

三安 SiC 器件助力空调实现超一级能效

更低损、更降本、更高效

AN2025-D03 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

在空调市场领域，空调的内部电源同样需要有一系列的电能处理和变换。主要的前级功能电路有 AC-DC 功率因数校正(PFC)电路，该电路用于处理交流电输入，提高电能利用率，并将其转换成高压直流电以供后级负载使用；后级为 DC-AC 逆变电路，该电路用于驱动空调系统压缩机的电机运转；辅助电源电路，用于给系统的控制芯片等零部件进行辅助供电，维持系统的正常运行。在空调电源的应用中，功率器件参与了重要的电能变换，仍然发挥着不可或缺的关键作用。

对于传统方案，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。随着国家在家用空调新能效标准的发布和实施，空调产品的能效提升更加受到制造商和消费者的重视。采用传统硅基器件去实现更高效率的途径变得越来越局限，于此同时，具有高温、高频、大功率、高压特性的第三代半导体碳化硅技术受到空调行业的高度关注。

SiC 功率器件的电气特性明显优于 Si，基于 SiC 的空调电源方案，其对应的系统质量更轻，体积更小，效率更高。对于空调电源，功率器件是其核心能量转换的单元，而功率器件在工作过程中产生的损耗分布主要集中在导通损耗和开关损耗。本文从能量损耗角度入手，实际搭建测试系统，针对市场 1.5 匹空调型号的电压电流规格，选择 1.5 匹机型适配的三安产品器件分别为 650V/10A SiC SBD 和 650V/65mΩ SiC MOS 作为待测器件，对应竞品规格选型为 600V/30A Si FRD 以及 650V/40A Si IGBT。通过实验手段，搭建经典的双脉冲测试系统，针对轻载到重载的情况分别选取 320V/3A、360V/7A、380V/11A 三个电压电流工作点对 SiC 基和 Si 基方案的开关管及二极管进行动态特性测试，收集对应的双脉冲动态开关数据，分析并阐述 SiC MOS 在空调应用中相对 Si IGBT 的优异性能表现。

双脉冲实验平台选取电感的感值为 300μH，采用待测开关管和续流二极管器件的组合形式，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 SDS065J010N3，如图 1 所示，该器件采用 TO-220N-2L 的封装形式，自带内绝缘的封装形式更容易进行装配和散热，并且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。待测 SiC MOS 器



件为 SMS0650065M，同样来自三安半导体，如图 2 所示采用 TO-247-4L 封装，开尔文源极 (Kelvin Source) 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。

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}	Test Condition.1	Test Condition.2	Test Condition.3
Group.1 Full Si	Si IGBT (650V/40A)	Si FRD (600V/30A)	15V/0V	82Ω/82Ω	V _{DC} =320V I _{DS} =3A	V _{DC} =360V I _{DS} =7A	V _{DC} =380V I _{DS} =11A
Group.2 SiC SBD	Si IGBT (650V/40A)	SDS065J010N3 (650V/10A)	15V/0V	82Ω/82Ω			
Group.3 Full SiC	SMS0650065M (650V/65mΩ)	SDS065J010N3 (650V/10A)	18V/-4V	10Ω/2Ω			

