

ICS 31.080

L 40/49



团 体 标 准

T/IAWBS 025-2025

碳化硅器件功率循环试验方法

Power cycling test methods for silicon carbide
power devices

2025-09-24 发布

2025-10-10 实施

中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 文字符号 2

5 SiC MOSFET 温敏参数选择与标定 2

6 SiC MOSFET 器件加热模式 2

 6.1 通则 2

 6.2 正向沟道加热模式 2

 6.3 反向沟道加热模式 3

 6.4 体二极管加热模式 3

7 试验设备 4

8 试验程序 4

 8.1 SiC MOSFET 器件试验程序 4

 8.2 SiC 二极管器件试验程序 5

 8.3 SiC MOSFET 及 SiC 二极管混合器件试验程序 5

9 试验条件 5

10 试验测量 5

11 失效判据 5

12 检测报告中应给出的信息 6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

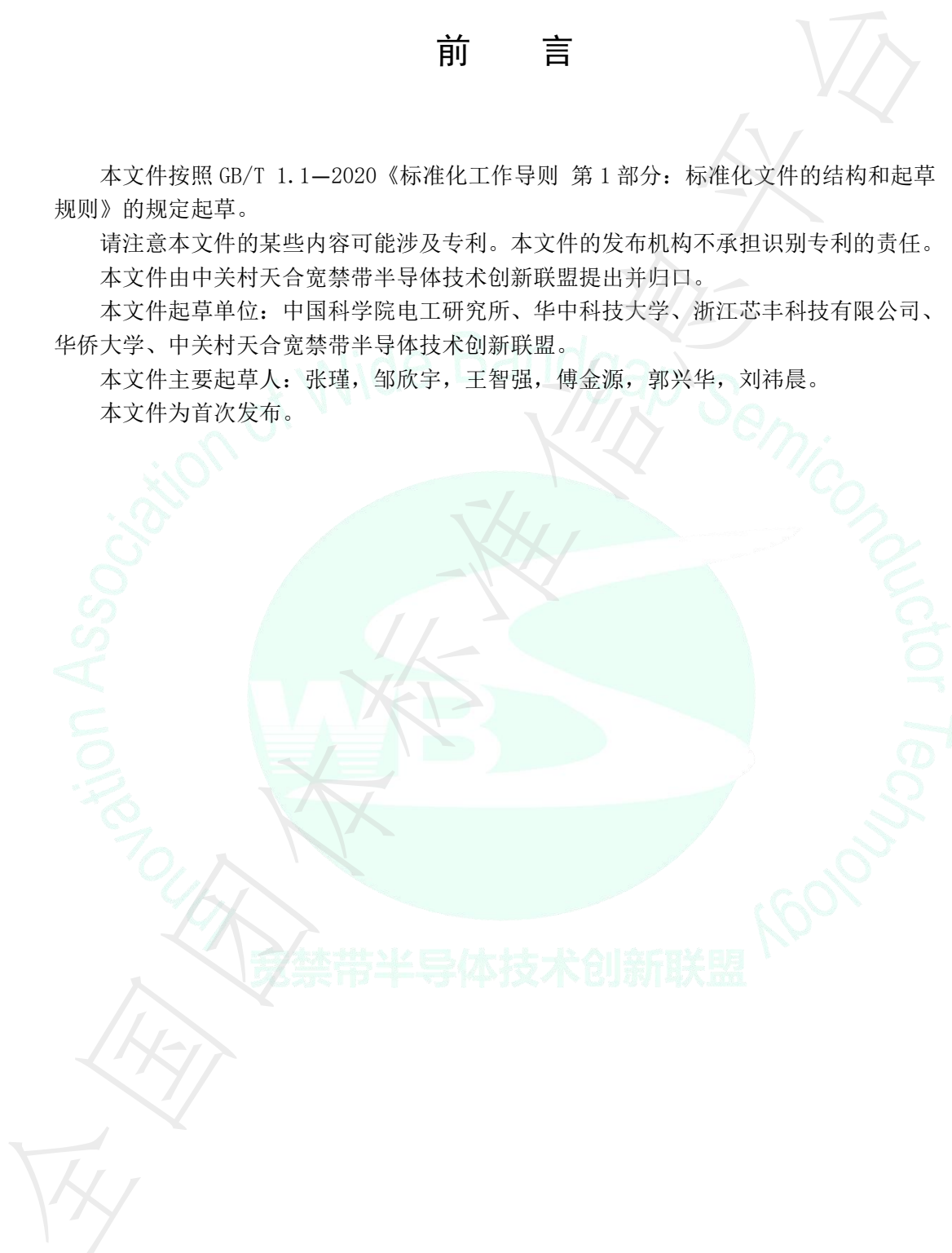
请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院电工研究所、华中科技大学、浙江芯丰科技有限公司、华侨大学、中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟。

