

特集 モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献する パワー半導体





Innovating Energy Technology



2022 Vol.95 No.

特集 モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献する パワー半導体

気候変動問題の解決を目指す"脱炭素化"の潮流が世界的に加速し ていることを踏まえ、富士電機は長期的に取り組むべき環境活動の方 向性を示す"環境ビジョン 2050"を策定しました。その達成に向けて "2030 年度目標"を設定しており、その一つとして、"製品による社会 の CO₂ 削減貢献量"を掲げています。この目標達成には、モビリティ の電動化、ならびにパワーエレクトロニクス機器の高効率化によるエネ ルギーの安定的かつ効率的利用が必須です。これらの電動化、高効率化 に富士電機のパワー半導体は大きく貢献しています。

本特集では、富士電機のパワー半導体について、最新の技術および製品を紹介します。

表紙写真

①産業用途向け第2世代1,700 V All-SiCモジュール
 ② xEV 向け IGBTモジュール「M677」
 ③第7世代新小型 IGBT-IPM「P639」



特集 モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献する パワー半導体

〔特集に寄せて〕パワー半導体デバイス	175(3
一電力変換システム技術の牽引役一	
LORENZ, Leo	

)

200 (28)

209 (37)

 (現状と展望) モビリティ・エネルギーマネジメントに
 178(6)

 貢献するパワー半導体

大西 泰彦 ・ 宮坂 忠志 ・ 井川 修

 xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現する
 185 (13)

 パッケージ技術

 佐藤 悠司 ・ 安達 新一郎 ・ 東 展弘

第2世代1,700 V All-SiC モジュールの系列拡大 高久 拓 · 高崎 愛子 · 奥村 啓樹

 RC-IGBT を搭載した第7世代 IGBT-IPM の小型製品の系列化
 195 (23)

 黒澤 英二 ・ 城塚 直彦 ・ 唐本 祐樹

3.3 kV 第7世代「X シリーズ」IGBT チップ技術 伊倉 巧裕 · 原田 祐一 · 関野 裕介

第7世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00 シリーズ」204 (32)松本 晋治 ・ 山根 博樹 ・ 宮城 輝大

 IPS 用オートゼロアンプ技術

 岩本 基光 ・ 豊田 善昭 ・ 片倉 英明

トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した214 (42)SiC-MOSFET馬場 正和 ・ 俵 武志 ・ 竹中 研介

	解説		
9 (47)	アーム		
0 (48)			
2(略語 		

富士電機技報 vol.95 2022 年 総目次

目次



Contents

2022 Vol 95 No



Abbreviations

220 (48)

Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOUNAL vol.95, 2022

特集に寄せて

Power Semiconductor Devices – Driving Technology for Power Conversion Systems

パワー半導体デバイス ―電力変換システム技術の牽引役―

LORENZ, Leo

Dr. Engineering, President ECPE (European Center for Power Electronics) Technology Advisor to Industry and Government, Munich, Germany 工学博士、ECPE プレジデント



Power Electronics is the key technology to control the flow of electrical energy along the whole chain from generation, transmission and distribution up to various types of consumers, and to do so with great precision, extremely fast dynamic control, high efficiency, and high-power density on all power conversion stages. Furthermore, this technology is an enabler for the grid integration of renewable energy sources and E-Mobility and provide significant contributions to the key issues of improved energy efficiency, reduced consumption of materials as well as the sustainable energy supply based on renewables.

Sustainability and Global Warming

Power electronics is a cross-sectional and ubiquitous field as it covers many disciplines including material science, semiconductor physics, assembly and interconnection technologies, circuit topologies and control, in all applications dealing with electric energy. Today we know that changes in all energy sectors are needed, and that renewables-based electrification is the major step towards greenhouse gas reduction and climate change mitigation.

Mobility is key for global growth and societal wealth. As such, mobility is undergoing a transformation from fossil fuel mobility to sustainable and environmentally friendly electric mobility. In addition, electrification allows the rise of new mobility concepts such as drones and high-speed transportation like the hyperloop concept. In general power electronics for electric vehicles have progressed well with transitioning from Silicon based switching devices to SiC and GaN switching devices. Integration of the electric motor and the inverter is seen as a key development to achieve better integration and standardization. Challenges here are new active or hybrid EMC filter technologies to reduce

■和文翻訳(富士電機にて作成)

パワーエレクトロニクスは、発電や送配電からさまざま な消費者に至るまでの一連の電気エネルギーの流れを、電 力変換のあらゆる段階で高精度に、極めて高速でダイナ ミックに、高効率、高電力密度で制御することを可能にす る重要な技術である。さらにこの技術は、再生可能エネル ギー源の電力系統への統合やモビリティの電動化を実現し、 再生可能エネルギーに基づく持続可能なエネルギー供給に 加え、エネルギー効率の向上、材料消費の削減という重要 課題に大きく貢献するものである。

サステナビリティと地球温暖化

パワーエレクトロニクスは、電気エネルギーを扱うあら ゆるアプリケーションにおいて、材料科学、半導体物理学、 アセンブリ・配線技術、回路トポロジーと制御など、多く の領域にわたる横断的でわれわれの身近に存在する分野で ある。今日、あらゆるエネルギー分野で変革が必要であり、 再生可能エネルギーによる電化が温室効果ガスの削減と 気候変動の緩和に向けた大きな一歩となるということが分 かっている。

モビリティは世界の成長と社会の豊かさへの鍵である。 その中でモビリティは、化石燃料によるモビリティから持 続可能で環境にやさしい電気によるモビリティへの変化を 遂げつつある。また電化により、ドローンやハイパールー プ構想のような高速輸送など、新たなモビリティの概念が 生まれている。一般的に電気自動車向けのパワーエレクト ロニクスは、シリコンベースのスイッチングデバイスか ら SiC や GaN のスイッチングデバイスへの移行が順調に 進んでいる。電気モータとインバータの統合は、より優れ た統合と標準化を実現するための重要な進歩である。その 際、小型化、軽量化、コスト低減のための新しいアクティ ブ EMC フィルタまたはハイブリッド EMC フィルタ技術 の開発がここでの課題となる。

トラックやバスは乗用車と同じ道路を走るが、より多く のエネルギーや電力を必要とし、稼働時間もはるかに長い。 size, weight, and costs.

Trucks and busses share the same roads as cars, but energy and power demands are higher, and the operation time is much longer. Power electronics is therefore designed to deal with higher lifetime requirements.

From all transportation systems, railway is the most experienced electrification so far. Trains and infrastructure are expected to last decades and as such power electronics must offer high reliability and long lifetime. The need for very high-speed trains is growing resulting in the development and implementation of MAGLEV trains and Hyperloop vehicles.

Emissions and noise from aircrafts must be reduced by 2040 and electrification will undoubtedly help in achieving these targets. In these application, semiconductors like SiC and GaN are needed and for the future even ultra-wide bandgap semiconductors (UWBG) will give an additional benefit.

Generally speaking, a lot of innovation towards smart converters using benefits from I 4.0 and AI will dominate power electronics in all fields of mobility and energy supply application. Sustainability is getting more in focus for all developments in the future.

Power semiconductor devices

The performance of active and passive power devices has always been a limiting but enabling factor for power electronics.

Silicon (Si) devices have been the workhorses of power electronics and will remain for the next decades. The low voltage MOSFET, the super junction MOSFET, the IGBT and thyristor-based devices have reached a level of maturity that ground-breaking innovations are not to be expected.

Two decades ago, the first silicon carbide (SiC) Schottky diode became commercially available, and one decade ago, the first SiC MOSFETs appeared on

富士電機技報 2022 vol.95 no.4

したがってこれらに対するパワーエレクトロニクスは、よ り長寿命に対応できるよう設計されている。

あらゆる輸送システムの中で、鉄道は、電化に対して最 も実績を積んでいる。列車と鉄道施設は数十年の耐久性を 要求されており、したがって鉄道システムに対するパワー エレクトロニクスには高い信頼性と長寿命が必要となる。 超高速列車へのニーズが高まっており、磁気浮上式鉄道や ハイパーループの開発や導入につながっている。

航空機の排気や騒音は 2040 年までに低減が必要であり、 電動化がその目標の達成に貢献すると期待されている。そ の際、SiCや GaN などの半導体が必要であり、将来に向 けては超ワイドバンドギャップ(UWBG)半導体もさら なる恩恵をもたらすであろう。

一般的に、インダストリー 4.0 や AI の利点を生かした スマートコンバータに向けた多くのイノベーションが、モ ビリティやエネルギー供給用途のあらゆる分野でパワーエ レクトロニクスに影響を及ぼすであろうと言われている。 今後、あらゆる開発において、サステナビリティがより重 視されるであろう。

パワー半導体デバイス

能動素子であれ、受動素子であれ、パワーデバイスの性 能は、常にパワーエレクトロニクスの制約要因でもあり実 現要因でもあった。

シリコン(Si)デバイスはパワーエレクトロニクスの 主力製品であり、今後数十年間はその座を維持すると思 われるが、低電圧 MOSFET やスーパージャンクション MOSFET、IGBT、サイリスタベースのデバイスは成熟期 にきており、革新的なイノベーションは望めない。

20年前、炭化けい素(SiC)ショットキーダイオード が初めて市販され、10年前にはSiC-MOSFETが初めて 製品化された。その後、SiCデバイスはかなりのシェアを 占めるようになり、モビリティの電動化や再生可能エネ ルギー技術の分野でハイエンドニッチから主流へと一歩 踏み出した。現在では、650V~6.5kVまでの電圧範囲 the market. In the meantime, SiC devices have reached a considerable market share and made the step out of the high-end niche into the mainstream, with the emobility and renewable energy technologies. Today the voltage range is covering from 650 V up to 6.5 kV and further development like the super junction MOSFET and the FinFET are attracting more and more attention.

Lateral gallium nitride (GaN) devices with voltage ratings up to 650 V are now established. There is currently a strong focus for consumer electronics but also for power supplies in ICT and data centres. All these applications take benefit from the low parasitic capacitances and the low gate charge. GaN-based converter circuits can operate at higher switching frequencies with still high efficiency and their volume and weight can be reduced significantly. Monolithic integration is an important advantage in lateral GaN technology. Vertical GaN transistors are recently considered for voltage ratings > 1,000 V and for higher current capabilities. The next step will be ultra-wide bandgap semiconductors (UWBG) made of Ga₂O₃, AlGaN, AlN or diamond crystals.

Power Electronics capability in Japan

Historically, Japan has a strong position in power electronics, on the technology side with power devices and on the application side with industry, renewable energy technologies and traction drives.

Japan industry is covering the whole value-added chain starting with materials, substrates, wafers, power devices, and converters covering a variety of applications.

From the very beginning of Power Electronics Fuji Electric is playing a key role, and in many cases, creates trend setting technologies. This issue provides an excellent example of the current technology available towards the future trends. をカバーしており、スーパージャンクション MOSFET や FinFET のようなさらなる進化がますます注目を集めてい る。

横型窒化ガリウム(GaN)デバイスでは、現在、定格 電圧 650 V までが実用化されており、民生用電気機器 だけでなく、ICT やデータセンターの電源用途にも注目 が集まっている。これらすべてのアプリケーションでは、 GaN の低寄生容量と低ゲート電荷の恩恵を受けている。 GaN ベースのコンバータ回路はより高いスイッチング周 波数でも高効率で動作し、体積や重量を大幅に削減できる。 モノリシック集積化は横型 GaN デバイスにおいて重要な 技術である。縦型 GaN トランジスタでは、最近、1,000 V を超える定格電圧と、より高い電流容量が検討されている。 次のステップでは Ga₂O₃、AlGaN、AlN あるいはダイヤ モンド結晶でできた超ワイドバンドギャップ(UWBG) 半導体の可能性が挙げられている。

日本におけるパワーエレクトロニクスの可能性

以前より日本は、パワーエレクトロニクスにおいて、技術面ではパワーデバイス、アプリケーション面では産業、 再生可能エネルギーおよびトラクションドライブ分野で確 固たる地位を築いている。

日本の産業は、材料、基板、ウェーハ、パワーデバイス、 コンバータでさまざまなアプリケーションをカバーし、バ リューチェーン全体を網羅している。

富士電機はパワーエレクトロニクスの初期から中心的な 役割を果たしており、時代の先駆けとなる技術を創出して いる。本号では、将来の動向を見据えた技術事例を分かり やすく紹介する。



モビリティ・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 Mobility and Energy Management

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

修 IKAWA, Osamu

井川

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おり、日本を含む世界各国で温 室効果ガス削減の具体的目標が定められている。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 の柱に据えており、革新的クリーンエネルギー技術・ 省エネルギー(省エネ)製品の普及拡大を通じ、"脱 炭素社会""循環型社会""自然共生社会"の実現を目 指す、"環境ビジョン 2050"を策定している。

中でも、脱炭素社会の実現に対しては、自動車電動 化の拡大や電気エネルギーの効率的な利用が必須であ り、パワーエレクトロニクス(パワエレ)機器はこれ らの実現に必要不可欠である。このことから、パワエ レ機器の主要なデバイスであるパワー半導体に対する 期待はますます高まってきている。

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、モータ搭載車 の販売台数は今後伸長していくものと考えられている。 富士電機は、モータ制御用の車載 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール、ならびに充電 器、直流電源の電力変換制御用途のパワー半導体製品 を開発し、量産体制を拡大している。

一方、内燃機関搭載車は環境性能を重視したハイブ



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)

リッド車などの形で存続すると予想される。この用途 向けに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) 製品、ガソリンエンジンの吸気・ 排気系や、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

(*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ある。 MOSFET とバイポーラトランジスタの長所を生かし 分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立で 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 きる。

モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

特集

富士電機技報 2022 vol.95 no.4

センサ、ガソリンエンジンの点火制御に用いられるワ ンチップイグナイタなどの車載用の製品を開発し、製 品化しており、エンジンの効率的な燃焼などを通じて、 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、小容量、中容量、大容量の製 品を展開している。

小容量の製品分野では、エアコンなど家電製 品のモータ駆動用の小容量 IPM (Intelligent Power Module)を開発し、製品化している。ま た、小容量のパワーコンディショナ(PCS: Power Conditioning System) や無停電電源装置(UPS: Uninterruptible Power System) などの電力変換装 置を主な用途とするディスクリート IGBT 製品を開発 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、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 UPS の電力変換装 置などに用いられる産業用 IGBT モジュールを開発し、 量産している。この分野では、労働力不足や生産性向 上に対応するための自動化投資などに伴い需要の拡大 が期待されている。

大容量の製品分野では、風力発電やメガソーラー 発電などの再生可能エネルギー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の IGBT モ ジュールを開発し、製品化している。

これらの製品のほか、それぞれの用途において、既 存のシリコン(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 ワー半導体である炭化けい素 (SiC) デバイスも開発し、 製品化している。

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 xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実 現するパッケージ技術

電動車(xEV)の駆動用モータの制御に必要な車載 IGBT モジュールは、限られたスペースに搭載される ために小型化が必須であり、さらに高出力化も求めら れていることから、高電力密度化が必要である。富士 電機は、パワーモジュールを高電力密度化するために 必要な半導体素子やパッケージの技術の開発に取り組 んでおり、xEV のパワートレインを構成するキーコ ンポーネントとして 100 kW クラスのインバータを ターゲットとした業界トップクラスの超小型の xEV 向け IGBT モジュール「M677」を開発した(図3)。 M677 では小型化と高出力化を両立させるため第7世 代 RC-IGBT (逆 導 通 IGBT : Reverse Conducting IGBT)を採用し、さらにその導通損失を低減するため、 Siウェーハの薄化と表面構造の最適化を行っている。 チップ体積の減少に伴い熱容量が減少し、内部温度が 上昇しやすくなることへの対策として、従来のアルミ ニウムワイヤ配線に比べて放熱性の高い銅製リードフ レームを採用した。これにより、例えばリーク電流に 起因する熱暴走によりチップを破壊するのに要する短 絡破壊エネルギーは、従来品に対して40%向上した。

また、高電力密度、高温環境下で使用されることに より配線抵抗や熱抵抗の上昇を引き起こすことが懸



図 3 xEV 向け IGBT モジュール「M677」

(*2) 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。

(*3) ディスクリート

パワー半導体素子の IGBT や MOSFET を 1 素子、ま 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 高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとし 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。

(*4)炭化けい素 (SiC)

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 たはそれに逆並列にダイオードが挿入された1in1と ブ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が ジュールの小型化とパワー密度向上につながる。 高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持つため、

て実用化が進められている。

(*5) RC-IGBT

Reverse-Conducting IGBT (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 けい素(Si)と炭素(C)の化合物である。3C、4H、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 特集

念されるエレクトロマイグレーションに対し、この パッケージが十分な耐性を備えていることを確認した。 (185ページ、"xEV 向け IGBT モジュールの高電力密 度化を実現するパッケージ技術"参照)。

3.2 第2世代 1,700 V All-SiC モジュールの系列拡大

AC 690 V 系モータドライブや電鉄に用いられるパ ワエレ機器は、DC バス電圧が 900 ~ 1,100 V であ るため、定格電圧 1,700 V のパワー半導体が求めら れている。また、太陽光発電や風力発電といった再生 可能エネルギーの分野では、発電効率の向上やコスト 低減を図るため、DC バス電圧の高圧化が進んでいる。 このような高耐圧のパワー半導体が要求される産業 用途向けに、第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を搭載した定格電圧 1,700 V の All-SiC モジュールを開発しており、その系列製品を今回開発 した。

開発した 1,700 V All-SiC モジュールにより 2 レベ ル回路を構成し、DC バス電圧 1,100 V のパワエレ機 器に適用した場合の発生損失は、従来の 1,200 V Si-IGBT により 3 レベル NPC 回路を構成した場合に比 べて 69% 低減した (図 4)。このように高効率化が見 込めるとともに、3 レベル回路から 2 レベル回路とし て使用するパワー半導体デバイス数を減らすことが可 能となり、パワエレ機器の高信頼化やコスト低減も期 待できる。

