

第 1 章 X 系列的基本概念和特征

1. X 系列的基本概念	1-2
2. X 系列芯片特征	1-3
3. X 系列封装技术特征	1-7
4. 额定电流等级提升和模块的小型化	1-11
5. 模块型号的说明	1-13
6. 术语和符号	1-14

本章介绍第 7 代 X 系列 IGBT 模块的基本概念和特征。

1. X 系列的基本概念

近年来，为了防止化石燃料枯竭和全球变暖，人们正在追求提高能源利用率和减少二氧化碳排放方面作出了努力。因此，包括了马达驱动等工业应用，开关电源等民生应用，以及电动汽车和铁路、太阳能发电和风力发电等可再生能源应用等，使用功率半导体器件的高效率电力变换装置其适用领域和市场正在急速扩大。在功率半导体器件中，IGBT（绝缘栅双极晶体管）模块具有高速开关、大功率高效率 and 容易操控的特征，从而使它在其应用领域中不断扩大。

IGBT 模块在投放市场以来，凭借多项技术创新实现了更低的损耗以及结构的小型化。这些创新在电力变换装置的高效率、小型化、高性价比作出了贡献。然而，IGBT 模块尺寸的小型化会导致 IGBT 模块在高功率密度时，结温升高和可靠性降低。为了进一步实现模块的小型化和高效率，除了提高芯片性能，创新的封装技术（散热性能和可靠性提高）也变得不可欠缺。为了满足市场需求，富士电机开发了新型芯片技术和封装技术的第 7 代 IGBT 模块「X 系列」。

● 更低的变频器损耗（芯片技术）

第 7 代 X 系列 IGBT 通过极薄的晶圆制造技术和细小的沟槽门极结构，使得它在损耗方面的表现比我们第 6 代 V 系列 IGBT 有了突飞猛进的进步。

● 连续运行温度 $T_{vjop}=175^{\circ}\text{C}$ 实现了更高电流输出（封装技术）

通过使用新开发的封装技术（高散热绝缘基板/高耐热硅凝胶/高强度焊锡）和模块构造的优化（绑定线直径/长度），提高了 X 系列在高温工作时的稳定性和耐久性，从而将最大连续可操作结温 T_{vjop} 从原来的 150°C 提高到 175°C 。这实现了在保持模块原有尺寸的条件下增加了输出能力。

● 额定电流的提升和 IGBT 模块的小型化

通过以上的性能提升，在保持模块尺寸不变的同时扩大了 X 系列模块的额定电流。

例）1200V EP2 封装（最大额定电流：第 6 代：50A → 第 7 代：75A），这意味着 X 系列的技术使得额定电流扩大了 50%。

从另一个角度来说，最大额定电流的扩大可以让封装尺寸减小，原来 75A/1200V 只能使用更大的 EP3 封装（详见第四章）。新一代的 IGBT 可以为电力变换装置小型化以及低成本化作出贡献。

