搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块

All-SiC Modules Equipped with SiC Trench Gate MOSFETs

中泽 将刚 NAKAZAWA, Masayoshi　大长 规浩 DAICHO, Norihiro　辻 崇 TSUJI, Takashi

随着人们要求电力转换装置进一步高效化、小型化、大容量化，对可满足这些要求的 SiC 模块产品化的期待也越来越高。富士电机过去通过独创的新封装结构，将最大额定容量 1200 V/100 A 的 All-SiC 模块成功产品化。这一新封装结构实现了 SiC 模块的高性能化和高可靠性。富士电机为扩大额定容量，这次新开发出了大容量新封装结构。在本封装中通过安装兼具低导通电阻和高速开关特性的 SiC 沟槽型栅 MOSFET，实现了额定容量 1200 V/400 A 的 All-SiC 模块。

There are increasing expectations placed on products that utilize SiC modules to achieve higher efficiency, smaller size and larger capacity in power conversion equipment. Fuji Electric has been producing products that incorporate All-SiC modules with a rated capacity of up to 1,200 V/100 A in a package with a new structure. This package achieves higher performance and higher reliability for SiC modules. In order to expand the rated capacity, Fuji Electric has recently developed a large-capacity package with a new structure. This new package utilizes an All-SiC module with a rated capacity of 1,200 V/400 A, being equipped with a SiC trench gate MOSFET that achieves both low on-resistance and high-speed switching characteristics.

1 引言

为解决全球变暖等环境问题、实现低碳社会，必须实现电力转换设备的节能化，以及积极使用可再生能源。功率半导体在高效的电力转换中发挥着重要作用。过去，使用主流半导体材料硅（Si）的半导体器件，虽然其特性不断得到改善，但性能正不断趋近于基于该材料物性的理论特性极限。因此，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 器件相比，SiC 器件可大幅降低损耗，因此，有望为进一步的节能做出贡献。

富士电机于 2013 年，在松本工厂开始运行如**图 1** 所示的、适用了业界首款 6 英寸 SiC 晶圆的生产线。2014 年，针对百万瓦级太阳能用功率调节器（PCS：Power Conditioning System）[1] 的升压电路，组合 SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 和 SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)，开发了 All-SiC 斩波器模块，并开始生产。该 All-SiC 斩波器模块达成了世界最高水平 98.8% 的转换效率，并且缩小体积约为传统 PCS 的 60%，为小型化做出了贡献。2016 年，又开发了 All-SiC 2 in 1 模块，利用其低损耗、高温运行保证、高可靠性和低热阻的特点，成功制造出了全封闭自冷型变频器（IP65 变频器）[2]。

富士电机已经开发出了最大额定容量 1200 V/100 A 的 All-SiC 模块[3]。为满足进一步扩大功率模块容量的需求，目前正在开发大容量的新封装结构。下面将介绍本封装中搭载了兼具低导通电阻和高速开关特性的第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET，额定容量 1200 V/400 A 的 All-SiC 2 in 1 模块。

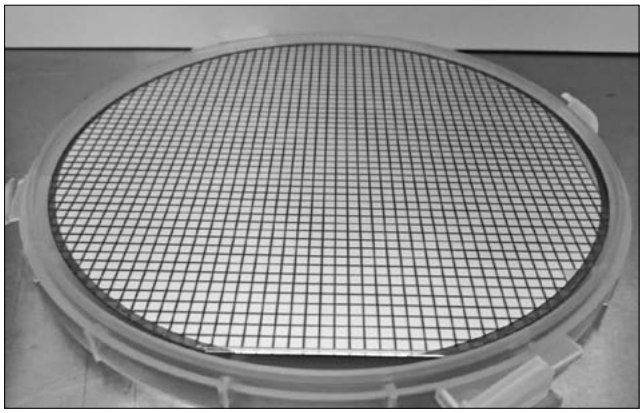

图 1　6 英寸 SiC 晶圆

2 All-SiC 2 in 1 模块的产品阵容

表 1 中展示了 All-SiC 2 in 1 模块的产品阵容。按照额定电流，分别推出了类型 1、类型 2、类型 3L 的新封装

表 1　All-SiC 2 in 1 模块的产品阵容

项目		类型 1	类型 2	类型 3L
外形尺寸（mm）		W68×D26×H13	W68×D26×H13	W126×D45×H13
外观				
额定	电压（V）	1200		
	电流（A）	25, 50	75, 100	200, 300, 400
端子	主端子	焊针		螺丝端子
	辅助端子	焊针		
连接对象	主端子	印刷基板		母线
	辅助端子	印刷基板		