SiC-MOSFET は Si-IGBT に比べ、はるかに高速



図4 3レベル回路と2レベル回路での損失比較

なスイッチングが可能であるが、高速スイッチング時 には、モジュール内部の配線インダクタンスにより 高いサージ電圧を引き起こすという弊害がある。今回 系列拡大した All-SiC モジュールでは、内部構造の 変更により配線インダクタンスを 24% 低減しながら も、第7世代「X シリーズ」IGBT の 2 in 1 パッケー ジ「M276」の外形および端子配置との互換性を確保 しており、Si-IGBT を容易に置き換えることができ る(190ページ、"第 2 世代 1,700 V All-SiC モジュー ルの系列拡大"参照)。

3.3 RC-IGBT を搭載した第7世代 IGBT-IPM の小 型製品の系列化

近年、ファクトリーオートメーション化や携帯電話 などの通信機器の普及により、産業用ロボットや工作 機械などに使用されるサーボシステムの需要が拡大し ている。こうした装置に強く求められるのが省スペー ス化であり、これを実現するためには、そこに使われ るパワー半導体も小型化することが必要であり、高温 動作化と低損失化が鍵となる。また、突然の故障を防 止するため高信頼性であることも求められている。

IGBT-IPM は、IGBT のゲートを駆動する制御 IC を内蔵し、さらに保護機能も備えた IGBT モジュール であり、高信頼性が要求される NC 工作機、ロボット、 エレベータなど、用途は多岐にわたっている。

最新世代である第7世代IGBT-IPMは、低損失化 を実現するために、IGBTのトレンチゲート構造の微 細化と薄ウェーハ加工技術によりドリフト層を薄化 した第7世代チップ技術に加え、IGBTのゲートを駆 動する新たな制御技術を採用した。さらに高耐熱ゲル や高信頼性はんだなどの第7世代パッケージ技術に より、高温動作化を実現した。今回、さらなる小型化、 高信頼性の要求に応えるため、第7世代IGBT-IPM の系列に、RC-IGBTチップを適用した製品を加えた。 RC-IGBTチップとは、IGBTチップとFWD(Free Wheel Diode)チップをワンチップ化したものである。

RC-IGBTの採用により、IGBTとFWDのそれぞ れのチップから構成される第6世代IGBT-IPMに比 ベてチップ総面積が33%低減し、パッケージの小型 化が可能となった。また、第7世代チップ技術と新た な制御技術により、発生損失を第6世代IGBT-IPM に比べ約7%低減させた。チップ面積と発生損失の低 減により、今回開発した小型パッケージ「P639」では、 チップからの発熱を放熱する銅ベースの面積を従来

(*6) 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。

に比べ 33% 縮小することができ、パッケージ面積は 27%低減した。さらに、RC-IGBTの採用によりパ ワーモジュールの代表的な寿命特性である *A* T_{vi}パワー サイクル寿命も向上する。従来の第6世代 IGBT-IPM では IGBT と FWD が交互に発熱と冷却を繰り返 すのに比べて、RC-IGBT では IGBT 領域と FWD 領 域が一つのチップ内にあるためチップ全体の温度変化 ΔT_{vi} が個別チップの場合よりも小さい。これにより、 温度変化による接合部の摩耗劣化に起因するΔT_{vi}パ ワーサイクル寿命は、出力周波数1Hz 動作時には第 6世代に比べて約10倍となると推定される。

例として、従来品の「P629」を使った幅60mm のバックフィンタイプのサーボアンプにおいて、開 発品である P639 で置き換えると、サーボアンプの筐 体(きょうたい)幅を 46.5 mm 程度にすることがで き、約20%の縮小が可能となる(図5)(195ページ、 "RC-IGBT を搭載した第7世代 IGBT-IPM の小型製 品の系列化"参照)。

3.4 3.3 kV 第7世代「X シリーズ」IGBT チップ技 衏

高速鉄道は、同じ長距離の輸送手段である飛行機 よりも格段に CO₂の排出量が少なく、国内はもとよ り国外での導入が近年増加している。その鉄道車両の モータの駆動には IGBT モジュールが使われる。CO2 を削減するために、IGBT モジュールのさらなる低損 失化が求められている。また、高速鉄道自体の消費電 力低減のためには、車両や搭載機器の軽量化が重要で あり、システムの小型・軽量化に貢献できる IGBT モ ジュールが求められている。

富士電機は、最新世代である「Xシリーズ」の



図5 バックフィンタイプのサーボアンプ模式図

IGBT と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を組み 合わせた 3.3 kV 定格の SiC ハイブリッドハイパワー モジュール(HPM: High Power Module)を開発し、 大幅な損失低減を実現した。

今回開発した、3.3 kV X シリーズ IGBT チップ (X-IGBT)では、従来と比べて表面構造を微細化す るとともに、n-ドリフト層の厚さを従来よりも薄くす ることにより、導通損失の指標である定格電流でのコ レクタ・エミッタ間飽和電圧 V_{CE(sat)} を従来に対して 1.0 V 低減している。

図6にターンオフ損失 *E*_{off} と *V*_{CE(sat)}の関係を示 す。X-IGBT では、同じ E_{off} で比べたときの $V_{\text{CE(sat)}}$ が、 従来品に対して 1.0 V 低減している。また、表面構造 の微細化によりターンオン時の dv/dt、di/dt のゲート 抵抗による制御性を改善し、これによりターンオン損 失*E*_{on}を改善させた。

この IGBT を搭載した 3.3 kV SiC ハイブリッド HPM は高速鉄道に採用され商用運転しており、高速 鉄道の消費電力の低減とともに、機器の小型・軽量化 に寄与している(200ページ、"3.3 kV 第7世代「X シリーズ」IGBT チップ技術"参照)。

3.5 第7世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00 シリー ズ」

電子機器に用いられるスイッチング電源についても、 省エネ化に関する要求が厳しくなっており、特にネッ トワークの利用が拡大して常時稼働のシステムが増え ることにより、軽負荷時の電力変換効率の向上が強く 求められている。また新興国では、インフラ整備の遅 れにより、商用電源(AC電源)の電圧変動が頻発し ている。これにより、AC 電源に高電圧が発生し、電



図6 ターンオフ損失とコレクタ・エミッタ間飽和電圧の関係

(*7) 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使用した

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 ダイオードと

整流作用を持つダイオードである。その優れた電気特 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。

表1 「FA8C00 シリーズ」の機能概要

項目	従来製品	FA8C00シリーズ
最小出力パルス幅の 選択機能	なし	内蔵
高AC入力電圧端子 最大印可電圧	650 V	710 V
IC出力電圧の クランプ機能	なし	内蔵(16 V)
外部レギュレータ	必要	不要 (8点の部品削減可能)

源装置の入力電圧範囲を超えることによる電源装置の 破壊が問題となっている。さらに、電子機器の継続的 な低価格化ニーズを受けて電源の部品点数削減の要求 も強い。

今回、従来製品と比べて電源システムの軽負荷時の 電力変換効率のさらなる向上と、高AC入力電圧対応、 電源部品の削減を可能とする「FA8C00シリーズ」を 開発した。表1にFA8C00シリーズの機能概要を示す。

軽負荷時の電力変換効率を高めるため、連続スイッ チング動作とスイッチング停止を繰り返すバースト 動作を行い、MOSFETのスイッチング損失を低減す る方法が従来から採られていた。この動作において電 力変換効率をさらに向上させるためには、幅の狭い MOSFET駆動用出力パルスを発生しないように、電 源に合わせて出力パルス幅を最適化することが効果的 である。FA8C00シリーズでは電源に合わせて最小 の出力パルス幅を設定できる機能を追加したことによ り、軽負荷時の電力変換効率を向上させることが可能 となった。

また、商用電源に接続される高AC入力電圧端子 (VH端子)の回路内部に使われる起動素子を改良し、 最大印加電圧を710Vに高めることにより、AC電源 の電圧変動による破壊を抑制できるようにした。

さらに、電源 IC により駆動される MOSFET のゲー ト端子の定格電圧は 20 ~ 30 V であり、これを超え る電圧が印加されると MOSFET が破壊される。これ を防ぐために、従来品では、MOSFET を駆動するド ライバ回路の電源電圧である VCC 端子電圧を、20 V 以下に制限するレギュレータ回路を外付けする必要が あった。新製品の FA8C00 シリーズでは、IC 内部で 出力端子電圧をクランプする機能を内蔵することで、 VCC 端子電圧が 30 V を超えても、IC から出力する ゲート電圧値は 16 V に抑えられる。したがって、外 部で構成していたレギュレータ回路が不要となり、電 源の部品削減を可能とした(204 ページ、"第 7 世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00 シリーズ」"参照)。

3.6 IPS 用オートゼロアンプ技術

富士電機は、自動車のトランスミッションなどを制

御するためのソレノイドバルブを動作させる電流駆 動素子である IPS を開発し、製品化してきた。IPS の 小型化、周辺部品を取り込んだ1チップ化は、ECU (Electronic Control Unit) 基板の小型化を可能にし て車内の快適性能の向上に寄与し、また IPS の電流検 出精度の向上は燃費向上に寄与する。これまで別置さ れていた IPS と電流検出用のシャント抵抗を1チップ 化すると、シャント抵抗で発生するジュール熱により チップ温度が上昇する問題がある。このチップ温度の 上昇を抑えるために、シャント抵抗の抵抗値を現状の 1/4 にする必要がある。これに対して、入力電流-ア ンプ出力電圧特性を維持するために、アンプの差動ゲ インを従来の4倍にすると、アンプ出力の誤差も大き くなり、電流検出精度が悪化する問題が起きる。これ を解決するため、オフセット電圧を一定時間ごとに自 己補償するオートゼロアンプ技術を開発した。

図7にオートゼロアンプを使用した実機評価結果 を示す。ゲインはシャント抵抗を従来の1/4にする ことを考慮して従来品の4倍の32倍とした。アンプ 入力には負荷電流1A、かつシャント抵抗が従来品の 1/4に相当する入力電圧を印加した。この条件で温度 -40℃から+175℃の範囲で電流検出精度の評価を 行った。電流検出精度の目標値は、第5世代 IPS と同 等の±3.1%以下とした。ゲインを従来品の4倍の32 倍としたにも関わらず第5世代 IPSの目標仕様を満足 している。

これにより、従来と同等の電流検出精度を保ちつつ、 ECU 基板の実装面積の縮小が期待できる(209ページ、 "IPS 用オートゼロアンプ技術"参照)。

3.7 トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制 した SiC-MOSFET

SiCはSiに比べて絶縁破壊電界強度が高いため、電 圧を支えるドリフト層を薄く、高濃度にすることによ



図7 オートゼロアンプを使用した実機評価結果

り素子の低抵抗化が可能である。その結果、電力変換 機器の低損失化に貢献できる。また、SiC は熱伝導率 が高く、バンドギャップが広いため、素子の高温動作 が可能となることから冷却システムを簡素化できるの で、電力変換機器の小型・軽量化に有利となる。

一方、SiC-MOSFETの還流素子として機能するボ ディダイオードに電流を流すと、オン電圧が増大す る現象(バイポーラ劣化)によって損失が増大する という問題があり、バイポーラ劣化の抑制方法として、 SBDと MOSFET のワンチップ化(トレンチ SBD 内 蔵)を検討した。

富士電機は、共同研究体つくばパワーエレクトロニ クスコンステレーション(TPEC:Tsukuba Power-Electronics Constellations)のプロジェクトに参画 し、その中でSiCトレンチゲートMOSFETにトレン チSBDを形成する技術を確立した。トレンチSBDを 内蔵する場合、トレンチゲート間に平面的にトレンチ SBDを形成してしまうと従来のSiCトレンチゲート MOSFETに対しセルピッチを広げる必要があり、導 通損失が増大する。そこで、セルピッチを広げること なく従来のSiCトレンチゲートMOSFETにトレンチ SBDを形成し、SBD内蔵を実現した。さらに、セル ピッチを狭めるとバイポーラ劣化を起こしにくくなり、 損失増加が抑制された。

図8に順方向通電電流密度とバイポーラ劣化の指標 であるドレイン・ソース間順方向電圧の初期値に対す る変動量 ΔV_F の関係を示す。セルピッチの大きい素子 Bではバイポーラ電流により ΔV_F が増加しているが、 相対的にセルピッチが狭い素子Cはバイポーラ劣化が 抑制されており、通電装置上限の電流密度2,000 A/ cm²まで ΔV_F が増大しないことが実証された。また、 エピタキシャル基板の貫通 BPD(基底面転位:Basal Plane Dislocation)密度に関係なく、安定してバイ ポーラ劣化を抑制できることも確認した(214 ページ、 "トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した



SiC-MOSFET"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、産業・社会インフラ、 自動車などの分野で、広く世の中に貢献してきた。中 でもパワーエレクトロニクスは、急速に高まっている 省エネルギー化、脱炭素化など環境問題への施策を牽 引する技術である。パワー半導体は、パワーエレクト ロニクスにおけるキーデバイスであり、今後もその技 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) 安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.236-239.
- (2) 立石義博ほか. xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.240-245.
- (3) Branislav Stevanovic. et al. "Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-Stage Grid-Connected 1500-V PV System With Employed 900-V SiC Devices". 2019, IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electronics, vol.7, no.2, p.811-832.
- (4) 岩崎吉記ほか.第2世代SiCトレンチゲートMOSFET
 搭載All-SiCモジュール.富士電機技報.2019, vol.92, no.4, p.229-233.
- (5) 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.
- (6) 寺島健史ほか.小型パッケージ「P644」を採用した第
 7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.234-238.
- (7) 皆川啓ほか.第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM 「P631」.富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.251-255.
- (8) Satou, K. et al. "The 7th Generation Intelligent Power Module for Industrial Applications". Proceeding of PCIM Asia 2021.
- (9) 国土交通省. "主な鉄道プロジェクトと海外展開に向けた取組". https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001590734.pdf,(参照 2022-11-24).
- (10) 関野裕介,森谷友博. 電鉄向け 3.3 kV SiCハイブリッドハイパワーモジュール. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.1, p.63-65.
- (11) 藪崎純ほか.第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.452-456.

- (12) 日朝信行ほか. 650 V耐圧PWM電源制御IC「FA8A80 シリーズ」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.246-250.
- (3) 中川翔ほか. ワンチップ リニア制御用IPS「F5106H」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.273-276.
- (14) 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.
- (15) 岩田英樹ほか. 車載用第5世代IPS「F5202H」. 富士電 機技報. 2020, vol.93, no.4, p.219-223.



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。

富士電機技報 2022 vol.95 no.4

xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現する パッケージ技術

Package Technology for Achieving Higher Power Density in IGBT Modules for xEVs

佐藤	悠司 SATO, Yushi	安達新一郎 ADACHI, Shinichiro	東	展弘 HIGASHI, Nobuhiro
----	----------------	--------------------------	---	----------------------

自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として電動車が期待されている。電動車のインバータに搭載されるパワー モジュールは、小型・薄型化、高出力化を併せ持った高電力密度化が求められる。富士電機は、これらの市場要求に対し て業界トップクラスの超小型の xEV 向け IGBT モジュール「M677」を開発した。高電力密度化に伴い増加する単位体積 当たりのストレスに対して、リードフレーム配線をチップの平面上に接合することで小型で薄型の IGBT の短絡耐量が向 上した。また、市場で要求されるはんだ接合部のエレクトロマイグレーション寿命に対して、十分な耐性を確保した。

In the automotive field, electrified vehicles are expected as a measure of reducing greenhouse gas emissions. Their power modules in the inverter are required to have a higher power density, that is, small, thin and high output. To meet these market demands, Fuji Electric has developed the "M677," an industry-leading ultra-compact IGBT module for xEVs. We have improved the shortcircuit withstand capacity of this small, thin IGBT by bonding the lead frame on the flat surface of the chip to reduce the stress per unit volume that has increased with the growth of the power density. In addition, the solder joints have sufficient resistance to the electromigration lifetime to meet the market needs.

