搭载有第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块

All-SiC Modules with 2nd-Generation SiC Trench Gate MOSFETs

岩崎 吉记 IWASAKI, Yoshinori　奥村 启树 OKUMURA, Keiji　金子 悟史 KANEKO, Satoshi

All-SiC 模块相比 Si-IGBT 模块可大幅降低损耗。过去，富士电机通过独创的新封装结构对 All-SiC 模块进行市场推广。如今，为进一步扩大产品序列，富士电机将第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 搭载于与传统的 Si-IGBT 模块在外形及端子配置方面具有兼容性的封装中，开发出了 All-SiC 模块。这样，变频器损耗可降低 78%，有助于通过输出电流扩大来增加电流密度，同时，使电力电子设备进一步实现小型化。

All-SiC modules can achieve significantly lower loss than Si-IGBT modules. Fuji Electric has been releasing All-SiC modules to the market using a new uniquely designed structural package. Recently, in order to further expand our product line-up, we developed All-SiC modules utilizing 2nd-generation SiC trench gate MOSFETs. These modules have compatibility with conventional Si-IGBT modules in respect to external dimensions and terminal arrangement. The inverter power dissipation loss has been reduced by 78%, which can contribute to the further downsizing of power conversion systems by increasing the current density due to the improved output current.

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。功率半导体的电能转换效率在节能方面起着重要作用。现在，主流的硅（Si）器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，电能转换效率的大幅改善越来越难。鉴于这一状况，作为新一代半导体材料的宽带隙半导体材料碳化硅（SiC）备受关注。与 Si 器件相比，SiC 器件可大幅降低损耗，预计可大幅改善电能转换效率，因此有望对进一步节能化做出贡献。

富士电机于 2013 年，在松本工厂开始运行业界首条使用了 6 英寸 SiC 晶圆的生产线。

另外，为充分发挥 SiC 器件的低损耗和高温动作保证等优点，开发了具有高可靠性和低热阻的新结构的全模块封装。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，开发出了组合平面型栅 SiC-MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）和 SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）的最大额定容量为 1200 V/100 A 的 All-SiC 斩波器模块，并开始了生产。通过使用该 All-SiC 斩波器模块，PCS 的转换效率达到了世界最高水平的 98.8%，装置比传统产品缩小了约 60%。

2016 年开发了小容量额定容量为 1200 V/35 A 的 All-SiC 2 合 1 模块，用于全封闭自冷式变频器（IP65 变频器）[2]，2017 年开发了搭载因采用沟槽型栅而拥有低导通电阻的第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET[3、4]，额定容量为 1200 V/400 A 的 All-SiC 2 合 1 模块[5、6]。

为进一步扩大产品序列，富士电机将 SiC-MOSFET 搭载于与传统的 Si-IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块在外形及端子配置方面具有兼容性的封装中，开发出了 All-SiC 模块。本兼容封装中搭载的 SiC-MOSFET 采用了电阻比第 1 代 SiC 沟槽栅 MOSFET 还要低的第 2 代 SiC 沟槽栅 MOSFET。这样，可增大电流密度，进一步缩小电力电子设备的体积。

富士电机新开发了使用了上述 62 mm 宽封装 1700 V/300 A 的 2 in 1 All-SiC 模块，本论文对其特点进行论述。

2 第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET

通常，为降低导通电阻，通过元胞间距的微细化来降低沟道电阻是有效的。但是，如果在平面型栅 MOSFET 上进行过度微细化，则会因构成沟道的阱处的耗尽层的扩大，而导致 JFET（Junction Field-Effect Transistor）电阻增加。因此，为进一步降低导通电阻，采用了沟槽型栅结构。沟槽型栅化可简单地通过元胞间距的微细化来降低导通电阻。此次开发的 1700 V 级第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET，可通过减薄芯片厚度和缩小元胞间距，让导通电阻 R_{on} 比第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 减少 18%。

