

团 体 标 准

T/CASAS 040—202X（征求意见稿）

SiC MOSFET 功率模块短路可靠性测试方法

Short-circuit reliability test method for silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor (SiC MOSFET) power module

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 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 测试对象..... 2

5 测试原理..... 2

 5.1 一般要求..... 2

 5.2 等效单管测试的测试原理..... 2

 5.3 桥臂直通测试的测试原理..... 2

6 测试条件..... 3

 6.1 测试环境条件..... 3

 6.2 测试安全条件..... 3

7 测试流程..... 4

 7.1 等效单管测试的测试流程..... 4

 7.2 桥臂直通测试的测试流程..... 4

8 数据记录和处理..... 6

9 测试报告..... 7

附 录 A （资料性） 功率模块短路可靠性测试记录表..... 8

参考文献..... 9

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。

本文件主要起草单位：

本文件主要起草人：

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。与SiC MOSFET单管功率器件相比，SiC MOSFET功率模块的电流更大，功率更高，广泛应用于高频、高压功率系统中。在SiC MOSFET功率模块的应用场景中，如电机驱动、逆变器、变频器等，有时会出现短路的工况。当SiC MOSFET 连接的负载发生短路，或发生桥臂直通短路时，电源电压 V_{DD} 将瞬间加载在器件的漏极，与 V_{GS} 共同作用，使模块中的器件处于高压大电流状态，由此产生的瞬时高热将烧毁器件，使系统失效。虽然SiC材料具有的优良热导率，可以加快散热，让SiC MOSFET器件在理论上比硅基器件具有更高的短路鲁棒性，但是SiC MOSFET的高功率密度特性往往使其在短路时具有更高的瞬时功率，有时可能高达数万瓦，让SiC MOSFET在高温与高电场应力下面临失效和退化风险，因此，SiC MOSFET模块面临的短路可靠性问题更加严峻。这要求SiC MOSFET模块具有一定的抗短路能力，即在一定的时间内承受住短路电流而不损坏的能力。因此，模块的短路可靠性测试对于模块的应用具有重要的意义。

SiC MOSFET 功率模块短路可靠性测试方法

1 范围

本文件规定了SiC MOSFET功率模块短路可靠性测试方法，包括测试原理、测试流程、数据记录和处理等内容。

本文件适用于SiC MOSFET功率模块在FT（Final Test）、实验室研发等阶段的短路可靠性测试。

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 2900.32-1994 电工术语 电力半导体器件

GB 19517—2023 国家电气设备安全技术规范

T/CASAS 039—202X SiC MOSFET单管功率器件短路可靠性测试方法

3 术语和定义

GB/T 2900.32-1994界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

SiC MOSFET 模块 SiC MOSFET module

由两个或两个以上SiC材料制作的MOSFET芯片或者和其它元器件按一定电路连接并安装在电路载体（陶瓷基覆铜板）上，采用绝缘壳体、塑料封装，实现半导体分立器件功能的模块。

3.2

半桥模块 half bridge module

由两个SiC MOSFET器件串联组成的模块。

3.3

全桥模块 full bridge module

由四个SiC MOSFET器件按一定的电路连接组成的模块。

3.4

三相全桥模块 3-Phase bridge module

由六个SiC MOSFET器件按一定的电路连接组成的模块。

3.5

短路可靠性 short circuit reliability

器件在短路工况下的承受能力，包括极限短路耐受时间、极限短路能量等指标。

3.6

短路耐受时间 short circuit withstand time

T_{SC}

在规定条件下，器件能够承受住短路电流而不损坏的时间。

3.7

极限短路耐受时间 short circuit withstand limit time; Limit T_{SC}

在规定条件下，器件能够承受住短路而不损坏的最长时间。

3.8

短路电流 short circuit current

I_{SC}

在规定条件下，器件的短路电流。

3.9

壳温 case temperature

T_C

在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]

