

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

藤平 龍彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

井川 修 IKAWA, Osamu

1 まえがき

人口増加と経済成長に伴い、世界のエネルギー消費量は増加の一途をたどっている。国際社会では、持続可能な開発目標であるSDGsや地球温暖化対策の国際的な枠組みである「パリ協定」が採択され、経済成長と社会・環境課題の解決の両立に向け、企業にも社会の一員として、積極的な行動が求められている。

富士電機でも、パリ協定に基づく日本の地球温暖化対策計画などを踏まえ、“低炭素社会の実現”“循環型社会の実現”“自然共生社会の実現”で構成される環境ビジョン2050を策定し、サプライチェーン全体で社会・環境課題の解決に取り組んでいる。その取り組みの中で、パワー半導体は、エネルギーの安定供給、自動化、省エネルギー（省エネ）といった重要な価値を創出する製品である。

富士電機は、以前からエネルギー技術の革新に取り組んでいる。エネルギーを安定的にかつ最も効率的に利用するためのパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器におけるキーデバイスであるパワー半導体を開発し、製品化している。近年急激に進む、CO₂排出量を抑制して地球の温暖化対策を行うため省エネ化のほか、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの拡大、さらには、ガソリン車やディーゼル車の販売をここ数十年で禁止して電動化した自動車（xEV）の導入による低炭素化、さらにその先の脱炭素化を実現することを各国が宣言するなどの動向に対応した製品を通じて、さらなる社会貢献を果たしていく。

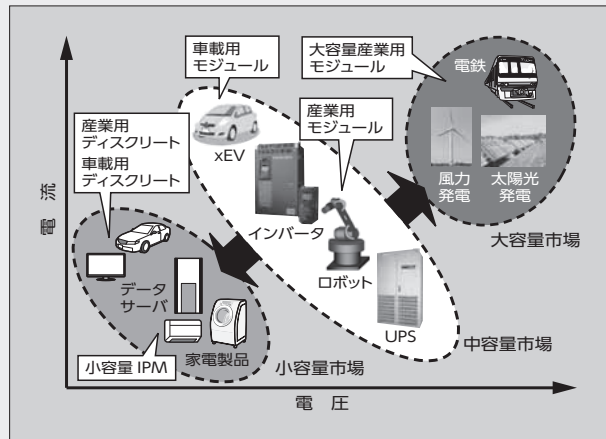


図1 富士電機のパワー半導体の製品応用例

2 富士電機のパワー半導体

富士電機は、用途に応じたさまざまなパワー半導体を開発している。図1に富士電機のパワー半導体の製品応用例を示す。

小容量市場向けに、エアコンなど家電製品のモータドライブシステム用途の小容量IPM^(*1) (Intelligent Power Module)、ならびに住宅用エアコン技術をベースとしてxEVに求められる性能を実現した車載エアコン用IPMを開発している。また、パワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System）、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）などにおける電力変換を主な用途とするディスクリートIGBT^(*2) (Insulated Gate Bipolar Transistor) や、さまざまな機器の電力変換部に用いられるSJ-MOSFET^(*3) (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect

(*1) IPM

Intelligent Power Moduleの略である。パワー半導体素子に加え、駆動回路、保護回路を内蔵したパワーモジュールである。回路設計の負担を軽減できる上、専用の駆動回路を用いることでパワー半導体素子の性能を最大限に引き出すことができる。

(*2) ディスクリート

パワー半導体素子の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) 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。

Transistor) 製品を開発している。SJ-MOSFET 製品については、産業用途だけではなく、エンジンやトランスミッション、ブレーキなどの制御用途や xEV の充電器の電力変換・制御用途の製品も開発している。また、LED 照明をはじめとするさまざまな電子機器のスイッチング電源制御のためのパワー IC 製品を開発している。さらには、ガソリン車の吸気系・排気系や、エンジン、トランスミッション、パワーステアリング、ブレーキなどの油圧制御部などに用いられる圧力センサや、ガソリンエンジンの点火制御に用いられるワンチップイグナイタも開発している。

中容量市場向けに、汎用インバータ用途、工作機械やロボットのサーボモータ制御用途、業務用エアコンのモータ制御用途、UPS の電力変換などに用いられる産業用 IGBT モジュール、ならびに xEV のモータ制御用途の車載用 IGBT モジュールなどを開発している。

