)。

### 2.5 ハイブリッド車用第 2 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術

自動車の動力制御に用いるインバータユニットは限られたスペースに搭載されるため、小型かつ搭載方法の自由度の高さと、低燃費を意識した軽量化と効率向上が求められる。インバータに搭載されるパワーモジュールにおいても、小型・軽量化、高効率化が必要であり、特に、車載用パワーモジュールでは、直接水冷構造を用いた高放熱化やアルミニウム冷却器を用いた軽量化が進んでいる。

富士電機では、二つのモータを制御するインバータと昇降圧コンバータを内蔵した、車載用アルミニウム直接水冷型インテリジェントパワーモジュール (IPM:

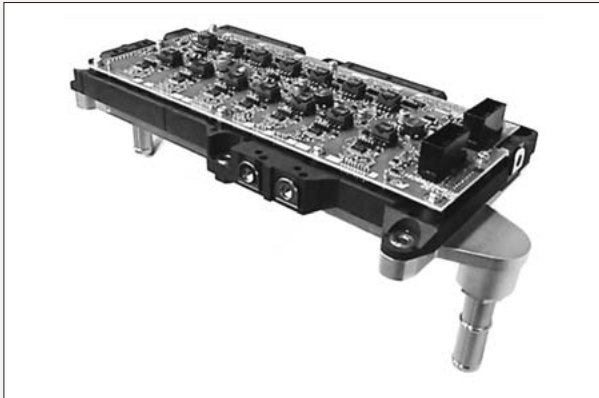


図6 ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷型 IPM

Intelligent Power Module)を開発し、ハイブリッド車に必要なとされる高出力を実現した。図6に、第2世代のIPMを示す。第2世代のIPMは第1世代に対して、体積を30%、質量を60%低減している。

高密度実装かつ高出力を実現するため、ヒートシンクとウォータージャケットを一体化した高放熱冷却構造と超音波接合技術、ならびに高出力と175℃連続動作を可能とする高耐熱技術を開発した。

本パッケージ技術を基に技術革新を推進することで、車載用パワーモジュールのさらなる高効率化と省エネルギーへの貢献が期待できる(258ページ“ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術”参照)。

### ③ パワーディスクリート・パワー IC

パワーディスクリート・パワー ICの製品および技術の最近の成果として、第3世代臨界モジュール PFC (Power Factor Correction: 力率改善) 制御 IC「FA1A00 シリーズ」、自動車用大電流 IPSの製品化、および LLC 電流共振電源の回路技術がある。

#### 3.1 第3世代臨界モード PFC 制御 IC「FA1A00 シリーズ」

富士電機では、テレビや PC などの電子機器に必要なクラス D [高調波電流を一定以下に抑える法的規制 (国際規格 IEC 61000-3-2)] を満足している高調波電流特性を持つ低待機電力、低コストの第2世代臨界モード PFC 制御 IC「FA5590 シリーズ」を製品化している<sup>(6)</sup>。今回はさらに軽負荷時の効率を改善し、また保護機能を強化した第3世代臨界モード PFC 制御 IC「FA1A00 シリーズ」を開発した。FA1A00 シリーズの外観を図7に、FA5590 シリーズとの比較を表1に示す。

