超一级能效 3 匹空调三安 SiC 器件损耗量化研究

损耗的“减法”与能效的“加法”

AN2026-D01 应用文档



作者：三安半导体 高级应用工程师 张建山、牛琪辉、游春林

审阅：姚晨

在双碳战略与行业高能效标准的双重驱动下，暖通空调系统的能效升级成为了产业的核心发展命题。传统空调电源拓扑普遍采用硅基开关管和硅基二极管作为电源的功率核心器件，受限于硅材料固有物理极限，硅基功率器件损耗显著，难以支撑空调达到超一级能效指标。在此行业背景下，第三代半导体 SiC 功率器件凭借其独有的高温、高频、高压等耐受特性，为空调电源实现损耗降级、能效跃迁提供全新技术路线，由此受到行业的深度关注与应用探索。

相较于传统 Si 基空调电源方案，SiC 技术的导入带来了许多成本的优化，核心优势如下：

1. 热管理系统成本缩减：SiC 空调电源方案能够显著降低功率器件的工作损耗，抑制器件温升，从而缩减散热片基板、风扇等辅助冷却部件的尺寸，有效降低热管理的成本；
2. 系统小型化和材料节省：SiC 系统方案的高频化设计能够大幅压缩电感、电容等无源元件体积，最终 PCB 布局将更为紧凑，电路板的集成度更高，有效降低了制造成本；
3. 整机运行能耗成本优化：依托 SiC 器件的优异开关特性，空调系统的能量损耗得到大幅削减，由此有效抬升空调全年运行能效比，最终减少终端用户的长期用电能耗支出；
4. 降低故障率与维护成本：SiC 的高温性能稳定性，可缓解功率回路因热应力累积引发的器件失效风险，从而降低系统故障率，延长空调的使用寿命，减少维护成本的开支。

系统中功率器件的工作损耗是决定系统效率以及空调能效的关键影响因素，本文从能量损耗角度入手，搭建双脉冲动态测试系统并进行横向测评。针对市场 3 匹空调机型，选择该机型适配的三安产品器件分别为 650V/20A SiC SBD 和 650V/65mΩ SiC MOS 作为待测器件（该全 SiC 器件组合具有成本优势，器件的开关性能可满足 3P 空调的输出功率能力，针对整机浪涌以及温升情况，视电控板中所设计的浪涌控制和吸收回路以及系统散热情况有所差异，客户可结合电控板的实际应用设计情况进行选型确认），对应竞品规格选型为 600V/60A Si FRD、650V/20A SiC SBD 以及 650V/50A Si IGBT。选取 3 匹空调满载工况对应的开关电压电流节点 360V/25A 并进行双脉冲动态特性测试。针对器件的不同结温工况，对 SiC 基和 Si 基方案进行横向测评，结合实测数据分析并阐述 SiC 基方案在空调应用中相对 Si 基方案的优异性能表现。

双脉冲实验平台选取电感的感值为 200μH，采用待测开关管和续流二极管器件的组合形式，

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

实验测试条件如表 1 所示。待测 SiC SBD 器件来自三安自主研发的 SDS065J020W4，该器件具有零反向恢复电流、低正向压降、高耐温等优异性能。如图 1 所示，器件采用 TO-3PF-3L 的封装形式，全塑封的器件封装形式使其在安装过程中无需再考虑绝缘垫片的额外安装；环氧树脂的全包覆使得该器件的绝缘耐压更高、防潮防污更强；相比于铁封器件的金属外壳与阴极连接，全塑封的外壳浮空加绝缘形式，将使得器件装配时的寄生电容得到有效降低。待测 SiC MOS 器件为 AMS0650065M2，同样来自三安半导体，该器件满足 AEC-Q101 标准，器件具有导通电阻低、寄生电容小、开关损耗小等优异特性，能够有效提升系统的可靠性和工作效率。如图 2 所示为该器件采用的 TO-247-4LB 封装，开尔文源极的引脚设计更有利于避免高频高压工作时功率回路对驱动回路的耦合干扰；细管脚的封装设计可以降低引脚之间的互感耦合噪声，同时降低驱动回路寄生电感；此外，粗细引脚的辨识度更高，有利于批量焊接良率的提高。