大容量市場向けには、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーにおけるさまざまな電力変換、鉄道車両のモータの可変速駆動装置用途の IGBT モジュールなどを開発している。

また、それぞれの用途向けに、Si デバイスに比べて高温動作、低損失、高耐圧といった優れた特徴を持つ炭化けい素 (SiC) デバイスや、Si-IGBT と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を組み合わせた SiC ハイブリッドモジュールなどの製品の開発も進めている。

③ パワー半導体の開発状況

ここでは、2章で述べた富士電機で開発するパワー半導体について、最新の開発状況を抜粋して述べる。

3.1 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM

富士電機は、第7世代「Xシリーズ」の半導体チップとパッケージを開発し、低損失、高信頼性の IGBT モジュールを製品化している。IPM は、駆動機能と保護機能を一つの IGBT モジュールに内蔵したものである。最適に設定された条件で IGBT を駆動できるため、駆動回路や保護回路の設計が軽減できる。富士電機で

は、業界で初めてとなる IGBT チップの過熱保護機能やアラーム要因識別機能を内蔵化するなど、IPM の高性能化や高信頼化などの要求に応える製品を開発してきた。インバータのさらなる小型化、低損失化、高性能化の要求に応えるために、第7世代 X シリーズ IGBT-IPM (X シリーズ IPM) を新たに開発した。

X シリーズ IPM では、RC-IGBT (Reverse Conducting-IGBT) を採用し、従来の最小パッケージよりもさらに 27% 冷却器上の設置面積を小型化したパッケージや、同じ電流量において、従来と比べ冷却器上の設置面積を 54% 小型化したパッケージなどをラインアップした。また、従来の第6世代品である「Vシリーズ」IPM⁽¹⁾においては、定格 600V 品は 400A まで、定格 1,200V 品は 200A までのラインアップであったが、X シリーズ IPM においては、定格 650V 品は 450A まで、定格 1,200V 品は 300A までラインアップを広げた。

X シリーズ IPM では第7世代 IGBT 技術と、それを駆動する制御回路技術の組み合わせにより、従来品である V シリーズ IPM よりも発生損失を約 7% 以上、低減させている (図2)。また、第7世代パッケージ技術の適用と制御回路の改善により、連続動作時のチップ接合温度 T_{vjop} の範囲を 125°C までから 150°C までに拡大した。これらの技術により、出力電流を約

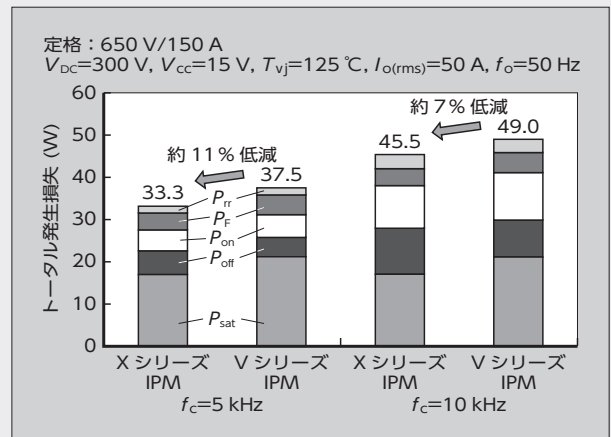


図2 発生損失シミュレーションの比較

(*4) MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor の略である。電界効果トランジスタの一つであり、酸化物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。ゲート部が素子の表面にあり、チャンネルが素子面と平行になるプレーナゲート MOSFET に対し、トレンチゲート MOSFET では素子に溝を形成してゲート部を溝内に埋め込み、チャンネルを素子面に対して垂直方向にしている。

(*5) SiC

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

(*6) 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。

(*7) RC-IGBT

Reverse-Conducting (逆導通) IGBT の略である。モジュールにおいて対で使われる IGBT と FWD をワンチップ化した素子である。IGBT 部と FWD 部が交互に動作するので放熱性に優れ、モジュール内のチップ数を削減できるため、IGBT モジュールの小型化とパワー密度向上につながる。

31% 増加できるようになった。また、IGBT チップが過熱状態であることを外部に警報する温度ワーニング機能を業界で初めて内蔵し、IGBT チップが過熱状態であることを外部に警報として知らせることができるようになった（219 ページ，“第 7 世代「X シリーズ」IGBT-IPM” 参照）。

