第 7 代“X 系列”1700 V IGBT 模块“PrimePACK™”

“PrimePACK™” of 7th-Generation “X Series” 1,700-V IGBT Modules

山本　拓也 YAMAMOTO, Takuya　　**吉渡　新一** YOSHIWATARI, Shinichi　　**冈本　有人** OKAMOTO, Yujin

产业、民生、汽车等领域以及可再生能源领域中使用的电力转换装置用大容量 IGBT 模块的需求正在扩大。在第 7 代“X 系列”IGBT 模块系列中，富士电机开发出了新产品“PrimePACK™”。本产品通过改善半导体芯片特性来降低电力损耗，以及使用新开发的高散热绝缘基板来大幅降低热阻。此外，通过提升 ΔT_{vj} 功率循环耐量和绝缘用硅胶的耐热性，将连续运行保证温度从过去的 150℃升高到 175℃，实现了传统技术难以做到的最大额定电流 1800 A 的产品。

The demand for large-capacity IGBT modules has been expanding for power conversion systems used in various sectors such as industrial, consumer, automotive and renewable energy. Fuji Electric has developed the “PrimePACK™” as the 7th-generation “X Series” IGBT modules. The module reduces power dissipation through characteristic enhancement of semiconductor chip and significantly reduces thermal resistance by using a newly developed high thermal conductive insulating substrate. Furthermore, by improving the capacity of ΔT_{vj} power cycle and the heat resistance of insulating silicone gel, the module has increased the guaranteed continuous operating temperature from 150°C to 175°C. With these technical development, Fuji Electric has achieved a product with a maximum rated current of 1,800 A using newly developed technologies.

1　引言

近年来为防止地球温室效应加剧，要求削减 CO_2 的排放量。在此背景下，电力电子技术愈发受到期待，在产业、民生、汽车等各领域中，使用功率半导体的电力转换装置的适用不断得到推进。其中，作为太阳能发电、风力发电等导入急速增加的可再生能源领域中使用的电力转换装置的关键器件，IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块的需求持续扩大。

富士电机凭借过去的多项技术革新，实现了 IGBT 模块的小型化、低损耗化和高可靠性化，为电力转换装置的小型化和高效化做出了贡献。如今，为满足电力转换装置进一步小型化、高效化的需求，在第 7 代“X 系列”IGBT 模块的产品系列中，富士电机开发出了新产品“PrimePACK™〈注〉”。

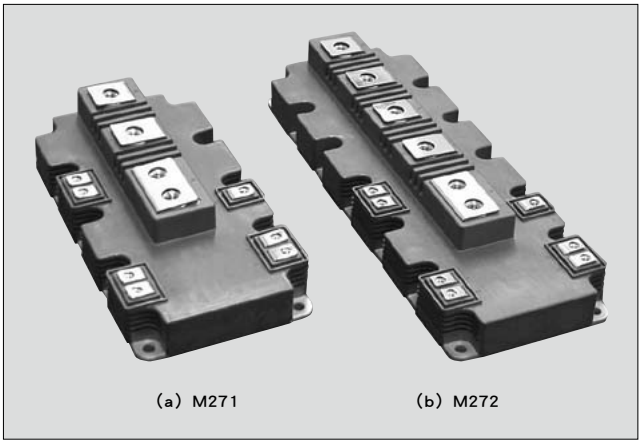


图 1　X 系列 PrimePACK™

表 1　X 系列 PrimePACK™的产品阵容

封装	额定		型号	绝缘基板	绝缘耐压	CTI *	T_{vjop}
	电压	电流					
M271	1200 V	900 A	2MBI900XXA120P-50	Al_2O_3	4.0 kVAC	>600	175 ℃
		1200 A	2MBI1200XXE120P-50	AlN			
	1700 V	900 A	2MBI900XXA170-50	Al_2O_3			
		1200 A	2MBI1200XXE170-50	AlN			
M272	1200 V	1400 A	2MBI1400XXB120P-50	Al_2O_3			
		1800 A	2MBI1800XXF120P-50	AlN			
	1700 V	1000 A	2MBI1000XXB170-50	Al_2O_3			
		1400 A	2MBI1400XXB170-50	Al_2O_3			
		1800 A	2MBI1800XXF170-50	AlN			

