All-SiC 2 in 1 模块

All-SiC 2-in-1 Module

蝶名林 干也 CHONABAYASHI, Mikiya　**大友 良则** OTOMO, Yoshinori　**唐泽 达也** KARASAWA, Tatsuya

为制造出支持 IP65 的防尘防水型高性能紧凑型变频器，富士电机使用 SiC 元件，开发出了 All-SiC 2 in 1 模块。SiC 元件相比 Si 元件，可大幅降低开关损耗，但为了使用该元件，在减低模块内部的配线电感的同时，还必须运用可保证高温下运行的高可靠性封装技术。为解决这些，富士电机开发了新的封装结构。相比使用 Si 元件的传统变频器，支持 IP65 的变频器使主电路的损耗降低了 44%。

Fuji Electric has developed an All-SiC 2-in-1 module utilizing a SiC device that has been adopted in the development of a high-performance compact IP65-rated inverter characterized by its dustproof and waterproof features. In order to make use of the much lower switching loss of SiC devices compared with Si devices, it is necessary to create a highly reliable packaging technology that ensures high-temperature operation while also reducing wiring inductance inside the module. Fuji Electric has developed a package with a new structure to meet these requirements. As a result, the IP65-rated inverter reduces loss in the main circuit by 44% when compared with conventional inverters that use Si devices.

1 引言

为实现低碳社会，必须积极利用可再生能源，以及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。现在，主流的硅（Si）元件的特性不断得到改善，但是正逐渐趋近于基于物理特性的理论极限。鉴于这一状况，作为新一代半导体材料的宽禁带半导体材料碳化硅（SiC）备受关注。与 Si 元件相比，SiC 元件可大幅降低损耗，因此，有望为进一步的节能做出贡献。

富士电机针对百万瓦级太阳能用功率调节器（PCS：Power Conditioning Sub-system），结合 SiCMOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）和 SiC-SBD（Schottky Barrier Diode），开发了 All-SiC 模块，并进行了量产。通过在 PCS 的升压电路中使用 All-SiC 模块，使损耗减少了 20%，转换效率达到了世界最高级别的 98.8%。在提升转换效率的同时，还对电路进行了优化，相比设置 2 台传统机型时的情况，成功实现了小型化，占用面积缩小了约 60%[(1)]。

为制造出支持 IP65 的防尘防水型高性能紧凑型变频器，这次，富士电机还开发出了 All-SiC 2 in 1 模块（**图 1**）。该变频器可直接安装于现场的墙壁上，无需用于放置的专用电柜。本稿中将对这种 All-SiC 2 in 1 模块的核心技术和特性进行介绍。

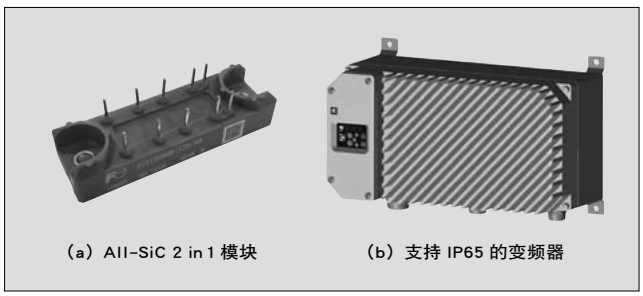

图 1　All-SiC 2 in 1 模块与支持 IP65 的变频器

2 核心技术

2.1 应用 SiC 元件

SiC 的最大电场强度是 Si 的约 10 倍。因此，可将生成电阻的主要原因的漂移层厚度减少至原来的 1/10 左右，大幅削减电力损耗。另外，还能制造出高耐压元件，这是用 Si 无法实现的。并且，SiC 的禁带宽度是 Si 的约 3 倍，因此，在高温下也能稳定运行。除此以外，SiC 的热导率达到了 Si 的 3 倍以上，散热性能好。

使用传统的 Si 元件时，要降低导通电阻，必须应用 2 种载流子。为此，开关时必须进行载流子的注入和释出，因此开关损耗大。由于上述的特性，通过 SiC 元件，可制造出传统的 Si 难以实现的、1200 V 以上耐压的 MOSFET 结构和 SBD 结构的元件。MOSFET 和 SBD 不同于 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）、pn 二极管等双极型晶体管，因为是单极运行的元件，可实现非常高速的开关，从而大幅降低开关损耗。

