



特集 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





Innovating Energy Technology



2023 Vol.96 No.

特集 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

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 している中、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います。

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、これらのキーデバイスと して脱炭素化実現に貢献しています。

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産業用大容量 IGBT モジュール
 ②産業用中容量 IGBT-IPM
 ③車載用 IGBT モジュール



特集 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

【特集に寄せて】ワイドバンドギャップパワー半導体 197 (3) ーエネルギー転換の革命か進化かー

De Doncker, Rik W

(現状と展望) 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する 201(7)
 パワー半導体
 大西泰彦・宮坂忠志・井川 修

中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」 高島 健介 · 吉田 崇一 · 立石 義博	207 (13)
xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上 中村 瑶子 · 渡壁 翼 · 浅井 竜彦	211 (17)
産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」 日達 貴久 ・ 川畑 潤也 ・ 小平 悦宏	216 (22)
第7世代「Xシリーズ」中容量 IGBT-IPM「P638」 藤井 優孝 ・ 城塚 直彦 ・ 唐本 祐樹	220 (26)
第 4.5 世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6C60 シリーズ」 小林 善則 ・ 山路 将晴 ・ 山本 毅	225 (31)
第7世代 2,300 V「X シリーズ」IGBT/FWD チップ ^{松本 治輝} ・田村 隆博・唐本 祐樹	231 (37)

大容量モジュール内蔵ゲート抵抗チップ技術235 (41)狩野 太一・ 宮澤 康弘・ 鎌田 省吾

 SJ構造適用による SiC-MOSFET の低損失化と信頼性向上
 240 (46)

 康
 武志
 竹中 研介
 ・ 成田 舜基

新製品紹介論文

サーボシステム「ALPHA7」診断オプション

244 (50)

略語・商標

富士電機技報 vol.96 2023 年 総目次



247 (53)



Contents



Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrif and Energy Management	ication
[Preface] Wide Bandgap Power Semiconductors – Revolution or Evolution for the Energy Transition? De Doncker, Rik W	197(3)
Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrification and Energy Management ONISHI, Yasuhiko MIYASAKA, Tadashi IKAWA, Osamu	201 (7)
"M675" New IGBT Module for BEVs in China TAKASHIMA, Kensuke YOSHIDA, Soichi TATEISHI, Yoshihiro	207 (13)
Improved Power Cycle Reliability for xEV Modules NAKAMURA, Yoko WATAKABE, Tsubasa ASAI, Tatsuhiko	211 (17)
"HPnC" Industrial Large-Capacity IGBT Module HITACHI, Takahisa KAWABATA. Junya KODAIRA, Yoshihiro	216 (22)
"P638" 7th-Generation "X Series" Medium Capacity IGBT-IPM FUJII, Masanari JOZUKA, Naohiko KARAMOTO, Yuki	220 (26)
"FA6C60 Series" 4.5th-Generation LLC Current-Resonant Control ICs KOBAYASHI, Yoshinori YAMAJI, Masaharu YAMAMOTO, Tsuyoshi	225 (31)
"X Series" 7th-Generation 2,300-V IGBT/FWD Chips MATSUMOTO, Haruki TAMURA, Takahiro KARAMOTO, Yuki	231 (37)
Built-In Gate Resistor Chip Technology for High-Power Modules KARINO, Taichi MIYAZAWA, Yasuhiro KAMADA, Seigo	235 (41)
SJ Structure to Reduce Loss and Improve Reliability of SiC-MOSFETS TAWARA, Takeshi TAKENAKA, Kensuke NARITA, Shunki	240 (46)
New Products	
"ALPHA7" Servo System Diagnostic Option	244 (50)
Abbreviations and Trademarks	247 (53)

Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOUNAL vol.96, 2023

特集に寄せて

Wide Bandgap Power Semiconductors – Revolution or Evolution for the Energy Transition?

ワイドバンドギャップパワー半導体 ―エネルギー転換の革命か進化か―

De Doncker, Rik W

Professor and Director Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), Director E.ON Energy Research Center and Research Campus Flexible Electrical Networks (FEN), RWTH Aachen University, Germany

In retrospect, I was undeniably overly optimistic when I wrote in my 1981 master thesis on Power Supplies for Pulsed Power Systems that it would take just one more decade to have wide bandgap devices commercially available as a better alternative to silicon devices for such high energy pulse applications. Today, we must recognize that it took three decades to receive even workable samples. Now, 43 years later, SiC power MOSFETs and GaN HEMT¹s are commercially available with static and dynamic performance characteristics that outperform silicon devices.

At present, primarily the voltage rating determines the type of wide bandgap material that is used in a given application. Whereas, GaN HEMT power devices can operate close to GHz switching frequencies with breakdown voltages up to 800 V, SiC MOSFET devices are available having 1.2 kV, 3.3 kV up to 10 kV breakdown voltages. Hence, when looking at vehicle electrification, grid and energy management applications, next to silicon IGBTs, SiC MOSFETs are currently the only practical alternative power semiconductor for 400 Vac low-voltage grid applications, $400 V_{dc}$ or $800 V_{dc}$ battery electric vehicles, as well as medium-voltage² distribution AC and DC grid connected converter applications. Compared to silicon IGBTs, SiC MOSFETs offer voltage switching speeds that are at least 20 to 30 times faster than IGBTs. Indeed, although converter designers were dreaming of ever faster switches, power devices with switching speeds up to 150 kV/µs or 150 V/ns were not even imaginable a decade ago. Theoretically, ignoring parasitic effects caused by stray capacitances and inductances, faster switching enables higher switching



■和文翻訳(富士電機にて作成)

振り返ってみると、1981年に執筆した修士論文におい て、あと10年もあれば、高出力用途において、ワイドバ ンドギャップパワー半導体が Si デバイスよりも高性能な 代替品として市販されるようになるだろうと書いたが、そ れは間違いなく楽観的すぎた。動作サンプルの入手まで 30年を要し、43年経った現在では、Si デバイスを静特性、 動特性において凌駕する性能の SiC-MOSFET と GaN-HEMT が市販されている。

現在のところ、ワイドバンドギャップパワー半導体の 材料は、用途ごとに主に定格電圧によって決定される。 GaN-HEMT は、耐圧は 800 V までで、GHz 近くの周 波数でスイッチングが可能である。一方、SiC-MOSFET は 1.2 kV、3.3 kV、さらに 10 kV までの耐圧を備えて いるものが市販されている。したがって、車両の電動化 や電力系統制御の用途では、Si-IGBT の次世代デバイス として今のところ、SiC-MOSFET が唯一の実用可能な パワーデバイスであり、AC400V電圧系統、電気自動 車 DC400 V/800 V 系統、さらに AC および DC の中電圧 系統への電力変換器などの用途で使用されている。Si-IGBT と比較して、SiC-MOSFET は少なくとも 20 倍か ら30倍のスイッチング速度で動作する。電力変換回路の 設計者は高速スイッチング速度を持つデバイスの出現を 期待していたが、150 kV/µs(もしくは 150 V/ns)のよ うな高速スイッチング速度を持つようなパワーデバイス は、10年前には想像すらできなかった。理論的には、浮 遊容量・インダクタンスに起因する寄生効果を無視すれ ば、高速スイッチングにより高周波化を実現できる。高 周波化により、インダクタ、変圧器、コンデンサなどの 受動部品の小型化と軽量化が可能となる。体積・質量の低

特集

¹ HEMT – High electron mobility transistor. GaN HEMTs are currently lateral devices.

² Medium-voltage starts at 1,000 V_{ac} or 1,500 V_{dc} according to IEC standards

[〈]注 1〉HEMT:高電子移動度トランジスタ。GaN-HEMT は現在 横型デバイスである。

<注 2> IEC 規格によると、中電圧は AC1,000 V または DC1,500 V 以上

frequencies. Higher switching frequencies potentially leads to smaller and lighter passive components, such as inductors, transformers and capacitors. Reduction of volume and weight is of particular interest in road vehicle and aerospace applications. With proper lowinductive design of the device package and converter lay-out, faster switching leads to lower switching losses. In addition, as MOSFETs have no forward threshold voltage, their conduction losses at partial load operation tend to be lower than those of IGBTs. Hence, applications which value high efficiencies over a wide operating range, such as PV inverters, heat pumps inverters, high-speed propulsion drives potentially benefit from SiC MOSFETs. Nevertheless, to be commercially successful, the higher cost of SiC versus silicon devices must be offset by a reduction of costs of passive components, cooling systems and energy consumption.

No doubt, effective use of the aforementioned fast switching characteristics of wide bandgap semiconductors leads to converter designs that have much higher power densities than what was achievable with silicon devices. For example, a two-phase 800 V_{dc} to 400 V_{dc} synchronous buck-boost SiC automotive DC-to-DC converter switching at 500 kHz was demonstrated with a volumetric power density reaching 100 kW/dm³, whereas the three-phase silicon IGBT variant switching at 20 kHz reached a power density of merely 4 kW/dm^{3¹²}. To achieve such extraordinary results, many aspects of the circuit had to be reengineered. To lower stray inductance not only the package design and placement of the SiC chips but also an ultra-compact lay-out of the converter had to be realized to lower the overall stray inductance of the converter, in an attempt to reduce over-voltage spikes and high-frequency ringing during the fast switching of SiC MOSFETs. Novel compact 3D-printed liquid cooled heatsinks and 3D-printed bobbins to shape the foil windings of the inductors and intelligent gate drivers that switch smoothly the SiC MOSFETs in picoseconds were developed to operate the SiC MOSFETs at their thermal limits under hard-switching conditions. In practice, circuit designers often slow down significantly the switching transients of SiC MOSFETs in hard-switching converters to limit over-voltage spikes, diode reverse recovery stress and reduce EMI high-frequency ringing noise. The latter in an attempt to reduce the cost of EMI filters. However, in doing so the potential efficiency advantages of SiC devices switching at high frequencies compared to silicon IGBTs switching at lower frequencies are par減は、自動車や航空分野への用途において特に重要であ る。低インダクタンスに設計したパッケージと変換回路レ イアウトを用いると、スイッチングの高速化はスイッチン グ損失の低減につながる。さらに、MOSFET は、動作時 にビルトイン電圧がなく、低負荷時の導通損失は IGBT よ りも低くなる傾向にある。したがって、太陽電池用イン バータ、ヒートポンプ用インバータ、高速駆動システムな ど、広い動作範囲にわたって効率を重視する用途において、 SiC-MOSFET が有利になる可能性がある。しかしながら、 SiC は、Si デバイスと比べて高コストであり、商業的に も成功するには、コスト差を受動部品や冷却システムの削 減やエネルギー効率 ())

前述したワイドバンドギャップパワー半導体の高速ス イッチング特性を活用することで、Si デバイスで実現し てきたものよりもはるかに高い電力密度を持つ変換回路設 計が可能になる。例えば、DC800VからDC400V対応 の二相式同期 SiC 車載昇降圧 DC-DC コンバータはスイッ チング周波数 500 kHz で動作し、電力密度が 100 kW/ dm³に達する。一方で、三相式 Si-IGBT コンバータでは スイッチング周波数が 20 kHz で 4 kW/dm³ の電力密度 に留まる。SiC 搭載変換器において、このような高電力 密度を得るためには、変換回路を多方面から再設計する 必要があった。浮遊インダクタンスを低減するには、SiC チップのパッケージ設計と配置だけでなく、変換回路の 超小型レイアウトを実現して変換回路全体の浮遊インダク タンスを低減しなければならなかった。その結果として、 SiC-MOSFET の高速スイッチング中の過電圧スパイクや 高周波リンギングが低減した。3D プリンタによる斬新で 小型の水冷冷却器やインダクタのアルミニウム巻き線を 成型するためのボビン、そして、SiC-MOSFET をピコ秒 で滑らかにスイッチングするゲートドライバを開発して、 SiC-MOSFET をハードスイッチング条件下の熱的限界点 で動作させている。実態としては、回路設計者は、ハード スイッチング回路において、SiC-MOSFET のスイッチン グ速度を大幅に減速させて、過電圧スパイクやダイオード の逆回復ストレスを抑制し、さらに EMI 高周波リンギン グノイズを低減させることが多い。後者は EMI フィルタ のコストを削減するためである。しかし、そうすることで、 Si-IGBT に対する、SiC の高周波スイッチング特性を生 かした効率面の優位性が失われてしまう。どのような用途 で、ワイドバンドギャップパワー半導体の特性を生かすこ とができるのかという疑問は依然として残っている。これ らのとおり、ワイドバンドギャップ半導体製品の商業的に 成功に至るまでには、まだエンジニアリング的な作業が 残っている。

〈注3〉EMI:電磁障害。ワイドバンドギャップパワー半導体は、 30 MHzを超える伝導性 EMIを発生させる可能性があり、 より高度なフィルタ設計が必要になる。

³ EMI – Electromagnetic interference. Wide bandgap devices can produce conducted EMI beyond 30 MHz, requiring more sophisticated filter designs.

富士電機技報 2023 vol.96 no.4

tially lost. Hence, the question when and where to use wide bandgap devices is a valid one. Consequently, it remains an engineering task to have a commercially successful product.

Clearly, soft-switching converters, predominantly DC-DC converters, such as dual active bridge converters, which use the stray capacitance of the semiconductor as a resonant capacitor thereby greatly decoupling the circuit stray inductance from the device package stray inductance, avoid to great extend the aforementioned EMI and overvoltage spike issues. Hence, soft-switching or quasi-resonant DC-DC converters can push wide-bandgap semiconductors up to their limits. Compact single and three-phase on-board AC-to-DC chargers are being installed in plug-in hybrid and full electric vehicles. SiC based converters are finding their way in compact DC fast charging stations that can charge $400 V_{dc}$ or $800 V_{dc}$ batteries at power levels ranging from 50 kW up to 350 kW. Work is ongoing to develop charging stations that can charge batteries of trucks and small all-electric aircraft up to 3 MW. The target is to charge a 500 kWh battery in just about 15 min.

Whether wide bandgap devices will replace IGBTs in inverters for propulsion systems of passenger electric vehicles, where the maximum speed is around 18,000 rpm is still an open question. Three-phase rotating field machines with (expensive) multi-slot, two-layer wave windings, which are typically used in induction machines and permanent magnet synchronous machines, do not require elevated switching frequencies to fulfil the acoustic noise and efficiency requirements. Actually, the lower the switching frequency, the more efficiently the drive operates. On the other hand, low-cost machines with block windings, such as switched reluctance machines, are prone to produce annoying tonal acoustic noise as they excite much stronger the so-called zero-breathing vibration mode of the stator. These vibration modes have eigenfrequencies that are an order of magnitude higher than the fundamental frequency of the machine, i.e. up to 4 kHz. Algorithms have been developed that actively dampen such vibration modes reducing the emitted noise by 20 dB, making a low-cost machine nearly as quiet as a rotating field wound machine. However, to compensate effectively 4 kHz vibrations SiC inverters switching at frequencies around 40 kHz and higher are needed. Hence, it can be anticipated that mass production of e-Axles drives, i.e. the integration of high-speed machine, inverter and gearing system, are implemented based on low-cost highspeed machines (up to 30.000 rpm) using SiC inverters that actively control smooth torques and dampen the stator vibrations that cause most acoustic noise.

