第 7 代“X 系列”IGBT 模块“Dual XT”

7th-Generation “X Series” IGBT Module “Dual XT”

吉田 健一 YOSHIDA, Kenichi　　吉渡 新一 YOSHIWATARI, Shinichi　　川畑 润也 KAWABATA, Junya

为响应电力转换装置小型化、低损耗化、高可靠性化的要求，富士电机在第 7 代“X 系列”IGBT 模块中，开发出了扩大了额定电流的“Dual XT”(X 系列 Dual XT)。X 系列 Dual XT 通过改善半导体芯片的特性，减少了电力损耗，还通过改善封装结构，提升了封装的通电能力。另外，通过提升 ΔT_j 功率循环耐量和绝缘用硅胶的耐热性，实现了连续运行时接合温度 T_{jop}=175℃。这是业界首款在这一封装尺寸下，额定达到 1200 V/800 A 的产品。

Power conversion equipment has been increasingly required to exhibit compactness, low loss and high reliability, and it is against this backdrop that Fuji Electric developed the 7th-generation “X Series” IGBT module “Dual XT” (X Series Dual XT) as a module that expands rated current. The X Series Dual XT has reduced power loss through semiconductor chip characteristic enhancement, while also improving the package current-carrying capability through package structure enhancement. In addition, by improving the ΔT_j power cycle capability and the heat resistance of the insulation-use silicone gel, the module achieves a junction temperature of T_{jop}=175°C under continuous operation. It is also the industry's first module in this package size that has a 1,200-V/800-A rating.

1 引言

近年来，从防止地球温室化效应的角度出发，要求改善能源效率和减少 CO_2 排放量，太阳能发电、风力发电等可再生能源的需求不断增长。这一领域中，尤其是电力转换装置的大容量化不断推进，大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块的需求正在扩大。

为响应电力转换装置小型化、低损耗化、高可靠性化的要求，富士电机在第 7 代“X 系列”IGBT 模块中，开发出了扩大了额定电流的“Dual XT”(X 系列 Dual XT)。

2 产品阵容

X 系列 Dual XT 的外观和内部如**图 1** 所示，产品系列如**表 1** 所示。产品阵容中包括焊针型 (M254、M285) 和压接针型 (M282、M286) 共计 4 种封装。M285 封装和 M286 封装为扩大额定电流、提升可靠性，将输出端子的铜增厚，采用了高散热绝缘基板，同时还适用了铜线接合技术、高 CTI (Comparative Tracking Index) 树脂盒等新封装技术。通过新技术，制造出了业界首款在这一封装尺寸下额定达到 1200 V/800 A 的产品。

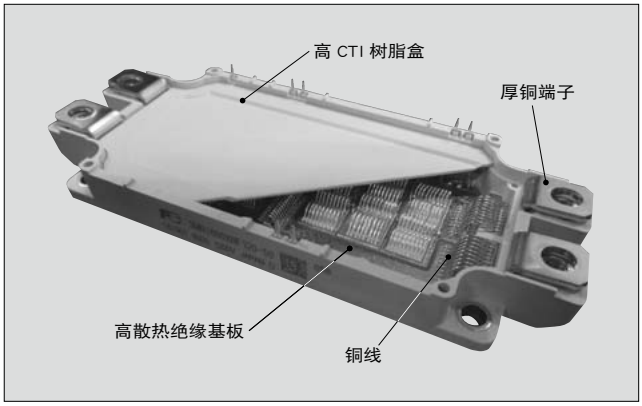

图 1　X 系列 Dual XT 的外观和内部

表 1　X 系列 Dual XT 的产品系列

产品型号	针型	额定电压 (V)	额定电流 (A)	封装型号	绝缘基板
2MBI225XNA120-50	焊针型	1200	225	M254	Al_2O_3
2MBI300XNA120-50			300		
2MBI450XNA120-50			450		
2MBI600XNE120-50			600	M285	AlN
2MBI800XNE120-50			800		
2MBI225XNB120-50	压接针型		225	M282	Al_2O_3
2MBI300XNB120-50			300		
2MBI450XNB120-50			450		
2MBI600XNF120-50			600	M286	AlN
2MBI800XNF120-50			800		
2MBI225XNA170-50	焊针型	1700	225	M254	Al_2O_3
2MBI300XNA170-50			300		
2MBI450XNA170-50			450		
2MBI600XNE170-50			600	M285	AlN
2MBI225XNB170-50	压接针型		225	M282	Al_2O_3
2MBI300XNB170-50			300		
2MBI450XNB170-50			450		
2MBI600XNF170-50			600	M286	AlN

