第 2 代 1200V All-SiC 模块的产品系列扩大

1,200-V 2nd-Generation All-SiC Modules

高崎 爱子 TAKASAKI, Aiko　　奥村 启树 OKUMURA, Keiji　　丸山 力宏 MARUYAMA, Rikihiro

富士电机将搭载在各种电力转换装置上的 Si-IGBT 模块产品推向市场，为实现低碳社会做出贡献。此次，为了改善电力转换效率，开发了搭载第 2 代 1200 V 沟槽型栅结构 SiC-MOSFET 芯片的 All-SiC 模块。通过采用具有低导通电阻的第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET，在保持与现有产品兼容性的同时，还可降低内部电感，实现了低损耗化。这样，与传统 Si-IGBT 模块相比，可将变频器损耗降低 63%，有助于电力电子设备的高密度化和小型化。

Fuji Electric has been commercializing Si-IGBT modules for use in a variety of power conversion systems to contribute to realizing a low-carbon society. We have recently developed All-SiC modules equipped with 2nd-generation trench gate SiC-MOSFET chips to improve power conversion efficiency. While maintaining compatibility with conventional products, they reduce internal inductance and power loss by taking advantage of the low on-resistance of the 2nd-generation SiC trench gate MOSFET. Compared with conventional Si-IGBT modules, they reduce inverter generated loss by 63%, contributing to the improved density and miniaturization of power electronics equipment.

1 引言

为实现低碳社会，需要电力电子设备的节能化。为实现节能化，需要提高电力电子设备的电力转换效率，在其中起着重要作用的是功率半导体。现在，作为主流的硅（Si）器件的特性已接近其物理极限，大幅改善特性变得非常困难。在此情况下，使用宽带隙半导体碳化硅（SiC）作为下一代半导体材料的器件备受关注。与 Si 器件相比，SiC 器件可大幅降低损耗，有望进一步提高电力电子设备的电力转换效率，实现节能。

富士电机于 2017 年推出了第 1 代 All-SiC 模块。该产品是将采用沟槽型栅结构的第 1 代 SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 芯片[(1)-(3)]搭载于全模封装中的 2 in 1 模块[(1),(4)]，其额定容量为 1200 V/400 A。并且，使用传统 Si-IGBT 模块的 62 mm 2 in 1 标准封装（W108 mm×D62 mm），开发了确保外形和端子配置兼容性的 All-SiC 2 in 1 模块。

此次开发的第 2 代 1200 V All-SiC 模块，与现有产品兼容的同时降低了内部电感。而且，通过采用第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET，导通电阻比第 1 代更低，实现了低损耗化。

本稿将对采用了外形与 Si-IGBT 模块的 62 mm 2 in 1 标准封装相同的 M295 封装〔2 in 1 封装（W108 mm、D62 mm）〕、额定容量为 1200 V/600 A 的 All-SiC 模块进行介绍。

2 第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET

通过从第 1 代到第 2 代芯片的厚度减薄和沟槽结构的元胞间距微细化，耐压 1200 V 的第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET[(5)]的标准化导通电阻 R_{on}·A 比第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 降低了 23%（**图 1**）。此外，沟道迁移率比第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 提高了 20%。

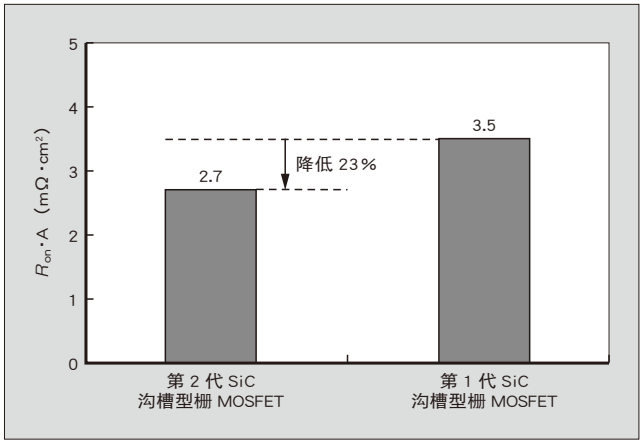


图 1　第 2 代 SiC 沟槽型栅与第 1 代 SiC 沟槽型栅的 R_{on}·A 比较

3 M295 封装

因为 SiC-MOSFET 是多数载流子器件（单极型器件），所以与少数载流子器件（双极型器件）Si-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 相比，开关速度可以更快。但是，高速开关也有弊端，由于模块内部配线电感的影响，可能引起较大的浪涌电压。