3 具有外形与端子配置兼容性的新结构封装

通常，MOSFET 是单极型器件，因此与 IGBT 相比，可进行高速开关。此外，SiC 是比 Si 拥有更快的高速开关能力的半导体材料。SiC-MOSFET 具有更快的开关速度，更高的浪涌电压。因此，为抑制浪涌电压，需降低模块内部的电感 L。为实现低电感化，让电磁相互感应作用的效果可以预测，开发了将内部的端子结构进行层压配线，确保与传统 Si-IGBT 产品的外形及外部端子配置具有兼容性的新结构封装。如**图 1** 所示，该 62 mm 宽兼容封装与传统封装相比，内部电感降低了 24%。

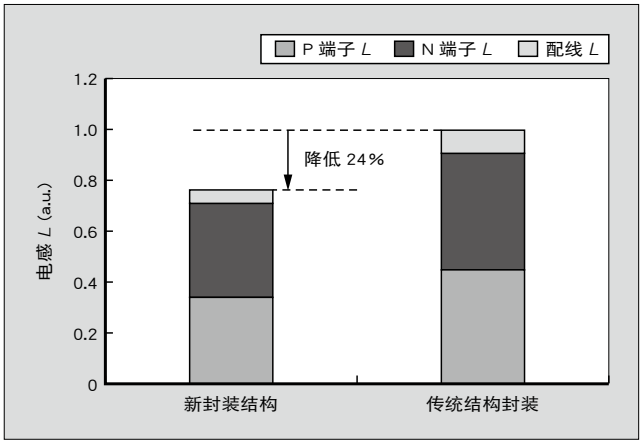

图 1　新结构封装与传统结构封装的电感比较

4　电气特性

4.1　输出特性

图 2 所示为搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块与第 7 代 X 系列 Si-IGBT 模块 1700 V/300 A 额定产品的输出特性比较结果。All-SiC 模块由 MOSFET 构成，因此其特征在于没有在 IGBT 或 PN 二极管等双极型器件中可见的内建电压。另外，从**图 2** 可知，All-SiC 模块在其额定漏极电流 I_D＝300 A 之下的电流区域，相比 Si-IGBT 模块有更小的漏极－源极电压 V_{DS}。在以变频器为首的电力转换装置，通常运行时的电流一般为模块额定值的 30% ～ 50% 左右。因此，在本模块额定电流的 50% 即 150 A 时，本模块的导通电压相比 Si-IGBT 模块约低 0.5 V。在占电力转换装置大部分运行的连续额定条件下，All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块相比，稳态损耗约低 30% 以上。

