



团 体 标 准

T/CASAS 038—2026

SiC MOSFET 非钳位电感开关（UIS）测试 方法

Unclamped inductive switching (UIS) test method for silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor (SiC MOSFET) power device

2026 – 09 – 28 发布

2026 – 09 – 28 实施

目 次

前言..... II

引言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 测试原理..... 1

4.1 不同测试电路的测试原理..... 1

4.1.1 测试电路I..... 2

4.1.2 测试电路II..... 2

4.2 测试电路的选择..... 3

5 测试条件..... 3

5.1 测试环境条件..... 3

5.2 测试安全条件..... 3

5.3 测试设备要求..... 4

6 测试流程..... 4

6.1 测试流程概述..... 4

6.2 基于测试电路I的雪崩击穿能量验证测试流程..... 4

6.2.1 单脉冲雪崩击穿能量验证..... 4

6.2.2 重复雪崩击穿能量验证..... 6

6.3 基于测试电路II的雪崩击穿能量验证测试程序..... 6

6.3.1 单脉冲雪崩击穿能量验证..... 6

6.3.2 重复雪崩击穿能量验证..... 7

6.4 基于测试电路I的极限单脉冲雪崩击穿能量测试程序..... 8

6.5 基于测试电路II的极限单脉冲雪崩击穿能量测试程序..... 8

7 数据记录和处理..... 8

8 测试报告..... 8

附录 A（资料性） SiC MOSFET 非钳位电感开关（UIS）测试记录表..... 9

参考文献..... 10

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：北京华峰测控技术股份有限公司、东南大学、重庆大学、广东工业大学、浙江大学、芯迈半导体技术（杭州）股份有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、华润润安科技（重庆）有限公司、宁波达新半导体有限公司、杭州飞仕得科技股份有限公司、深圳平湖实验室、中国电力科学研究院有限公司、智新半导体有限公司、复旦大学宁波研究院、西安交通大学、安徽长飞先进半导体股份有限公司、杭州长川科技股份有限公司、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：周鹏、刘惠鹏、袁琰、魏家行、曾正、孙鹏、贺致远、任娜、孙钦华、陈媛、潘效飞、张海涛、刘伟、江雪晨、曾威、王小明、张雷、王民、孙博韬、王来利、刘晓钰、孙海洋、高伟。

引 言

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管（SiC MOSFET）具有工作频率高、阻断电压高、耐高温能力强、通态电阻低和开关损耗小等特点，在高频、高压功率系统中有着广泛的应用。目前，SiC MOSFET已被广泛地应用在开关功率转换器、开关电源、电机驱动等场景中，这些场景有着较高的 di/dt 和 dv/dt ，并且通常使用变压器等感性负载，线路自身也不可避免地具有寄生电感。高的 di/dt 与电感共同作用，会产生过高的感应电压，过压可能会损坏器件，造成电力电子电路的故障。

在器件遭遇的各种电压过压情况中，器件关断瞬间产生的反电动势迫使MOSFET进入雪崩击穿状态，即非钳位电感开关（UIS），被认为是器件遭遇的最恶劣的电应力情况。这种情况要求SiC MOSFET需具有一定的承受雪崩能量的能力，即在雪崩击穿状态下快速释放掉储存在电感中的能量而不损坏的能力。

为了对器件承受雪崩能量时的稳定性和可靠性进行评估，需要进行UIS测试，通常指对单脉冲雪崩击穿能量（EAS）和重复雪崩击穿能量（EAR）这两项可靠性参数的测试。EAS测试过程中的较大的能量在正常的工作状态下不会出现，EAR测试与正常工作状态更加相似。但为了提高测试效率，业界通常对EAS进行定义和测试。

UIS测试具有破坏性，对于器件的应用具有重要的意义。首先，一部分不合格的器件在UIS测试过程中会被打坏，从而被暴露出来；其次，对于通过了UIS测试的器件，还需要对这些器件进行其他参数的测试，确认这些器件是否有损坏或损伤，未通过其他参数测试的器件仍然会被筛选出来；最终，通过了其他参数测试的器件才能作为合格的器件。