表 1 双脉冲测试条件和待测器件组合一览表

Groups	Switching Device Si IGBT/SiC MOS	Diode Si FRD/SiC SBD	Driver vol. DRV_V_{GS}	Driver res. R_{Gon}/R_{Goff}	RR Test T_j conditon	DPT Test T_j conditon
Group.1 Full Si	Si IGBT (650V/50A)	Si FRD (600V/60A)	15V/0V	62Ω/30Ω	T_j=25℃, 65℃, 100℃, 135℃, 175℃	T_j=25℃, 100℃,175℃
Group.2 Comp. Hybrid		Comp.SiC SBD (650V/20A)				——
Group.3 SA Hybrid		SDS065J020W4 (650V/20A)				T_j=25℃, 100℃,175℃
Group.4 Full SiC	AMS0650065M2 (650V/65mΩ)	SDS065J020W4 (650V/20A)	18V/-4V	10Ω/2Ω	——	T_j=25℃, 100℃,175℃

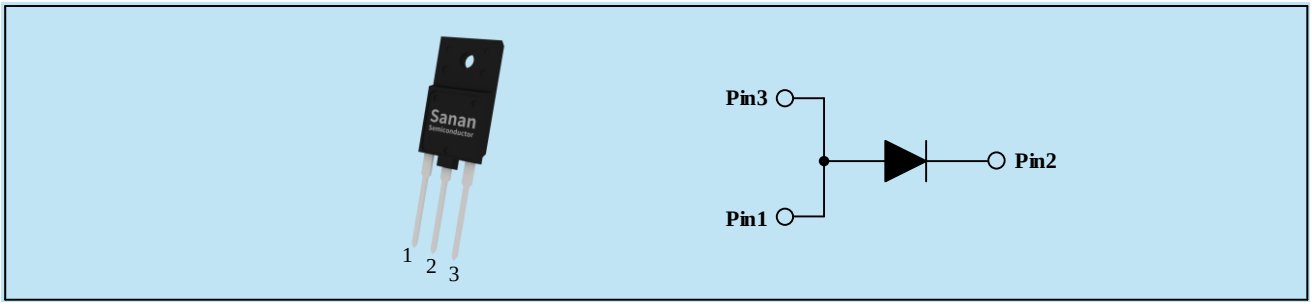


图 1 650V/20A SiC SBD SDS065J020W4

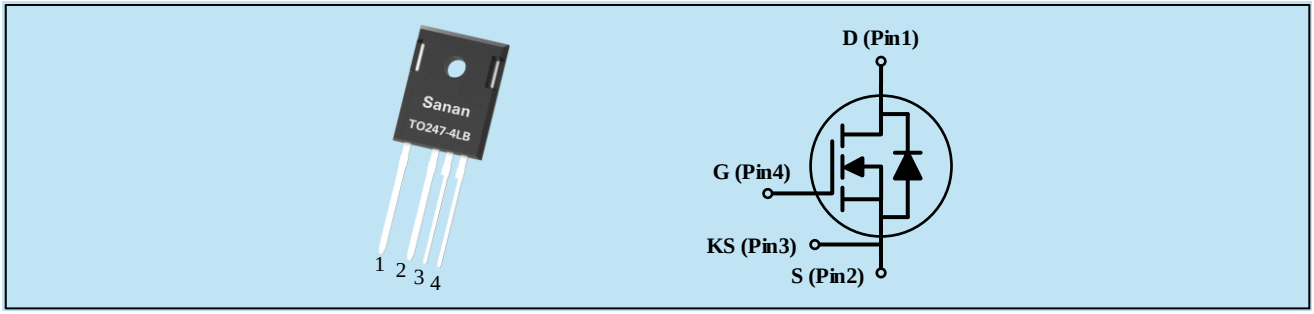


图 2 650V/65mΩ SiC MOS AMS0650065M2

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.
http://www.sanan-semiconductor.com

一、二极管反向恢复性能对比

为研究 Si FRD 和 SiC SBD 在开关过程中的反向恢复性能差异，实验选用表 1 的组合 1 至组合 3 进行对比测试，控制测试变量仅为续流二极管的类别，其余测试条件均相同。分别在 25℃、65℃、100℃、135℃、175℃五个结温条件下进行反向恢复性能测试，测试结果如表 2 所示，对不同结温下 Si FRD 和 SiC SBD 的反向恢复能量总结成柱状图如图 3 所示。

