

三安 SiC 技术助力空调系统突破能效瓶颈

创“芯”科技，引领绿色未来

AN2025-D04 应用文档



作者：三安半导体 高级应用工程师 张建山、许亚坡、杨青海

审阅：姚晨

随着国家“双碳”目标的提出，各行各业对节能减排的要求越加重视。暖通空调作为建筑能耗的主要来源之一，其能效提升对于实现“双碳”目标具有十分重要的战略意义和经济效益。此外，国家空调新能效标准的发布也使得变频空调开始占据市场的绝对主导地位，如何更好地提高空调能效，成为了空调技术行业十分重要的发展方向。

对于传统空调电源方案，通常选用 Si IGBT 或者 Si MOS 功率器件作为此类系统的开关元件。然而，受限于 Si 材料自身的物理特性，在如今更高频的空调开关电源设计中将不可避免地引入更多的损耗，从而引起器件温度的上升，由此导致系统散热成本的增加以及效率的下降。因此，采用传统 Si 基功率器件去实现系统更高能效的途径变得越来越局限，于此同时，具有高温、高频、高压、大功率等优异特性的第三代半导体 SiC 技术逐渐受到空调行业的高度关注。

相较于传统 Si 基空调电源方案，SiC 技术的引入为空调行业带来了许多成本的优化，例如：

1. 减少散热系统成本：SiC 空调电源方案能够更好地降低功率器件的工作损耗，改善器件的温升，从而减小散热片、风扇等辅助冷却部件的尺寸，降低热管理的成本；
2. 系统小型化和材料节省：系统能够获得更高的工作频率，由此减小系统中电感、电容等无源元件的尺寸和成本，PCB 布局更为紧凑，从而缩小电路板面积，降低制造成本；
3. 降低能耗成本：SiC 器件的高效开关性能显著降低了空调系统的能量损耗，助力空调系统进一步提高运行能效，从而减少运行电费的产生；
4. 降低维护与故障率：SiC 的高温性能稳定性，降低了因热应力导致的系统故障率，由此可延长空调的使用寿命。

为更直观地阐述 SiC 器件的应用优势，本文以实际空调系统为测试平台，横向测评三安 SiC SBD 与传统 Si FRD、竞品 SiC SBD 在实际系统应用中的性能表现。结合市场调研和用户需求，选用目前主流的 1.5 匹家用空调机型作为评估系统，该系统的前级 PFC 功率电路拓扑简图如图 1 所示。该拓扑为经典的 PFC 电路架构，所用开关管为 650V/30A Si IGBT，二极管为 600V/30A Si FRD。Si IGBT 的金属背板通过垫片与散热片进行装配连接，垫片起绝缘和导热作用。Si FRD 为全塑封的封装形式，该器件的背板通过涂抹导热硅脂直接与散热片进行装配连接。