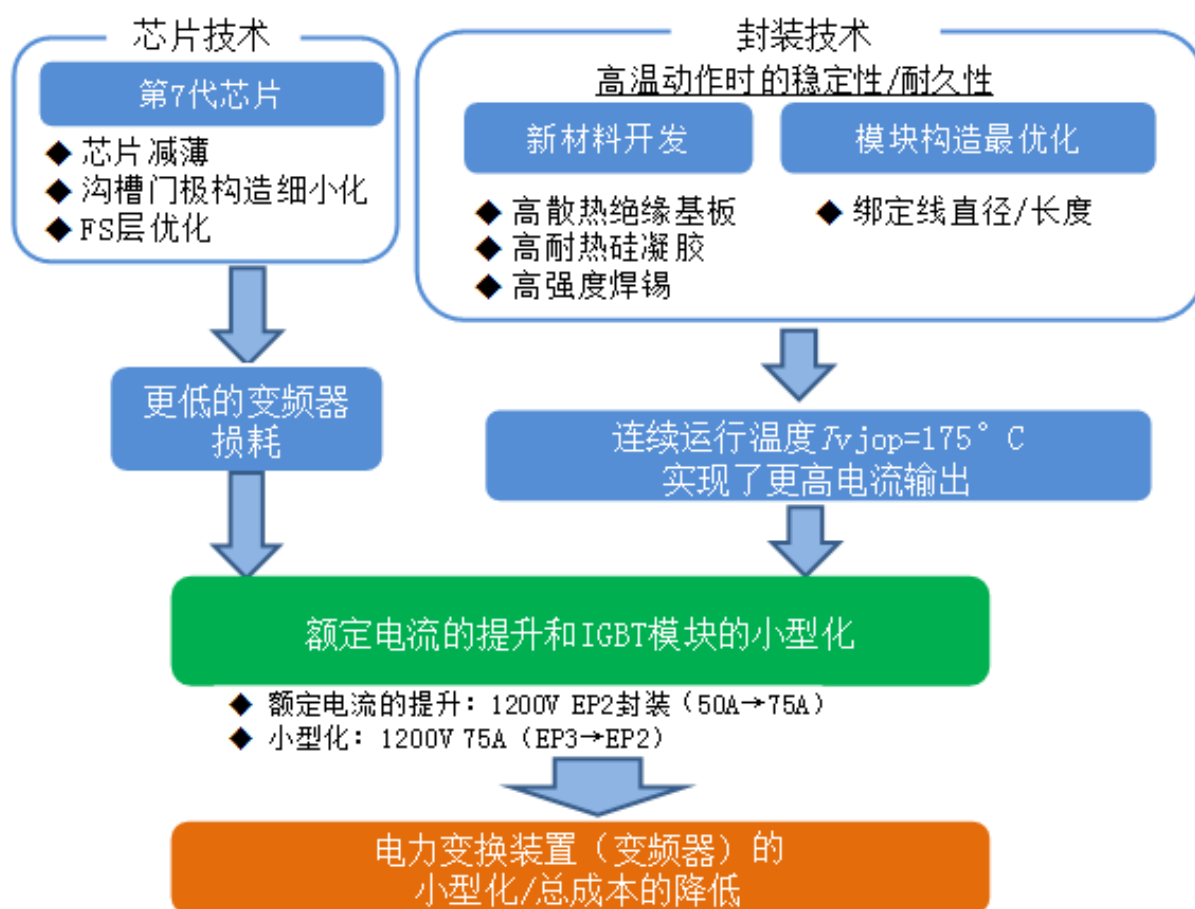


图 1-1 第 7 代 X 系列 IGBT 模块基本的概念

2. X 系列芯片特征

如图 1-2 所示是第 6 代 V 系列和第 7 代 X 系列的芯片剖面图。第 7 代的 IGBT 芯片结构继承了第 6 代 V 系列技术开发的场截止 (Field Stop) 结构和沟槽门极结构。第 7 代 X 系列与第 6 代 V 系列相比, 通过用薄晶片减少漂移层的厚度。通过采用这样的薄漂移层, 可以在第 7 代 X 系列中更进一步降低 IGBT 芯片的导通压降。一般来说, 漂移层变薄时, 可能会出现关断时的电压振荡及耐压降低, 但通过进一步优化场截止层, 可以抑制电压振荡的同时确保足够的击穿电压以达成芯片的进一步减薄。另外, 与第 6 代 V 系列相比, 通过使芯片表面的沟槽门极结构的细小化和最优化, 可以抑制在导通时 P 通道抽出的空穴, 通过增加表面的载流子浓度来提高 IE 效果 (Injection Enhanced), 大幅度改善了导通压降和关断损耗之间的平衡关系。

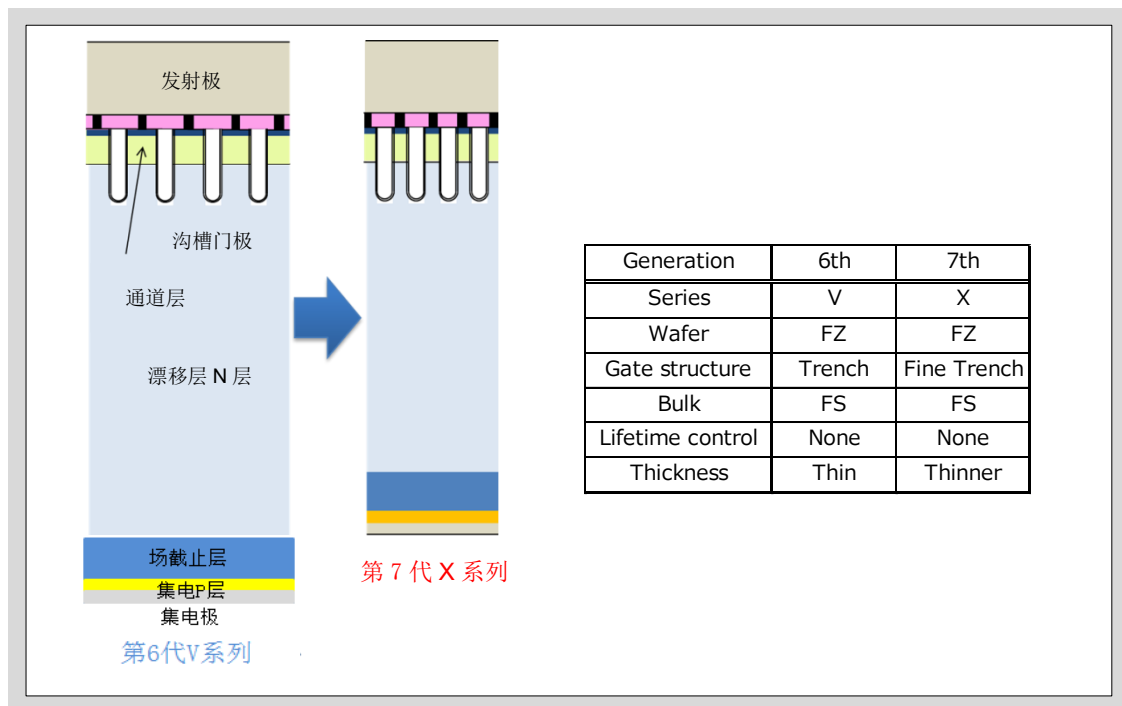


图 1-2 X 系列 IGBT 芯片剖面图

X 系列芯片的主要特征

1. 更薄的漂移层
 - 降低导通压降
 - 降低开关损耗
2. 细小化沟槽门极结构
 - 降低导通压降
 - 降低开关损耗
3. 优化场截止层
 - 抑制电压振荡
 - 降低高温漏电流