SiC MOSFET 器件非钳位电感开关（UIS）测试方法

1 范围

本文件描述了SiC MOSFET器件非钳位电感开关(UIS)的测试方法,包括单脉冲雪崩击穿能量(EAS)和重复雪崩击穿能量(EAR)的测试原理、测试条件、测试流程、数据记录和处理、测试报告等内容。

本文件适用于SiC MOSFET分立器件在CP(Chip Probe)、KGD(Known Good Die)、FT(Final Test)、实验室研发等阶段的UIS测试。对于SiC MOSFET功率模块,可在将单管封装成模块前参照本文件对单管进行测试。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

非钳位电感开关 unclamped inductive switching
UIS

导通下关断器件,利用存储在感性负载的电感中的能量冲击器件,使未经电压钳位的器件进入雪崩击穿的过程。

3.2

单脉冲雪崩击穿能量 energy in avalanche, single pulse
EAS

单次雪崩状态下器件能够消耗的能量。

注:对单脉冲雪崩击穿能量的测试通常在器件量产过程中进行,其目的是在器件的产品手册或产品详细规范等文件中规定的雪崩击穿电流条件下,对器件能否承受住雪崩击穿能量而不损坏进行验证。其基本原理是将器件的产品手册或产品详细规范等文件中规定的雪崩击穿电流值设置到测试装置中,验证器件能否承受住雪崩击穿能量而不损坏。

3.3

极限单脉冲雪崩击穿能量 limit energy in avalanche, single pulse
Limit EAS

单次雪崩状态下器件能够消耗的能量最大值。

注:对极限单脉冲雪崩击穿能量的测试通常在器件的研发阶段进行,其目的是在雪崩击穿电流待定的条件下,通过测试得到器件的极限雪崩击穿能量。其基本原理是:在固定电感条件下,按照规定的雪崩击穿电流的初始值和步长,不断增加器件承受的雪崩击穿电流,当电流增加到某一值时器件被损坏,将该临界条件下的雪崩击穿能量作为器件的极限雪崩击穿能量。