3.2 第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET

SiC は、次世代のパワー半導体材料として期待されている。SiC は、絶縁破壊耐量が Si の約 10 倍あるため、デバイスの高耐圧を確保しながら薄化とドリフト層の高濃度ドーピングによって導通損失が低くできる。さらに MOSFET の採用によりスイッチング損失の低減と高速スイッチングが可能である。このような SiC デバイスの優れた性質を生かすことにより、Si-IGBT に比べて小型で高パワー密度のモジュールが実現できる。

富士電機では、このような SiC デバイスの優れた特長を生かした小・中容量市場向け製品や配電機器向けなど大容量帯の製品を開発している^{(2),(3)}。これらの製品向けに、SBD とプレーナゲート MOSFET、SiC トレンチゲート MOSFET を量産している。プレーナゲート MOSFET に比べて高いしきい値電圧と低オン抵抗が可能で SiC トレンチゲート MOSFET の第 1 世代品を量産化し、第 1 世代よりも高い性能を持つ第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を開発した。1,200 V 定格品で比較すると、第 1 世代 SiC トレンチゲート

MOSFET に比べて同じゲートしきい値電圧において、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET の単位面積換算のオン抵抗は約 23% 低い（表 1）。さらに、独自の技術によってボディダイオードへの通電によるオン抵抗の上昇を防止し、信頼性が向上している（224 ページ，“第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET” 参照）。





3.3 第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET 搭載 All-SiC モジュール

富士電機では、前述の優れた SiC の特性を生かしたモジュールを製品化してきた。2014 年にはメガソーラー用 PCS の昇圧回路向けに、フルモールドパッケージにプレーナゲート MOSFET を搭載したチョップパモジュールを開発した。その後もこのパッケージのコンセプトを継承した新構造パッケージに第 1 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載したモジュールを採用した製品を開発してきた。今回、さらにパワエレ機器に柔軟に対応できるようにするため、従来の Si-IGBT モジュールと同じ外形を持つ端子配置のパッケージに、第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を搭載した製品を開発した。今回開発した 62 mm 幅の Si-IGBT 互換パッケージ品を Si-IGBT 製品の替わりにインバータに搭載すると、発生損失は 78% 低くなる。さらに、同じチップ温度を想定すると、約 2 倍まで出力電流を大きくすることが可能であることを示した。今回、小容量帯は Small 1B, Small 2B パッケージ、中容量帯は 62 mm パッケージ、大容量帯は HPnC パッケージでのラインアップを計画し、さらに柔軟にパワエレ機器に All-SiC モジュールの適用が可能となるようにしていく（表 2）（229 ページ，“第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET 搭載 All-SiC モジュール” 参照）。

表 1 第 1 世代と第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET の特性比較

項目	第2世代	第1世代
オン抵抗 (第1世代を1とする)	0.77	1.00
ゲートしきい値電圧	5.0 V	5.1 V
ゲート推奨駆動電圧	+15 V/-3 V	+20 V/-3 V
ゲート絶対最大定格電圧	+20 V/-7 V	+25 V/-7 V

表 2 Si-IGBT 互換パッケージ All-SiC モジュールのラインアップ

項目		パッケージタイプ	Small 1B	Small 2B	62 mm STD	HPnC
		外形寸法 W×D×H (mm)	62.8×33.8×12.0	56.7×62.8×12.0	62.0×108.0×30.5	100.0×140.0×38.0
定格電圧	MOSFET世代	等価回路				
1,200 V	第2世代 トレンチゲート	2 in 1	~100 A	~200 A	~600 A	—
		6 in 1	~50 A	~100 A	—	—
1,700 V	第2世代 トレンチゲート	2 in 1	—	—	~400 A	~1,000 A
3,300 V	第1世代 トレンチゲート	2 in 1	—	—	—	~750 A