表 2 Si FRD 对比 SiC SBD 反向恢复特性量化分析

Parameter		Recovery Energy	Recovery Time	Recovery Charge	Recovery Current
Symbol		E_{rr}	T_{rr}	Q_{rr}	I_{rrm}
T_j=25℃	IGBT+Si FRD	17.0	42.8	0.32	14.0
	IGBT+Comp.SiC SBD	1.24	16.3	0.04	4.25
	IGBT+SDS065J020W4	1.15	16.4	0.04	4.05
T_j=65℃	IGBT+Si FRD	49.0	65.9	0.63	19.0
	IGBT+Comp.SiC SBD	1.52	17.7	0.04	4.57
	IGBT+SDS065J020W4	1.45	17.5	0.04	4.27
T_j=100℃	IGBT+Si FRD	85.0	79.5	1.00	24.0
	IGBT+Comp.SiC SBD	1.66	18.8	0.04	4.50
	IGBT+SDS065J020W4	1.46	18.6	0.04	4.69
T_j=135℃	IGBT+Si FRD	139.0	92.9	1.50	28.0
	IGBT+Comp.SiC SBD	1.75	20.0	0.04	4.58
	IGBT+SDS065J020W4	1.46	16.8	0.03	4.10
T_j=175℃	IGBT+Si FRD	239.0	115.7	2.26	34.0
	IGBT+Comp.SiC SBD	1.75	18.5	0.05	4.56
	IGBT+SDS065J020W4	1.45	18.4	0.04	4.38
unit		μJ	ns	μC	A

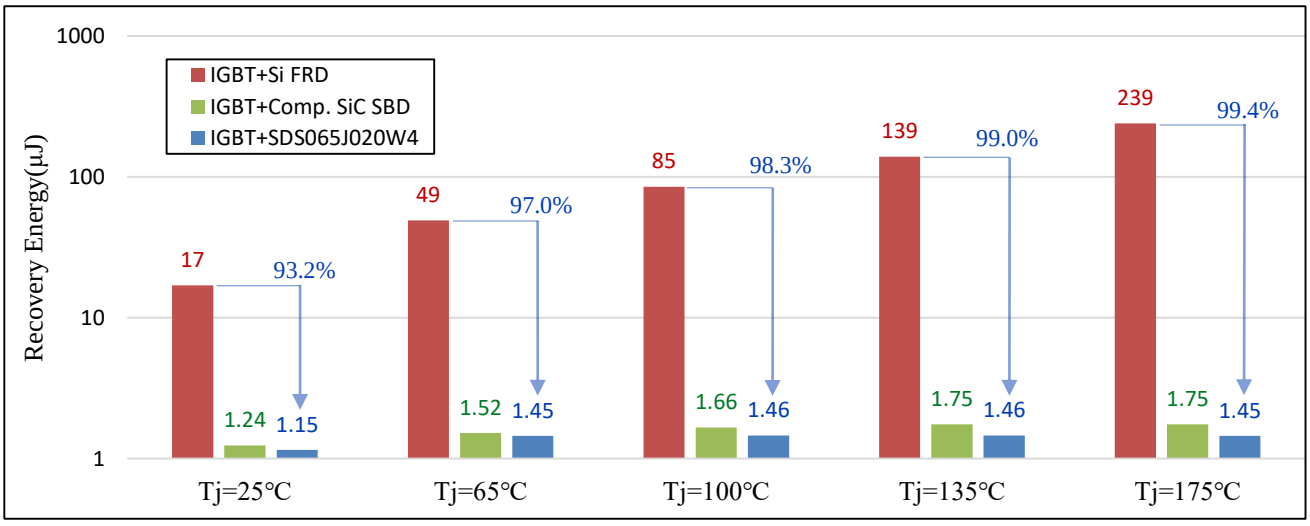


图 3 不同结温条件下 Si FRD 对比 SiC SBD 反向恢复能量损耗图

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.
http://www.sanan-semiconductor.com

