大容量 SiC 混合模块“HPnC”

“HPnC” High-Current SiC Hybrid Module

关野 裕介 SEKINO, Yusuke　　三本 孝博 MITSUMOTO, Takahiro　　森谷 友博 MORIYA, Tomohiro

富士电机开发了用于电铁和太阳能发电、风力发电领域的大容量功率模块“HPnC”。芯片技术中，适用了第 7 代“X 系列”的技术，降低了芯片损耗。封装中，绝缘基板使用了氮化铝（AlN）陶瓷，基座材料中还使用了镁和碳化硅的复合材料（MgSiC）。主端子结构采用了层压结构，从而将内部电感降低到 10 nH，并利用超声波端子接合方式，满足了 RoHS 指令的要求。运用这些技术后，与过去的 HPM 相比，电流密度增加了 12%，实现了高电流密度化。

Fuji Electric has been developing the “HPnC” high-current power module to be used with electric railcars and photovoltaic and wind power generation facilities. The chip uses 7th-generation “X Series” technology, enabling it to achieve lower power loss. The package employs an aluminum nitride (AlN) insulating substrate that utilizes a high heat-dissipating member, as well as base materials consisting of magnesium and silicon carbide composite materials (MgSiC). Adopting a laminated structure for the enclosure of the terminal makes the internal inductance decrease to 10 nH. Furthermore, Ultrasonic terminal welding is used to comply with the RoHS directive. With these technologies, the module achieves a high current density, which is 12% greater than the conventional HPM.

1 引言

近年来从防止地球温室化效应的角度出发，要求改善能源效率并削减 CO_2 排放量。为此，功率半导体的电力转换装置在各领域都得到了广泛应用。尤其是在电铁和太阳能发电、风力发电领域，装置的大容量化和小型化不断推进。这些装置中使用的大容量 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块被要求进一步高电流密度化，从而实现小型化。

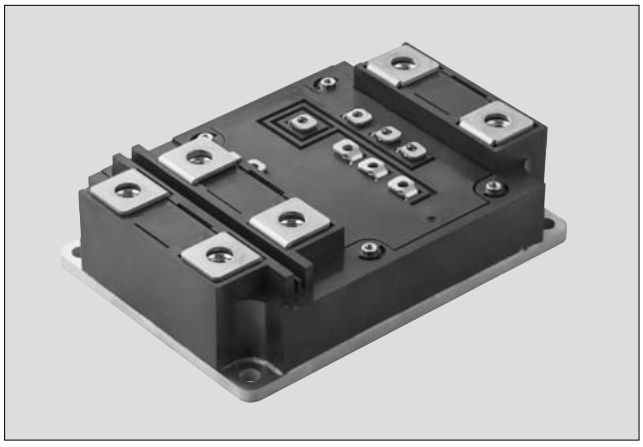


图 1　大容量 SiC 混合模块“HPnC”

为满足这些要求，富士电机采用安装了第 7 代“X 系列”IGBT 芯片[1]和 SiC-SBD（Schottky Barrier Diode）芯片[2]的新型封装，开发了大容量功率模块“HPnC”（High Power next Core）（**图 1**）。

2 产品阵容的探讨

表 1 中展示了 HPnC 的产品系列一览和特点。HPnC 探讨了 3300 V/450 A 和 1700 V/1000 A 这 2 个系列的产品阵容。IGBT 采用了 X 系列。FWD（FreeWheeling-Diode）有 2 种，Si 品采用了 X 系列的 PiN 二极管或特性进一步改善的 SiC-SBD。本文将对搭载了 3.3 kVX 系列 IGBT 芯片和 SiC-SBD 芯片的 3300 V/450 A 的 HPnC 进行介绍。

本产品的电路构成为 2 in 1，内置热敏电阻，可检测模块内部的温度上升情况。为确保高散热性和高可靠性，在绝缘基板中使用了氮化铝（AlN）陶瓷。而基座材料虽然线膨胀系数与传统产品的铝和碳化硅的复合材料（AlSiC）相同，但因为采用了导热性出众的镁和碳化硅的复合材料（MgSiC），确保了用于电铁时的高可靠性。**图 1** 中展示了模块的外观。封装确保了与其他公司模块的安装兼容性。