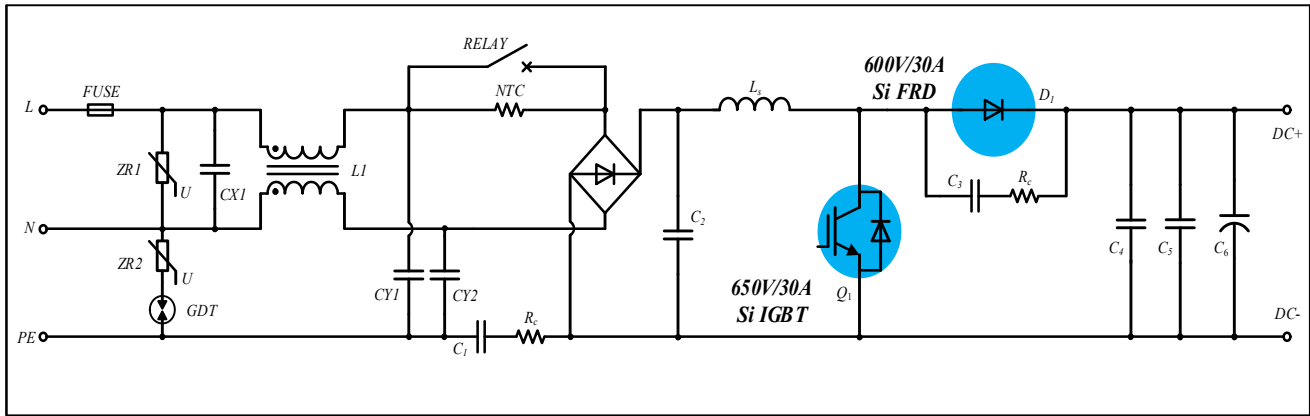


图 1.1.5 匹空调前级 PFC 功率电路拓扑

待测 SiC SBD 器件来自三安自主研发的第三代 650V/12A SiC SBD(SDS065J012N3)以及第四代 650V/10A SiC SBD(SDS065J010N4)，其中 SDS065J012N3 主要面向于 1.5 匹空调应用场景，SDS065J010N4 则面向于 1 匹空调应用场景。如图 2 所示为上述两款内绝缘器件的封装信息，器件均采用 TO-220N-2L 的封装形式，通过在绝缘金属背板直接涂抹导热硅脂即可与散热片进行安装，在减免背板绝缘垫片成本的同时又可极大减小器件到散热片的热阻，很好地缓解二极管在大功率工作情况下的温升问题。此外，该器件具有零反向恢复电流、低正向压降、低热阻、高耐温等优异性能，可很好改善系统温升、系统效率等问题。待测横向评估 SiC SBD 产品来自三安的第三代 650V/12A SiC SBD(SDS065J012C3)铁封器件，以及来自市场主流友商产品 650V/12A SiC SBD(WN*)。待测横向评估 Si FRD 产品选择目前市场上占有率较高的两款 600V/30A Si FRD。根据实验测试目标选择对应待测器件并利用控制变量法进行实测评估。

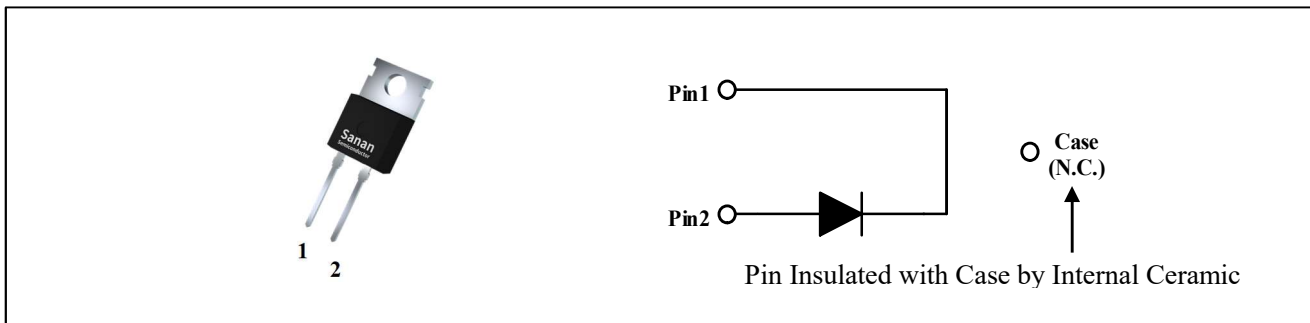


图 2 三安内绝缘封装器件封装引脚图

一、1.5 匹满载工况内绝缘封装特性对比测试

为更好地量化分析新型内绝缘封装相较于传统铁封器件在空调应用系统中的温升优化，实验对上述两种不同封装形式的器件分别在 1.5 匹空调系统中进行了满载测试。其中铁封器件同样选择来自三安半导体的 SDS065J012C3，二者的区别仅为封装形式的不同，铁封器件因其金属背板与漏极电气相通，故在实际使用中需要在器件与散热片之间加入垫片进行绝缘以及辅助散热。同时为对比 SiC SBD 相较于传统 Si FRD 的性能优势，实验也选用两款主流的 Si FRD 竞品作为横向测评对象。对参与横向测评的待测二极管的关键信息总结如表 1 所示。



表 1 内绝缘封装特性测试所用待测器件关键参数对比

Device	BYC*	VS*	SDS065J012N3	SDS065J012C3
Manufacturer	Comp.W	Comp.V	Sanan	
Category	Si FRD		SiC SBD	
Parameter	600V/30A		650V/12A	
Package	Fully Molded by Epoxy Resin		Insulated with Case by Ceramic	Non-insulated with Case