3.4

重复雪崩击穿能量 energy in avalanche, repetitive pulse
EAR

重复雪崩状态下,器件单次能够消耗的能量。

3.5

极限雪崩击穿电流值 limit I_{AV}

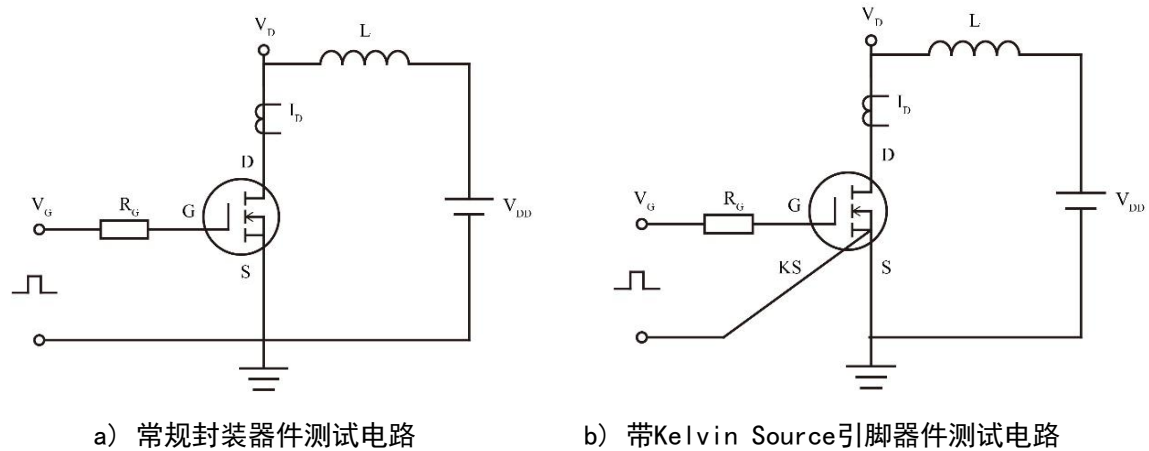
单次雪崩状态下器件能够承受的充电电流的最大值。

4 测试原理

4.1 不同测试电路的测试原理

4.1.1 测试电路 I

对SiC MOSFET器件进行UIS测试的测试电路 I 见图1。



a) 常规封装器件测试电路
b) 带Kelvin Source引脚器件测试电路

标引序号说明：
 L ——为电感；
 I_D ——为对漏极电流；
 V_D ——为充电电压；
 V_G ——为栅极电压；
 R_G ——为栅极电阻；

图1 测试电路 I

图1中测试电路 I 的测试原理是让器件处于导通状态，让充电电压对电感充电，然后在充电电流达到规定值后关断器件，让存储在电感中的能量被器件消耗，最后判断器件是否失效，并计算雪崩击穿能量。

使用测试电路 I 时，使用公式（1）计算雪崩击穿能量。

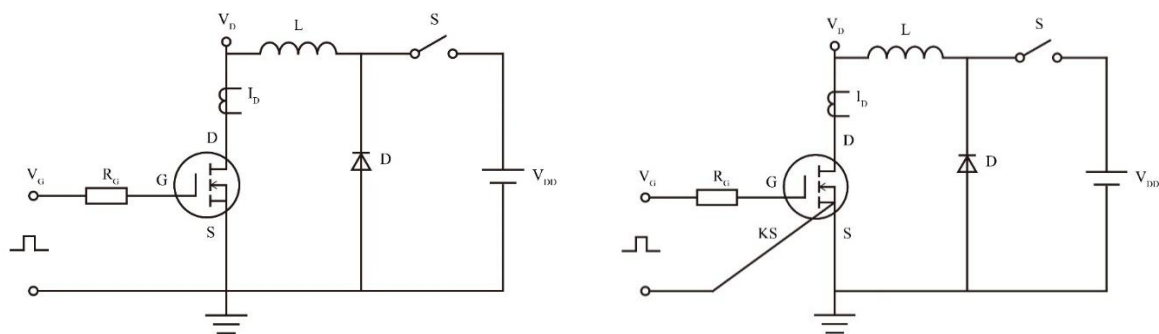
$$EAS = \frac{1}{2} \times I_{AV}^2 \times L \times \frac{V_{(AV)DSS}}{V_{(AV)DSS} - V_{DD}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 EAS ——雪崩击穿能量；
 I_{AV} ——充电电流的峰值；
 L ——电感值；
 $V_{(AV)DSS}$ ——雪崩击穿电压；
 V_{DD} ——充电电压。

注：若需对不同器件的雪崩击穿能量进行比较，应使用相同的电感进行测试和计算。

4.1.2 测试电路 II

测试电路 II 在测试电路 I 中增加了续流二极管和高速开关，见图2。图2中：



a) 常规封装器件测试电路

b) 带Kelvin Source引脚器件测试电路

L ——为电感；

I_D ——为对漏极电流进行监测的装置；

V_{DD} ——为充电电压；

V_G ——为栅极电压；

R_G ——为栅极电阻；

D ——为二极管；

S ——为高速开关。

图2 测试电路 II

测试电路 II 的测试原理是让器件处于导通状态，接通高速开关 S ，让充电电压对电感充电，然后在充电电流达到规定值后，断开高速开关 S ，同时关断器件，让存储在电感中的能量通过二极管被器件消耗，最后判断器件是否失效，并计算雪崩击穿能量。

注：由于测试设备严格同时地执行“断开高速开关 S ”和“将器件关断”这两项操作在工程上无法实现，建议先断开高速开关 S 。

使用测试电路 II 时，使用公式 (2) 计算雪崩击穿能量。

$$EAS = \frac{1}{2} \times I_{AV}^2 \times L \dots\dots\dots (2)$$

式中：

EAS ——雪崩击穿能量；

I_{AV} ——充电电流的峰值；

L ——电感值。

4.2 测试电路的选择

依据测试中使用的充电电压 V_{DD} 和器件击穿电压的大小关系，选择合适的测试电路：

- 若充电电压 V_{DD} 大于器件的产品手册或详细规范等文件中规定的器件击穿电压，则只能选择测试电路 II 进行测试；
- 若充电电压 V_{DD} 小于器件的产品手册或详细规范等文件中规定的器件击穿电压，或没有文件对器件的击穿电压进行规定，则可以从测试电路 I 和测试电路 II 中选择一种进行测试。