富士电机从 2013 年开始，在松本工厂启动了世界首条 SiC 6 英寸晶片的生产线。**图 2** 中展示了 6 英寸晶片的外观。

2.2 新封装结构

如 **2.1 节**中所述，SiC-MOSFET 相比 Si-IGBT，可实现高速开关。但随着开关速度的高速化，浪涌电压也会升高，因此必须降低模块内部的配线电感。并且，还需要具有高可靠性的模块用封装技术，其必须能够并联多个 SiC-MOSFET 等小尺寸芯片，且保证 SiC 元件在高温下可以运行。

为解决这些课题，富士电机开发了新的封装结构，用于

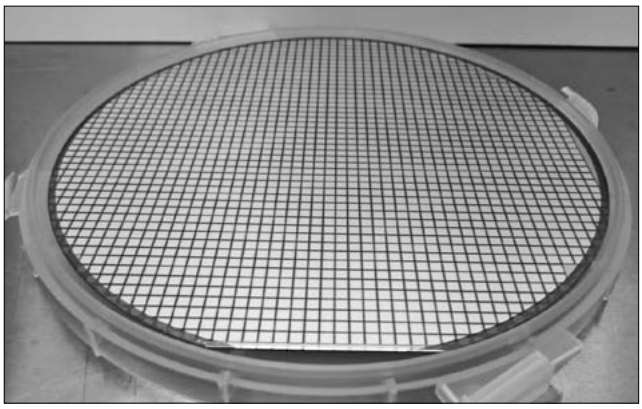

图 2　6 英寸晶片

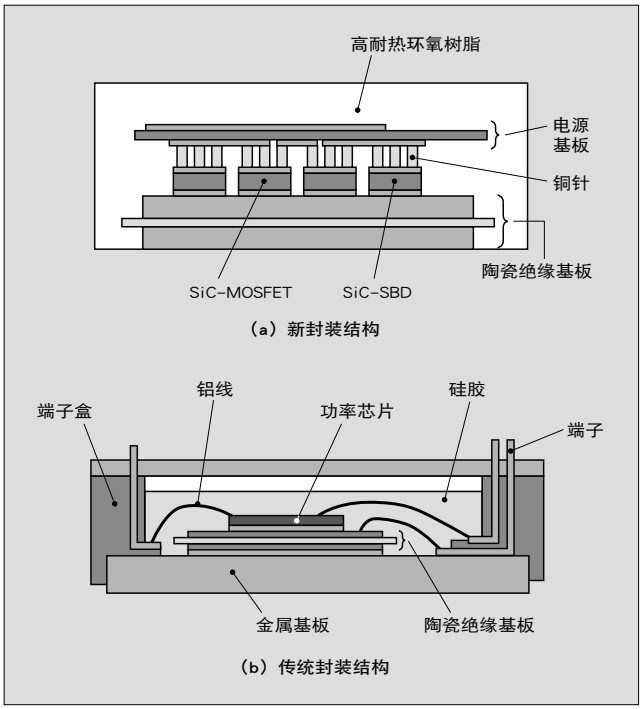

图 3　新封装结构和传统封装结构的比较

All-SiC 2 in 1 模块（**图 3**）[2),3)]。

以**图 3**(a)的新封装结构代替**图 3**(b)中展示的传统的铝线焊接，其用 SiC 元件上形成的铜针进行配线，可通过大电流。另外，还能高密度地安装小尺寸的 SiC 芯片，实现多个芯片的并联。并且，内部的电感可减少至铝线焊接时的约 1/4。采用接合了厚铜板的陶瓷基板，代替安装功率芯片的传统绝缘基板，实现了低热阻化。除此以外，采用高耐热环氧树脂代替模块内部的密封材料——传统的硅胶，从而抑制了芯片和铜针接合部等处的变形。通过采用这一结构，ΔT_j 功率循环耐量达到了传统产品的 10 倍，确保了高度的可靠性。