因此，在 M295 封装中，为确保 Si-IGBT 62 mm 2 in 1 标准封装的外形和端子配置的兼容性，降低配线电感，采取了以下措施。Si-IGBT 的 2 in 1 标准封装和此次开发的 M295 封装的内部结构如**图 2** 所示。如**图 3** 所示，M295 封装采用了尽可能接近邻近并列的主端子的平板部分，从而可以灵活利用电磁相互感应作用的母排结构，内部

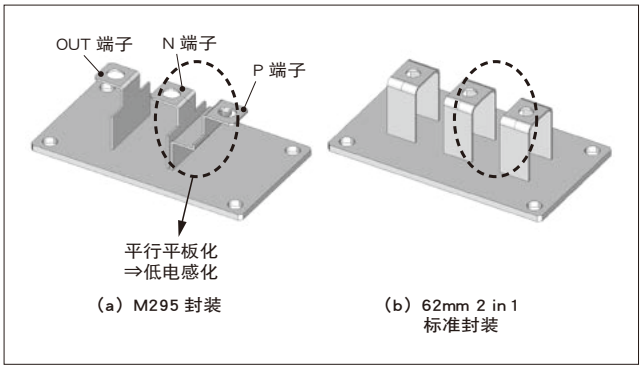


图 2　M295 封装与 62 mm 2 in 1 标准封装内部结构的区别

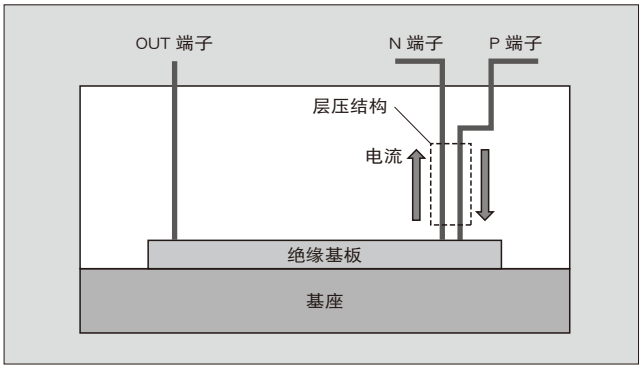


图 3　模块的截面结构

电感比以往减少了 24%。

4　搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块（1200 V/600 A 额定产品）的电气特性

4.1　输出特性

图 4 所示，为第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 搭载在 M295 封装上的 All-SiC 模块与采用标准封装的第 7 代“X 系列”Si-IGBT 模块 1200 V/600 A 额定产品的输出特性比较结果。通常，MOSFET 的特点是没有 IGBT 等双极型器件中的内建电压。因此，在额定电流（I_D=600 A）以下，

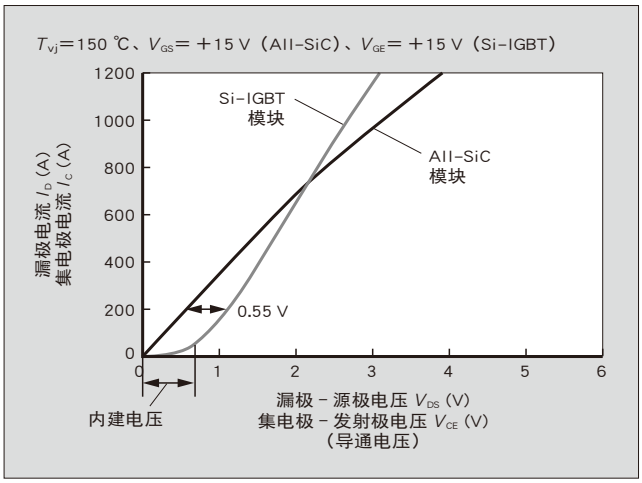


图 4　输出特性的比较

搭载 MOSFET 作为开关元件的 All-SiC 模块比 Si-IGBT 模块的导通电压低。

在变频器等电力转换装置中，通常以模块额定电流的 30% 左右运行，因此，用相当于模块额定电流约 30% 的 200 A 进行了比较。其结果，All-SiC 模块的导通电压比 Si-IGBT 模块低约 0.55 V，稳态损耗可降低约 50%（**图 9** 的 P_{sat}）。