軽負荷時の MOSFET のターンオンのタイミングを

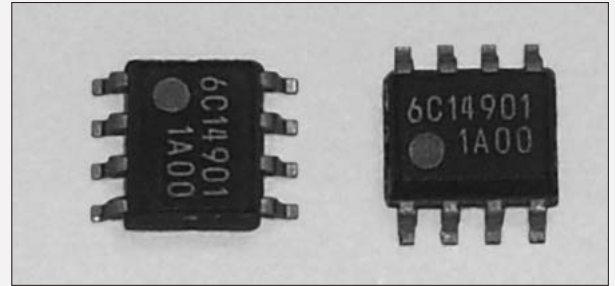


図7 「FA1A00 シリーズ」

表1 臨界 PFC 制御 IC の性能比較

項目		FA1A00	FA5590
高効率	軽負荷時スイッチング周波数	200 kHz (AC240V, 10%負荷で 効率14ポイント改善)	600 kHz
	パワーグッド信号出力機能	あり	なし
安定性	軽負荷時安定機能	あり	なし
	ゼロ電流検出電圧	-4mV±3mV	-10mV±5mV
安全性	オーバーシュート低減機能	あり (オーバーシュート 電圧10V低減)	なし
	基準電圧	2.5V±1.0%	2.5V±1.4%
	過電流検出電圧	-0.6V±2.0%	-0.6V±3.3%

遅らせてスイッチング周波数を低減させるボトムスキップ機能により、効率を14%向上させた(AC240V 10%負荷)。

パワーグッド信号出力機能を内蔵しているため、後続の電源回路において、従来は必要であった PFC 出力電圧を監視する回路が省略でき、電源のコストが削減できる。

また、軽負荷時安定機能を新たに追加して各種安全性を向上させることで、消費者のニーズに応えている(263ページ“第3世代臨界モード PFC 制御 IC「FA1A00 シリーズ」”参照)。

#### 3.2 LLC 電流共振電源の回路技術

富士電機では、スイッチング電源分野において、100W クラスから比較的大容量の500W クラスまでの電源を、小型で薄く構成するとともに、高効率化、低ノイズ化にも優れた、LLC 電流共振電源の制御用 IC を製品化している<sup>(7)</sup>。この制御用 IC では、LLC 電流共振方式で課題となってきた上下アーム短絡による貫通電流に対する防止機能を内蔵し、機器のスタンバイ時などの軽負荷時に、低待機電力モードで動作する。そのため、これまで待機時に低待機電力化するために必要であったスタンバイ専用電源を不要にできるというメリットがある。

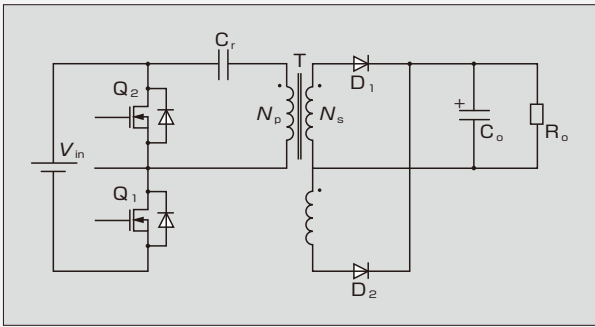


図8 LLC 電流共振コンバータ回路

図8に、LLC 電流共振コンバータの回路図を示す。回路は、二つの MOSFET を直列接続したハーフブリッジ回路と、共振用コンデンサ ( $C_r$ )、トランス (T)、出力整流ダイオード ( $D_1$ ,  $D_2$ ) および出力電解コンデンサ ( $C_o$ ) から成る ( $N_p$ : トランスの一次巻線の巻数,  $N_s$ : 二次巻線の巻数)。LLC 電流共振コンバータで用いるトランスは結合係数を小さくすることで、漏れインダクタンスを大きくし、これを共振用インダクタとして利用している。

富士電機の LLC 電流共振制御 IC のスムーズな導入のために、特に設計が難しく電源動作の鍵を握るトランスの設計例と、実際に試作したトランスを搭載した電源の代表特性を述べる (268 ページ “LLC 電流共振電源の回路技術” 参照)。

### 3.3 自動車用大電流 IPS

自動車電装分野では、“環境” “安全” “省エネルギー” をキーワードとして、排ガスの低減、安全な車両制御、高度な燃焼技術による燃費向上を図っている。これに伴って電子システムが複雑化し、ECU (Electronic Control Unit) の大規模化が進んでいる。ECU は、搭載スペース捻出のためにエンジンの近くなどに設置され、搭載部品の温度環境は年々高温化している。このため、ECU の小型化や高温環境での信頼性の向上が切望されている。これを実現するための、パワー半導体とその周辺保護回路、状態検出・状態出力回路、ドライブ回路などを一体化した、スマートパワーデバイスである IPS (Intelligent Power Switch) が注目されている。