3　特性

3.1　导通时的 *I*–*V* 特性

I–*V* 特性是决定模块导通时发生的损耗（导通损耗）的特性。**图 4** 中展示了 All-SiC 2 in 1 模块和 Si-IGBT 模块的 *I*–*V* 特性。MOSFET 不像 IGBT 那样有内建电压。因此，All-SiC 2 in 1 模块相比 Si-IGBT，在一定电流以下时可降低导通损耗。

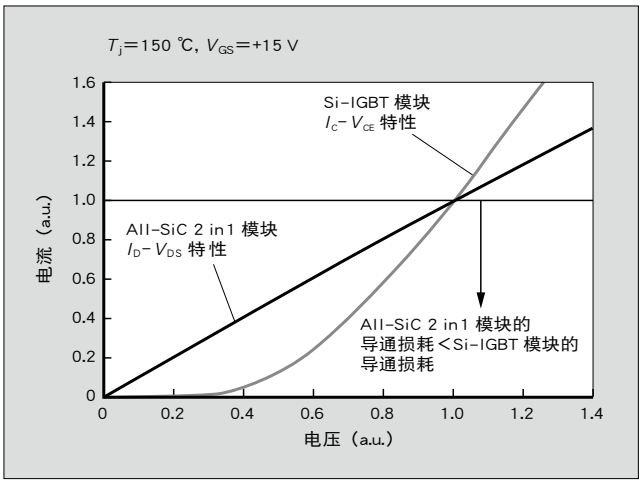

图 4　*I*–*V* 特性

3.2　开关特性

开关损耗可分为开通时发生的开通损耗、关断时发生的关断损耗、反向恢复时发生的反向恢复损耗三种。开通损耗如**图 5** 所示，关断损耗如**图 6** 所示，反向恢复损耗如**图 7** 所示，总开关损耗如**图 8** 所示。All-SiC 2 in 1 模块相比 Si-IGBT 模块，开通损耗降低 62%，关断损耗降低 74%，反向恢复损耗降低 100%。由此，All-SiC 2 in 1 模块相比传统的 Si-IGBT 模块，总开关损耗降低 75%。

3.3　变频器产生的损耗的仿真

我们在变频器的一般使用条件下，对 All-SiC 2 in 1 模块和 Si-IGBT 模块进行了变频器产生的损耗的仿真。载波频率 4 kHz 时的仿真结果如**图 9** 所示。All-SiC 2 in 1 模块的变频器产生的损耗，相比 Si-IGBT 模块降低约 46%。

图 10 中展示了变频器产生的损耗与载波频率的相关性。All-SiC 2 in 1 模块的开关损耗相比 Si-IGBT 模块非常小，即使增加载波频率，变频器产生的损耗的增加幅度也很小。