★ 比较电痕指数（comparative tracking index）

〈注〉PrimePACK™：Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

2 特点

图 1 中展示了 X 系列 PrimePACK™的外观。封装类型有“M271”和“M272”2 种，封装形状与传统产品“V 系列”IGBT 模块的 PrimePACK™相同。**表 1** 中展示了产品阵容。额定电压有 1200 V 和 1700 V 2 种，最大额定电流都是 1800 A。相比传统产品 1400 A 的最大额定电流，X 系列 PrimePACK™扩大了约 29%。另外，通过改善芯片特性、提升封装的长期可靠性，实现了连续运行时接合温度 T_{vjop}=175 ℃。

3 电气特性

为改善能源转换效率，减少 IGBT 模块产生的损耗是重要的。而产生的损耗是由搭载的 IGBT、FWD（Free Wheeling Diode）等半导体芯片的特性决定的。X 系列 PrimePACK™采用的半导体芯片适用了包括最新微细化技术、薄晶圆化技术等在内的 X 系列的芯片技术，相比传统产品，大幅减少了产生的损耗[1]。此外，通过改善高温运行时的可靠性和破坏耐量，实现了 T_{vjop}=175 ℃，比传统产品高 25 ℃。

3.1 IGBT 特性

X 系列的 IGBT 适用了最新的微细化技术和薄晶圆化技术，大幅改善了饱和电压与关断损耗和均衡关系。**图 2** 中展示了 X 系列 PrimePACK™与传统产品的均衡特性。饱和电压降低约 0.7 V，关断损耗降低约 11%，均衡特性得到了改善。通过优化电场终止层，抑制了薄晶圆化导致的元件耐压的降低和关断时的电压振动。

3.2 FWD 特性

X 系列的 FWD 通过减小漂移层厚度，降低了正向导通电压。此外，通过优化寿命控制，实现了平滑的反向恢复波形，同时，改善了反向恢复损耗。**图 3** 中展示了均衡特性。