4.2　开关特性

如**图 5** 所示，通常 Si-IGBT 模块在温度变高时开关速度变慢。

但如**图 6** 所示，All-SiC 模块在 T_{vj}=25 ℃和 150 ℃

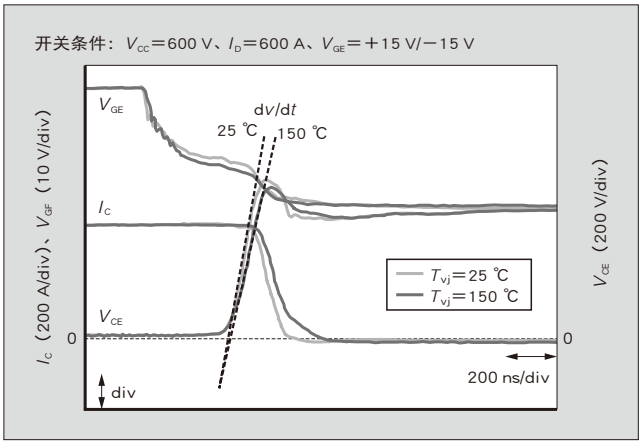


图 5　Si-IGBT 模块的 T_{vj}=25 ℃与 150 ℃的开关波形比较

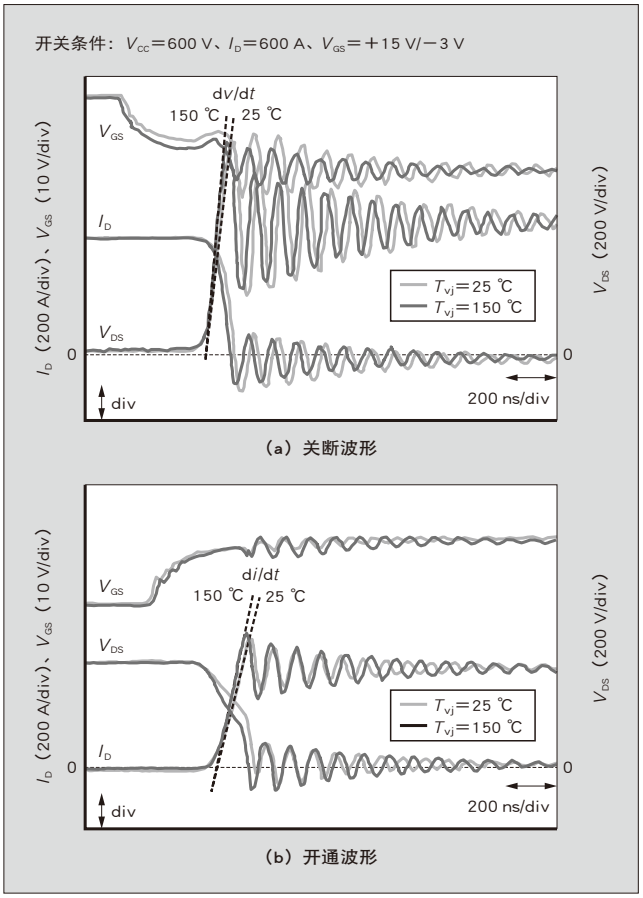


图 6　All-SiC 模块 T_{vj}=25 ℃与 150 ℃的开关波形比较

时，开关速度几乎没有变化。其中的原因，是 All-SiC 模块几乎没有在 Si-IGBT 模块中看到的关断和反向恢复时的拖尾电流，而且载流子迁移率的温度依赖性很小。