3 特性

在提升能源转换效率方面，改善 IGBT 模块的电力损耗很重要，而这一电力损耗是由 IGBT、FWD (Free Wheeling Diode) 等半导体芯片的特性决定的。

3.1 IGBT 特性的改善

X 系列 Dual XT 的 IGBT 通过减小漂移层的厚度，降低了集电极 – 发射极间的饱和电压。另外，通过对电场终止（FS）层的优化，抑制了漂移层厚度减小时可能发生的关断时的电压振动和耐压降低。

由此，X 系列 Dual XT 的 IGBT 如**图 2** 所示，相比传统产品 “V 系列” Dual XT，其饱和电压约降低 0.4 V、关断损耗约降低 7%，特性得到了大幅改善。

3.2 FWD 特性的改善

X 系列 Dual XT 的 FWD 通过减小漂移层的厚度，降低了阳极 – 阴极间的正向导通电压。另外，通过局域寿命的优化，如**图 3** 所示，相比传统产品，反向恢复波形更加平缓。并且，通过削减反向恢复时的峰值电流和尾电流，大幅降低了反向恢复损耗[1]。

由此，X 系列 Dual XT 的 FWD 如**图 4** 所示，相比传统产品，其正向导通电压约降低 0.1 V、反向恢复损耗约降低 9%，特性得到了大幅改善。