由表 2 和图 3 分析可知，本次测试选取能够影响反向恢复的关键核心指标如反向恢复损耗、反向恢复时间、反向恢复电荷和反向恢复电流，以该类指标去作为评判器件反向恢复性能的重要依据。相比于传统 Si FRD 方案而言，SiC SBD 在电路的工作过程中所展现的反向恢复性能均获得了大幅提升。而三安凭借自身优异的器件特性，在反向恢复测试中的性能表现优于同规格竞品 SiC SBD。为分析器件在不同温度下的工作表现，实验模拟了不同的结温条件，分别对比量测了从常温 25℃到高温 175℃下器件的反向恢复特性。以图 3 所展示的二极管反向恢复损耗趋势为例，在常温 25℃条件下，Si FRD 的反向恢复损耗为 17μJ，而三安 SiC SBD 仅为 1.15μJ，该损耗仅为 Si FRD 的 6.8%。随着二极管工作结温的抬升，二者所表现出的反向恢复差距不断被放大。在高温 175℃条件下，Si FRD 的反向恢复损耗达到了 239μJ，而三安 SiC SBD 的反向恢复损耗受温度影响十分微弱，在该高温条件下数值仅为 1.45μJ。

为更深入分析不同温度条件下二极管的反向恢复特性，实验分别量测了 Si FRD 和三安 SiC SBD 器件在常温 25℃和高温 175℃的反向恢复关键时域波形，具体波形对比如图 4 所示。

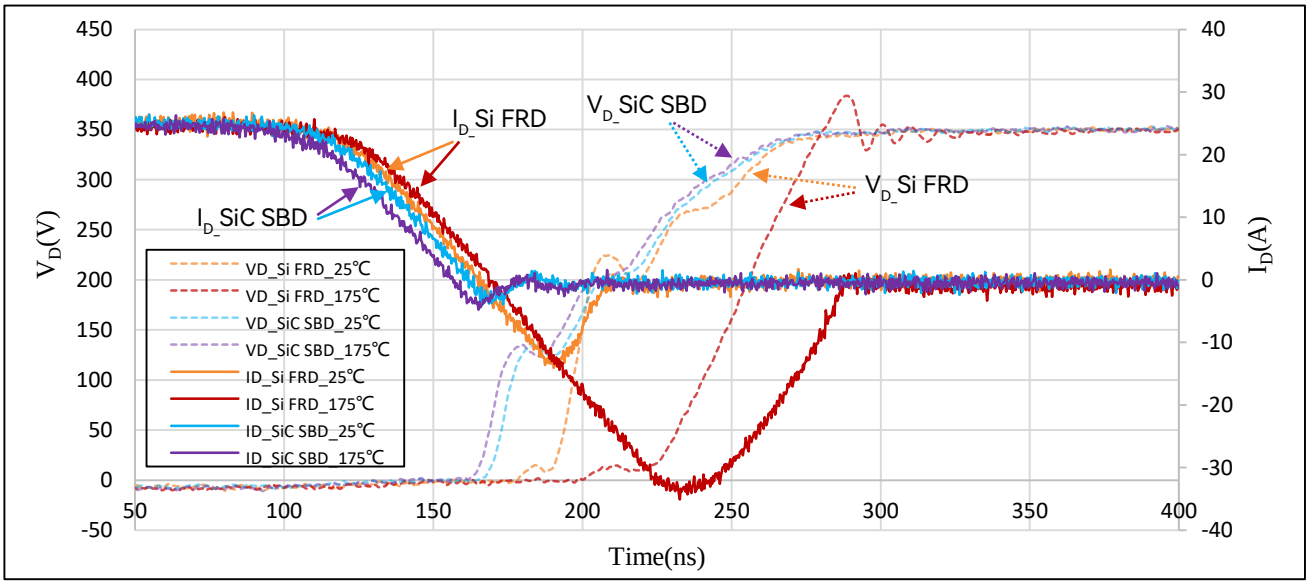


图 4 不同结温条件下 Si FRD 对比 SiC SBD 反向恢复特性波形细节

结合器件工作机理分析可知，Si FRD 器件的反向恢复主要来源于 PN 结内储存的少数载流子。该器件反向恢复对温度的敏感度极高，高温将导致反向恢复特性变差，具体表现在：当温度升高，载流子寿命显著变长，高温下多余少子更难复合，导致漂移区留存的电荷变多；高温本征激发加剧，额外产生大量的本征载流子，从而进一步加大漂移区储存电荷量；此外，高温条件将使得载流子的迁移率下降，载流子的复合速度变慢。而 SiC SBD 依靠多数载流子导电，导通期间几乎不存在少数载流子注入，PN 结的少子储存效应完全消失，因此 SiC SBD 并没有由少子引起的反向恢复电荷 Q_{rr}，实验所测 E_{rr}、T_{rr}、Q_{rr}、I_{rr} 参数为器件关断时器件的结电容充放电导致，并非传统意义的反向恢复。此外，SiC SBD 结电容随温度的变化幅度非常微弱；SiC 材料的禁带宽度大，高温所导致的本征激发影响基本可以忽略，几乎不会产生额外载流子；高