实验通过调整空调系统的关键参数，控制变量统一并让系统保持在满载功率段运行。分别监测系统 PFC 端输入功率值、器件的实时温度值以及器件的工作波形，计算不同功率时所对应的器件温升值，最终绘制器件的温升与 PFC 端输入功率的特性曲线如图 3 所示。

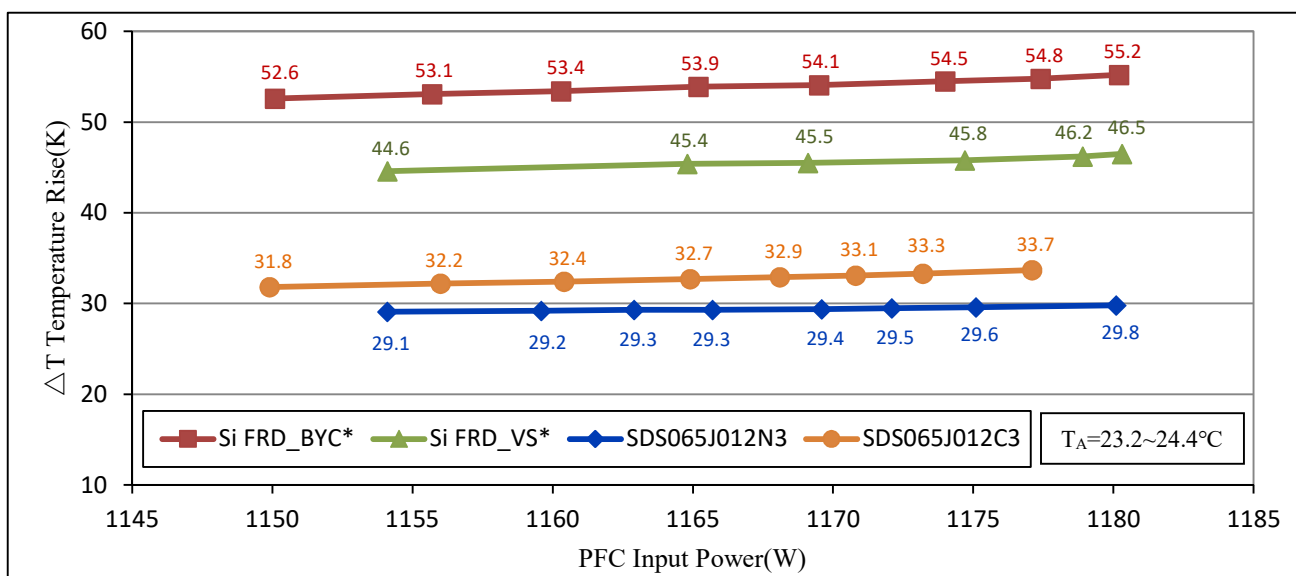


图 3 满载功率段不同二极管的温升曲线对比

结合图 3 分析器件的温升机理可知，随着处理功率的增加，待测二极管的温升均呈现上升趋势。而该温升来源于其工作损耗，二极管损耗的分布主要包含导通损耗以及反向恢复损耗，并且该器件的热阻决定了器件内部热量能够传导到器件表面的热传导能力，此外，器件背板有无绝缘导热垫片也将直接影响器件的温升情况。相比于传统铁封形式的 SDS065J012C3，新型内绝缘封装器件 SDS065J012N3 在该功率段实测温度更低，满载工况下两者温差超过 4°C。因其背面金属基板已做绝缘处理，因此与散热片的装配无需再额外增加绝缘垫片，由此可进一步减小器件到散热片的热阻，增强器件的散热能力以及降低系统成本。

对比图 3 中 Si FRD 器件可知，Si FRD 器件因其具有更高的导通压降和较大的反向恢复损耗，因此在实际系统工作中的温度更高，全塑封形式的器件封装虽然可以直接与散热片进行固定，但由于其封装热阻较高，导致器件散热较差。如图 4 所示为满载输入功率 1180W 时，SDS065J012N3 内绝缘器件与图 3 两款 Si FRD 全塑封器件的热成像图对比。SDS065J012N3 因其更低的导通压降，使得产生的导通损耗更低。此外，SiC SBD 的固有零反向恢复特性，也使



