面向配电设备的搭载有沟槽型栅 MOSFET 的 3.3 kV All-SiC 模块

3.3-kV All-SiC Module with Trench-Gate MOSFETs for Electric Distribution Equipment

金井 直之 KANAI, Naoyuki　　保谷 昌志 HOYA, Masashi　　辻 崇 TSUJI, Takashi

富士电机参与了国立研究开发法人 新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的项目，正致力于开发适用于太阳能发电等分散型能源大量导入时可稳定电网的配电设备和控制系统。富士电机针对配电设备开发了搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）的 3.3 kV All-SiC 模块。相比于以往搭载有 SiC 平面型栅 MOSFET 的模块，变频器损耗降低了 60%，实现了高功率密度化。

Fuji Electric has participated in the project of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and is developing electric distribution equipment and control systems to stabilize the power grid when the massive introduction of distributed energy sources, such as photovoltaic power generation. In this regard, we have developed a 3.3-kV All-SiC module equipped with SiC trench-gate MOSFETs for electric distribution equipment. The module reduces inverter loss by 60% and achieves higher power density compared with modules equipped with conventional SiC planar-gate MOSFETs.

1 引言

为应对全球变暖等环境问题，企业需要削减 CO_2 等温室气体的排放量。为达成这一目的，必须积极地利用可再生能源，实现电力电子设备的节能化。而功率半导体，则在电力电子设备的电力转换中发挥着重要作用。传统的主流 Si（硅）器件不断得到改良，其性能已经接近物理极限。在此背景下，利用新一代半导体 SiC（碳化硅）器件，可进一步降低损耗，有望为节能和电力电子设备的小型轻量化做出贡献。

富士电机从 2014 年 9 月开始，参与了国立研究开发法人 新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的“分散型能源新一代电网构建实证事业”项目的开发。为了扩大以太阳能发电为中心的可再生能源导入，维持并提升电力、设备系统产业方面的国际竞争力，富士电机正致力于开发使用 SiC 功率半导体的静止型无功补偿器（SVC：Static Var Compensator）等新一代电压调节设备（配电设备）及其控制系统。

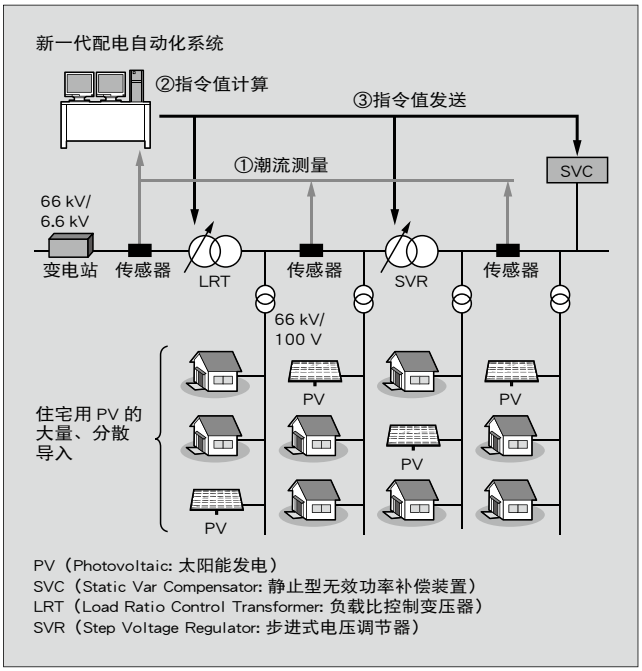

图 1　NEDO 项目分散型能源新一代电网构建实证事业的概要

2 配电设备用 All-SiC 模块

在 NEDO 项目的分散型能源新一代电网构建实证事业中，随着将以太阳能发电为中心的分散型能源大量导入配电系统中，会出现产生剩余电力、频率调节能力不足、配电线电压上升等众多技术课题，富士电机正致力于开发可解决这些课题的配电设备及其控制系统（**图 1**）。尤其在日本国内，如果在现在的基础上有更多的一般家庭导入太阳能发电，将出现 6.6 kV 配电系统中电压上升造成的逆潮流、抑制太阳能发电造成损耗等问题。要解决该问题，需要在 6.6 kV 配电系统中导入进行电压调节的静止型无功补偿器（SVC）或步进式电压调节器（SVR：Step Voltage Regulator）等配电设备。在导入时，要求配电设备小型轻量化，以便安装到现有的电线杆上（单根），另外，由于无法通过水冷、强制空冷等方式冷却，因此必须可以自行冷却。