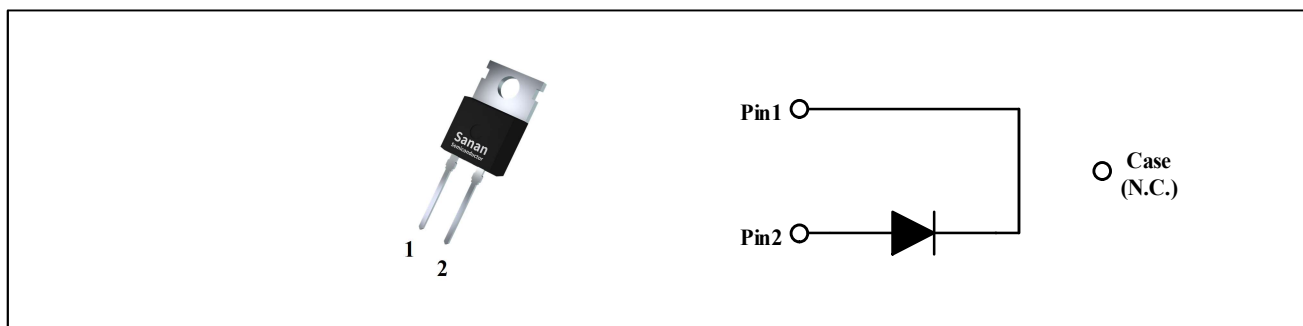


图 1 650V/10A SiC SBD SDS065J010N3



图 2 650V/65mΩ SiC MOS SMS0650065M

一、二极管反向恢复性能对比

为研究 Si FRD 和 SiC SBD 在开关过程中的性能差异，选用表 1 的组合 1 和组合 2 进行对比实验，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 320V/3A、360V/7A、380V/11A 三个工况点进行开关测试，测试结果如表 2 所示，取最大电流 380V/11A 工况进行波形展示如图 3 所示（通道 1 为栅极电压，通道 2 为二极管电压，通道 3 为二极管电流）。



表 2 Si FRD 对比 SiC SBD 反向恢复特性量化分析

Parameter	Sym bol	Test.1: $V_{DC}=320V$, $I_{DS}=3A$		Test.2: $V_{DC}=360V$, $I_{DS}=7A$		Test.3: $V_{DC}=380V$, $I_{DS}=11A$		unit
		Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	
Recovery Energy	E_{rr}	6.8	3.0	12.3	3.3	17.5	3.6	μJ
Recovery Time	T_{rr}	36	28	39	24	41	22	ns
Recovery Current	I_{rrm}	4.9	2.8	6.9	3.7	8.0	4.3	A

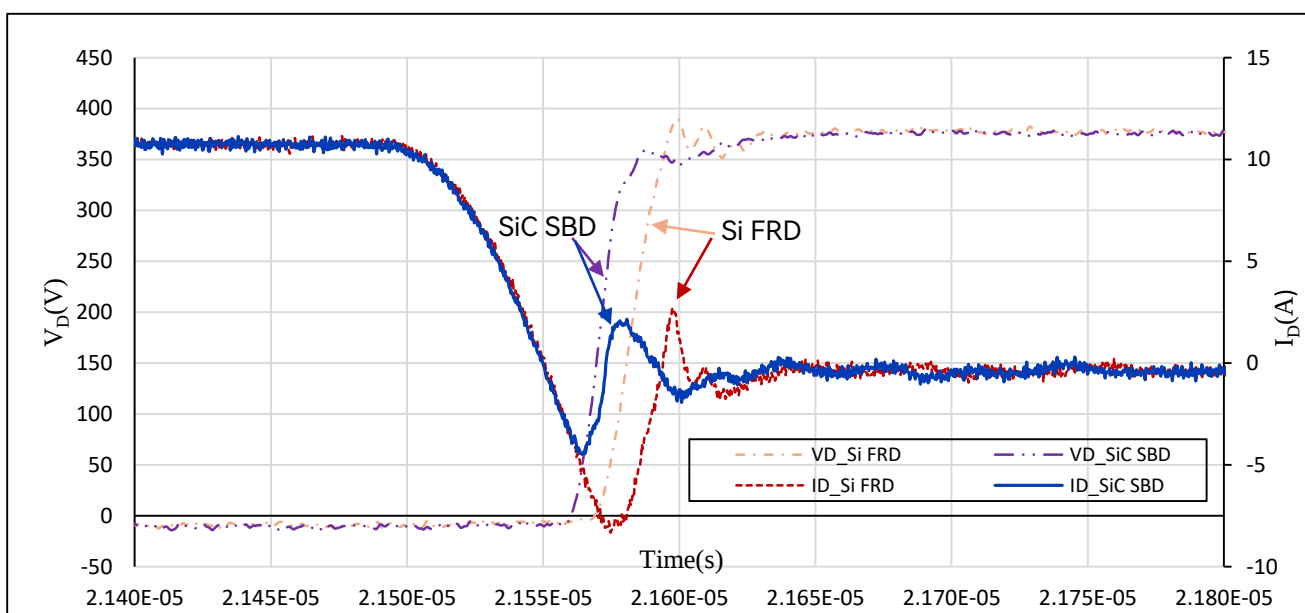


图 3 Si IGBT 和 SiC SBD 的反向恢复波形细节对比(380V/11A)

对比表 2 和图 3 分析可知, FRD 因为存在反向恢复问题, 必然导致较大的反向恢复时间和反向恢复峰值电流。而 SiC SBD 是一种多数载流子导电器件, 它没有少数载流子寿命和反向恢复问题, 因此所测得的反向恢复时间是其肖特基势垒电容的充电时间。根据测试结果可知, SiC SBD 的反向恢复能量 E_{rr} 以及反向恢复时间 T_{rr} 均小于 Si FRD。随着工作电流的增加, 两者的反向恢复差距逐步放大, 可见在大电流工况下更能体现 SiC SBD 的优势, 也体现了 SiC SBD 的反向恢复基本不受工作电流大小影响的良好特性, 有利电源系统稳定的 EMI 表现。