得其在高速开关过程中所引入的反向恢复损耗更低。加上该器件内绝缘封装的良好散热特性，由此使得器件在实际工作系统中的整体温升能够得到很好的控制，实测器件塑封体上表面仅为 54.1℃，很好地满足系统的散热需求，从而有效地降低了系统热管理的成本。

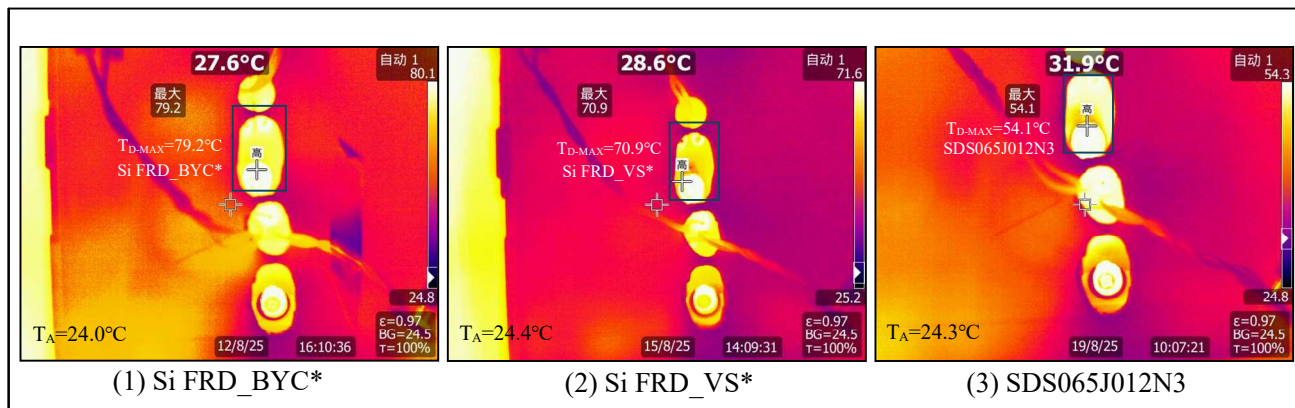


图 4 满载功率 1180W 时不同二极管的热成像对比

二、1-1.5 匹满载工况 SiC SBD 横向对比测试

针对市场 1-1.5 匹工况的器件应用需求，为更全面地评估三安内绝缘 SiC SBD 相比友商竞品在实际空调系统的应用性能表现，实验共选取了 5 款待测二极管器件用于做横向评估。对参与横向测评的待测二极管关键信息总结如表 2 所示。其中 BYC*和 VS*器件为当前 1.5 匹空调市场占有率较高的 600V/30A Si FRD 产品，其封装形式均为全塑封封装。WN*器件则为 1.5 匹空调市场所对应的主流 650V/12A SiC SBD 内绝缘竞品。SDS065J012N3 为三安推出的第三代 650V/12A SiC SBD 内绝缘产品，该产品相较于同规格竞品具有更低的导通压降 V_F 、更低的热阻 $R_{th(j-c)}$ 以及更高的浪涌电流 I_{FSM} 等特性，由此器件能够在实际工作中获得更优异温升性能和抗浪涌特性，适用于 1.5 匹空调应用场景。SDS065J010N4 则为第四代 650V/10A SiC SBD 内绝缘产品，对比同规格竞品，该产品超低的导通压降极大优化了导通损耗，降低了器件的总体损耗，从本质上改善了器件的温升，适用于 1 匹空调应用场景。

表 2 1-1.5 匹空调测试所用待测二极管关键参数对比

Device	BYC*	VS*	WN*	SDS065J012N3	SDS065J010N4
Manufacturer	Comp.W	Comp.V	Comp.W	Sanan	
Category	Si FRD		SiC SBD		
Parameter	600V30A		650V12A		650V10A
Package	Fully Molded by Epoxy Resin		Insulated with Case by Ceramic		

实验严格控制系统的变量统一，让待测器件均工作在满载功率段，分别使用功率分析仪实时监测系统的 PFC 端输入功率，使用热成像仪监控器件的温度，使用示波器监测器件的工作波形。实验所选用的待测器件背板均为绝缘状态，无需额外增加绝缘垫片即可与散热片进行固定连接，测试过程中记录不同功率时所对应的器件温升并总结如图 5 所示。