3.4 車載エアコン用 IPM

富士電機の住宅エアコン向け小容量 IPM は、高省エネ性能、小型、低ノイズおよび高信頼性を同時に実現している。車載エアコンでは、住宅エアコン向けに比べて空調容積は小さいものの、車両の断熱性能が低いので、エアコンシステムのコンプレッサの負荷は小さくない。ガソリン車においては、コンプレッサの駆動はエンジンによって行われてきた。近年、急速に普及が拡大している xEV においては、コンプレッサの駆動は消費電力が数 kW に及びモータによって行われている。このためコンプレッサ駆動用のモータは走行用と同じ高圧バッテリーに直接接続され、高い省エネ性能が求められる。さらに、コンプレッサおよびインバータ回路が搭乗者から近い位置に搭載されることから、騒音や振動の低減が必要であるため、車載エアコン用 IPM は高出力周波数や高キャリア周波数駆動への対応が必要となる。また、車両制御用コンピュータへのノイズ妨害制御を含む安全性の確保が必要である。今回、住宅エアコン向けおよび産業インバータ向けに開発した第 2 世代小容量 IPM⁽⁶⁾ をベースに、前述の xEV 向けのデバイスに求められる性能を実現した車載エアコン用 IPM を開発した。IGBT の導通損失^{(*) (8)}の低減を図り、さらに、IGBT および FWD (Free Wheeling Diode) のターンオフ時のサージ電圧を抑制し、スイッチングノイズの低減と損失低減を両立させた。図 3 に FWD のターンオフサージ電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。ほぼ同じターンオフ損失で、ターンオフサージ電圧は 53% 低減した。さらに、パッケージを最適設計して車載品質を確保し

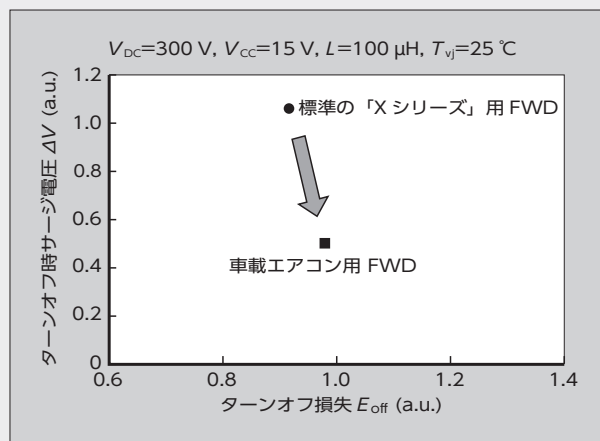


図 3 FWD のターンオフ時サージ電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性

た (234 ページ, “車載エアコン用 IPM” 参照)。

3.5 xEV 向け第 4 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術

富士電機は、xEV の走行モータ駆動用インバータ向けのモジュールを開発している。これまでに IGBT と FWD を統合した RC-IGBT や、アルミニウム直接水冷モジュールなどの採用により、小型で高電流密度のモジュールを開発してきた⁽⁷⁾。今回、従来よりも電力密度を高めた第 4 世代アルミニウム直接水冷構造を開発した (図 4)。第 4 世代アルミニウム直接水冷構造では、第 2 世代で採用したヒートシンク・ウォータージャケット一体構造を継承している。第 3 世代で採用した二次元流路形状から三次元流路形状に変更することにより冷却水の流速を高め、ベースの厚さを最適化してチップ-冷却水間の熱抵抗を 10% 下げた。さらに、従来のアルミニウムワイヤによる配線に替わり導電率の高い銅リードフレームを使った配線により実装面積の低減を図った。加えて、リードフレーム構造では、高い熱伝導率と広い接合面積によって接合面での熱拡散効果によるチップ温度の低下が可能である。これらの技術を用いた第 4 世代アルミニウム直接水冷構造では、第 3 世代構造に比べて体積当たりの電力密度を 36% 高めることが可能である (238 ページ, “xEV 向け第 4 世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術” 参照)。

3.6 xEV 向け DC/DC コンバータ用モジュール

xEV には、3.5 節で示したような走行モータ駆動用インバータのほか、ガソリン車においてエンジンを原動力として電装部品用に発電するオルタネータの代わりとなる DC/DC コンバータなどの電力変換装置が搭

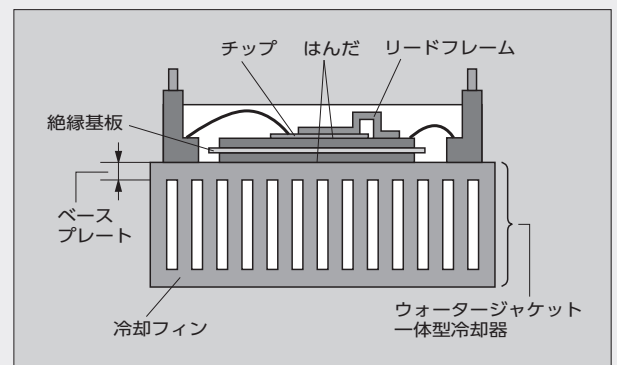


図 4 第 4 世代アルミニウム直接水冷構造

(*) (8) FWD

Free Wheeling Diode の略である。還流ダイオードともいう。インバータなどの電力変換回路において、IGBT と並列に接続され、IGBT をオフした際にイン

