

团 体 标 准

T/CASAS 015—2022

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (SiC MOSFET) 功率循环试验方法

Power cycling test method for silicon carbide metal-
oxide-semiconductor field-effect-transistor (SiC MOSFET)

版本: V01.00

2022-07-18 发布

2022-07-18 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前言.....	III
引言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 试验装置.....	2
5 试验步骤.....	3
5.1 试验方法.....	3
5.2 试验电路.....	3
5.3 试验夹具及安装.....	4
5.4 试验条件.....	4
5.5 试验设置.....	5
5.6 试验控制和测量.....	5
5.7 试验注意事项.....	5
5.8 终点测量.....	5
6 试验数据处理.....	6
7 试验报告.....	6
参考文献.....	7

前 言

本文件按照 GB/T1.1—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。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归 CASA 所有，未经 CASA 许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经 CASA 允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件起草单位：工业和信息化部电子第五研究所、江苏宏微科技股份有限公司、国网智能电网研究院有限公司、深圳市禾望电气股份有限公司、佛山市国星光电股份有限公司、中国电子科技集团集团第五十五研究所、比亚迪半导体股份有限公司、深圳基本半导体有限公司、中国航天科技集团公司第八研究院第八〇八研究所、南方电网科学研究院有限责任公司、西安交通大学、东莞南方半导体科技有限公司、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：陈媛、贺致远、来萍、路国光、姚天保、李金元、李尧圣、谢峰、成年斌、陈义强、黄云、刘奥、刘昌、徐新兵、吴海平、唐宏浩、刘伟鑫、李巍巍、王来利、乔良、徐瑞鹏。

引 言

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET)具有阻断电压高、工作频率高、耐高温能力强、通态电阻低和开关损耗小等特点,广泛应用于高频、高压功率系统中。随着电力电子技术的不断发展,越来越多的领域如航天、航空、石油勘探、核能、通信等,迫切需要能够在高温、高频等极端环境下工作的电子器件。SiC MOSFET 的功率循环试验是使器件重复承受通电升温 and 关断降温循环,以加速器件芯片与安装表面之间所有的键合和界面退化。器件能否能承受规定应力条件下的功率循环次数是评估器件实际应用可靠性的重要手段。

由于 SiO₂与 SiC 界面缺陷的俘获和释放机制,传统的 Si MOSFET 的功率循环试验方法会由于 SiC MOSFET 器件的阈值电压 $V_{GS(th)}$ 漂移导致结温等监测参数出现偏差,从而影响功率循环试验的准确性,本文件给出了适用于 SiC MOSFET 器件的功率循环试验方法。

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管（SiC MOSFET）

功率循环试验方法

1 范围

本文件规定了碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管（SiC MOSFET）功率循环试验方法，包括：试验装置、试验程序以及失效判据。

本文件适用于不带反向并联肖特基二极管的 SiC MOSFET 分立器件的功率循环试验。

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 4586 半导体器件 分立器件第 8 部分 场效应晶体管

T/CASAS 006—2020 碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管通用技术规范

JESD51—1 集成电路热测量方法 电气测试方法：单个半导体器件（Integrated circuits thermal measurement method - Electrical test method (single semiconductor device)）

3 术语和定义

T/CASAS 006—2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

结温 junction temperature

T_{vj}

器件中主要发热部分的半导体结的温度。

注：结温通过器件的温度敏感参数计算得到。

[来源：GB/T 14113—1993，5.34，有修改]

3.2

壳温 case temperature

T_c

在半导体器件管壳规定点测得的温度。

注：通常指最接近有源区部位的管壳温度，常见为芯片正下方几何中心点。

[来源：GB/T 2900.32—1994，2.2.10，有修改]

