

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^{(*)1}、パワーディスクリット^{(*)2}、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^{(*)3}（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^{(*)4}（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

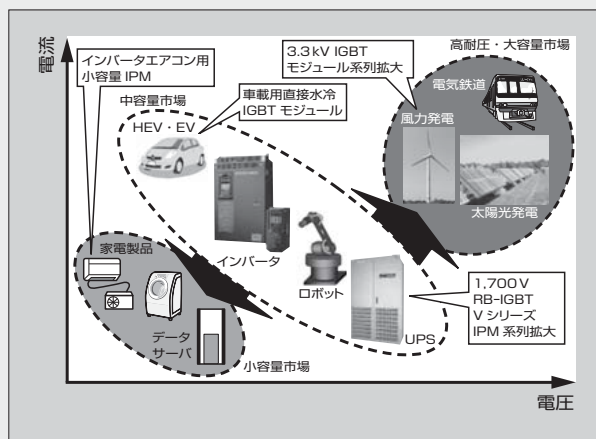


図1 開発したパワーモジュールの適用例

(*)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^(*)5)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⁽¹⁾(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)

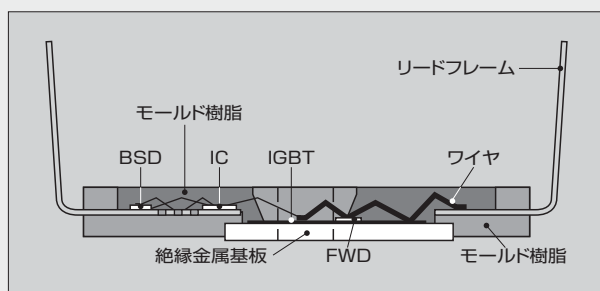


図2 インバータエアコン用小容量IPMの断面構造

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(Al₂O₃)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。

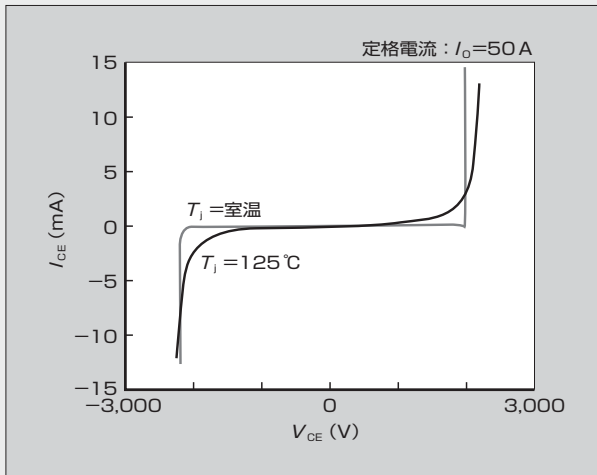


図3 1,700 V RB-IGBT のオフ状態の双方向 I-V 特性

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

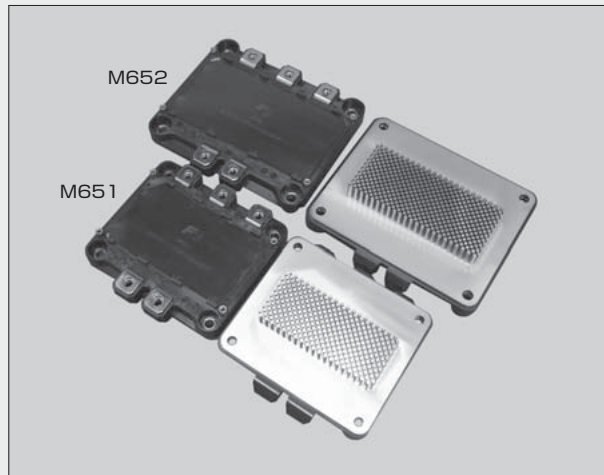


図4 車載用直接水冷 IGBT モジュール

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⁽³⁾や粘度、塗布方法、種類を選択することが重要であり⁽³⁾、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⁽⁴⁾。

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、Si₃N₄ (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。