针对目前 1.5P 以内的空调电源, 主流的 AC-DC 方案仍然是传统有桥 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

通过分析开关功率器件的损耗机理可知，其损耗来源主要包含导通损耗和开关损耗两部分。Si IGBT 的导通损耗主要由开关管的饱和导通压降 V_{CEsat} 以及通过开关管的电流共同决定，SiC MOS 的导通损耗同样由其导通压降 $V_{DS(on)}$ 以及通过开关管的电流共同决定。为研究 Si IGBT 和 SiC MOS 在导通过程中的性能差异。分别选择 650V/40A Si IGBT 和三安半导体的 650V/65mΩ SiC MOS(SMS0650065M)作为待测器件进行了输出特性曲线对比测试，结果展示如图 4 所示。

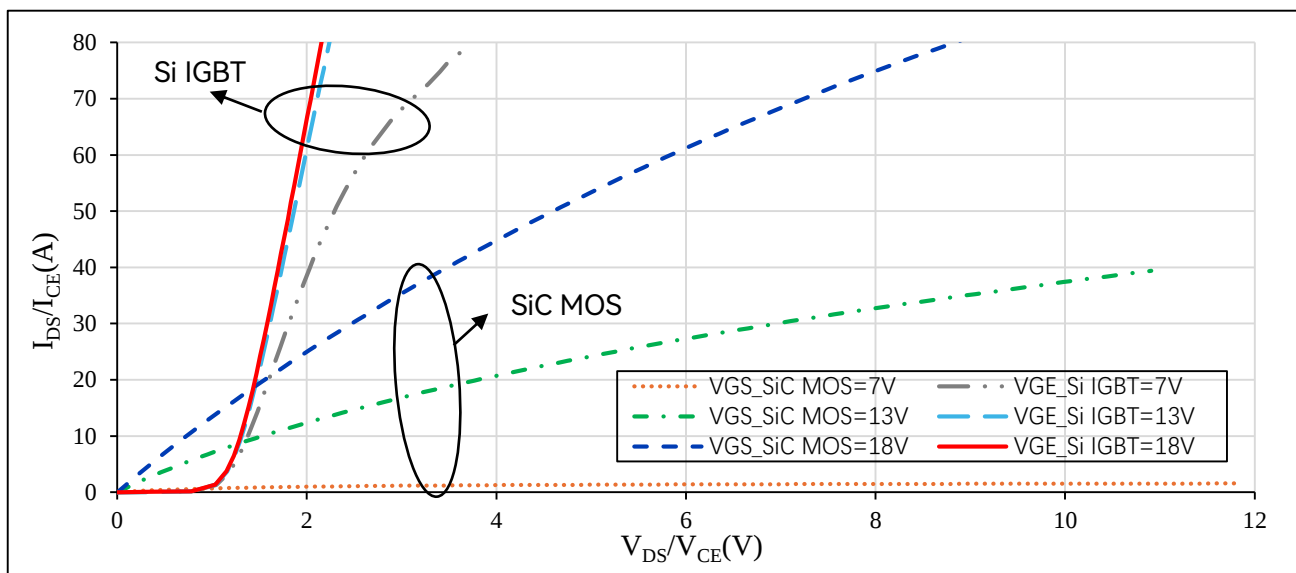


图 4 Si IGBT 和 SiC MOS 的输出特性曲线对比

根据图 4 输出特性曲线对比可知，SiC MOS 及 Si IGBT 的 I_{DS}/I_{CE} 均随着 V_{DS}/V_{CE} 的增加而变大，但由于 Si IGBT 有门槛电压，因此在较小电流条件下 SiC MOSFET 的表现占据主要优势，其对应的导通电阻越小，器件的损耗功率将越小。通过选取相同 18V 栅极电压的测试条件，计算 Si IGBT 和 SiC MOS 对应的导通损耗功率曲线对比如图 5 所示。