表 1　产品阵容

产品型号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	IGBT	FWD	封装型号	电路结构	热敏电阻	绝缘基板	基座
2MBI450XUF330-50	3300	450	X 系列	SiC-SBD	M288	2 in 1	内置	AlN	MgSiC
2MSI450XUF330-50				X 系列					
2MBI1000XUF170-50	1700	1000		SiC-SBD					
2MSI1000XUF170-50				X 系列					

3 “HPnC”的特点

表 2 中展示了与电铁用的模块传统产品“HPM”(High Power Module) 的特性比较[3]。相比 HPM，HPnC 为降低浪涌电压改善了 Parasiticinductance（模块内部电感）、实现了高电流密度化、改善了并联时的装配性，还满足了 RoHS 指令〈注〉的要求。

3.1 低电感封装

模块内部电感，HPnC 为 10 nH，相比 HPM 的 42 nH，改善了 76%。**图 2** 中展示了 HPnC 的截面结构图。为降低内部电感，在集电极端子和发射极端子间采用了层压结构。**图 3** 中展示了 HPnC 与 HPM 关断时的波形比较。d*i*/d*t* 同样为 5 kA/μs 时，HPnC 关断时的浪涌电压因为电感下降的效果，比 HPM 低约 150 V。由此，相比 HPM，能够以更快的 d*i*/d*t* 实现关断，并降低开关损耗。

