

自動車電動化・エネルギーマネジメントに 貢献するパワー半導体

Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrification and Energy Management

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

井川 修 IKAWA, Osamu

1 まえがき

世界的にカーボンニュートラル実現に向けた脱炭素化の取組みが加速している。富士電機は、“豊かさへの貢献”“創造への挑戦”“自然との調和”を経営理念に掲げ、エネルギー・環境事業で持続可能な社会の実現に貢献していくことを経営方針の柱に据え、カーボンニュートラル実現に向けて、生産活動により排出されるGHG（Green House Gas）を2030年度に、2019年度比で46%超低減することを目指している。

自動車の電動化ならびにエネルギーの安定的かつ効率的利用のためのパワーエレクトロニクス機器の高効率化は、脱炭素化に向けた有効なアプローチであり、富士電機のパワー半導体は、そのためのキーデバイスとして貢献している。具体的には、パワー半導体の代表素子であるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）^(※1)や炭化けい素（SiC）^(※2)を用いたMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）と、それを搭載するパッケージの開発を行い、さらなる高効率化、小型化、高信頼化などのニーズに応える製品を市場に提供している。

2 富士電機のパワー半導体

富士電機は、市場の要求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製品の適用例を示す。

2.1 車載分野

世界における動力機関別の乗用車の販売台数予想を図2に示す。これから分かるように、電動車（xEV）

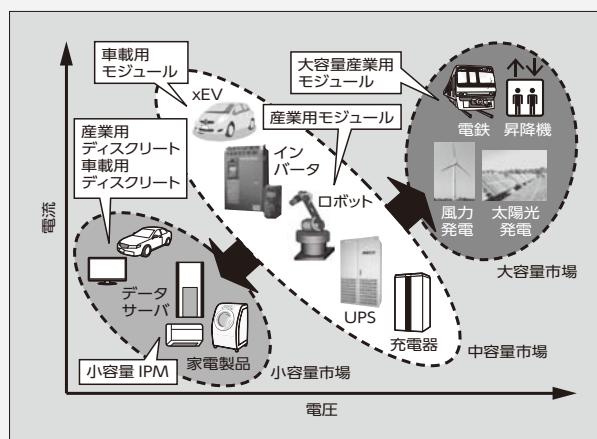


図1 富士電機のパワー半導体製品の適用例

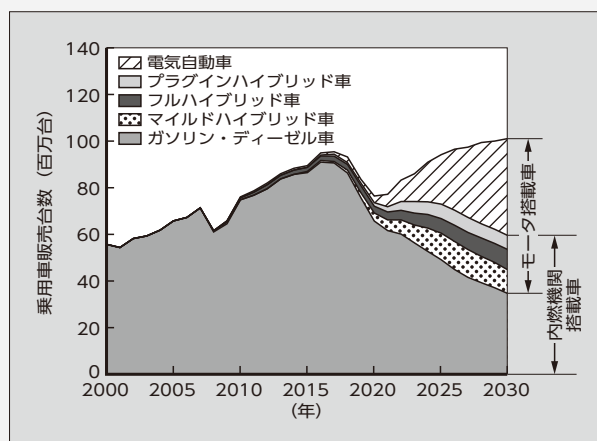


図2 動力機関別の乗用車の販売台数予想（富士電機作成）

の販売台数は、2030年度全自動車販売台数の50%超に到達することが予想されている。富士電機は、モータ制御用の車載IGBTモジュール、車載SiC-

(※1) 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、MOSFETとバイポーラトランジスタの長所を生かしている。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。

(※2) 炭化けい素（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。

MOSFET モジュール、ならびに充電器、直流電源などの電力変換装置向けのパワー半導体製品を開発し、量産体制を拡大し、前述のニーズに対応していく方針を掲げている。一方、内燃機関搭載車は、環境性能を重視したハイブリッド自動車などの形で今後も存続すると予想されている。この用途向けには、エンジンやトランスミッションの油圧バルブなどの駆動電流をオン・オフ制御する IPS (Intelligent Power Switch)、ガソリンエンジンの吸気・排気系の制御部やトランスミッションの油圧制御部などに用いられる圧力センサ、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ニタなどの車載用の製品を開発しており、エンジンの効率的な燃焼を通じて、CO₂ 削減に貢献している。