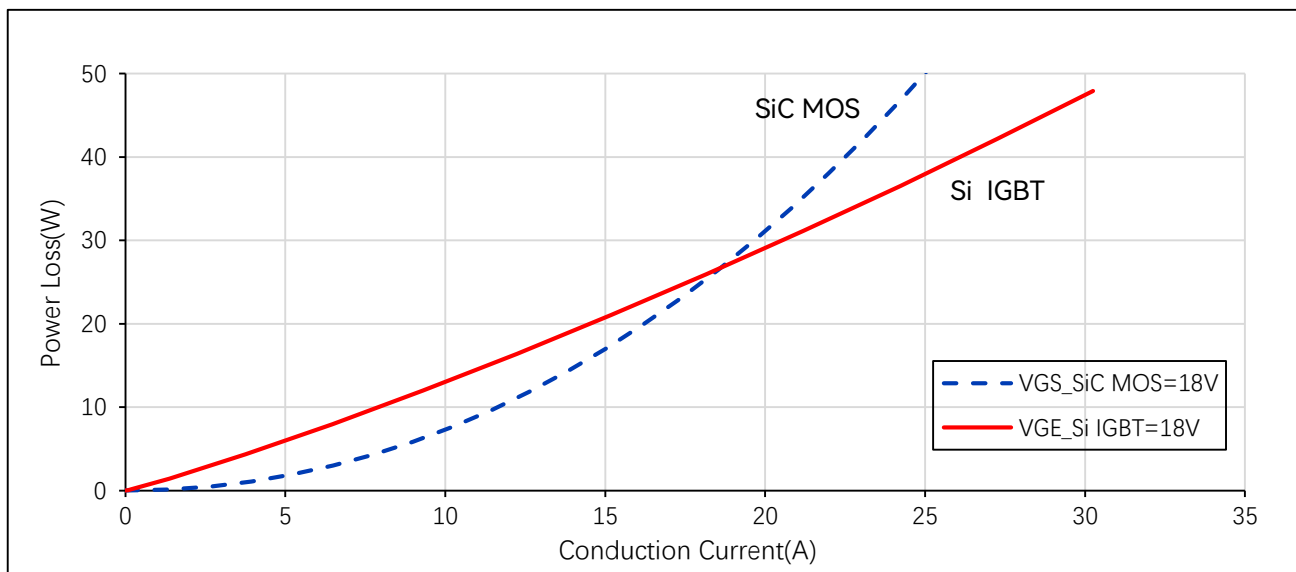


图 5 Si IGBT 和 SiC MOS 的导通损耗功率曲线对比



根据图 5 分析可知, 对于所选待测器件(Si IGBT: 650V/40A, SiC MOS: 650V/65mΩ), 当器件的传导电流小于 19A 时, SiC MOS 的导通损耗优势较为明显, 结合市场上 1.5P 空调的使用场景, 该电流区间基本可以覆盖电源板的输出工况。更值得注意的是, 空调大多数工作在中、轻载的情况下, 此功率等级 SiC MOS 损耗占比更小, 更能够发挥其效率优势, 从而助力空调实现超一级能效。

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 2 和组合 3 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 2 开关电阻分别选择 82Ω/82Ω, 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 SiC MOS 的驱动电阻配置均在 10Ω 左右的量级。这里实验方案组合 3 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/10A SiC SBD SDS065J010N3, 同样选取最大电压电流(380V/11A)工况进行测试, 波形数据如图 6 所示(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)。