本文件主要起草人：张瑾，邹欣宇，王智强，傅金源，郭兴华，刘伟晨。

本文件为首次发布。



碳化硅器件功率循环试验方法

1 范围

本文件提出了碳化硅器件在进行功率循环试验时需要遵循的方法和步骤。

本文件适用于碳化硅金属氧化物场效应晶体管（SiC MOSFET）、碳化硅（SiC）二极管以及二者混合封装器件的测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 4937.3 半导体器件 机械和气候试验方法 第3部分：外部目检

GB/T 4937.34-2024 半导体器件 机械和气候试验方法 第34部分：功率循环

GB/T 4937.35 半导体器件 机械和气候试验方法 第35部分：塑封电子元器件的声学显微镜检查

IEC 60747-2:2016 半导体器件 第2部分：分立器件 整流二极管（Semiconductor devices—Part 2: Discrete devices—Rectifier diodes）

IEC60747-8:2021 半导体器件 分立器件 第8部分：场效应晶体管（Semiconductor devices—Discrete devices—Part 8: Field-effect transistors）

3 术语和定义

GB/T 4937.34、IEC60747-2以及IEC 60747-8界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

正向沟道加热 Forward channel heating

功率循环试验时，仅在加热阶段施加正栅极电压，开通被测MOSFET沟道，且加热电流从被测MOSFET的漏极流向源极的加热方式。

3.2

反向沟道加热 Backward channel heating

功率循环试验时，仅在加热阶段施加正栅极电压，开通被测MOSFET沟道，且加热电流从被测MOSFET的源极流向漏极的加热方式。

3.3

体二极管加热 Body diode heating

功率循环试验时，始终对被测MOSFET施加负栅极电压，完全关闭被测MOSFET的沟道，且加热电流从被测MOSFET的源极流向漏极的加热方式。

3.4

秒级功率循环 Second level power cycling

加热时间小于等于 10s 的功率循环。

3.5

分钟级功率循环 Minute level power cycling

加热时间大于等于30s的功率循环。

4 文字符号

IEC60747-2以及IEC60747-8规定的文字符号适用于本文件。

5 SiC MOSFET 温敏参数选择与标定

温敏电参数（TSEP）法是指选用合适的电参数，计算出选用的TSEP与温度的函数关系，进而在功率循环（PC）测试过程中通过测量TSEP计算得到结温。

为了避免栅氧缺陷导致的温敏电参数漂移问题，对于SiC MOSFET，应选择完全关闭沟道条件下的体二极管压降（或称源漏极电压）作为温敏电参数。室温下完全关闭沟道后的体二极管压降通常在2V~3V之间。

标定SiC MOSFET体二极管温敏特性之前，首先需要确定一个能够完全关闭MOSFET沟道的负栅压，标定电路宜采用图1所示的形式。

在室温下向被测器件（DUT）的体二极管通入测量电流 I_m ，即电流从源极S流向漏极D，测量电流的选择不应使DUT因流过测量电流而明显发热，范围宜根据DUT的容量大小选择10mA~100mA。然后不断降低栅极驱动电压 V_g ，并观察体二极管压降。随着栅极电压的降低，体二极管压降随之升高，当压降趋于稳定不再升高后，即认为此时的沟道已完全关闭，记录此时的栅极电压，作为正式标定时施加的负栅压。