2.2 産業分野

産業用途については、その用途の電力帯に応じた製品を展開している。

大容量の製品分野では、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）向けの電力変換装置用や鉄道車両のモータの可変速駆動装置用 IGBT モジュールを開発し、製品化している。これらの用途では、既存の Si デバイスと比較して、低損失、高耐圧、高温動作といった優れた特徴を持った次世代のパワー半導体である SiC デバイスも開発し、製品化している。

中容量の製品分野では、汎用インバータ、工作用機械やロボットのサーボモータ制御、業務用エアコンのモータ制御、データセンター向け無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の電力変換装置などに用いられる IGBT モジュールを開発し、量産している。この分野では、今後の労働力不足に対応するための自動化投資やデータセンターの建設が進むと予想されており、需要拡大が期待されている。

小容量の製品分野では、電力の有効利用を目指したさまざまな製品への適用に向け、それぞれの用途に適したデバイスの開発を行っている。エアコンなど家電製品のモータ駆動用には小容量 IPM（Intelligent Power Module^(※3)）を、小容量のパワーコンディショナ（PCS：Power Conditioning System^(※4)）や UPS などの電力変換装置にはディスクリート IGBT を開発し、製品化している。さらに、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。

③ パワー半導体の開発状況

富士電機のパワー半導体における最新の開発成果は、次のとおりである。

3.1 中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」

自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として、電気自動車（BEV：Battery Electric Vehicle）のような電気モータで走行する xEV の普及が期待されており、特に中国では、政府が BEV 普及のための政策を積極的に行っていることもあり普及率が高く、世界最大の BEV 市場を形成している。近年、快適な室内空間の確保や高出力化が求められており、大型車両の需要が年々高まっている。このような背景から、富士電機は、中国市場をターゲットにパワーモジュールの高電力密度化を実現した 100 kW クラスのモータ出力容量帯をターゲットとした 6 in 1 パワーモジュール「M653」を 2017 年にリリースした。

今回、M653 に対して新規技術を適用することにより、同一パッケージで電力密度をさらに向上させた「M675」を開発した。表 1 に M653 と M675 の比較を示す。高電力密度化を実現するために、チップの薄型化および新規ライフタイムコントロール手法を適用し、従来とチップサイズを大きく変えることなく低損失化を実現した。また、冷却器内部のフィンの形状を

表 1 「M653」と「M675」の比較

項目		M653（従来品）	M675（開発品）
外観	表面		
	裏面		
モータ出力容量帯		100 kW	140 kW
コレクタ・エミッタ間電圧		750 V	750 V
チップ技術		第7世代 RC-IGBT	第7世代 RC-IGBT (M675向け)
冷却器構造		波フィン構造	ピンフィン構造
パッケージサイズ (mm)		W162×D116×H24（同一パッケージ）	

(※3) 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。

(※4) 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 1 in 1 と

呼ばれる回路から構成されるパワー半導体デバイスである。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。

従来の波フィン構造からピンフィン構造とすることにより熱抵抗を低減した。その結果、発生損失を 13%、熱抵抗を 20% 低減し、出力電流を 30% 増加させることで、適用可能なモータ出力容量帯を 100 kW から 140 kW まで拡大した（207 ページ、“中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」” 参照）。

3.2 xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上

電機モータで走行する xEV の普及が期待される中、インバータとモータなどの駆動システムを統合した機電一体型システム“eAxe”の開発が活発化している。eAxe は、自動車内の限られたスペースに搭載されるため、小型かつ薄型で取付け位置の自由度が高いことが求められる。さらに大型車の電動化が進んでいることにより、パワーモジュールもより一層の高電力密度化や大容量化が要求され、発熱密度の増大に対応する信頼性向上が重要となっている。

第 4 世代車載用パワーモジュール（図 3）では、リードフレーム配線と樹脂封止構造により高電力密度化と熱変形抑制による高信頼化を実現している。今回、さらなる高信頼化のため、樹脂密着性を向上するリードフレームの粗化技術を開発した。この技術により粗化未処理と比較して、密着力が 2 倍以上に向上し、モジュールの ΔT_{vj} パワーサイクル耐量は 1.3 倍に向上した（211 ページ、“xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上” 参照）。