4 测试对象

本文件的测试对象为SiC MOSFET功率模块，包括半桥模块、全桥模块、三相全桥模块、其他模块等。

5 测试原理

5.1 一般要求

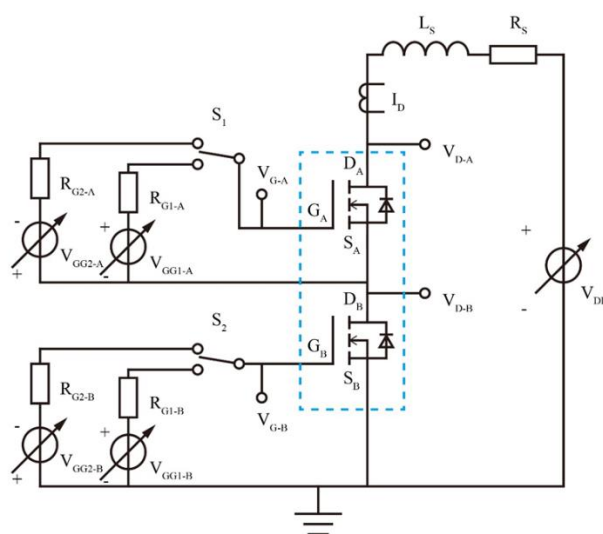
在对SiC MOSFET功率模块进行测试时，依据功率模块中的功率器件是否可以拆解为半桥模块结构选择不同的测试原理进行测试。若功率器件不能拆解为半桥模块结构，则使用等效单管测试原理进行测试；若功率器件能拆解为半桥模块结构，则可从桥臂直通测试原理或等效单管测试原理中选择一种进行测试。

5.2 等效单管测试的测试原理

进行等效单管测试时，将功率模块中被测的单个功率器件的栅极、漏极、源极分别导出，接入T/CASAS 039—202X规定的短路测试电路中，按照与单管功率器件相同的测试原理和测试流程进行测试。

5.3 桥臂直通测试的测试原理

桥臂直通测试的测试电路图见图1，其中蓝色虚线框所示为功率模块中被测的半桥模块结构。



标引序号说明：

L_S ——为允许的最大杂散电感，该杂散电感应足够低，以确保最大短路电流可在栅极脉冲宽度（ t_{pSC} ）最初的25%内达到；

R_S ——为整体环路电阻，该电阻值应足够低，以确保该电阻最大压降小于 V_{DD} 的5%；

I_D ——为对漏极电流进行监测的装置；

V_{DD} ——为可调电压源，电压源最大输出电流应大于被测器件短路电流；

V_{GG-A} ——为半桥模块结构中器件A的栅极所接的栅极脉冲发生器，脉冲宽度最小分辨率为 $0.1\mu s$ ，最小脉冲宽度为 $0.5\mu s$ ；

R_{G-B} ——为半桥模块结构中器件A的栅极所接的栅极电阻；

V_{GG-B} ——为半桥模块结构中器件B的栅极所接的栅极脉冲发生器，脉冲宽度最小分辨率为 $0.1\mu s$ ，最小脉冲宽度为 $0.5\mu s$ ；

R_{G-B} ——为半桥模块结构中器件B的栅极所接的栅极电阻。

图1 桥臂直通测试电路

进行桥臂直通测试时，将功率模块中被测的半桥模块结构导出并接入到短路测试电路中，先控制半桥模块结构中的器件B开通并确保器件B允许通过的电流大于器件A在测试过程中所需的最大电流，按照与单管功率器件相同的测试原理和测试流程对器件A的短路可靠性进行测试，然后控制半桥模块结构中的器件A开通并确保器件A允许通过的电流大于器件B在测试过程中所需的最大电流，按照与单管功率器件相同的测试原理和测试流程对器件B的短路可靠性进行测试。