2.1 导通压降和关断损耗之间平衡关系的改善

图 1-3 显示了第 7 代 X 系列和第 6 代 V 系列 IGBT 芯片输出特性的比较。如图所示，在额定电流条件下，第 7 代 X 系列的导通压降(集电极-发射极电压) $V_{CE(sat)}$ 降低了约 0.25V。通过降低导通压降，可以减小电流流过 IGBT 时产生的导通损耗（电流×导通压降），从而可以进一步提高电力变换装置的效率。

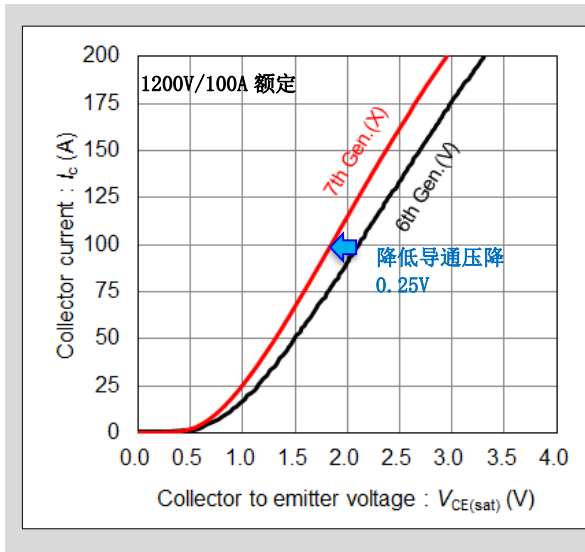


图 1-3 IGBT 输出特性的改善

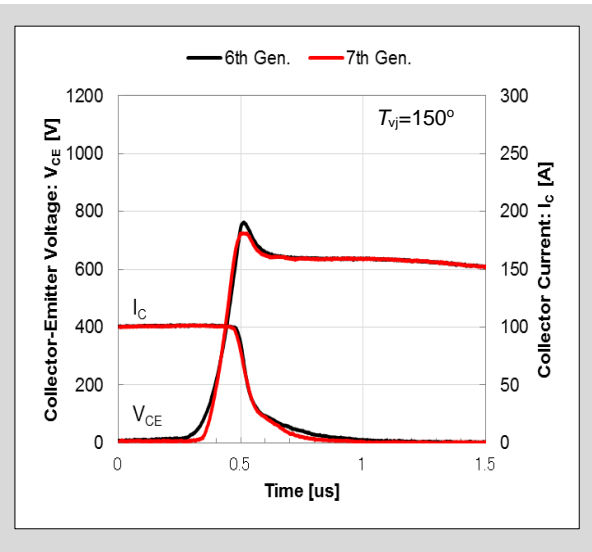


图 1-4 IGBT 关断波形比较

图 1-4 显示了第 7 代 X 系列和第 6 代 V 系列的关断比较波形。通过应用更薄的漂移层及增强正效果，显著地降低了拖尾电流，使得 X 系列的关断损耗降低了 10%。

图 1-5 显示了 IGBT 导通压降和关断损耗之间的平衡关系。与 V 系列相比，X 系列的导通压降降低了 0.25V。

通过上述改善，尽管第 7 代的 IGBT 芯片尺寸有所减小，但却实现了更低的损耗。

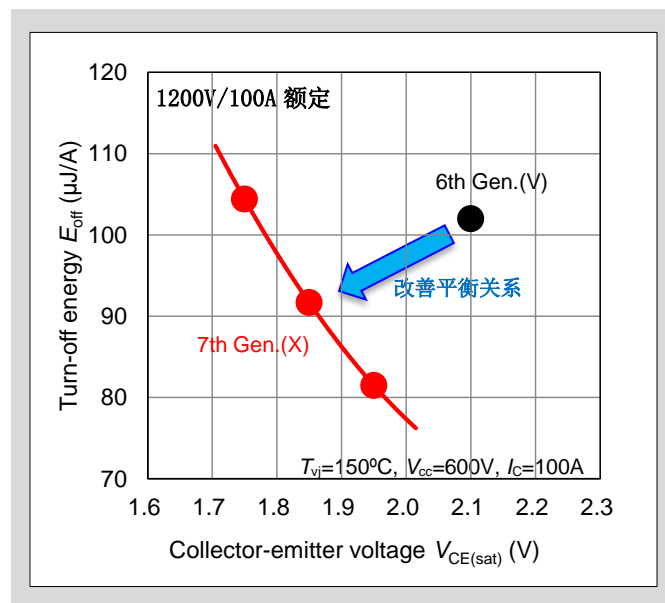


图 1-5 IGBT 关断损耗-导通压降平衡特性改善

2.2 漏电流的改善

IGBT 在集电极和发射极之间施加反向偏压时的漏电流具有随着温度的升高而增加的特性。由于在这种高温下的漏电流发生的损耗，使结温进一步上升，并且随着温度的升高，进一步增加了漏电流，在这种情况下可能会导致热失控损坏。通过优化了场截止层，和第 6 代 V 系列相比，第 7 代 X 系列 IGBT 在高温下的漏电流降低了 28%，同时也降低了热失控的风险，从而保证了能够连续工作在 175℃ 的结温。

2.3 FWD 反向恢复特性的改善

第 7 代 X 系列 IGBT 模块，不仅改善了 IGBT 芯片的特性，还改善了并联在 IGBT 上的二极管特性。（FWD: Free Wheeling Diode）