Si 功率半导体的损耗大，导致模块冷却用散热器的尺寸较大。为此，配电设备难以小型轻量化，必须在相邻的 2 根电线杆间设置专用架台[(1)]，而由于设置场所、成本方面的原因，导入工作难以推进。2017 年，通过搭载在 NEDO 项目中开发的 All-SiC 功率半导体模块，实现了配电设备的小型轻量化，从而可安装在单根电线杆上。此外，由于 All-SiC 模块可以在超出人类听觉频率范围的 13 kHz 以上的频率运行，因此有望导入居住区。富士电机在 2017 年，开发了配电设备用 3.3 kV 耐压 All-SiC 200 A 1 in 1 模块，

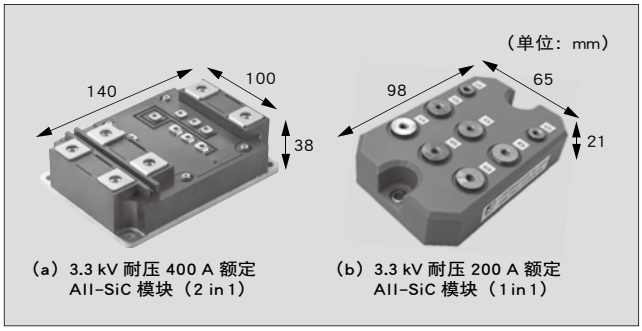

图 2　3.3 kV 耐压 All-SiC 模块

以及搭载了该模块的 SVC[2]。

为了实现配电设备的进一步小型轻量化，目前正在开发大额定容量的模块。在正在开发的封装中，搭载了兼具低导通电阻和高速开关特性的 SiC 沟槽型栅 MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）。本文将对面向配电设备正在新开发的 3.3 kV 耐压 All-SiC 400 A 2 in 1 模块的结构和特性进行介绍（**图 2**）。

要采用 200 A 1 in 1 模块来实现和 400 A 2 in 1 模块相同的电路结构，则需要 4 台。相比而言，All-SiC 400 A 2 in 1 模块的占用空间减小了 45%。

All-SiC 模块结合了 SiC-MOSFET 和 SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）的芯片。越是高耐压，单位面积的导通电阻就越大，耐压达到 600 V 以上时，Si 器件主要使用 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）。IGBT 凭借向漂移层内注入少数载流子空穴，实现电导率调制来降低导通电阻，另一方面由于少数载流子的积累在开关时会产生拖尾电流，这会导致开关损耗增大。针对这个问题，由于 SiC 是宽禁带器件，其漂移层的电阻比 Si 器件还要低，即使没有电导率调制，导通电阻也可以很小，因此 MOSFET 的结构能兼顾高耐压和低损耗。

在 2017 年开发的 All-SiC 200 A 1 in 1 模块中，搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET。一般，元胞间距的微细化可降低 SiC 平面型栅 MOSFET 单位面积的导通电阻。但如果过度微细化，JFET（Junction Field-Effect Transistor）的电阻将增加，使导通电阻难以继续降低。因此，通过使用 SiC 沟槽型栅 MOSFET，可抑制微细化导致的 JFET 电阻成分的增加，从而实现低导通电阻化。

3　模块结构

图 3 是模块截面的概要结构的比较。3.3 kV 耐压 All-SiC 模块的结构，延续了已量产的功率调节器（PCS：Power Conditioning System）用 1.2 kV 耐压 All-SiC 模块的结构[3],[4]。在该 All-SiC 模块的结构中，以形成在功率连接基板上的铜针来进行配线。如此便能流通大电流，实现 SiC 器件的高密度安装。搭载了芯片的绝缘基板中，采用接合了厚铜板的高强度 Si_3N_4（氮化硅）绝缘基板，提升了对环氧树脂密封残留应力的耐受性。另外，采用环氧树脂作为模块内部的密封材料，抑制了高温运行时焊接层的劣化和绝缘性能的降低，确保了高可靠性。但是，要保持这种模块结构进行容量扩大，需要保证充分的绝缘距离，因此存在封装尺寸变大的问题。