1 まえがき

気候変動問題を解決するために"2050年のカーボン ニュートラル実現"に向けた国際的な取組みが加速してい る。自動車分野では、温室効果ガス排出削減の手段として、 ハイブリッド自動車(HEV:Hybrid Electric Vehicle) やプラグインハイブリッド自動車(PHEV:Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、電気自動車(EV:Electric Vehicle)のような電気モータで走行する電動車(xEV) の普及が期待されている。

この社会的要請の実現に貢献するため、富士電機は、 xEVのパワートレインを構成するキーコンポーネントと して、100kW クラスのインバータをターゲットとした 業界トップクラスの超小型の xEV 向け IGBT モジュール 「M677」を開発した(図1)。M677 では、高い電力密度 を実現することにより、市場の要求に応えるモジュールの 小型化を達成した。



図 1 xEV 向け IGBT モジュール「M677」

本稿では、高電力密度化を実現するパッケージ技術につ いて述べる。

2 高電力密度化の課題

開発した M677 では、モジュールの小型化と高出 力化を両立させるために第7世代 RC-IGBT(逆導通 IGBT: Reverse-Conducting Insulated Gata Bipolar Transistor)を採用し、さらにその導通損失を低減するた め、チップの薄化と表面構造の最適化を行っている。また、 回路構成を1チップ/アームとして、従来品の「M653」 で採用していた2チップ/アーム構成に比べてチップの 専有面積を低減した。その結果、表1に示すように、従来 品の M653に比べて主回路の面積が半減し、電力密度を 約2倍高めている。一方、従来品に比べてチップを小型 化・薄化したことにより、チップ体積の減少に伴う熱容量

表1 「M653」と「M677」の内部回路比較



〈注〉アーム:219ページ「解説1」を参照のこと

の減少や、チップ表面積の減少による熱抵抗の増加が避け られない。モジュールの性能を低下させないためには、動 作時の接合部の温度を規定値以下に保たなければならない ので、チップからの放熱性を高める対策が必要となる。

また、高電力密度化に伴って、エレクトロマイグレー ションへのさらなる対策も必要となる。エレクトロマイグ レーションとは、金属中に電流を流すと、電子が金属原子 と衝突して金属原子が輸送される現象である。金属原子が 輸送されるとボイドを形成し、これが増大すると電気抵抗 や熱抵抗の上昇をもたらす。最終的には断線を引き起こ す可能性もあることから、モジュールの信頼性を確保する ためにも、電流密度の高い部分が十分なエレクトロマイグ レーション耐性を備えることが必要となる。

3 短絡耐量の向上

3.1 IGBT の短絡故障モード

パワーモジュールの短絡動作は、チップ破壊、制御回路 や駆動回路の異常、ノイズによる誤動作、配線接続の間違 い、地絡などが原因となり発生する。IGBT が短絡状態に なると、高電圧が印加された状態で数千Aの大電流が流 れるため、IGBT に大きなストレスがかかり、この状態が 続くと IGBT が破壊に至る。

短絡動作に伴う IGBT の破壊モードは、図2 に示す四つ に大別することができる。高電圧が印加された状態で大電 流が流れることによりラッチアップが起き、ターンオン 動作後すぐに破壊に至る A モード、短絡動作中の電力損 失による急激な温度上昇によって熱破壊に至る B モード、 ターンオフ動作中に IGBT 内部の不均一な動作による電流 集中が影響して破壊に至る C モード、短絡遮断後の異常 なリーク電流による熱暴走が起こり破壊に至る D モード である。このような短絡動作時に IGBT が破壊に至るまで の時間は、短絡耐量として規定される。



図 2 IGBT の短絡破壊モード

3.2 IGBT の活性体積とD モード短絡耐量の関係

Dモードに対する短絡故障の原因は、短絡遮断後に発 生する異常なリーク電流によって熱暴走が起こり、チップ の内部温度が急激に上昇することである。この短絡耐量は、 チップの薄化を図ると低下する。薄化したチップは、体積 が減少して熱容量が小さくなるため、短絡遮断後の熱暴走 に対してチップの温度が格段に上昇しやすいことが原因と されている。図3に IGBT の活性体積(電流が流れる有効 領域)と短絡破壊エネルギーの関係を示す。IGBT の活性 体積とDモードに対する短絡耐量は比例するので、小型 化と高耐量化はトレードオフの関係にある。

3.3 リードフレーム配線による短絡耐量の向上

チップの薄化に伴って熱容量が低下しても、チップと配 線の接合面積を増加して放熱性を向上することで温度上昇 を抑えることができる。

今回開発した M677 のチップに対して、従来品の M653 に使われていたアルミニウムワイヤ配線を適用し た場合は、Dモードに対する短絡耐量が M653 に対して 30% 低下する。その対策として、アルミニウムワイヤ配 線に比べて熱容量が大きい銅製リードフレーム配線をチッ プの平面上に接合する構造を採用した。

図4にアルミニウムワイヤ配線と銅製リードフレーム配線のDモードで破壊に至る短絡破壊エネルギーの比較による、リードフレーム配線による短絡耐量の向上の効果を示す。従来のアルミニウムワイヤ配線に対して、40%向上することを確認した。

M677 では、上述した対策により、導通損失低減に有 効となる薄化したチップにおいて短絡耐量を確保した。加 えて、RC-IGBT の表面構造を最適化することにより、導 通損失を低減している。図5 にコレクタ・エミッタ間飽和 電圧 $V_{CE(sat)}$ を示す。同一の飽和電圧下におけるコレクタ 電流密度は、従来の RC-IGBT と比べて 20% 増加してい る。



図3 IGBT の活性体積と短絡破壊エネルギーの関係



図4 リードフレーム配線による短絡耐量の向上の効果



図 5 コレクタ・エミッタ間飽和電圧 V_{CE(sat)}

④ エレクトロマイグレーションと信頼性評価手法

4.1 エレクトロマイグレーション

2)章で述べたエレクトロマイグレーションに起因する平 均故障時間(MTTF: Mean Time To Failure)は、式(1) に示す "Black の式"より推定できる。

MTTF= $AJ^{-n}\exp\left(\frac{Ea}{kT}\right)$ ······(1) A:定数 J:電流密度 n:電流密度指数 Ea:活性化エネルギー k:ボルツマン定数 T:絶対温度

この式(1)によれば、エレクトロマイグレーションによる MTTFは、電流密度が大きく、温度が高いほど短くなる。 パワーモジュールを構成する部材の中で、最も電流密度が 大きくなるのは接合材として使われるはんだ部分であるた め、M677の開発に際しては、はんだ接合部に対するエ レクトロマイグレーション耐性を検証した。

4.2 電流密度と温度の影響

M677 において、リードフレームや絶縁基板とチップ を接続するはんだ接合部のエレクトロマイグレーション耐 性を検証するため、はんだ接合部を模擬した試験片を用 いて評価した。図6 に試験回路の概要を示す。M677 では、 パワーモジュール動作時の温度変化によって接合部に発生 するひずみを低減するために、はんだAとはんだBには 特性が異なるはんだを採用しているので、それぞれ試験片 を評価した。

試験方法として、試験片には一定の電流を連続通電し、 恒温槽中で周囲温度を制御した。上述した式(1)で支配因子 となっている電流密度と温度を試験条件として比較した。 また、エレクトロマイグレーション寿命の判定基準として、 試験片の抵抗値が20%増加した時間とした。

試験結果として、図7 に電流密度に対するエレクトロマ イグレーション寿命を、図8 に温度に対するエレクトロマ イグレーション寿命を示す。"Black の式"から予想され るとおり、電流密度が大きいほど、また、温度が高いほど 短くなっている。また、はんだ B は、はんだ A に対して エレクトロマイグレーション耐性があることを確認した。





図7 電流密度に対するエレクトロマイグレーション寿命



図8 温度に対するエレクトロマイグレーション寿命



図9 連続通電試験後のはんだ接合部の断面

4.3 「M677」のエレクトロマイグレーション耐性

M677 は、エレクトロマイグレーション寿命の目標値 を満足できるように、チップサイズ、はんだ材料、内部配 線などが設計されている。エレクトロマイグレーション の目標寿命は、4.2節で述べた電流密度と温度に対する結 果から、式(1)で求めたはんだ材料の MTTF と、パワーモ ジュールが実際に xEV に使われる際に想定されるストレ スにより求めた。

M677のエレクトロマイグレーション耐性を検証する ために、実機を使った連続通電試験を実施した。図9に連 続通電試験後のはんだ接合部の断面を示す。それぞれ、目 標寿命の約3倍の時間まで連続通電した際の、はんだ接 合部1およびはんだ接合部2の断面である。試験後の断 面には、配線抵抗や熱抵抗の上昇に伴うボイドが確認され なかったことから、M677はエレクトロマイグレーショ ンの目標寿命に対して十分な耐性を実現していると考えら れる。

5 あとがき

xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現する ために取り組んだ短絡耐量の向上およびエレクトロマイグ レーション耐性について述べた。このような取組みによ り、xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュー ル「M677」の提供を可能にした。 今後も急速に伸長する xEV 向けパワー半導体の需要に 対し、低損失化、高電力密度化、高信頼性化のために技 術開発に引き続き取り組み、市場要求に応えたパワーモ ジュールを提供することでカーボンニュートラルの実現に 貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 安達新一郎ほか. xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBT モジュール「M677」、富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.236-239.
- (2) 立石義博ほか.xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却 技術.富士電機技報.2021,vol.94, no.4, p.240-245.
- (3) 荒井裕久ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.269-273.
- (4) Yamashita, J. et al, "A Study on the Short Circuit Destruction of IGBTs", Proc. of the 5th ISPSD, 1993, p.35-40.
- (5) Yamashita, J. et al, "A Study on the IGBT' s Turn-off Failure and Inhomogeneous Operation", Proc. of the 6th ISPSD, 1994, p.45–50.
- (6) Otsuki, M. et al, "Investigation on the Short-Circuit Capability of 1200 V Trench Gate Field-Stop IGBTs", Proc. of the 14th ISPSD, 2002, p.281–284.
- (7) Hagino, H. et al, "An Experimental and Numerical Study on the Forward Biased SOA of IGBT's", IEEE Transactions. Electron Devices, 1996, vol.43, no.3, p.490–500.
- (8) Takata, I. et al, "Non Thermal Destruction Mechanisms of IGBTs in Short Circuit Operation", Proc. of the 14th ISPSD, 2002, p.173–176.
- (9) Otsuki, M. et al, "A Study on the Short-Circuit Capability of Field-Stop IGBTs", IEEE Transactions. Electron Devices, 2003, vol.50, no.6, p.1525-1531.
- (10) Otsuki, M. et al, "Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution", ISPSD, 2003, April 14– 17, Cambridge UK, p.144–147.
- R.L. de Orio. et al, "Physically based models of electromigration : From Black's equation to modern TCAD models", Microelectronics Reliability, 2010, vol.50, p.775–789.



佐藤 悠司

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・ IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導 体事業本部電装事業部電装設計第一部。

モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

特集

富士電機技報 2022 vol.95 no.4



安達 新一郎

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・ IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導 体事業本部電装事業部電装設計第一部。



展弘

東

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・ IPM のパッケージ開発に従事。現在、富士電機株 式会社半導体事業本部電装事業部電装設計第一部。

第2世代1,700VAll-SiC モジュールの系列拡大

Line-Up Expansion of 2nd-Generation 1,700-V All-SiC Modules

高久	拓 TAKAKU, Tak	高崎 愛子 TAKASAKI, Aiko	奥村 啓樹 OKUMURA, Keiji
----	---------------	----------------------	-----------------------------

これまでに富士電機では、シリコン(Si)パワー半導体に比べてパワーエレクトロニクス(パワエレ)機器の大幅な損失 低減が期待できる 1,200 V 耐圧 All-SiC モジュールを開発している。今回、モータドライブや再生可能エネルギー、電鉄 などに用いられる高耐圧の電力変換器向けに、第2世代トレンチゲート構造の 1,700 V 耐圧 SiC-MOSFET パワー半導体 を搭載した All-SiC モジュールを開発した。これにより、電力変換器の発生損失を同定格の Si-IGBT モジュールに対して 68% 低減でき、パワエレ機器の高密度化と小型化が期待できる。

Fuji Electric has developed 1,200-V All-SiC modules, which are expected to significantly reduce power electronics equipment loss compared with silicon (Si) power semiconductors. We have recently developed an All-SiC module equipped with a 1,700-V SiC-MOSFET power semiconductor that utilizes a 2nd-generation trench gate structure. It is designed for high-voltage power converters used in motor drives, renewable energy facilities, and electric railcars. It reduces generated loss in power converters by 68% compared with Si-IGBT modules with the same power ratings. It is expected to increase the density and miniaturization of power electronics equipment.

1 まえがき

持続可能な社会の実現には、エネルギー利用の効率化、 省エネルギー(省エネ)化、太陽光発電や風力発電といっ た再生可能エネルギーの導入など、脱炭素化の取組みが重 要である。そのためには、発電や電力変換に不可欠なパ ワーエレクトロニクス(パワエレ)機器の効率向上が必要 であり、その構成部品であるパワー半導体は重要な役割を 担っている。現在、パワー半導体として主流の Si デバイ スの特性は、その物性で決まる限界に近づきつつあるため、 効率を大幅に改善することが困難になっている。このよう な状況の中、パワエレ機器のさらなる高効率化、省エネ化 の実現のため、SiC デバイスの適用が進められている。

これまでに富士電機では、産業用途向けに第2世 代SiCトレンチゲート MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を搭載した 定格電圧 1,200V、定格電流 300 ~ 600 A の All-SiC モ ジュールを開発している。

一方、AC 690 V 系モータドライブや電鉄に用いられる パワエレ機器は DC バス電圧が 900 ~ 1,100 V であるた め、定格電圧 1,200 V のパワー半導体モジュールでは耐 圧が不足している。したがって、これらのパワエレ機器 では、より耐圧の高い定格電圧 1,700 V のパワー半導体 が求められる。また、太陽光発電や風力発電といった再 生可能エネルギーの分野では、発電効率の向上やコスト 低減を図るため、DC バス電圧を従来の 1,000 V 程度から 1,500 V へと高圧化する動きがある。そのため、インバー 夕回路に中性点を持たせた 3 レベルインバータ回路が多 く採用され、1,700 V のパワー半導体が適用されている。

富士電機では、このような高耐圧のパワー半導体が 要求される産業用途向けに第2世代 SiC トレンチゲー

```
富士電機技報 2022 vol.95 no.4
```

ト MOSFET を搭載した定格電圧 1,700 V の All-SiC モ ジュールを開発した。

本稿では今回新たに系列化した定格電圧 1,700 V の All-SiC モジュールについて述べる。

1,700 V 定格 All-SiC モジュールの特徴

2.1 第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET

今回開発した 1,700 V 定格 All-SiC モジュールの回路 構成と外観を図1 に示す。第2世代 1,700 V SiC トレンチ ゲート MOSFET (SiC-MOSFET) と 1,700 V SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)を逆並列接続し、それら2 組 を直列接続したハーフブリッジ回路構成としている。この 1,700 V SiC-MOSFET は、第2世代 1,200 V SiC トレン チゲート MOSFET の技術を応用し、ドリフト層の最適化 と JFET (Junction Field-Effect Transistor) 幅の最適 化により、オン抵抗の増加を抑えつつ、長期信頼性の確保 を実現している。



図 1 1,700 V 定格 All-SiC モジュールの回路構成と外観

2.2 新構造「M295」パッケージ

SiC-MOSFET は、多数キャリアデバイス(ユニポーラ デバイス)であるため、少数キャリアデバイス(バイポー ラデバイス)である Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に比べ、はるかに高速なスイッチングが可能 である。しかし、高速スイッチング条件下では、モジュー ル内部の配線インダクタンスにより高いサージ電圧を引 き起こすという弊害を持つ。そこで、今回系列拡大した All-SiC モジュールでは、図2 に示すように内部の P 端 子と N 端子を並行平板構造とすることで、配線インダク タンスを 24% 低減した。さらに本パッケージは、第7 世代「X シリーズ」IGBT の 2 in 1 パッケージ「M276」 の外形および端子配置との互換性を確保しており、Si-IGBT からの容易な置換えを実現している。

2.3 出力特性

第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET を用いた All-SiC モジュールと、Si を用いた従来の第7世代 X シリー ズ IGBT モジュールの 1,700 V/300 A 定格品における出 力特性の比較を図3 に示す。All-SiC モジュールは、ユニ ポーラデバイスである MOSFET で構成されるため、バイ ポーラデバイスである IGBT で見られるビルトイン電圧 がないことが特徴である。また、ドレイン電流 I_D が定格 電流より小さい領域では、All-SiC モジュールのオン電 圧 $V_{\rm DS}$ は Si-IGBT モジュールのオン電圧 $V_{\rm CE}$ よりも小さ く、 $I_{\rm D}$ =150 A では All SiC モジュールのオン電圧は、Si-IGBT モジュールより 0.4 V 低くなっている。

一般に電力変換システムの定格電流実効値は、モジュー



図2 パッケージ内部構造



図3 出力特性の比較

ル定格電流の 30 ~ 50% にて設計されることが多い。こ のため、 $I_{\rm D}$ =150 A の場合、All-SIC モジュールの導通損 失は同定格の Si-IGBT モジュールと比較して 33% 低減 することができる。

2.4 スイッチング特性

All-SiC モジュールと従来の Si-IGBT モジュールのス イッチング損失の特性差を明らかにするために、ターンオ フ時の dv/dt とターンオン時の di/dt をそれぞれ等価に し、スイッチング波形の比較を行った。**表1**に、ゲート抵 抗 R_{G} 、ターンオフ dv/dt、ターンオン di/dt の値を示す。

表1に示した条件下での、All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールの定格電流 300 A におけるスイッチング 波形の比較を図4(a)、図4(b)、図4(c)に示す。

All-SiC モジュールは、Si-IGBT モジュールに比べて ターンオフおよび逆回復時のテール電流が大幅に減少し ている〔図4(a)、図4(c)〕。また、ターンオンおよび逆回 復時のピーク電流も大幅に減少していることが分かる〔図 4(b)、図4(c)〕。これは、Si-IGBT モジュールはバイポー ラデバイスであるため、少数キャリア注入による過剰キャ リアがスイッチング動作に影響しているのに対し、All-SiC モジュールはユニポーラデバイスであり、多数キャリ アのみで動作するためである。

また、図4(a)に示すように、All-SiC モジュールは Si-IGBT モジュールよりもターンオフ時の di/dt が大きいが、 ターンオフ時のサージ電圧は低いレベルに抑えられている。 これは、2.2 節で述べた All-SiC 用に開発した新パッケー ジの内部インダクタンス低減の効果によるものである。

表 2 は、All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールの ターンオフ損失 E_{off} 、ターンオン損失 E_{on} 、逆回復リカバ

表1 ターンオフ dv/dt とターンオン di/dt

スイッチング条件	ターンオフ		ターンオン	
T_{vj} =175 deg.C	<i>R</i> _G (オフ)	dv/dt	R _G (オン)	di/dt
Si-IGBT	0.39 Ω	4.19 V/ns	0.39 Ω	3.28 A/ns
All-SiC	27 Ω	4.15 V/ns	3 Ω	3.48 A/ns



図 4 All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチング 波形の比較

表2 スイッチング損失の比較

スイッチング 条件 T _{vj} =175 deg.C	ターンオフ 損失 <i>E</i> off	ターンオン 損失 <i>E</i> _{on}	逆回復 リカバリ損失 <i>E</i> rr	合計
Si-IGBT	96.0 mJ	109.1 mJ	98.4 mJ	303.5 mJ
All-SiC	61.1 mJ	24.6 mJ	0.98 mJ	86.7 mJ
低減率	36%低減	77%低減	99%低減	71%低減