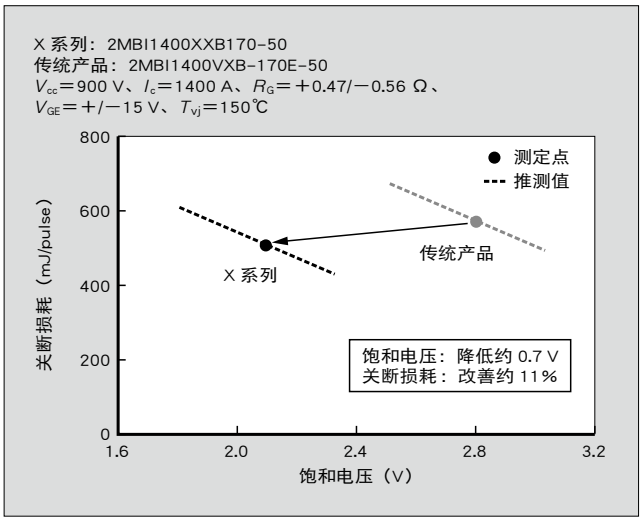


图 2 均衡特性（IGBT）

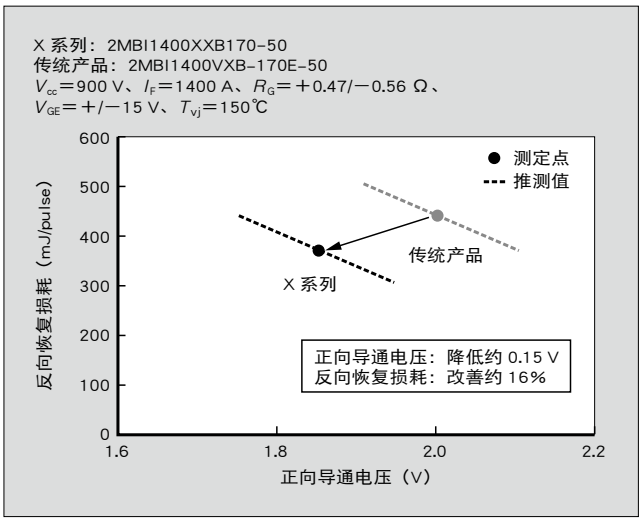


图 3 均衡特性（FWD）

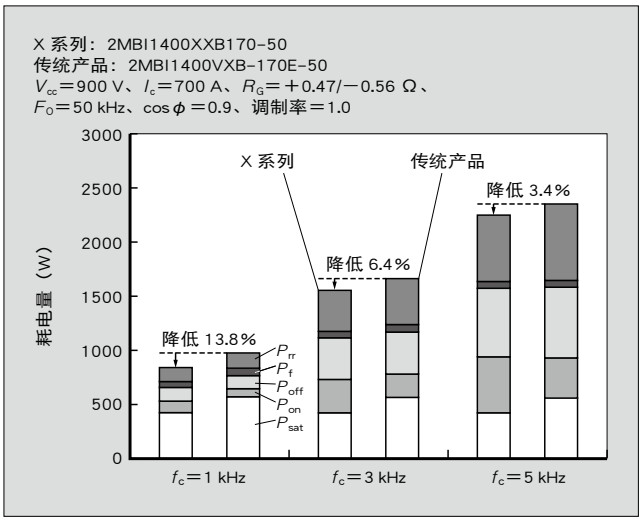


图 4 耗电量

正向导通电压降低约 0.15 V，反向恢复损耗降低约 16%，均衡特性得到了改善。针对若漂移层厚度减小，反向恢复运行时的电压振动和浪涌电压会增大的课题，富士电机通过优化背面结构，实现了现行产品同等以下的特性。

3.3 耗电量

图 4 中展示了耗电量的计算结果。通过改善上述的半导体芯片特性，在载波频率 1 kHz 时，X 系列 PrimePACK™的耗电量相比传统产品降低了约 13.8%，实现了电力转换装置的高效化。

4 封装技术

表 2 中展示了封装结构的比较。X 系列 PrimePACK™为了比传统产品实现更高的功率密度，在维持原有的封装尺寸的情况下，提升了输出电流。而实现这一点后，可能会导致半导体芯片温度上升以及长期可靠性下降。本产品通过适用 X 系列的封装技术，抑制了芯片温度的上升，同时，将连续运行温度从 150 ℃提高到了 175 ℃。并且，还确保了

表 2　X 系列 PrimePACK™的封装结构

	X 系列 PrimePACK™	传统产品
额定电压	1200 V/1700 V	1200 V/1700 V
最大额定电流	1800 A	1400 A
绝缘基板	AlN	Al_2O_3
连续运行时接合温度 T_{vjop}	175 ℃	150 ℃
硅胶的耐热温度	175 ℃	150 ℃