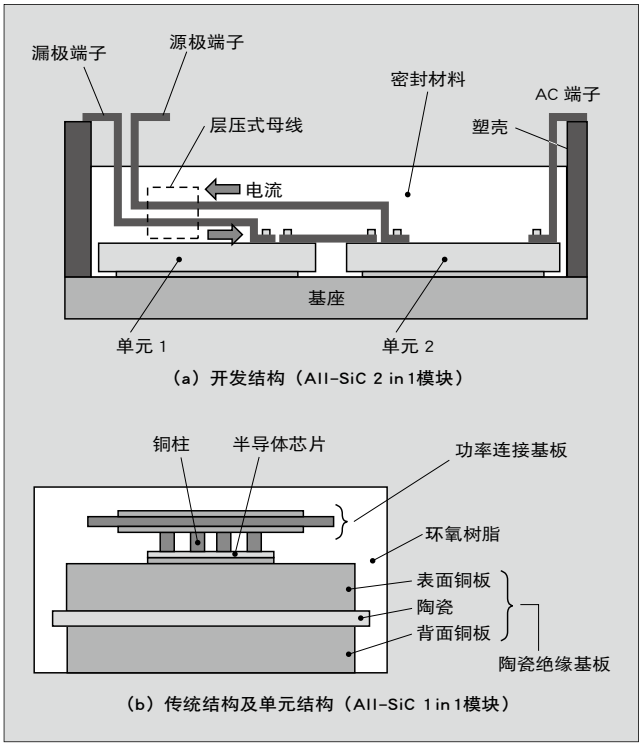

图 3　模块截面的概要结构的比较

于是，在开发的模块中，以树脂密封的单元为基础进行排列，以母线构成 2 in 1 的电路。将单元、母线及其接合部进一步使用密封材料进行密封，形成层压结构，既可避免单元的大型化并同时确保模块的绝缘性，顺利进行容量扩大。模块的外观方面，为了确保和其他公司模块的安装兼容性，采用了和大容量功率模块 “HPnC”（High Power next Core）同样的外观[5]。基座材料采用了线膨胀系数低、导热性能出众的镁和碳化硅的复合材料（MgSiC），确保了用于配电设备时的高可靠性。

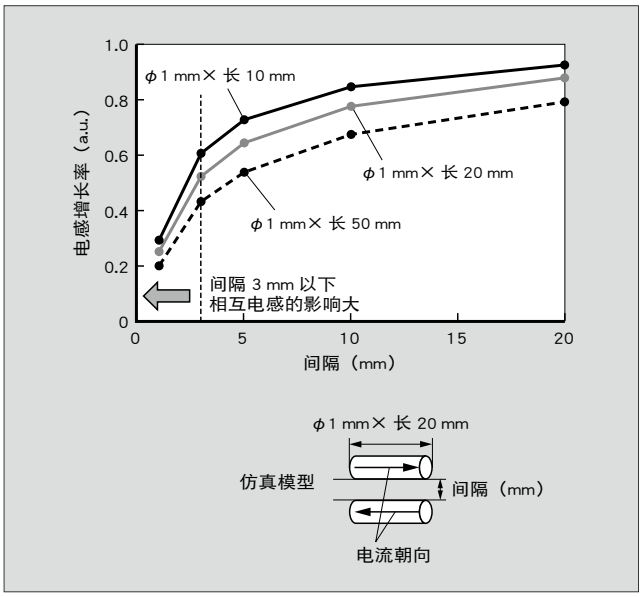

图 4　配线电感（仿真）

由于对漏极端子或源极端子和单元之间的层压式母线配线结构进行了如下的改造，因此在确保绝缘性的同时还降低了模块内部的电感，和 HPnC 同样为 10 nH。

图 4 是对母线配线电感仿真的解析结果。降低配线电感的要点是缩短电流路径、增大电流路径的截面积以及对相互电感的灵活运用。其中，相互电感的灵活运用对封装设计而言十分重要。母线之间间隔越狭窄则相互电感的影响越大，间隔未超过 3 mm 时尤其大。因此，新开发的模块对漏极端子或源极端子和单元之间的母线间的部分进一步使用密封材料进行密封，在确保绝缘性的同时缩小了间隔，使流过母线的电流方向相对，实现了和 HPnC 相同程度的模块内部电感。