5 测试条件

5.1 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 %。

5.2 测试安全条件

在测试时，器件会面临炸机的风险，应在实验过程中注意满足以下安全条件：

- a) 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器件造成不可逆的损坏；

- b) 在被测器件上增加保护罩，避免器件炸机给测试人员造成伤害。

5.3 测试设备要求

测试设备会影响测试精度，测试设备应满足以下要求：

- a) 若使用本文件中的测试电路 I，需注意 V_{DD} 的取值对测试精度的影响，同时需注意测试过程中 V_{DD} 的衰减，建议在 V_{DD} 的衰减小于 5% 的条件下进行测试；
- b) 若使用本文件中的测试电路 II，由于测试设备严格同时地执行“断开高速开关 S”和“将器件关断”这两项操作在工程上无法实现，需注意两项操作的先后顺序对测试精度的影响。若先关断器件，则 V_{DD} 会持续对器件进行充电，可能会导致危险；若先断开高速开关，则电路中的电流会衰减，导致电感中能量开始被器件消耗时的电流实际值低于理论的 I_{AV} 值，建议在电流衰减不超过 2% 的条件下进行测试。

6 测试流程

6.1 测试流程概述

测试目的分为能量验证和极限值测试两种情况，测试电路有 I 和 II 两种选择，测试脉冲分为单脉冲和重复脉冲两种情况。根据测试目的、测试电路和测试脉冲的不同，测试流程分为 6 种情况，如表 1 所示。

表1 测试流程的 6 种情况

项目	能量验证	极限值测试
测试电路 I	单脉冲（EAS），见 6.2.1	单脉冲（Limit EAS），见 6.4
	重复脉冲（EAR），见 6.2.2	
测试电路 II	单脉冲（EAS），见 6.3.1	单脉冲（Limit EAS），见 6.5
	重复脉冲（EAR），见 6.3.2	

6.2 基于测试电路 I 的雪崩击穿能量验证测试流程

6.2.1 单脉冲雪崩击穿能量验证

基于测试电路 I 的单脉冲雪崩击穿能量验证按照如下流程进行测试：

- a) 根据 SiC MOSFET 单管功率器件的芯片或封装形式，选择合适的探针台或测试夹具；
- b) 按照表 2 对承受应力前的器件进行测试；

表2 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：USL：规格上限	
注2：LSL：规格下限	

- c) 在测试装置中设置以下测试参数：
- 1) 电感值 L ；
 - 2) 充电电压 V_{DD} ；
 - 3) 栅极电压 V_G ；
 - 4) 栅极电阻 R_G ；
 - 5) 充电电流的峰值 I_{AV} 。
- d) 施加充电电压 V_{DD} ，栅极施加电压 V_G ，使器件处于导通状态， V_{DD} 向电感充电；
- e) 对漏极电流 I_D 进行监测， I_D 达到规定的充电电流峰值 I_{AV} 时，将器件关断；

f) 使用下面的方法 1) 对器件是否失效进行初步判断, 若方法 1) 判断器件失效, 可直接判定器件失效; 若方法 1) 判断器件未失效, 则进一步使用下面的方法 2) 对器件是否失效进行准确判断, 最终以方法 2) 的判断结果为准:

1) 继续对漏极电流 I_D 进行监测, 使用公式 (3) 计算 t_{AV} , 判断器件关断后的 t_{AV} 时刻器件是否失效:

$$t_{AV} = \frac{I_{AV} \times L}{V_{(AV)DSS} - V_{DD}} \quad (3)$$

式中:

t_{AV} ——雪崩效应理论时间;

I_{AV} ——充电电流的峰值;

L ——电感值;

$V_{(AV)DSS}$ ——雪崩击穿电压;