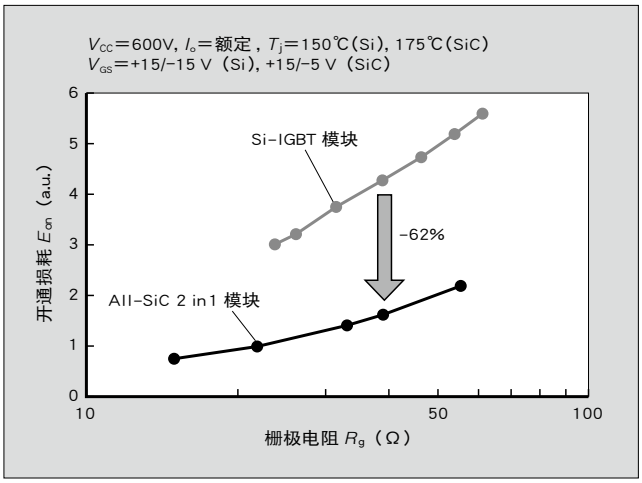

图 5　开通损耗

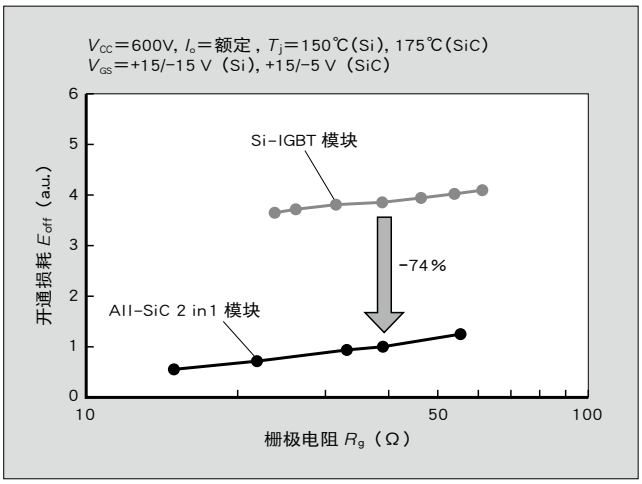

图 6　关断损耗

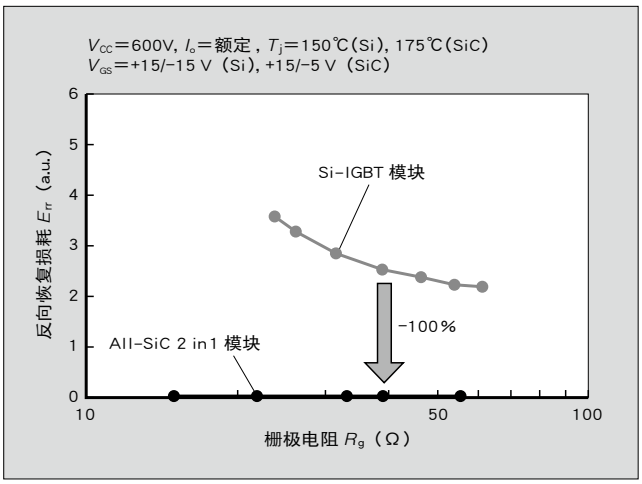

图 7　反向恢复损耗

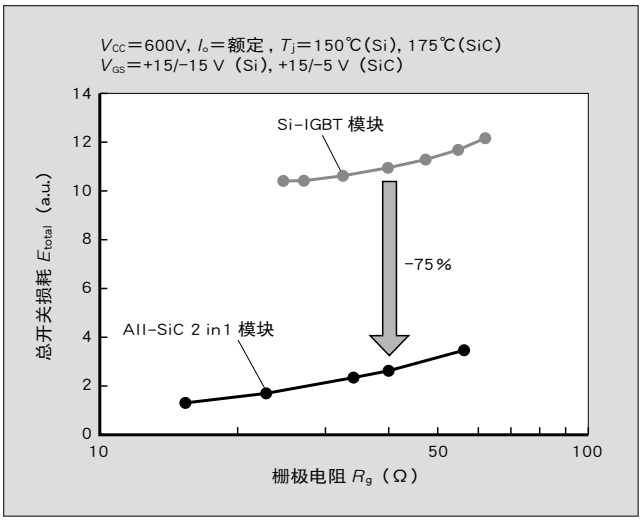

图 8　总开关损耗

因此，All-SiC 2 in 1 模块相比 Si-IGBT，可在更高载波频率下进行开关动作，有助于过滤器等无源器件小型化，进而促进电力电子设备的小型化。

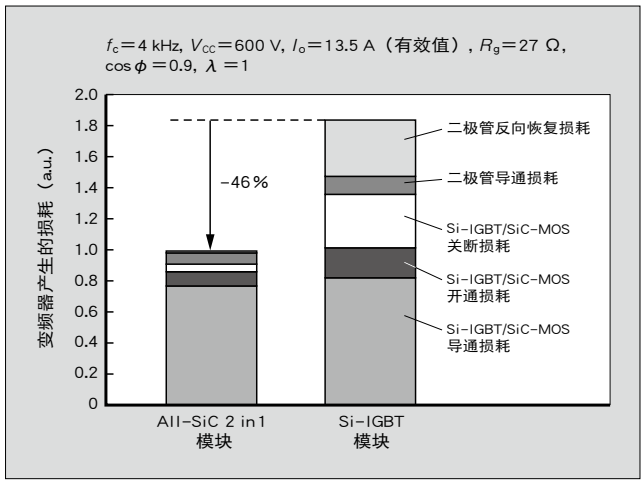

图 9　变频器中产生损耗的仿真结果

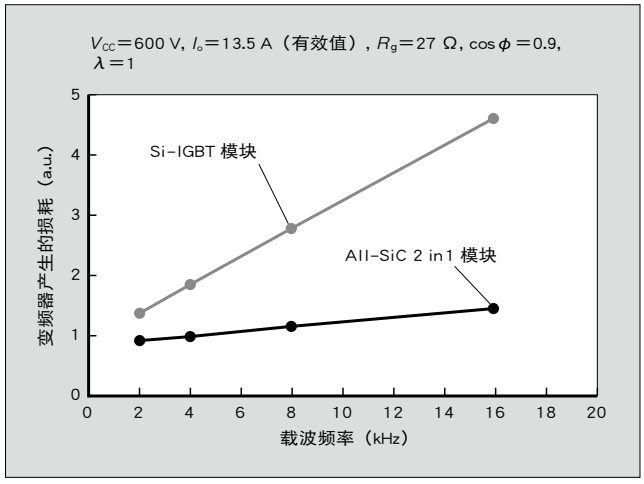

图 10　变频器产生的损耗的载波频率依赖性

3.4　在产品中的应用

富士电机凭借**第2章**中介绍的核心技术将 All-SiC 2 in 1 模块制成产品，并如**表 1** 所示将其扩展为系列产品。支持 IP65 的变频器中采用了小型化优势明显的类型 1〔外形尺寸：W62×D20×H12 (mm)〕。这样，模块的占用面积相比传统的 Si-IGBT 模块〔外形尺寸：W94×D34×H30 (mm)〕，减少了约 60%。

支持 IP65 的变频器，是针对食品加工线、工业锅炉、畜禽厩舍等严苛的使用环境而开发的。在这种环境中使用的变频器，不仅要求小型化，还要求具备高度的防护结构和自冷结构。

为实现这一点，富士电机充分利用 All-SiC 2 in 1 模块低损耗、可保证高温运行、高可靠性、低热阻的特性，为支持 IP65 的变频器的开发做出了贡献。通过搭载 All-SiC 2 in 1 模块，相比搭载传统的 Si 模块的产品，主电路损耗降低了 44%。

表 1　All-SiC 2 in 1 模块的系列产品

项目		类型 1	类型 2	类型 3L
外观				
外形尺寸（mm）		W62×D20×H12	W68×D26×H13	W126×D45×H13
封装		新封装结构		
额定	额定电压（V）	1200		
	额定电流（A）	15，35	50，75	150，200，320