3.3

最高循环温度 maximum cycle temperature

$T_{vj(max)}$

循环周期的最高结温，为通电结束瞬间的结温。

3.4

最低循环温度 minimum cycle temperature

$T_{vj(min)}$

循环周期的最低结温，为降温结束瞬间的结温。

3.5

温差 junction temperature swing

ΔT_{vj}

$T_{vj(max)}$ 与 $T_{vj(min)}$ 的差值。

3.6

接通时间 on time

t_{on}

一个循环周期内器件的通电时间。接通时间内，器件持续升温到规定的最高循环温度 $T_{j(max)}$ 。

3.7

关断时间 off time

t_{off}

一个循环周期内器件的断电时间。关断时间内，器件持续降温到规定的最低循环温度 $T_{j(min)}$ 。

3.8

加热电流 heating current

I_L

接通时间内，器件的导通升温时的电流。

3.9

测试电流 measurement current

I_{sense}

关断时间内，测试器件温度敏感电学参数的电流。

3.10

制冷率 coolant rate

Q_{cool}

关断时间内，被测器件采用强迫制冷的制冷速率。

4 试验装置

所使用的试验装置应能够提供和控制指定的温度和循环时间。试验装置的关键组成如下，见图1：

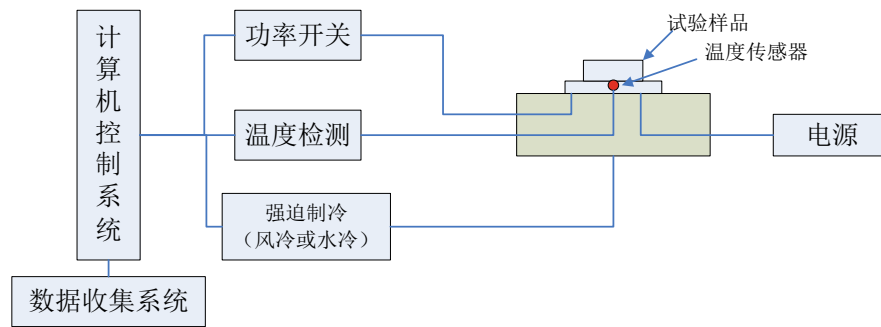


图1 功率循环试验装置的典型构成

- a) 功率偏置单元(电源)。功率循环试验利用被试验器件自身半导体结温在加电周期升温的原理，在规定时间内通过规定的电流将半导体器件温度升至规定温度。功率偏置单元（电源）应能满足半导体器件在规定时间内升至规定温度的要求；
- b) 功率开关。功率开关用来自动控制半导体器件“加电”和“断电”，以达到规定的循环次数。
- c) 温度检测单元。利用温度传感器检测试验过程的壳温变化情况。通过测试半导体器件的温度敏感参数获得结温变化情况；
- d) 冷却系统。包括强制空气或其他水冷装置，制冷方式的选择取决于试验样品和试验要求；
- e) 计算机控制系统。用于自动控制功率开关、冷却系统、功率偏置单元等功能模块；
- f) 数据收集系统，能够记录相关的试验数据，包括温度、试验时间、电参数测试信息和结果。

5 试验步骤

5.1 试验方法

功率循环试验的一般方法是驱动被测器件在规定的循环次数内经过规定的温度波动，并在试验过程中收集试验数据。试验步骤的关键组成包括，但不限于试验控制、温度测量、数据采集要求以及加热和冷却方法。

5.2 试验电路

建议采用如图2所示的SiC MOSFET的功率循环试验电路以及图3所示的栅极电压开关序列，图中的反向二极管为SiC MOSFET的体二极管。

如图3所示，在时间点0和 t_1 之间， S_1 导通， S_2 关断，栅极加正电压，SiC MOSFET器件导通升温；在时间 t_1 和 T_p 之间， S_1 关断， S_2 导通，SiC MOSFET关断，栅极在 t_1 和 t_2 、 t_3 和 T_p 之间，加负电压，在 t_2 和 t_3 之间加正电压，通过调整从 t_2 到 t_3 的脉冲长度，实现同样的正负栅偏应力，减轻 $V_{GS(th)}$ 的漂移。