V_{DD} ——充电电压。

若器件关断后的 t_{AV} 时刻, I_D 变为 0, 表明雪崩过程结束, 器件未失效, 器件未失效的一种典型波形图见图 3。

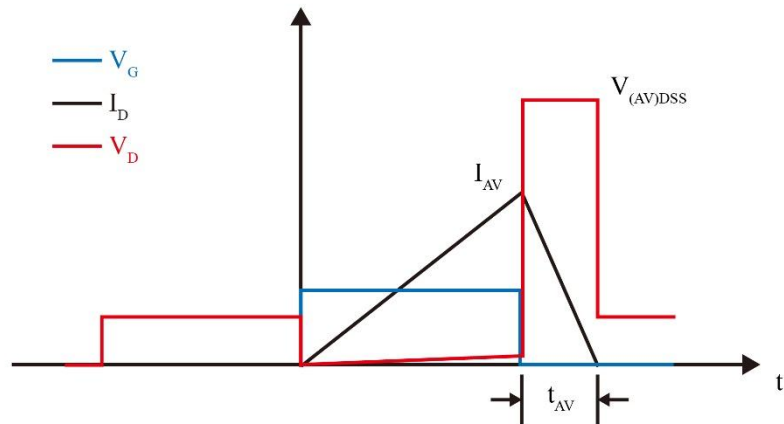


图3 器件通过测试的一种典型波形图

若器件关断后的 t_{AV} 时刻, I_D 仍然大于 0.1 倍的 I_{AV} , 表明器件失效, (器件失效的一种典型波形图见图 4, 其他失效波形以实际情况为准)。

注: 建议使用 I_{AV} 的 0.1 倍作为判定值, 特定器件可选用 I_{AV} 的其他倍数作为判定值。

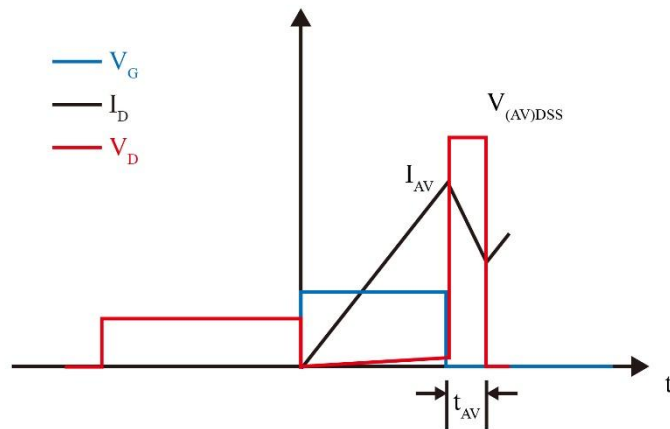


图4 器件未通过测试的一种典型波形图

2) 依据表 2 对承受应力后的器件进行测试, 并将测试结果与步骤 b) 中承受应力前的测试结果进行对比, 判断器件是否失效。

6.2.2 重复雪崩击穿能量验证

若基于测试电路 I 对重复雪崩击穿能量进行验证,则在6.2.1的基础上,将在栅极施加单次脉冲更换为在栅极施加周期性的脉冲并进行测试,并在测试过程中对结温进行探测。相邻两次脉冲的时间间隔 T 应确保施加周期性脉冲过程中器件结温接近最高结温并保持稳定。若时间间隔 T 较长,器件在每次脉冲后均能回到起始结温,则无法测得重复雪崩击穿能量。