ダクタンスに蓄えられたエネルギーを電源側へ還流させる役割を担うデバイスである。Si の FWD では、PIN ダイオードが主流である。少数キャリアも用いたバイポーラタイプであるため、順方向電流通流時の電

圧降下を小さくできるが、その分、逆回復損失が大きくなる。

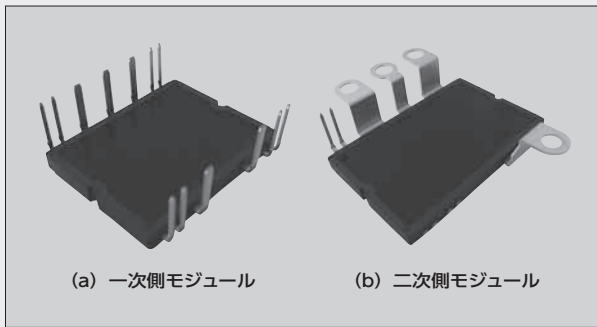


図5 DC/DCコンバータ用モジュール

載されている。このDC/DCコンバータは、高圧のメインバッテリーから電装品給電用の低電圧バッテリーに出力できるように電圧を変換する。富士電機は、産業用に小容量モジュール⁽⁸⁾で培った技術を応用してxEV向けDC/DCコンバータ用モジュールを開発した(図5)。ディスクリート製品からなる従来のDC/DCコンバータでは、絶縁シートを使って高圧バッテリーと車体とを絶縁していた。本モジュールは、この絶縁機能と複数の半導体素子を内蔵している。これにより、高密度の実装が可能となった。さらに、二次側のSBDにおいて、従来品はサージ電圧による破壊を防止するためにサージクランプ回路が必要であった。本製品では、耐圧構造を改良して、スイッチング時のサージ電圧耐量の代替特性であるリカバリー破壊耐量の許容ピーク電流値を従来の約3倍に拡大し、サージクランプ回路が不要となった。これらの技術により、DC/DCコンバータのシステムサイズの実装面積を40%低減した(243ページ, “xEV向けDC/DCコンバータ用モジュール”参照)。

3.7 1,200V ディスクリート IGBT 「XS シリーズ」

太陽光発電などの再生可能エネルギーの拡大による電力変換需要の増大や、情報・通信システムの高度化などによる世界的なデータ使用量の増大といった社会的背景を受けて、PCSやUPSの需要が増大している。これらの装置において、エネルギーロスを低減する高効率化は重要な課題となっており、そこに使用される半導体スイッチングデバイスに対しても高効率化への要求が高まっている。富士電機では、これらの要求に応えるため、従来品である「High-Speed Wシリーズ」に比べて効率を改善した650V耐圧のディスクリートIGBT「XSシリーズ」⁽⁹⁾を開発し、量産している。今回、XSシリーズの1,200V耐圧品を新たに開発した。XSシリーズは第7世代IGBTおよびFWD技術をベースにディスクリート向けに最適な設計を行った製品であり、今回開発した1,200V耐圧品では、従来品のHigh-Speed Wシリーズに対して導通損失 $V_{CE(sat)}$ を0.55V低減し、トレードオフ特性を20%以

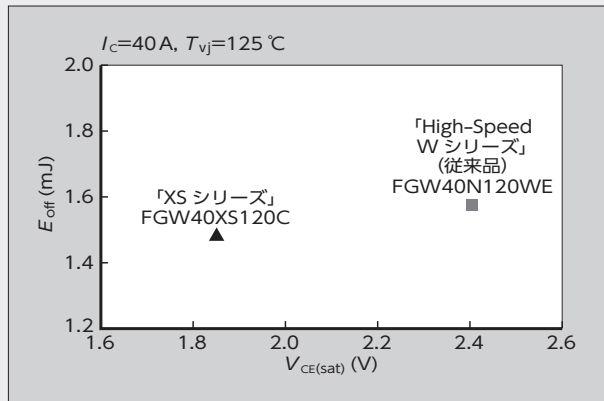


図6 1,200V「XSシリーズ」におけるトレードオフ特性 (IGBT)