リ損失 E_{rr} の比較である。All-SiC モジュールの E_{off} 、 E_{on} 、 E_{rr} は、Si-IGBT モジュールと比較して、36%、77%、 99% それぞれ低減している。その結果、同じスイッチン グ速度条件下で、All-SiC モジュールの総スイッチング損

```
富士電機技報 2022 vol.95 no.4
```



図5 ソース電流の出力特性

失は、Si-IGBT モジュールよりも 71% 減少している。

2.5 逆方向出力特性

誘導性負荷をスイッチングする場合に、SiC-MOSFET にドレイン電流とは逆方向に電流(ソース電流 I_s)が流 れる。この時の出力特性を図5に示す。開発したAll-SiC モジュールは、SiC-MOSFET にSiC-SBD が逆並列に接 続されているため、SiC-MOSEFTのボディダイオード (BD)とSiC-SBDの出力特性の合成である変曲点を持っ た曲線となる。すなわち、ゲート・ソース間電E V_{GS} = -3Vの場合、 I_s が変曲点の電流値 270 A 以下では SiC-SBD にのみ電流が流れ、270 A を超えると MOSFET の BDと SBD に電流が分流する。また、 V_{GS} =15 V の場合、 I_s が変曲点の電流値 110 A 以下では MOSFET のチャネ ル部にのみ電流が流れ、110 A を超えると MOSFET と SBD に電流が分流する。

③ パワエレ機器での発生損失シミュレーション

太陽光発電や風力発電などのDCバス電圧が1,500V、 出力電流実効値が150Aの電力変換器において、図6(a) に示す中性点クランプ方式であるNPC(Neutral Point Clamped)回路に、All-SiCモジュールを適用した場合 の発生損失のシミュレーションを行った。1,700V/300A のSi-IGBTモジュールの損失を比較した結果を図7に示 す。All-SiCモジュールでは、T1やD5でのスイッチン グ損失が大幅に低減したことにより、インバータ全体での 発生損失は68%低減していることが分かる。このことか



図6 3 レベルおよび 2 レベルインバータ回路



図7 DC1,500 V 3 レベルインバータ回路での損失比較

ら、冷却に必要なヒートシンクサイズを約1/3にできる ため、高効率化と同時にインバータ装置の大幅な小型化が 期待できる。

図8にDCバス電圧1,100Vを想定したパワエレ機器 での3レベル回路と2レベル回路の発生損失の比較を示 す。Si-IGBT モジュールは、図6(a)に示した3レベル NPC 回路を定格電圧 1,200 V モジュールで構成した場合 と、図6(b)に示した2レベル回路に定格電圧1,700Vの Si-IGBT モジュールと All-SiC モジュールで構成した 場合を比較した。1,200 V Si-IGBT による 3 レベル回路 から 1,700 V Si-IGBT の 2 レベル回路に構成を変えた場 合、パワー半導体の素子数は減るが、スイッチング損失が 大幅に増加するため、全体での損失も増加してしまう。一 方、1,700 V All-SiC モジュールの2 レベル回路では、ス イッチング損失が大幅に低減するため、全体での損失も3 レベル回路に比べ 69%の低減となる。この結果、1,700 V All-SiC モジュールを DC バス 1,100 V のパワエレ機器 に適用することで、高効率化が見込めるだけでなく、パ ワー半導体デバイス数が10個から4個に減り、また、駆 動回路も4個から2個に削減できるため、パワエレ機器 の簡素化も実現できる。



図8 3 レベル回路と2 レベル回路での損失比較

表 3 「M295」パッケージ All-SiC モジュール製品系列

MOSFET世代	パッケージ	回路構成	定格電圧	定格電流	
	M295 第2世代		1,200 V	300 A	
				450 A	
第2世代 トレンチゲート		2 in 1		650 A	
	A let		200 A		
			1,	1,700 V	300 A
				400 A	

4 All-SiC モジュールの製品系列

表3に、M295 パッケージ All-SiC モジュール製品系 列を示す。既にラインアップされている定格電圧 1,200 V の製品と同じ M295 パッケージを適用して、今回新たに 定格電圧 1,700 V についても定格電流 200 ~ 400 A まで を製品化した。これら All-SiC モジュールは、第7世代 X シリーズ IGBT モジュールと互換パッケージであるため、 多くのパワエレ機器への All-SiC モジュールの適用が可 能である。

5 あとがき

今回新たに系列化した1,700V定格のAll-SiCモジュー ルについて述べた。近年、市場が大きく伸長している電鉄 や再生可能エネルギー向けのパワエレ機器に適用すること で、システムのさらなる高効率化、高電力密度化、小型化 が期待できる。

今後は、さまざまな市場要求に応えるべく、異なるパッ ケージや定格容量での All-SiC モジュールを開発し、持 続可能社会の実現に貢献する所存である。 特集

参考文献

- (1) 吉田敏弘ほか. 過酷な環境下に設置可能な耐環境インバー
 タ「FRENIC-eFIT」. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.1, p.17-21.
- (2) Stevanovic, B. et al. "Highly Efficient, Full ZVS, Hybrid, Multilevel DC/DC Topology for Two-StageGrid-Connected 1500 V PV System with Employed 900 V SiC Devices". 2019, IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electronics, vol.7, no.2, p.811–832.
- (3) 岩崎吉記ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭 載 All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.229-233.
- (4) 高崎愛子ほか. 第2世代1,200 V All-SiCモジュールの系列 拡大. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.229-233.
- (5) 内田貴史ほか. 第2世代1,700 V SiCトレンチゲート
 MOSFET. 富士電機技報. 2021, vol. 94, no.4, p.272-276.



高久 拓

IGBT モジュールおよび All-SiC モジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体 事業本部産業事業部産業設計第一部主査。博士(工 学)。電気学会会員。



高崎 愛子

SiC パワー半導体モジュールの設計・開発に従事。 現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業 部産業設計第一部。

奥村 啓樹

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電 機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開 発部。

RC-IGBT を搭載した第7世代 IGBT-IPM の小型製品の 系列化

Line-Up of Compact 7th-Generation IGBT-IPMs that Use RC-IGBTs

黒澤	英二 KUROSAWA, Eiji	城塚 直彦 JOZUKA, Naohiko	唐本 祐樹 KARAMOTO, Yuki
----	-------------------	-----------------------	----------------------

富士電機は、電力変換装置のさらなる小型化、高信頼性化の要求に応えるため、RC-IGBT チップを搭載した新小型パッケージ「P639」を適用した第7世代 IGBT-IPM の系列化を行った。この製品は、第6世代 IGBT-IPM の「P629」に比べ、設置面積を27%縮小した。また、第7世代チップ技術とIGBT のゲートを駆動する新たな制御技術を採用することにより、連続動作時の発生損失を約7%低減した。さらに、第7世代のパッケージ技術を適用し、150℃での高温動作化を実現した。

In order to meet the demand for further miniaturization and higher reliability in power conversion systems, Fuji Electric has developed a line-up of 7th-generation IGBT-IPMs that is equipped with RC-IGBT chips and utilize the new compact "P639" package, the footprint of which is 27% smaller than the "P629" package used for 6th-generation IGBT-IPMs. In addition, using the 7th-generation chip technology and new control technology for driving the gates of the IGBTs has reduced generated losses during continuous operation by 7%. Moreover, it utilizes the 7th-generation packaging technology to achieve high-temperature operation at 150°C.

1 まえがき

近年、ファクトリーオートメーション化や携帯電話など の通信機器の普及により、産業用ロボットや工作機械など に使用されるサーボシステムの需要が拡大している。こう した装置に強く求められるのが省スペース化であり、これ を実現するためには、そこに使われるパワー半導体も小型 化することが必要であり、高温動作化と低損失化が鍵とな る。また、突然の故障を防止するため高信頼性であること も求められている。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT のゲートを駆 動する制御 IC を内蔵し、さらに保護機能も備えた IGBT モジュールであり、高信頼性が要求される Numerical Control (NC) 工作機、ロボット、エレベータなど、用 途は多岐にわたっている。

最新世代である第7世代IGBT-IPMは、低損失化を実 現するために、IGBTのトレンチゲート構造の微細化と薄 ウェーハ加工技術によりドリフト層を薄化した第7世代 チップ技術に加え、IGBTのゲートを駆動する新たな制御 技術を採用した。さらに第7世代パッケージ技術である 高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの適用により、高温動作 化を実現した。今回、さらなる小型化、高信頼性の要求に 応えるため、第7世代IGBT-IPMの既存系列に、RC-IGBT(逆導通IGBT: Reverse Conducting IGBT)チッ プを搭載した新小型パッケージ「P639」を適用した製品 を加えた。本製品は、高放熱性とIGBT チップの特性を直 接検出する高精度な保護機能を兼ね備えており、IGBT-IPMとしては、業界トップクラスの小型化を実現した製 品であり、適用機器の小型化に貢献する。

2 特徴

2.1 製品の概要

図1に新小型パッケージP639の外観を示す。P639 パッケージの外形寸法はD36.0×W70.0×H12.0 (mm) であり、回路構成は三相インバータ回路を一つのモジュー ルに集積した6in1となっている。P639はRC-IGBT チップを搭載することにより小型化を実現した。

表1に 650 V/50 A、1,200 V/25 A 以下の定格における、 第7世代 IGBT-IPM と従来の第6世代 IGBT-IPM の製 品ラインアップを示す。第6世代 IGBT-IPM では、一世 代前の IGBT チップを採用した「P629」パッケージのみ のラインアップであったが、第7世代 IGBT-IPM では、 より小型の P639 パッケージをラインアップし、適用機器 の小型化に貢献する。

図2に P629 と P639 の外形の比較を示す。P639 の設 置面積は、P629 に対して 27% 縮小した。さらに、主端



図1 新小型パッケージ「P639」

表1 製品ラインアップ

定	格	第6世代	第7世代
650 V	1,200 V	IGB1-IP/M	IGB1-IP/M
20 A	10 A		P630
30 A	—	P629	F039
50 A	25 A		P629



図2 「P629」と「P639」の外形の比較

子、制御端子の配列は P629 と同一となっており、置換え が容易である。

P639 を用いた第7世代 IGBT-IPM は、第7世代チッ プ技術とそれを駆動する新たな制御技術によって、第6 世代 IGBT-IPM に対して、発生損失を約7% 低減した。 さらに、第7世代パッケージ技術によって高温動作化を 実現した。また、RC-IGBT チップを適用することにより、 低周波動作時のチップ温度変化量を低減することができ、 第6世代 IGBT チップと FWD (Free Wheeling Diode) チップを搭載した製品に対し ΔT_{vj} パワーサイクル寿命が 向上した。

2.2 製品の特徴

(1) パッケージの小型化

従来の P629 は、チップ搭載面積が約 30% を占めてお り、パッケージの小型化を実現するためにはチップ面積を 縮小することが重要となる。ただし、チップ面積を縮小す るとチップ特性の悪化や熱抵抗の上昇に加えて、信頼性を 確保する上で必要なアルミニウムワイヤ本数の確保が課題 となる。そこで、RC-IGBT チップを採用することにより、 この問題を解決した。

図3にRC-IGBT チップの概略図と等価回路図を示す。 前述のとおり、RC-IGBT チップはIGBT と FWD を同一 チップ上に形成したチップであり、第6世代 IGBT チッ プと第6世代 FWD チップを合わせた面積(総面積)に対 し、第7世代 RC-IGBT チップの方が小さくなる。

表 2に 650 V/20 A の第 6 世代チップと第 7 世代チッ プの比較を示す。第 6 世代 IGBT-IPM のチップ総面積に 対し、第 7 世代 IGBT-IPM のチップ総面積は 33% 低減 する。第 7 世代 RC-IGBT チップは第 6 世代 IGBT チッ プ、FWD チップ単体の面積より大きいため、アルミニウ



図3 RC-IGBT チップの概略図と等価回路図

表 2 650 V/20 A の第 6 世代チップと第 7 世代チップの比較

項目	第6世代 IGBT+FWD	第7世代 RC-IGBT
チップ総面積比	IGBT+FWD 0.9+0.6=1.5	1.0 (–33%) *
アルミニウム ワイヤ本数	4本	4本
FWD熱抵抗値 (℃/W)	1.96	1.21 (–38%) *

*第6世代からの低減率

ムワイヤは従来と同じ本数をボンディングすることがで きる。さらに、熱抵抗値は、チップサイズが大きくなるた め38%低減し、放熱性の向上が期待できる。これにより、 製品特性や信頼性の悪化を伴わずにパッケージの小型化を 実現した。

(2) *ΔT*_{vi}パワーサイクル寿命の向上

本稿で述べているパワーモジュールの代表的な寿命特 性として ΔT_{vj} パワーサイクル寿命がある。これは、チッ プの温度変化 ΔT_{vj} の繰り返しを許容できる回数で定義さ れる。許容回数を越えて ΔT_{vj} が繰り返し起こると製品が 故障する。これは、 ΔT_{vj} により熱応力が発生し、チップ - アルミニウムワイヤ接合部、チップ-はんだ接合部の摩 耗劣化が生じるためである。また、 ΔT_{vj} パワーサイクル 寿命は ΔT_{vj} に依存し、 ΔT_{vj} が大きくなるほど短くなる。

NC工作機などには低速動作や高トルク動作を行うため に、低周波で動作させるモードがある。低周波動作におい ては同じ相の IGBT チップや FWD チップに電流が流れて いる時間が長いので、チップ温度が上昇しやすい。また、 電流が流れない時間も長く、その間にチップ温度が低下 する。そのため、低周波動作ではチップの ΔT_{vj} が大きく、 発生する熱応力も大きくなり、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命 が短くなる。

図4に低周波動作時のチップ温度推移の試算結果を示 す。従来のIGBT チップとFWD チップを搭載した第6世 代IGBT-IPMでは、インバータ動作時は、IGBT チップ

```
富士電機技報 2022 vol.95 no.4
```



図4 低周波動作時のチップ温度推移の試算結果

と FWD チップが交互に発熱するため、発熱期間の有無 で ΔT_{vj} は大きくなる。その結果、 ΔT_{vj} は IGBT で 24 °C、 FWD で 28 °Cとなる。一方、RC-IGBT チップを搭載 した第7世代 IGBT-IPM は、RC-IGBT は IGBT 領域 と FWD 領域が1 チップ内で交互に発熱するため、チッ プ温度変化量が低減する。さらに、熱抵抗値の改善によ り、チップ温度の上昇が抑えられる。これにより、第7 世代 IGBT-IPM の RC-IGBT チップの ΔT_{vj} は、第6世 代 IGBT-IPM の IGBT チップと FWD チップの組合せに おいて、温度変化量が大きい FWD チップに対して7°C低 くなる。図5 に ΔT_{vj} パワーサイクル寿命曲線を示す。本 事例では、 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命が約10 倍になると 推定される。

(3) 損失の低減

(a) IGBT の飽和電圧とターンオフ損失

第7世代 IGBT チップは、表面のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によるドリフト層の薄化によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフを改善した。P639に搭載する RC-IGBT チップにおいても第7世代チッ



図 5 ΔT_{vj} パワーサイクル寿命曲線



図 6 コレクタ・エミッタ間飽和電圧とターンオフ損失のトレー ドオフ

プ技術を採用し、図**6**に示すように、従来製品の第6世 代 IGBT チップと比べ、 $V_{CE(sat)}$ を 0.05 V 低減し、かつ E_{off} を 0.14 mJ 低減した。

(b) ターンオン損失

図7に第7世代 IGBT-IPM 650 V/20Aのターン オン損失 Eon の電流と温度の依存特性を示す。Eon は、 IGBT を駆動する制御 IC に新たな制御技術を採用する ことで低減を図った。一般的に IGBT チップの特性には 温度依存性があり、チップの温度が高いほど電圧変化率 dv/dt が小さくなり、Eon が増加する傾向がある。この 影響により、従来の制御技術を適用した 650 V/20 A の 場合、定格電流時の E_{on} が常温時(25 ℃) に対し、高 温時(125℃)は12.4%増加する。一方、第7世代 IGBT-IPM では、新たな制御技術により、IGBT チッ プの温度が高くなるとターンオン時のゲート駆動電流を 調整し、dv/dtを最適に制御する。これは IGBT チップ 上に形成されている温度センサを活用し、リアルタイム に IGBT チップの温度をゲート駆動回路にフィードバッ クすることで高温時の dv/dt が小さくなることを抑制 している。本機能により、T_{vi}=25℃に対し、T_{vi}=125℃ における Eon の増加を 6.8% に抑えることが可能である。



図7 ターンオン損失の電流と温度依存特性

富士電機技報 2022 vol.95 no.4





(c) インバータ動作時の損失

図8に650V/20Aの第6世代IGBT-IPMと第7 世代IGBT-IPMにおける三相PWM(Pulse Width Modulation)インバータ動作時のアーム当たりの発 生損失をシミュレーションした結果を示す。第7世代 IGBT-IPMは、 $V_{CE(sat)} \ge E_{off}$ のトレードオフ改善と E_{on} の低減により、発生損失を第6世代IGBT-IPMに 対し、約7%低減している。

(d) 放熱性能

図9に示すように、P639はP629に対し、パッケー ジを小型化するため、チップにて発生した熱を放熱する 役割を持つ銅ベースの面積を32%縮小しており、放熱 性が悪化する。図10にヒートシンクの放熱性能と発生 損失を同一の条件として、FEM(有限要素法:Finite Element Method)により銅ベースの温度分布の解析 をした結果を示す。P629に比べ、P639は銅ベースの 面積を縮小したことにより、ケースの温度変化量ΔT_c が約6%増加してしまう。