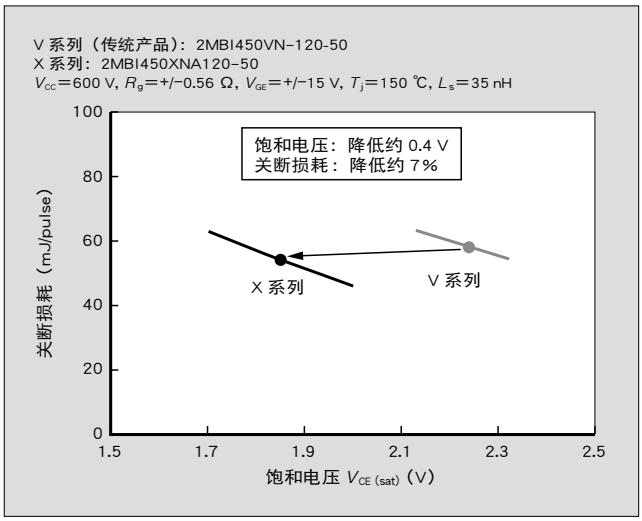

图 2 均衡特性（IGBT）

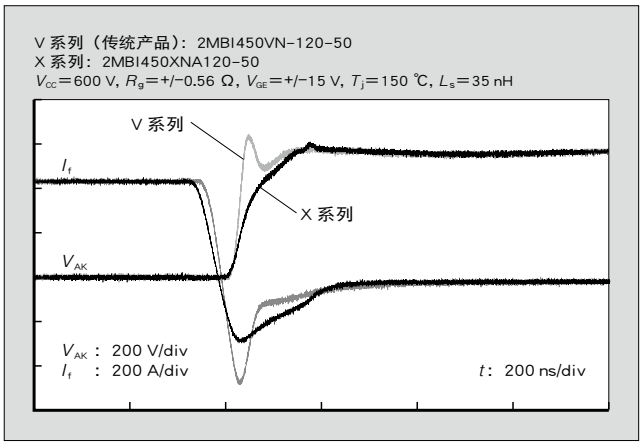

图 3 反向恢复波形

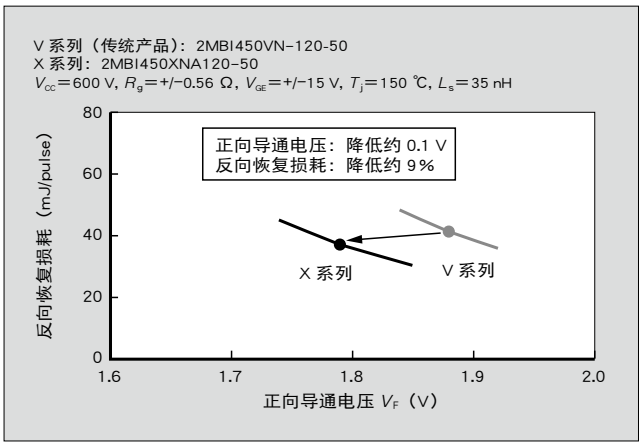

图 4 均衡特性（FWD）

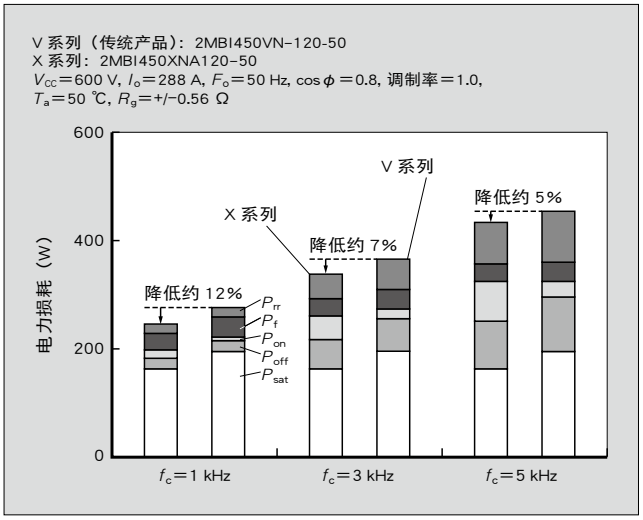

图 5 电力损耗

3.3 电力损耗比较

图 5 中展示了电力损耗的计算结果。通过 **3.1 节**、**3.2 节**中介绍的改善，X 系列 Dual XT 的电力损耗相比传统产品，在载波频率 1 kHz 时，减少了约 12%。

4 封装技术

表 2 中展示了 X 系列 Dual XT（M285、M286）封装结构的特点。新封装结构为了有助于将装置小型化，力求在维持封装尺寸不变的情况下，实现增加输出电流。为实现这一目标，必须对通电时包括封装内半导体芯片的通电部分的发热，和封装的散热性这两方面进行改善。

4.1 通过 AIN 绝缘基板降低热阻

在开发 X 系列 Dual XT（M285、M286）时，为了高效地对半导体芯片产生的热进行散热，全新开发了采用 AIN 基板[2]的高散热绝缘基板。

图 6 中展示了结点 – 塑壳间的热阻。适用了 AIN 绝缘基板的半导体芯片，相比目前广泛使用 Al_2O_3 绝缘基板的情况，相同芯片尺寸下热阻可减少约 45%。

表 2 X 系列 Dual XT（M285、M286）的封装结构的特点

项目		X 系列 Dual XT	V 系列 Dual XT（传统产品）
安装的芯片		X 系列	V 系列
额定电压		1200 V	1200 V
最大额定电流		800 A	600 A
绝缘基板		AlN	Si_3N_4
输出端子的铜厚		2.0 mm	1.5 mm
引线接合	输出端子	铜	铝板
	绝缘基板间	铜	铝板
T_{jop}		175 ℃	150 ℃
塑壳树脂材料		高 CTI 树脂	传统树脂
硅胶		高耐热硅胶（−40～+175 ℃）	传统硅胶（−40～+150 ℃）