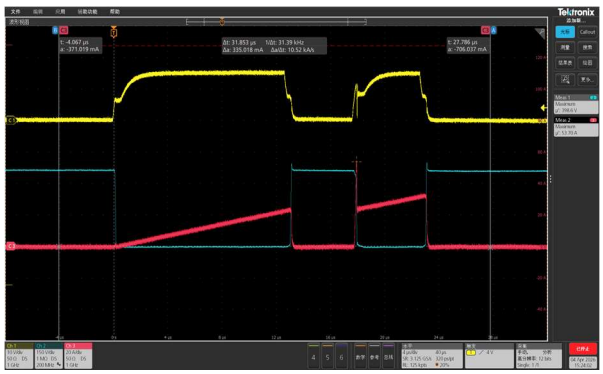
Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.
http://www.sanan-semiconductor.com

温条件下其漂移区也不会新增多余电荷，由此使得其 Q_{rr} 基本不变。综上，在开关波形图上，对于 Si FRD，其电压和电流将产生更大的交叠，并且随着温度的上升，其交叠的面积将呈现快速增大的趋势，对应反向恢复损耗将剧烈增大。相比之下，SiC SBD 的反向恢复受温度影响十分微弱，在高温条件下其交叠仅略微增加，对应反向恢复损耗略微增大。

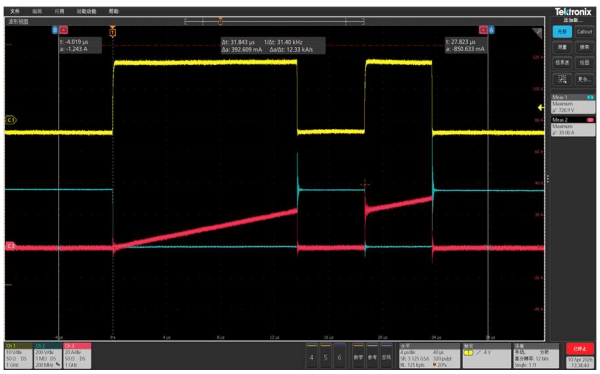
针对目前 3 匹以内的空调电源，主流的 AC-DC 方案仍然是传统有源 Boost PFC。三安凭借性能优异且具备批量应用业绩的 SiC SBD 产业优势，器件已经广泛应用于空调行业。用 SiC SBD 去代替传统的 Si FRD，不仅可以获得更低的开关管损耗和更高的效率，从而减少空调散热器尺寸和成本；还可以拥有更高的开关频率，从而减小无源元件的体积，提高系统的功率密度；并且可以得到更好的开关波形质量，提升系统的 EMI 性能等等。

二、主动开关器件性能对比

为进一步研究 Si IGBT 和 SiC MOS 在开关过程中的性能差异，实验选用表 1 的组合 3 和组合 4 进行对比测试。关于栅极驱动参数的选择，由于 IGBT 关断时存在拖尾电流，导致其开关速度受到了限制，在此实验方案组合 3 开关电阻分别选择 62Ω/30Ω，驱动电压为 15V/0V。SiC MOS 凭借其低寄生电容等特性，开关动作更快，为了充分发挥其高速开关的能力，通常量测所用的 SiC MOS 的驱动电阻被配置在 10Ω 以内的量级。这里实验方案组合 4 开关电阻分别选择 10Ω/2Ω，驱动电压为 18V/-4V。所用栅极驱动器相同，所用续流二极管均为三安半导体的 650V/20A SiC SBD SDS065J020W4。如图 5 所示为开关条件 360V/25A、待测器件结温 175℃时，开关管的测试波形（通道 1 为栅极电压，通道 2 为漏源极电压，通道 3 为开关管电流）。



Si IGBT 双脉冲开关波形



SiC MOS 双脉冲开关波形

图 5 Si IGBT 和 SiC MOS 的双脉冲开关波形对比(T_j=175℃)