确定所需的负栅压后，按照IEC 60747-8:2021第6.3.20条规定的方法，对SiC MOSFET体二极管温敏特性进行标定并记录。

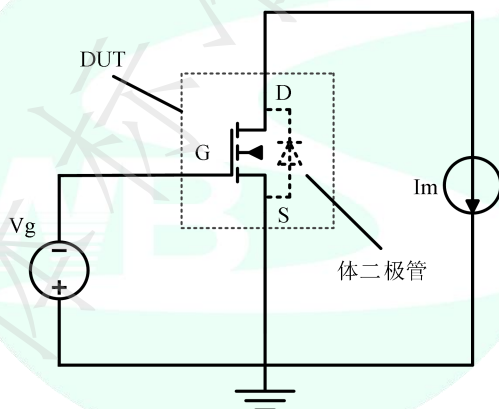


图1 SiC MOSFET 温敏电参数标定电路

6 SiC MOSFET 器件加热模式

6.1 通则

本文件提出的SiC MOSFET功率循环测试共有正向沟道加热、反向沟道加热以及体二极管加热三种加热模式。其中，前两种模式的失效特征主要以封装失效为主，而体二极管加热模式的失效特征还可能包含双极性退化，因此如果功率循环试验的目的是验证封装的可靠性，宜采用前两种加热模式；若功率循环试验的目的是验证器件在脉冲电流下抵抗双极退化的能力或者相关方有规定时，可采用体二极管加热模式。

6.2 正向沟道加热模式

正向沟道加热模式宜采用如图2所示的测试电路。当需要对DUT加热时，闭合开关S1，断开开关S2，驱动电源 V_g 输出正电压，此时加热电流 I_{load} 从DUT的漏极流向源极，DUT开始升温；当达到所需的加热时长后，断开S1，闭合S2，驱动电源 V_g 输出负电压，此时测量电流 I_m 从源极流向漏极，测量DUT此时的体二极管压降即源漏极电压 V_{SD} 即可获得芯片结温的变化量。

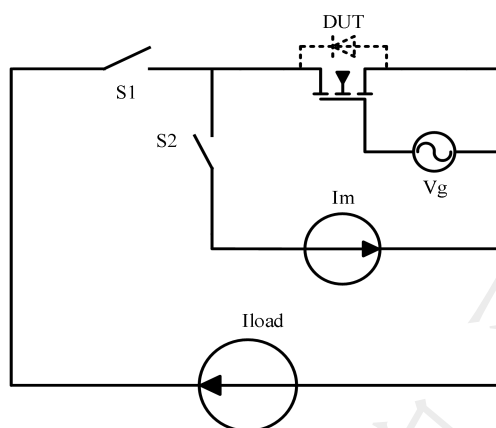


图2 正向沟道加热模式测试电路

6.3 反向沟道加热模式

反向沟道加热模式宜采用如图3所示的测试电路。当需要对DUT加热时，闭合开关S1，驱动电源Vg输出正电压，此时加热电流Iload从DUT的源极流向漏极，DUT开始升温；当达到所需的加热时长后，断开S1，驱动电源Vg输出负电压，此时测量电流Im从源极流向漏极，测量DUT此时的源漏极电压 V_{SD} 即可获得芯片结温的变化量。

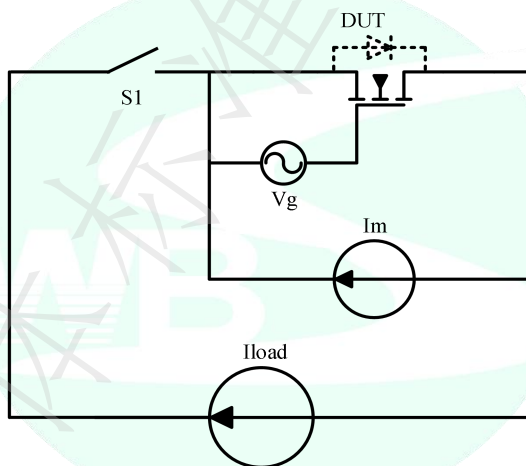


图3 反向沟道加热模式测试电路

6.4 体二极管加热模式

体二极管加热模式宜采用如图4所示的测试电路。当需要对DUT加热时，闭合开关S1，驱动电源Vg始终输出负电压，此时加热电流Iload从DUT的源极流向漏极，DUT开始升温；当达到所需的加热时长后，断开S1，此时测量电流Im从源极流向漏极，测量DUT此时的源漏极电压 V_{SD} 即可获得芯片结温的变化量。