4.2　开关特性

⑴　开关速度比较

图 3 所示为额定值为 1700 V/300 A 的 All-SiC 模块，在结温 T_{vj}＝25 ℃和 150 ℃时的开关波形。通常，与室温

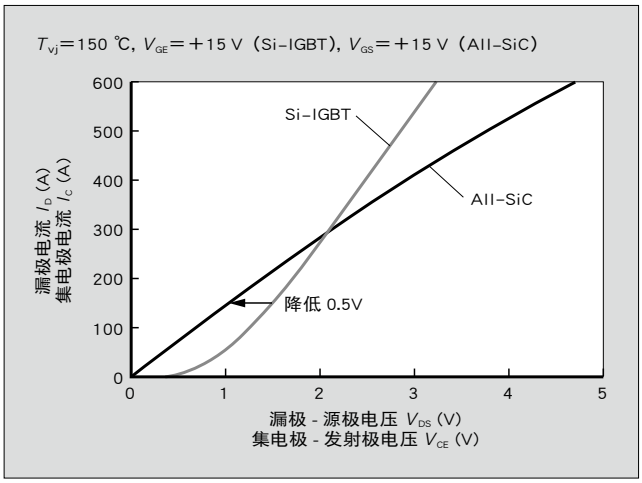

图 2　晶体管的输出特性比较

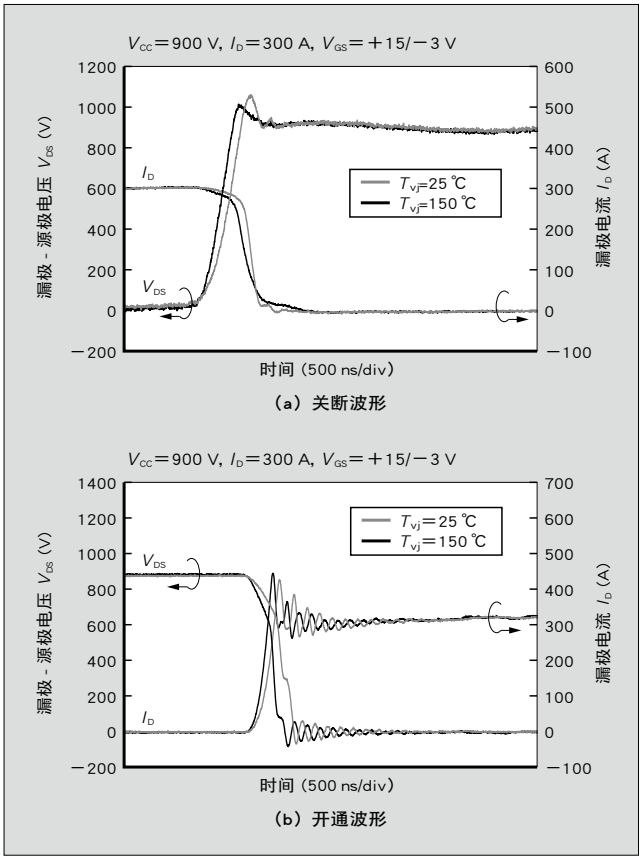

图 3　All-SiC 模块 T_{vj}＝25 ℃与 150 ℃的开关波形比较

相比，Si-IGBT 模块在高温下开关速度指标 dv/dt 和 di/dt 变小。但是在高温下，All-SiC 模块这些指标会变高，这与 Si-IGBT 模块动作不同。因为 dv/dt 和 di/dt 是影响干扰的指标，所以通过选择栅极电阻 R_G，使 All-SiC 模块和 Si-IGBT 模块在通常使用的 T_{vj}＝25 ℃～150 ℃温度范围内大致相同。**表 1** 与**表 2** 所示为这些指标的比较结果。关于最大开关速度，关断 dv/dt 为 5.6 ～ 5.8 kV/μs，开通 di/dt 为 4.0 ～ 4.1 kA/μs。两者大致相同，可推测对干扰的影响是同等的。

⑵　开关波形与损耗

图 4 所示为额定值为 1700 V/300 A 的 All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块的开关波形。

与 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块关断和反向恢复时的尾电流大幅降低〔**图 4**(a)、**图 4**(c)〕，开通和反向恢复

表 1　T_{vj}＝25 ℃与 150 ℃的关断 dv/dt

项目	T_{vj}＝25 ℃	T_{vj}＝150 ℃
All-SiC 2G 沟槽型栅模块	5.0 kV/μs	5.8 kV/μs
Si-IGBT 7G 模块	5.6 kV/μs	4.8 kV/μs

表 2　T_{vj}＝25 ℃与 150 ℃的开通 di/dt

项目	T_{vj}＝25 ℃	T_{vj}＝150 ℃
All-SiC 2G 沟槽型栅模块	3.2 kA/μs	4.1 kA/μs
Si-IGBT 7G 模块	4.0 kA/μs	3.1 kA/μs