由波形图分析可知，在相同的电压电流工况条件下，由于 Si IGBT 的寄生电容比 SiC MOS 大得多，其中，更大的米勒电容导致了开关过程中更长的米勒平台，如此将进一步延缓 Si IGBT 的开启和关断时间，实测在高温 175℃条件下 Si IGBT 的 T_{on} 和 T_{off} 时间达到了 296ns/496ns。对于相同电压电流应力工况，较长的开关时间必将导致其电压电流的交叠面积更大。于此同时，

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

Si IGBT 的关断拖尾电流也将影响器件的开关损耗，并且拖尾电流会伴随结温的升高而增大，最终导致损耗的增加和器件温度的加速上升。相比前者，SiC MOS 因其自身更低的寄生电容参数，该器件能够更快地完成开关动作，实测高温 175℃下其 T_{on} 和 T_{off} 时间仅为 31ns/22ns，其开关电压电流的交叠面积大幅缩小，并且 SiC MOS 为单极型器件，关断过程无拖尾电流，综上分析可知 SiC MOS 的整体开关损耗将远小于 Si IGBT 器件。

随着开关电源系统的优化迭代和工作频率的不断提升，功率器件的开关损耗逐渐成为系统损耗中的主要贡献部分。针对 3 匹空调应用工况，为更好地定量分析 Si IGBT 与 SiC MOS 在对应电压电流应力下的动态开关特性，实验选取表 1 的组合 3(650V/50A IGBT + SDS065J020W4)和组合 4(AMS0650065M2 + SDS065J020W4)分别在 360V/25A 的极限电压电流工况点进行对照测试。考虑室外温度对器件结温的影响，分别记录结温在 25℃、100℃、175℃下对应的 T_{off}、E_{off}、T_{on}、E_{on}、E_{sw} 等关键指标数据，具体测试结果如表 3 所示，对表格中的开关损耗数据进一步整理并形成损耗柱形图对比如图 6 所示。

表 3 Si IGBT 对比 SiC MOS 开关特性量化分析

Parameter		Turn-off Time	Turn-off Loss	Turn-on Time	Turn-on Loss	Switching Loss
Symbol		T_{off}	E_{off}	T_{on}	E_{on}	E_{sw}
T_j=25℃	IGBT+SDS065J020W4	449	349	310	599	948
	AMS0650065M2+SDS065J020W4	19	8	37	93	101
T_j=100℃	IGBT+SDS065J020W4	465	410	303	662	1072
	AMS0650065M2+SDS065J020W4	20	9	34	85	94
T_j=175℃	IGBT+SDS065J020W4	496	591	296	755	1346
	AMS0650065M2+SDS065J020W4	22	10	31	75	85
unit		ns	μJ	ns	μJ	μJ