6 测试条件

6.1 测试环境条件

测试环境温度要求为 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，测试环境相对湿度不超过65 %。

6.2 测试安全条件

在进行极限短路耐受时间测试时，模块会面临炸机的风险，应在实验过程中注意满足以下安全条件：

- 在测试电路中增加具有过流保护功能的电路，避免在测试过程中给模块造成不可逆的损坏；
- 在被测模块上增加保护罩，避免模块炸机给测试人员造成伤害；

- c) 在测试设备上增加保护开关,用于在器件无法正常关断时断开测试电路,避免在测试过程中给模块和测试设备造成损坏,同时避免给测试人员造成伤害。短路过程中保护开关的分压不超过母线电压的1%;
- d) 符合GB 19517—2023的要求。

7 测试流程

7.1 等效单管测试的测试流程

按照T/CASAS 039—202X进行测试。

7.2 桥臂直通测试的测试流程

使用桥臂直通测试对 I 类短路的短路耐受时间进行验证时,按照如下流程进行测试:

- a) 根据SiC MOSFET功率模块的封装形式,选择合适的测试夹具,将被测的半桥模块结构导出并接入到短路测试电路中;
- b) 按照表1对承受应力前的器件进行设测试;

表1 器件合格的定义

参数	合格判据
I_{GSS}	$I_{GSS} < USL$
I_{DS}	$I_{DS} < USL$
$V_{GS(th)}$ 或 $V_{GS(off)}$	$LSL < V_{GS(th)} < USL$ 或 $LSL < V_{GS(off)} < USL$
$V_{DS(on)}$	$LSL < V_{DS(on)} < USL$
$r_{DS(on)}$	$LSL < r_{DS(on)} < USL$
注1: 规格上限。	
注2: 规格下限。	

- c) 将模块温度设置为指定的温度值 T_C ,然后静置一段时间;
- 注: 若没有特殊约定, T_C 可设为室温25℃,静置时间可选择2h或4h。
- d) 对半桥模块结构中的器件A进行测试,在测试装置中设置以下测试参数:
 - 1) 漏-源电压 V_{DS} (在测试过程中等同于母线电压 V_{DD});
 - 2) 在器件A栅极的脉冲发生器中设置一个脉冲信号,高电平为器件开通态的栅-源电压 V_{GS} ,低电平为器件关断态的栅-源电压 (通常可设为0V或-5V),脉冲宽度为 t_{pSC} ;
 - 3) 在器件B栅极的脉冲发生器中设置一个信号,高电平为器件开通态的栅-源电压 V_{GS} ,在该电压下器件B允许通过的电流大于器件A在测试过程中所需的最大电流,低电平为器件关断态的栅-源电压 (通常可设为0V或-5V);
 - 4) 两个器件各自的开通态的栅极电阻 R_{G1} 和关断态的栅极电阻 R_{G2} 。
 - e) 在漏极施加电压 V_{DS} ;
 - f) 在器件B的栅极施加电压,开通器件B;
 - g) 通过脉冲发生器在器件A的栅极施加脉冲;
 - h) 在施加脉冲的过程中,对漏极电流 I_D 进行测试,判断应力是否正确地施加在器件A上:
 - 1) 若漏极电流最终降至0,表明器件被安全地关断。器件被安全关断时,漏极电流的典型波形见图7;