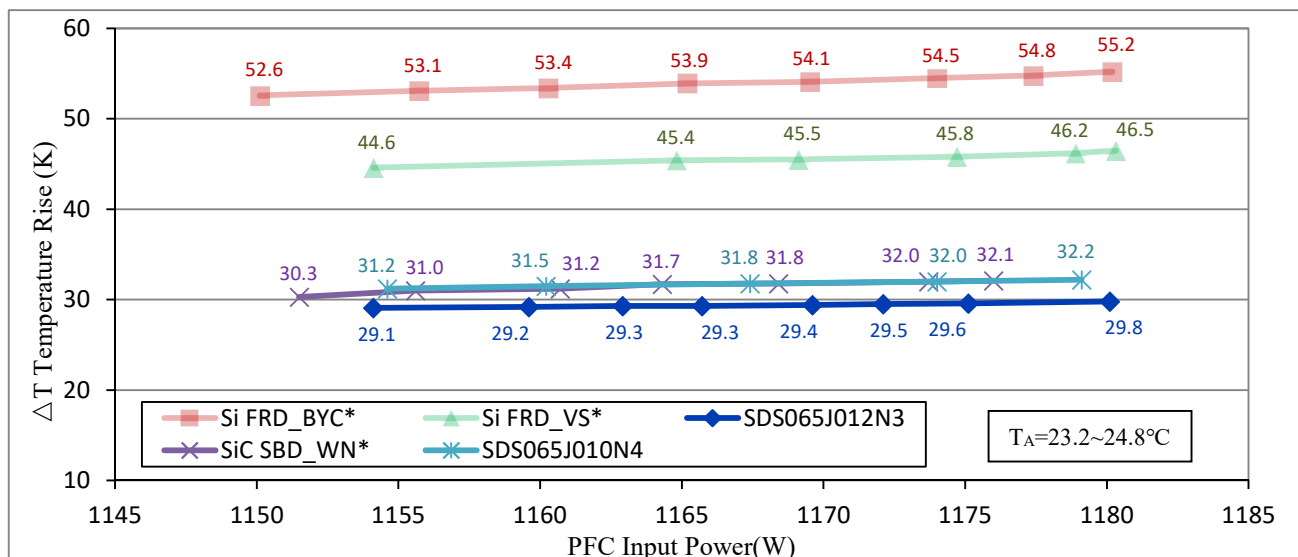


图 5 满载功率段不同二极管的温升曲线对比

从图 5 测试结果分析可知, SiC SBD 的温升均明显低于 Si FRD。对于同规格 650V/12A 的 SiC SBD 横向测评中, 三安半导体 SDS065J012N3 的温升表现要明显优于友商产品 WN*器件。分析导致温升差异的原因, 主要来自于三安 SDS065J012N3 更小的压降 V_F 以及更低的封装热阻 $R_{th(j-c)}$, 由此使得该器件的工作损耗进一步降低, 最终表现出良好的温升特性。此外, 实验对 SDS065J010N4 器件进行了同等功率曲线测试, 因其具有的低压降和低热阻特性, 最终实测温升与友商竞品 650V/12A WN*器件相当, 能够很好地满足目标 1 匹功率应用场合。

对于空调电源 Boost PFC 应用工况, 该拓扑电路的主动开关管同样决定着系统的性能表现, 同时不同的升压二极管对于 IGBT 的影响也不一样。在系统满载工况的测试过程中, 针对不同待测二极管的测试环节, 同样监测并记录了 Boost PFC 中开关管 IGBT 的温升表现和工作波形。满载下将表 2 的 5 组器件对应的 IGBT 温升曲线进行了记录并绘制总结如图 6 所示。