适用元件	MOSFET	SiC-MOSFET		
	SBD	SiC-SBD		

4　后记

本文介绍了用于制造支持 IP65 的变频器的 All-SiC 2 in 1 模块。

现在，SiC-MOSFET 中，在基板表面形成栅极的平面栅型是主流。而为响应进一步节能化和低价格化的市场要求，必须降低 SiC-MOSFET 导通时的导通电阻 R_{on}。为实现这一点，富士电机正致力于沟槽型栅 MOSFET 的开发[4]。通过在 All-SiC 2 in 1 模块中安装沟槽型栅 MOSFET，可进一步实现模块的小型化和大容量化。

今后，富士电机将通过在各种电力电子设备中搭载 All-SiC 2 in 1 模块，为电力电子技术的发展和低碳社会的构建做贡献。

参考文献

⑴　大岛雅文等. 搭载有 All-SiC 模块的百万瓦级太阳能用 PCS “PVI1000 AJ-3/1000”. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.2, p.60-64.

⑵　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.

⑶　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.

⑷　小林勇介等. 利用仿真预测 SiC 沟槽型 MOSFET 的特性. 富士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.2, p.78-81.

蝶名林 干也

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事业统括部模块技术部。

大友　良则

从事功率半导体用封装装配的开发。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安装开发部。

唐泽　达也

从事 SiC 的结构开发和设计。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安装开发部。

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。