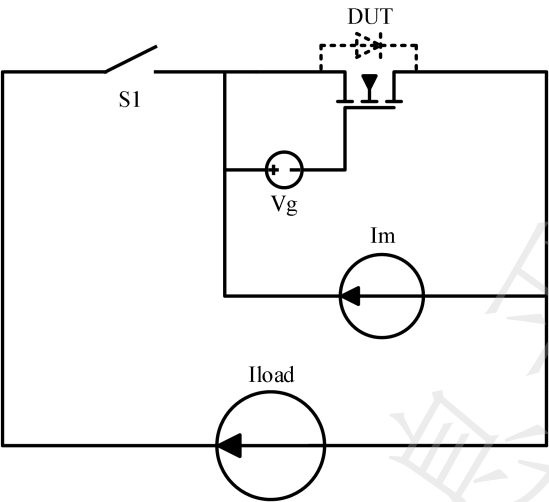


图 4 体二极管加热模式测试电路

SiC MOSFET 三种不同加热模式的电路控制逻辑见表1。

表 1 不同加热模式的控制逻辑

加热模式	电路状态	开关 S1	开关 S2	驱动电源 Vg
正向沟道加热	加热	闭合	断开	正电压
	冷却	断开	闭合	负电压
反向沟道加热	加热	闭合	不适用	正电压
	冷却	断开	不适用	负电压
体二极管加热	加热	闭合	不适用	负电压
	冷却	断开	不适用	负电压

7 试验设备

所用试验设备除了应满足 GB/T 4937.34-2024 第 4 章之要求外，还应满足以下要求：

- 设备应具有足够功率的栅极驱动电路，且输出的栅极驱动电压应满足正、负幅值可调，其中正栅压的可调范围不宜小于（0~+15）V，负栅压的可调范围不宜小于（-10~0）V；
- 设备应具有温敏电参数法测量器件结温的能力，且温敏参数测量范围不宜小于±5V；
- 对于采用水冷板散热的设备，水冷板的控温范围不宜小于（10~85）℃；
- 设备应采用适当的技术，避免加热开始阶段，电源对被测器件产生电流冲击；
- 设备应具有实时数据记录功能，所记录的数据应包括但不限于：加热电流，加热时间，器件加热压降，冷却时间，结温变化量，最低结温，最高结温，栅极驱动电压，测试循环数等；
- 设备安装环境温度：+5℃~+35℃，相对湿度：≤85%，气压：86kPa~106kPa，安装地点不含易燃、易爆、腐蚀性气体和粉尘，附近没有强电磁辐射源。

8 试验程序

8.1 SiC MOSFET 器件试验程序

首先应对全部DUT按第10章的要求，进行试验前检测。然后，对DUT按第5章的要求进行温度敏感参数标定。标定完毕后，根据选定的加热模式按图2、图3或图4将DUT接入测试电路中，调节加热电流 I_H 、通电

时间 t_{on} 、断电时间 t_{off} 以及散热环境温度，使DUT的结温或壳温达到规定值后，开始计数，待到达规定的试验循环数后，切断加热电流，试验结束。试验结束后，对全部DUT按第10章的要求，进行试验后检测，根据表2对试验的符合性进行判定。

8.2 SiC 二极管器件试验程序

碳化硅二极管的功率循环测试方法与硅基二极管相同，按照IEC 60747-2:2016第7.5条，对其进行试验。

8.3 SiC MOSFET 及 SiC 二极管混合器件试验程序

SiC MOSFET及SiC二极管混合器件应在相关方允许的情况下，对其内部结构进行必要处理，如剪断内部键合线，以便断开MOSFET与二极管芯片的电气连接，然后按本文件第8.1、8.2条所规定的程序对SiC MOSFET部分和SiC二极管部分分别进行试验。