结构。相比过去最大额定容量 1200 V/100 A 的类型 2 模块，采用新开发的大容量类型 3L 封装，实现了最大额定容量 1200 V/400 A 的 2 in 1 模块。

3 All-SiC 模块的核心技术

3.1 大容量新封装结构

为 All-SiC 模块开发的新封装结构与 Si-IGBT 模块用的传统封装结构的比较如**图 2** 所示[4]。在传统封装中，配线采用铝线焊接，绝缘用密封树脂采用硅胶树脂，绝缘基板采用薄铜陶瓷绝缘基板。而在新封装结构中，配线采用植入针，密封树脂采用高耐热环氧树脂，绝缘基板采用厚铜陶瓷绝缘基板。由此，实现了 SiC 芯片多个并联的高密度安装，以及内部电感下降、低热阻化和高可靠性。

以上述技术为基础的大容量新封装结构的开发要点有以下 3 点。

(a) 主端子与叠层母线间的连接简单

(b) 辅助端子与印刷基板间的连接简单

(c) 确保端子间和对地间的绝缘距离与兼顾低电感

为连接输入侧的电源与功率模块、实现低电感，使用叠层母线最佳。此次的大容量新封装结构中也采用了用于连接叠层母线和功率模块的螺丝端子结构。该螺丝端子结构通过激光焊接，与位于外部端子及其上部的带螺孔铜条接合。

而要实现高速高频开关，必须降低栅极 – 源极间的配线的电感。为此，辅助端子采用了可通过焊接直接连接到电路基板上的焊针型，从而可将栅极驱动电路配置在模块附近。

而绝缘性方面，为实现符合 IEC 60077、IEC 62497 标准，必须确保充分的绝缘距离，虽然可将绝对最大额定电压扩展到 1700 V 的外形，但这会导致封装大型化。另外，还存在要抑制电流高速分断时的浪涌电压，就必须降低模块内部电感的课题。因此，本封装采用了和传统的类型 2 封装相同的低背型外形，从而确保了充分的绝缘距离，且缩短了主电路路线，实现了低电感化。

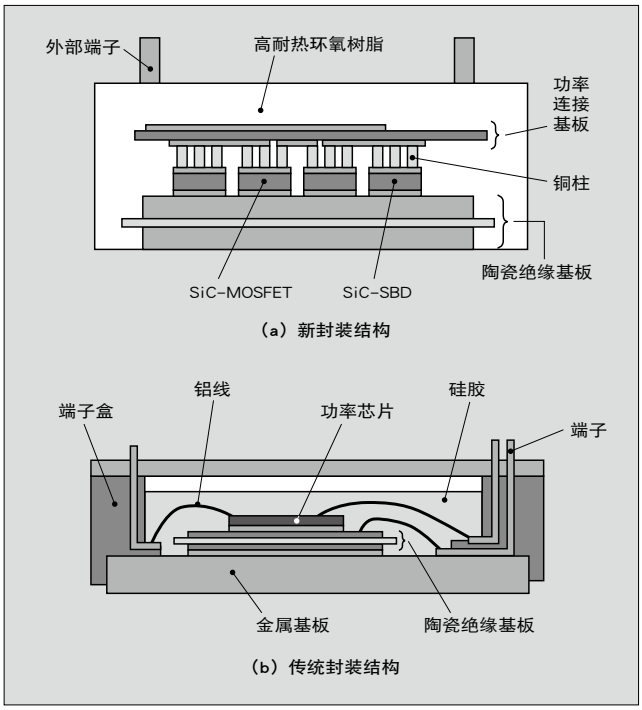

图 2 封装的结构比较

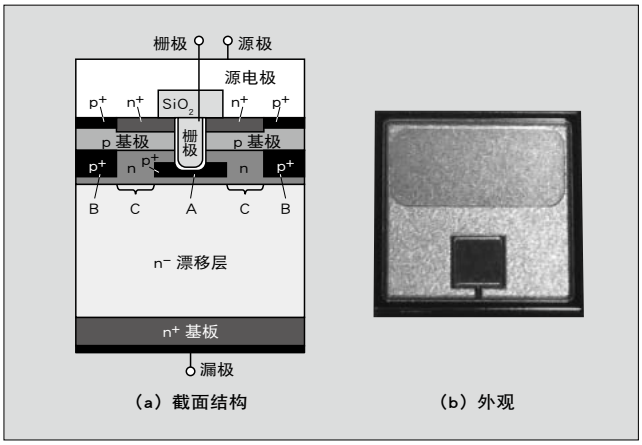

图 3 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的截面结构和芯片的外观

3.2 1200 V 额定耐压 SiC 沟槽型栅 MOSFET

过去，富士电机成功将搭载了平面型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块产品化。一般，镶边网格的微细化可进一步降低平面型栅 MOSFET 单位面积的导通电阻。但如果过度微细化，JFET (Junction Field-Effect Transistor) 电阻将增加，使导通电阻难以继续降低。