上改善した(図6)(247ページ, “1,200V ディスクリート IGBT 「XSシリーズ」”参照)。

3.8 第4世代 LLC 電流共振 IC 「FA6C00 シリーズ」

電子機器に用いられるスイッチング電源において、出力電圧75~300Wクラスでは、電源の高効率化や低ノイズ化に有効なLLC電流共振回路が広く使用されている。IoT (Internet of Things) の伸展に伴い、数多くの電子機器がインターネットに接続され、その消費電力も大きくなっている。このような中、電源にも消費電力低減が求められており、待機時の低消費電力化に加えて軽負荷時の高効率化が必要となっている。富士電機では、LLC電流共振回路向けに、さまざまな制御ICを開発してきた。今回、従来の待機電力の抑制に加え、軽負荷時の効率改善と電源部品の削減を可能とする「FA6C00シリーズ」を開発した(図7)。従来技術では、高効率を図るとトランスの音鳴り^(※9)が発生し、問題となっていた。FA6C00シリーズでは、連続スイッチング制御に高周波バースト動作制御を新たに採用することにより、音鳴りを抑制しつつ軽負荷時の効率を約10%向上させた。また、出力電圧制御に共振電流位相比制御を新たに採用することにより、位相補償回路部品を従来品から7個削減することができ、

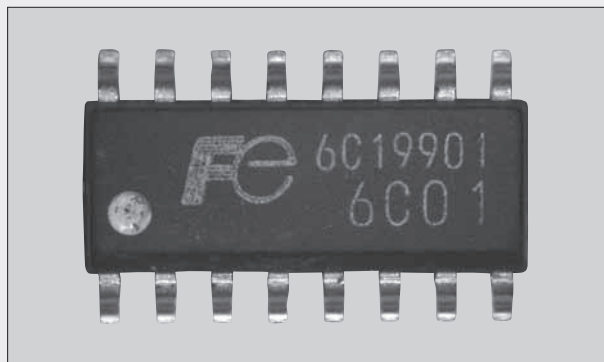


図7 「FA6C00シリーズ」

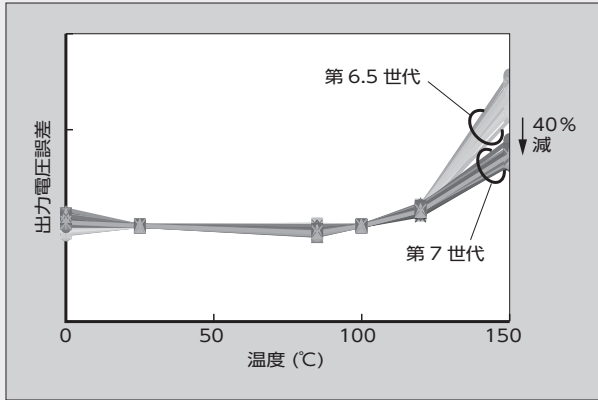


図8 第7世代車載用高圧センサにおける出力誤差特性

電源システムのコストダウンに貢献する（251 ページ，“第4世代 LLC 電流共振 IC「FA6C00 シリーズ」”参照）。

3.9 第7世代車載用高圧センサ

環境負荷を低減するため xEV の導入が進んでいる一方で、ガソリン車やディーゼル車といった内燃機関自動車においては、省エネによる CO₂ 排出低減も重要な課題である。圧力センサは、吸気系、排気系、トランスミッションの油圧モニタなどに用いられ、省エネに貢献している。富士電機では、車載用に圧力センサを開発してきており、吸気系や排気系に用いられる低圧センサと、油圧制御部などに用いられる高圧センサを製品化し、環境負荷低減に貢献してきた。高圧センサとしては、エンジンオイル圧用の第6.5世代圧力センサの量産を開始している。今回、トランスミッションやブレーキなどの油圧制御システム用途の第7世代車載用高圧センサを開発した。パッケージにステンレスダイヤフラム方式を採用し、また、デュアルゲートの MOS トランジスタを新たに開発して高耐圧化、高温時の特性誤差の低減を行い（図8）、150℃での動作保証や高精度制御化、小型化による高実装密度化を実現した（257 ページ，“第7世代車載用高圧センサ”参照）。