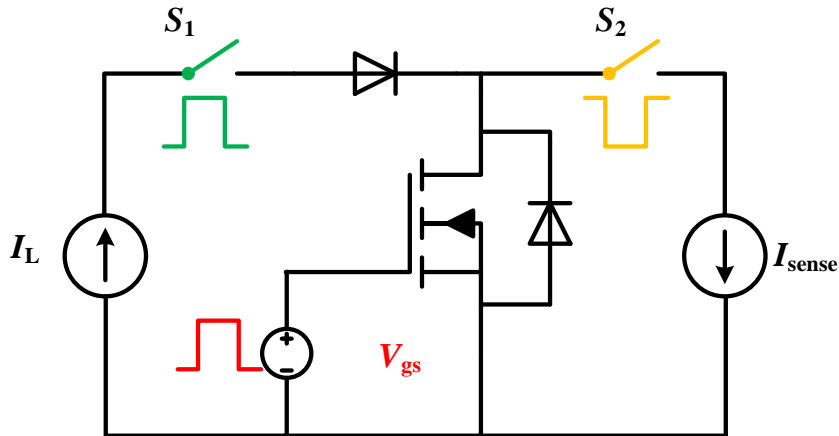


图2 SiC MOSFET 试验电路图

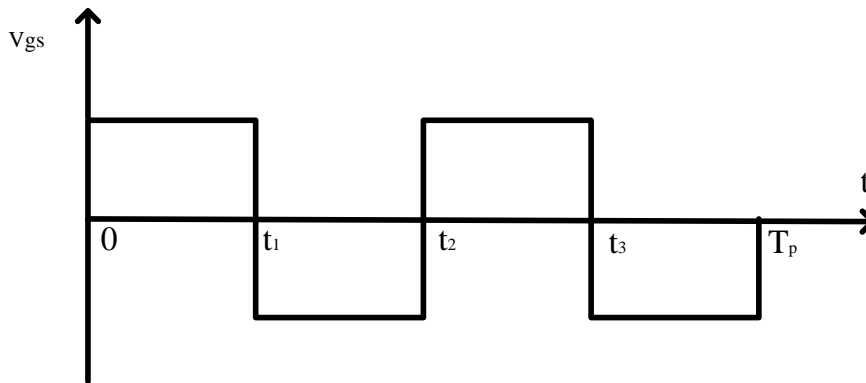


图3 SiC MOSFET 功率循环试验栅极电压开关序列

5.3 试验夹具及安装

功率循环试验样品和装置的构成,包括器件、封装、热沉以及夹具等都会对试验结果有显著的影响。功率循环试验的设置应尽可能反映产品的实际状态。

5.4 试验条件

试验电流电压等条件的选择应根据产品的详细规范,不应超过产品的最大额定值,同时以缩短试验时间为原则。

试验包括秒级功率循环和分钟级功率循环,推荐按照表1的试验条件进行分钟级功率循环,如果特别关注键合退化,可以加做秒级功率循环。根据产品的要求,其他试验条件是可以接受的,需在产品的详细规范中指明试验条件。

试验的接通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} 与试验器件的安装条件、热沉、制冷量以及驱动功率等有很大的关系。根据器件规范的最高结温,推荐最高循环温度 $T_{vj(max)}$ 为 175°C 或 150°C ,最低循环温度通常为室温。

表1 分钟级功率循环试验条件

所需循环数 ($\Delta T_{vj} \geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	所需循环数 ($\Delta T_{vj} \geq 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)	每循环时间
60000 / (X + Y)	30 000 / (X+Y)	$t_{\text{on}}/t_{\text{off}} \geq 2\text{ min}^{\text{a}}$ $t_{\text{on}} = X, t_{\text{off}} = Y$
15 000 次	7 500 次	$t_{\text{on}}/t_{\text{off}} < 2\text{ min}^{\text{b}}$
^a 当 $\Delta T_{vj} \geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 接通时间2分钟/关断时间4分钟, 需要 10000 次循环 [60000 / (2+4)], 当 $\Delta T_{vj} \geq 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 需要 5000 次循环; ^b 当 $\Delta T_{vj} \geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 接通时间1分钟/关断时间1分钟, 需要 15000 次循环, 当 $\Delta T_{vj} \geq 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 需要 7500 次循环。		