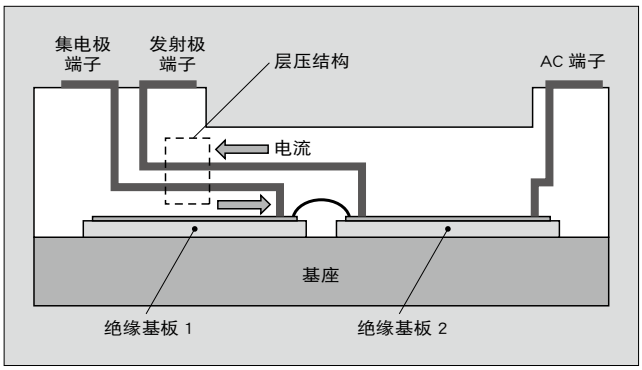


图 2 HPnC 的截面结构图

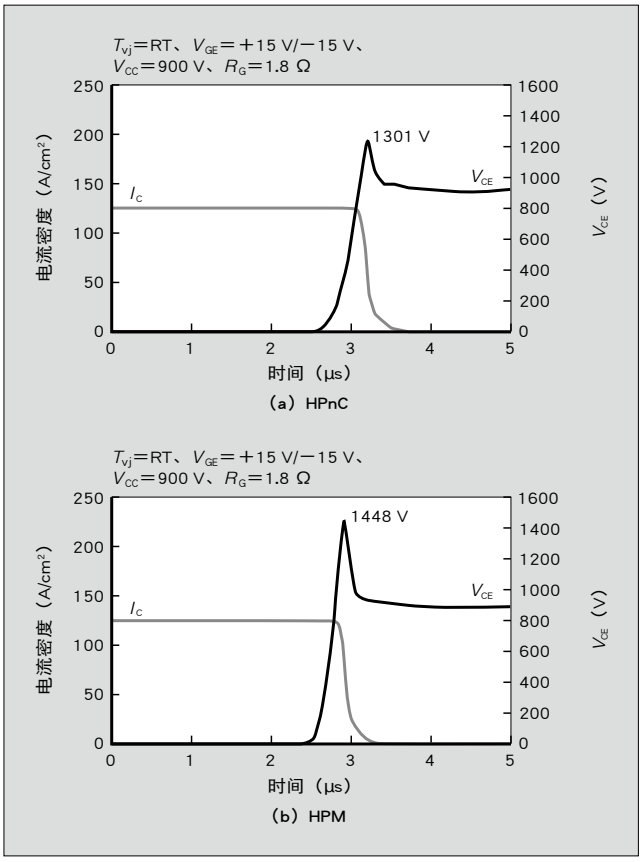


图 3 关断比较

3.2 高电流密度化

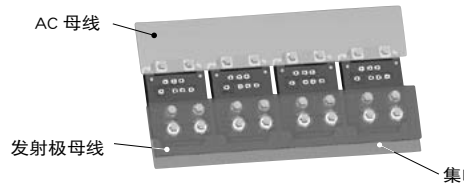
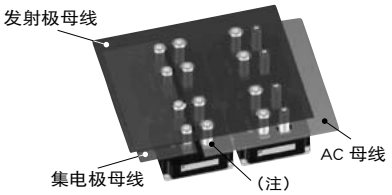
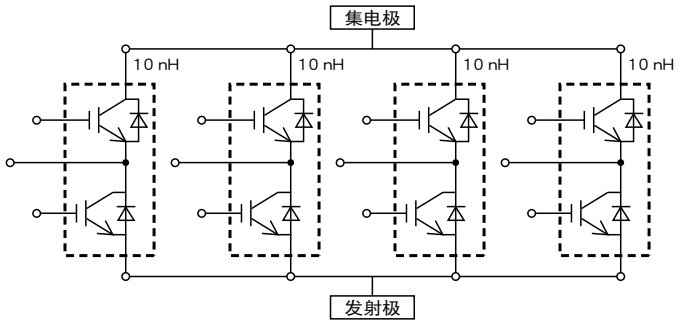
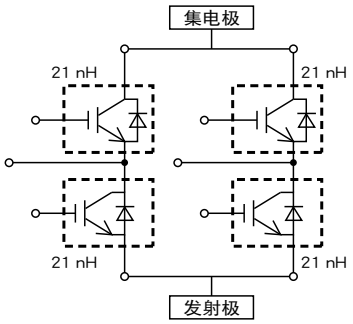
基于占用面积的电流密度，耐压 3.3 kV 的 HPM 为 5.76 A/cm^2，与此相比，HPnC 为 6.43 A/cm^2，实现了约 12% 的高电流密度化。这是因为采用第 7 代 IGBT 芯片和热导率是 HPM 的 AlSiC 基座 1.5 倍的 MgSiC 基板，降低了热阻 $R_{th\ (j-c)}$。

表 2 封装特性

封装	HPnC	HPM（传统产品）	改善率 （%）
外观 / 尺寸 （mm）	W：100 D：140 H：38	W：130 D：140 H：38	—
电路	2 in 1	1 in 1	—
额定（代表）	3300 V/450 A＋450 A	3300 V/1000 A	—
模块内部电感（L_P）	10 nH	42 nH （2 in 1 结构时）	76.2
浪涌电压（V）	401	548	26.8
设置面积（cm^2）	140	173.7	19.4
电流密度（A/cm^2）	6.43	5.76	11.6
并联性	好	差	—
2 并联时的电感（L_P）	2.5 nH	21 nH	89.0
RoHS 指令	○	×	—

〈注〉RoHS 指令：关于电气电子设备中限制特定有害物质使用的 EU（欧盟）指令

表 3　HPM 与 HPnC 的并联比较

	2 In1 HPnC 4 并联（总体 3300 V/1800 A）	1 In1 HPM 2 并联（总体 3300 V/2000 A）
模块并联时的装配性比较		
并联时模块电感的比较	 总电感：10/4＝2.5 nH	 总电感：（21＋21）/2＝21 nH

（注）：因为结构复杂难懂，因此用垫片来表现。

3．3　并联的装配简便性和电感的优势

大容量 IGBT 模块多通过并联模块来支持大电流。**表 3** 中展示了 HPM 和 HPnC 并联时的装配性和电感的比较。额定电流方面，HPM 以串联方式配置额定 1000 A 的 1 in 1 结构，形成了 2 in 1 的 2 并联结构，总额定电流为 2000 A。而 HPnC 以 450 A 的 2 in 1 结构形成 4 并联结构，额定电流为 1800 A。

并联的装配简便性在于，在安装到主电路中时 HPM 受端子位置影响，集电极母线、AC 母线、发射极母线 3 层重叠，导致母线装配难度大。而 HPnC 将 AC 端子独立配置在集电极端子、发射极端子对面，避免了 3 层重叠，改善了装配性。

在电感方面，HPM 由于发射极端子的位置远离电容器，发射极母线较长，导致主电路电感较大。而 HPnC 将集电极端子和发射极端子配置在电容器附近，从而缩短了母线长度，降低了主电路电感。另外，模块的内部电感方面，2 并联的 HPM 为 21 nH，而 4 并联的 HPnC 为 2.5 nH，降低了约 90%。电感是由主电路和模块内部的电感决定的，降低这两者有望实现更加高速的开关。