X 系列的 FWD 器件通过减小漂移层的厚度来降低正向电压 (V_F)。然而，通常在二极管的漂移层变薄时，反向恢复时耗尽层容易到达底面，从而在反向恢复时会发生电压振荡的问题。在 X 系列的 FWD 器件中，通过优化芯片底面结构，可以抑制反向恢复运行期间耗尽层的延伸，防止耗尽层到达底面，从而抑制反向恢复时的电压振荡和浪涌电压。图 1-6 表示了第 7 代 X 系列和第 6 代 V 系列的 FWD 的比较特性。图 1-6 (a) 所示，反向恢复峰值电流和拖尾电流都减小了，实现了更加平缓的反向恢复波形。而图 1-6 (b) 则显示了反向恢复损耗和正向电压之间平衡关系的改善，与第 6 代 V 系列相比，相同的 V_F 条件下第 7 代 X 系列反向恢复损耗降低了约 30%。

一般而言，当模块开关时发生的电磁干扰 (EMI: Electro Magnetic Interference) 取决于电压斜率 dv/dt 。将反向恢复波形变软的目的是通过降低 dv/dt 来改善 EMI。

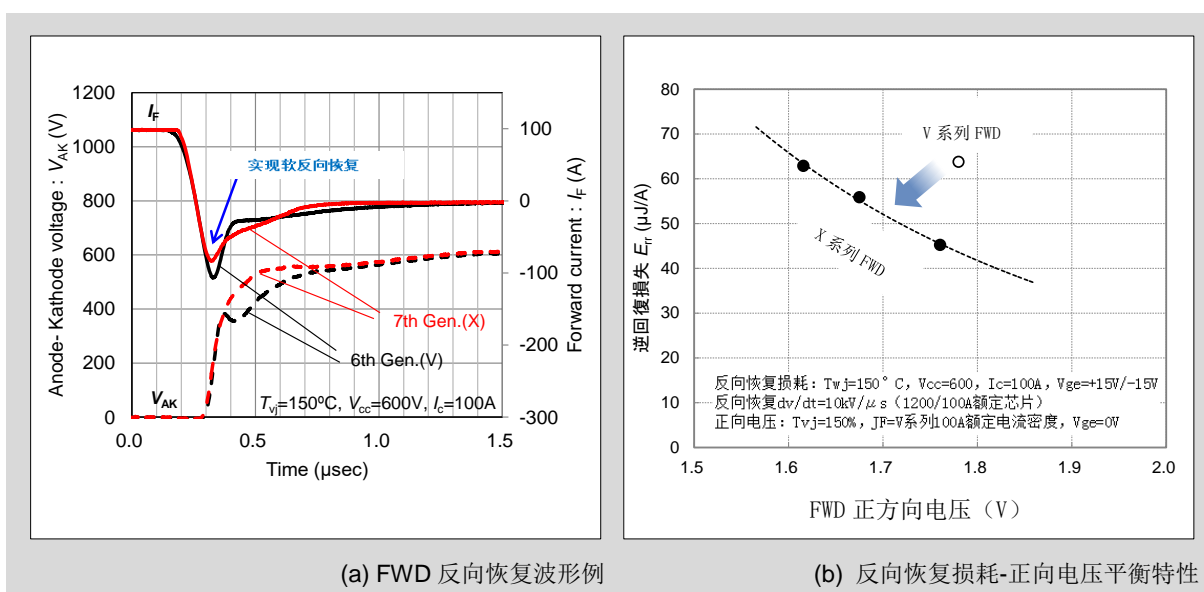


图 1-6 X 系列 FWD 特性改善

3. X 系列的封装技术特征

第 7 代 X 系列保证连续运行期间的结温 $T_{vjop}=175^{\circ}\text{C}$ 。为了实现这点，提高 IGBT 以及 FWD 芯片的效率和尺寸是必不可少的。但是另一方面，由于芯片小型化而增加的功率密度导致芯片温度的增加，因此可能降低器件的可靠性。在第 7 代 IGBT 模块中，通过优化模块结构以及新开发的高耐热和高可靠性封装解决了这个问题。

- 新材料的开发
 - 高散热陶瓷绝缘基板 → 散热性、可靠性提升
 - 高耐热硅凝胶 → 在 175°C 时保证长期的绝缘性
 - 高强度焊锡 → ΔT_{vj} 功率循环耐量的提升
- 模块结构的优化
 - 绑定线直径/长度优化 → ΔT_{vj} 功率循环耐量提升

3.1 高散热陶瓷绝缘基板开发

为了改善 IGBT 以及 FWD 芯片的散热性能，第 7 代 IGBT 模块减小了绝缘基板的热阻，因为陶瓷绝缘基板对芯片与散热片之间的热阻影响最大。低成本 Al_2O_3 （氧化铝）、具有高导热性和低热阻的 AlN （氮化铝）等被广泛用作绝缘基板的材料。为了对应近年来的高输出・小型化的要求，具有低热阻的 AlN 绝缘基板的应用越来越广泛。然而，由于基板厚度大，常规的 AlN 绝缘基板具有高刚性。外壳温度（ T_c ）升高时，施加于基板下焊锡的热应力将增加，从而降低可靠性。

如图 1-7 所示，第 7 代 X 系列模块，新开发的绝缘基板的 AlN 陶瓷层比以前系列更薄，并能确保高散热・低热阻和长期可靠性。通常来说，当 AlN 绝缘层变薄时，会担心陶瓷绝缘基板的绝缘强度和初始强度降低，但是通过优化陶瓷的烧结条件解决了这些问题。