デュアルアクティブブリッジコンバータなど、主に DC-DC コンバータとして使用されるソフトスイッチン グ変換器は、半導体の浮遊容量を共振コンデンサとして使 用しており、それによって回路の浮遊インダクタンスはデ バイスパッケージの浮遊インダクタンスから切り離され、 前述の EMI および過電圧スパイクは大きな問題にはなら ない。したがって、ソフトスイッチングまたは疑似共振に よる DC-DC コンバータは、ワイドバンドギャップ半導 体の性能を限界まで引き出すことができる。小型の単相式 および三相式車載 AC-DC 充電器がプラグインハイブリッ ド車や電気自動車に搭載されている。SiC 搭載変換器は、 50 kW から 350 kW の範囲で DC400 V または DC800 V のバッテリを充電できる小型 DC 急速充電ステーションに 適している。さらに、3 MW までのトラックや小型電動航 空機のバッテリを充電できる充電ステーションの開発が進 められており、500 kWh のバッテリを約15分で充電す ることを目標としている。

ワイドバンドギャップパワー半導体が、最高約 18,000 rpm の乗用電気自動車で使用される駆動用イン バータにおいて、IGBT を置き換えるか、未だ議論が続い ている。誘導機および永久磁石同期機などで使用される (高価な)マルチスロット二層波巻線を備える三相回転機 は、ノイズや効率の要件を満たすために、スイッチング周 波数を上げる必要がない。実際、スイッチング周波数が低 いほど、モータドライブ装置の効率が上がる。一方、ス イッチトリラクタンス機のようなブロック巻線を有する低 コストの回転機は、固定子のいわゆるゼロブリージング振 動を強く励起するため、不快な騒音を発生する傾向がある。 この振動モードの固有振動数は、回転機の基本周波数よ り一桁高い最大4kHzとなる。このような振動モードを アクティブに減衰させるアルゴリズムが開発されており、 騒音を 20 dB 低減し、低コストの回転機を巻線形の回転 機とほぼ同等にまで静音化する。しかし、4kHzの振動 を効果的に補償するためには、スイッチング周波数が約 40 kHz 以上の SiC インバータが必要となる。したがって、 高速回転機、インバータおよびギア機構を一体化した e-Axles 量産化時には、滑らかなトルク制御と騒音の主要因 となる固定子振動を減衰させる SiC インバータ駆動の低 コストな高速回転機(最高 30,000 rpm)が適用されると 予想される。

References

- A. Stippich et al., "Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles," in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol.2, no.4, pp.249-258, December 2017, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2017.00023.
- (2) A. Wienhausen, "High integration of power electronic converters enabled by 3d printing," PhD Thesis RWTH Aachen University, 2019, DOI: 10.18154/RWTH-2019-08746.
- (3) A. Stippich, "Exploiting the full potential of silicon carbide devices via optimized highly integrated power modules," PhD Thesis RWTH Aachen University, 2021, DOI: 10.18154/RWTH-2021-08122.
- (4) C. Luedecke, "Compensating asymmetries of parallelconnected SiC MOSFETs using intelligent gate drivers," PhD Thesis RWTH Aachen University, 2022, DOI: 10.18154/RWTH-2022-09587.
- (5) G. Engelmann "Reducing device stress and switching losses using active gate drivers and improved switching cell design," PhD Thesis 2018 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2018-228973.
- (6) J. Henn, "Gate driver integrated closed-loop control for electromagnetic emissions and switching losses of wide bandgap power electronic converters," PhD Thesis

2022 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2023-07726.

- (7) K. Oberdieck, "Measurement and mitigation of electromagnetic emissions of propulsion inverters for electric vehicles," PhD Thesis 2020 RWTH Aachen University, DOI: 10.18154/RWTH-2020-09215.
- M. Neubert, "Modeling, synthesis and operation of multiport-active bridge converters," PhD Thesis 2020 RWTH Aachen University, 10 kV SiC MOSFETs for 5 kVdc to +/- 375 Vdc DAB converter, DOI: 10.18154/ RWTH-2020-10814.
- (9) A. Hofmann, F. Qi, T. Lange and R. W. De Doncker, "The breathing mode-shape 0: Is it the main acoustic issue in the PMSMs of today's electric vehicles?," 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China, 2014, pp. 3067-3073, DOI: 10.1109/ICEMS. 2014. 7014021.
- (10) A. Klein-Hessling, A. Hofmann and R. W. De Doncker, "Direct instantaneous torque and force control: A novel control approach for switched reluctance machines," 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, ID, USA, 2015, pp. 922-928, DOI: 10.1109/IEMDC. 2015. 7409171.



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)や炭化けい素 (SiC)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 6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造に

ることができるので、インバータへの応用に十分なス よって 2.2 ~ 3.3 eV のバンドギャップを持つワイド 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、きるとして実用化が進められている。

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 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 イグナイ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)を、小容量のパワーコンディショ ナ (PCS: Power Conditioning System) 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6in1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

項目		M653(従来品)	M675(開発品)
ム毎	表面	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	
2 V EZ	裏面	A Sector	and and
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- (mm)	ſズ	W162×D116×H24(同一パッケージ	

「M653」と「M675」の比較 表1

(*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

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 パワー半導体素子の IGBT や MOSFET を 1 素子、ま 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100kWから 140kW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 "eAxle"の開発が活発化している。 eAxle 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_{vi}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℃ 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 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 2,300 V「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、 DC1,000 Vから DC1,500 V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1,700 Vと3,300 VのXシリーズIGBTモジュールがあるが、定格電圧1,700 Vでは入力電圧DC1,500 Vに対して耐圧が不足し、定格電圧3,300 Vでは耐圧が過剰で損失が増大するため、入力電圧DC1,500 V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 2,300 V 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 3,300 V 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 2,300 V「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。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。



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 ppm/℃のモジュール内蔵ゲート抵抗チップ(図



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*_{cn}

±,	ターンオン時のスイッチング損失 <i>E</i> on			
リンフル	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、Superjuction (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及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 「FA1A60N」とLLC電流共振制御IC「FA6B20N」.富士 電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.283-288.
- (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。

富士電機技報 2023 vol.96 no.4

中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」

"M675" New IGBT Module for BEVs in China

髙島	健介	TAKASHIMA, Kensuke	吉田	崇一	YOSHIDA, Soichi	立石	義博	TATEISHI, Yoshihiro	
----	----	--------------------	----	----	-----------------	----	----	---------------------	--

近年、世界的に自動車の電動化が加速し特に中国では世界最大の BEV 市場が形成され、大型車両の需要が高まっており、パワーモジュールは高出力化、高電力密度化が求められている。富士電機は、140 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとして、新型 IGBT モジュール「M675」を開発した。低損失な RC-IGBT、高放熱な冷却器の組合せにより、従来品「M653」と本体サイズは同じでありながら、発生損失を 13% 低減、熱抵抗を 20% 低減し、出力電流を 30% 増加させた。その結果、高電力密度化を実現し、ターゲットとするモータ出力容量を M653 の 100 kW から 140 kW まで拡大した。

The electrification of automobiles has recently accelerated worldwide. Especially in China, where the world's largest BEV market has developed, the demand for large vehicles is increasing, so has the demand for power modules with higher output and power density. Fuji Electric has developed the "M675" new IGBT module for motors with output capacities of 140 kW class. By combining a low-loss RC-IGBT and high thermal performance cooler, it has reduced power loss by 13% and thermal resistance by 20% and has increased output current by 30%, while maintaining the same dimensions as the conventional "M653". Consequently, it achieves a higher power density and increases the targeted motor output capacity to 140 kW compared to the 100 kW of the M653.

1 まえがき

近年、気候変動問題の解決を目指し "2050年カーボン 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、 ハイブリット自動車(HEV: Hybrid Electric Vehicle) やプラグインハイブリット自動車(PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、電気自動車(BEV: Battery 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。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、車両には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。車両の大型 化に向けては、駆動モータの制御に用いるインバータユ ニットを小型化してエンジンルームの限られたスペースに 搭載した上で、高出力化、低損失化する必要があり、"高 電力密度化"が重要となる。そのため、インバータユニッ トの心臓部であるパワーモジュールにも高電力密度化が要 求されている。

このような背景から、富士電機は、パワーモジュールの 高電力密度化を行う上で必要な半導体技術および冷却技術 の開発に取り組んでいる。半導体技術では、チップ搭載 面積削減によるパワーモジュールの小型化に向け、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD (Free Wheel Diode)の二つの役割のチップを1チップ化した RC-IGBT (Reverse-Conducting IGBT)技術に取り組 んできた。冷却技術では、フィンとウォータージャケット の隙間をなくすことで冷媒の流速を増加させ冷却性能を向 上させたウォータージャケット一体型フィンの開発に取り 組んできた。これらの技術を適用して高電力密度を実現し、 2017年に100kWクラスのモータ出力容量帯をターゲットとした6in1パワーモジュール「M653」をリリースした。

今回、M653 に対し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し、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 中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」を開発 した。

2 「M675」の特徴

今回開発した M675 (定格 750 V/820 A)は、三相イ ンバータ回路を一つのモジュールに集積した 6 in 1 パワー モジュールである。図1 に M675 の外観を示す。また、表 1 に M653 と M675 の比較を示す。さらなる高電力密度 化を実現するために、チップ性能および冷却性能を向上 させた結果、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。また、既に M653 を使用して いる顧客がインバータ周辺の設計資産を流用できるように、 M653 と同一の端子ケースを採用するとともに、冷却器 のインバータとの取付け部を同一寸法として、M653 と



図1「M675」

表1 「M653」と「M675」の比較

項目		M653(従来品)	M675(開発品)
(力) 先日	表面	A. S	
外觀 裏面	裏面	Teste	n.e.
モータ出力容量	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×H2	24(同一パッケージ)

の互換性を確保した。このパワーモジュールの特徴の概要 を M653 と比較して次に示す。

(1) チップ技術

M653 で使用していた第7世代 RC-IGBT に対し、 フィールドストップ (FS) 層の最適化によるチップの薄 型化および新規ライフタイムコントロール手法の適用によ り、低損失化を実現した。この新型チップはチップサイズ が従来と大きく変わらないため、M653 と同一パッケー ジへの搭載が可能である。詳細は3章で述べる。

(2) 冷却器構造

従来のウォータージャケット一体型フィンのコンセプト は維持し、冷却器内部のフィンの形状を従来の波フィン構 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。また、水路穴やモジュール締結穴位置を M653 と共 通にすることで、既存モデルからの置換えを容易にした。 詳細は④章で述べる。

3 第7世代 RC-IGBT の性能向上

3.1 「M675」向け RC-IGBT の改良点

M675 には、第7世代 RC-IGBT をさらに性能向上さ せた新規設計のチップを搭載している。図2に、M675 向



図2 第7世代 RC-IGBT の断面図の比較

富士電機技報 2023 vol.96 no.4

け第7世代 RC-IGBT と従来の第7世代 RC-IGBT の断 面図の比較を示す。M675向け RC-IGBT の改良点を次 に示す。

(1) FS 層の最適化によるチップの薄型化

RC-IGBT では、チップの薄型化により導通損失および スイッチング損失を低減できるが、チップを薄くすると耐 圧が低下してしまい、損失低減と耐圧はトレードオフの 関係にある。M675向け第7世代 RC-IGBT では、この トレードオフの関係を改善するため FS 層の不純物濃度と 分布を最適化し、高い耐圧を実現した。これにより、従来 チップと同等の耐圧を確保しつつチップを薄型化し、導通 損失およびスイッチング損失を低減した。

(2) 新規ライフタイムコントロール手法の適用

RC-IGBT は、IGBT と FWD を 1 チップ化することに より小面積化しているが、それぞれのチップ特性の最適化 は製造上難しい。例えば、FWD の逆回復電流調整のため に結晶欠陥を導入するライフタイムコントロールを行えば、 FWD の逆回復損失 $E_{\rm rr}$ は低減できるが、導通損失となる IGBT のコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{\rm CE (sat)}$ や、FWD のダイオード順方向電圧 $V_{\rm F}$ は増加してしまう。この問題 を解決するため、ライフタイム分布を最適化する新規ラ イフタイムコントロール手法を開発し、M675 向け RC-IGBT チップに適用した。この新規手法により、 $E_{\rm rr}$ と導 通損失の双方を低減することができた。

これら二つの改良により、M675向けの RC-IGBT では、 従来の第7世代 IGBT と比較して耐圧を維持しつつ、損 失を低減した。

3.2 損失低減

図3に、M653とM675の出力特性の比較を示す。 M675では搭載チップの改良により、同じコレクタ電流 *I*cにおいて、*V*_{CE (sat)}を15%低減している。

図4に、M653とM675の動特性波形とスイッチン グ損失を示す。M675のスイッチング損失(ターンオン 損失 *E*_{on}+ターンオフ損失 *E*_{off}+*E*_{rr})は136.2 mJ となり、 M653の127.9 mJ に対し6% 低減した。

次に、M675とM653を三相インバータにて同一の条







図4 動特性波形とスイッチング損失

件で運転したときの発生損失を試算した。図5 に示すとおり、M675 では導通損失およびスイッチング損失が改善 され、トータルの発生損失を13% 低減できる。

4 新型冷却器構造

4.1 「M675」向け冷却器の改良点

パワーモジュールの高電力密度化を実現するには、チッ プの低損失化に加え、冷却性能の向上も有効である。 M675では、従来の冷却器に比べて大幅に冷却性能を向 上した新型冷却器を開発し適用した。新型冷却器では、冷







却器内部のフィン構造を改良した。

図6にM653 およびM675 に適用している冷却器の内 部構造を示す。M653の冷却器内部は波フィン構造を採 用していたが、M675 搭載の新型冷却器ではピンフィン 構造を採用した。このピンフィン構造では、波フィン構造 に比べて冷媒の流路が限定されないため熱を逃がしやすく、 さらに冷媒とフィンの接触面積を増加させることにより冷 却性能を向上している。

4.2 冷却性能向上

図7に新型冷却器と従来の冷却器の圧力損失と熱抵抗の トレードオフ関係を示す。一般的に冷却器の圧力損失と熱 抵抗はトレードオフの関係にあるが、新型冷却器構造を採 用した M675 ではフィン形状の改良により、このトレー ドオフ関係を改善した。同じ圧力損失条件で比較すると、 M675 は M653 と比べて熱抵抗が 20% 低減しており、圧



図6 冷却器の内部構造

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図7 圧力損失と熱抵抗のトレードオフ関係

力損失を M653 と同等に維持しつつ、高出力化が可能で ある。一方、M675 は M653 に対して低い圧力損失で同 じ熱抵抗を実現しており、車両の電動ウォーターポンプの 消費電力削減による電力効率向上に貢献する。

これに加え、M675 に搭載している新型冷却器は、従 来の冷却器と同じウォータージャケット一体型構造を採用 しており、顧客側でのウォータージャケットが不要であり 熱設計を容易としている。また、冷却水の水路穴位置やモ ジュール締結穴位置も同一設計としており、M653 との 置換えが容易な構造とした。

5 出力電流の向上

図8に、M653とM675の出力電流とチップ接合温度 の関係を示す。第7世代RC-IGBTに改良を加えたチッ プと新型冷却器構造の適用により、M675はM653に比 べて、同一チップ接合温度において出力電流が30%増 加した。これにより、適用可能なモータ出力容量帯を 100kWから140kWに拡大した。



図8 出力電流とチップ接合温度の関係

6 あとがき

本稿では、性能向上した第7世代 RC-IGBT チップお よび新型冷却器構造を採用した「M675」モジュールにつ いて述べた。今回開発した車載用 IGBT モジュール M675 は、従来品「M653」に比べて適用電流を30%増加し、 適用可能なモータ出力容量帯を100 kW から140 kW に 拡大した。

今後も電動車インバータシステムの高電力密度化の要求 に応えて電動車の普及を後押しし、カーボンニュートラル 実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用RC-IGBT. 富士 電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (2) Higuchi, K. et al, "New Standard 800 A/750 V IGBT module technology for automotive application". PCIM Europe 2015, p.1137–1144.
- (3) Gohara, H. et al, "Next-Gen IGBT module structure for hybrid vehicle with cooling performance and high temperature operation". PCIM Europe 2014, p.1187– 1194.
- (4) Adachi, S. et al, "Automotive power module technologies for high speed switching". PCIM Europe 2016, p.1956–1962.
- (5) Adachi, S. et al, "Ultra–Compact Automotive Power Module for 100 kW xEV Application". PCIM Europe 2022, p.1035–1038.



髙島 健介

電気・ハイブリッド自動車用 IGBT 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 本部電装事業部電装設計第一部。



吉田 崇一

車載用パワー半導体素子の開発に従事。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。

立石 義博

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に 従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開 発統括部パッケージ開発部。

xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上

Improved Power Cycle Reliability for xEV Modules

中村 瑶子 NAKAMURA, Yoko 渡壁 翼 WATAKABE, Tsubasa 浅井 竜彦	ASAI, Tatsuhiko
---	-----------------

電動車において、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の開発が進んでおり、このシ ステムに搭載されるパワーモジュールも高電力密度化・高信頼化が必要である。富士電機が開発した第4世代車載用パワー モジュールでは、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、さらなる高信頼性確保のため、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_{vi}パワーサイクル耐量は1.3倍に向上した。

Integrated mechanical and electrical systems for electrified vehicles are being widely developed. They include drive systems, such as inverters and motors, and power modules for the components are also in need of high power density and reliability. Fuji Electric's 4th-generation automotive power module achieves high power density and high reliability by suppressing thermal deformation through the use of lead frame wiring and a resin molding structure. In order to ensure higher reliability, we have developed a lead frame roughening technology that improves resin adhesion. Compared to untreated roughening, this technology improves adhesion twofold or more and improves the module's ΔT_{vi} power cycle reliability by a factor of 1.3.