针对 All-SiC 模块和 Si-IGBT 模块，在 T_{vj}=150 ℃的情况下，选择使开关速度指标 dv/dt 和 di/dt 大致相同的驱动栅极电阻 R_G 来比较开关特性，其比较结果如**图 7** 所示。

与 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块关断（**图 7**(a)）时的拖尾电流大幅减少。另外，在反向恢复（**图 7**(c)）时，除了拖尾电流之外，峰值电流也大幅减少。这是因为在开关时，

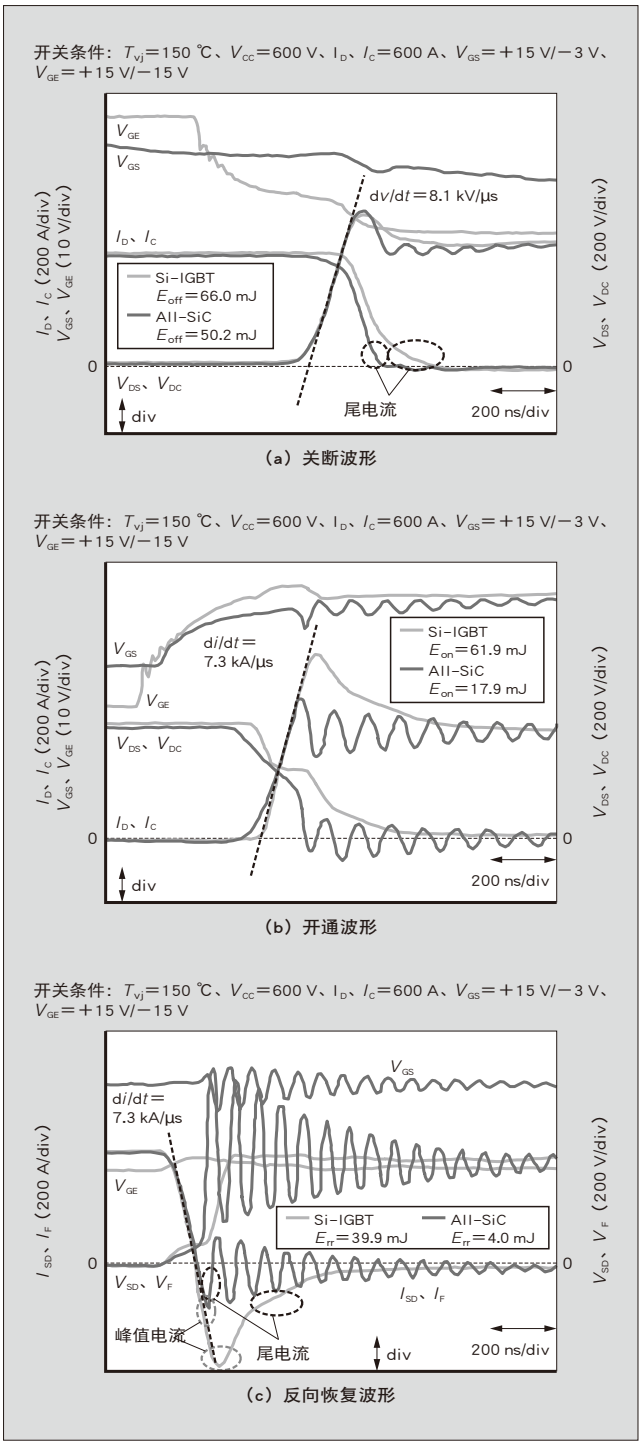


图 7　额定值 1200 V/600 A 的 All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块的开关波形

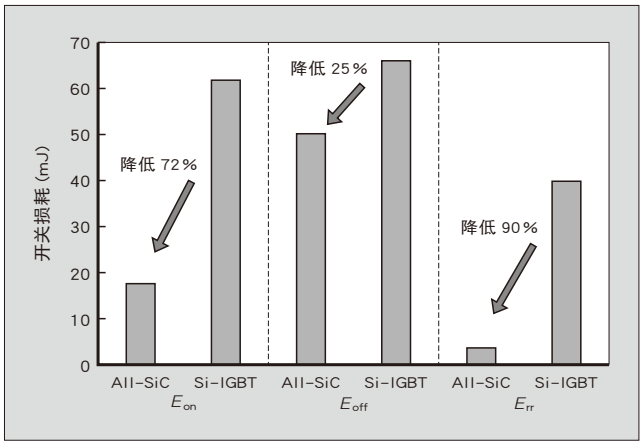


图 8　额定值 1200 V/600 A 的 All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块的开关损耗比较