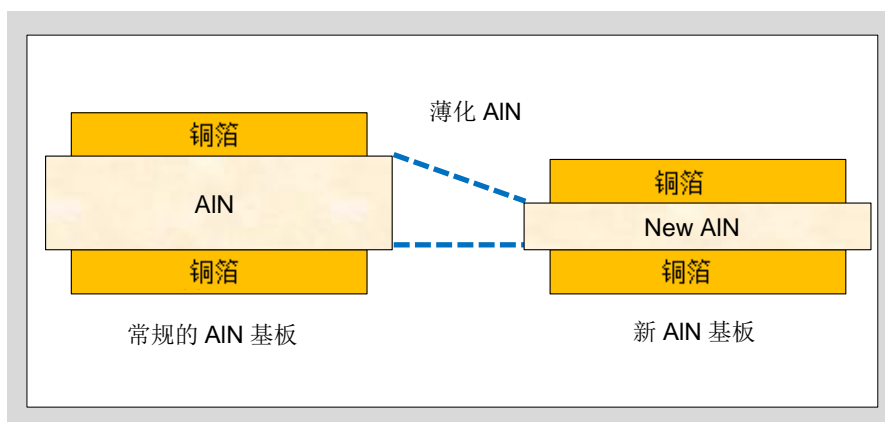


图 1-7 高散热 AlN 基板横截面构造比较

如图 1-8 显示了常规的 Al_2O_3 基板和新开发的高散热 AlN 绝缘基板的芯片-外壳之间热阻曲线。如图所示，高散热 AlN 绝缘基板比 Al_2O_3 基板的热阻降低了约 45%（相同芯片尺寸上进行比较）。对功率密度和芯片温度要求比较严格的产品，通过使用新 AlN 绝缘基板解决了温升和长期可靠性的问题，实现了模块的小型化和高温运行。

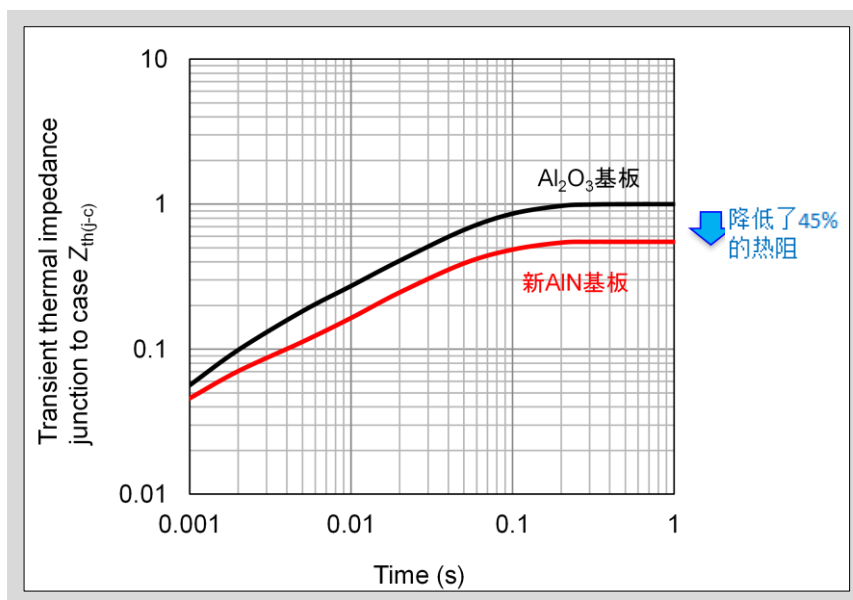


图 1-8 Al_2O_3 基板和高散热新 AlN 基板的热阻比较

3.2 高耐热硅凝胶的开发

第6代V系列的连续运行时的最大结温(T_{vjop})是150℃,第7代X系列可以保证连续最大结温是175℃。IGBT 模块另一个长期可靠性的问题是在高温条件下减缓模块内部硅凝胶的劣化。硅凝胶是用于确保IGBT 模块的绝缘耐压,通常硅凝胶会随着温度升高而发生固化,并且固化后的硅凝胶可能会产生裂缝,从而降低绝缘性能,因此无法保证在高温条件下连续运行。为了解决这个问题,开发了新高耐热的硅凝胶。这个高耐热硅凝胶,通过材料组成的优化,抑制了高温下的固化,经试验证实,即使在高温环境下的放置试验(215℃、2000小时)也没有出现裂纹。

图1-9显示了环境温度和硅凝胶使用寿命的关系。横轴是环境温度(数值越小,温度越高)、纵轴表示硅凝胶的寿命。在175℃下高耐热硅凝胶的使用寿命比传统的硅凝胶提高了5倍,并且与150℃下的传统的硅凝胶具有相同的使用寿命。因此,确保X系列模块在175℃的高温下绝缘性能可以与传统的产品在150℃条件下的绝缘性能具有相同的可靠性。