4 特性

本次开发的 3.3 kV 耐压 All-SiC 400 A 2 in 1 模块的额定电流为 400 A，搭载了 SiC 沟槽型栅 MOSFET。因此，和搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET 的 200 A 1 in 1 模块的特性进行了比较。

4.1 导通时的 *I–V* 特性

I–V 特性决定了模块导通时产生的损耗（恒定损耗）。**图 5** 是 All-SiC 400 A 2 in 1 模块和 All-SiC 200 A 1 in 1 模块在 T_{vj}=25 ℃和 T_{vj}=150 ℃下的 *I–V* 特性。搭载了 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 400 A 2 in 1 模块和搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET 的 All-SiC 200 A 1 in 1 模块相比，在 25 ℃及 150 ℃下，即使漏极电流达到 2 倍，其漏极电压仍然相同。这是因为 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的导通电阻比 SiC 平面型栅 MOSFET 小的缘故。

4.2 开关特性

开关损耗可以分为开通损耗、关断损耗及反向恢复损耗三种。其中，**图 6** 是 T_{vj}=150 ℃时的开通损耗，**图 7** 是关断损耗。另外，**图 8** 是总开关损耗。

All-SiC 400 A 2 in 1 模块和 All-SiC 200 A 1 in 1 模块相比，栅极电阻为 4.7 Ω 时，开通损耗和关断损耗较低。因此，总开关损耗降低了 20%。SiC 沟槽型栅 MOSFET