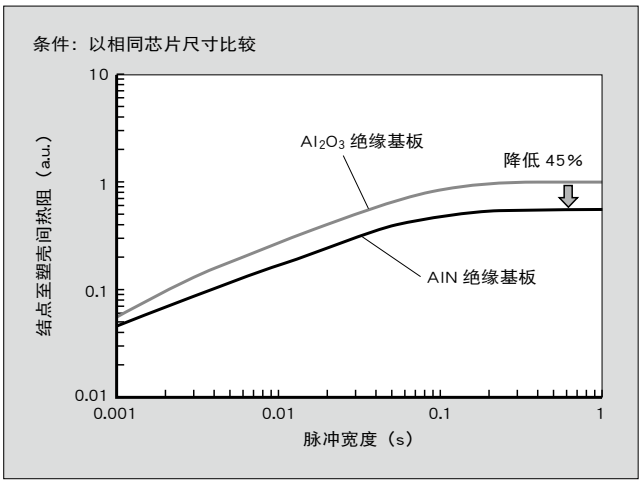

图 6 结点至塑壳间热阻

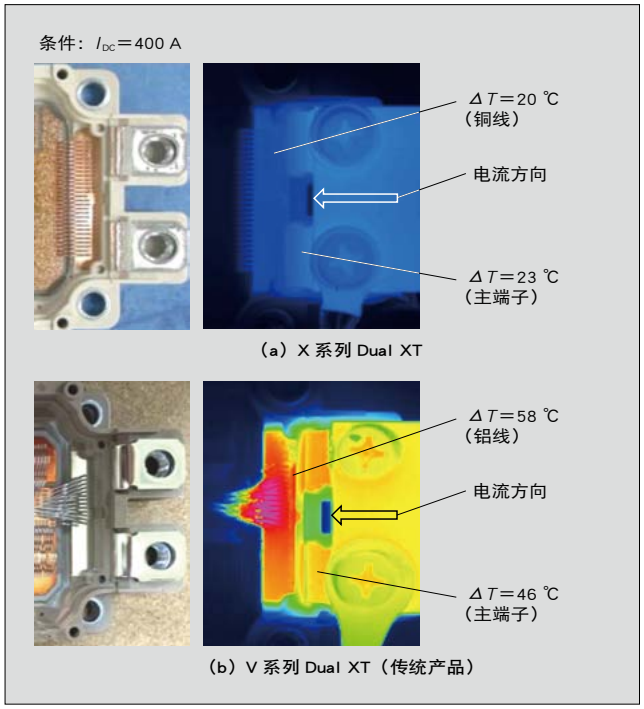

图 7 封装散热的评价结果

4.2 以铜线减少封装内的发热

传统产品在封装内部的主电路配线中采用的是铝线。但铝线通电时发热大，而传统产品的最大额定电流以 600 A 为极限。因此，X 系列 Dual XT（M285、M286）在主电路配线中采用了铜线。如**表 3** 中所示，铜的电阻率比铝低 40%，热导率高 77%。通过抑制通电时封装内的发热和改善散热，温度上升的情况得到了显著的改善。另外，传统产品的端子 – 绝缘基板间的铝线配线密集。X 系列 Dual XT 为进一步降低配线的电阻，采用了全新的绝缘基板布局，实现了直线配置铜线，且增加了配线数量。

图 7 中展示了封装散热的评价结果。传统产品封装中配线的温度上升为 ΔT=58 ℃，而 X 系列 Dual XT（M285、M286）的封装中则为 ΔT=20 ℃，改善至传统产品的一半以下。

表 3 配线材料的物性

材料	电阻率（$10^{-8}\Omega \cdot m$）	热导率〔W/（m · K）〕
铝板	2.5	220
铜	1.5	390
铜线效果	降低 40%	提高 77%

4.3 增厚输出端子的铜以减少封装主端子的发热

X 系列 Dual XT（M285、M286）将输出端子的厚度从传统产品的 1.5 mm 加厚到了 2.0 mm，并对端子形状进行了优化，从而减少了发热。如**图 7** 中所示，传统产品封装中主端子的温度上升为 ΔT=46 ℃，而 X 系列 Dual XT（M285、M286）的封装中则为 ΔT=23 ℃，改善至传统产品的一半。

4.4 连续运行时接合温度 T_{jop} 的扩大

X 系列 Dual XT 为了实现更高的输出电流，将连续运行时的接合温度 T_{jop} 从传统产品的 150 ℃扩大到了 175 ℃。为扩大 T_{jop}，必须提升针对大温度变化的耐量（ΔT_j 功率循环耐量），以及改善高温下的长期可靠性（绝缘用硅胶的耐热性）。

图 8 为 ΔT_j 功率循环耐量。若将传统产品的 T_{jmax}=150 ℃提升到 175 ℃，则 ΔT_j 功率循环耐量将大幅降低。针对这一点，X 系列 Dual XT 通过新开发焊锡材料[3]和在半导体芯片上适用新配线接合技术，成功在 T_{jmax}=175 ℃、ΔT_j=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 Dual XT 即使是在 T_{jmax}=175 ℃的条件下运行，其 ΔT_j 功率循环耐量也超过了传统产品在 T_{jmax}=150 ℃条件下运行时的耐量。

IGBT 模块内部为确保绝缘性能，使用了硅胶。**图 9** 中展示了硅胶自身的温度和寿命的关系。传统硅胶在 150 ℃的条件下可维持 10 年以上的寿命，但在 175 ℃的条件下寿命会缩短至约 2 年。针对这一点，X 系列 Dual XT 通过采用新硅胶[3]，确保了 175 ℃的条件下也有 10 年以上的寿命，保证了与 150 ℃条件下的传统产品同等的硅胶寿命。