3．4　满足 RoHS 的要求

HPnC 为满足 RoHS 指令的要求，以超声波接合取代焊锡来接合端子和绝缘基板。并且，因为接合了线膨胀系数相同的材料，因此比传统产品更加可靠。

4　芯片特性的改善

模块小型化（高电流密度化）时的重要课题——IGBT 模块产生损耗的改善，对 IGBT 芯片和 FWD 芯片的特性有很大的依赖性。

4．1　IGBT 芯片特性的改善

图 4 中展示了 T_{vj}＝150 ℃时在传统 IGBT 芯片基础上的特性改善。关断损耗 E_{off} 是一样的，但集电极 – 发射极电压 $V_{CE\ (sat)}$ 相比传统 IGBT 芯片的 3.7 V，X 系列 IGBT 芯片为 2.5 V，改善了 1.2 V。X 系列 IGBT 通过优化边缘结构，扩大了活性面积、减小了漂移层的厚度，从而改善了 $V_{CE\ (sat)}$ 和 E_{off} 的均衡关系。

4．2　采用 SiC–SBD，降低开关损耗

图 5、**图 6** 中，展示了为实现与传统系列的 3.3 kV Si–IGBT（HPM）相同的额定电流，2 并联时的 3.3 kV X 系列 SiC 混合模块（HPnC）的波形比较。SiC 混合模块由于反向恢复时峰值电流 I_{rr} 的大幅降低，关断损耗 E_{on} 大幅下降，不会产生恢复损耗 E_{rr}。这是因为 SiC–SBD 是单极型器件，不会发生载流子的扫出，因此不产生 I_{rr}。如**表 4** 所示，E_{on} 下降 32%，E_{rr} 下降 99.8%，均实现了大幅改善。