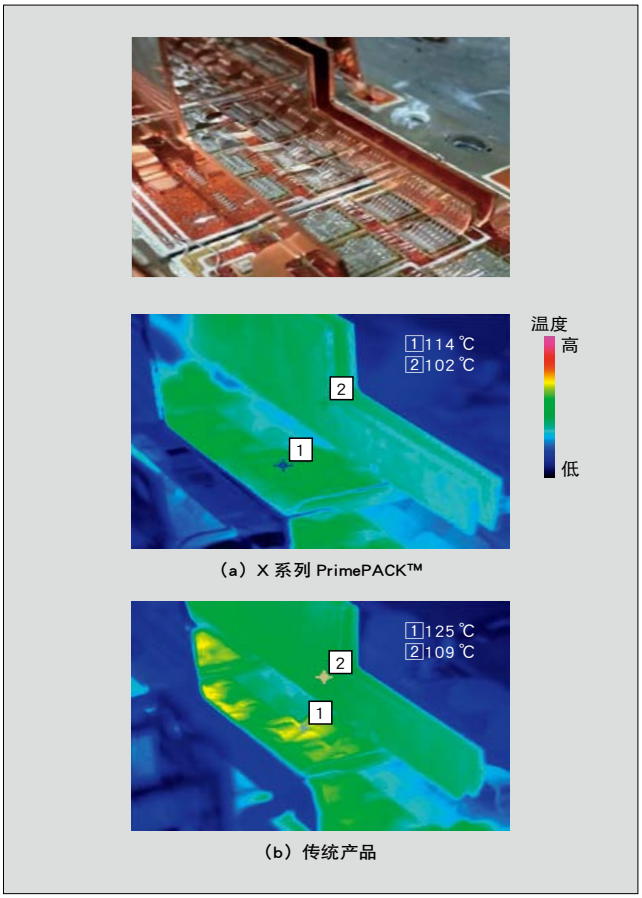
高温连续运行时的长期可靠性[2),3)]。

4.1　新型高散热绝缘基板的适用

为高效地对半导体芯片产生的损耗导致的发热和主端子的发热进行散热，必须改善接合部－塑壳间的热阻。X 系列 PrimePACK™开发了使用热导率高的 AlN（氮化铝）基板的高散热绝缘基板。由此，与传统产品的 Al_2O_3（氧化铝）绝缘基板相比，相同芯片尺寸时，接合部－塑壳间的热阻降低了约 45%。**图 5** 中展示了封装内部温度上升的测量结果。X 系列 PrimePACK™相比传统产品，IGBT 部的温度降低了约 11 ℃。主端子部的温度降低了约 7 ℃。

4.2　连续运行时接合温度 T_{vjop} 的扩大

X 系列 PrimePACK™为了实现更高的输出电流，将 T_{vjop} 从传统产品的 150 ℃提升到了 175 ℃。而要提升运行温度，必须改善对反复热应激的耐量（ΔT_{vj} 功率循环耐量）。



（a）X 系列 PrimePACK™

（b）传统产品

图 5　温度上升的测量结果

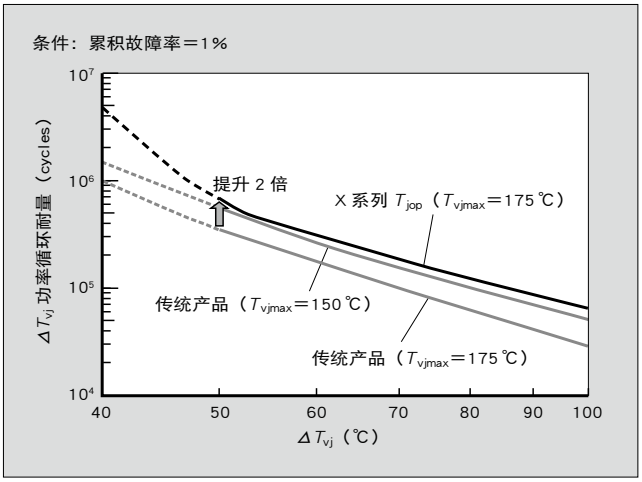


图 6　ΔT_{vj} 功率循环耐量

图 6 中展示了 ΔT_{vj} 功率循环耐量。若将传统产品的 T_{vjmax}=150 ℃提升到 175 ℃，则 ΔT_{vj} 功率循环耐量将下降。针对这一点，X 系列 PrimePACK™凭借新开发焊锡材料和在半导体芯片上适用新配线接合技术，成功在 T_{vjmax} =175 ℃、ΔT_{vj}=50 ℃的条件下，将耐量提升为了传统产品的约 2 倍。

最终，X 系列 PrimePACK™即使是在 T_{vjmax}=175 ℃的条件下运行，其 ΔT_{vj} 功率循环耐量也超过了传统产品在 T_{vjmax}=150 ℃条件下运行时的耐量。

4.3　高耐热硅胶

IGBT 模块内部为确保绝缘性能，使用了硅胶。而温度越高硅胶越容易劣化，绝缘性能可能会下降。

图 7 中展示了硅胶的温度和寿命的关系。传统硅胶在 150 ℃的环境下可维持 10 年以上的寿命，但在 175 ℃的环境下寿命会缩短至约 2 年。X 系列新开发的硅胶在 175 ℃时的寿命，与传统产品的硅胶在 150 ℃时的寿命相同，从而确保了与传统产品在 150 ℃环境下相同的长期绝缘性能。