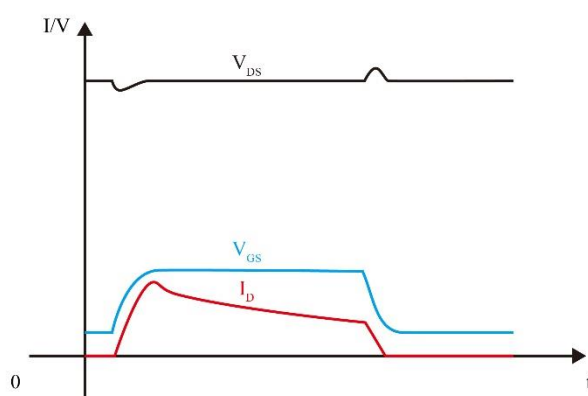


图2 器件安全关断时漏极电流的典型波形图

- 2) 若出现异常情况，包括但不限于漏极电流迅速上升等，表明器件失效。漏源失效的典型波形见图3。栅源失效的典型波形见图4。延迟失效的典型波形见图5。

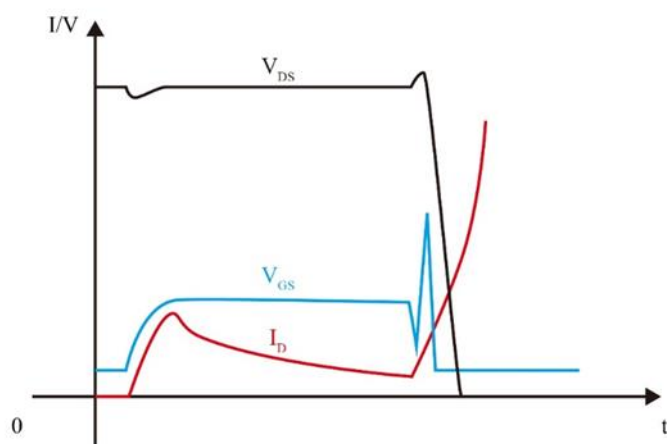


图3 器件漏源失效时的典型波形图

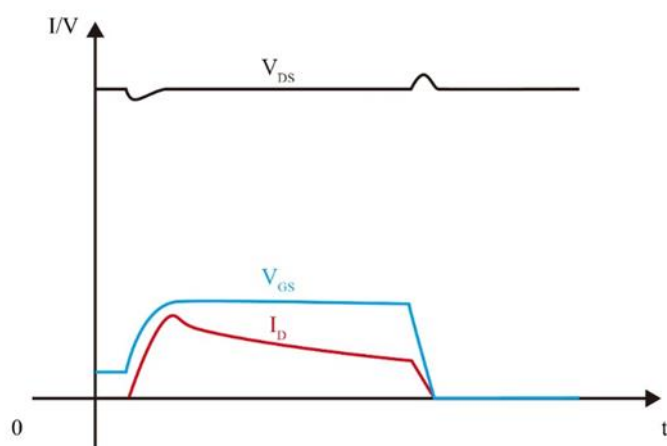


图4 器件栅源失效时的典型波形图

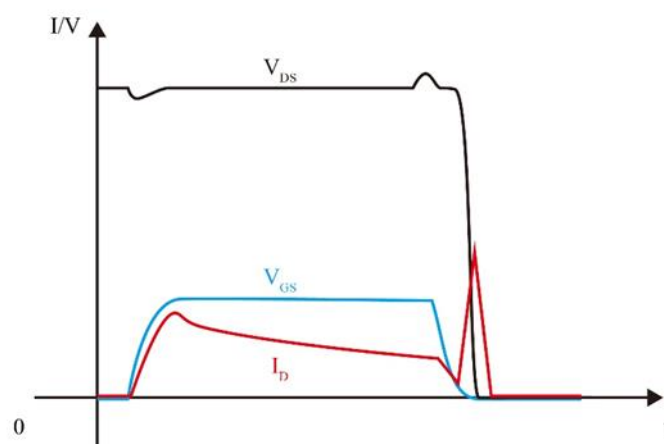


图5 器件延迟失效时的典型波形图

- i) 依据表1对承受应力后的器件A进行测试，判断器件A是否失效，并将测试结果与承受应力前的测试结果进行对比。
- j) 对半桥模块结构中的器件B进行测试，在测试装置中设置以下测试参数：
 - 1) 漏-源电压 V_{DS} （在测试过程中等同于母线电压 V_{DD} ）；
 - 2) 在器件B栅极的脉冲发生器中设置一个脉冲信号，高电平为器件开通态的栅-源电压 V_{GS} ，低电平为器件关断态的栅-源电压（通常可设为0V或-5V），脉冲宽度为 t_{pSC} ；
 - 3) 在器件A栅极的脉冲发生器中设置一个信号，高电平为器件开通态的栅-源电压 V_{GS} ，在该电压下器件A允许通过的电流大于器件B在测试过程中所需的最大电流，低电平为器件关断态的栅-源电压（通常可设为0V或-5V）；
 - 4) 两个器件各自的开通态的栅极电阻 R_{G1} 和关断态的栅极电阻 R_{G2} 。
- k) 在漏极施加电压 V_{DS} ；
- l) 在器件A的栅极施加电压，开通器件A；
- m) 通过脉冲发生器在器件B的栅极施加脉冲；
- n) 在施加脉冲的过程中，对漏极电流 I_D 进行测试，判断应力是否正确地施加在器件B上；
- o) 依据表1对承受应力后的器件B进行测试，判断器件B是否失效，并将测试结果与承受应力前的测试结果进行对比。

8 数据记录和处理

应记录和处理的数据至少包含以下几方面：

- a) 记录在脉冲发生器中设置的脉冲宽度 t_{pSC} ，即短路耐受时间；
- b) 记录在脉冲施加过程中漏极电流 I_D 的最大值，即短路电流；
- c) 依据公式（1），计算短路能量 P 。

$$P = \int_{t_1}^{t_2} (V_{DS} \times I_D) dt \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