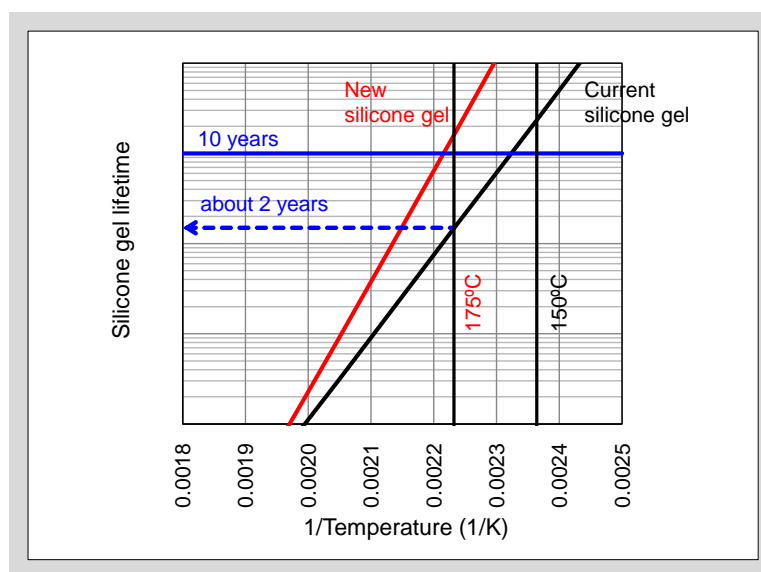


图 1-9 高耐热硅凝胶寿命和温度的关系

3.3 高强度焊锡的开发和绑定线直径/长度的优化

为了确保 IGBT 模块长期可靠性,有必要提高重复热应力的耐受能力(ΔT_{vj} 的功率循环耐量)。

图1-10是IGBT模块的剖面构造图。在IGBT模块中,将绝缘陶瓷基板焊接在铜基板上,并且将IGBT/FWD芯片焊接在陶瓷基板上面的铜箔。然后半导体芯片和铜箔通过铝绑定线连接构成回路。在电力变换装置运行期间,IGBT模块温度会升高,由于模块内的各种材料(铜、陶瓷、半导体芯片)的膨胀系数不同,所以在接合部位会产生机械应力。在半导体芯片的结温 T_{vj} 反复上升下降的使用条件下,会重复施加热应力至芯片上方的绑定线和芯片下方焊接部分,导致劣化。 T_{vj} 越高,劣化的进展速度越快。

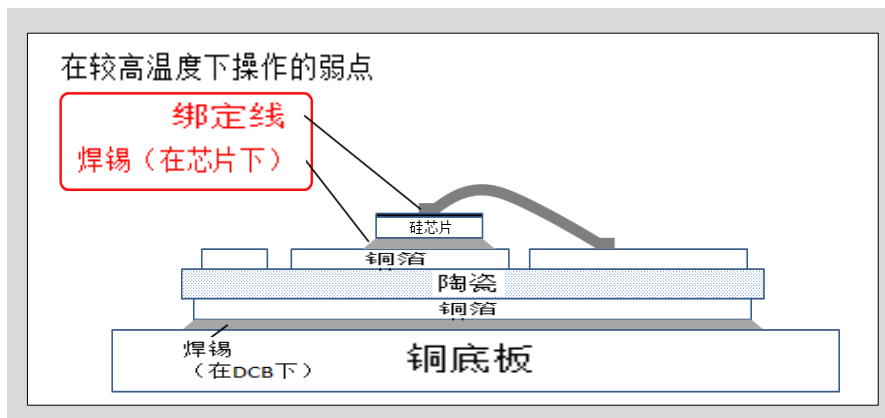


图 1-10 模块剖面构造图

第 7 代 X 系列对芯片上的绑定线在直径和长度方面进行了优化。这确保了在 $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$ 条件下的连续工作也具有足够的功率循环耐量。此外，芯片下的焊接材料已被新开发的高强度焊锡所取代。

图 1-11 显示了第 7 代 IGBT 模块和第 6 代模块的 ΔT_{vj} 功率循环寿命曲线。第 7 代的寿命比第 6 代多了 2 倍 ($T_{vj,max}=150^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{vj}=50^{\circ}\text{C}$)。此外，第 7 代 X 系列模块在 $T_{vj,max}=175^{\circ}\text{C}$ 时的功率循环耐量是等于或者高于第 6 代 V 系列 $T_{vj,max}=150^{\circ}\text{C}$ 时的功率循环耐量，这也保证了在 $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$ 的安全运行性和高可靠性。

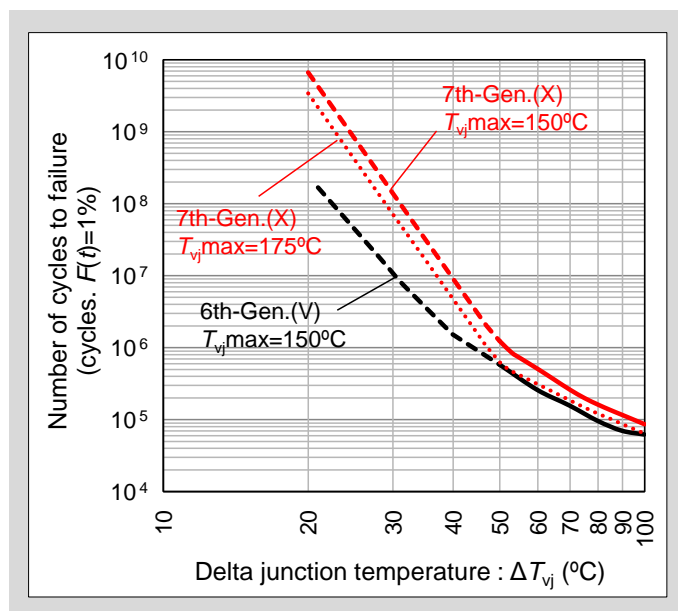


图 1-11 ΔT_{vj} 功率循环耐量曲线

4. 额定电流等级提升和模块的小型化

如上所述，通过改进 IGBT 和 FWD 芯片，降低了第 7 代 X 系列模块的损耗，从而提供了更加便于用户使用的器件。此外，由于封装技术的革新，大大提高了散热性和可靠性。通过应用这些技术，IGBT 模块实现了更高效率，更小尺寸，更高功率密度以及高温下更高可靠性。