1 まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けて、CO₂排出量 削減が世界各国で重要性を増している。自動車産業で は、CO₂の排出量を削減するため、ハイブリット自動 車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) やプラグインハ イブリット 自動車 (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、電気自動車(BEV: Battery Electric Vehicle) のように、電気を動力源としてモータで走行する電動車 (xEV)の普及を加速している。電動化においては、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 "eAxle"の開発が活発化している。eAxle は、 自動車の中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や、低燃費(電 費)を実現するために軽量かつ高効率であることが求めら れている。昨今、大型車の電動化が進んでおり、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求められ、 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。

2 高電力密度・高信頼性を実現するパッケージ技術

2.1 高電力密度化、高信頼化に向けた取組み

図1に、富士電機の車載用パワーモジュール電力密度の 年次推移を示す。これまで高放熱冷却器や高信頼性はんだ 2⁽¹⁾ 技術、超音波接合技術、175℃連続動作保証対応技術、な らびに半導体素子(チップ)である IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)と FWD(Free Wheeling Diode)を一体化した RC-IGBT(逆導通 IGBT: Reverse Conducting IGBT)を開発し、パワーモジュー ルの高電力密度化を実現してきた。

図2に車載用 IGBT モジュールの構造の比較を示す。第



図1 富士電機の車載用パワーモジュール電力密度の年次推移

4世代では、高電力密度と高信頼性を達成するため、リー ドフレーム配線技術と樹脂封止を適用している。封止材料 を従来のゲルに替えてエポキシなどの固形樹脂とすること により、温度変化に伴うモジュール内部部材の熱変形を抑 制し、モジュール部材間の線膨張係数差に起因するひずみ を低減した。これにより、高いΔT_{vi}パワーサイクル耐量 (パワーサイクル寿命)を確保した。また、図3に内部レ イアウトの比較を示す。アルミニウムワイヤを用いる場合、 電流容量に応じた本数のワイヤを配線しボンディングエリ アを確保する必要があった。一方で、リードフレーム配線 は、銅製のリードフレームと絶縁基板銅回路および半導体 チップをはんだで接合している。導電率の高い銅材を用い ることにより、アルミニウムワイヤ配線と比較して実装面 積を15%縮小した。これにより、モジュール面積を削減 しモジュール体積当たりの電力密度を36%向上した。







図3 内部レイアウトの比較

2.2 高電力密度化・高信頼化の課題

2.1節で述べたように、第4世代モジュールは、樹脂 封止およびリードフレーム配線の適用により高いΔT_{vj}パ ワーサイクル耐量を確保している。通電によるモジュール 内部部材の熱変形を樹脂封止で抑制しているが、高出力化 が進みチップの発熱が増えると部材の熱変形が大きくなり、 接合部における熱応力が樹脂の密着力を上回って樹脂剝離 が発生する懸念がある。リードフレームとの間で樹脂剝離 が進むと、チップ周辺の接合部の熱変形抑制効果が弱まり、 チップ周辺の熱変形が増大することに伴い故障が発生する。 特に、チップの発熱と冷却を繰り返すパワーサイクル下で は、樹脂剝離とそれに伴う亀裂が進展しやすい。そのため、 さらなる高出力と高信頼性の両立には樹脂とリードフレー ムの密着性を向上する必要がある。

樹脂密着性を向上させる手法としては、密着助剤の添加 や熱処理、プライマー材などによるコーティング処理と

富士電機技報 2023 vol.96 no.4

いった化学的に密着性を向上する手法と、表面凹凸形状に よるアンカー効果を利用して物理的に密着性を向上する手 法が挙げられる。後者は、必要な部分に選択的に加工がで きることから、樹脂密着性向上手法としてリードフレーム の表面粗化を選定した。

3 リードフレーム粗化による密着性向上技術

3.1 リードフレーム面粗さと密着強度の関係

図4に面粗さと密着強度の関係を示す。ここで、面粗さ を適切に表すパラメータとして、表面積の増加分に着目し た*Sdr*(展開面積比)を選定した。*Sdr*は、表面積の増加 割合を表し、表面積*A*₁とその表面を XY 平面に投影した 時の面積*A*₀から増加割合を求め、式(1)のように表される。

 $Sdr = \{ (A_1/A_0) - 1 \} \times 100 (\%) \dots (1)$

Sdr の増加とともに密着強度が増加し、Sdr が 0.2 より も大きいと密着強度が飽和した。また、Sdr が 0.2 付近を 境に破壊モードが異なることが分かった。Sdr が 0.2 より も小さい領域では界面破壊が主となるのに対し、Sdr が 0.2 よりも大きい領域では凝集破壊が主となり、密着強度 が樹脂のバルク強度を上回った。

この結果から、Sdrを増すことにより、樹脂が微細構造 に入り込むアンカー効果(投錨効果)が生まれており、粗 化処理により、従来の粗化未処理の試料に比べて2倍以 上の密着強度が得られることが確認できた。

3.2 粗化手法の選定

表1に粗化未処理状態と各種手法による粗化後の表面状 態を示す。各手法の利点と欠点は次のとおりである。

(1) 粗化未処理

リードフレーム表面の銅素地は平滑であり、Sdr は 0.04 ~ 0.1 と小さく、密着強度も低い。

(2) 薬液エッチング

薬液によるエッチングで微小凹凸を形成する手法である。 一度に複数のリードフレームを処理することが可能である。



図4 面粗さと密着強度の関係

粗化手法 (a) 粗化未奶理 (b) 薬液エッチング 外観 ----Sdr $0.2 \sim 0.5$ $0.04 \sim 0.1$ 粗化手法 (c) レーザ照射 (d) 金型プレス 外観 自己的 () () Sdr $0.2 \sim 1.0$ $0.1 \sim 0.3$

表1 粗化未処理状態と各種手法による粗化後の表面状態

しかし、エッチング液の管理が必要であり、粗さのコント ロールが難しい。

(3) レーザ照射

レーザを照射することで、表面に微小なクレーター状の 穴を形成する粗化手法である。粗化形状の自由度が高く、 粗さのコントロールが比較的容易である。しかし、加工時 に発生する微粒子(パーティクル)の管理が必要となる。 (4) 金型プレス

複数の微小突起を設けた金型でリードフレーム表面にプレス加工を行い、微小な凹みを形成する粗化手法である。 リードフレーム製造段階で粗化加工できるため、粗化のための製造工程を削減できる利点がある。しかし、金型の微 細加工の制約から粗さの制御範囲が小さい。

これらの比較検討の結果から、粗化形状の自由度が高く、 安定的に粗化処理ができるレーザ照射を選定した。

3.3 粗化形状の最適化

図5にレーザ照射による粗化加工の模式図を示す。レー ザをリードフレーム表面に照射すると、クレーター状の窪 み(スポット)が形成される。ガルバノスキャナを用い、 リードフレーム表面をなぞるように走査することにより、 面内に等間隔でスポットを形成することができる。

レーザ粗化において表面状態に影響を及ぼす主要なパラ



図5 レーザ照射による粗化加工の模式図

メータには、(1)波長、(2)出力、(3)走査スピードがあり、各 パラメータによるスポット形状の制御性を確認した。 (1) 波長

汎用のレーザ装置の出力波長として、約1,000 nm(赤 外レーザ)か約500 nm(緑レーザ)が用いられている。 緑レーザはリードフレームの素材である銅への吸収率が優 れるが、出力の制御範囲が小さく、粗さのコントロール 範囲が狭いことが分かった。一方で、赤外レーザは銅への 吸収率は低いものの、出力の制御範囲が広く、粗さのコ ントロール性に優れていることを確認した。このことから、 リードフレームの粗化には赤外レーザを選定した。 (2) 出力

赤外レーザの出力を変えて粗化加工を行い、形成された スポットの直径を測定したところ、スポットの直径は出力 に比例することが分かった。一方、スポット深さはレーザ 出力に依存しなかった。これは、銅に対する赤外レーザの 吸収が小さく、熱エネルギーの影響が表層近くのみに留 まったためであると考えられる。このことから、レーザ出 力を調整することにより、一定の深さで任意の直径のス ポットを形成できることが分かった。

(3) 走査スピード

等時間間隔で出力されるレーザの走査スピードを変える ことにより、スポットが並ぶ間隔(ピッチ)をコントロー ルできることを確認した。

図6に、レーザ出力と走査スピードの二つのパラメータ を変更して粗化加工した際の粗化加工条件と粗化形状を示 す。レーザ出力を大きくするにつれてスポットの直径が大 きくなることが分かる。一方、走査スピードを上げるに つれて、スポット間の間隔は大きくなっている。図6(A) では、レーザ出力が小さく走査スピードが速いため、比 較的小さなスポットが離隔して並んでいる。図6(I)で はレーザ出力が大きく、走査スピードが遅いためスポッ ト同士が重なり合い、境界線が見えなくなっている。Sdr



図6 粗化加工条件と粗化形状



図7 断面形状の模式図

で比較すると、図6(A)が最小で0.24、図6(I)が最大 で0.90となった。密着性の観点では、ピッチを小さくし、 粗さを大きくすることが望ましく、図6(E)~図6(I) が適している。しかし、図6(F)、図6(H)、図6(I)の ようにスポットの密度を上げすぎると、加工に伴い発生す るパーティクルが多くなってしまう。図7に図6(A)と 図6(I)の断面形状の模式図を示す。図7(b)の図6(I) のようにスポットが重なっている場合、表面に溶融スパッ タが堆積した層が形成されており、破壊の起点となる恐れ がある。

このように、密着性を確保するために十分な Sdr が得られパーティクル発生が少ない加工条件として、図6(E) が最適であることが確認できた。

4 粗化加工適用によるモジュールの信頼性向上

レーザ粗化による信頼性向上効果を確認するため、レー ザ粗化したリードフレームを用いてモジュールを作製し、 *ΔT_{vi}パワーサイクル*試験を実施した。

図8にレーザ粗化を施した粗化エリアを示す。事前の信 頼性試験の結果から、リードフレームと樹脂の剝離が発生 しやすいのは、発熱源であるチップと接する部分であるこ とを確認しており、当該箇所にのみレーザ粗化を施した。

図9にレーザ粗化処理の有無による*AT_{vi}パワーサイク* ル耐量とパワーサイクル試験後の超音波映像装置(SAT: Scanning Acoustic Tomography)の観察結果の比較を 示す。粗化未処理のモジュールに対して、レーザ粗化した モジュールでは 1.3 倍に耐量が向上した。SAT 観察により、 粗化未処理ではリードフレーム上面に剝離があるのに対し、









図 9 *Δ T_{vj} パワーサイクル*耐量と SAT 観察結果の比較

レーザ粗化したものは剝離が生じていないことを確認した。 粗化未処理ではリードフレームと樹脂が剝離して封止樹脂 の変形抑制効果が弱まるためチップ周辺の熱変形が増大し、 早期に寿命に達した。今回、レーザ粗化により剝離が防止 されたことで、樹脂封止の熱変形抑制効果が維持され、長 寿命となった。

5 あとがき

本稿では、車載パワーモジュールの高電力密度化と高信 頼化を達成するために開発したリードフレーム - 樹脂封止 構造について述べた。また、さらなる出力向上、信頼性向 上に向けリードフレーム粗化技術に着目し、封止樹脂と リードフレームの密着力向上によってパワーモジュールの ΔT_{vi}パワーサイクル耐量を向上できることを報告した。

今後もパワーモジュールの性能向上を実現する技術開発 を推進し、お客さまの要求に応える製品をタイムリーに提 供すること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) 郷原広道ほか.ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術.富士電機技報.2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (2) 郷原広道ほか.ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直 接水冷パッケージ技術.富士電機技報.2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (3) 郷原広道ほか. 車載用第3世代パワーモジュールのパッケー ジ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.
- (4) 井上大輔ほか. xEV向け第4世代アルミニウム直接水冷パッ ケージ技術. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.238-242.
- (5) 佐藤憲一郎ほか. RC-IGBTを搭載した車載用第3世代直接 水冷型パワーモジュールの高機能化. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.
- (6) Osawa, A. et al. "The highest density IGBT module in the world for xEV power train". Proceedings of PCIM Europe 2017, p.1761–1766.



中村 瑶子

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に 従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開 発統括部パッケージ開発部。



渡壁 翼

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に 従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開 発統括部パッケージ開発部。



浅井 竜彦

IGBT 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開発統括部パッケージ開 発部課長。エレクトロニクス実装学会会員。

産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」

"HPnC" Industrial Large-Capacity IGBT Module

日達費	責久 HITACHI, Takahisa	川畑 潤也 KAWABATA. Junya	小平 悦宏 KODAIRA, Yoshihiro
-----	----------------------	-----------------------	--------------------------

温室効果ガスの排出量を削減するために、再生可能エネルギーが注目されている。今後のさらなる普及に向けて、発電 コストの低減および発電効率の向上のため、電力変換装置の大容量化が進んでいる。富士電機はこれに対応するため、並 列接続の容易さと出力容量の拡大を実現した、産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」を開発した。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 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。

Renewable energy has been highlighted as a means of reducing greenhouse gas emissions. For further promote its use, power conversion equipment capacity is increasing in order to reduce power generation costs and improve efficiency. Fuji Electric has accordingly developed the "HPnC" industrial large-capacity IGBT module, which can be easily connected in parallel and provides high output power. Products of a 1,700-V rating have increased approximately 33% available output current by using optimal internal structure. Products of a 2,300-V rating, which are developed for 1,500-V DC power conversion equipment, have increased the output power by approximately 18%.

1 まえがき

近年、世界各国で地球温暖化が原因と推定される異常気 象が問題となっている。そのため、地球温暖化の主な原因 である温室効果ガスの排出量を削減することができる太陽 光・風力発電などの再生可能エネルギーが注目され、普及 が進んでいる。再生可能エネルギー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求められて いる。そのためには電力変換装置の大容量化が有効であり、 使用する半導体モジュールには、高電流密度化や高耐電圧 化が期待されている。加えて、並列接続の容易さも要求さ れている。

富士電機ではこれらの要求に応えるために、再生可能エ ネルギーなど産業用の高出力アプリケーション向け大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール 製品として、「HPnC」(High Power next Core)を開発 した(図1)。



図 1 大容量 IGBT モジュール「HPnC」

2 電力変換装置における入力電圧の高電圧化

現在は電力変換装置の入力電圧が DC1,000 V のシステ ムが主流であるが、さらなる発電コストの低減や発電効率 の向上のため、入力電圧 DC1,500 V システムの導入が進 んでいる。太陽光発電システムの構成例を図2 に示す。電 力変換装置において、DC1,000 V システムと DC1,500 V システムを比較すると、DC1,500 V システムの方が電圧 が高いため、太陽光パネルの直列接続数を 1.5 倍に増やす ことができる。それに伴い、使用するケーブル量や電力変 換装置や変圧器数が 2/3 になり、これら周辺部材や機器 のコストを低減できる。また、電圧を上げることで電流が 減り、電圧降下に伴う電力損失が小さくなるため、発電効 率が向上する。

表1にDC1,500Vシステムにおける2レベルインバー タと3レベルインバータの比較を示す。大容量の電力変 換装置では、IGBTモジュールを多並列接続して使用す ることが多く、2レベルインバータの方が、回路が単純 で主回路の配線が容易な上に部品点数も少なく、多並列 化に有利である。従来のDC1,000V入力の2レベルイ ンバータには定格電圧1,700VのIGBTモジュールが使 用されているが、DC1,500V入力に対しては電圧容量が 足りず、適した定格電圧のラインアップがなかった。そ こで今回、DC1,500V入力に適した定格電圧2,300V のIGBTモジュールを開発した。これを使用することで、 DC1,500Vに対して2レベルインバータを適用して回路 構成を簡素化し部品点数を削減でき、多並列接続が容易に なる。



図2 太陽光発電システムの構成例

表1 DC1,500 V システムにおける 2 レベルインバータと 3 レベルインバータの比較

項目	2レベルインバータ		3レベルインバータ	
回路構成	主回路配線が容易(主回路配線が複雑	×
部品点数	少ない	0	多い	×
多並列化	向き	0	不向き	×
素子定格電圧	2,300 V	-	1,700 V	-
モジュール1台 当たりの損失	大きい >		小さい	0
回路例				