P ——短路能量；

t_1 —— t_{pSC} 的开始时间；

t_2 —— t_{pSC} 的结束时间；

V_{DS} —— t_{pSC} 时间段内的源漏电压；

I_D —— t_{pSC} 时间段内的漏极电流。

9 测试报告

测试报告至少应给出以下几个方面内容：

- a) 测试对象：
 - 1) 被测的功率模块；
 - 2) 被测功率模块中的功率器件。
- b) 样品数量；
- c) 所使用的标准；
- d) 所使用的方法；
- e) 测试条件；
- f) 各测试条件下的测试结论：
 - 1) 对于短路耐受时间验证测试，应给出在规定的短路耐受时间条件下，模块中的每个器件是否通过了测试；
 - 2) 对于极限短路耐受时间测试，应给出模块中每个器件的极限短路耐受时间测试结果和极限短路能量计算结果。
- g) 观察到的异常现象；
- h) 测试日期。

附 录 A
(资料性)

功率模块短路可靠性测试记录表

功率模块短路可靠性测试记录参考表A. 1。

表A. 1 功率模块短路可靠性测试记录表示例

样品名称				样品数量	
样品型号				批号/编号	
测试仪器仪表	仪器名称	型号	序列号	计量有效期	
测试依据的标准或文件					
测试地点				环境温、湿度	℃ %
测试原理		☐ 桥臂直通测试原理 ☐ 等效单管测试原理			
测试项目		半桥模块结构中器件A		半桥模块结构中器件B	
测试条件	源漏电压 V_{DS} :		源漏电压 V_{DS} :		
	器件开通态栅源电压 V_{GG1} :		器件开通态栅源电压 V_{GG1} :		
	器件关断态栅源电压 V_{GG2} :		器件关断态栅源电压 V_{GG2} :		
	器件开通态栅极电阻 R_{G1} :		器件开通态栅极电阻 R_{G1} :		
	器件关断态栅极电阻 R_{G2} :		器件关断态栅极电阻 R_{G2} :		
	脉冲宽度 t_{pSC} : (产品手册或详细规范等文件中的规定值)		脉冲宽度 t_{pSC} : (产品手册或详细规范等文件中的规定值)		
测试结果		是否通过测试	漏极电流 I_D 最大值	是否通过测试	漏极电流 I_D 最大值
样品序号	1	☐ 是 ☐ 否		☐ 是 ☐ 否	
	2	☐ 是 ☐ 否		☐ 是 ☐ 否	
	3	☐ 是 ☐ 否		☐ 是 ☐ 否	
		☐ 是 ☐ 否		☐ 是 ☐ 否	
观察到的异常现象					
测试人员签字				测试日期	

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
-