因此，通过使用沟槽型栅 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。**图 3** 中展示了此次开发的 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的截面结构和芯片的外观[5]。

为兼顾低导通电阻化和可避免误运行的高阈值电压，富士电机进行了镶边网格的微细化和通道长度的优化。并且，为提升氧化膜的可靠性，用 p 阱围住沟槽底的栅极氧化膜，缓和了作用于栅极氧化膜的高电场。且如**图 3** 所示，还对沟槽底的 p 阱（图中 A）和连接到源极的 p 阱（图中 B）间的 JFET 区（图中 C）进行了优化。

如上所述，通过采用沟槽型栅 MOSFET 和优化各种参数，实现了世界最高级别的导通电阻 3.5 mΩ・cm^2、阈值电压 5 V 的 1200 V 额定耐压 SiC-MOSFET。

4 1200V/400A All-SiC 2 in 1 模块的特性

4.1 输出特性

为了和在大容量新封装结构中搭载了沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块（1200 V/400 A 额定品）进行比较，**图 4** 中展示了第 7 代“X 系列”Si-IGBT 模块（1200 V/450 A 额定品[6]）的输出特性。MOSFET 不像 IGBT 那样有内建电压，因此，All-SiC 模块连续运行时的导通损耗低于 Si-IGBT 模块。

4.2 开关特性

图 5 中展示了 All-SiC 模块开通、关断和反向恢复时的开关波形。展示出了无误运行的稳定波形。

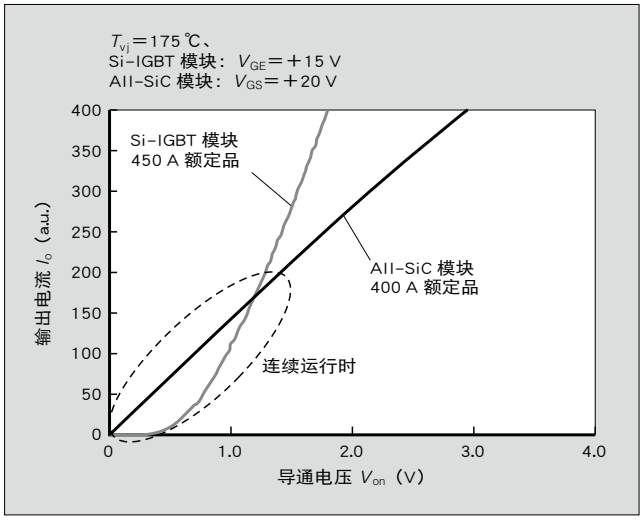

图 4　输出特性比较

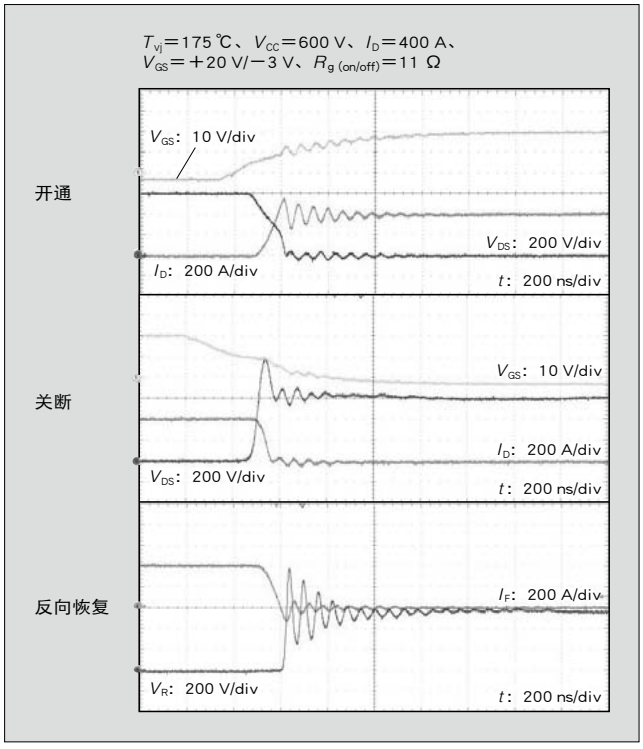

图 5　All-SiC 模块的开关波形（1200 V/400 A）

开通损耗的比较如**图 6** 所示，关断损耗的比较如**图 7** 所示，反向恢复损耗的比较如**图 8** 所示，总开关损耗的比较如**图 9** 所示。All-SiC 模块相比第 7 代 X 系列 Si-IGBT 模块，开通损耗降低约 87%，关断损耗降低约 74%，反向恢复时的损耗降低了约 95%。由此，总开关损耗降低了约 84%。