图 1-12 显示了第 6 代 V 系列和第 7 代 X 系列（1200V/75A）额定产品应用于变频器设备时 IGBT 模块的功率损耗和 IGBT 结温的比较（计算值）。如上所述，第 7 代 X 系列中，由于减小了 IGBT 和 FWD 的导通压降，从而降低了 IGBT 和 FWD 的导通损耗（ P_{sat} 、 P_{f} ）。此外，通过改善 IGBT 的开关特性来降低关断损耗（ P_{off} ），改善 FWD 的反向恢复特性来降低 IGBT 开通损耗（ P_{on} ）和 FWD 的反向恢复损耗（ P_{rr} ）。因此，在第 7 代 X 系列中，变频器损耗降低约 10%。此外，通过降低损耗、优化高散热绝缘基板和封装技术，从而现实 IGBT 的结温也降低约 10%。

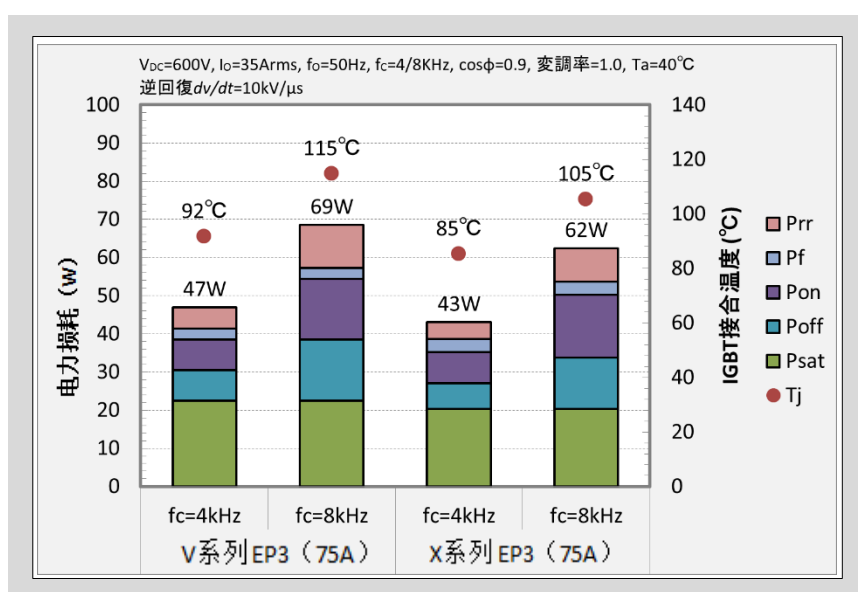


图 1-12 变频器装置的损耗和 IGBT 结温

此外，第 7 代 X 系列中，通过实现在高温下降低 IGBT 芯片的漏电流技术并应用新开发的高耐热硅凝胶技术，来保证在结温为 175°C 条件下的连续工作。如图 1-13 所示，由于变频器损耗降低和工作温度升高，与以前的第 6 代 V 系列相比，变频器的输出能力变大，相同尺寸的变频器的输出电流可增加约 35%。

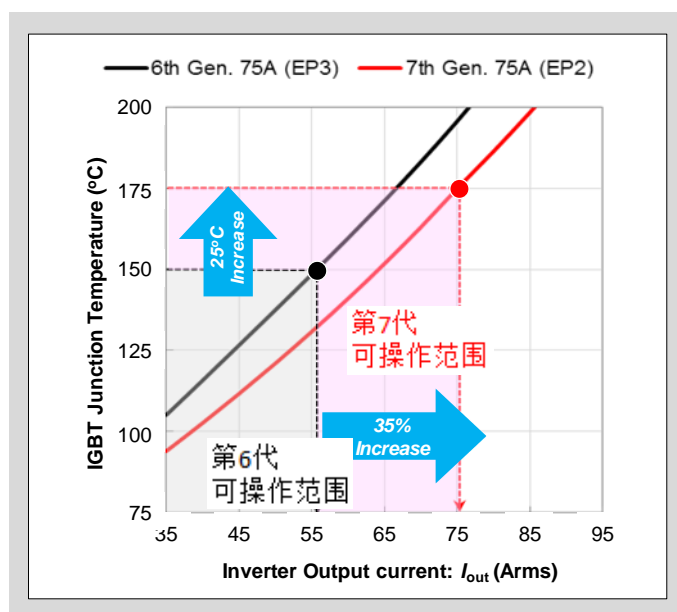


图 1-13 变频器输出电流和 IGBT 结温关系

此外，第 7 代 X 系列中，通过低损耗、高功率密度和高温工作，实现了用同一封装来提升电流额定值。比如，1200 系列的 EP2 封装中，第 6 代 V 系列的最大额定电流为 50A，而在第 7 代 X 系列中，最高额定电流扩大到 75A。该效果可以在不改变电力变换装置壳体尺寸的情况下增加输出功率（图 1-14）。