3 製品ラインアップ

表 2に HPnC の製品 ラインアップを示す。定格電圧 1,700 V で定格電流 1,200 A/1,500 A/1,800 A、定格電圧 2,300 V で定格電流 1,200 A のモジュールをラインアッ プした。定格電圧 1,700 V 品は DC1,000 V 入力に適して おり、従来品に比べて小型で高効率となっている。定格 電圧 2,300 V 品は 2 レベルインバータにて DC1,500 V 入 力に対応できる。IGBT チップと FWD (Free Wheeling Diode) チップは、低損失の第 7 世代「X シリーズ」技術 を採用しており、回路構成は 2 in 1 である。サーミスタ

表 2 「HPnC」の製品ラインアップ

製品型式	定格電圧(V)	定格電流(A)
2MBI1200XZF170-50		1,200
2MBI1500XZF170-50	1,700	1,500
2MBI1800XZF170-50		1,800
2MBI1200XZF230-50	2,300	1,200

を内蔵しており、モジュール内部の温度検知が可能であ る。高放熱性を確保するため、絶縁基板には窒化アルミ ニウム (AlN) セラミックを、ベース材には銅 (Cu)を 採用している。また、ケース材料に高 CTI (比較トラッキ ング指数: Comparative Tracking Index) 樹脂を採用し て、絶縁耐量を上げることで、従来品の耐圧 1,700 Vか ら 2,300 V までに対応したパッケージとなっている。

4 「HPnC」の特徴

4.1 電流密度の向上

HPnCは、内部構造の最適化によるチップ搭載エリ アの拡大により電流密度が向上している。表3に定格 1,700 V/1,800 A の HPnC と従来品である PrimePACK[™] のチップ搭載エリアの比較を示す。ベースプレート面積 に対するチップ搭載エリアの比率は、PrimePACK[™] の 21.7% に対し、HPnCは28.4% となり約7%向上し た。チップの占有面積が増えた結果、ベースプレート面 積に対する電流密度は定格1,700 V/1,800 A 品の場合、 PrimePACK[™] は8.1 A/cm²であるのに対して、HPnC は 12.9 A/cm² と約 1.6 倍になり、小型パッケージでより大 きな電流を出力可能となった。電流密度の向上により、電 力変換装置は同一設置面積で出力容量を拡大できる。

表3 チップ搭載エリアの比較

	PrimePACK™*		HPnC	
項目	面積(cm²)	対ベース プレート	面積(cm²)	対ベース プレート
ベースプレート	222.5	21.7%	140.0	20 / 0/
チップ	48.2	21.7 %	39.8	20.4 %

* PrimePACK™: Infineon Technologies AGの商標または登録商標

<注> PrimePACK™: Infineon Technologies AGの商標または登 録商標 特集



図3 並列接続時の取付け状態の比較

4.2 並列接続の容易さ

従来の大容量製品で並列接続する場合、GDU(ゲート駆動回路:Gate Drive Unit) 基板が主電流経路の 端子位置と重なるためブスバーと干渉し、組立性が悪い。図3に並列接続時の取付け状態の比較を示す。例と して、同一設置面積となる HPnC3 台と、従来品である PrimePACK™2 台を並列接続した状態とした。

GDU 基板の取付けを想定した場合、PrimePACK™ ではGDU 基板がAC ブスバーの直下に配置されるため、 GDU 基板上の搭載部品がAC ブスバーと干渉する可能性 がある。HPnC ではPN 端子とAC 端子を離して配置する ことにより、ブスバーとの干渉を解消した。

また、PrimePACK™ は AC 端子を挟んで GDU 基板を 取り付けるため、並列接続する際の GDU への配線が複雑 であった。HPnC では PN 端子と AC 端子が離れているこ とで、GDU 基板への配線が PN 端子や AC 端子と干渉す ることがなくなった。これらにより、並列接続が容易に なった。

5 電力変換装置への適用効果

5.1 出力電流の増大(定格電圧 1,700 V 品)

定格電圧 1,700 V 品は、前述のとおり電流密度を向上し、 パッケージを小型化した。ベースプレート面積を比較す ると、PrimePACKTM は 2 台で 445 cm² (222.5 cm²×2) となるが、HPnC では同一設置面積に 3 台 (420 cm² : 140 cm²×3) 搭載できる。これらをそれぞれ並列に接続 した場合のコレクタ電流 I_{c} -コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} 特性を図4に示す。同じ V_{CE} で比較した HPnC の I_{c} は約 1.25 倍となり、同一設置面積でより多くの電流が流



図 4 コレクタ電流 *I*_C-コレクタ・エミッタ間電圧 *V*_{CE} 特性(定格電圧:1,700 V)

せることがわかる。

図5 にインバータ発生損失の比較を示す。図4 の特性を 反映すると IGBT の導通損失が約 15% 低減し、インバー 夕発生損失は HPnC が 2,701 W となり PrimePACK™ の 3,060 W に比べ約 12% 低減する。

図6に出力電流と IGBT 接合温度の関係を示す。IGBT 接合温度 *T*_{vj}=125 ℃の時の IGBT の出力電流は HPnC で 1,850 A となり、PrimePACK[™] の 1,390 A に対して約 33% 増やすことができる。

このように、HPnCは同一設置面積で大電流化できる ため、電力変換装置の大容量化に貢献する。

5.2 出力容量の拡大(定格電圧 2,300 V 品)

HPnC では、PrimePACK[™] にない定格電圧 2,300 V 品 をラインアップしている。DC1,500 V 対応の 2,300 V 品 を使用することで、DC1,000 V 対応の 1,700 V 品と比べ て、同一設置面積における出力容量を上げることができる。 図7に出力容量と IGBT 接合温度の関係を示す。5.1 節





図6 出力電流と IGBT 接合温度の比較(定格電圧: 1,700 V)



図7 出力容量と IGBT 接合温度(定格電圧: 2,300 V、1,700 V)

と同様に、同一設置面積となるよう PrimePACKTM は 2 台、 HPnC は 3 台として、PrimePACKTM は定格電圧 1,700 V 品を、HPnC は定格電圧 2,300 V 品を使用した場合の出 力容量を比較した。IGBT 接合温度 T_{vj} =125 °Cにおける HPnC の出力容量は 1.97 MW となり、PrimePACKTM の 1.67 MW に比べ約 18% 拡大することができる。2,300 V 品は 1,700 V 品に対して動作電圧が上がるため、出力容 量を増大しても低電流で動作できる。低電流では電圧降下 に伴う電力損失が下がるため、電力変換装置の効率が向上 する。

6 あとがき

今回開発した「HPnC」は、定格電圧 1,700 V 品は主 に DC1,000 V のシステム向けに、定格電圧 2,300 V 品は DC1,500 V のシステム向けにラインアップした。電力変 換装置の大容量化に対応するため、モジュール 1 台当た りの電流密度が向上するとともに、並列接続が簡単にでき る構造とした。また、電力変換装置のさらなる高効率化 に向け、低損失の SiC(炭化けい素)-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)チップ を搭載した定格電圧 2,300 V 品の開発も進めている。

今後も、再生可能エネルギーのさらなる発電コストの低 減と発電効率の向上に貢献できるよう、製品開発を進めて いく所存である。

参考文献

- (1) S. Chen et al. "Application of Newly–Developed
 2.3 kV Si and SiC Devices to Renewable Energy
 System". Proceeding of PCIM Europe 2023, p.696–700.
- (2) 関野裕介ほか.大容量SiCハイブリッドモジュール 「HPnC」、富士電機技報.2017, vol.90, no.4, p.228-232.



日達貴久

産業用 Si-IGBT モジュール、SiC-MOSFET 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。



川畑 潤也

産業用 Si-IGBT モジュール、SiC-MOSFET 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。



小平 悦宏

産業用 Si-IGBT モジュール、SiC-MOSFET 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。

第7世代「Xシリーズ」中容量 IGBT-IPM「P638」

"P638" 7th-Generation "X Series" Medium Capacity IGBT-IPM

藤井	優孝 FUJII, Masanari	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、低損失化の要求に応えるため、新パッケージ「P638」を適用した第7 世代「Xシリーズ」IGBT-IPMを開発した。この製品は、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る発生損失の10%低減と、第7世代のパッケージ技術の適用によ る150℃での高温動作化の両方を実現することで、連続動作時の負荷電流を第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。

Fuji Electric has developed a 7th-generation "X Series" IGBT-IPM, which utilizes our new "P638" package to meet the demand for further miniaturization and lower loss in power converters. Compared to the "P630" 6th-generation IGBT-IPM, this 7th-generation product has a 54% smaller module footprint. The 7th-generation chip technology has reduced the generated loss by 10% and the 7th-generation package technology has increased the operating temperature to 150°C, allowing the P638 to have the higher continuous load current than that of the P630 6th-generation IGBT-IPM by 28%.

1 まえがき

近年、地球温暖化対策が世界共通の課題となり、エネル ギーの有効利用が求められている。その対策として、電気 エネルギーを効率的に利用して、省エネルギー(省エネ) 化に貢献するパワーエレクトロニクス(パワエレ)機器へ の期待が高まっている。そのため、産業用ロボットや工作 用機械をはじめとした幅広い用途で利用されるパワエレ機 器である電力変換装置には、さらなる省エネ化が求められ ている。加えて、電力変換装置には、省スペースで高信頼 性であることも求められている。

これらを実現するためには、電力変換装置で使用するパ ワー半導体が低損失、小型、高信頼性であることが重要と なる。このパワー半導体の一つとして IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) チップとダイオードチッ プを搭載した IGBT モジュールがある。IGBT-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高機能な IGBT モジュールであり、高い信頼性が要求される NC 工 作用機械やロボットなど、さまざまな用途で使用されてい 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、第7世代のチップ技術とパッケージ技術 を適用し、従来製品より小型化した新パッケージ「P638」 を適用した第7世代 IGBT-IPM を開発し、系列化した。

2 製品概要と機能

2.1 製品外形

図1に新パッケージ P638の外観を示す。図2に今回 開発した第7世代 IGBT-IPM P638と同一出力定格の第

```
制御端子
(単位:mm)
がイドピン
(¢2.5×2)
M4
P 端子
V 端子
V 端子
22
55
90
```

図1 新パッケージ「P638」



図2 「P638」と「P630」の外形の比較

6世代 IGBT-IPM「P630」の外形の比較を示す。P638 は、モジュール設置面積を P630 に対して 54% 縮小した。 P630 と同様に装置のプリント基板への取り付けは、はん だ付けを必要としない M4 ねじ用のナット入り主端子と し、制御信号用の端子は、金めっきを行ったコネクタ用ピン端子を適用した。また、両端にガイドピンを設けることでプリント基板への挿入を容易にした。本モジュールの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化した6 in 1 構成とした。

2.2 ラインアップ

表1に第7世代 IGBT-IPM P638の製品ラインアップ を示す。定格電圧 650 V 系は定格電流 100 A と 150 A、 定格電圧 1,200 V 系は定格電流 50 A と 75 A のそれぞれ 2 系列を製品化した。

2.3 機能

表2に第7世代IGBT-IPMと第6世代IGBT-IPM の機能比較を示す。第7世代IGBT-IPMは、第6世代 IGBT-IPMに対して短絡保護の動作遅延時間を50%短

表1 第7世代 IGBT-IPM「P638」の製品ラインアップ

定格電圧	定格電流	製品型式
6501/	100 A	6MBP100XGN065-50
650 V	150 A	6MBP150XGN065-50
1 200 \/	50 A	6MBP50XGN120-50
1,200 V	75 A	6MBP75XGN120-50

表 2 第 7 世代 IGBT-IPM と第 6 世代 IGBT-IPM の機能比較

機能		第6世代IGBT-IPM	第7世代IGBT-IPM
	短絡保護	○ (動作遅延2µs)	◎ 高速化 (動作遅延1 µs)
保護機能	チップ過熱保護	(170℃±20℃)	◎ 高精度化 (182.5℃±7.5℃)
	電源電圧低下 保護	0	0
チップ温度 機能	ワーニング出力	_	ິ (≧150 ℃)

○は機能あり、◎は従来に対する機能向上、-は機能なし

縮するとともに、チップ過熱保護動作温度のばらつきを 約 60% 低減した。また、第 7 世代 IGBT-IPM は、第 6 世代 IGBT-IPM よりも最高動作温度が向上しているため、 チップ過熱保護の動作温度を 182.5 ℃に上げることによ り、使用可能な温度帯域を広げた。

さらなる高信頼性化要求に応えるため、第7世代 IGBT-IPMは、チップ温度が150℃以上になると、チッ プ過熱状態であることをチップ過熱保護動作より早く装置 側に警報として知らせる温度ワーニング出力機能を業界で 初めて搭載した。本機能を利用することにより、IGBT-IPM が過熱保護にて出力停止するより早く運転条件を緩 和することが可能となり、突然の装置停止による生産性の 低下を防ぐことができる。

図3にチップ温度ワーニング動作のタイミングチャート を示す。図3の①において、IGBT チップ接合温度 T_{vj} が チップワーニング温度 T_{jw} を超えると、ワーニング出力端 子電圧が High から Low となる。その際、スイッチング 動作は継続される。

図3の②では、①の状態の後も温度上昇が継続し、*T_{vj}*がチップ過熱保護温度*T_{jOH}*を超えたため過熱保護アラーム出力端子信号が High から Low となり、スイッチング動作を停止する。

図3の③では、 T_{vj} がワーニングリセット温度を下回り、 ワーニング出力端子電圧が Low から High に復帰する。

このように T_{jOH} は、IGBT のチップ温度が 175 ℃以上 になると動作し、保護アラームを出力するとともにスイッ チング動作を停止するが、チップ温度ワーニング出力機能 は、チップ温度ワーニングを出力した後もスイッチング動 作を継続する。

2.4 高温動作化

表3に、第7世代 IGBT-IPM と第6世代 IGBT-IPM の最高動作温度の比較を示す。第7世代 IGBT-IPM は、 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 んだの採用により、連続動作時チップ接合温度 *T*_{vjop} の最 高値を第6世代 IGBT-IPM の 125 ℃から 150 ℃に向上



図3 チップ温度ワーニング動作タイミングチャート

表3 最高動作温度の比較

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℃
連続動作時チップ 接合温度T _{vjop}	125℃	150 <i>°</i> C
最高チップ接合温度 T _{vjmax}	150℃	175℃

し、最高チップ接合温度 *T*_{vjmax}を第6世代 IGBT−IPM の 150 ℃から 175 ℃に向上した。

3 発生損失の低減

今回開発した P638 パッケージは、同一定格の第6世 代 IGBT-IPM P630 のパッケージよりも小型のためチッ プ搭載密度が上がり、チップ温度が上昇する懸念があった。 そこで、次の二つの取組みによって低損失化を図った。

- IGBT 導通損失の低減
- IGBT ターンオン損失の低減

3.1 IGBT 導通損失の低減

第7世代 IGBT-IPM の IGBT チップは、チップ表面の 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、導通損失 P_{sat} を低減した。

 P_{sat} は IGBT 導通時のコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{\text{CE (sat)}}$ と導通電流の積に比例する。また、この $V_{\text{CE (sat)}}$ は、 電流遮断時のターンオフ損失 E_{off} との間にトレードオフの 関係がある。図4に示すとおり、第7世代 IGBT-IPM は 第6世代 IGBT-IPM に対し、 $V_{\text{CE (sat)}}$ を低減できている。

図5 に定格 650 V/150 A IGBT-IPM の PWM インバー 夕動作時の発生損失シミュレーション結果を示す。第7 世代 IGBT-IPM は、発生損失に占める比率が最も大きい P_{sat} を下げるために、 V_{CE} (sat) を 0.4 V 低減した。これに より第7世代 IGBT-IPM は、PWM インバータ動作時の 発生損失全体の約 43% を占める IGBT の P_{sat} を、第6世 代 IGBT-IPM に比べて約 19% 低減した。



図4 コレクタ・エミッタ間飽和電圧 VCE(sat) とターンオフ損失 Eoff

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図5 発生損失シミュレーション結果

なお、一般に導通損失低減のために薄ウェーハ化すると 素子耐圧が低下するが、今回、薄ウェーハ化に伴う素子耐 圧の低下は、IGBT チップ裏面構造のフィールドストップ (FS)層を最適化することにより抑制した。

3.2 ターンオン損失

ー般に IGBT は、温度が高いほど電圧変化率 dv/dt が 小さくなり、スイッチングが遅くなるため、スイッチング 損失が増大する。そこで、第7世代 IGBT-IPM では、高 温時のターンオン損失 P_{on} を低減するために、IGBT チッ プに内蔵された温度センサの情報を制御 IC にフィード バックすることにより、高温時の dv/dt が小さくならな いよう IGBT のゲート駆動能力の切替えを制御 IC で行う ことにした。