4.3　变频器产生的损耗的仿真

关于变频器中搭载的 All-SiC 模块与第 7 代“X 系列”Si-IGBT 模块在一般使用条件下产生的损耗，富士电机通过仿真得到的结果如**图 10** 所示。All-SiC 模块的变频器产生的损耗比 Si-IGBT 模块降低约 57%。

图 11 中展示了通过仿真得到的产生损耗的载波频率依赖性的结果。相比 Si-IGBT 模块，All-SiC 模块的开关损耗非常小。因此，通过提高载波频率，可大幅缩小 DC 电抗器、绝缘变压器等无源器件的尺寸。例如，在铁路车辆用辅助电源装置中，相比传统的商用频率绝缘方式，可实现装置约 1/2 的小型轻量化[7]。

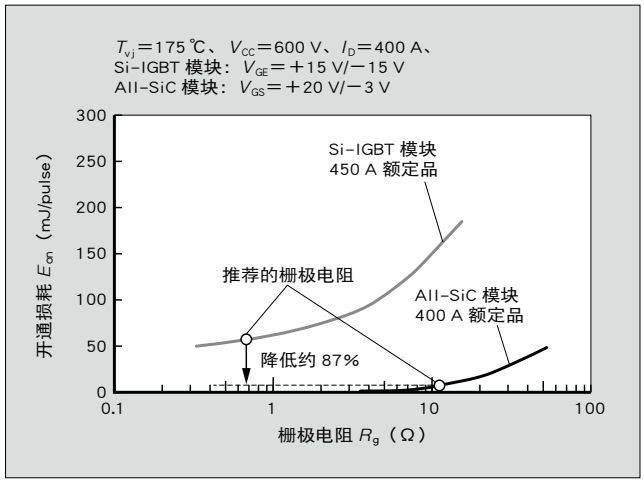

图 6　开通损耗

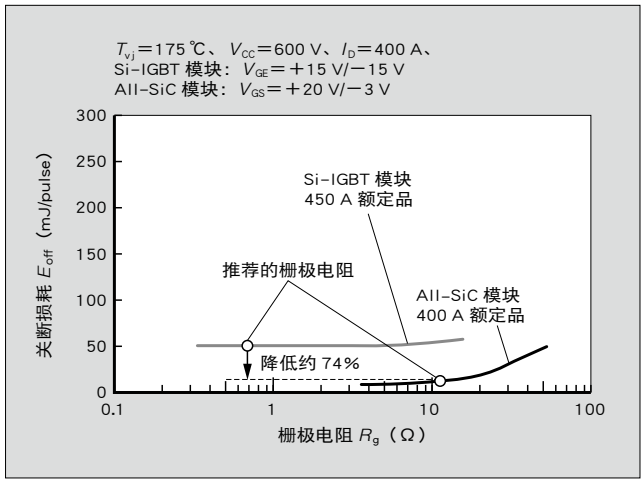

图 7　关断损耗

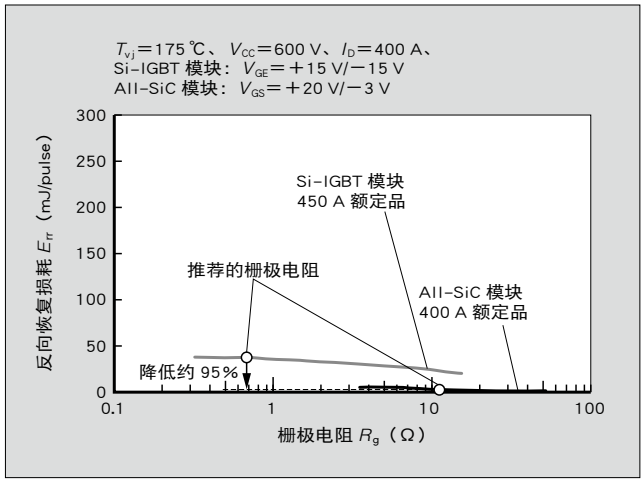

图 8　反向恢复损耗

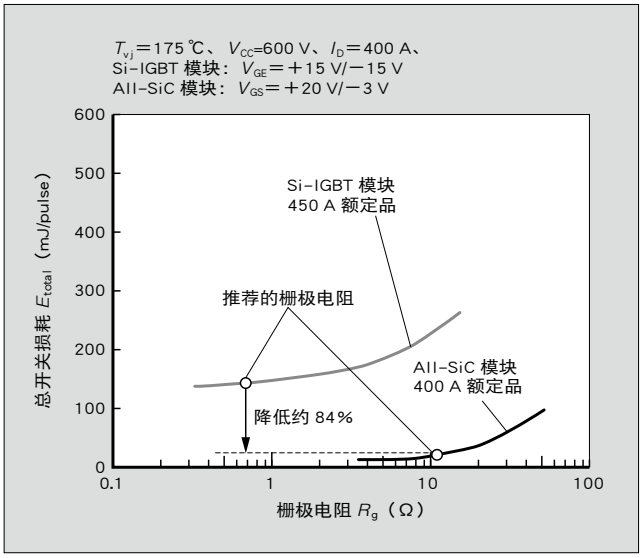

图 9　总开关损耗

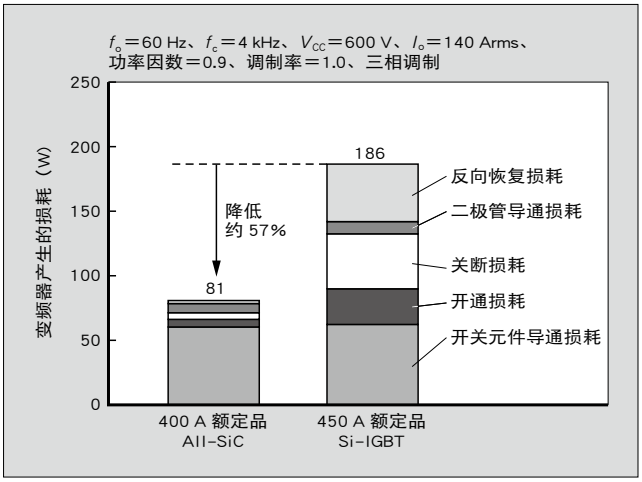

图 10　变频器中产生损耗的仿真效果

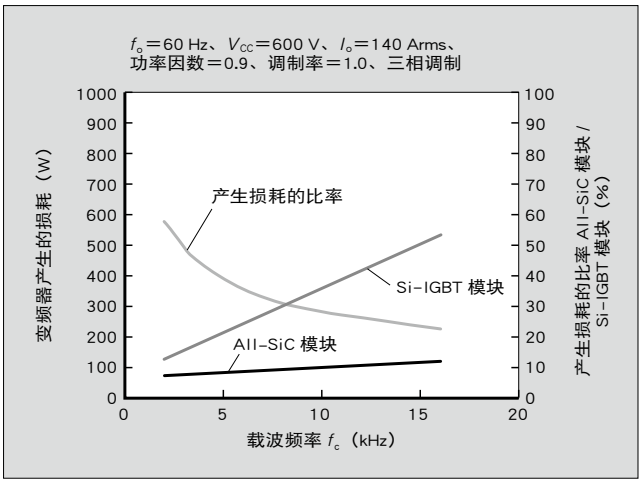

图 11　变频器产生的损耗的载波频率依赖性

5　后记

本文针对搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块进行了介绍。通过在新开发的新结构大容量封装中搭载 SiC 沟槽型栅 MOSFET，实现了 1200 V/400 A 额定的 2 in 1 模块。今后，富士电机将通过进一步提高 All-SiC 模块的电力密度、扩充产品阵容，为各种电力转换装置的小型化、高效化、高可靠性化做贡献。

本开发的一部分同时也是共同研究团体 筑波电力电子协作群（TPEC：Tsukuba Power-Electronics Constellations）的业务内容。在此向各位相关人员表示深深的感谢。

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　蝶名林干也等. All-SiC 2 in 1 模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.7-10.
⑶　Iwasaki, Y. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package”. PCIM Europe 2017.
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　辻崇等. 1.2 kV SiC 沟槽型栅 MOSFET. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.3-6.
⑹　Yoshida, K. “Power Rating extension with 7th generation IGBT and thermal management by newly developed package technologies”, PCIM Europe 2017.
⑺　茨木那津子ほか. SiC デバイスを適用した高周波絶縁形鉄道車両用補助電源の回路方式検討. 平成 26 年電気学会全国大会 5-124.

中泽　将刚
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产业模块部。

大长　规浩
从事 SiC 模块的封装开发和设计。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。

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。