

第2世代 1,700V All-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, Taku

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⁽¹⁾。

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 1,200 V、定格電流 300 ~ 600 A の All-SiC モジュールを開発している⁽¹⁾。

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⁽²⁾。そのため、インバータ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⁽³⁾。

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。

② 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⁽³⁾。

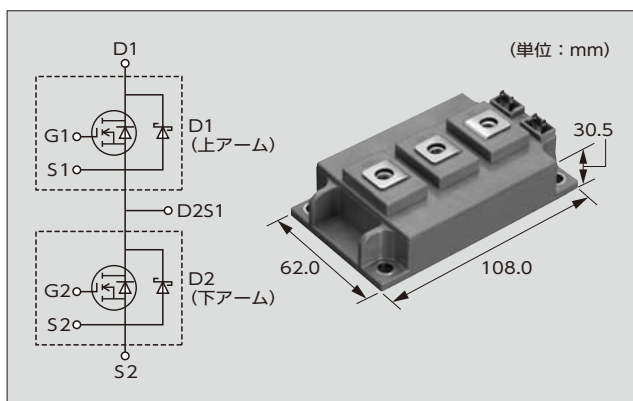


図 1 1,700 V 定格 All-SiC モジュールの回路構成と外観

2.2 新構造「M295」パッケージ⁽⁴⁾

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_{DS} は Si-IGBT モジュールのオン電圧 V_{CE} よりも小さく、 $I_D=150\text{ A}$ 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、モジュール

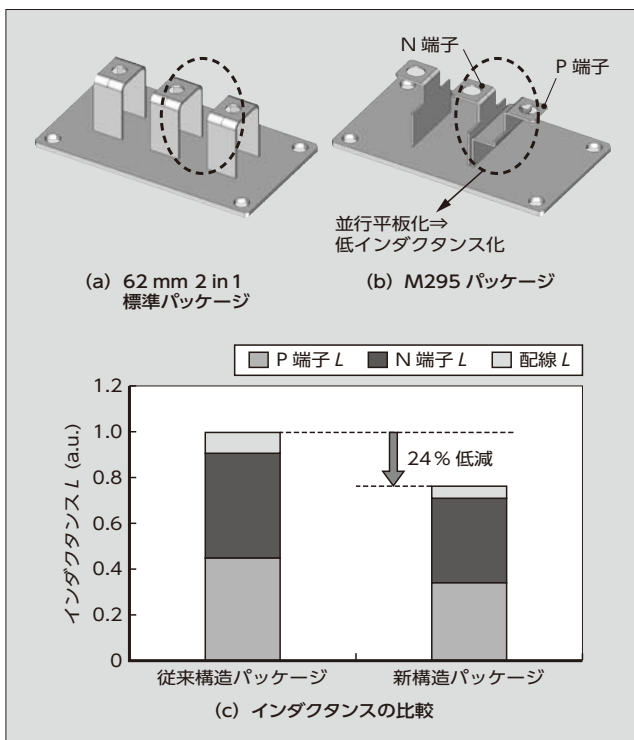


図 2 パッケージ内部構造

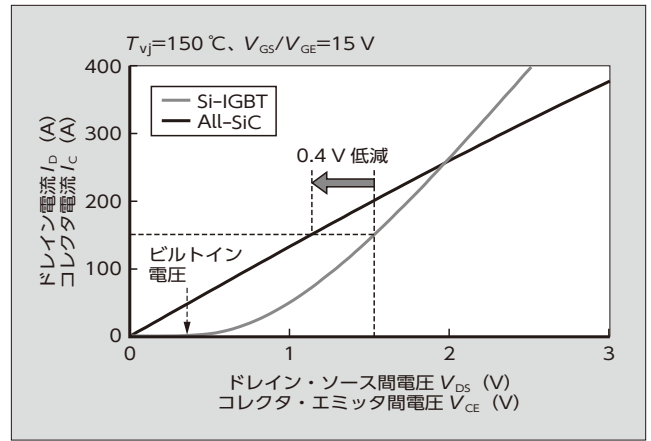


図 3 出力特性の比較

ル定格電流の 30 ~ 50% にて設計されることが多い。このため、 $I_D=150\text{ A}$ 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witching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 が大きいのが、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 $T_{vj}=175\text{ deg.C}$	ターンオフ		ターンオン	
	R_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