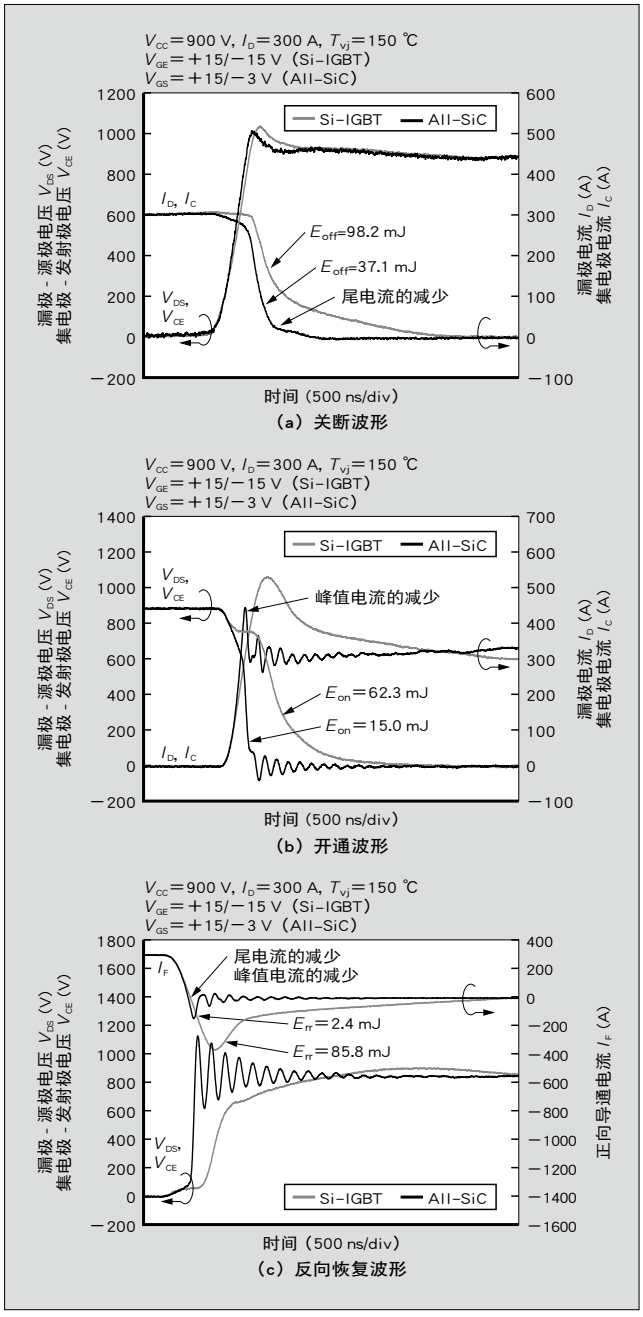

图 4　额定值 1700 V/300 A 的 All-SiC 模块与 Si-IGBT 模块开关波形的比较

时的峰值电流也大幅降低〔**图 4**(b)、**图 4**(c)〕。这是因为，Si-IGBT 模块为双极型器件，因此少数载流子注入引起的过剩载流子影响开关动作，另一方面，All-SiC 模块为单极型器件，只在多数载流子下动作。另外，从**图 4**(a)可知，与 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块关断 d*i*/d*t* 高，但浪涌电压被控制在大致相当的水平。这是由上述新结构封装的低电感化效果引起的。这样，利用新结构封装的低电感，可发挥 All-SiC 模块的高速关断特性。

通过选择最佳的 RG，在 All-SiC 模块的开关速度大致与 Si-IGBT 模块相同的条件下，与 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块在额定电流 300 A 下关断损耗 E_{off} 降低 62%，开通损耗 E_{on} 降低 76%，反向恢复损耗 E_{rr} 降低 97%。由此，总开关损耗降低 78%。

5　变频器产生的损耗的仿真

通过调整 R_G，使 All-SiC 模块（搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET）的开关速度与 Si-IGBT 模块（第 7 代 X 系列）大致相同。并在在该条件下，进行了搭载在变频器上时的损耗模拟。其结果如**图 5** 所示。在同一输出电流条件〔100 $A_{(rms)}$〕下，与 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块开关损耗大幅度降低，变频器损耗降低了 78%。并且，在相同的 ΔT_{vj-a} 条件下，输出电流可增大至 Si-IGBT 模块的约 2 倍。这样，与相同容量的 Si-IGBT 模块相比，All-SiC 模块可扩大变频器容量。如上所述，搭载了第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块，有助于输出电流的扩大导致的电流密度增大及电力电子设备的进一步小型化。