しかし、前述のとおり、第7世代 IGBT-IPM は第6 世代 IGBT-IPM に対して、発生損失を約7% 低減して いるため、銅ベースサイズの縮小により*ΔT*_cが増加し ても、発生損失を低減したことにより、同等のチップ温



図9 銅ベースサイズの比較

〈注〉アーム:219ページ「解説1」を参照のこと

富士電機技報 2022 vol.95 no.4



図 10 FEM による銅ベースの温度分布の解析結果

表3 許容動作温度の比較

項目	第6世代IGBT-IPM	第7世代IGBT-IPM
最高ケース温度 T _{cmax}	110℃	125℃
連続動作時最高接合温度 T _{vjop}	125℃	150℃
最高接合温度 T _{vjmax}	150℃	175℃

度に抑制することが可能である。このことから、容易に 置換えが可能となる。

(4) 高温動作化

表3に第7世代 IGBT-IPM と第6世代 IGBT-IPM の 許容動作温度の比較を示す。第7世代 IGBT-IPM は、第 7世代のパッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はん だなどの高温動作を可能にする技術を採用し、連続動作 時の最高接合温度 T_{vjop} を第6世代 IGBT-IPM の 125 ℃ から 150 ℃に拡大した。また、最高接合温度 T_{vjmax} は 150 ℃から 175 ℃に拡大した。これにより、装置冷却部 品の小型化が可能となった。

3 適用機器の小型化への貢献

例として、第6世代IGBT-IPMのP629を使った60mm幅のサーボアンプを本稿で述べた第7世代 IGBT-IPMのP639を用いて小型化した場合について述 べる。図11に示すように、サーボアンプには、冷却部品 が筐体の後方についたバックフィンタイプのものがある。 このタイプのサーボアンプではIGBT-IPMの短手の幅が 低減した分、サーボアンプ筐体(きょうたい)幅の低減が 可能である。すなわち、P629からP639に置き換えるこ とで、アンプ幅としては13.5mm(約20%)縮小するこ



図 11 バックフィンタイプのサーボアンプ模式図

とができる。これにより、サーボアンプを収納する制御盤 の小型化が図られ、サーボシステム全体を省スペース化す ることが期待できる。

4 あとがき

本稿では、RC-IGBT チップを搭載した第7世代 IGBT-IPMの新小型系列であるP639 について述べた。

小型系列製品のラインアップを拡充したことにより、今 後の電力変換装置のさらなる小型化に貢献できると考えて いる。

今後も継続的な技術革新を推進し、市場要求に応える製品の開発を行っていく。さらには、IGBT モジュールの製品開発をとおして地球温暖化対策や、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) 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) 寺島健史ほか.小型パッケージ「P644」を採用した第7世 代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.234-238.
- (3) 皆川啓ほか.第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM 「P631」.富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.251-255.
- (4) Satou, K. et al. "The 7th Generation Intelligent Power Module for Industrial Applications". Proceeding of PCIM Asia 2021.
- (5) 江袋佑太ほか.第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.4, p.246-250.
- (6) Kawabata, J. et al. " The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". Proceeding of PCIM Europe 2015.



黒澤英二

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。 現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業 部産業設計第一部。



城塚 直彦

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、 富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業 設計第一部。



唐本 祐樹

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機 株式会社半導体事業本部産業事業部産業設計第一 部。

3.3 kV 第 7 世代「X シリーズ」IGBT チップ技術

3.3-kV 7th-Generation "X Series" IGBT Chip Technology

伊倉	巧裕 IKURA, Yoshihiro	原田 祐一 HARADA, Yuichi	関野 裕介 SEKINO, Yusuke
----	---------------------	----------------------	-----------------------------

鉄道分野において、モータを駆動するために使用される IGBT モジュールは、CO₂ 削減に直結するため、さらなる低損 失化が求められている。富士電機は、この要求に応えるため、最新世代の「X シリーズ」の IGBT と SiC-SBD を組み合わ せた、3.3 kV 定格の SiC ハイブリッドモジュールを開発した。X シリーズ IGBT チップは、表面構造の微細化とドリフト 層の厚さを薄くすることで、コレクタ・エミッタ間飽和電圧を従来よりも 1.0 V 低減した。また、SiC-SBD を組み合わせ ることでターンオン損失を 51%、逆回復損失を 98% 低減した。

The railways, including high-speed rails, use IGBT modules for drive motors. It is essential for IGBT modules to reduce power loss, as they directly contribute to CO_2 reduction. To meet this demand, Fuji Electric has developed a 3.3-kV SiC hybrid module that combines the latest generation "X Series" IGBTs and SiC-SBDs. Using a finer surface structure and a thinner drift layer, the X Series IGBT chip has reduced the collector-emitter saturation voltage by 1.0 V, compared with a previous generation. In addition, by combining it with a SiC-SBD, the hybrid module has achieved significant performance improvements with a turn-on loss reduction of 51% and reverse recovery loss reduction of 98%.

1 まえがき

地球温暖化を背景に、CO₂の排出量を削減するさまざ まな取組みが進んでいる。日本における CO₂の総排出量 のうち、およそ 20% が運輸に関わる活動から生じており 移動手段の電動化が進められている。中でも高速鉄道は飛 行機よりも格段に CO₂の排出量が少ないため、国内はも とより国外での導入が近年増加している。

鉄道分野において、モータを駆動するために IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールが使 われている。消費電力を低減し、CO₂を削減するために、 IGBT モジュールのさらなる低損失化が求められている。 また、高速鉄道自体の消費電力低減のためには、車両や搭 載機器の軽量化が重要であり、システムの小型・軽量化に 貢献できる IGBT モジュールが求められている。

従来の IGBT モジュールは、Si (シリコン)を原料とす る Si-IGBT と Si-PiN ダイオードで構成されている。次 世代のパワー半導体材料である SiC (炭化けい素)の実 用化が始まっており、SiC を用いることで、Si よりも格 段に損失を低減できる。SiC を用いた素子として、デバ イス構造および製造プロセスがよりシンプルである SBD (Schottky Barrier Diode)の導入が MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)や IGBT に先行して進んでいる。

富士電機は、大幅な損失低減を実現するため、最新世 代の「X シリーズ」の IGBT と SiC-SBD を組み合わせ た 3.3 kV 定格の SiC ハイブリッドハイパワーモジュール (HPM: High Power Module)を開発した。本稿では、 3.3 kV X シリーズ IGBT チップ (X-IGBT) 技術につい て述べる。

3.3 kV「X シリーズ」IGBT チップの特徴

2.1 低損失化技術

(1) 導通損失の低減

図1にIGBTの断面構造を示す。IGBTは表面のMOS チャネルから電子が注入され、それに応じて裏面のp⁺ コ レクタ層からホールが注入されることで、低不純物濃度の n⁻ドリフト層に電流を担う粒子であるキャリア(電子と ホール)がたまることにより、低抵抗となる伝導度変調に より低導通損失を実現している。今回開発したX-IGBT は、従来の「Uシリーズ」IGBTチップ(U-IGBT)と比 べて表面構造を微細化することでキャリア蓄積効果を増強 し、n-ドリフト層中のキャリア密度を高めることで n-ド リフト層を低抵抗化した。

また、高度な薄ウェーハ化技術を用いて、n-ドリフト 層の厚さを従来よりも薄くすることにより、コレクタ電極 とエミッタ電極の間を流れる電流の導通経路を物理的に短



図 1 IGBT の断面構造

くすることで、n-ドリフト層を低抵抗化した。

図2にコレクタ電流 I_{c} - コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} の波形を示す。X-IGBT は、前述したように n- ドリフト 層を低抵抗化することにより、定格電流での V_{CE} を従来の U-IGBT に対して 1.0 V 低減した。

図3にターンオフ損失 E_{off} とコレクタ・エミッタ間飽和 電圧 $V_{CE(sat)}$ の関係を示す。一般に、 E_{off} と $V_{CE(sat)}$ の間に は二律背反の関係があり、 p^+ コレクタ層の濃度を高くして $V_{CE(sat)}$ を下げると、 E_{off} は増加する関係にある。X-IGBT は従来に対して、同じ E_{off} で比べた時の $V_{CE(sat)}$ を 1.0 V 低減した。

(2) ターンオン時の di/dt および dv/dt の制御性の改善

図1に示すように、キャリアの排出を抑制しキャリア蓄 積効果を高めてオン電圧を下げるために、従来は表面にフ ローティングp層を備えた構造を採用していた。しかし、 フローティングp層があると、ターンオン時の di/dt およ び dv/dt が大きくなり、それを抑制するためにゲート抵 抗を高める必要があり、ターンオン損失 Eon の増加を招い ていた。フローティングp層があると di/dt および dv/dt の制御性が悪化する。この原因を解析した結果、図4 に模 式的に示すように、フローティングp層にホールがたまり、 フローティングp層の電位が急激に増加し、その電位の 増加速度(dv/dt)によりゲート電極に変位電流が流れる



図2 コレクタ電流-コレクタ・エミッタ間電圧の波形



図3 ターンオフ損失とコレクタ・エミッタ間飽和電圧の関係



3.3 kV 第7世代「X シリーズ」IGBT チップ技術



ため、ゲート抵抗 R_Gの抵抗値とは関係なく、ゲート電極の充電が速くなることを明らかにした。

X-IGBT は、表面構造の微細化によりフローティン グp層を用いずに低いオン電圧を実現し、フローティン グp層をなくしてターンオン時のdi/dt、dv/dt の $R_{\rm G}$ に よる制御性を改善した。図5にターンオン時のdi/dtの $R_{\rm G}$ 依存性を示す。従来は $R_{\rm G}$ を大きくしてもdi/dtの減 少は少ないが、X-IGBT では大きく減少していること が分かる。例えばdi/dtを 0.15 kA/µs にするときの $R_{\rm G}$ は、U-IGBT では 60 Ω以上にする必要があるのに対し、 X-IGBT ではおよそ 40 Ωで済むため、 $R_{\rm G}$ が小さい分だ け $E_{\rm on}$ を低減できる。

2.2 破壊耐量向上技術

IGBT には短絡状態でもある程度の時間は壊れずにいる 短絡耐量が求められる。しかし、高耐圧の IGBT ほど n-ドリフト層の正の固定電荷が少ないため、短絡時に注入さ れる大量の電子により正の固定電荷が打ち消されやすくな る。結果として、電界のピークが裏面側に移動し、アバラ ンシェ降伏を生じさせ、IGBT は破壊(裏面アバランシェ 破壊)に至る。

この裏面アバランシェ破壊を避けるためには、裏面から のホールの注入を最適化することが有効である。裏面から



図 5 ターンオン時の di/dt の R_G 依存性



図 6 IGBT 中の寄生 PNP バイポーラトランジスタ

のホールの注入を最適化することは、図6に示す IGBT 中の寄生 PNP バイポーラトランジスタの利得を制御することで可能となる。

ここで α_{PNP} はベース接地電流利得、 α はコレクタ効率、 β はベース伝達効率、 γ はエミッタ注入効率を表す。

式(1)によれば、 α_{PNP} はnフィールドストップ層の中性 領域により決まる β と、 p^+ コレクタ層により決まる γ に よって調整できる。nフィールドストップ層またはコレク 夕層などを最適化することによって、裏面からのホールの 注入を制御し、 α_{PNP} を適切な値にすることができる。そ の結果、短絡期間中の裏面アバランシェ破壊を回避できる。

図7に3.3kVのIGBTの短絡期間中の電界分布を示す。 α_{PNP}を適切な値に調整することによって裏面側の電界が 高くなることを抑制できることが分かる。

しかし、従来のものから α_{PNP} だけが適切な値になる ように調整した n フィールドストップ層またはコレクタ 層は高温下でのリーク電流を増大させるので、高温動作 時に破壊のリスクが高まる。この問題を乗り越えるため



図7 3.3 kVの IGBT の短絡期間中の電界分布

富士電機技報 2022 vol.95 no.4



図8 短絡動作時の波形

に、X-IGBT では新たに開発した n フィールドストップ 層とコレクタ層を適用した。濃度分布を最適化すること で、リーク電流を抑制しつつ、適切な値のα_{PNP}を実現し た。これにより、短絡期間中のホールの注入を最適化し裏 面アバランシェ破壊を抑制しつつ、高温動作でのリーク電 流を抑制した。図8に短絡動作時の波形を示す。定格電流 の16倍もの電流を流しても破壊せずに電流を遮断できる ことを確認した。

適用例(SiC-SBD との組み合わせによる損失 の低減)

今回開発した 3.3 kV 定格の SiC ハイブリッド HPM で は、IGBT と 組 み 合 わ せ る FWD (Free Wheeling Diode)を従来の Si-PiN ダイオードから新たに開発した SiC-SBD に置き換えることで、ダイオードの逆回復損失 E_{rr} を低減するだけでなく、IGBT の E_{on} も低減している。

Si-PiN ダイオードは導通時に少数キャリアをデバイス 内部に蓄積しており、オフするタイミングで掃き出す必 要がある。これは FWD の逆回復波形の逆回復ピーク電流 $I_{\rm p}$ として現れ、IGBT のターンオン波形のコレクタピーク 電流 $I_{\rm cp}$ にも重畳され、その分の損失が生じる。SiC-SBD はデバイス内部にキャリアをためないため、 $I_{\rm cp}$ や $I_{\rm p}$ は原 理的に発生せず、その分の損失が生じない。図9にSi-PiN ダイオード、SiC-SBD を組み合わせたときの IGBT のターンオン波形を示す。Si-PiN ダイオードを組み合わ せた場合には大きな $I_{\rm cp}$ が生じているが、SiC-SBD を組 み合わせた場合には $I_{\rm cp}$ は生じていない。

表1に新製品と従来品のスイッチング損失の比較を示す。 SiC-SBDを使用することで*E*_{on}を51%、*E*_{rr}を98%低減し、大幅な特性改善を実現した。



図9 ターンオン波形

表1 スイッチング損失比較

項目	従来品 HPM Si-PiN/ Si-IGBT	新製品 HPM SiC-SBD/ Si-IGBT	改善率	
ターンオン損失(mJ)	2,933	1,425	51%	
ターンオフ損失(mJ)	1,957	1,900	3%	
逆回復損失 (mJ)	1,548	30	98%	

4 あとがき

3.3 kV の最新世代である「X シリーズ」の IGBT チッ プ技術について述べた。表面構造と裏面構造の最適化によ り損失の改善を実現した。本稿で述べた 3.3 kV X シリー ズ IGBT を搭載した 3.3 kV SiC ハイブリッドハイパワー モジュールは高速鉄道に採用され商用運転しており、高速 鉄道の消費電力の低減と共に、機器の小型・軽量化に寄与 している。今後も IGBT の特性改善を進め、CO₂ 削減に より持続可能な社会の実現に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 国土交通省."運輸部門における二酸化炭素排出量". https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/ sosei_environment_tk_000007.html,(参照2022-11-24).
- (2) 国土交通省."主な鉄道プロジェクトと海外展開に向けた取組".https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001485720.pdf,(参照 2022-11-24).
- (3) Takasaki, A. et al. "All SiC module with 1700 V

rated 2nd generation trench gate SiC-MOSFETs". International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe), 2021.

- (4) Sekino, Y. et al. "High Power next Core (HPnC) package with 3.3 kV SiC Hybrid chip combination". International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia), 2018.
- (5) 関野裕介,森谷友博. 電鉄向け 3.3 kV SiCハイブリッドハイ パワーモジュール. 富士電機技報. 2021, vol.94, no.1, p.63-65.
- (6) Onozawa, Y. et al. "Development of the next generation 1200 V trench-gate FSIGBT featuring lower EMI noise and lower switching loss". International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2007.
- (7) Onozawa, Y. et al. "Development of the next generation 1700 V trench-gate FS-IGBT". International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2011.
- (8) 藤田憲司,小林宣之.世界の安全・安心・快適な公共交通に 貢献する鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器.富士電機 技報.2021,vol.94, no.1, p.19-23.



伊倉 巧裕

IGBT チップの研究・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デバイス開 発部。IEEE(米国電気電子学会)会員。



原田祐一

IGBT チップの研究・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デバイス開 発部。



関野 裕介

IGBT モジュール、All-SiC モジュールの開発・ 設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業 本部産業事業部産業設計第一部主査。

第7世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00シリーズ」

"FA8C00 Series" 7th-Generation PWM Power Supply Control ICs

松本	晋治 MATSUMOTO, Shinji	山根 博樹 YAMAN	IE, Hiroki 宮城	輝大 MIYAGI, Kodai
----	----------------------	-------------	----------------------	------------------

近年、電子機器の省エネルギー化が進む中で、電子機器に用いられるスイッチング電源には、軽負荷時の電力変換効率 向上、高AC入力電圧対応、小型化が求められている。富士電機は、これらの要求に応えた第7世代 PWM 電源制御 IC 「FA8C00 シリーズ」を開発した。MOSFET のゲート駆動に最適な最小出力パルス幅を選択でき、軽負荷時の電力変換効 率が向上した。また、高AC入力電圧端子の最大印加電圧を650Vから710Vに向上した。さらに、IC出力電圧をクラン プすることで、外部レギュレータ回路が不要となり、部品点数の削減を可能にした。

As energy saving performance has been increasingly enhanced in recent electronic equipment, demand is increasing for switching power supplies for electronic equipment with high efficiency in power conversion at light loads, high voltage AC input, and compactness. Fuji Electric has thus developed the "FA8C00 Series" 7th-generation PWM power supply control ICs. Minimum output pulse width is selectable for optimal MOSFET gate drive, improving power conversion efficiency at light loads. The maximum applied voltage at the high voltage AC input terminals has increased from 650 V to 710 V. Furthermore, clamping the IC output voltage eliminates the need for an external regulator circuit, reducing the number of components.