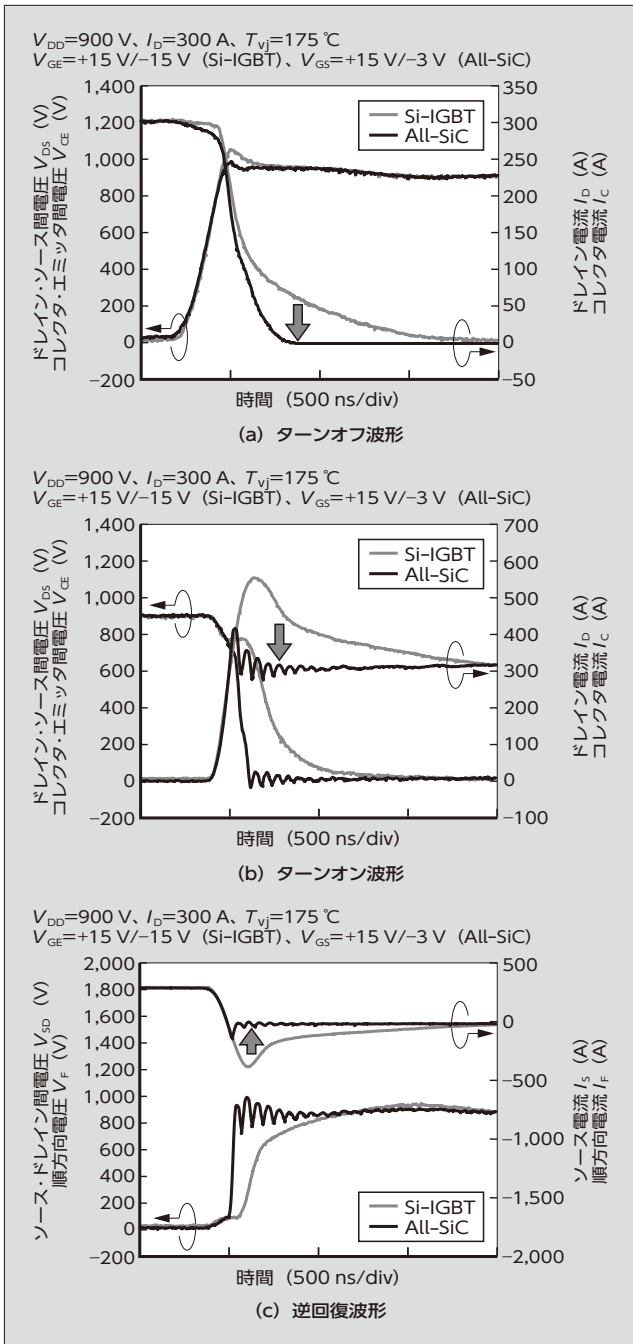


図4 All-SiC モジュールと Si-IGBT モジュールのスイッチング波形の比較

表2 スwitchング損失の比較

スイッチング条件 $T_{vj}=175 \text{ deg.C}$	ターンオフ損失 E_{off}	ターンオン損失 E_{on}	逆回復リカバリ損失 E_{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