3.3 産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」

太陽光・風力発電などの再エネは、地球温暖化対策

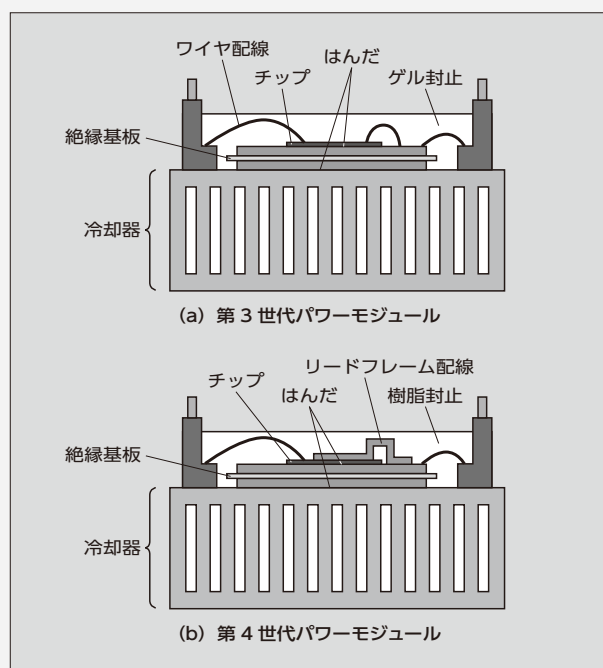


図3 車載用 IGBT モジュールの構造の比較



図4 大容量 IGBT モジュール「HPnC」

に向けて普及が進んでいる。再エネのさらなる普及に向けては、発電コストの低減と発電効率の向上が必要である。そのためには電力変換装置の大出力容量化が有効であり、今回、これに対応するため、産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」（図 4）を開発し、並列接続の容易さと出力容量の拡大を実現した。定格電圧 1,700 V 品は、内部構造の最適化により製品の電流密度を上げることで、従来品に比べ出力電流が約 33% 拡大した。また、定格電圧 2,300 V 品は、近年、導入が進んでいる入力電圧 DC1,500 V の電力変換装置に対応し、従来品に比べ出力容量が約 18% 拡大した（216 ページ、“産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」” 参照）。

3.4 第 7 世代「X シリーズ」中容量 IGBT-IPM 「P638」

産業用ロボットや工作用機械は、自動車産業をはじめとした幅広い分野で活用されている。これらの機器に搭載されているモータを制御する電力変換装置には、省スペース化、省エネルギー化、高信頼性が求められている。これを実現するためには、電力変換装置で使用するパワー半導体が小型、低損失、高信頼性であることが重要となる。

IGBT-IPM は、IGBT チップとダイオードチップを搭載した IGBT モジュールに、IGBT チップを制御するゲート駆動回路と保護回路を内蔵した高機能 IGBT モジュールである。IGBT-IPM に使用するゲート駆動回路は、損失低減を実現しつつ、低損失化とトレードオフの関係にある放射ノイズも低く抑えている。

今回、電力変換装置のさらなる小型化と低損失化要求に応えるために、新パッケージ「P638」を適用した第 7 世代「X シリーズ」IGBT-IPM（図 5）を開発した。本製品は、第 6 世代 IGBT-IPM の「P630」に比べ、モジュール設置面積を 54% 縮小した。また、第 7 世代チップ技術により発生損失を 10% 低減するとともに、第 7 世代パッケージ技術により 150 °C での高温動作化を実現することで、連続動作時の負

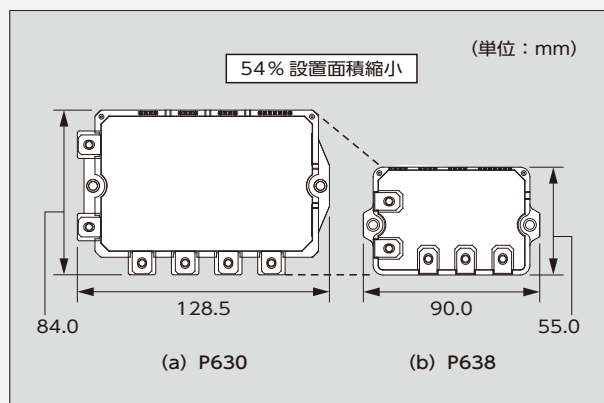


図5 「P638」と「P630」の外形の比較

荷電流を第6世代IGBT-IPM P630よりも増大でき、28%大きい負荷領域まで使用可能となった(220ページ、「第7世代「Xシリーズ」中容量IGBT-IPM「P638」」参照)。