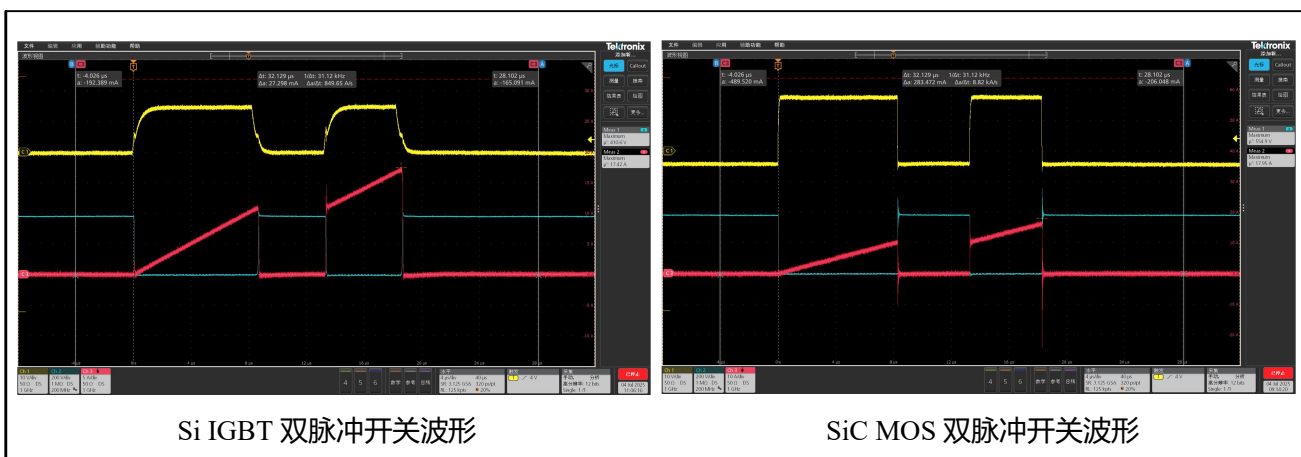


图 6 Si IGBT 和 SiC MOS 的双脉冲开关波形对比(380V/11A)

由波形图分析可知, 在基本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, 如此将更加延缓 Si IGBT 的开启和关断时间, 实测其 T_{on} 和 T_{off} 时间达到了 144ns/453ns。对于相同硬开关的电压电流应力工况, 较长的开关时间必将导致其电压电流的交叠面积更大, 如此将增加其开关损耗。相比前者, SiC MOS 因其自身更低的寄生电容参数, 使得该器件能够更快地完成开关动作, 实测其 T_{on} 和 T_{off} 时间仅为 31ns/24ns, 由此可知 SiC MOS 的开关损耗表现将远小于 Si IGBT。

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 1.5P 空调应用工况, 为定量分析不同开关器件在对应电压电流应力下的开关特性表现, 实验分别在 320V/3A、360V/7A、380V/11A 三个电压电流工作点对以上两个组合方案进行开关测试, 测试结果如表 3 所示。



表 3 Si IGBT 对比 SiC MOS 开关特性量化分析

Parameter	Sym bol	Test.1: $V_{DC}=320V$, $I_{DS}=3A$		Test.2: $V_{DC}=360V$, $I_{DS}=7A$		Test.3: $V_{DC}=380V$, $I_{DS}=11A$		unit
		Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + SiC SBD (SDS065J010N3)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	
Turn-off Time	T_{off}	497	47	478	29	453	24	ns
Turn-off Switching Energy	E_{off}	28.7	5.5	64.2	6.3	144.9	5.3	μJ
Turn-on Time	T_{on}	114	26	127	29	144	31	ns
Turn-on Switching Energy	E_{on}	39.7	15.1	98.0	31.0	181.7	51.3	μJ
Switching Energy	E_{sw}	68.3	20.6	162.2	37.3	326.7	56.6	μJ
60kHz	P_{tot}	4.10	1.23	9.73	2.24	19.60	3.39	W

结合表 3 数据分析其动态开关特性可知，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，以器件的开关工作频率为 60kHz 为例，当开关电压电流为 320V/3A 时，实测 SiC MOS 的总开关损耗功率仅为 1.23W，该数值约为 Si IGBT 的 30.0%。当开关电压电流为 380V/11A 时，测得 Si IGBT 的开关损耗则高达 19.60W，而 SiC MOS 的总开关损耗功率仅为 3.39W，该数值仅为 Si IGBT 的 17.3%。可见，在 1.5P 空调电源工况范围内，对于更高的工作电压电流以及更高的系统开关频率，SiC MOS 将越能发挥其独特的开关性能优势。

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(Si IGBT+Si FRD)和组合 3(SiC MOS+SiC SBD)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 82 Ω /82 Ω ，驱动电压为 15V/0V，对于 SiC 基方案，驱动电阻选用 10 Ω /2 Ω ，驱动电压为 18V/-4V。实验同样分别在三种典型工况点进行测试，结果记录如表 4 所示，对各工况下损耗数据分析并形成损耗柱形图对比如图 7 所示。