在步骤f)中,按照第1)种方法对器件是否失效进行判断时,若器件未失效,一种典型波形见图5。

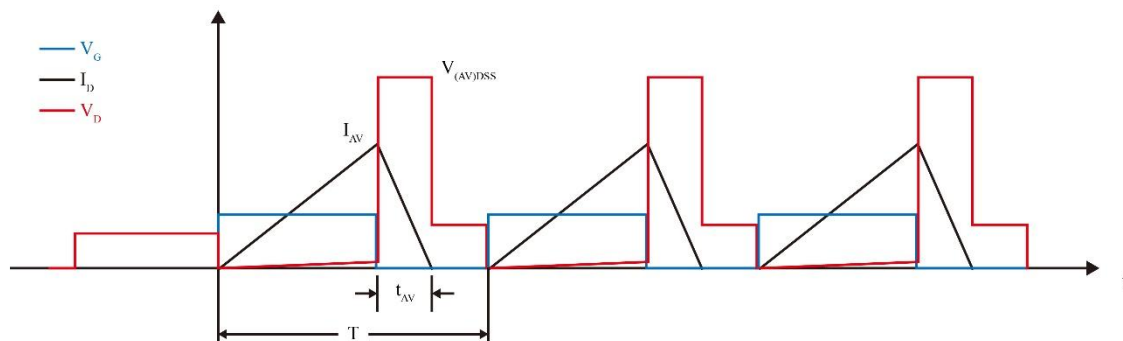


图5 器件通过测试的一种典型波形图

6.3 基于测试电路 II 的雪崩击穿能量验证测试程序

6.3.1 单脉冲雪崩击穿能量验证

基于测试电路 II 的单脉冲雪崩击穿能量验证按照如下流程进行测试:

- 根据 SiC MOSFET 单管功率器件的芯片或封装形式,选择合适的探针台或测试夹具;
- 按照与 6.2.1 相同的要求,对承受应力前的器件进行测试,在测试装置中设置测试参数;
- 施加充电电压 V_{DD} ,在栅极施加电压 V_G ,使器件处于导通状态,接通高速开关 S, V_{DD} 向电感充电;
- 对漏极电流 I_D 进行监测, I_D 达到规定的充电电流峰值 I_{AV} 时,断开高速开关 S,将器件关断;
- 使用下面的方法 1) 对器件是否失效进行初步判断,若方法 1) 判断器件失效,可直接判定器件失效;若方法 1) 判断器件未失效,则进一步使用下面的方法 2) 对器件是否失效进行准确判断,最终以方法 2) 的判断结果为准从以下两种方法中,选择一种,对器件是否失效进行判断:
 - 继续对漏极电流 I_D 进行监测,使用公式(4)计算 t_{AV} ,判断器件是否失效:

$$t_{AV} = \frac{I_{AV} \times L}{V_{(AV)DSS}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

t_{AV} ——雪崩效应理论时间;

I_{AV} ——充电电流的峰值;

L ——电感值;