6　All-SiC 模块的产品阵容计划

表 3 所示为搭载于与传统 Si-IGBT 模块具有外形与端子配置兼容性的封装中的 All-SiC 模块产品阵容计划。此次，计划在小容量带宽中使用 Small 1B、Small 2B 的产品，在中容量带宽中使用 62 mm 封装的产品，在大容量带宽中使用 HPnC（High Power next Core）封装的产品。这样，除了原来的产品阵容序列的全模封装之外，还将 Si-IGBT 的兼容封装序列化，所以可以更灵活地将 All-SiC 模块应用[7]~[9]

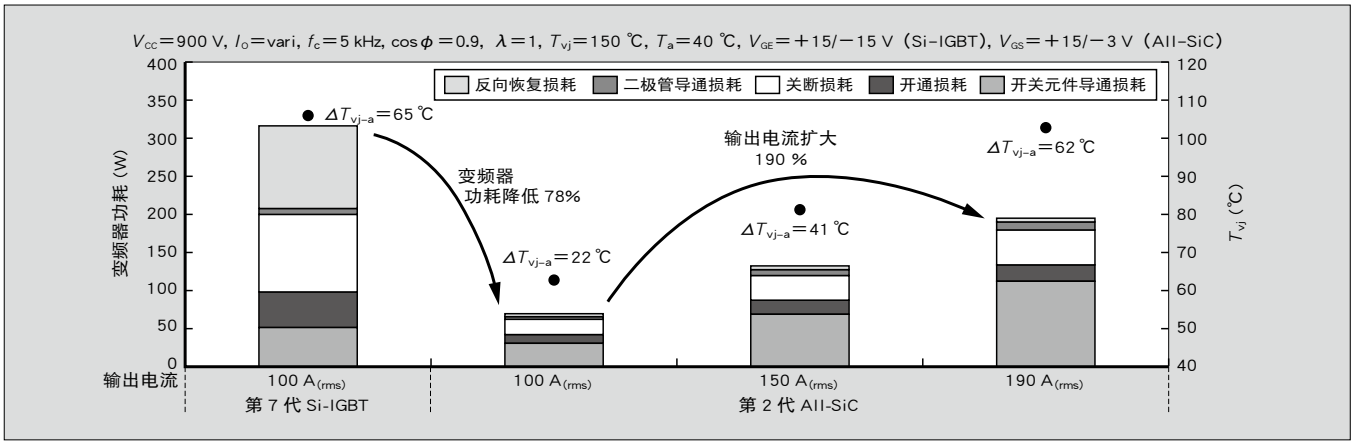

图 5　变频器功耗的仿真结果（输出电流依赖性）

表 3　兼容封装搭载 All-SiC 模块的产品阵容计划

项目		封装类型	Small 1B	Small 2B	62 mm STD	HPnC
		外形尺寸 W×D×H (mm)	62.8×33.8×12.0	56.7×62.8×12.0	62.0×108.0×30.5	100.0×140.0×38.0
额定电压	MOSFET 代别	等效电路				
1200 V	第 2 代沟槽栅	2 in 1	～ 100 A	～ 200 A	～ 600 A	—
		6 in 1	～ 50 A	～ 100 A	—	—
1700 V	第 2 代沟槽栅	2 in 1	—	—	～ 400 A	～ 1000 A
3300 V	第 1 代沟槽栅	2 in 1	—	—	—	～ 750 A

于电力电子设备。

7　后记

本文针对搭载有第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块进行了论述。仿真结果表明，可大幅降低变频器功耗。

今后，富士电机将进一步致力于 All-SiC 模块的高电力密度化和装置的小型与轻量化，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。

本课题是与联合研究机构 TSUKUBA POWER ELECTRONICS CONSTELLATIONS（TPEC）共同开发。在此向各位相关人员表示深深地感谢。

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 in1 模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.7-10.
⑶　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.
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.
⑸　Iwasaki, Y. et al. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package” PCIM Europe 2017. p.651-657.
⑹　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.
⑺　Horio, M. et al. “New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices”, Proceeding of PCIM Europe 2011. p.229-234.
⑻　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.
⑼　仲村秀世等. All-SiC 模块的封装技术. 富士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.1, p.3-6.

岩嵜　吉记
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产业事业部产业模块部。

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。

金子　悟史
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。