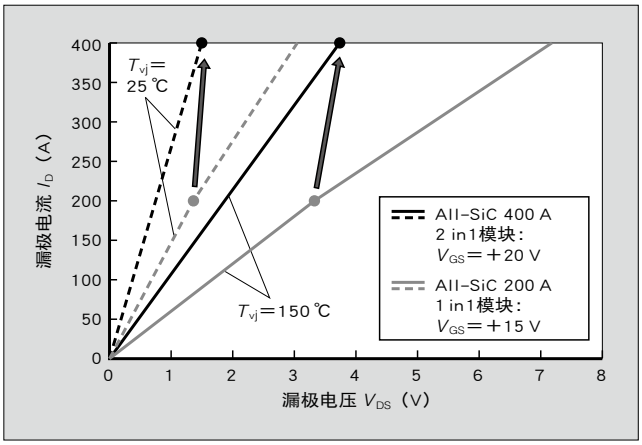

图 5 *I–V* 特性的比较

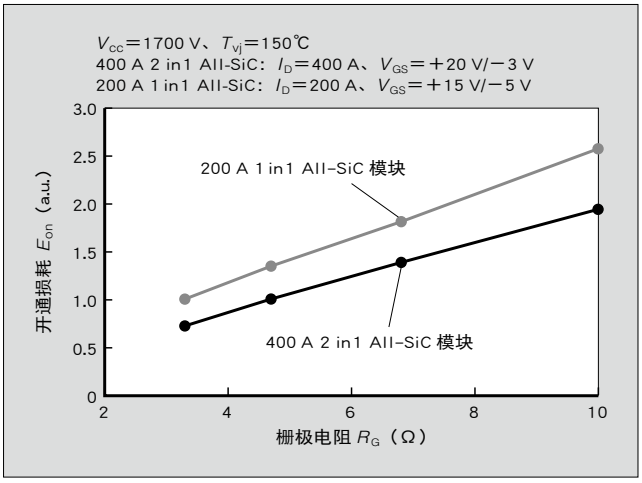

图 6 开通损耗

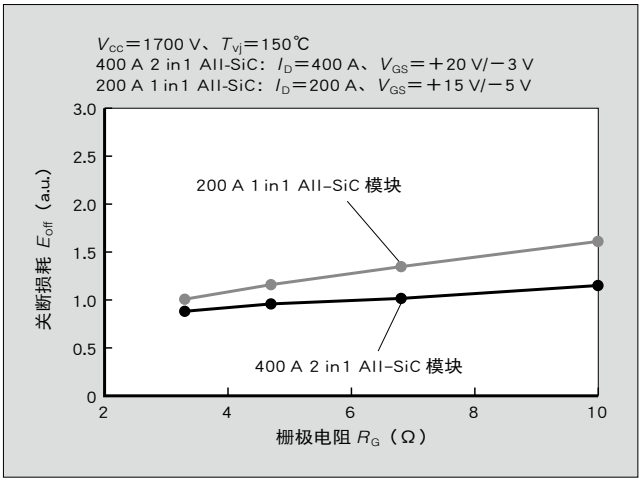

图 7 关断损耗

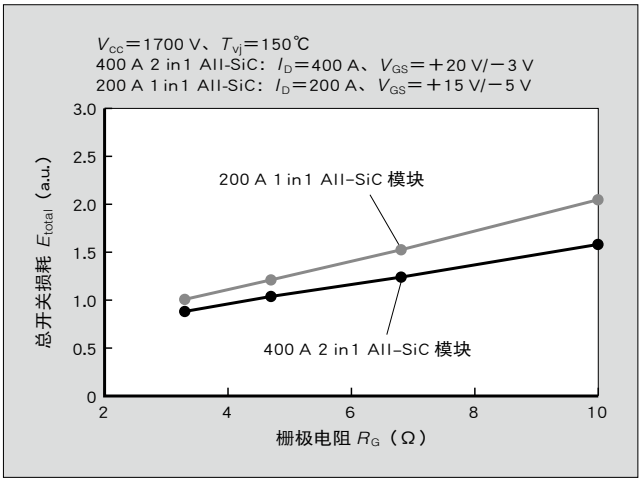

图 8 总开关损耗

由于具有比 SiC 平面型栅 MOSFET 更高速的开关特性，因此即使额定电流达到了 2 倍，总开关损耗也很低。

4.3 变频器产生的损耗的仿真

开发中的配电设备 SVC 的变频器是三电平变频器，其电路构成如**图 9** 所示。富士电机在 SVC 的三电平变频器的

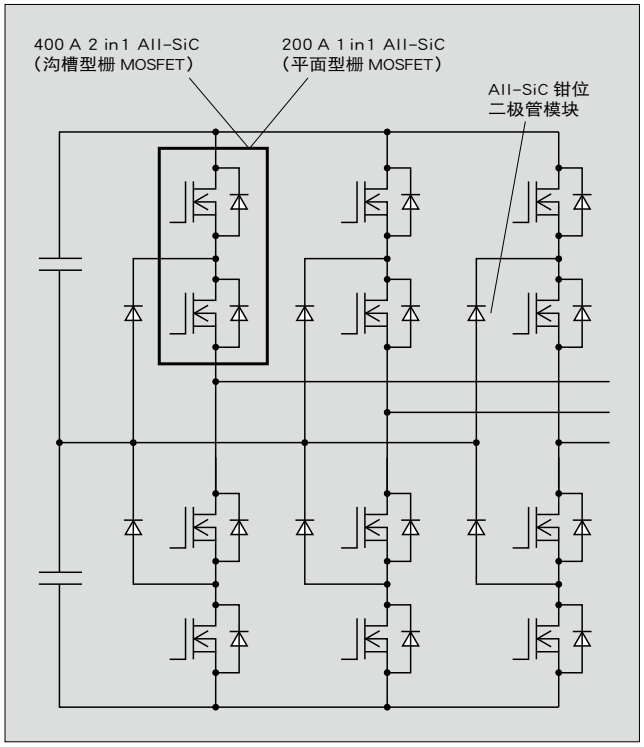

图 9　SVC 三电平变频器电路

使用条件下，对搭载了 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块和搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块进行了变频器损耗的仿真，结果如**图 10** 所示。SVC 的三电平变频器的损耗取决于开关损耗更甚于恒定损耗。因此，搭载了开关损耗低的 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块和搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET 的模块相比，在载波频率为 13 kHz 时，变频器损耗降低了 60%。