その結果、発生損失全体の約 15% を占める IGBT の Pon を第6世代 IGBT-IPM に対して約6% 低減した。前 述の導通損失低減と合わせて、第7世代 IGBT-IPM の総 発生損失は、第6世代 IGBT-IPM に対して約 10% 低減 している。

3.3 放射ノイズ特性

一般にスイッチング損失を低減するために、ゲート駆動 電流を増加して dv/dt を大きくすると、放射ノイズが大 きくなる。そこで、放射ノイズ特性を評価した。

図6に放射ノイズ特性の評価結果を示す。第7世代 IGBT-IPMでは、ゲート駆動電流切替え後のdv/dtを第 6世代IGBT-IPMと同等になるように設計したことによ り、ノイズレベルが最大となる周波数60MHz近傍を含め、 全周波数帯域でノイズレベルが第6世代IGBT-IPMと同 等となっている。



図6 放射ノイズ特性の評価結果(相対比較試験結果)

④ 小型化と高出力化

図7に P638 パッケージと P630 パッケージの銅ベース サイズ比較を示す。P638 パッケージは、パッケージサイ ズを小型化するために、チップで発生した熱を放熱する銅 ベースの面積を P630 パッケージに対して 26% 縮小した。

図8 に連続動作時の温度分布比較(熱解析結果)を示す。 図8 (a)と図8 (b)は、第6世代 IGBT-IPM P630のケー ス温度が連続動作時に最高ケース温度 T_c =110 ℃となる 放熱条件にて第7世代 IGBT-IPM P638を動作させた ときの有限要素法 (FEM: Finite Element Method) に よる熱解析での温度分布の比較である。第7世代 IGBT-IPM P638 は銅ベースの面積縮小に伴い放熱性が低下して いるが、前述の損失低減によって最高ケース温度 T_c は第 6世代 IGBT-IPM P630 と同等となっている。第6世代 IGBT-IPM P630 は、 T_{vjop} が最高 125 ℃に対して、 T_{vj} は 115 ℃で、マージンが 10 ℃である。これに対して第7 世代 IGBT-IPM P638 は、チップの最高使用温度の向上 により、 T_{vjop} が最大 150 ℃であり、 T_{vj} の 114 ℃に対し、 36 ℃のマージンが確保されている。



また、図8(c)は第7世代 IGBT-IPM P638の負荷電流

図7 銅ベースサイズ比較



図8 連続動作時の温度分布比較(熱解析結果)

を第6世代 IGBT-IPM P630より28% 大きくし、 T_c が 最高125 ℃となるようにしたときの熱解析の結果である。 T_{vj} は132 ℃であり、 T_{vjop} が最高150 ℃よりも18 ℃低い。 損失低減とチップの最高使用温度の向上により、第7世 代 IGBT-IPM P638 は第6世代 IGBT-IPM P630より も28% 大きい負荷領域まで使用可能である。

5 あとがき

本稿では、第7世代「Xシリーズ」中容量 IGBT-IPM 「P638」について述べた。

X シリーズ中容量 IGBT-IPM のラインアップ拡充によ り、今後の電力変換装置のさらなる省スペース化、省エネ ルギー化、高信頼化に貢献し、エネルギー資源を有効に活 用できる社会の実現を目指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) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富

富士電機技報 2023 vol.96 no.4

特集

士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.

(3) Kawabata, J.et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". Proceeding of PCIM Europe 2015.



藤井 優孝

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。

第 4.5 世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6C60 シリーズ」

"FA6C60 Series" 4.5th-Generation LLC Current-Resonant Control ICs

小林	善則 KOBAYASHI, Yoshinori	山路 将晴 YAMAJI, Masaharu	山本	毅 YAMAMOTO, Tsuyoshi
----	-------------------------	------------------------	----	----------------------

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。富士電機は、降圧回路を内蔵したスイッチ ング電源向け LLC 電流共振制御 IC を開発した。これにより、電源に搭載する部品 7 個が削減可能である。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% の損失低減が可能となり、IC 表面温度も約 6℃低減した。

Efforts to achieve a decarbonized society has increased the demand for switching power supplies that deliver low standby power, high efficiency, and low costs through component reduction. Fuji Electric has developed a LLC current resonant control IC for switching power supplies with a built-in buck circuit. This IC allows power supply circuits to reduce seven parts. Although the built-in buck circuit rose concerns about heat generation from the IC, the use of a new level-shift devices for the high-side driver has enabled the IC to reduce power loss by approximately 40%, lowering IC surface temperature by approximately 6°C.

1 まえがき

脱炭素社会の実現に向けて、電子機器に搭載されるス イッチング電源には低待機電力化、高効率化の要求が高 まっている。一方、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。富士電機はスイッチング 電源のLLC電流共振回路向けに、独自の制御方式によっ て電源の低待機電力化および高効率化を実現してきた。ま た、従来はIC周辺回路で実現していた機能をICに内蔵 したLLC電流共振制御ICを提供し、電源に搭載する部 品の削減および電源のコストダウンに貢献してきた。

今回、従来の低待機電力化、高効率化および多機能化を 踏襲しつつ、降圧回路を内蔵することでさらに電源に搭載 する部品の削減を実現した第4.5世代LLC電流共振制御 IC「FA6C60シリーズ」を開発した(図1)。

本稿では、FA6C60 シリーズの概要と特徴および適用 効果について述べる。



図 1 第 4.5 世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6C60 シリーズ」

2 製品の概要

本製品は、LLC 電流共振回路の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) ドラ イバ、力率改善(PFC: Power Factor Correction)回路 の動作電源の役割を担う降圧回路を 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 個を削減可能 とした。降圧回路の内蔵に際しては、ドライバ素子の損失 を低減することにより IC の発熱を防止した。

本製品を適用することによって、LED 照明用の電源を はじめ産業用電源、TV などの民生用の電源の低待機電力 化、高効率化と電源に搭載する部品の削減による電源のコ ストダウンが可能になる。図2に FA6C60 シリーズのブ ロック図を、表1に主な仕様を示す。

FA6C60 シリーズの構成は次のとおりである。

○LLC 電流共振回路を制御する制御ユニット(図2①)

- ハーフブリッジ回路のハイサイドのスイッチング素子 である MOSFET を直接駆動できる 780 V 耐圧ハイサ イドドライバ(図2②)
- 同じくローサイドの MOSFET を直接駆動できる 40 V
 耐圧ローサイドドライバ(図2③)
- 低消費電力で IC を起動するための 650 V 耐圧起動素
 子を含む起動回路(図2④)
- MOSFETが破壊しないようゲート電圧を 20 V以下 に抑制する降圧回路(図2⑤)



図 2 「FA6C60 シリーズ」のブロック図

表1 主な仕様

項目	定格値
ハイサイド電源対地電圧 $V_{\rm B}$	-0.3 \sim $+780$ V
ハイサイド電源電圧 <i>V</i> _{BS}	-0.3 ~ +30 V
ローサイド電源電圧 <i>V</i> _{cc}	-0.3 ~ +40 V
VH端子入力電圧V _H	-0.3 \sim $+650$ V
降圧回路出力電流/ _{VREG}	$-40 \sim +0.1 \text{mA}$
動作ジャンクション温度 <i>T</i> j	-40 ∼ +150 °C
(系列により異なる)	-60 ~ +150 ℃

3 製品の特徴

3.1 ハイサイドドライバへの新規レベルシフト素子適用

ハイサイドドライバは、ハーフブリッジ構成のハイサ イド側 MOSFET のゲートを駆動する役割を担っており、 GND 基準の信号(最大 40 V)をハイサイド動作電源基 準の信号(最大 750 V)にレベル変換するレベルシフト回 路が内蔵されている。IC の発熱は、ほとんどがこのレベ ルシフト回路の構成デバイスであるレベルシフト素子の HVNMOS(High-Voltage N-channel Metal-Oxide-Semiconductor)で発生する。これはスイッチング時にレ ベル変換する際、HVNMOS のソース・ドレイン間に数 百Vの高電圧がかかった状態でドレイン電流を流すため、 瞬間的に数Wもの電力がHVNMOSで消費されるためで ある。従来のレベルシフト回路では、HVNMOSのドレ イン電流が大きく、発熱量が多かった。

発熱の低減には、レベルシフト素子のドレイン電流を減 少させることが有効である。しかし、単に HVNMOS の チャネル長やチャネル幅を調整してドレイン電流を減少さ せた場合、スイッチング時に HVNMOS のソース・ドレ イン間の接合容量の放電時間が長くなり、IC の入出力伝 達遅延時間が増加し信号が伝達できなくなる可能性があ る。図3の回路モデルで示しているとおり、レベルシフト 回路の伝達遅延時間 t_d は、HVNMOS のドレイン電流 I_L とソース・ドレイン間容量 C_d の比に依存する。そのため、 $I_L と C_d$ の両方を低減することがレベルシフト回路におけ る発熱と伝達遅延時間増加の両方の抑制に効果的である。

今回、HVNMOSの*I*_L と*C*_dを低減するため、新規レベルシフト素子を開発した。図4に従来のレベルシフト素子の平面構造と等価回路を示す。図4の従来のレベルシフト素子の平面構造と等価回路を示す。図4の従来のレベルシフト素子は、二つのHVNMOSがハイサイド回路領域と離隔して形成され、HVNMOSとハイサイド回路領域との信号線はボンディングワイヤによって接続される。そのため、デバイスの接合容量に加えてボンディングワイヤとチップ表面との間にも寄生容量があり、HVNMOSの*C*_d成分が



図3 ハイサイドドライバのレベルシフト回路における回路モデル



図4 従来のレベルシフト素子の平面構造と等価回路





大きくなる。

一方、図5 に示した新規レベルシフト素子では、高耐圧 接合終端領域と HVNMOS が一体化した自己遮蔽構造を 採用しており、HVNMOS の C_d成分がデバイスの接合容 量のみとなり、接合面積を最小化することで C_dを小さく することができる。また、図5 に示したように、負の温度 係数を持つポリシリコンで形成されるソースフォロア抵抗 R_sを HVNMOS のソースと GND 電位領域との間に接続 した。これにより、負の温度特性を持つ HVNMOS のド レイン電流の温度依存性やばらつきを軽減することができ る。

伝達遅延時間の主要因である C_d/I_L について、従来と新 規のレベルシフト素子の比較を図6に示す。同一チャンネ ル幅で比較すると、従来よりも新規レベルシフト素子の方 が C_d/I_L の値が小さくなっており、新規レベルシフト素子 の方が I_L を減少させた場合の伝達遅延時間の増加を抑制 できることを示している。

図7に、新規のレベルシフト素子における I_L の温度依存性を示す。200 Ω のソースフォロア抵抗を接続したレベルシフト素子の方が、0 Ω (ソースフォロア抵抗なし)の場合に比べて I_L の温度依存性が小さい。これは負の温度係数を持つソースフォロア抵抗が、負の温度特性を持つHVNMOSのドレイン電流の温度特性を相殺する方向に



図6 従来と新規のレベルシフト素子の比較



図7 新規のレベルシフト素子における / の温度依存性





働くためである。

従来のレベルシフト素子および新規のレベルシフト素子 をそれぞれ搭載したハイサイドドライバICにおいて、ス イッチング動作開始から1分後のICチップ表面温度とス イッチング周波数依存性の測定結果を図8に示す。従来 のレベルシフト素子のICの表面温度は代表的な動作条件 である200kHz動作時におよそ31℃上昇するのに対し、 新規レベルシフト素子のICはおよそ5℃の上昇に抑えら れていることがわかる。

今回、ハイサイドドライバに自己遮蔽構造の新規レベルシフト素子を採用したことで、入出力伝達遅延時間の増加を抑えつつ、HVNMOSのドレイン電流を小さくでき、損失および発熱量を低減することができた。また、新規レベルシフト素子のソース-GND間に負の温度係数の抵抗を挿入し、オン電流の高温での急激な減少をソース-GND間の抵抗によって防ぐことにより、オン電流を小さくしても全温度範囲で回路動作に必要な電流が確保でき、安定したレベルシフト回路動作を実現している。

3.2 降圧回路の内蔵

図9に電源回路構成を示す。

図9(a)に示すように、PFC回路と組み合わせて電源を 構成する場合、従来はLLC電流共振回路のMOSFETド



図9 電源回路構成

ライバ、PFC 回路の動作電源として、降圧回路を外部回 路で構成していた。これは、IC が駆動する MOSFET の ゲートの定格電圧が 20 ~ 30 V であるため、電源の補助 巻線から供給される VCC 端子電圧が 30 V を超えた場合 でも MOSFET を破壊させないよう降圧回路で VCC 端子 電圧を 20 V 以下に抑えるためである。本製品では、図 9(b)に示すように、降圧回路を IC に内蔵することにより 外部で構成していた回路を不要とし、電源に搭載する部 品を 7 個削減(8 個削減、1 個追加)した。降圧回路を内 蔵する上で IC の発熱が懸念されたが、3.1 節で述べたと おりハイサイドドライバに新規レベルシフト素子を採用し 大幅に損失および発熱を低減できたことにより内蔵が可 能となった。図10 に降圧回路図を、図11 に降圧回路出力



図 10 降圧回路図



図 11 降圧回路出力(V_{REG})の起動シーケンス

 (V_{REG}) の起動シーケンスを示す。

IC が起動する際は VH 端子と V_{cc} 端子との間の起動回 路から V_{cc} 端子に接続された容量を充電することで V_{cc} 端子電圧を上昇させる。しかし、降圧回路出力である V_{REG} を V_{cc} と同時に立ち上げると、 V_{REG} 端子に接続され た容量への充電も同時に行われるため、 V_{cc} 端子電圧が 既定の電圧まで上昇せず、IC が動作開始できない懸念が あった。そこで、 V_{REG} の立ち上がりを V_{cc} 端子電圧が上 昇して IC が起動した後とし、 V_{REG} が所定の電圧に達する まではその出力電流を制限した。また、MOSFET が低電 圧で駆動され破壊に至るのを防ぐため、 V_{REG} が所定の電 圧に達するまでは MOSFET をゲート駆動しない制御と し、同時に PFC-IC も LLC-IC から通信信号を送信し停 止する制御とした。これらにより、降圧回路を内蔵しても MOSFET が破壊することなく IC の動作開始を可能とした。

4 電源回路への適用効果

4.1 IC 損失の低減

図12 に電源適用時の従来製品との損失比較を、図13 に



図 12 電源適用時の従来製品との損失比較







図 14 電源回路での適用例

IC 表面温度の比較を示す。ハイサイドドライバに新規レ ベルシフト素子を採用したことにより、降圧回路を IC に 内蔵しても電源の損失を約40%削減し、IC 表面温度を約 6°C低減できている。この結果、電源基板のレイアウト設 計をする際に、IC の発熱を考慮した放熱や電源に搭載す る部品の配置などの発熱対策が容易になる。

4.2 スイッチング電源搭載部品の削減

「FA6C60N」を搭載した電源回路での適用例を図14 に示す。降圧回路の内蔵により、従来と比較し電源に搭載 する部品を7点削減でき、電源のコストダウンに貢献する。

5 あとがき

本稿では、第4.5世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6C60 シリーズ」について述べた。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で IC の発熱を大幅に低減 し、降圧回路を内蔵することにより、電源に搭載する部品 の削減および、電源のコストダウンを実現した。

今後も電源の低待機電力化、高効率化とともに電源に搭 載する部品の削減を実現する IC を開発していく所存であ る。

参考文献

- 園部孝二ほか.高効率電源用の臨界モードPFC制御IC 「FA1A60N」とLLC電流共振制御IC「FA6B20N」.富士電機 技報.2016, vol.89, no.4, p.283-288.
- (2) 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.

- (3) 山路将晴ほか.800V保証HVIC技術.富士時報.2010,
 vol.83, no.6, p.398-404.
- (4) Fujihira, T. et al. "Proposal of new interconnection technique for very high–voltage IC's". Japanese Journal of Applied Physics. 1996, vol.35, no.11, p.5655–5663.
- (5) Yamaji, M. et al. "600 V High Voltage Gate Driver IC (HVIC) with 1.0 MHz High Frequency Operation for LLC Current Resonant Power Supply". The 2018 International Power Electronics Conference. 2018, p.2774–2779.