表 4 Si 基方案对比 SiC 基方案开关特性量化分析

Parameter		Sym bol	Test.1: $V_{DC}=320V$, $I_{DS}=3A$		Test.2: $V_{DC}=360V$, $I_{DS}=7A$		Test.3: $V_{DC}=380V$, $I_{DS}=11A$		un it
			Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	Si IGBT (650V/40A) + Si FRD (600V/30A)	SiC MOS (SMS0650065M) + SiC SBD (SDS065J010N3)	
Characteristics of Switching Device	Turn-off Time	T_{off}	496	47	467	29	463	24	ns
	Turn-off Switching Energy	E_{off}	26.9	5.5	64.0	6.3	143.5	5.3	μJ
	Turn-on Time	T_{on}	125	26	143	29	160	31	ns
	Turn-on Switching Energy	E_{on}	60.2	15.1	147.3	31.0	260.2	51.3	μJ
	Switching Energy	E_{sw}	87.1	20.6	211.3	37.3	403.7	56.6	μJ
Reverse Diode Characteristics	Recovery Energy	E_{rr}	6.8	1.4	12.3	1.7	17.5	1.9	μJ
	Recovery Time	T_{rr}	36	10	39	8	41	8	ns
Total Energy		E_{total}	93.9	22.0	223.6	39.0	421.2	58.5	μJ
60kHz		P_{tot}	5.63	1.32	13.42	2.34	25.27	3.51	W

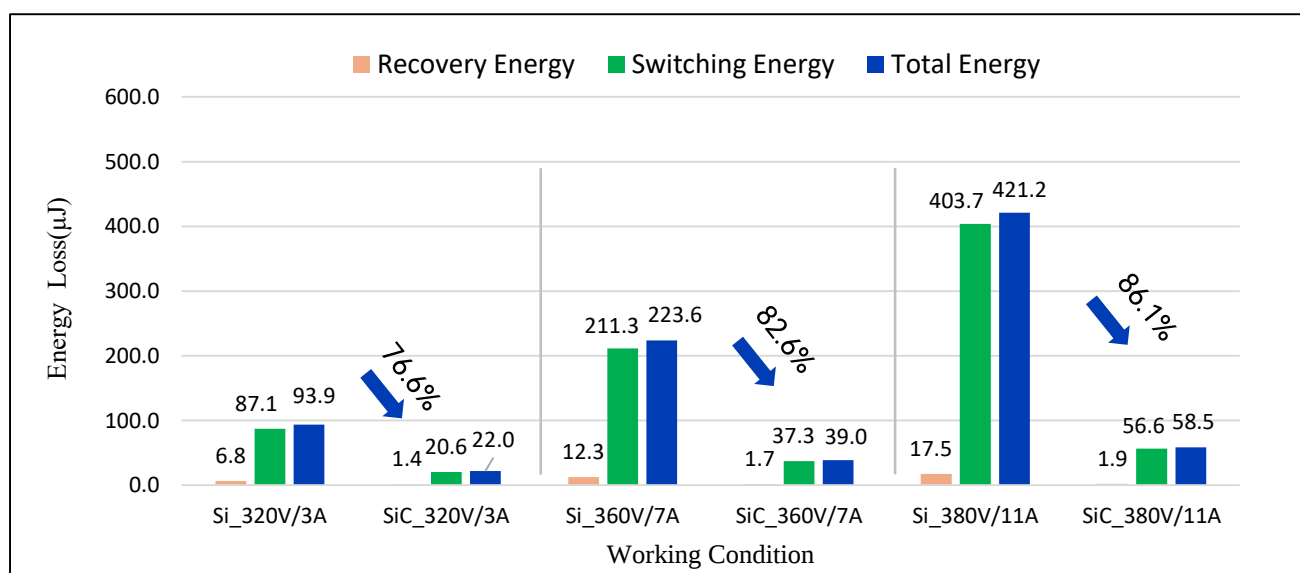


图 7 Si 基方案对比 SiC 基方案开关特性损耗对比

根据表 4 和图 7 的数据结果分析可知，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，由此大幅降低了开关管的开关损耗。



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。并且随着系统输出功率的增加，开关管的工作电压电流随之增大，Si 基方案的反向恢复损耗和动态开关损耗也呈现了快速增加的趋势，而 SiC 基方案的对应损耗增量则明显小于 Si 基方案。两者的损耗差异随着电压电流的增加而放大，在最大电压电流工况(380V/11A)下，Si 基方案的总损耗达 421.2 μ J，对应 60kHz 下的功率损耗达到了 25.27W，而相同工况下 SiC 基方案总损耗则仅有 58.5 μ J，对应功率损耗为 3.51W，该值仅为 Si 基方案的 13.9%，降幅高达 86.1%。

四、总结

SiC 基方案凭借更低的开关损耗，很好地缓解了器件的散热问题。针对更大匹数的空调电源应用，在满足器件散热的条件下，系统和器件的开关频率能够做得更高，由此可以减小电感电容等无源元件的体积和成本，符合未来功率电源的小型化、高效化、低成本的发展趋势。

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。