图 11 中展示了通过仿真得到的三电平变频器产生损耗对载波频率的依赖性的结果。在 SVC 的三电平变频器的使用条件下，载波频率越高，搭载了 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块与搭载了 SiC 平面型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块之间的损耗差就越大。从这个结果中可以得出结论，搭载了 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块，在高频率下具有更大优势。

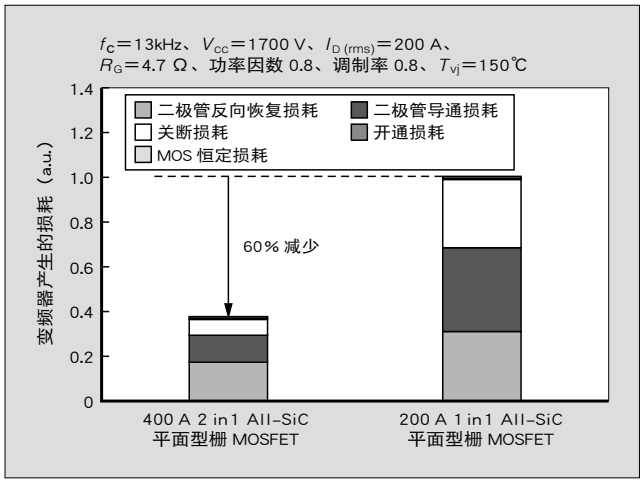

图 10　变频器产生的损耗的仿真

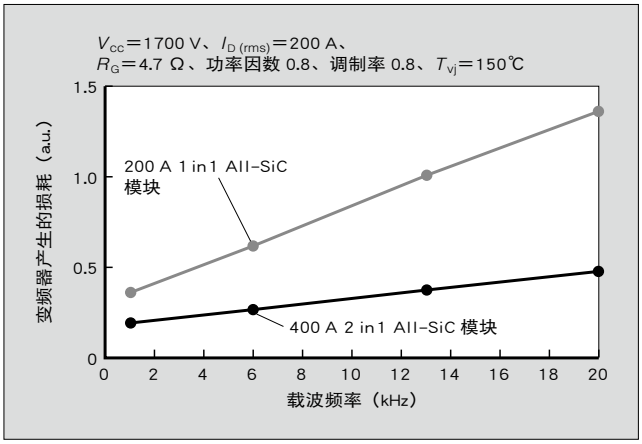

图 11　变频器产生的损耗的载波频率依赖性

5　后记

以上对面向配电设备的搭载了沟槽型栅 MOSFET 的 3.3 kV All-SiC 模块进行了介绍。该产品延续了功率调节器用 1.2 kV 耐压 All-SiC 模块的结构，是一款可靠性更高的模块产品。另外，该产品发挥了低损耗及高频驱动的特点，为自冷、可安装于单根电线杆的小型轻量的配电设备 SVC 的开发做出了贡献。

今后，富士电机将以配电设备的进一步小型轻量化为目标，加快大容量 All-SiC 模块的开发，为电力电子技术的发展和低碳社会的实现做出贡献。

本文中的成果，是从国立研究开发法人 新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的项目——分散型能源新一代电网构建实证事业的结果中得到的。在此向各位相关人员表示深深的感谢。

参考文献

⑴　小岛武彦等. 有助于解决电压变动问题的配电系统用静止型无功功率补偿装置. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.2, p.96-99.
⑵　谷口克己等. 配电设备用 3.3kV 耐压 All-SiC 模块. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.7-10.
⑶　梨子田典弘等. 针对百万瓦级太阳能用功率调节器的 All-SiC 模块. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.7-10.
⑷　仲村秀世等. All-SiC 模块的封装技术. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.3-6.
⑸　关野裕介等. 大容量 SiC 混合模块“HPnC”. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.15-19.

金井　直之
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。应用物理学会会员。

保谷　昌志

从事功率半导体器件用封装的研究开发。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封装开发部。

辻　　崇

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。应用物理学会会员。

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。