富士電機では、これにこたえて大電流 IPS を開発した。<sup>(8)</sup> 図9に、自動車用大電流 IPS のチップを示す。本製品は特に、モータ制御用などの誘導性負荷や機械式リレーの半導体化用途で使用されることを意識した設計としている。低オン抵抗化、高放熱処理可能な小型パッケージ、各種保護機能 (バッテリー逆接続時の温度上昇抑制など)、および高誘導性負荷エネルギー耐量の特徴としている。本製品は、2014 年度中に市場への供給を開始する予定である (273 ページ “自動車用大

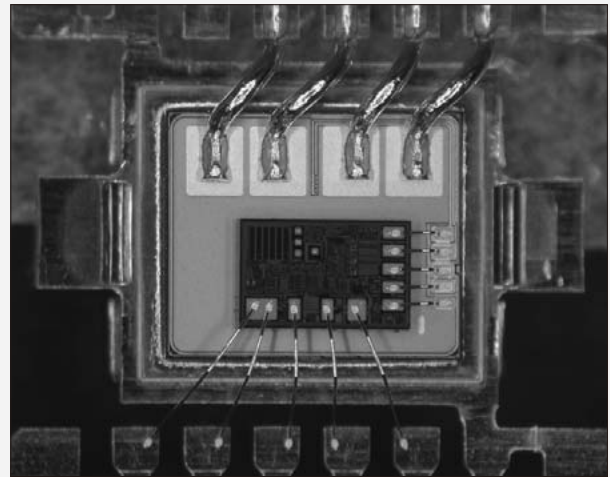


図9 自動車用大電流 IPS のチップ

電流 IPS” 参照)。

## 4 あとがき

パワー半導体は、産業、電源、自動車などの分野におけるパワーエレクトロニクス製品にとって必要不可欠なキーデバイスである。特に、近年の環境保護意識の高まりに伴い、再生可能エネルギー分野の拡大、ハイブリッド車や電気自動車の普及が進み、パワー半導体の果たす役割は大きくなっている。

IGBT, SiC モジュール、ハイブリッドモジュール、パワーディスクリート・パワー IC などのパワー半導体における技術革新や高信頼性化、低コスト化、適用分野の拡大はさらに進み、省エネルギー技術の発展に貢献をしていくであろう。

富士電機は、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、安全・安心して持続可能な社会の実現を目指していく。

## 参考文献

- (1) 木下明将ほか. “高温での Vf を特徴とした 600 V / 1,200 V クラス SiC-SBD”. つくば市. 2010-10-21. 応用物理学会 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 19 回講演.
- (2) Horio, M. et al. “Ultra Compact and High Reliable SiC MOSFET Power Module with 200°C Operating Capability”, Proceedings of ISPSD 2012. p.81-84.
- (3) Voss, S. “Anode Design Variation in 1200-V Trench Field-stop Reverse-conducting IGBTs”. Proceeding of ISPSD 2008. p.169-172.
- (4) Takahashi, K. et al. “New Reverse-Conducting IGBT (1200 V) with Revolutionary Compact Package”, Proceedings of ISPSD 2014. p.131-134.
- (5) Gohara, H. et al. “Next-gen IGBT module structure

for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”. Proceedings of PCIM Europe 2014. May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.

- (6) 菅原敬人ほか. 第2世代臨界モードPFC制御IC「FA5590 シリーズ」. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.405-410.
- (7) 山田谷正幸ほか. 第2世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」. 富士電機技報 . 2013, vol.86, no.4, p.267-272.
- (8) Toyoda, Y. et al. “60 V-Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET” ISPSD 2013. p.147-150.



**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。