Si-IGBT 模块需要通过注入少数载流子才能动作，而 All-SiC 模块只需多数载流子即可动作。另外，All-SiC 模块关断时的 di/dt 虽然比 Si-IGBT 大，但关断时的浪涌电压却控制在大致相同的水平。这是由**第3章**中所述 M295 封装的低电感化效果造成的。

因此，与 Si-IGBT 模块相比，在额定电流 600 A 下，All-SiC 模块关断损耗 E_{off} 降低了 25%，开通损耗 E_{on} 降低了 72%，反向恢复损耗 E_{rr} 降低了 90%（**图 8**）。

这样，在开关速度相同的情况下，All-SiC 模块的总开关损耗比 Si-IGBT 模块低 57%。

5　变频器损耗计算结果

在**第4章**的 All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块的 dv/dt 和 di/dt 大致相同时的驱动条件下，通过仿真计算二电平变频器的损耗，其结果如**图 9** 所示。在相同输出电流〔$I_{O(rms)}$=200 A〕的条件下搭载 All-SiC 模块时，由于开关损耗的大幅降低，在开关频率 f_c=5 kHz 时，变频器损耗降低 59%，结－壳间温度 ΔT_{vj-c} 降低 4 ℃。另外，在更高的开关频率 f_c=20 kHz 下，变频器损耗可以降低 63%，ΔT_{vj-c} 降低 14 ℃。从另一个角度看，搭载 All-SiC 模块时，f_c=20 kHz 的损耗与搭载 Si-IGBT 模块时 f_c=5 kHz 的损耗大致相同。因此，如果采用搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块，由于损耗变小，从而可以实现高密度化和大容量化。同时，通过提高工作频率，可使用小型的无源器件，有助于电力电子设备的小型化。

6　第 2 代 1200 V All-SiC 模块的产品系列扩大

表 1 所示，为搭载了第 2 代 1200 V MOSFET 的 All-SiC 模块产品阵容计划。目前，从小容量的 Small 1B、Small 2B、EconoPACK™ 2〈注〉到中容量的 M295 62 mm 模块，均在进行系列开发。这些产品采用了与传统 Si-IGBT 模块在外形和端子配置上具有兼容性的封装。

〈注〉EconoPACK™：Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

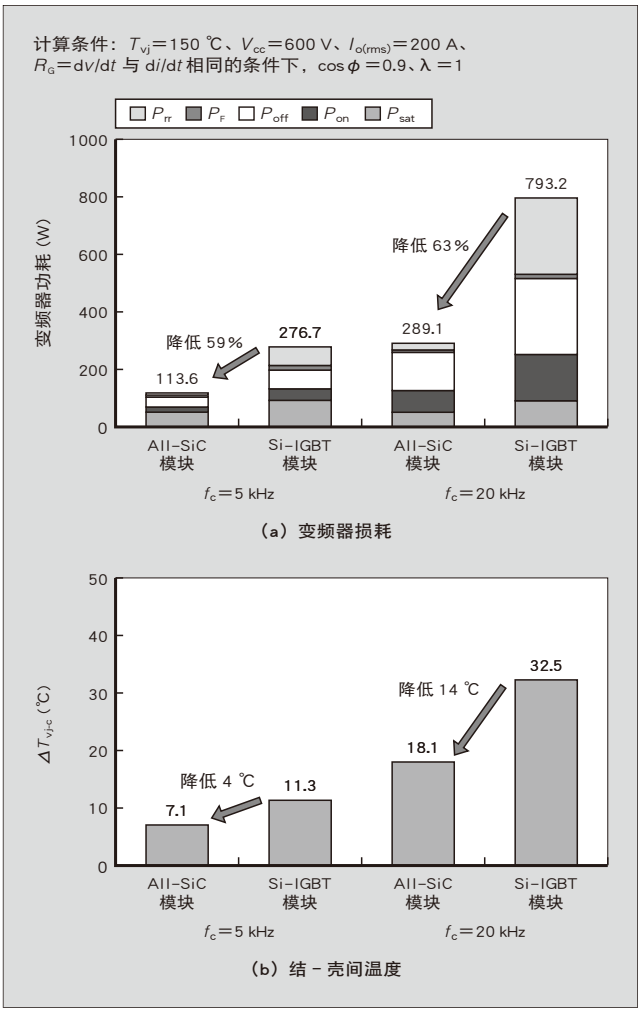
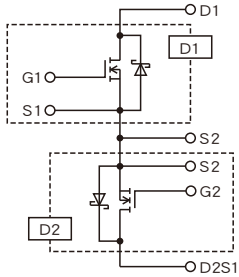
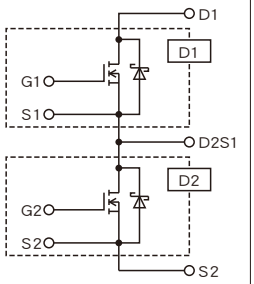