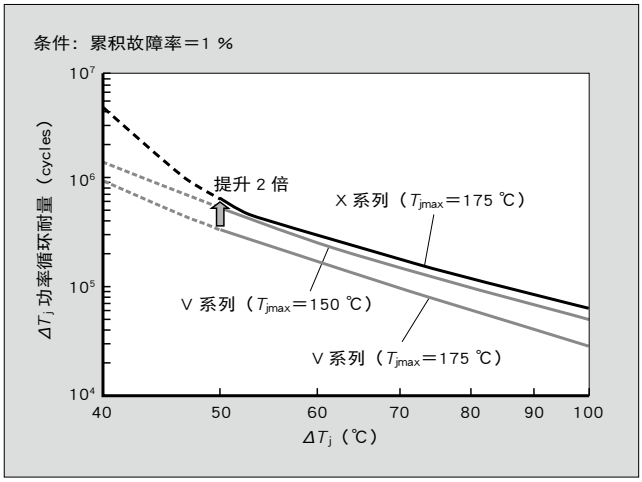

图 8　ΔT_j 功率循环耐量

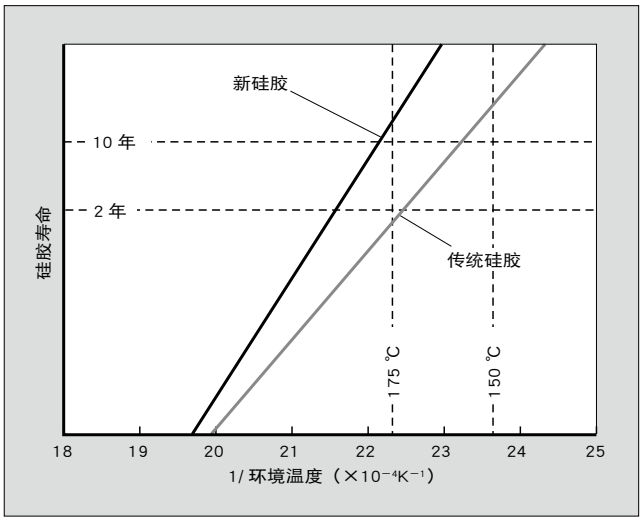

图 9　硅胶自身的温度和寿命的关系

5　总结

X 系列 Dual XT 通过改善半导体芯片的特性，降低了电力损耗；通过改善封装结构，提升了封装通电能力；通过提升 ΔT_j 功率循环耐量和绝缘用硅胶的耐热性，实现了 T_{jop}=175 ℃。由此，针对变频器等适用 IGBT 模块的产品，可实现提升能源转换效率、提升实际运行时的输出电流的目标。

图 10 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 Dual XT，相比传统产品输出电流提升了 40%[4]。

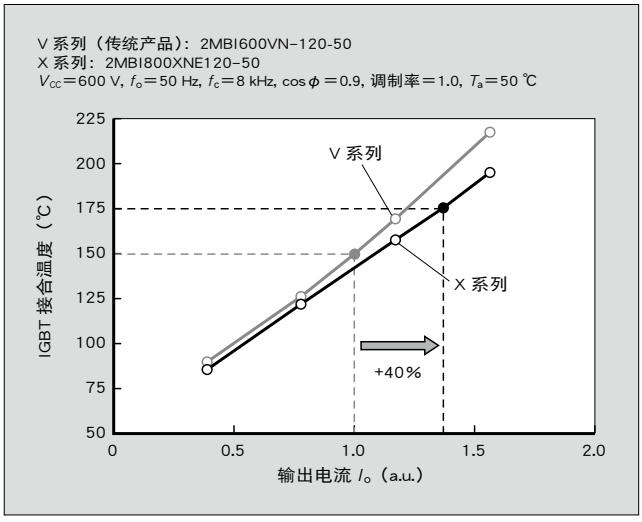

图 10　变频器输出电流与 IGBT 接合温度

6　后记

第 7 代 “X 系列” IGBT 模块 “Dual XT”，凭借大幅改善半导体芯片的特性和新封装技术，实现了业界首款额定 800 A 的产品。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

(1) 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.

(2) Momose, F. et al. “The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module”, PCIM Europe 2015.

(3) 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.

(4) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”, Proceeding of PCIM Europe 2016.

吉田　健一
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。

川畑　润也
从事 IGBT 模块的开发。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。