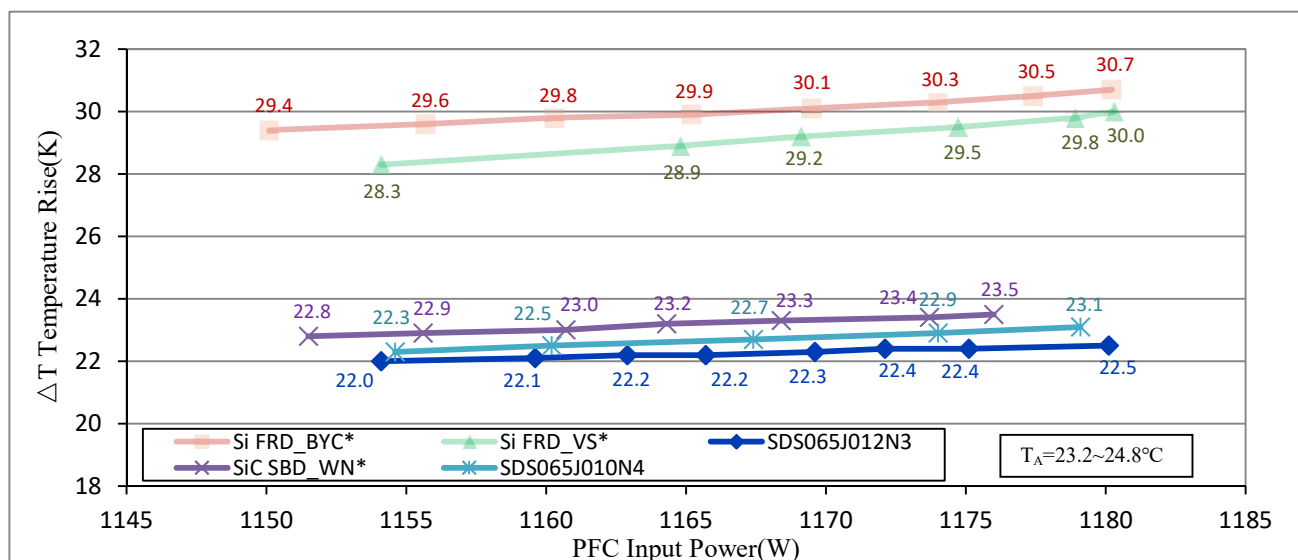


图 6 满载功率段不同二极管方案对应的 IGBT 温升曲线对比



结合 Boost PFC 电路特点对主动开关管的损耗进行分析，该损耗一部分来自开关管自身的导通损耗和开关损耗，另一部分则来自电路中续流二极管的反向恢复损耗。在主动开关管导通的瞬间，二极管由原先的续流状态切换至反向截止状态，在这过程中的反向恢复电流将影响 IGBT 的开通过程，从而使其温升增加，并且该温升随着 PFC 处理功率的增加而变大。此外，由于测试系统中二极管与 IGBT 布局紧凑且共用散热片，因此两者热量的扩散途径存在耦合影响，IGBT 的温升也将受到二极管温升影响。分析图 6 数据可知，两款 Si FRD 因其存在较大的反向恢复电流，使得 IGBT 在导通瞬间的损耗增大，并且 IGBT 的温度也受到了 Si FRD 的热耦合影响，实测 Si FRD 方案的温升数值均比 SiC SBD 方案更大。横向对比 650V/12A SiC SBD，主动开关管 IGBT 的温升同样由开关管工作损耗、二极管的反向恢复损耗以及二极管工作时的热耦合三个因素共同影响，实测 SDS065J012N3 方案的 IGBT 实测温升表现同比竞品 WN* 方案更优，满载功率 IGBT 温升仅为 22.5K。此外，SDS065J010N4 器件凭借优异的器件特性，该器件的导通损耗和反向恢复损耗得到有效降低，由此可以减小二极管工作时对 IGBT 的热耦合影响以及叠加到 IGBT 的反向恢复影响，实测该方案满载功率 IGBT 温升也仅为 23.1K，表现同样优于竞品方案，接近于三安 SDS065J012N3 方案。

三、总结

三安半导体 SiC 基方案凭借优异的器件特性，很好地缓解了系统的散热问题，助力空调系统进一步突破能效瓶颈，同时符合未来功率电源的小型化和低成本的发展趋势。三安半导体通过不断地技术迭代，深耕研发 SiC 功率器件，后续更多优异的 SiC 产品将陆续推出，从而满足客户的各类应用需求，由此稳步提升其 SiC 产品在对应空调制造商的应用渗透率，最终将助力并推动空调市场领域完成大规模应用 SiC 的技术转型。