3.5 第4.5世代LLC電流共振制御IC「FA6C60シリーズ」

脱炭素社会の実現に向けて、電子機器に搭載されるスイッチング電源への低待機電力化、高効率化の需要が高まるとともに、電源に搭載する部品の削減によるコストダウンも強く求められている。今回、従来製品⁽²⁾⁽³⁾に対して降圧回路をICに内蔵することにより、スイッチング電源に搭載する部品7個の削減を可能とした、第4.5世代LLC電流共振制御IC「FA6C60シリーズ」を開発した。降圧回路を内蔵する上でICの発熱が懸念されたが、ハイサイドドライバに新規レベルシフト素子を採用することにより、降圧回路を内蔵しても従来比で約40%の損失低減が可能(図6)となり、IC表面温度も約6℃低減した(225ページ、「第4.5世代LLC電流共振制御IC「FA6C60シリーズ」」参照)。

3.6 第7世代2,300V「Xシリーズ」IGBT/FWDチップ

太陽光発電や風力発電の再エネ分野では、発電コスト低減と効率向上のため、電力変換装置の入力電圧は、DC1,000VからDC1,500Vへと高電圧化が進んでいる。富士電機の現行の製品として、定格電圧1,700Vと3,300VのXシリーズIGBTモジュールがあるが、定格電圧1,700Vでは入力電圧DC1,500Vに対して耐圧が不足し、定格電圧3,300Vでは耐圧が過剰で損失が増大するため、入力電圧DC1,500Vに適

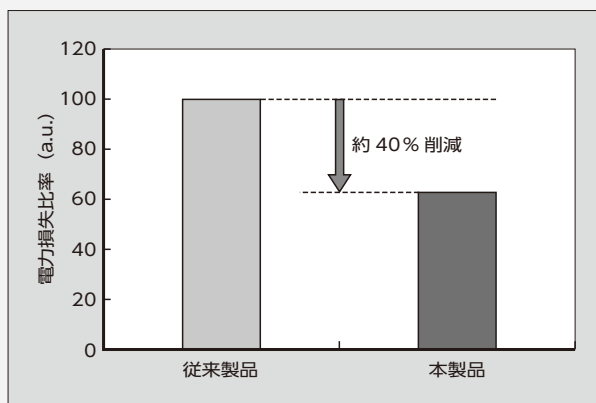


図6 電源適用時の従来製品との損失比較

した耐圧クラスのIGBTモジュールが必要となっている。今回、この要求に応えるため、定格電圧2,300VのXシリーズIGBTチップとFWD^(*)(Free Wheeling Diode)チップを開発した。IGBTとFWDともに、ドリフト層の厚さを薄くし、裏面構造を最適化することで、耐量と耐圧を確保し、既存の3,300Vチップに対して、IGBTはコレクタ・エミッタ間飽和電圧を39%、FWDは逆回復損失を43%低減した(図7)(図8)(231ページ、「第7世代2,300V「Xシリーズ」IGBT/FWDチップ」参照)。

3.7 大容量モジュール内蔵ゲート抵抗チップ技術

近年、再エネ分野をはじめ、電力変換装置に対する高信頼化・高効率化の要求が高まっている。この用途で使用される大容量モジュールでは、さらなる高信頼化・高効率化を実現するために、短絡発振抑制と

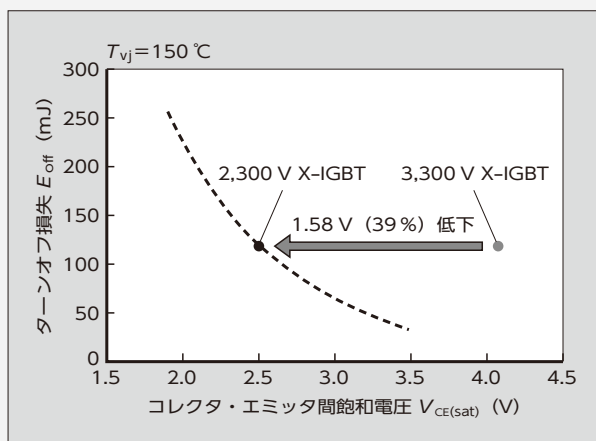


図7 ターンオフ損失 E_{off} とコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ の関係(チップ測定)

(*)5 FWD

Free Wheeling Diodeの略である。逆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に還流させる役割を担うデバイスである。SiのFWDとして主に使われているPiN(P-intrinsic-N)ダイオードは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。