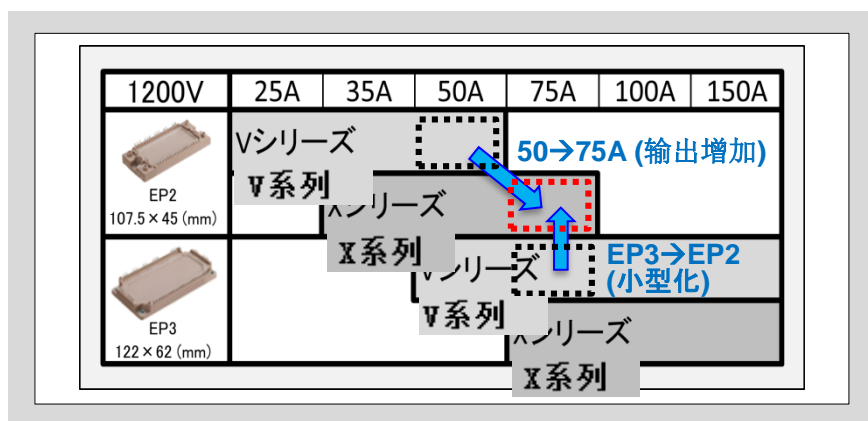
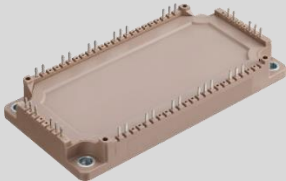


图 1-14 EP 系列(1200V 额定)

另一方面，扩大 IGBT 模块的额定电流，也有助于电力变换装置的小型化（图 1-14）。如表 1-14 所示，在第 6 代 V 系列模块中，额定 1200V/75A 的 IGBT 模块使用 EP3 封装（122mm x 62mm），但在第 7 代 X 系列中，可以将相同额定值的 IGBT 装入 EP2 封装（107.5mm x 45mm）。这样模块的封装面积（安装尺寸）就减少了 36%。

表 1-1

	第 6 代 V 系列	第 7 代 X 系列
封装外观	 EP3 封装	 EP2 封装
额定电压/额定电流	1200V/75A	1200V/75A
电流密度	100%	160%
封装面积	122mm x 62mm 7564mm ² (100%)	107.5mm x 45mm 4836mm ² (64%)
模块重量	310g (100%)	200g (65%)

如上所述，第 7 代 X 系列可以在相同的额定功率下降低模块尺寸，或者在相同封装尺寸下提高额定功率，这都是通过减少 IGBT 和 FWD 的损耗提高工作结温以及新的封装技术来实现的，通过减少系统尺寸和提高输出电流来实现更高效率、更低成本的电力变换装置。

5. 模块型号的说明

第 7 代 X 系列 IGBT 模块的产品型号名称以及命名规则，请参照表 1-2。

表 1-2 模块型号名称 例) 6MBI100XBA120-50

6	MB	I	100	X	B	A	120	-50
IGBT 开关数量	模块种类	内部构成	额定电流	IGBT 芯片世代	封装		额定电压	其他
	MB: IGBT 模块	I: 标准模块	$I_C \times 1$ (A)	X: X series (7 th Gen.)			V_{CES} x1/10 (V)	< 50: RoHS 不满足
		R: 功率集成模块 (PIM)						≥ 50: RoHS 满足
		P: 智能功率模块 (IPM)						

6. 术语和符号

X 系列 IGBT 模块的数据表以及应用手册中使用最大额定/电气特性的术语和符号，可能与第 6 代 V 系列或者更早版本有所不同。表 1-3 列出了 X 系列和 V 系列以前主要的术语和符号，与第 6 代 V 系列或更老的产品相比时，请使用此表作为参考。基本上符合 IEC 标准（IEC60747），但某些产品可能与 V 系列具有相同的符号。

表 1-3 术语和符号

V 系列以前		X 系列	
术语	符号	术语	符号
集电极电流 Collector current	I_c	集电极电流 collector current	I_c
	I_c pulse	重复峰值集电极电流 Repetitive peak collector current	I_{CRM}
	$-I_c$	FWD 正向电流 Forward current	I_F
	$-I_c$ pulse	FWD 重复峰值正向电流 Repetitive peak forward current	I_{FRM}
最大损耗 Collector Power dissipation	P_c	最大损耗 Total Power dissipation	P_{tot}
结温 Junction temperature	T_j	结温 Virtual junction operating temperature	T_{vj}
连续运行时的结温 Junction temperature (Switching condition)	T_{jop}	连续运行时的结温 Operating virtual junction temperature	T_{vjop}
绝缘强度 Isolation voltage	V_{iso}	绝缘强度 Isolation voltage	V_{isol}
安装力矩 Screw torque	-	散热器安装力矩	M_s
		端子安装力矩	M_t
热阻（外壳-散热器） Thermal resistance (case to heat sink)	$R_{th(c-f)}$	热阻（外壳-散热器） Thermal resistance (case to heat sink)	$R_{th(c-s)}$
		IGBT 热阻（外壳-散热器） Thermal resistance (case to heat sink per IGBT)	$R_{th(c-s)I}$
		FWD 热阻（外壳-散热器） Thermal resistance (case to heat sink per FWD)	$R_{th(c-s)D}$