小林 善則

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。



山路 将晴

パワー IC のデバイス・プロセ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 部デバイス開発部主査。博士(工学)。IEEE 会員。



山本 毅

パワー半導体のフィールドアプリケーションエン ジニア業務に従事。現在、富士電機株式会社半導 体事業本部営業統括部応用技術部主査。

第7世代 2,300 V「X シリーズ」IGBT/FWD チップ

"X Series" 7th-Generation 2,300-V IGBT/FWD Chips

松本	治輝 MATSUMOTO, Haruki	田村	隆博 TAMURA, Takal	niro 唐本	祐樹	KARAMOTO, Yuki	
----	----------------------	----	------------------	------------	----	----------------	--

太陽光・風力発電など再生可能エネルギー分野で電力変換装置に利用されるパワー半導体の利用が拡大している。近年、 発電出力拡大のため、搭載する IGBT モジュールの高電圧化や高耐圧化が求められている。富士電機は、この要求に応え るため、定格電圧 2,300 V の「X シリーズ」IGBT チップと FWD 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 3,300 V 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。

Power semiconductors has been widely used in power conversion equipment in the renewable energy field, including solar and wind power generation. IGBT modules are required to deliver a high voltage rating and withstand voltage due to the recent increase in power generation output. To meet this demand, Fuji Electric has developed an "X Series" IGBT chip and FWD chip with a rated voltage of 2,300 V. Use of optimal backside structure with a thinned drift layer allows both chips to have enough tolerance and withstand voltage. The IGBT has a 39% lower collector-emitter saturation voltage and the FWD has a 43% lower reverse recovery-loss than conventional 3,300-V chips.

1 まえがき

地球温暖化対策として温室効果ガス削減の要求が高まっ ている。温室効果ガスは、電力を効率よく利用することで 削減することができるため、電力変換装置で使用されるパ ワー半導体にはさらなる高性能化が要求されている。パ ワー半導体は、産業、車載向けなどさまざまな分野で用い られており、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネ ルギー分野での利用が急激に拡大している。パワー半導 体としては、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) チップと FWD(Free Wheeling Diode)チップで構成さ れる IGBT モジュールが広く使われている。

再生可能エネルギーのさらなる普及に向けて、発電効率 の向上と発電コストの低減が求められている。そのために は電力変換装置の入力電圧を上げて電流を低減すること が有効で、DC1,000 V から DC1,500 V 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 1,700 V と 3,300 V の「X シリーズ」の IGBT モジュールがあるが、 定格 1,700 V では入力電圧 DC1,500 V に対して耐圧が不 足し、定格 3,300 V では耐圧が過剰で損失が増大するた め、入力電圧 DC1,500 V に適した耐圧クラスの IGBT モ ジュールが必要となっている。

そこで、新規耐圧クラスの定格2,300VのXシ リーズIGBTモジュールを開発した。本稿では、定格 2,300V/1,200AのIGBTモジュールに搭載するIGBT (X-IGBT)とFWD(X-FWD)のチップ技術について述 べる。

2 2,300 V「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 はゲートに 電圧を印加することで表面の MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) チャネルから電子が注入され、これに応 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- ドリフト層に電子とホールが溜まり伝 導度変調が生じる。この伝導度変調によって IGBT は低抵 抗となり、低導通損失を実現している。

2,300 V X-IGBT は、図1 に示すように3,300 V X-IGBT に対してn-ドリフト層厚を薄くし、損失を低減した。n-ドリフト層厚を薄くすると、電流経路となる コレクタ電極とエミッタ電極間の距離が短くなり、n-ドリフト層の低抵抗によりコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE (sat)}$ が低下し、導通損失が低減する。また、n-ドリ



図 1 IGBT の断面構造

フト層厚を薄くすることにより、導通時に n- ドリフト層 に蓄積されるキャリアの総量も減少するため、ターンオフ 時にキャリアが掃き出されるまでの時間が短縮し、ターン オフ損失 *E*_{off} も低減する。

図 2 に 2,300 V X-IGBT と 3,300 V X-IGBT のコレク タ電流 I_c - コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} 特性を示す。定 格電流において、低抵抗の 2,300 V X-IGBT は 3,300 V X-IGBT に比べ V_{CE} が 1.58 V (39%) 低下した。

図3に $E_{off} \geq V_{CE (sat)}$ の関係を示す。 $E_{off} \geq V_{CE (sat)}$ は トレードオフの関係にあるが、2,300 V X-IGBT の E_{off} お よび $V_{CE (sat)}$ は、ともに3,300 V X-IGBT よりも低くなり、 同一の E_{off} において $V_{CE (sat)}$ は1.58 V (39%)低下した。 IGBT チップの $V_{CE (sat)}$ 低下は、装置に実装したときの導 通損失低減につながる。

(2) ターンオフサージ電圧の改善

一方、n-ドリフト層厚を薄くしたことにより、ターン オフサージ電圧は上昇してしまう。n-ドリフト層厚が薄 いと、ターンオフ動作時の逆バイアス印加により、空乏 層が裏面の p+コレクタ層に到達しやすくなり、ターンオ フサージ電圧が上昇する。これに対し、2,300 V X-IGBT では n-ドリフト層と p+コレクタ層のキャリア濃度を濃 くすることで対策した。



図 2 コレクタ電流 /_c-コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} 特性



図3 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

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図4 2,300 V X-IGBT のターンオフサージの波形

図4に2,300VX-IGBTのターンオフサージの波形 を示す。2,300VX-IGBTのターンオフサージ電圧は 2,078Vであり、通常使用される動作条件下において定格 電圧の2,300V以下に収まることが確認できた。

2.2 破壊耐量向上技術

IGBT は、短絡により大電流が流れた際にも一定時間破壊しないことが要求される。これに対し、n-フィールドストップ層と p+コレクタ層の設計最適化を進めた。短絡状態ではエミッタ側から多くの電子が注入され、n-ドリフト層の正の固定電荷が打ち消されて、電界のピークが裏面側に移動することでアバランシェ破壊(裏面アバランシェ破壊)が発生する。この裏面アバランシェ破壊に対する耐量を向上させる方法として、エミッタ側から注入される電子をコレクタ側から注入されるホールで打ち消すことが挙げられる。コレクタ側からのホールの注入量を増やすことは、式(1)で表される IGBT 裏面の寄生 pnp トランジスタの増幅率 α_{pnp} を増大することで可能となる。

- α :コレクタ効率
- β : ベース輸送効率
- γ :エミッタ注入効率

 α_{pnp} は、n-フィールドストップ層の設計で決まる β と、 p+コレクタ層濃度によって決まる γ によって調整できる。n-フィールドストップ層の設計は漏れ電流にも影響し、低濃度もしくは浅く形成すると漏れ電流が増加してしまうが、高温で漏れ電流が増加すると、高温動作時の破壊リスクが高くなる。一方、p+コレクタ層濃度はIGBTの特性を決定する主要パラメータの一つであり、特に E_{off} と $V_{CE (sat)}$ に強く影響する。このように、n-フィールドストップ層とp+コレクタ層は、裏面アバランシェ耐量だけでなく、その他の特性も満たす適切な設計とする必要がある。

2,300 V X-IGBT では、n-フィールドストップ層と p+コレクタ層の設計の最適化によりα_{pp}を適切な値に設



図5 高温漏れ電流の測定結果



図6 裏面アバランシェ耐量測定時の短絡波形

定し、短絡時の裏面アバランシェ破壊耐量確保と、漏れ電 流低減の両立を図った。

図5にn-フィールドストップ層を最適化する前後に おける高温漏れ電流の測定結果を示す。2,300 V X-IGBT の150℃における漏れ電流は、n-フィールドストップ層 の最適化により34% 低減した。

図6に裏面アバランシェ耐量測定時の短絡波形を示す。 2,300 V X-IGBT の裏面アバランシェ耐量は、定格電流の14倍であり、十分な耐量があることが確認できた。

このように、n-フィールドストップ層とp+コレクタ 層の設計の最適化により、高温漏れ電流の増加を抑制しつ つ、裏面アバランシェ耐量を確保することができた。

3 2,300 V「X シリーズ」FWD チップの特徴

3.1 低損失化技術

(1) 逆回復損失の低減

図7にFWDの断面構造を示す。3,300VのIGBTモ ジュールに搭載されているFWDは、第5世代「Uシ リーズ」のFWD(U-FWD)である。図7に示すように、 2,300VX-FWDでは、IGBTと同様に3,300VU-FWD に対してn-ドリフト層厚を薄くすることにより損失低減 を図った。n-ドリフト層厚を薄くすることで、導通時に



図7 FWD の断面構造

n-ドリフト層に蓄積されているキャリアの総量が減少するため、逆回復電流が抑えられ、逆回復損失 E_{rr} が低減する。

図8に、2,300VX-FWDと3,300VU-FWDの逆回 復波形を示す。2,300VX-FWDは、3,300VU-FWD と比較して逆回復電流が低減しており、2,300VX-FWD でn-ドリフト層厚を薄くした効果が確認できた。

図9に E_{rr} と順方向電圧 V_F の関係を示す。 E_{rr} と V_F はトレードオフの関係にあり、pアノード濃度を増加させると V_F が低下し、 E_{rr} が増大する。同一の V_F において、2,300 V X-FWDの E_{rr} は、3,300 V U-FWDに対して43%低減することができた。

(2) 逆回復サージ電圧の改善

一方、n-ドリフト層厚を薄くしたことにより、逆回復 サージ電圧は上昇してしまう。n-ドリフト層厚を薄くす ると、逆回復動作時の逆バイアス印加により空乏層がカ ソード側へ到達しやすくなり、逆回復サージ電圧が上昇す る。そこで、2,300 V X-FWD ではカソード層の構造を最 適化し、カソード層側への空乏層の伸びを制御することに より急激なサージ電圧の上昇を抑制した。

図10に2,300 V X-FWD の逆回復サージの波形を示す。 サージ電圧は1,578 V で定格電圧2,300 V に対して十分 な余裕があることが確認できた。



図 8 2,300 V X-FWD と 3,300 V U-FWD の逆回復波形



図9 逆回復損失 Err と順方向電圧 VF の関係



図 10 2,300 V X-FWD の逆回復サージの波形

3.2 破壊耐量向上技術

FWD は、逆回復動作時の素子破壊を防止するため、製品仕様に基づいて逆回復耐量を確保する必要がある。 FWD では、素子外周の耐圧構造部に存在するキャリアが、 逆回復動作時にアノード層の素子活性領域端部に集中し やすく逆回復耐量を低下させる要因となっている。そのた め、裏面構造の最適化により、素子周縁部のキャリア量を 抑制してアノード層の活性端部に集中するキャリアを低減 し、耐量を向上させている。

2,300 V X-FWD について最大許容電流を評価した結果、 定格電流の2倍以上でも破壊しないことが確認できた。

4 あとがき

新規耐圧クラスとなる定格電圧 2,300 Vの「Xシリー

ズ」IGBT と FWD のチップ技術について述べた。IGBT と FWD ともに、n− ドリフト層厚を薄くしたことと裏面 構造の最適化によって、再生可能エネルギー分野で要求が 高まっている入力電圧 DC1,500 V で必要な耐圧と耐量を 確保しながら低損失化を実現した。

今回、開発した技術を用いて、今後も IGBT と FWD の 特性改善を進め、温室効果ガス削減に向けた再生可能エネ ルギーの普及に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 国土交通省. "国土交通省がその事務及び事業に関し温 室効果ガスの排出の削減等のため実施すべき措置につい て定める計画". https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ environment/sosei_environment_fr_000137.html, (参 照 2023-11-30).
- (2) 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.
- (3) 古閑丈晴ほか. 3.3 kV IGBTモジュール. 富士時報. 2007, vol.80, no.6, p.397-401.
- (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.



松本 治輝

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開発統括部デバイス開発 部。



田村 隆博

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。工学博士。

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。



大容量モジュール内蔵ゲート抵抗チップ技術

Built-In Gate Resistor Chip Technology for High-Power Modules

狩野	太一 KARINO, Taichi	宮澤 康弘 MIYAZAWA, Yasuhiro	鎌田 省吾 KAMADA, Seigo

再生可能エネルギー分野で用いられる電力変換装置の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。富士電機 は、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 0 ppm/℃以下の モジュール内蔵ゲート抵抗チップを開発した。この技術により、高温時のターンオン損失を 13% 低減した。

High-power modules for power converters for the renewable energy field must suppress short-circuit oscillation and reduce switching loss at high temperatures to further improve reliability and efficiency. Therefore, the gate resistance value of IGBTs in high-power modules is required to be optimal and is prevented from rising even at high temperatures. In response to these needs, Fuji Electric has developed a built-in resistor chip for high-power modules that has a temperature coefficient of resistance of less than 0 ppm/°C by combining a polysilicon resistor and a low specific-resistance Si substrate. This technology has reduced turn-on loss at high temperatures by 13%.

1 まえがき

近年、地球温暖化対策や安全・安心で持続可能な社会の 実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネ ルギーと、それを支えるパワーエレクトロニクス(パワエ レ)技術への期待が高まっている。パワエレ技術を活用し た電力変換装置には、高信頼性で高効率であることが求め られている。

富士電機は、1988年にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールを製品化して以来、電力変換装置 の高信頼化・高効率化に加え、小型化や低コスト化に貢 献してきた。大容量モジュールで使用されるIGBTチップ は、第7世代「Xシリーズ」まで進歩し特性を向上して きたが、第7世代IGBTを搭載した大容量モジュールの さらなる高信頼化・高効率化には、内蔵するゲート抵抗用 の抵抗チップの特性を改善し、IGBTの短絡発振の抑制や スイッチング損失の低減を進める必要がある。

本稿では、大容量 IGBT モジュールの短絡発振抑制と高 温時のスイッチング損失増大抑制を目的に開発した、ゲー ト抵抗チップ技術について述べる。

2 モジュール内蔵ゲート抵抗

2.1 ゲート抵抗の必要性

図1に大容量 IGBT モジュールの回路図例を示す。 IGBT の短絡時には、ゲート電圧が発振し、IGBT の破壊 を引き起こすことがある。短絡発振時の波形イメージを図 2に示す。この短絡発振を抑制するため、大容量モジュー ルでは IGBT のゲートにゲート抵抗を接続している。大 容量モジュールでは、大容量化を実現するために複数の IGBT チップを並列に接続する。この影響で寄生容量や寄



図1 大容量 IGBT モジュールの回路図例



図2 短絡発振時の波形イメージ

生インダクタンスが形成されゲート電圧の発振が発生しや すくなる。

2.2 従来のゲート抵抗

大容量モジュールに適用している従来のゲート抵抗は、 Siウェーハ内に拡散層を形成した縦型の拡散抵抗で、所 望の抵抗値を得るためにウェーハ厚さや表面拡散層深さ、 チップサイズを調整する。表面電極はアルミニウムワイヤ のボンディングが可能で、裏面電極はモジュール内の絶縁 基板に実装できる構造となっている。また、抵抗チップの 表面電極と IGBT のゲートはアルミニウムワイヤで接続さ れる。

この従来の抵抗チップは、-40 ~ +150 ℃で温度係数 が7,083 ppm/℃(10 Ω品で70.8 mΩ/℃)と大きな正 の温度特性を持っており、高温時にスイッチング損失が大 きくなるという問題があった。そのため、第7世代 IGBT モジュールのさらなる高信頼化・高効率化を実現し、その 能力を十分に発揮するためには、短絡時の発振を抑制でき る抵抗値を備え、高温でも抵抗値が上昇しない抵抗チップ が必要であった。

3 開発したゲート抵抗

3.1 抵抗チップ

今回、ゲート電圧の短絡発振を抑制できるよう抵抗値を 調整できるとともに、高温時のスイッチング損失が増大し ないよう負の温度特性を持つ抵抗チップを開発した。また、 アルミニウムワイヤをボンディングでき、かつ絶縁基板に 実装できる構造とした。

(1) 仕様

表1にゲート抵抗チップの仕様を示す。抵抗値は5~ 50Ωの範囲で選択可能であり、いずれの抵抗値において も温度係数は小さく、負の値である。

(2) 構造

今回開発した抵抗チップは、ポリシリコン (PolySi) 抵抗体と低比抵抗 Si 基板を組み合わせた構造であり、従 来から使用されている Si パワー半導体プロセスで製造可 能である。抵抗チップの構造を図3 に示す。図3 は一つの チップに二つの抵抗を搭載した2抵抗/1 チップタイプで の構造を示している。IGBT のゲートとアルミニウムワイ ヤで接続される表面電極のパッド、PolySi 抵抗体、低比 抵抗 Si 基板、裏面電極で構成される。PolySi 抵抗体には イオン注入で不純物を導入する。抵抗チップは縦型構造の デバイスであり、電流は表面電極と裏面電極間に流れる。