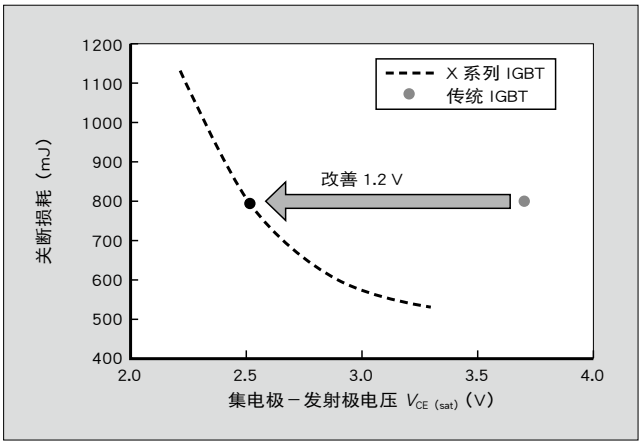


图 4　3.3 kV “X 系列” IGBT 芯片的特性改善

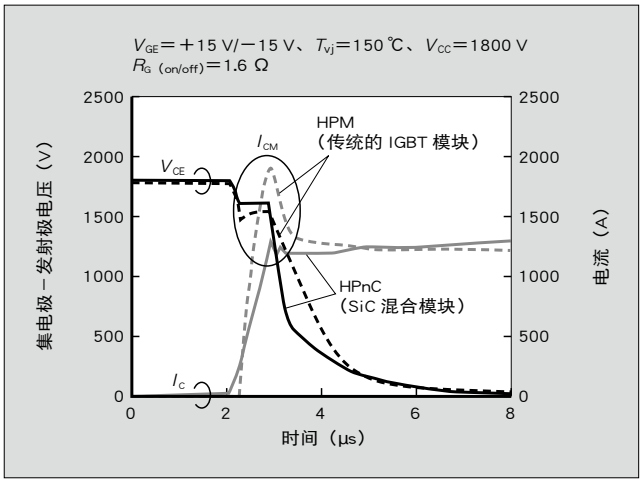


图 5　开通波形比较

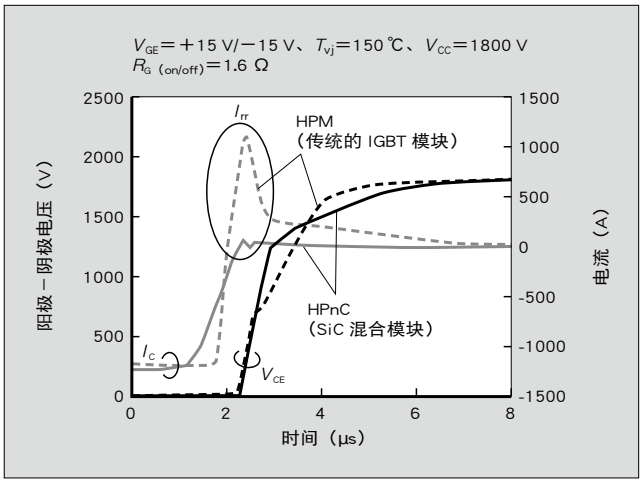


图 6　恢复波形比较

表 4　开关损耗比较（单位：mJ）

	开通损耗 E_{on}	关断损耗 E_{off}	恢复损耗 E_{rr}	总损耗 E_{total}
HPM（传统产品）	3493	2417	903	6813
HPnC（SiC 混合模块）	2374	2294	2	4670
改善率（%）	32	5	99.8	31

4．3　变频器产生的损耗

图 7 中展示了 3300 V/1000 A 的 HPM 与 3300 V/450 A 的 2 并联 HPnC 的变频器产生损耗仿真结果的比较。

载波频率 f_c 为 5 kHz、输出电流 450 A 时，相比 HPM，总损耗改善了约 40%。另外，相同输出电流时，HPM 的 f_c 是 5 kHz，而 HPnC 提升至 9 kHz，是前者的 1.8 倍。而输出电流方面，f_c 都为 5 kHz 时，输出电流可从 450 A 扩大到 720 A，扩大为 HPM 的 1.6 倍。如上所述，通过扩大输出电流增加电流密度，或通过扩大 f_c 实现滤波器的小型化，将为变频器的小型化、低损耗化做贡献。

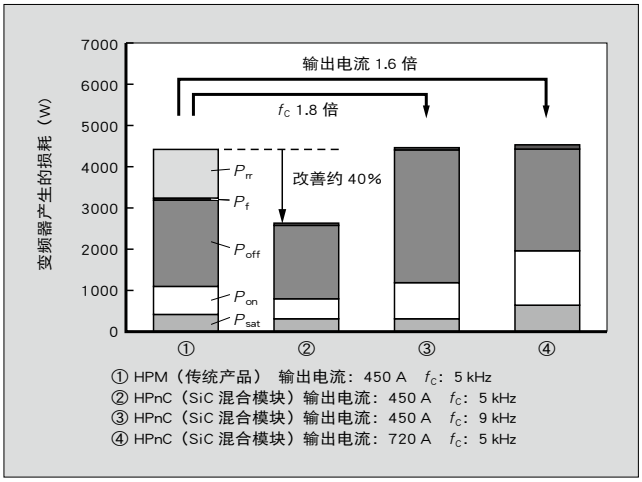


图 7　变频器中产生损耗的仿真结果

5　后记

本文对大容量 SiC 混合模块“HPnC”进行了介绍。耐压 3.3 kV 的 SiC 混合模块 HPnC，在封装结构中采用了层压结构，并通过优化主端子位置降低了电感，从而可抑制浪涌电压，实现更加高速的开关，并以并联结构支持大电流化。此外，凭借超声波端子接合技术的导入，确保了与传统产品相同的高可靠性，又满足了 RoHS 指令的要求。

而芯片方面，由于搭载 X 系列 IGBT 和 SiC-SBD 而实现的特性改善，降低了变频器产生的损耗，实现了高电流密度化，扩大了 f_c，从而实现了小型化。今后，富士电机将通过进一步的封装改善和芯片技术改善，为电力电子技术的发展做贡献。

本研究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

(1)　川畑润也等. 第 7 代“X 系列”IGBT 模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.15-19.
(2)　小根泽巧等. 1700V 耐压 SiC 混合模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.7-10.
(3)　福知輝洋，金子悟史. 3.3kV IGBT モジュールの系列拡大. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.422-425.

关野　裕介
从事 SiC 混合模块的开发和设计。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。

三本　孝博

从事大容量 IGBT 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。

森谷　友博

从事 SiC 器件的开发和设计。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元件开发部。

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。