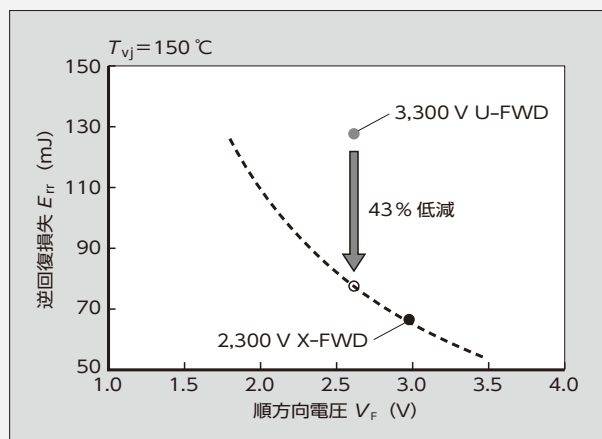


図8 逆回復損失 E_{rr} と順方向電圧 V_F の関係 (チップ測定)
* U-FWD : 第5世代「Uシリーズ」のFWD

高温時のスイッチング損失低減を両立する必要がある。そのため、大容量モジュールのIGBTのゲートに接続されるゲート抵抗には抵抗値の最適化に加え、温度上昇に伴う抵抗増加の抑制が求められている。今回、このような要求に応え、ポリシリコン抵抗体と低比抵抗Si基板を組み合わせ、抵抗値の温度係数が $-260 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ のモジュール内蔵ゲート抵抗チップ (図

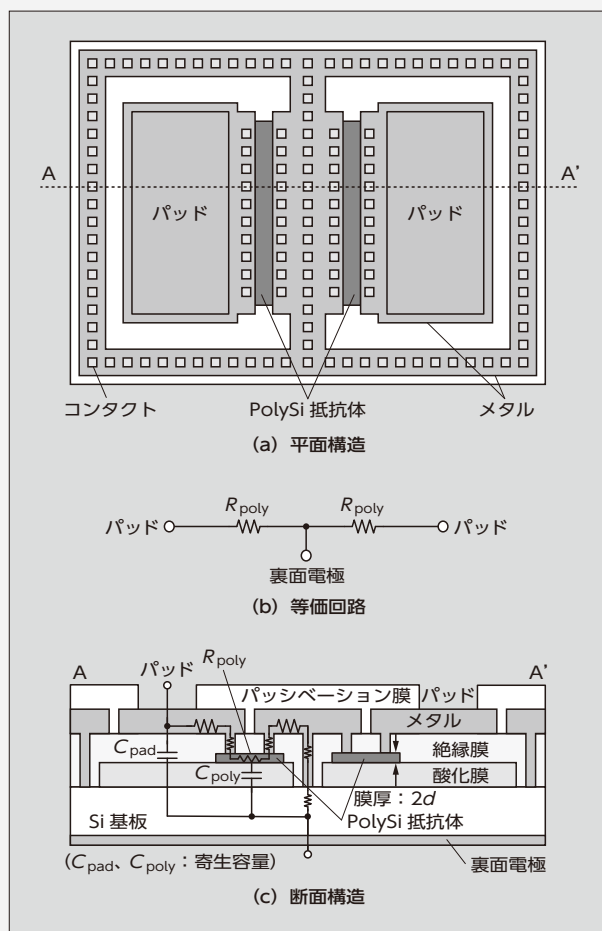


図9 抵抗チップの構造 (2抵抗/1チップ)

表2 大容量モジュールのターンオン時のスイッチング損失 E_{on}

サンプル	ターンオン時のスイッチング損失 E_{on}	
	室温	高温
基準	1.0	1.5
本開発の抵抗チップ適用品	1.0	1.3

* 基準の室温時を1.0とする

9)を開発した。本抵抗チップを搭載することにより、大容量モジュールの高温時のターンオン損失を13%低減することが可能である (表2) (235ページ, “大容量モジュール内蔵ゲート抵抗チップ技術” 参照)。

3.8 SJ構造適用によるSiC-MOSFETの低損失化と信頼性向上

xEVの航続距離の伸長には車体の軽量化が重要であり、搭載されるモータ制御用インバータの小型・軽量化が求められている。そのためには、使用されるパワー半導体素子数の削減、素子の熱損失低減による冷却機構の簡素化が効果的である。このため、インバータ用のパワー半導体は従来のSiのIGBTと還流ダイオードの構成から、SiCを材料としたSiC-MOSFETに移行しつつある。富士電機では、SiC-MOSFETのさらなる低損失化に向けて、Superjunction (SJ) 構造を適用したSiC-MOSFET (SiC SJ-MOSFET)の開発を進めている。