表1 ゲート抵抗チップの仕様

項目		特性値
	電圧 (V)	80
最大定格	電流(mA)	70
	電力 (W)	1.2
抵抗值(Ω)		5~50
温度係数(ppm/℃)(-40~+150℃)		-260

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図3 抵抗チップの構造(2抵抗/1チップ)

抵抗チップの抵抗値は PolySi 抵抗体の抵抗で決まり、 PolySi 抵抗体の幅と長さを変えることで、所望の抵抗値 を実現できる。図3 に示した抵抗チップの構造は、1チッ プに二つのパッドが配置され、それぞれのパッドに接続 された PolySi 抵抗体を形成することで、二つの抵抗を1 チップで実現している。これにより、同一の電源ラインに 接続された二つの IGBT チップに対して一つの抵抗チップ で対応することができる。

(3) PolySi 抵抗体

抵抗チップの PolySi 抵抗体は、負の抵抗値温度係数の 実現、高信頼化を目指して開発を進めた。

(a) 抵抗值温度係数

抵抗チップの抵抗値温度係数は、PolySi抵抗体中 の不純物濃度に依存する。高温時の抵抗値上昇による IGBT のスイッチング損失を増大させないことを目的に 温度係数の目標値は0ppm/℃以下とし、プロセスばら つきの影響で温度係数がばらついても正の値にならない 範囲をターゲットに、PolySiへのイオン注入条件を調 整して不純物濃度プロファイルを最適化した。

(b) 高信頼化

抵抗チップは、IGBT チップの搭載数に応じて各 IGBT のゲートに接続される。そのため、IGBT のス イッチングのアンバランスを防ぐためには抵抗値のば



図4 不純物濃度プロファイルのシミュレーション結果

らつきを抑える必要がある。PolySi 抵抗体の面積を大 きくすることによりばらつきを小さくできることから、 PolySi 抵抗体を厚くして低シート抵抗化し、同一抵抗 値をより大面積で実現できるようにした。また、長期の 使用でも抵抗値変動を抑えられるよう、PolySi 抵抗体 にドープするイオン種を選定した。

前述の(a)および(b)を達成するため、PolySi 抵抗体中の 不純物濃度プロファイルと PolySi 抵抗体の膜厚を最適化 した。図4に、イオン注入後の不純物濃度プロファイルの シミュレーション結果を示す。シート抵抗の低抵抗化のた め、PolySi 抵抗体の膜厚 d を 2 倍の 2d に厚くした。不 純物濃度プロファイルは、PolySi 抵抗体の厚膜化に応じ て PolySi 抵抗体中で不純物濃度が最も高くなるピーク位 置が深くなるようイオン注入の加速電圧を調整した。こ れにより、熱処理による不純物拡散後に PolySi 抵抗体 中の不純物濃度プロファイルを従来と同じにすることで、 PolySi 抵抗体の膜厚を厚くしても温度係数を合わせるこ とができた。

(4) 酸化膜および絶縁膜

抵抗チップには図3に示したように、パッド部直下に積 層されている絶縁膜とPolySi抵抗体下の酸化膜による寄 生容量 C_{pad}、PolySi抵抗体部直下の酸化膜による寄生容 量 C_{poly}が存在しており、ゲート発振の周波数が大きくな ると寄生容量のインピーダンスが低下する。そのため、こ の寄生容量との合成抵抗となる抵抗チップ自体の抵抗値も 低下してしまい、ゲート発振を抑制できなくなる。そこで、 任意の周波数に対して抵抗チップが抵抗体として機能する 領域と寄生容量によるインピーダンス低下領域との境界値 について検討した。

抵抗チップの等価回路を図5 に示す。抵抗チップの等価 回路から、次の RC ローパスフィルタの式が成り立つ。



図5 抵抗チップの等価回路



図6 寄生容量と抵抗値の関係



抵抗チップが短絡時のゲート発振の周波数に対して 抵抗体として機能するための寄生容量 C_{para} の境界値を、 $I_{pad}=I_{R}$ として式(1)より算出した。

図6に、製品使用時のゲート発振周波数相当の40 MHz とした時の境界値と、寄生容量および抵抗値の関係を示す。 所望の抵抗値に対して図6に示したインピーダンス低下領 域外となる寄生容量値以下になるように絶縁膜と酸化膜の 厚さ、およびメタルと PolySi 抵抗体の面積を設計した。

3.2 特性

開発品と従来品の抵抗値の温度特性を図7に示す。 -40~+150℃の温度係数を既存品の7,083 ppm/℃から -260 ppm/℃(10 Ω品換算で70.8 mΩ/℃から -2.6 m Ω/℃)に低減することができ、-40~+150℃の範囲で 25℃の抵抗値に対して±2.5%以内の抵抗値変化率を実現 した。これにより、IGBTの高温におけるスイッチング損 失増加を抑制することができる。



図7 開発品と従来品の抵抗値の温度特性

4 製品適用

4.1 大容量モジュールへの適用事例

図8に、開発した抵抗チップをXシリーズの PrimePACKTMに適用した時のモジュール絶縁基板の模式 図を示す。この適用事例では、2抵抗/1チップタイプの 抵抗チップであり、絶縁基板上のIGBTチップ二つに対し て1チップの抵抗チップで対応している。また、アルミ ニウムワイヤは直径0.4mmまで対応可能である。

表2に、本開発の抵抗チップを搭載した大容量モジュー ルのターンオン時のスイッチング損失 *E*_{on} を示す。今回開



図8 モジュール絶縁基板の模式図

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 Eon

サンプル	ターンオン時のスイッチング損失 <i>E</i> 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

<注> PrimePACK[™]: Infineon Technologies AG の商標または登 録商標

富士電機技報 2023 vol.96 no.4



図9 抵抗チップのバリエーション

発した抵抗チップを適用した大容量モジュールにおいて室 温時の損失に差はないが、高温時においては 1.5 から 1.3 に約 13% 低減した。

4.2 バリエーション

図9に抵抗チップのバリエーションを示す。図9(a)の2 抵抗/1チップと図9(b)の1抵抗/1チップとも抵抗値は同 じであり、搭載するモジュールに応じて選択できる。図 9(a)の2抵抗/1チップの抵抗チップは、1チップで二つ のIGBTのゲートに接続することができるため、モジュー ル内のチップ専有面積を省スペース化することが可能であ る。

今回開発した抵抗チップを大容量モジュールの IGBT ゲート抵抗に適用することで、短絡発振による IGBT の破 壊を防止するとともに、消費電力低減に貢献することがで きる。

5 あとがき

本稿では、PolySi 抵抗体と低比抵抗 Si 基板を組み合わ せて構成される、大容量モジュールに内蔵されるゲート抵 抗チップ技術について述べた。本抵抗チップにより、第7 世代 IGBT を搭載した大容量モジュールの短絡発振を抑制 するとともに高温時のターンオン損失増大を抑制すること ができる。

今後、SiC モジュール製品への適用も含めて、抵抗チップの製品適用を進めていく所存である。

参考文献

- 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBT モジュールの系列化. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.233-237.
- (2) 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.
- (3) Takei, M. et al. "Analysis of IPM Current Oscillation under Short Circuit Condition". International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs

(ISPSD), 1998.

- (4) 山口義弘ほか. SiCパワーモジュールのダイナミックイン テグリティ設計. 三菱電機技報. 2016, vol.90, no.5, p.283-286.
- (5) M. Spang. et al. "Differential–Mode Oscillations between parallel IGBTs in Power Module." ECCE, 2015.
- (6) Ohi, T. et al. "Investigation of Gate Voltage Oscillations in an IGBT Module under Short Circuit Conditions." IEEE, 2002.



狩野 太一

パワー IC のデバイス・プロセスの開発・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。



宮澤 康弘

パワー IC のデバイス・プロセスの開発・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。

鎌田省吾

パワー IC のプロセス開発に従事。現在、富士電機 株式会社半導体事業本部開発統括部プロセス開発 部。

SJ 構造適用による SiC-MOSFET の低損失化と 信頼性向上

SJ Structure to Reduce Loss and Improve Reliability of SiC-MOSFETs

俵	武志 TAWARA, Takeshi	竹中 研介 TAKENAKA, Kensuke	成田 舜基 NARITA, Shunki
---	--------------------	-------------------------	----------------------

SiC-MOSFET の性能改善に向け、スーパージャンクション(SJ)構造の研究を進めている。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 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、逆回復時の蓄積電荷量の増加が抑制され、ボディダイオードの通電劣化が抑制された。SiC-SJ-MOSFET により、オン抵抗の低減のみならず、スイッチング損失低減や信頼性向上につながることが期待される。

Fuji Electric is conducting research on superjunction (SJ) structures to improve the performance of SiC-MOSFETs. A SiC-SJ-MOSFET has a SJ structure that is fabricated using a multi-epitaxial process, in which epitaxial growth (n-column formation) and aluminum (Al) ion implantation (p-column formation) are repeated. Al ion implantation reduces a carrier lifetime of the drift layer and suppresses the increase in reverse recovery charge during reverse recovery, alleviating the bipolar degradation of the body diode compared to conventional SiC trench gate MOSFETs. SiC-SJ-MOSFETs are expected not only to reduce on-resistance but also reduce switching loss and improve reliability.

1 まえがき

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて脱炭素 化が加速しており、自動車分野では電気自動車の普及が 進んでいる。電気自動車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、イン バータ内の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、従来のシリコン(Si)を材 料とした IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)と 還流ダイオードの構成から、炭化けい素(SiC)を用いた SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)に移行しつつある。

本稿では、SiC-MOSFET の高性能化に向けた最新の取 組みについて述べる。

2 SiC-MOSFET の課題と対策

SIC-MOSFET はビルトイン電圧を生じないことやス イッチングを高速化できるなどの特徴を持っており、低電 流動作時の導通損失やスイッチング損失が低減される。ま た、SiC が Si の約 8 倍高い絶縁破壊電界を持っているこ とから、ドリフト層中の不純物を高濃度化することにより 耐圧を維持しつつ素子抵抗を下げることが可能で、損失を 低減することができる。さらに、MOSFET 形成に付随し て形成されるボディダイオード(寄生ダイオード)を還流 ダイオードに用いることで素子数を削減できる。

一方で、ユニポーラデバイスであるため、素子が高温 化した際にフォノン散乱により電子移動度が低下し、ド リフト層の抵抗が大幅に増大してしまう。また、SiC-

```
富士電機技報 2023 vol.96 no.4
```

MOSFETのボディダイオードに通電した場合、エピタキ シャル層と基板界面やエピタキシャル層に内部の積層欠陥 が拡張し、オン電圧が上昇する通電劣化現象が知られてい る。この現象は、ボディダイオード通電時にドリフト層に 注入される少数キャリアの濃度上昇によって引き起こされ ることが分かっており、防止するには注入キャリアを抑制 する必要がある。

富士電機では、高温時のドリフト層抵抗増大の問題を解 決するため、ドリフト層にスーパージャンクション(Sj: Superjunction)構造を備えたSiC-MOSFET(SiC-SJ-MOSFET)の開発を進めている。SJ構造はpカラムとn カラムの繰返しからなり、空乏層が横方向に拡張するため、 カラム中の不純物濃度を高めても耐圧を維持できる。その ため、不純物濃度を高め電子密度を高くすることにより、 高温で電子移動度が低下しても抵抗の増加を抑制すること ができる。SJ構造化した際のドリフト層抵抗は、式(1)に 比例して低下するため、高耐圧素子で pn カラムの繰返し ピッチを縮めるほど低減効果が大きくなる。

d×E_c/V_B ······(1)
 d : pn カラムの繰返しピッチ
 E_c : 絶縁破壊電界強度

 $V_{\rm B}$:耐圧

SJ 構造の製造方法としては、薄い n 型エピタキシャル と局所アルミニウム (Al) イオン注入を繰り返すことで p、 n カラムを形成するマルチエピタキシャル法(図1) が使 われており、マルチエピタキシャル法を用いて SJ 構造を Al のイオン注入で形成した際に、ドリフト層のキャリア ライフタイムが低下することが報告されている。これは、 Al イオン注入時に導入された欠陥がライフタイムキラー として働いているためと考えられる。ドリフト層のキャリ



図1 SJ構造の作製法(マルチエピタキシャル法)

アライフタイムが低減することで、ドリフト層への少数 キャリア注入が抑制されるため、スイッチング時の逆回復 損失低減や、ドリフト層中の少数キャリア密度の低下によ り通電劣化現象の抑制が期待される。

③章から、SJ 構造の適用による SiC-MOSFET の低損 失化と通電劣化抑制効果について述べる。

3 低損失化

耐圧 1.2 kV クラスで定格電流 18 A のドリフト層濃 度と膜厚を備えた標準的なトレンチゲート MOSFET (non-SJ)、ドリフト層の約半分の深さまで SJ 構造を形 成したトレンチゲート MOSFET (semi-SJ)、ならび にドリフト層のほぼ全域に SJ 構造を形成したトレンチ ゲート MOSFET (full-SJ) を試作した。試作した SJ-MOSFET の模式図を図2 に示す。

試作した素子の代表的な特性オン抵抗 R_{on} ・Aとしきい 値電圧 V_{th} の温度依存性の評価結果を図3に示す。 V_{th} が 同等の素子で比較した結果、semi-SJ、full-SJでは高温 時の R_{on} ・A増加が抑制された。これはドリフト層のn濃 度が高いため、電子移動度の低下による影響を軽減して いるためと考えられる。full-SJの方が R_{on} ・Aが低いのは、 バッファ層に比べて高不純物濃度のnカラムが長いため である。

一般に MOSFET の R_{on}・A は耐圧とトレードオフの関係にあるため、各素子の耐圧を評価した。耐圧波形の代表 例を図4に示す。室温と 175 ℃で、各素子とも 1,500 V 以上の耐圧を示しており、ドリフト層を SJ 構造化するこ とで耐圧を維持しつつ、高温時の抵抗増加を抑制できるこ とが確認できた。

次に、図5に示す回路にて、通常のスイッチングパルス に続き、短いインターバルで二つ目のパルスを与えるダブ ルパルス試験を行い、ボディダイオードの逆回復波形を調 べた。ボディダイオードと MOSFET には同型の素子を用 いた。図6に175℃における代表的な逆回復波形を示す。



図 2 試作した SJ-MOSFET の模式図



図3 特性オン抵抗としきい値電圧の温度依存性の評価結果

full-SJ 構造にした場合も Si の SJ-MOSFET で問題とさ れるような大きい逆回復電流は流れていない。これはマル チエピタキシャル法で SJ 構造を製造したことにより、ド リフト層のキャリアライフタイムが短く、キャリアの注入 が抑制されているためである。

測定した逆回復波形からドリフト層の蓄積電荷量 Q_{rr}を 計算した結果を図7に示す。Q_{rr}が増えるほどスイッチン グ時の逆回復損失は増加する。Q_{rr}はドリフト層の容量に よるものとボディダイオード通電時に注入されたキャリア によるものの和であるが、注入キャリアはドレイン電流と ともに増加するため、Q_{rr}の電流依存性(傾き)を調べる ことにより、注入キャリアの多寡を判別することができる。 non-SJではドレイン電流とともにQ_{rr}が大きく増加し、 ドリフト層への注入キャリアが増加した。一方、semi-SJや full-SJではQ_{rr}の電流依存性が小さく、単位電流当



図4 耐圧波形の代表例



図5 ダブルパルス試験評価回路



図6 典型的な逆回復波形

たりのキャリア注入増加が non-SJ に対して、それぞれ 27% と 13% に減少した。semi-SJ や full-SJ ではドリ フト層容量による $Q_{\rm rr}$ の初期値は高いものの、大電流を流 しても $Q_{\rm rr}$ の増加は小さく、スイッチング損失の増加を抑 制できていることが確認できた。