9 试验条件

SiC 器件功率循环的试验条件包括但不限于以下内容：

- SiC MOSFET 器件加热模式：宜采用正向沟道加热或反向沟道加热模式；若采用体二极管加热模式，应说明理由，且应征得相关方的同意。
- 加热电流： I_H ，适用时；
- 最高结温： T_{jmax} ，允许误差 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；
- 结温温升： ΔT_j ，允许误差 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；
- 壳温温升： ΔT_c ，允许误差 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；
- 栅极电压： $+V_G/-V_G$ ；
- 通电时间和断电时间： t_{on} 和 t_{off} ，按规定，其中秒级功率循环的 t_{on} 宜小于等于 10s，分钟级功率循环的 t_{on} 宜大于等于 30s；
- 散热方式：液冷或风冷，其中秒级功率循环宜采用液冷方式，分钟级功率循环宜采用风冷方式；
- 试验循环数： n ，规定值或测试至失效。

10 试验测量

至少应在开始试验前和完成试验后，按 GB/T 4937.3 标准进行外观目检以及按表 2 所列特性参数对全部 DUT 进行电气测试；此外，宜对 DUT 按 GB/T 4937.35 标准进行超声扫描检测，以便辅助分析功率循环试验对芯片焊层以及底板焊层的破坏程度。

鉴于SiC器件可能存在电参数恢复的特性，试验结束后，进行电气测试的时间间隔不宜超过48h。

11 失效判据

受试样品在试验过程中出现了功能异常或非人为的机械损伤，如封装裂纹或封装破裂均应视为故障，此外满足表2所列的失效判据，亦认为发生了故障。

表 2 功率循环试验失效判据

类型	特性参数	试验前测试值	试验后测试值	失效判据
SiC MOSFET	I_{DSS}	I_{DSS1}	I_{DSS2}	$ I_{DSS2} - I_{DSS1} > I_{DSS1}$ 或 0.1mA（二者取大者）
	I_{GSS}	I_{GSS1}	I_{GSS2}	$ I_{GSS2} - I_{GSS1} > I_{GSS1}$ 或 20nA（二者取大者）
	$V_{GS(th)}$	$V_{GS(th)1}$	$V_{GS(th)2}$	$ V_{GS(th)2} - V_{GS(th)1} > 0.2 V_{GS(th)1}$
	$V_{DS(on)}$	$V_{DS(on)1}$	$V_{DS(on)2}$	$ V_{DS(on)2} - V_{DS(on)1} > 0.05 V_{DS(on)1}$
	V_{SD}	V_{SD1}	V_{SD2}	$ V_{SD2} - V_{SD1} > 0.05 V_{SD1}$

类型	特性参数	试验前测试值	试验后测试值	失效判据
	$V_{(BR)DSS}$	$V_{(BR)DSS1}$	$V_{(BR)DSS2}$	$ V_{(BR)DSS1} - V_{(BR)DSS2} > 0.05 V_{(BR)DSS1}$
	$R_{th(j-c)}$	$R_{th(j-c)1}$	$R_{th(j-c)2}$	$ R_{th(j-c)2} - R_{th(j-c)1} > 0.2 R_{th(j-c)1}$
SiC 二极管	I_R	I_{R1}	I_{R2}	$ I_{R2} - I_{R1} > I_{R1}$ 或 0.1mA (二者取大者)
	V_F	V_{F1}	V_{F2}	$ V_{F2} - V_{F1} > 0.05 V_{F1}$
	$V_{(BR)}$	$V_{(BR)1}$	$V_{(BR)2}$	$ V_{(BR)1} - V_{(BR)2} > 0.05 V_{(BR)1}$
	$R_{th(j-c)}$	$R_{th(j-c)1}$	$R_{th(j-c)2}$	$ R_{th(j-c)2} - R_{th(j-c)1} < 0.2 R_{th(j-c)1}$
注：考虑到 SiC MOSFET 和 SiC 二极管的击穿电压 $V_{(BR)DSS}$ 和 $V_{(BR)}$ 测试过程中可能会对器件造成损伤，因此在相关方允许的情况下，可不作击穿电压测试。				

12 检测报告中应给出的信息

检测报告至少应给出下列信息：

- 检测实验室的名称和地址；
- 客户的名称和地址；
- 依据的检测标准号及版本号；
- 所用检测设备的标识（名称、型号、唯一性标识等）；
- 适用时，应给出设备的校准有效期；
- 检测样品的描述、状态和明确的唯一性标识；
- 检测样品的接收日期和检测日期；
- 检测条件及检测结果和（或）结论；
- 对检测方法的偏离、增添或删减，以及特定检测条件的信息，如环境条件。