1 まえがき

深刻な問題となっている地球温暖化対策として、温室効 果ガス排出量削減への取組みは非常に重要になっている。 電子機器に用いられるスイッチング電源においても、環境 問題への関心の高まりにより、省エネルギー化に関する要 求が厳しくなっている。特に近年、ネットワークの利用が 拡大して常時稼働のシステムが増えることにより、軽負荷 時の電力変換効率の向上が強く求められている。

また新興国では、経済の発展に伴い電子機器の普及が進 んでいる一方で、インフラ整備の遅れにより、商用電源 (AC電源)の電圧変動が頻発している。それにより、AC 電源に高電圧が発生し、電源装置の入力電圧範囲を超える ことによる電源装置の破壊が問題となっている。さらに、 電子機器の継続的な低価格化ニーズにより、電源に対して もさらなる小型化と部品削減の要求が強まっている。

今回、従来製品と比べて電源システムの軽負荷時の電力変換効率のさらなる向上と、高AC入力電圧対応、電源部品の削減を可能とする第7世代PWM電源制御IC 「FA8C00シリーズ」を開発した。

本稿では、FA8C00 シリーズの概要と特徴およびそれ らの適用効果について述べる。

2 製品概要

図1にFA8C00シリーズの外観を示す。FA8C00シリー ズは、従来製品と同様に8ピンの小型パッケージである SOP-8を採用している。このICは、軽負荷時の電力変 換効率の向上を実現するため MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)のゲート駆動 に最適な最小出力パルス幅を外部部品で選択できる機能を

```
富士電機技報 2022 vol.95 no.4
```



図 1 「FA8C00 シリーズ」の外観

新たに導入している。

また、AC電源からの高電圧印加による破壊を抑制する ため、AC電源に接続される入力端子の最大印加電圧を 650 Vから710 Vに向上させた。さらに、電源部品の削 減を行うために、MOSFETのゲート過電圧破壊を防止す るIC出力電圧のクランプ機能を導入することで、従来の 外部レギュレータ回路を不要とした。

表1に FA8C00 シリーズの機能概要を示す。また図2

表1 「FA8C00 シリーズ」の機能概要

項目	従来製品	FA8C00シリーズ				
最小出力パルス幅の 選択機能	なし	内蔵				
高AC入力電圧端子 最大印可電圧	650 V	710V				
IC出力電圧の クランプ機能	なし	内蔵 (16V)				
外部レギュレータ	必要	不要 (8点の部品削減可能)				



図 2 「FA8C00 シリーズ」のブロック図

に FA8C00 シリーズのブロック図を示す。FA8C00 シ リーズでは最小出力パルス幅の選択機能を"FB ゲイン回 路"、710 V 起動素子搭載による高 AC 入力電圧対応を"起 動電流制御回路"、IC 出力電圧のクランプ機能を"ドライ バ回路"で実現した。

3 特徴

3.1 軽負荷時の効率向上

図3に示すように、従来はスイッチング動作の開始と停 止を連続して繰り返すバースト動作を行い、スイッチン グ損失を低減することで軽負荷時の電力変換効率を向上 させていた。図4 に OUT 端子の出力パルス幅と CS、FB 端子電圧との関係を示す。連続スイッチング動作時の MOSFET 駆動用 OUT 端子の出力パルス幅は、電流セン ス入力(CS)端子電圧 Vcs とフィードバック制御信号入 力(FB)端子電圧を IC 内部で分圧した電圧値 V_{fbd}の比 較結果で決定されるが、スイッチング動作の開始時と停止 時の FB 端子電圧は低いため、幅の狭い出力パルスが発生 していた。これにより1回のスイッチング動作で電源の 出力側に送る電力が少なくなる。その結果、電力不足を補 うためスイッチング回数が増加し、スイッチング損失が増 加するため、軽負荷時の電力変換効率を低下させていた。 また、図5に示すように OUT 端子の出力パルス幅が広く なりすぎると、MOSFET やダイオードの導通損失が増加



図3 バースト動作



図4 OUT 端子の出力パルス幅と CS、FB 端子電圧との関係

富士電機技報 2022 vol.95 no.4



図5 出力パルス幅による電力変換効率の変化

するため、電源によってはスイッチング回数が少なくても 電力変換効率が低下する。

このように、軽負荷時の電力変換効率を向上させるには 出力パルス幅の最適化が効果的である。そこで、FA8C00 シリーズでは電源に合わせて最小の出力パルス幅を外部部 品で設定できる機能を追加した。**図6**に外部部品による最 小パルス幅の選択を示す。具体的な設定方法としては、外 部ラッチ信号入力端子(LAT 端子)にコンデンサを接続し、 コンデンサ C1の容量値により最小出力パルス幅を決める IC 内部の $V_{\rm fbd}$ 電圧を3種類の中から選択する。一例とし て R1=90 kΩ、C1=1,000 pF を接続した場合、High が 選択され、最小出力パルス幅を最も広くすることが可能で ある。この機能により、電源ごとに最適な最小出力パルス 幅を設定することができ軽負荷時の電力変換効率の向上が 可能となる。

3.2 AC入力の許容最大印加電圧の拡大

低消費が求められる商用電源(AC電源)に接続される 高AC入力電圧端子(VH端子)の回路内部には、起動素 子(JFET: Junction Field-Effect Transistor)を搭載し ている。IC 起動時はVH端子からICの電源であるVCC 端子に起動電流(起動時のVCC端子充電用電流)を供給



図6 外部部品による最小パルス幅の選択

富士電機技報 2022 vol.95 no.4

し、VCC 端子電圧が一定電圧以上になると起動電流制御 回路により VH 端子からの起動電流供給を停止させてい る。この起動素子に、定格の 650 V 以上が印加されると 破壊する恐れがある。

FA8C00シリーズでは、起動素子を改良して、VH 端子 への最大印加電圧を710Vに高め、商用電源(AC電源) の電圧変動下での起動素子の破壊を抑制した。

3.3 出力電圧クランプ機能の内蔵

FA8C00シリーズでは、外付け MOSFET のゲート過電 圧破壊を防止するため、IC 出力電圧をクランプする機能 を内蔵している。図7 に OUT 端子の外部回路構成と IC 出力電圧クランプ回路、図8 に IC 出力電圧クランプ動作 を示す。既存の FA8A80 シリーズの IC 出力電圧は、電 源の補助巻線から供給される電圧(VCC 端子電圧)が電 源の構成によっては VCC 端子電圧の 30 V を超える場合 があり、IC から出力する MOSFET ゲート駆動電圧値も 30 V を超えてしまう。通常 MOSFET ゲートの定格電圧 は 20 ~ 30 V であり、MOSFET を破壊させないために従 来は VCC 端子電圧が 20 V 以下になるように外部レギュ レータ回路が必要であった。

新製品の FA8C00 シリーズでは、IC 内部で IC 出力電 圧をクランプする機能を内蔵することで、VCC 端子電圧 が 30 V を超えても IC から出力するゲート電圧は 16 V に



図7 OUT 端子の外部回路構成と IC 出力電圧クランプ回路



図8 IC 出力電圧のクランプ動作

抑えられるため、外部で構成していた外部レギュレータ回 路が不要となり、電源の部品削減を可能とした。

4 電源回路への適用効果

4.1 電力変換効率の向上

表2に従来製品との電力変換効率の比較を、図9に 電力変換効率の測定結果を示す。また、測定に用いた、 FA8C00シリーズ評価用電源ボードの回路図を図10に示 す。

FA8C00 シリーズは、バースト動作する出力電流 0.1A 以下の軽負荷領域の電力変換効率を従来製品より改善可能 であり、例えば入力電圧 AC230 V で出力電流 0.01 A の 条件では +1.5% の効率向上効果を確認している。

表2 従来製品との電力変換効率の比較

製品		従来	製品	FA8C00シリーズ			
入力電圧		AC115 V	AC230 V	AC115 V	AC230 V		
	出力電流 0.01 A	81.9%	78.2%	82.5%	79.7%		
軽負荷領域の	出力電流 0.02 A	85.7%	83.3%	86.6%	84.1%		
電力変換効率	出力電流 0.05 A	88.0%	86.8%	88.7%	87.2%		
	出力電流 0.1 A	89.0%	87.9%	89.5%	88.3%		





図 10 「FA8C00 シリーズ」評価用電源ボードの回路図(19 V/3.4 A 65 W)

特集

モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



図 11 「FA8C00 シリーズ」と従来製品の VCC 端子周りの電源 回路例

4.2 電源回路部品点数の削減

図11にFA8C00シリーズと従来製品のVCC端子周りの電源回路例を示す。FA8C00シリーズでは前述のようにICにクランプ回路を内蔵しているため、VCC端子電圧がMOSFETのゲート耐圧より高い場合でも、IC出力電圧をMOSFETのゲート耐圧以下に抑えるため、外部レギュレータ回路が不要で、電源の部品8点を削減可能であり、電源の小型化に貢献できる。

5 あとがき

本稿では、第7世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00 シ

リーズ」について述べた。カレントモード PWM 電源制 御 IC には、多様な電源仕様に適用できるようにさまざま な機能の内蔵が求められている。

今後も市場ニーズにマッチした軽負荷時の電力変換効率 の向上、部品点数削減による電源の小型化に応えた製品を 提供していく所存である。

参考文献

- (1) 藪崎純ほか.第6世代PWM制御IC「FA8A00シリーズ」.富 士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.452-456.
- (2) 日朝信行ほか.650V耐圧PWM電源制御IC「FA8A80シ リーズ」、富士電機技報、2017, vol.90, no.4, p.246-250.



松本 晋治

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在、富 士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設 計第二部。



山根博樹

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在、富 士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設 計第二部。



宮城 輝大

スイッチング電源制御 IC の開発に従事。現在、富 士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業設 計第二部。

富士電機技報 2022 vol.95 no.4

IPS 用オートゼロアンプ技術

Auto-Zero Amplifier Technology for Intelligent Power Switch

岩本	基光 IWAMOTO, Motomitsu	豊田	善昭 TOYODA, Yoshiaki	片倉	英明	KATAKURA, Hideaki
----	-----------------------	----	---------------------	----	----	-------------------

近年、自動車に搭載される電子部品が増加し、ECU 基板は高密度実装が求められている。ECU に搭載する部品には小型 化や複数部品の統合化の要求があり、富士電機は電流駆動素子、電流検出アンプ、電流検出用シャント抵抗を1チップ化 する次世代 IPS の開発を検討している。シャント抵抗をチップ内に内蔵する場合、アンプの精度を従来以上に高精度化す る必要がある。そこで、出力誤差を自動補正する機能を備えた高精度アンプのオートゼロアンプ技術を開発した。これに より、電流検出精度を従来と同程度に維持しつつ、ECU 基板の実装面積を縮小することができる。

Electronic components installed in an automobile, recently increased in number, are required to be mounted with high density on the electronic control unit (ECU) board. They are also required to be miniaturized and integrated. Fuji Electric has therefore been studying the development of a next-generation intelligent power switch that integrates a current drive devices, current detection amplifier, and current detection shunt resistors into a single chip. Integrating shunt resistors into the chip will need a higher accurate amplifier than ever. We have thus developed a highly accurate auto-zero amplifier technology that automatically corrects output errors. This amplifier helps reduce an ECU board footprint while maintaining the same current detection accuracy as conventional products.

1 まえがき

近年、自動車に対して、環境、安全、快適性能の向上が 強く求められている。環境では車両の燃費向上や電動化、 安全では先進運転支援システムをはじめとした自動運転化、 そして快適性能では広い室内空間を確保するための部品の 小型化などが取り組まれている。

富士電機は車載パワーICとしてIPS (Intelligent Power Switch)、圧力センサ、イグナイタを開発してき た。IPS は、トランスミッションを制御するためのソレノ イドバルブを駆動する電流駆動素子として使用されている。 IPS の小型化、周辺部品を取り込んだ1チップ化は ECU (Electronic Control Unit) 基板の小型化を可能にし、広 い室内空間を実現することで快適性能の向上に寄与する。 また、IPS の電流検出精度の向上はトランスミッションの 高精度な制御を実現し、燃費向上に寄与する。

これまで別置されていた IPS と電流検出用のシャント 抵抗を1チップ化することで ECU 基板の小型化が可能と なるが、電流検出アンプ出力の誤差が従来よりも大きくな るため、電流検出精度が悪化する弊害がある。この課題を 解決する手段として、IPS とシャント抵抗を1チップ化し ても出力誤差の増加を防ぐことができるオートゼロアンプ 技術を開発した。本稿では、その概要と適用事例について 述べる。

2 リニア IPS の課題

2.1 リニア IPS の機能

IPS はパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) に各種制御機能を付加したパ ワー IC である。IPS にはアンプを内蔵して負荷に流す電



図 1 従来のリニア IPS の使用形態

流をセンシングするリニア IPS がある。富士電機の従来のリニア IPS の使用形態を図1に示す。

リニア IPS は、マイコンからの指令により、負荷に電 流を流す。負荷に流した電流はシャント抵抗で電圧に変 換し、アンプで増幅してからマイコンに内蔵された ADC (Analog-Digital Converter) にフィードバックする。 マイコンはフィードバックされた信号に基づいてリニア IPS への指令値を調整する。この仕組みにより、負荷(ソ レノイドバルブ)に正確な電流を流すことができる。

富士電機の従来のリニア IPS は、図1 に示すように電流 制御用のパワー MOSFET、制御部および電流検出用のア ンプを1 チップ化したパワー IC であり、ECU 基板の高 密度実装に貢献している。また、電流検出用アンプは負荷 に流れる電流を正確に検出する必要があるため、出力電圧 に発生する誤差が最小になるように回路・レイアウト設計 を最適化している。

2.2 1チップ化の課題

リニア IPS に最も強く求められているのは、"ECU 基 板の小型化"への貢献である。このため、さらなる小型化 を目指すため、シャント抵抗のリニア IPS への内蔵化を 検討した。

シャント抵抗内蔵化に当たって、最大の問題となるのは 発熱である。現在市場で使用されている ECU と同じ抵抗 値をチップ内に取り込むと、抵抗で発生するジュール熱で チップ温度が過度に上昇する問題がある。パッケージの 放熱などを考慮すると、チップ内にシャント抵抗を内蔵 するには抵抗値を現状の 1/4 にする必要がある。抵抗値 を 1/4 にした場合、アンプの入力電圧も 1/4 になるため、 入力電流 - アンプ出力電圧特性を維持するにはアンプの差 動ゲインを従来の 4 倍にする必要がある(図2、図3)。

差動ゲインを4倍にすることで入出力特性は維持でき るが、一方で、出力電圧で発生する誤差が増加するという デメリットが生じる。

オフセット電圧を持つ OP アンプを使った差動アンプの 回路図を図4に示す。ここでオフセット電圧とは、OP ア ンプの入力部で発生する直流電圧の誤差である。これは差 動対と呼ばれる対となった二つのトランジスタのしきい値 電圧の、製造ばらつきに起因する差によって発生する。図 4の差動アンプ回路について、入力電圧を V_{in}、出力電圧 を V_{out}、オフセット電圧を V_{os}とすると、出力電圧 V_{out} は式(1)となる。



図2 シャント抵抗と出力電圧(従来品)



図3 シャント抵抗と出力電圧(開発品)



図4 差動アンプの回路図

$V_{\rm out} = (R_2/R_1) \times V_{\rm in} + (1 + R_2/R_1) \times V_{\rm os}$	(1)
V _{in} :入力電圧	
V _{out} :出力電圧	
$V_{ m os}$:オフセット電圧	
<i>R</i> :シャント抵抗	

ここで、 $(R_2/R_1) \times V_{in}$ は信号の大きさ、 $(1+R_2/R_1) \times V_{os}$ はオフセット電圧による誤差である。この式(1)を図2に当てはめると、 R_2/R_1 が差動ゲインGに相当し、 V_{in} が入力電流 $I_0 \times R$ に相当するため、式(2)となる。

V_{out}=G×I₀×R+(1+G)×V_{os} ·······(2)
V_{out}: 出力電圧
V_{os}: オフセット電圧
G : 差動ゲイン
I_o:入力電流

一方、図3では出力電圧は、式(3)で表される。

 $V_{\text{out}} = 4 G \times I_0 \times R/4 + (1+4 G) \times V_{\text{os}}$ $= G \times I_0 \times R + (1+4 G) \times V_{\text{os}}$ (3)

式(2)、式(3)を比較すると、信号の大きさは $G \times I_0 \times R$ で変化がない一方で、誤差は $(1+G) \times V_{os}$ から、 $(1+4G) \times V_{os}$ まで大きくなっている。例えば差動ゲインGを8倍とすると、出力電圧で発生する誤差は $9V_{os}$ から 33 V_{os} まで、約4倍に大きくなる。

このように、シャント抵抗を内蔵すると ECU 基板が小型化できるが、差動アンプの出力電圧の誤差が大きくなる という弊害が生じる。この問題を解決するには、差動アン プを構成する OP アンプのオフセット電圧を小さくする必 要がある。

オフセット電圧を小さくする手法としては、チップ上の デバイス配置の最適化や、出荷テスト時のトリミングなど がある。しかし、デバイス配置の最適化では効果が限定的 である。また、出荷テスト時のトリミングでは、調整後の 温度変化などによるオフセット電圧の変動を補償すること が困難である。これらを考慮し、今回はオフセット電圧を 一定時間ごとに自己補償するオートゼロアンプ技術を開発 し、適用した。

③ オートゼロアンプ技術の特徴

3.1 オートゼロアンプを適用した次世代 IPS の構成

図5 に次世代 IPS のブロック図を示す。シャント抵抗 の内蔵化によって発生する誤差の増加への対策として、電 流検出アンプにオートゼロアンプを適用している。要素 デバイスとして、電流駆動用のパワー MOSFET、パワー MOSFET を制御する制御部、シャント抵抗、5V系の電 流検出アンプ(オートゼロアンプ適用)があり、これらを 1 チップ化している。