5.5 试验设置

首先确定沟道完全关闭的栅源电压 $V_{GS(\text{off})}$, 测试不同负偏栅压下(0V到最大负栅压, 间隔0.5V或1V测一次)的体二极管 I - V 特性曲线, 当体二极管 I - V 特性曲线不再发生变化时的栅压即为 $V_{GS(\text{off})}$ 。然后器件开始进行功率循环试验, 升温时, V_{GS} 设置为 $V_{GS(\text{on})}$ (通常 $\geq +15\text{V}$), 此时MOSFET沟道导通, $I_L = I_{DS}$, 电流为安培(A)级, MOSFET导通加热, 器件在 T_{on} 时间内功率升温; 降温时 V_{GS} 设置为小于 $V_{GS(\text{off})}$, 电流流过反向二极管, $I_{\text{sense}} = I_{SD}$, 电流为毫安(mA)级, 器件在 T_{off} 时间内降温, 通过 V_{SD} (T)方法监测结温, 即利用反向体二极管的结电压来计算结温。

5.6 试验控制和测量

使用恒定时间值(t_{on} 、 t_{off})来控制接通和关断时间(循环持续时间)。为了达到试验所需的结温的温升 ΔT_{vj} , 接通和关断时间需在试验开始前确定, 并且仅允许在试验开始时设置一次。

试验前还需标定器件的温度敏感系数(K), K系数的标定方法依据JESD51-1。

经过初始阶段的试验调整后, 参数稳定, 所有控制参数(t_{on} 、 t_{off} 、 V_g 、 I_L 、 Q_{cool})必须保持不变, 直到试验结束。试验过程实时监控 $T_{vj(\text{max})}$, $T_{vj(\text{min})}$, R_{th_ja} , V_{ds_on} 参数的变化。

5.7 试验注意事项

试验功率不等于电源上的显示值, 而应通过测量被测器件的实际电压和电流来计算偏置功率。某些形式的连续温度测量和适当的关机控制可以用来防止温度超过控制上限。采集温敏参数时应确保SiC MOSFET沟道完全关断。

5.8 终点测量

终点测量包括但不限于电参数和热阻测试, 测试应按照产品的详细规范进行。终点测量应在器件从规定试验条件下移出后的96h内完成, 阈值电压 $V_{GS(th)}$ 应在移出后的10h内完成, 测试方法参考JEP183。如果终点测量不能在规定的时间内完成, 那么在完成试验后测量前, 器件至少应追加200次相同条件的试验循环。

6 试验数据处理

失效判据应包括但不限于表2所示的参数，测试方法依据GB/T 4586，测试条件按照产品规范测试常温下的参数变化。建议在试验结束后使用声学扫描显微镜检查器件的所有界面退化情况。

表2 功率循环试验的失效判据

参数	符号	失效判据 (相对于初始值的变化率)
漏-源极导通电压	$V_{ds,on}$	5%
体二极管正向压降	V_F	5%
结壳热阻	$R_{th,jc}$	20%
阈值电压	$V_{GS(th)}$	5%
零栅压漏电流	I_{dss}	500%；若初始值<10 nA，则试验后不超过50 nA
栅源漏电流	I_{gss}	500%；若初始值<10 nA，则试验后不超过50 nA

7 试验报告

试验报告至少应给出以下几个方面的内容：

- a) 试验对象；
- b) 样品数量；
- c) 试验条件；
- d) 循环次数；
- e) 参数测试结果；
- f) 测量间隔时间。

参 考 文 献

- [1] GB/T 29332—2012 半导体器件 分立器件 第9部分：绝缘栅双极晶体管
 - [2] IEC 60747-8—2010 Semiconductor devices—Discrete devices—Part 8: Field-effect transistors
 - [3] AEC-Q101 Stress test qualification for discrete semiconductors
 - [4] JEDEC 22-A122 Power cycling
 - [5] JEP 183 SiC MOSFET Guidelines for measuring the threshold voltage (VT) of SiC MOSFETs
-