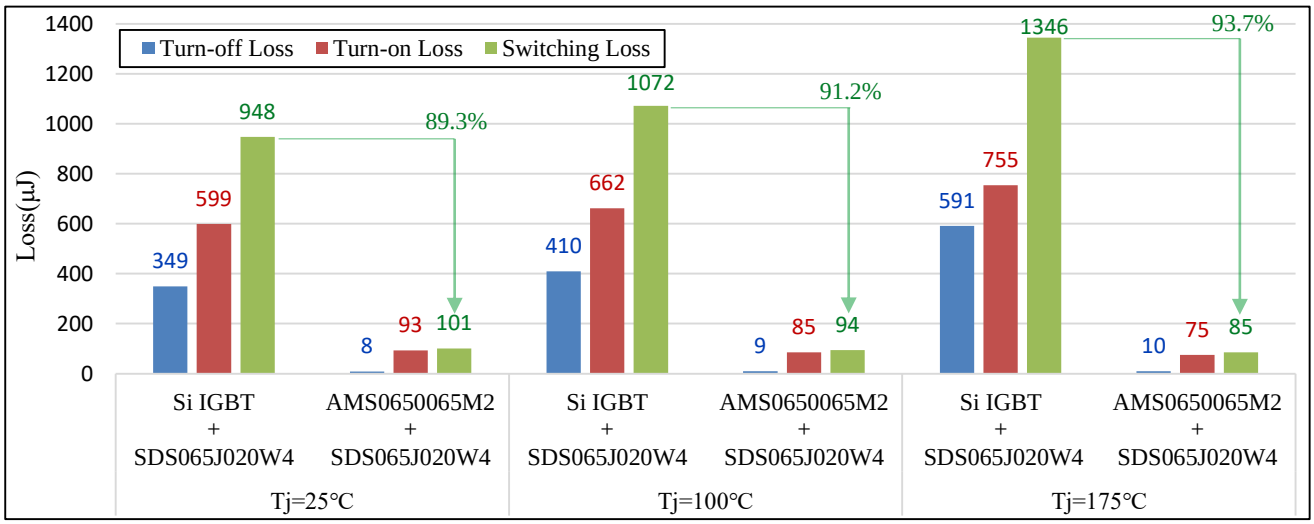


图 6 不同结温条件下 Si IGBT 对比 SiC MOS 开关损耗图

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

结合表 3 和图 6 数据分析其动态开关特性，无论是开关时间还是开关损耗，SiC MOS 的表现均显著优于 Si IGBT。伴随器件结温的升高，Si IGBT 的开关损耗不断加剧，在极限结温 175℃条件下，Si IGBT 的开关损耗达到了 1346μJ，SiC MOS 仅为 85μJ，相比前者大幅降低了 93.7%。

即使在高温工况下，SiC MOS 的开关损耗也仅仅呈现了微弱的变化：其中，开通损耗表现为小幅减小，于此同时，关断损耗表现为略微增加。结合器件工作机理分析温升对器件的开关损耗的主要影响机制如下：结温升高会使得器件的阈值电压轻微下降，此因素会倾向于让器件更容易导通，有利于降低器件的开通损耗；结温升高会导致 SiC 材料的电子迁移率下降，同时器件内部寄生电容略微增大，沟道载流子移动速度变慢，米勒平台的时间被拉长，导致开关损耗增加。而对于 Si IGBT 损耗机理，除了上述影响机制，还需考虑到 Si IGBT 为少子器件，当结温升高后少子寿命增加，关断拖尾电流显著增大，最终导致关断损耗大幅上升。

综上可见，SiC MOS 的引入将极大程度改善器件的开关损耗问题，从而进一步有效优化器件的散热方式和系统的热管理方案。对于空调应用领域，高频化、小型化和高能效是目前业界的主流发展趋势，在后续空调电源技术方案的发展迭代中，SiC MOS 的开关性能优势将愈加显现，所处的功率应用地位也将继续不断提升。

三、全 SiC 器件 PFC 优势分析

为综合对比 Si 基组合方案和 SiC 基组合方案的量化差异，实验选用表 1 的组合 1(650V/50A IGBT + 600V/60A Si FRD)和组合 4(AMS0650065M2 + SDS065J020W4)进行了对比测试，其中栅极驱动器为相同型号，同样考虑 Si IGBT 和 SiC MOS 器件开关特性不同，为其选择对应相匹配的驱动参数。对于 Si 基方案，驱动电阻选用 62Ω/30Ω，驱动电压为 15V/0V，对于 SiC 基方案，驱动电阻选用 10Ω/2Ω，驱动电压为 18V/-4V。实验同样在 360V/25A 的极限应力工况下进行对照测试，选取 3 种典型器件结温（25℃、100℃、175℃）进行动态特性数据记录，测试结果如表 4 所示,对各结温工况下的损耗数据进行分析对比并形成损耗柱形图如图 7 所示。

表 4 Si 基方案对比 SiC 基方案开关特性量化分析

Parameter		Turn-off Time	Turn-off Loss	Turn-on Time	Turn-on Loss	Switching Loss	Recovery Energy	Recovery Time	Total Loss
Symbol		T_{off}	E_{off}	T_{on}	E_{on}	E_{sw}	E_{rr}	T_{rr}	E_{total}
T_j=25℃	IGBT+Si FRD	448	365	270	706	1071	17	43	1088
	AMS0650065M2+ SDS065J020W4	19	8	37	93	101	8	10	109
T_j=100℃	IGBT+Si FRD	467	439	276	1056	1495	85	79	1580
	AMS0650065M2+ SDS065J020W4	20	9	34	85	94	8	10	102
T_j=175℃	IGBT+Si FRD	499	610	295	1675	2285	239	116	2524
	AMS0650065M2+ SDS065J020W4	22	10	31	75	85	8	10	93
unit		ns	μJ	ns	μJ	μJ	μJ	ns	μJ