3.2 オートゼロアンプ

(1) 動作原理

図6にオートゼロアンプの原理図を示す。

オートゼロアンプはメインアンプと補正アンプの二つの OP アンプで構成される。それぞれの OP アンプには、通 常の + 入力と - 入力以外にオフセット電圧補正用の入力 端子(図中の CO 端子)が備わっている。Vos1 はメイン アンプのオフセット電圧、Vos2 は補正アンプのオフセッ ト電圧である。

SW1とSW2は交互にオン-オフし、SW3とSW4も 交互にオン-オフする。スイッチングのタイミングは、



図 5 次世代 IPS のブロック図



図6 オートゼロアンプの原理図

SW1 と SW3 が同時にオンし、SW2 と SW4 が同時にオ ンする。コンデンサ C1 と C2 はメインアンプと補正アン プのそれぞれの補正電圧を保持する。

オートゼロアンプの動作は SW の接続状態によって二 つのフェーズに分けられる。

(a) フェーズ1:SW1・SW3=オフ、SW2・SW4=オン 補正アンプが自己のオフセット電圧の補正を行う。補 正アンプの両入力がショートされるため、補正アンプに は自己のオフセット電圧 Vos2 が入力される。補正アン プの出力は SW4 を経由して自身の補正用端子 CO に接 続される。このとき、補正用アンプは自身のオフセット 電圧 Vos2 をキャンセルする電圧を出力し、補正用コン デンサ C2 を充電する。

(b) フェーズ 2:SW1·SW3=オン、SW2·SW4=オフ

メインアンプの補正を行う。補正アンプの+端子に は自身のオフセット電圧 Vos2 経由で IN+ が接続され、 - 端子には IN- が接続される。補正アンプの+端子に は Vos2 が接続されているが、補正用アンプはフェーズ 1 でオフセット補正済みであり、出力にはオフセット電 圧成分は重畳しない。

メインアンプは負帰還動作をするため、メインアン プの+端子と - 端子の電位は等しくなる。故に IN+ と IN-の電圧差がメインアンプのオフセット電圧 $V_{os}1$ と なる。補正アンプにはメインアンプのオフセット電圧 $V_{os}1$ が入力される。補正アンプからはメインアンプの オフセット電圧 $V_{os}1$ をキャンセルさせる電圧が出力さ れ、メインアンプの補正コンデンサ C1 に補正電圧を充 電する。

フェーズ1とフェーズ2を定期的に繰り返すことで、 補正アンプとメインアンプの補正電圧は常に最適な値に保 たれ、メインアンプ出力で発生する誤差を最小に抑えるこ とが可能となる。

(2) 動作電源電圧の低減

次世代 IPS では、パワー MOSFET と 5 V 系の回路を 1 チップに集積する必要があり、プロセスには第 5 世代 IPS デバイス・プロセス技術を使用してオートゼロアンプ技術 の開発を行った。本プロセスの特徴は、電流駆動用のトレ ンチゲート MOSFET、中耐圧 MOSFET、三重拡散構造 による低耐圧 MOSFET、およびシャント抵抗を 1 チップ に集積できることである。これにより、車載用パワー IC として必要な電流駆動能力・耐圧性能を備えつつ、オフ セット電圧を自動補正するオートゼロアンプ技術を実現す ることが可能となる。

図7に第5世代 IPS デバイスの断面構造を示す。一般 的に、三重拡散構造では最上層の不純物濃度を高くする 必要があり、その層に形成する MOSFET はしきい値電圧 が高くなる傾向にある。今回採用した三重拡散構造の低 耐圧 MOSFET も同様の傾向である。しきい値電圧の高い MOSFET で構成された回路は、動作可能な電源電圧が高 くなる。一方で市場要求は、電源電圧変動への耐性向上の ために低電源電圧で動作することが求められている。そこ



図7 第5世代 IPS デバイスの断面構造

で、今回設計したオートゼロアンプでは次のような工夫を して動作電圧の低減を図った。

(a) バイアス回路

回路中で最も低い電源電圧で動作を開始する必要があ るバイアス回路を見直した。具体的には、MOSFETの 段数が多い箇所の回路構成の変更や MOSFET のバイア ス条件の最適化により低電圧動作を実現した。

(b) UVLO (Under Voltage Lockout) 回路

電源電圧が低く、アンプの動作電圧に達していないと きにはアンプ出力は不定となる。不定状態でマイコン の ADC に信号を出力するとシステムの誤動作の原因と なるため、アンプ出力が確定するまではアンプの出力を 0V に固定する UVLO 回路を搭載した。アンプを 0V に固定する基準となる電圧が製造ばらつきによって変動 すると動作保証電圧が高くなる。このことから、基準電 圧への製造ばらつきの影響が最小となるように回路を改 良した。

このような工夫により、三重拡散構造のプロセスで従来 品と同等の動作電圧を実現することを可能とした。

④ オートゼロアンプの効果

図8にオートゼロアンプを使用した実機評価結果を示 す。ゲインはシャント抵抗を従来の1/4にすることを考



図8 オートゼロアンプを使用した実機評価結果

慮して従来品の4倍の32倍とした。アンプ入力には負荷 電流1A、かつシャント抵抗が従来品の1/4に相当する入 力電圧を印加した。この条件で温度-40℃から+175℃ の範囲で電流検出精度の評価を行った。目標値は第5世 代IPSと同等とした。

図8に示すとおり、ゲインを従来品の4倍の32倍としたにも関わらず第5世代 IPSの目標仕様を満足している。

これらの評価結果から、IPS とシャント抵抗を1チップ 化した際に発生する誤差の増加を、オートゼロアンプ技術 を用いて解決できる目途がついた。シャント抵抗内蔵によ り ECU 基板の小型化を実現し、かつ電流検出精度は従来 と同等が実現できる見込みである。

5 あとがき

車載用パワー IC に搭載可能な、IPS 用オートゼロアン プ技術の開発を行った。これにより、電流検出精度を従来 と同程度に維持しつつ ECU 基板の小型化が期待できる。

急速に電子化が進む自動車分野においては、IPS 以外に も広く用途があると考えている。今後適用範囲を広げるた めの検討を進め、自動車業界に貢献していく所存である。

参考文献

- 中川翔ほか. ワンチップリニア制御用IPS「F5106H」. 富 士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.273-276.
- (2) Toyoda,Y. "60 V–Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET". ISPSD. 2013, p.147–150.
- (3) 芦野仁泰ほか. 第7世代車載用高圧センサ. 富士電機技報.2019, vol.92, no.4, p.257-261.
- (4) 細川英治ほか. 自動車用ワンチップイグナイタ. 富士時報.2007, vol.80, no.6, p.410-412.
- (5) 岩田英樹ほか. 車載用第5世代IPS「F5202H」. 富士電機技 報. 2020, vol.93, no.4, p.219-223.



岩本基光

パワー IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社 半導体事業本部開発統括部デバイス開発部主査。



片倉 英明

パワー IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社 半導体事業本部開発統括部デバイス開発部。



豊田 善昭

半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士 電機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス 開発部主査。

トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した SiC-MOSFET

Trench SBD-Integrated SiC-MOSFET To Suppress Bipolar Degradation

馬場 正和 BABA, Masakazu	啺 ī	駶場	正和 BABA, Masakaz	俵	武志	TAWARA, Takeshi	竹中	研介	TAKENAKA, K	Cens	uke
----------------------	-----	----	------------------	---	----	-----------------	----	----	-------------	------	-----

SIC-MOSFET のボディダイオードに順方向通電を行うと、ドリフト層内に積層欠陥が拡張し、特性が劣化(オン電圧が上昇)する問題がある。これに対して、SiC トレンチゲート MOSFET にトレンチ SBD を内蔵することで、チップサイズを大きくすることなく、順方向通電時にボディダイオードに流れる電流を抑制できる。本構造では従来の SiC トレンチゲート MOSFET に対して、特性劣化が生じる電流密度を約4倍に高めることができた。また、外付けの SBD を用いないために製品の小型・軽量化が期待できるとともに、特性劣化が抑制されるので長期信頼性の向上も期待できる。

When the body diode of a SiC-MOSFET is forward biased, characteristic degradation occurs as on-voltage rises with stacking faults expanding within the drift layer. To avoid the issue, integrating a trench SBD into a conventional SiC trench gate MOSFET will suppress a body diode current under forward bias without the need for increased chip size. This structure has increased the current density at which characteristic degradation occurs by approximately four times compared with conventional SiC trench gate MOSFETs. Without using external SBDs, this technology is expected to reduce the size and weight of products and reduce characteristic degradation, improving long-term reliability.

1 まえがき

近年、脱炭素化社会実現のために、電力変換機器の低損 失化が求められている。ワイドバンドギャップ材料である 炭化けい素(SiC)はシリコン(Si)に比べて絶縁破壊電 界強度が高く、電圧を支えるドリフト層を薄く、高濃度に することにより素子の低抵抗化が可能である。また、熱伝 導率が高く、バンドギャップが広いため、素子を高温で動 作できることから冷却システムを簡素化でき、電力変換機 器の小型・軽量化による恩恵が得られる。例えば電気自動 車においては、SiC パワー半導体素子を用いることにより、 インバータの小型・軽量化および損失低減による航続距離 の伸長が可能となる。インバータなどの電力変換機器に は、MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) や SBD (Schottky Barrier Diode) が用いられる。インバータ回路を小型化する際に、還流素 子として外付けされる SBD の代わりに、MOSFET の内 蔵 pn ダイオード(ボディダイオード)を用いることで素 子数を減らす方法が知られている。しかしながら、SiC-MOSFET のボディダイオードに電流を流すと、オン電圧 が増加する現象(バイポーラ劣化)によって損失が増加す る懸念がある。

本稿では、トレンチ SBD 内蔵による SiC-MOSFET の バイポーラ劣化の抑制効果について述べる。

2 バイポーラ劣化と SBD 内蔵化による抑制効果

図1にSiCトレンチゲート MOSFET 素子の断面を示 す。トレンチゲートの周囲に形成されるボディダイオード に通電すると、バイポーラ劣化により MOSFET のドレイ ン・ソース間にかかる、順方向電圧 V_F と動作開始時の電

```
富士電機技報 2022 vol.95 no.4
```



図1 SiC トレンチゲート MOSFET 素子の断面

E Von が上昇することが報告されている。バイポーラ劣化 は順方向通電中に積層欠陥 (SF: Stacking Fault)が拡 張し、高抵抗層となることで引き起こされる。ボディダイ オードが動作すると、ドレイン側から電子が、ソース側よ リホールがドリフト層、基板に注入される。注入された電 子、ホールの再結合によって放出されるエネルギーにより、 ドリフト層や基板内に存在する基底面転位 (BPD: Basal Plane Dislocation)を起点として SF が拡張する。

BPDはSiC基板内に存在する転位欠陥であり、ド リフト層のエピタキシャル成長開始時にドリフト層と 基板の界面で貫通刃状転位(TED:Threading Edge Dislocation)に変換される。SFは、TEDに変換されず に、ドリフト層を貫通したBPDより拡張する。また、大 電流の通電によりTEDに変換されたBPDからもSFが拡 張することが報告されている。

図2は従来のSiCトレンチゲート MOSFET について、 ボディダイオードに500A/cm²まで順方向通電を行い、 $V_{\rm F}$ の通電前の初期値に対する変動量 $\Delta V_{\rm F}$ をプロットした



図 2 従来の SiC トレンチゲート MOSFET とバイポーラ劣化

グラフである。未対策の状態では 500 A/cm² の電流密度 で順方向通電を行うと *ΔV*_F が増加しバイポーラ劣化が発 生することを確認した。

富士電機は、バイポーラ劣化を抑制するための技術とし て再結合促進層を開発した。再結合促進層はドリフト層と 基板の間に形成される高キャリア濃度層で、少数キャリア であるホールのキャリア寿命が短い。そのため、ドリフト 層から基板に注入されるホールが低減し、SFの拡張が抑 制できる。将来、チップ面積の縮小が進み、より高電流 密度で使われるようになった場合、再結合促進層をより高 濃度・厚膜に最適化することが必要となる。そこで、バイ ポーラ劣化を抑制する代替手段の一つとして、ボディダイ オードを動作させず、電子とホールを再結合させないこと が有用であると考えた。本稿ではバイポーラ劣化の抑制方 法として、SBD と MOSFET のワンチップ化(トレンチ SBD 内蔵)を検討した。

次に、トレンチ SBD 内蔵によるバイポーラ劣化抑制の 原理を述べる。図3に SiC トレンチゲート MOSFET の断 面構造とボディダイオード通電時の等価回路を示す。SiC トレンチゲート MOSFET とトレンチ SBD 下の p 型層は、 それぞれ奥行き方向で表面の p 型コンタクトを介してソー スに接続されている(不図示)。また、図3に示した等価 回路は、ボディダイオード通電時の電流経路を示している。 図3(a)の SiC トレンチゲート MOSFET に対して、図3(b) のトレンチ SBD 内蔵 SiC トレンチゲート MOSFET(SBD 内蔵 MOSFET) では、トレンチ SBD と内蔵 pn ダイオー ドが並列接続され、ドリフト層抵抗を共有する。並列接続 により、トレンチ SBD と内蔵 pn ダイオードにかかる電



図 3 SiC トレンチゲート MOSFET 断面構造とボディダイオ-ド通電時の等価回路

Eは等しいが、実際には内蔵 pn ダイオードと比べてトレ ンチ SBD は、図3(b)の分岐点から離れた箇所に形成され るため、SBD とドリフト層間の抵抗(広がり抵抗)も考 慮する必要がある。図3(b)に示す内蔵 pn ダイオードにか かる電圧 $V_{\rm sp}$ は、SBD にかかる電圧 $V_{\rm SBH}$ と広がり抵抗に かかる電圧 $V_{\rm sp}$ の和に等しい。そのため、 $V_{\rm SBH}$ と $V_{\rm sp}$ の和 を内蔵 pn ダイオードのビルトイン電圧 $V_{\rm D}$ よりも低くす れば内蔵 pn ダイオードはオンしない。一般的に $V_{\rm SBH}$ は ショットキー接合による電位障壁の高さで決まり、 $V_{\rm D}$ よ りも小さい。そのため、 $V_{\rm sp}$ を調整することで内蔵 pn ダ イオードの動作を抑制することができる。結果として内 蔵 pn ダイオードの代わりにトレンチ SBD が動作するが、 トレンチ SBD はユニポーラデバイスであるためバイポー ラ劣化が起きることはない。

③ トレンチ SBD 内蔵 SiC-MOSFET の特性

今回、共同研究体つくばパワーエレクトロニクスコン ステレーション(TPEC:Tsukuba Power-Electronics Constellations)のプロジェクトを活用し、SiCトレン チゲート MOSFET にトレンチ SBD を形成する技術を確 立し、デバイスを試作した。トレンチ SBD 内蔵に当たり、 セルピッチの狭い従来の SiC トレンチゲート MOSFET に 対して、プレーナ型の SBD を形成するとセルピッチが広 特集



図 4 トレンチ SBD を内蔵した SiC トレンチゲート MOSFET の 断面 SEM 像



図 5 耐圧波形

がり V_{on} が大きくなり損失が増加する。そこで、トレンチ SBD を形成することにより、セルピッチを広げることな くトレンチ SBD 内蔵を実現した。

図4に試作したトレンチ SBD を内蔵した 1,200 V 耐 圧 SiC トレンチゲート MOSFET の断面 SEM(走査型電 子顕微鏡: Scanning Electron Microscopy)像を示す。 SiC トレンチゲート MOSFET のトレンチゲートの間にト レンチ SBD が形成できていることを確認した。

図5は従来の SiC トレンチゲート MOSFET と SBD 内



図6 $R_{on} \cdot A - V_{th}$ トレードオフ

蔵 MOSFET の室温における耐圧波形で、いずれの構造も 1,200 V 以上の耐圧を備えている。また、ドレイン・ソー ス間のリーク電流に有意差はなく、SBD 内蔵 MOSFET によるリーク電流への影響はないことを確認した。図6 は 同セルピッチの SiC トレンチゲート MOSFET と SBD 内 蔵 MOSFET の、室温における特性オン抵抗 Ron・A とし きい値電圧 V_{th} のトレードオフである。ゲート構造、セル ピッチ、活性領域の面積は両構造で変わらないため、ほぼ 同等の特性となっている。

4 バイポーラ劣化抑制効果の検証

図7は従来のSiCトレンチゲート MOSFET と、セル ピッチが異なる3種類のSBD内蔵 MOSFETの150°Cに おけるボディダイオードのJ-V特性である。素子A、素 子 B、素子 C の順にセルピッチは狭くなる。

まず、従来の SiC トレンチゲート MOSFET について、 内蔵 pn ダイオードが動作すると電子電流とホール電流、 すなわちバイポーラ電流が流れ、図7(a)に示したように指 数関数的に増加する波形となる。対して、図7(b)、図7(c)、 図7(d)は*J*-*V* 波形の立ち上がり初期においては線形特性 を示した。内蔵 pn ダイオードのビルトイン電圧に対して *V*_{SBH} の方が小さいため、SBD のみが動作し電子電流のみ、



図7 150℃におけるボディダイオードの J-V 特性

すなわちユニポーラ電流が流れていると考えられる。また、 素子A、素子B、素子Cについて、印加電圧を増加させ ると電流密度が急峻(きゅうしゅん)に増加する傾向を示 した。電流増加の傾きが急激に変化する条件(変曲点)を 境界にして、トレンチSBDに加えて内蔵pnダイオード が動作し始めたと考えられる。変曲点となる電流密度はセ ルピッチが狭いほど高くなる傾向がある。セルピッチが狭 まると、図3(b)の分岐点とSBD間の距離が短くなって広 がり抵抗は減少し、V_{sp}は低下する。その結果、内蔵pn ダイオードがオンし難くなったと考えられる。図7(d)の特 性から、セルピッチが最も狭い素子Cにおいて、従来の SiCトレンチゲート MOSFET のバイポーラ劣化発生時の 6倍となる3,000 A/cm²以上の電流密度においてバイポー ラ劣化が生じないと推定される。