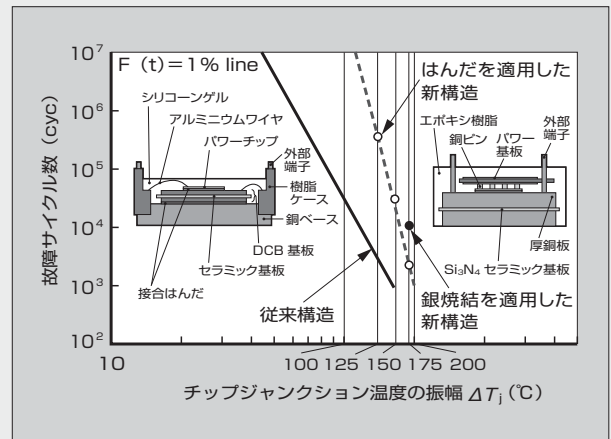


図5 200℃動作試験におけるパワーサイクル耐量

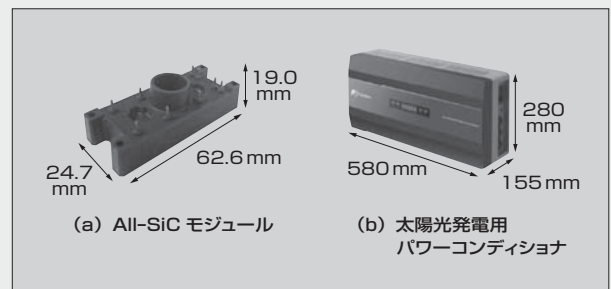


図6 All-SiC モジュールと搭載評価した太陽光発電用パワーコンディショナ

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^(*)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

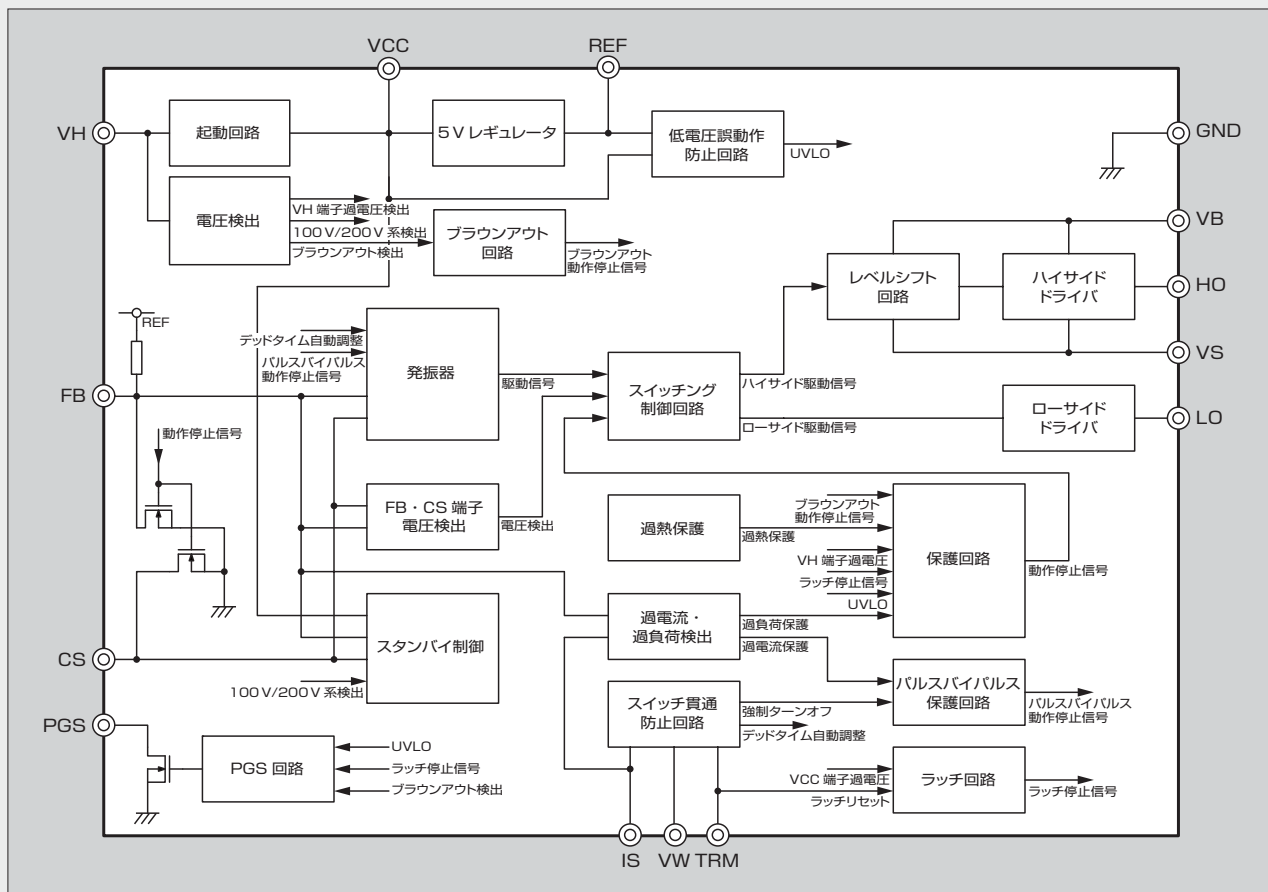


図7 「FA5760N」ブロック図

(*) 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⁽⁶⁾。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。



*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。