今回開発したエピタキシャル成長 (nカラム形成) とアルミニウム (Al) イオン注入 (pカラム形成) を

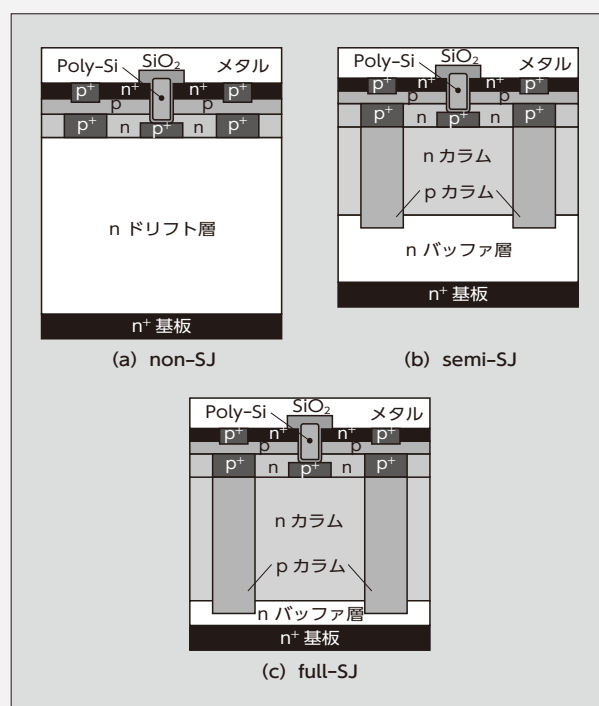


図10 試作したSJ-MOSFETの模式図

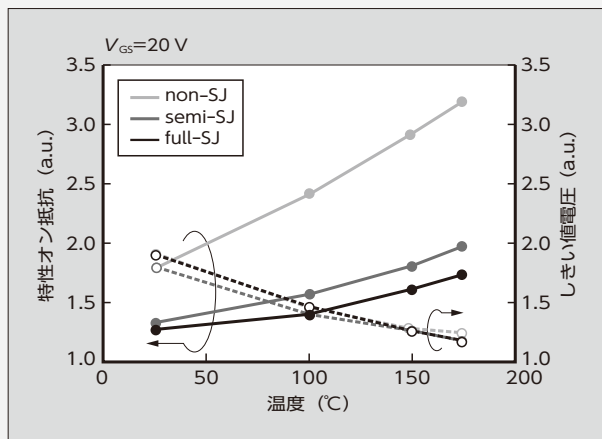


図 11 特性オン抵抗としきい値電圧の温度依存性の評価結果

繰り返すマルチエピタキシャル法で SJ 構造を製造した SiC-SJ-MOSFET (図 10) は、Al イオン注入によるドリフト層のライフタイム低減効果により、従来の SiC トレンチゲート MOSFET に比べて、高温時のオン抵抗増加を抑制でき (図 11)、また、大電流を流した際にもスイッチング損失の増加を抑制できることを確認した (240 ページ、「SJ 構造適用による SiC-MOSFET の低損失化と信頼性向上」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・環境技術の革新を追求し社会に貢献してきた。そして 2050 年のカーボンニュートラル実現が、世界共通の課題となっている現在、パワー半導体のさらなる技術革新を進め、自動車、産業・社会インフラなどの分野で“車の電化率向上”“再生可能エネルギーの主流化”“エネルギー供給の安定化”“省エネルギー機器・システムの普及”に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士

電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219-223.

(2) 園部孝二ほか. 高効率電源用の臨界モードPFC制御IC「FA1 A60N」とLLC電流共振制御IC「FA6B20N」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283-288.

(3) 小林善則ほか. 第4世代LLC電流共振IC「FA6C00シリーズ」. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.251-256.

(4) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.

(5) 山本拓也ほか. 第7世代「Xシリーズ」1,700 V IGBTモジュール“PrimePACK™”. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.224-227.

(6) Takei, M. et al. “Analysis of IPM Current Oscillation under Short Circuit Condition”. International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 1998.



大西 泰彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部長。工学博士。電気学会会員。



宮坂 忠志

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



井川 修

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社半導体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。