3.10 透過型偏光顕微鏡を用いた SiC 基板の結晶欠陥評価

SiC を用いたパワー半導体デバイスを開発する上

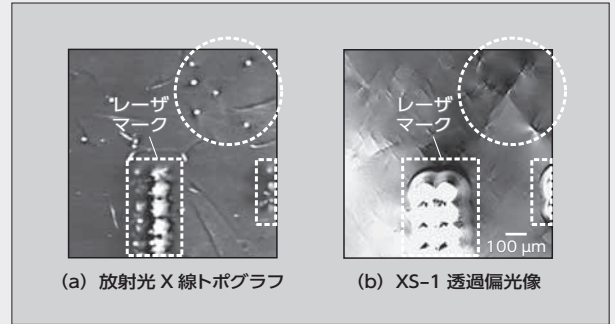


図9 n形 SiC バルク基板の比較例

で、基板の結晶欠陥の低減は重要な課題である。従来、SiC 単結晶の結晶転位の非破壊の評価法として放射光を用いた X 線トポグラフィが用いられてきた。しかしこの方法は、大型の放射光施設が必要であり、開発への迅速なフィードバックや、製造工程などでの検査用途を想定した場合には適用は簡単ではない。一方、実験室などで用いられる手法として、透過型偏光顕微鏡を用いた転位起因の応力による複屈折を観察する方法がある。しかしこの方法は、SiC は複屈折が小さいため、大きな欠陥しか検出できないという問題があった。今回、富士電機では、国立研究開発法人 産業技術総合研究所と共同で、透過型偏光顕微鏡による非破壊、簡便、高感度な SiC の結晶欠陥評価方法を検討した。図9に、n形 SiC バルク基板の比較例を示す。この手法により、SiC の市販 n 形バルク基板^{(*)11}、市販エピタキシャル基板^{(*)12}、自立エピタキシャル基板^{(*)13}を評価し、手法の有効性を示した（262 ページ，“透過型偏光顕微鏡を用いた SiC 基板の結晶欠陥評価”参照）。

4 あとがき

富士電機のパワー半導体開発における最新の成果を抜粋して述べた。富士電機では、創業以来エネルギー技術の革新に取り組んできており、経営方針の一つとして“エネルギー・環境技術の革新により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献”を掲げている。その中でもパワーエレクトロニクス機器は、ますます高まっている省エネルギー化、低・脱炭素化など環境問題への対応施策を牽引（けんいん）する技術である。パワー半導体は、パワーエレクトロニクスにおける

(*9) 音鳴り

IC の制御周波数が可聴域にあると、電源を構成するトランスやコンデンサなどの受動部品から音が発生する現象をいう。

(*10) 結晶転位

結晶の中では、原子が規則的に並んでいる。この原子の並びに生じたズレが直線状である結晶欠陥のことである。

(*11) バルク基板

原料となる SiC を加熱により昇華させて、温度の低い領域で SiC の単結晶のインゴットを得る。このインゴットから切り出したウェーハのことである。

(*12) エピタキシャル基板

バルク基板などの上に基板の結晶面にそろえて薄膜を形成（エピタキシャル成長）した基板のことである。

(*13) 自立エピタキシャル基板

エピタキシャル基板において十分な厚さのエピタキシャル膜を形成したのち、バルク基板部分を研削・研磨により除去することで得られた、エピタキシャル膜だけからなる基板のことである。

キーデバイスであり、その技術革新を通じて安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

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

(2) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.209-213.

(3) 金井直之ほか. 配電機器向けトレンチゲートMOSFET搭載3.3kV All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.215-219.

(4) 蝶名林幹也ほか. All-SiC 2 in 1 モジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.238-241.

(5) Iwasaki, Y. et al. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package" proc. PCIM Europe 2017, p.651-657.

(6) 荒木龍ほか. 第2世代小容量IPM. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.259-263.

(7) 佐藤憲一郎ほか. RC-IGBTを搭載した車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.

(8) 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.

(9) 原幸仁ほか. 650VディスクリットIGBT「XSシリーズ」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.236-240.

(10) 山田谷政幸ほか. LLC電流共振制御IC「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.

(11) 陳建ほか. 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.

(12) 園部孝二ほか. 高効率電源用の臨界モードPFC制御IC「FA1A60N」とLLC電流共振制御IC「FA6B20N」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283-288.

(13) 佐藤栄亮ほか. 第6.5世代車載用高圧センサ. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.241-245.



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。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。



宮坂 忠志

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部電装事業部長。電気学会会員。



井川 修

電子デバイスの事業運営に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部産業事業部長。工学博士。電気化学会会員。





*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。