り損失 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

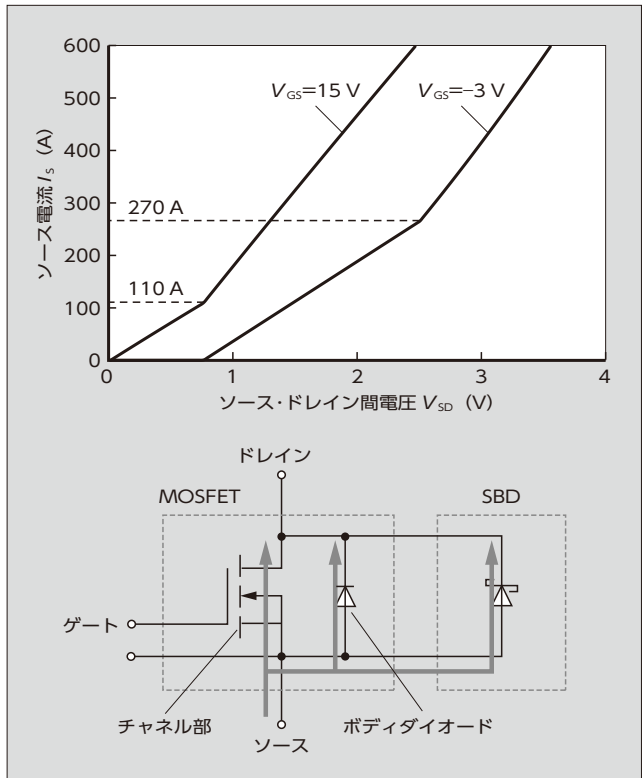


図5 ソース電流の出力特性

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-MOSFET 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⁽⁵⁾。すなわち、ゲート・ソース間電圧 $V_{GS} = -3 \text{ V}$ 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、 $V_{GS} = 15 \text{ V}$ の場合、 I_S が変曲点の電流値 110 A 以下では MOSFET のチャン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 1,500 V、出力電流実効値が 150 A 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。1,700 V/300 A 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

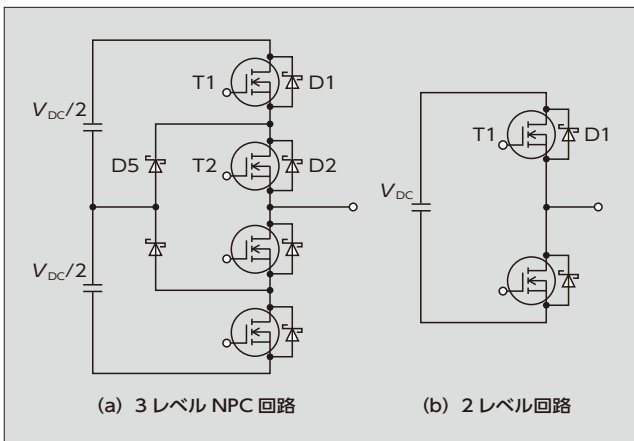


図6 3レベルおよび2レベルインバータ回路

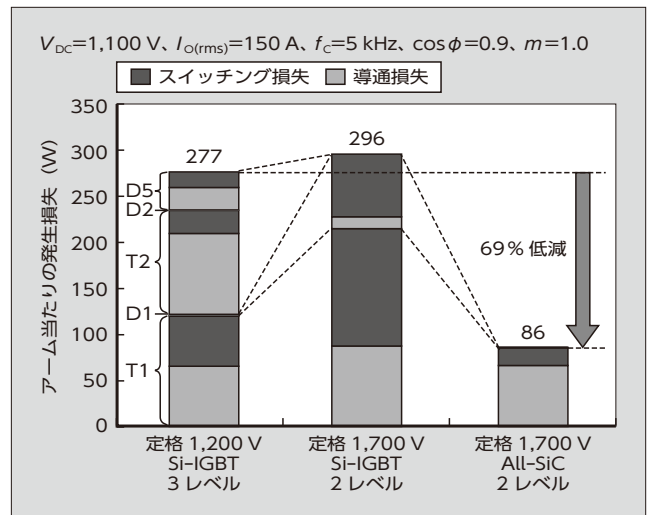


図8 3レベル回路と2レベル回路での損失比較

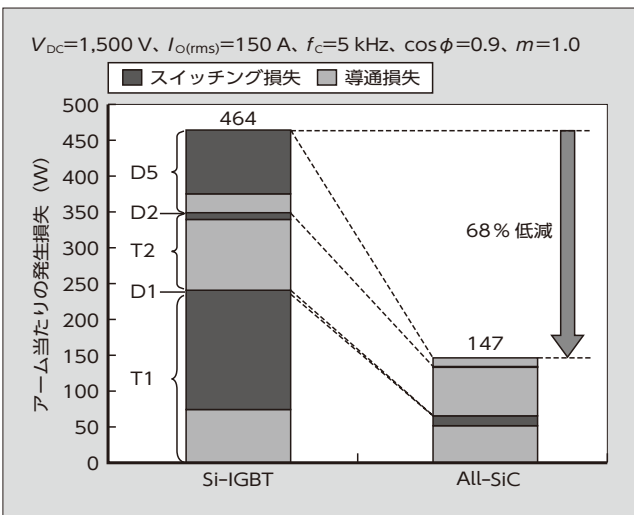



図7 DC1,500 V 3レベルインバータ回路での損失比較

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 1,100 V 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 1,700 V 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。

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
第2世代 トレンチゲート	M295 	2 in 1	1,200 V	300 A
				450 A
				650 A
			1,700 V	200 A
				300 A
			1,700 V	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 1,700 V 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。

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-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.
- (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。



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。





*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。