图 9　变频器中产生损耗的仿真效果

另外，近年来，在可再生能源领域，变频器电路中具有中性点的三电平变频器的应用正在推进。这是因为，与许多电力转换装置中采用的二电平变频器相比，三电平变频器可通过抑制输出侧的高次谐波和降低损耗来实现高效化。[6],[7] 因此，

表 2　搭载 M295 62 mm 封装的 All-SiC 模块的内部电路

类型	双向开关	2 in1
模块内部电路		
	与 2 in1 型的区别：源通用规格	

如**表 2** 所示，在采用本文所述 M295 的 62 mm 封装的模块中，除了 2 in 1 之外，还计划将具有可构成三电平变频器双向开关内部电路的模块添加到系列中。

7　后记

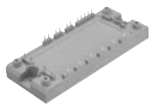
以上，对第 2 代 1200 V All-SiC 模块的产品系列扩大进行了介绍。

根据变频器损耗仿真结果，使用该产品可大幅降低损耗，实现高电力密度化和装置的小型化与轻量化。今后，富士电机将通过把 All-SiC 模块用于各种电力电子设备来实现节能，继续为 All-SiC 技术的发展做出贡献。

参考文献

(1)　Iwasaki, Y. et al. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package”。PCIM Europe 2017. p.651-657.
(2)　辻崇等. 1.2kV SiC 沟槽型栅 MOSFET. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.3-6.
(3)　小林勇介等. 利用仿真预测 SiC 沟槽型 MOSFET 的特性. 富

表 1　第 2 代 1200 V All-SiC 模块的产品阵容计划

封装		外形尺寸 W×D×H (mm)	电路图样	额定电流							
				50 A	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	450 A	600 A
Small1B		33.8×62.8×12.0	2 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
			6 in 1	○	—	—	—	—	—	—	—
Small2B		56.7×62.8×12.0	2 in 1	—	—	○	○	○	—	—	—
			6 in 1	○	○	○	—	—	—	—	—
Econo PACK ™* 2		45.0×107.5×20.5	6 in 1	○	○	○	○	—	—	—	—
62 mm (M295)		62.0×108.0×30.5	2 in 1	—	—	—	—	—	○	○	○
			双向开关	—	—	—	—	—	○	—	—

* EconoPACK ™：Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.2, p.78-81.
⑷ 中泽将刚等. 搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.3-6.
⑸ 奥村启树等. 第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.17-20.
⑹ 陈土爽清等. 3 电平电力转换器用大容量 IGBT 模块. 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.1, p.10-13.
⑺ 小松康佑ほか. アドバンスト NPC 回路用 IGBT モジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.

高崎　爱子
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部产业模块部。

奥村　启树
从事 SiC 功率 MOSFET、SBD 的研究、开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部元件开发部。

丸山　力宏
从事 SiC 模块的开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。