図7 蓄積電荷量 Q_{rr}の計算結果

4 ボディダイオード通電劣化の抑制

試作した素子に対して、ボディダイオードの通電劣化試 験を行った結果を図8に示す。素子温度175℃でボディ ダイオードへの通電ストレス(DC 100 A/cm² で 10 min、 パルス500 ~ 1,500 A/cm² で積算5 min)をかけ、ボ ディダイオードのオン電圧の初期値からの変化を評価した。 評価したサンプル数は各構造で7~8素子である。通電 によりオン電圧が測定ばらつき(0.5%)以上に上昇した ものを、通電劣化が発生した素子とした。

non-SJ 構造では、通電ストレス 500 A/cm² から劣化が 確認され、大電流通電を行うにつれて劣化が大きくなった。 一方、semi-SJ は劣化が見られる通電ストレスは 1,000 A/ cm² に向上し、さらに full-SJ では 1,500 A/cm² とな り、SJ 構造を備えた素子は通電劣化が生じにくいことが 示された。これは、マルチエピタキシャル法で製造した SJ 構造によりドリフト層のキャリアライフタイムが低下



図8 ボディダイオードの通電劣化試験結果

し、ボディダイオード通電時に少数キャリア注入が抑制されて積層欠陥が拡大しにくくなっているためと考えられる。 semi-SJに比べてfull-SJの方が通電劣化抑制効果が高いが、これはfull-SJではドリフト層全域にSJ構造があるために、ドリフト層と基板の界面までライフタイムが低下しているためと考えられる。通電劣化の原因となる欠陥は基板内に多く存在するため、劣化を抑制するには基板に到達する少数キャリア密度を抑制する必要がある。 semi-SJの場合、ライフタイムが比較的長いバッファ層内で少数キャリア密度が上昇してしまい、full-SJに比べて通電劣化抑制効果が低かったと考えられる。

5 あとがき

ドリフト層にAIイオン注入を用いてSJ構造を形成したSiC-SJ-MOSFETは、従来のSiC-MOSFET(non-SJ)に比べて、高温時のオン抵抗増加を抑制でき、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、さらにボディダイオードの通電劣化を抑制できることを確認した。低損失で還流ダイオードの外付けが不要なSiC-SJ-MOSFETを適用することにより、インバータの高効率化と小型・軽量化およびそれに伴う電気自動車の 航続距離の伸長が期待される。

今後、詳細な特性評価や信頼性評価を行い SiC-SJ-MOSFET の実用化を進め、電気自動車の普及に貢献して いく所存である。

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)殿の事業として行われた。 試作・評価、および議論に関してご協力頂いた森本忠雄氏、 原田信介氏、加藤正史氏、福井琢也氏、石井達也氏に深く 謝意を表する。

参考文献

(1) Tawara, T. et al. "Injected carrier concentration

dependence of the expansion of single Shockley-type stacking faults in 4H–SiC PiN diodes". J. Appl. Phys. 123 (2018), p.025707.

- (2) Kobayashi, Y. et al. "High-temperature Performance of 1.2 kV-class SiC Super Junction MOSFET". Proc. ISPSD2019 (2019) 31b.
- (3) Fujihira, T. "Theory of Semiconductor Superjunction Devices". Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997), p.6254.
- (4) Harada, S. et al. "First Demonstration of Dynamic Characteristics for SiC Superjunction MOSFET Realized using Multi-epitaxial Growth Method". IEDM (2018), p.181.
- (5) Fukui, T. et al. "Effects of ion implantation process on defect distribution in SiC SJ-MOSFET". Jpn. J. Appl. Phys. 62 (2023), p.016508.
- (6) Saito, W. et al. "600V Semi-superjunction MOSFET".Proc. ISPSD2003 (2003), p.45.



武志

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。



成田 舜基

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。 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

特集

新製品紹介

サーボシステム「ALPHA7」診断オプション

"ALPHA7" Servo System Diagnostic Option

樋口 文哉 * HIGUCHI, Fumiya

二階堂 時宏 * NIKAIDO, Tokihiro

モーションシステムは、金属加工機械や包装機械、半 導体製造装置など、さまざまな機械装置で位置や速度、 加速度、力などを制御するために使用されている。

これまでのモーションシステムでは、生産性向上のた め高速化が重視されてきたが、近年は加えて、機械装置 の稼働中にリアルタイムで不良品を検出し、不良品の流 出を防ぐことが求められている。

この要求に応えるため富士電機は、AI (Artificial Intelligence) 技術を活用した、サーボシステム 「ALPHA7」診断オプションを開発した。

1 機械装置における不良品検出の課題

不良品が流出すると、商品回収に莫大なコストが掛か るだけでなく、企業イメージが低下して会社全体の売上 減少につながる可能性がある。そのため、エンドユーザー から機械装置メーカーに対し、生産性を損なうことなく リアルタイムで製品の異常を検知し、不良品の流出を防 止する仕組みを機械装置に組み込んでほしいという要求 が増えている。

例えば、端子圧着機械では電線の圧着不良をリアルタ イムで検出するよう求められている。機械装置メーカー では、さまざまなセンサを搭載して不良品の検出精度向 上を進めてきたが、大きなコストが掛かっており、コス ト低減と不良品検出精度の維持・向上の両立が課題となっ ている。

2 診断オプションによる異常検出

図1にサーボシステム ALPHA7 および診断オプショ ンの外観を示す。診断オプションは、サーボアンプから の応答データ、制御アプリケーションの演算データな どを基に、アナリティクス・AI である多変量統計的プ ロセス管理 (MSPC: Multivariate Statistical Process Control)により、異常診断を行う。これにより、セン サを追加することなく、高精度の不良品検出を実現した。 また、上位システムを変えることなくサーボ単体で、正 常動作との動作の差異を基にして、不良品発生に至るよ



図1 サーボシステム「ALPHA7」および診断オプション

りも前に加工工程で発生している異常を検知することも できる。

2.1 診断の仕組み

診断オプションは、モデル生成機能と診断機能を持っ ている。モデル生成機能は、機械装置が正常に運転して いる状態を表す診断モデルを作成する機能である。診断 機能は、モデル生成機能で作成した診断モデルと実際の 製造時のパラメータを比較して良品の判定を行う機能で ある。これらの機能は MSPC により実現している。

MSPCは、多変量のプロセスデータ(パラメータ)間 の相関関係を表す空間において、正常な状態である範囲 を診断モデルとして設定し、観測されたパラメータのセッ トが診断モデルの範囲を逸脱した場合、異常とする診断 手法である。図2にMSPCによる診断を示す。診断モデ





^{*} 富士電機株式会社インダストリー事業本部ファクトリーオート メーション事業部機種業務部



図 3 サーボシステム「ALPHA7」と診断オプションによるシス テム構成例

ルのパラメータ間の相関からのずれを*Q*統計量、平均値 からのずれを*T²*統計量とし、この2種類の評価値に基づ き異常の検出を行う。この手法を用いることで、個々の パラメータの上下限値による診断では見逃されてしまう 異常についても検出が可能となる。

2.2 診断オプションの構成

図3にサーボシステム ALPHA7 と診断オプションの構成例を示す。サーボシステム ALPHA7 に診断オプション を搭載し、各社の EtherCAT 対応の PLC (Programmable Logic Controller) と組み合わせることにより、容易に 異常診断を実現できる。

診断オプションには、モデル生成および診断に必要な アプリケーションが実装されており、ユーザーは診断に 必要な情報を設定するだけで、新たにプログラムを作成 することなく診断を実行できる。また、プログラマブル 表示器「MONITOUCH」に前述の設定や診断状況のモ ニタリングが可能な画面サンプルを用意し、ユーザーが 簡単に診断を開始できるようにした。

3 適用事例

端子圧着時の不良品例を図4に示す。従来、端子圧着 機械では、図4のような圧着時の被覆噛(か)みや浅打 ちによる不良を防止するため、荷重センサと検査装置を 組み合わせて端子圧着不良を検知する仕組みを構築して いた。しかし、センサや検査装置を追加することでシス テムの構造が複雑となる問題があった。また、端子ごと に個別調整が必要となり、調整に時間を要していた。

そこで、ALPHA7の負荷トルクモニタ機能と診断オプ ションを導入した。図5に診断オプションで使用する入



図4 端子圧着時の不良品例



図5 診断オプションで使用する入力データ例

カデータ例を示す。ここに示す回転速度や負荷トルクの ずれ具合をデータとして利用し、サーボをセンサとして 活用することにより、外部センサを使うことなく圧着不 良を検知することが可能となった。また、診断オプショ ンの MSPC を活用し、端子の種類ごとに正常状態の診断 モデルを登録することにより調整時間の短縮を実現する とともに、圧着不良検知の精度も向上した。

参考文献

 (1) 湯尾幸輝ほか. リアルタイムで不良品検出を実現するAIを 適用した機械装置向け診断ソリューション. 富士電機技報.
 2021, vol.94, no.3, p.141-145.

[〈]注〉EtherCAT: Beckhoff Automation GmbHの商標または登録商標

発売時期

2023年6月

お問い合わせ先

富士電機株式会社 インダストリー事業本部 ファクトリーオートメーション事業部機種業務部 電話(03)5435-7091

略語(本号で使った主な略語)

AI	Artificial Intelligence	人工知能
BEV	Battery Electric Vehicle	電気自動車
CTI	Comparative Tracking Index	比較トラッキング指数
EMI	Electromagnetic Interference	電磁障害
FEM	Finite Element Method	有限要素法
FWD	Free Wheeling Diode	
GDU	Gate Drive Unit	ゲート駆動回路
GHG	Green House Gas	
HEMT	High Electron Mobility Transistor	高電子移動度トランジスタ
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
HPnC	High Power next Core	
HVNMOS	High–Voltage N–channel Metal–Oxide–Semiconductor	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
MOS	Metal–Oxide–Semiconductor	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
MSPC	Multivariate Statistical Process Control	多変量統計的プロセス管理
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PFC	Power Factor Correction	力率改善
PHEV	Plug–in Hybrid Vehicle	プラグインハイブリッド自動車
PLC	Programmable Logic Controller	プログラマブルコントローラ
RC-IGBT	Reverse-Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SAT	Scanning Acoustic Tomography	超音波映像装置
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置

商標(本号に記載した主な商標または登録商標)

EtherCAT	Beckhoff Automation GmbH の商標または登録商標
Ethernet	富士フイルムビジネスイノベーション株式会社の商標または登録商標
PrimePACK™	Infineon Technologies AG の商標または登録商標

その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。



主要事業内容

エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

発電プラント 地熱発電、水力発電、燃料電池、火力発電

エネルギーマネジメント 蓄電制御システム、太陽光発電、風力発電

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)、電機盤

器具 受配電・制御機器

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、原子力関連設備、 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

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) https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html



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

発

次号予定

富士電機技報 第 97 巻 第 1 号

特集 地球環境負荷低減と生産性向上に貢献する

パワーエレクトロニクス

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		日政一郎 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	田中	誠					
事	務	局	斎藤	哲哉	青木	信	伊藤	秀之			
編	集	室	藤木	徹	小野₹	与拓也	木村	基	小野	直樹	
			高橋	徹							

令和6年2月20日印刷 令和6年2月29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

富士電機技報 第96巻 第4号

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。 © 2024 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

富士電機技報 vol.96 2023 年 総目次

No.1 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

〔特集に寄せて〕ソフトセンサーによるリアルタイム監視の展開						公人	3 (3)
〔現状と展望〕自動化と省エネルギーに貢献する							
計測・制御・情報システムの現状と展望	•••••		鉄谷	裕司	松本	康	4(4)
プラントシステムのエンジニアリング効率化を実現する							
グローバル対応監視制御システム・・・・・	若井	大資	佐藤	好邦	吉原	大助	11 (11)
プラントの操業最適化に貢献するソフトセンサ・・・・・・	田中	雅紀	加藤	泰輔	村上	賢哉	17 (17)
エンジニアリングのリードタイム短縮と品質向上を							
実現して DX を加速する支援ツール・・・・・	北村	純郎	吉野	稔	阿部	雄大	22 (22)
製造現場の DX に貢献する製造実行システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	•••••		中嶋	孝広	喜多村	」 卓	27 (27)
工場設備の自動化に貢献するモーションコントローラ							31 (31)
プラントの監視制御システムの高度化に貢献する差圧・圧力発信器	•••••		山下真	〔一郎	坂上	智	35 (35)
EV 駆動部品の使用環境を再現する性能試験システム	大竹	克朋	三春	勉	宮本	洋圭	39 (39)
排ガス浄化システムの効率的な運用管理を実現する船舶 IoT システム 安信							44 (44)
安全・安心に貢献する放射線管理ソリューション・・・・・	•••••		前川	修	阿部	洋平	48 (48)
保守、点検の効率化と予知保全の実現に貢献するスマート保安サービス	•••••		須長	祐悟	福島	宗次	53 (53)
製品紹介論文							
1,700 V/75 ~ 200 A 4 in 1 モジュール	•••••		•••••	•••••		•••••	59 (59)
配線用遮断器・漏電遮断器用の外部操作ハンドルと端子カバー							62 (62)

No.2 特集 2022 年度の技術成果と展望

特集に寄せて

"エネルギー・環境技術の革新で	
安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献"	71(3)
"エネルギー・環境技術の革新により、市場環境の変化に対応し、	
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"	72(4)
ハイライト・・・・	73(5)
パワエレ エネルギー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	82 (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	87 (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·····	94 (26)
□産業 □電装	
発電プラント・・・・・	97 (29)
□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	101 (33)
□自動販売機 □店舗流通	
基盤・先端技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	103 (35)
□基盤技術 □先端技術	

No.3 特集 カーボンニュートラルの実現に向けたソリューション・技術

〔特集に寄せて〕カーボンニュートラルと電力システム ……………………………………………………………… 安田恵一郎 119(3) 〔現状と展望〕カーボンニュートラルの実現に向けた 外山健太郎 120 (4) 全体最適を実現するデジタルツインモデル型 CEMS ………………………………………… 竜田 尚登 松本 宏治 127 (11) 飯坂 達也 再生可能エネルギーの導入拡大を支える電力流通ソリューション…………… 岡林 弘樹 三好龍之介 藤尾 昂弘 133 (17) 電力の安定供給に貢献する系統用蓄電システム…………………………………… 金本 真依 毛内 俊晴 宮村 尚孝 138 (22) 新たな分散型電力システムの設備導入に向けた 設備設計シミュレーション技術………………………………………… 石上 雄太 佐藤 智希 林 巨己 145 (29) 船舶・港湾分野におけるカーボンニュートラルへの取組み……………………………… 造田 大祐 林 寬明 項 東輝 151 (35) 池田 良成 松尾 壮太 156 (40) コンビニエンスストア店舗向け省エネルギーソリューション…………………………………………………………………………… 石原 雄大 162 (46) 洋 166 (50) 高効率な直流配電システムの構築を可能にする DC/DC コンバータ………… 依田 和之 田重田稔久 山田 隆二 170 (54) 熱プロセスの電化に貢献する排熱回収・利用技術…………………………… 岩崎 正道 白井 英登 安嶋 賢哲 175 (59) 水素・アンモニアの普及を支える計測技術……………………………………………………………… 小泉 和裕 山内 芳准 武田 直希 179 (63) 新製品紹介論文

No.4 特集 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

〔特集に寄せて〕 ワイドバンドギャップパワー半導体								
―エネルギー転換の革命か進化か ―					ncker, l	Rik W	197	(3)
〔現状と展望〕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・・・・・	大西	泰彦	宮坂	忠志	井川	修	201	(7)
中国向け BEV 用新型 IGBT モジュール「M675」	髙島	健介	吉田	崇一	立石	義博	207	(13)
xEV 向けモジュールのパワーサイクル寿命向上	中村	瑶子	渡壁	翼	浅井	竜彦	211	(17)
産業向け大容量 IGBT モジュール「HPnC」	日達	貴久	川畑	潤也	小平	悦宏	216	(22)
第 7 世代「X シリーズ」中容量 IGBT-IPM「P638」	藤井	優孝	城塚	直彦	唐本	祐樹	220	(26)
第 4.5 世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6C60 シリーズ」	小林	善則	山路	将晴	山本	毅	225	(31)
第 7 世代 2,300 V「X シリーズ」IGBT/FWD チップ	松本	治輝	田村	隆博	唐本	祐樹	231	(37)
大容量モジュール内蔵ゲート抵抗チップ技術	狩野	太一	宮澤	康弘	鎌田	省吾	235	(41)
SJ 構造適用による SiC-MOSFET の低損失化と信頼性向上	俵	武志	竹中	研介	成田	舜基	240	(46)
新製品紹介論文								
サーボシステム「ALPHA7」診断オプション							244	(50)





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



サステナブルな社会の実現に貢献



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 パーサルデザイン(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 07797-2