次に SBD 内蔵 MOSFET について順方向通電試験を実施し、バイポーラ劣化の抑制効果を検証した。通電試験 に際して、変曲点前後での効果検証と、通電装置の最大 電流密度 2,000 A/cm² まで通電した際のバイポーラ劣化 の有無を検証するため、素子 B と素子 C を試験した。ま ず、素子 B について、実使用を想定した 150 °Cに加熱 し、通電による発熱を抑えるためデューティ比を調整した パルス印加により通電した。通電前の初期特性を測定後 に、300 A/cm²、700 A/cm²、1,000 A/cm²、1,500 A/ m²、2,000 A/cm² でそれぞれ通電し、1,000 A/cm² まで は実効通電時間 5 分、2,000 A/cm² については実効通電 時間 2 分とした。通電後に再度測定し、 $\Delta V_{\rm F}$ を評価した。

図8に、順方向通電電流密度に対する*AV*_Fを示す。変 曲点の700 A/cm²より電流密度の低い条件では*AV*_Fの増 加はないことを確認した。1,000 A/cm²以上の電流密度 では*AV*_Fが増加し特性劣化が確認された。変曲点以上の 条件で電流密度が高くなるほど、バイポーラ電流成分は増 加するため、ドリフト層に注入される電子、ホールが増加 し、バイポーラ劣化が生じたと考えている。特性劣化した 素子について、SFの有無を確認するために表面電極を剥 離し、SF が発光する 420 nm の波長でフォトミルネッセ ンス (PL: Photo Luminescence) イメージング測定を



図8 順方向通電電流密度に対する ΔV_F



図9 順方向通電後にΔV_Fが増加した素子のPL像

実施した。図9に順方向通電後に $\Delta V_{\rm F}$ が増加した素子の PL像を示す。図9で示している白色で表れている領域が 拡張した SFである。この結果により、バイポーラ電流成 分が小さい変曲点近傍や変曲点よりも低い電流密度では、 ドリフト層への電子、ホール注入量が少ない、あるいは内 蔵 pn ダイオードが動作しないため、バイポーラ劣化が発 生しないことを確認した。

続いて、より高い電流密度の変曲点を示した素子 C に ついて順方向通電試験を実施した。図7(d)の*J*-V波形か ら 2,000 A/cm²の電流密度でもΔV_Fは変動しないと推察 される。そこで、素子 C は通電装置で最も厳しい条件の 175 ℃、2,000 A/cm² で実効通電時間 2 分の試験を実施 した。素子 C は図8 に示すとおり、試験環境で最も厳し い条件においてバイポーラ劣化しないことが示された。本 結果より、セルピッチの縮小により変曲点の電流密度を高 めることによって、従来の SiC トレンチゲート MOSFET がバイポーラ劣化した電流密度の 4 倍である 2,000 A/ cm² まで特性劣化しないことを実証した。

5 貫通 BPD 密度による影響評価

次に SF 拡張の原因となる貫通 BPD 密度に対する依存 性を評価した。BPD 密度の異なる基板は複数のベンダか ら入手し、各基板上にエピタキシャル成膜と SBD 内蔵 MOSFET を試作し、バイポーラ劣化抑制の効果が同様に 得られるかを検証した。試作に使用したエピタキシャル 基板はドリフト層成膜後に PL イメージング測定を行う ことでドリフト層を貫通する貫通 BPD の面内分布を確認 し、特に貫通 BPD が含まれるチップを選定して試験を実 施した。デバイス構造は④章でバイポーラ劣化が発生しな かった素子 C の構造とした。初期測定後に、100 A/cm²、 150 ℃で 10 分間 DC 印加、2,000 A/cm²、175 ℃で 2 分 間パルス印加による順方向通電を実施した。

図10は1チップ当たりに含まれる貫通 BPD の密度に 対するΔV_Fを示している。評価した全素子について、通 電前の初期値に対して変動量が小さく、特性劣化していな いことを確認した。本結果から、SBD 内蔵化によるバイ ポーラ劣化抑制は、貫通 BPD の密度に関係なく効果があ ることが示された。



図 10 貫通 BPD 密度に対する ΔV_F

6 あとがき

ボディダイオード動作によるバイポーラ劣化を抑制す る技術として MOSFET に SBD を内蔵する構造を検討し た。トレンチ SBD 構造を用いることで、従来の SiC トレ ンチゲート MOSFET に対して特性を悪化させることなく SBD を内蔵できる。

ボディダイオードの*J*-V特性で示される変曲点から、バイポーラ劣化が抑制される電流密度を推定し、セルピッチを狭めるほど高い抑制効果が得られることを示した。実際の順方向通電試験から、従来のSiCトレンチゲート MOSFET のバイポーラ劣化発生時の4倍の電流密度 2,000 A/cm² まで特性劣化が生じないことを実証した。また、エピタキシャル基板の貫通 BPD 密度に依らず安定してバイポーラ劣化を抑制できることを確認した。

本研究は、共同研究体つくばパワーエレクトロニクス コンステレーション(TPEC)の事業として行われた。試 作・評価および議論に協力いただいた、国立研究開発法人 産業技術総合研究所の原田信介殿、森本忠雄殿に謝意を表 する。

参考文献

- Agarwall, A. et al. "A New Degradation Mechanism in High–Voltage SiC Power MOSFETs". IEEE Electron Device Letters, vol.28, no.7, 2007, p.587–589.
- (2) Skowronski, M. et al. "Recombination-enhanced defect motion in forward-biased 4H-SiC p-n diodes".
 J. Appl. Phys. vol.92, no.8, 2002, p.4699-4704.
- (3) Konishi, K. et al. "Stacking fault expansion from basal plane dislocations converted into threading edge dislocations in 4H–SiC epilayers under high current stress"
 J. Appl. Phys. 114, 2013, p.014504–1–014504–5.
- (4) 俵武志ほか. SiC-MOSFETのバイポーラ劣化抑制のためのバッファ層技術. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.214-218.



馬場正和

SiC パワー MOSFET 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デバ イス開発部。工学博士。応用物理学会会員。



武志

俵

SiC パワー MOSFET、SBD の研究開発に従事。 現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所先進 パワーエレクトロニクス研究センター(富士電機より出向)。



竹中 研介

SiC パワー MOSFET の研究開発に従事。現在、 国立研究開発法人産業技術総合研究所先進パワー エレクトロニクス研究センター(富士電機より出 向)。応用物理学会会員。

解説1 アーム

arm

インバータなどのスイッチング回路において、スイッチ とダイオードで構成されるものをアームという。図1のよ うに、電源から負荷に電流を供給する回路を上アームとい う。電源に負荷から電流を引き込む回路を下アームという。 p.185、198



図1 スイッチング回路

略語(本号で使った主な略語)

ADC	Analog–Digital Converter	
AI	Artificial Intelligence	人工知能
BPD	Basal Plane Dislocation	基底面転位
ECU	Electronic Control Unit	
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FEM	Finite Element Method	有限要素法
FWD	Free Wheeling Diode	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
HPM	High Power Module	
ICT	Information and Communication Technology	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
JFET	Junction Field–Effect Transistor	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
MTTF	Mean Time To Failure	平均故障時間
NC	Numerical Control	数值制御
NPC	Neutral Point Clamped	
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PHEV	Plug–in Hybrid Electric Vehicle	プラグインハイブリッド自動車
PL	Photo Luminescence	フォトルミネッセンス
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RC-IGBT	Reverse–Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
SEM	Scanning Electron Microscopy	走查型電子顕微鏡
SF	Stacking Fault	積層欠陥
TED	Threading Edge Dislocation	貫通刃状転位
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置
UVLO	Under Voltage Lockout	
UWBG	Ultra-wide Bandgap Semiconductors	



エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、 エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、 安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。





主要事業内容

パワエレ エネルギー

エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

エネルギーマネジメント エネルギーマネジメントシステム

変電システム 変電設備、産業電源

施設・電源システム 無停電電源装置(UPS)、配電盤

器具 受配電・制御機器

パワエレ インダストリー

あらゆる産業分野の自動化と省エネに貢献します。

オートメーション インバータ、モータ、サーボシステム、コントローラ、 プログラマブル表示器、計測機器、センサ、FA システム、 駆動制御システム、計測制御システム

社会ソリューション 鉄道車両用駆動システム、ドアシステム、 船舶用排ガス浄化システム、放射線機器・システム

設備工事 電気工事、空調設備工事

IT ソリューション ICT に関わる機器・ソフトウェア

半導体

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。 パワー半導体 産業分野、自動車分野

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・ 試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。 再生可能エネルギー・新エネルギー 地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

火力発電

原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。 自販機 飲料自販機、食品・物品自販機 **店舗流通** 店舗設備機器、金銭機器

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記 URL で利用できます。 富士電機技報(和文)



FUJI ELECTRIC REVIEW(英文) 富士電機技術期刊(中文) https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html

富士電機技報 第95巻 第4号



次号予定

- 富士電機技報 第 96 巻 第 1 号
- 特集 自動化と省エネルギーに貢献する

計測・制御・情報システム

富士電機技報企画会議

幹		事	安川	和行											
企画メンバー		土屋	敏章	前田西	前田政一郎		前田政一郎		前田政一郎		前田政一郎 粕谷		敏	渡部	雅教
			松尾	壮太	片桐	源一	出野	裕	鈴木	健司					
特	集 委	員	松尾	壮太	熊谷	明恭	折笠	仁							
事	務	局	斎藤	哲哉	黒田	健一	堀口	道子							
編	集	室	藤木	徹	木村	基	小野₹	与拓也	小野	直樹					
			高橋	徹											

令和5年3月20	日 印刷 令和 5 年 3 月 30 日 発行
編集兼発行人	中山 和哉
発 行 所	富士電機株式会社 技術開発本部 〒 141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 (ゲートシティ大崎イーストタワー)
編 集·印 刷	富士オフィス&ライフサービス株式会社内 「富士電機技報」編集室 〒 191-8502 東京都日野市富士町1番地 電話 (042) 585-6965 FAX (042) 585-6539
発 売 元	株式会社オーム社 〒101-8460東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 電話(03)3233-0641

振替口座 東京 6-20018

*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。 © 2023 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)



https://www.fujielectric.co.jp



富士電機技報 vol.95 2022 年 総目次

No.1 特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

〔特集に寄せて〕電力の安定供給の変遷と挑戦				•••••	三谷	康範	3(3)
〔現状と展望〕 電力安定供給と省エネルギーに貢献する							
電源システムの現状と展望・・・・・			河野	正志	松本	康	4(4)
データセンターの電力安定供給に貢献する電源システム							
データセンターの電力安定供給に貢献する							
大容量無停電電源システム					濵田	一平	9(9)
冗長性および保守性を高めた電源システムの構築技術・・・・・・	安本	浩二	根本	健司	北谷	· 裕次	14 (14)
電力の安定供給に貢献するデータヤンター向け電源切換盤・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	村津	宏樹	若林	郁也	徳田	圖	20 (20)
省エネルギー・小型化のニーズに対応する	1371		нп		10.1-4	1.11	
毎形大容量 5 脚モルトラ			永霞	友宏	宮田	粗	25 (25)
設備安定稼働に貢献する電源システム			1 4₩⊟			ы	20 (20)
			芒土	広	佰	笛中	30 (30)
八全宙电池時間システム	枯古	禾阳	11-44	海安	<u></u> 一 合	声之	30(30)
	他早	万明	田地	白人	口启	普俱	30 (30)
素材製造設備の安定稼働に貢献する産業用電源・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	波部	辛平	岡崎	 澤 半	浅田	推入	42 (42)
リプレース対応の強化と安定稼働性を向上した							
中容量無停電電源装置	川崎	大介	附田	原大	筒井	重男	48 (48)
環境負荷低減に貢献するパームヤシ脂肪酸エステル変圧器	•••••	•••••	彦坂	知行	千葉4	公一郎	53 (53)
新製品紹介論文							
小型汎用自動販売機「マルチ君」・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••••					•••••	59 (59)

No.2 特集 2021 年度の技術成果と展望

〔特集に寄せて〕			
"エネルギー・環境技術で新たな社会価値創出に貢献"・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	近藤	史郎	67 (3)
"エネルギー・環境技術の革新により、			
お客さまの新たな価値の創出と社会課題の解決を目指す"	中山	和哉	68 (4)
ハイライト・・・・	•••••		69 (5)
パワエレ エネルギー	•••••		78 (14)
□エネルギーマネジメント □変電システム			
□施設・電源システム □受配電・開閉・制御機器コンポーネント			
パワエレ インダストリー	•••••		83 (19)
□ファクトリーオートメーション □プロセスオートメーション			
□情報ソリューション □社会ソリューション □フィールドサービス			
半導体·····	•••••	•••••	93 (29)
□産業 □電装			
発電プラント・・・・・	•••••	•••••	97 (33)
□再生可能エネルギー・新エネルギー □ソリューション・サービス			
食品流通	•••••	•••••	100 (36)
□自動販売機 □店舗流通			
基盤・先端技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••••	•••••	102 (38)
□基盤技術 □先端技術			
デザイン(Fe design)	•••••	•••••	107 (43)

No.3 特集 新しい価値を創造する富士電機の食品流通										
〔特集に寄せて〕熱のデジタルトランスフォーメーション実現に向けて 「現状と展望〕新しい価値を創造する	•••••			•••••	齋藤	潔	117	(3)		
富士電機の食品流通の現状と展望					石橋	剛信	118	(4)		
自動販売機										
自動販売機運用サービスの拡充・・・・・	・田中	誠一	柳川	弘行	水野	健太	123	(9)		
飲料自動販売機のヒートポンプ適用技術	• • • • • • • • • • • •	•••••	渡辺	忠男	河野	周	128	(14)		
冷凍自動販売機「FROZEN STATION」	・福田	勝彦	岩子	努	中西	寿一	132	(18)		
カップミキシング式自動給茶機「とろみ給茶機」	・畔栁	靖彦	喜田	明	小沢	竜徳	136	(22)		
グローバル汎用自動販売機「FGG160DCY」	•••••	•••••	•••••	•••••	阿部	順一	140	(26)		
店舗流通										
店舗向けネットワークサービス・・・・・	・徳永	勇貴	武藤	健二	石原	雄大	144	(30)		
ショーケースの省エネルギー技術・・・・・	• • • • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	木下	卓	147	(33)		
店舗における省エネルギーの施策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••••	•••••	宮越	智也	水澤	竜也	151	(37)		
共通技術										
機能性塗料による熱交換器の無着霜化技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	・小川	莉玖	水澤	竜也	滝口	浩司	155	(41)		
次世代エッジデバイス基盤開発とその適用・・・・・	・ ぺれら	まどぅら	竹内	志郎	濱田	公介	159	(45)		
製品紹介論文										
第 7 世代「X シリーズ」1,700 V/800 A										
産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」	• • • • • • • • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	164	(50)		
第 2 世代 SiC-SBD 1,200 V シリーズ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・							166	(52)		

No.4 特集 モビリティ・エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

〔特集に寄せて〕 パワー半導体デバイス								
―電力変換システム技術の牽引役―	•••••	•••••	•••••		LOREN	Z, Leo	175	(3)
〔現状と展望〕モビリティ・エネルギーマネジメントに								
貢献するパワー半導体・・・・・	大西	泰彦	宮坂	忠志	井川	修	178	(6)
xEV 向け IGBT モジュールの高電力密度化を実現する								
パッケージ技術・・・・・	佐藤	悠司	安達新	î一郎	東	展弘	185	(13)
第2世代 1,700 V All-SiC モジュールの系列拡大	高久	拓	高崎	愛子	奥村	啓樹	190	(18)
RC-IGBT を搭載した第7世代 IGBT-IPM の小型製品の系列化	黒澤	英二	城塚	直彦	唐本	祐樹	195	(23)
3.3 kV 第 7 世代「X シリーズ」IGBT チップ技術	伊倉	巧裕	原田	祐一	関野	裕介	200	(28)
第 7 世代 PWM 電源制御 IC「FA8C00 シリーズ」	松本	晋治	山根	博樹	宮城	輝大	204	(32)
IPS 用オートゼロアンプ技術	岩本	基光	豊田	善昭	片倉	英明	209	(37)
トレンチ SBD 内蔵によりバイポーラ劣化を抑制した SiC-MOSFET	馬場	正和	俵	武志	竹中	研介	214	(42)
解説								
アーム・・・・・	•••••	•••••	•••••		•••••	•••••	219	(47)





独自のパワーエレクトロニクス技術と用途の可能性を凝縮した、富士電機のパワー半導体。高耐圧・大容量化、 低電力損失化、小型軽量パッケージ化を進めているこのキーデバイスは、太陽光発電、風力発電などのクリーン エネルギー分野、産業や家庭に求められる省エネルギー分野、ハイブリッドカー・電気自動車といった交通分野 まで、様々な場面で活躍しています。さらに、新素材 SiC を採用した、より高性能な次世代パワー半導体を開発。 富士電機は、これからもエネルギー技術を革新し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していきます。



富士電機のパワー半導体

Innovating Energy Technology

エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新の追求により、 エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、 安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



耐食・材料・熱水利用技術 地熱発電プラント



パワーエレクトロニクス技術 インバータ



デバイス技術 パワー半導体



トロニクス技術 パワーエレクトロニクス技術 UPS (無停電電源装置)



パワーエレクトロニクス技術 メガソーラー向けPCS (パワーコンディショナ)



熱交換・冷媒制御技術 ハイブリッドヒートポンプ式 自動販売機



本誌は、環境に配慮した FSC[®] 認証紙および 植物油インキを使用しています。また、ユニ バーサルデザイン (UD)の考えに基づいた 見やすいデザインの文字を採用しています。





雑誌コード 07797-3