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

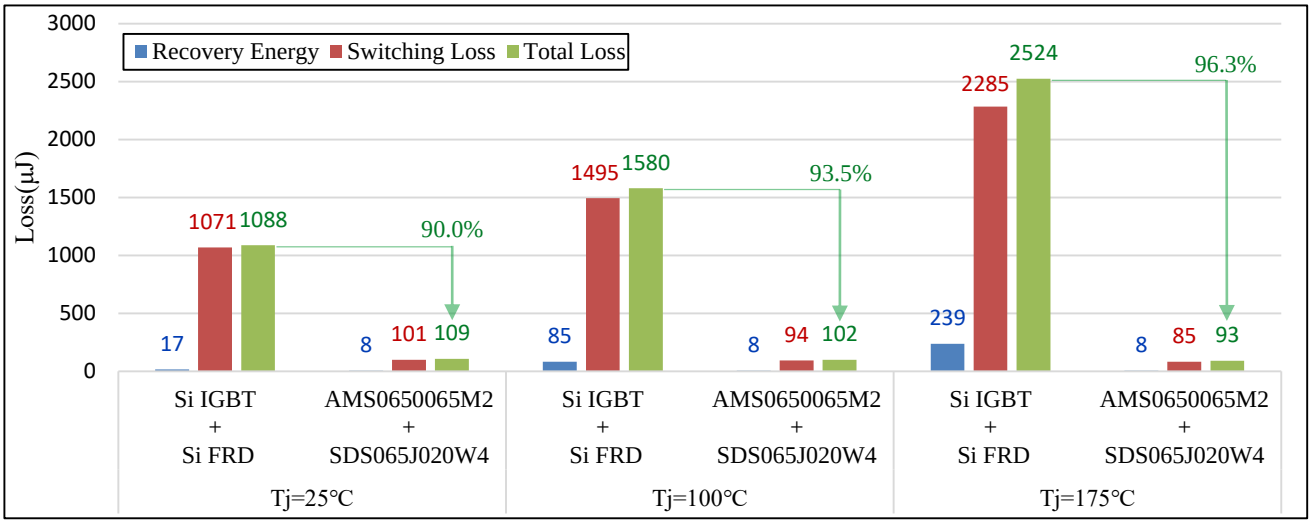


图 7 Si 基方案对比 SiC 基方案开关特性损耗对比

根据表 4 和图 7 的数据结果分析可知，在结温 100°C条件下，Si IGBT 器件的总体损耗已经达到 1580μJ，而 SiC MOS 仅为 102μJ，其损耗仅为前者的 6.5%。而在极限结温 175°C条件下，Si IGBT 的开关损耗更是达到了 2524μJ，SiC MOS 仅为 93μJ，相比前者大幅降低了 96.3%。

相比于 Si 基方案，SiC MOS 具有更快的开关动作，更快的电压电流切换速度使得开关时的电压电流交叠更小，由此大幅降低了器件的开关损耗。得益于优异的器件特性，SiC SBD 拥有极低的反向恢复时间，所对应的反向恢复损耗也远低于 Si FRD。并且结合前面损耗影响机制的分析可知，SiC 方案的反向恢复损耗和开关损耗受高温的影响程度均明显小于 Si 基方案，由此可见 SiC SBD 和 SiC MOS 极强的高温鲁棒性，更适用于户外高温应用场景。

四、总结

SiC 基方案凭借更低的动态损耗，很好地缓解了器件的散热问题。针对高功率等级变频空调电源场景，在满足器件散热的条件下，系统和器件的工作频率可得到显著提升。并且依托高频化的设计优势，对应的功率电源能够缩减电感、电容等无源器件的物理尺寸，从而降低整机物料成本，契合下一代功率变换器小型化、高效率、低成本的行业发展方向。

得益于 SiC 技术的突出优势，SiC SBD 和 SiC MOS 产品在空调市场领域的需求量将越来越大。三安半导体在 SiC 功率器件的技术革新上深耕研发，通过不断迭代优化器件性能，致力于提供满足客户各类需求的优质产品，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。

Sanan Semiconductor Co., Ltd. All rights reserved, also regarding any disposal, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.
http://www.sanan-semiconductor.com