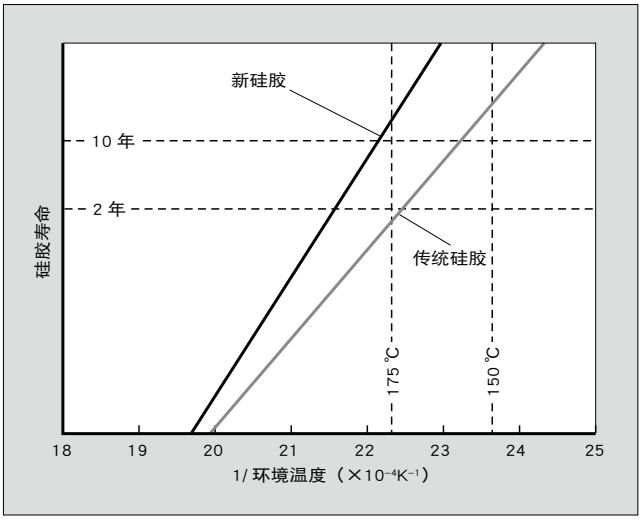


图 7　硅胶自身的温度和寿命的关系

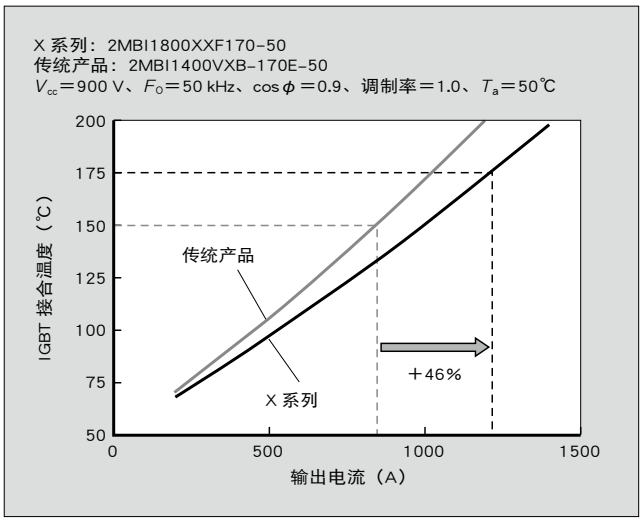


图 8　变频器输出电流与 IGBT 接合温度

5　总结

X 系列 PrimePACK™通过改善半导体芯片的特性，降低了产生的损耗；通过适用新型高散热绝缘基板，改善了热阻；通过提升 T_{vj} 循环功率耐量和绝缘用硅胶的耐热性，实现了 T_{vjop}=175℃。由此，可改善变频器等的能源转换效率，提升实际运行时的输出电流。

图 8 中作为改善效果示例，展示了变频器输出电流和 IGBT 接合温度的关系。通过适用 X 系列 PrimePACK™，输出电流达到了传统产品的 1.46 倍。

6　后记

第 7 代“X 系列”IGBT 模块“PrimePACK™”，凭借半导体芯片特性的大幅改善和新封装技术，实现了业界顶级的额定电流。我们坚信本产品的系列化将为电力转换装置的进一步小型化和高效化，以及实现安全、安心、可持续发展的社会做贡献。今后，富士电机也将继续提供适用了最新技术的产品，为各种电力转换装置的小型化、高效化、高可靠性化做贡献。

参考文献

⑴　Onozawa, Y. et al. “Development of the 1200V FZ-Diode with soft Recovery Characteristics by the New Local Lifetime Control Technique”. Proceeding of ISPSD 2008, p.80-83.
⑵　Momose, F. et al. “The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module”, PCIM Europe 2015.
⑶　吉田健一等. 第 7 代“X 系列”IGBT 模块“Dual XT”. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.19-22.

山本　拓也
从事 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事业统括部模块技术部。

吉渡　新一
从事 IGBT 模块的开发和设计。现为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组长。

冈本　有人
从事 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事业统括部模块技术部。

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。