$V_{(AV)DSS}$ ——雪崩击穿电压。

若器件关断后的 t_{AV} 时刻, I_D 变为0,表明雪崩过程结束,器件未失效,器件未失效的典型波形图见图6。

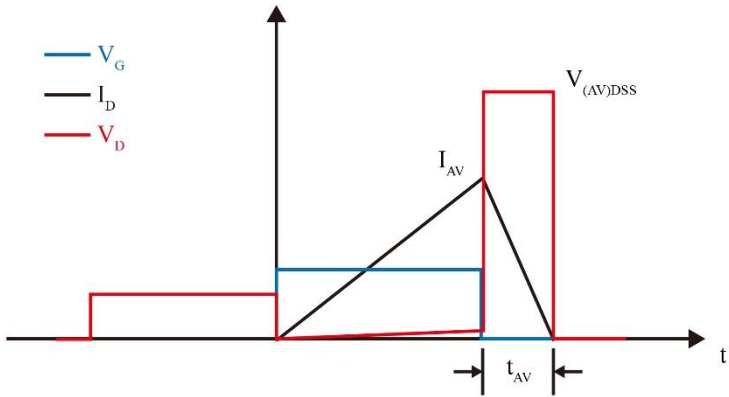


图6 器件通过测试的一种典型波形图

若器件关断后的 t_{AV} 时刻， I_D 仍然大于0.1倍的 I_{AV} ，表明器件失效（器件失效的一种典型波形图见图7，其他失效波形以实际情况为准）。

注：建议使用 I_{AV} 的0.1倍作为判定值，特定器件可选用 I_{AV} 的其他倍数作为判定值。

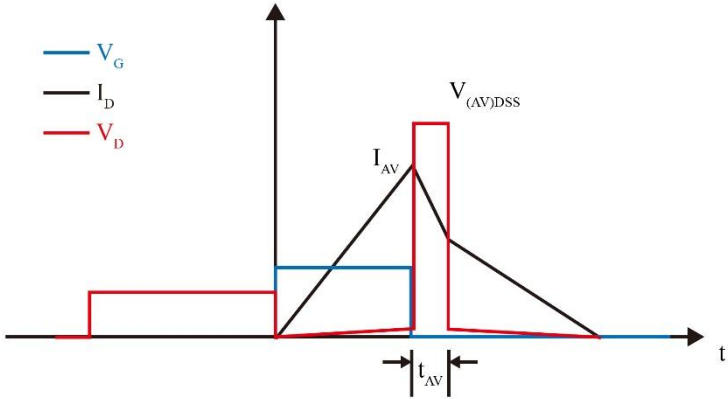


图7 器件未通过测试的一种典型波形图

- 2) 按照与 6.2.1 相同的要求，依据表 2 对承受应力后的器件进行测试，并将测试结果与步骤 b) 中承受应力前的测试结果进行对比，判断器件是否失效。

6.3.2 重复雪崩击穿能量验证

若基于测试电路 II 对重复雪崩击穿能量进行验证，则在6.3.1的基础上，将在栅极施加单次脉冲更换为在栅极施加周期性的脉冲并进行测试。相邻两次脉冲的时间间隔 T 应确保施加周期性脉冲过程中器件结温接近最高结温并保持稳定。

在步骤e) 中，按照第1) 种方法对器件是否失效进行判断时，若器件未失效，一种典型波形见图8。

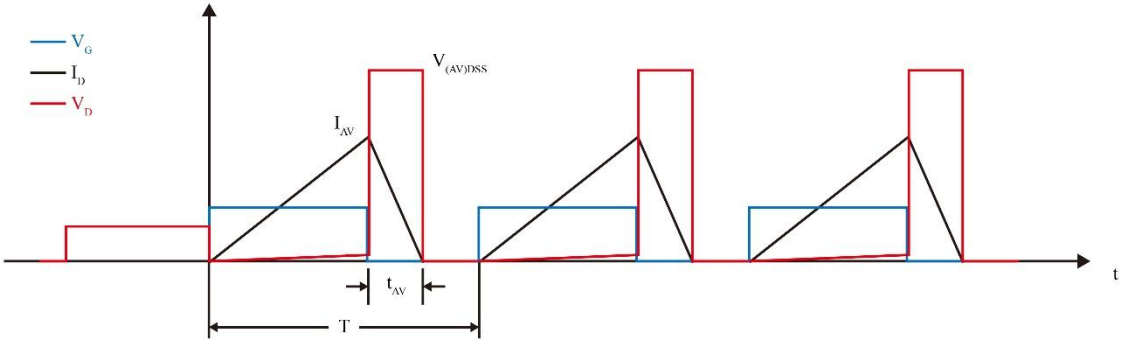


图8 器件通过测试的一种典型波形图

6.4 基于测试电路 I 的极限单脉冲雪崩击穿能量测试程序

基于测试电路 I 的极限单脉冲雪崩击穿能量按照如下流程进行测试：

- a) 根据 SiC MOSFET 单管功率器件的芯片或封装形式，选择合适的探针台或测试夹具；
- b) 在测试装置中设置充电电流峰值 I_{AV} 的初始值 I_{AV0} ，其他测试参数与 6.2.1 相同；
- c) 施加充电电压 V_{DD} ，在栅极施加电压 V_G ，使器件处于导通状态， V_{DD} 向电感充电；
- d) 对漏极电流 I_D 进行监测， I_D 达到充电电流峰值 I_{AV} 的初始值 I_{AV0} 时，将器件关断；
- e) 按照与 6.2.1 相同的判断方法，对器件是否失效进行判断：
 - 1) 若器件未失效，则回到步骤 b)，将 I_{AV} 增加一个步长 ΔI_{AV} 并等待器件结温及器件的电性能回到初始值起始结温后，再继续进行测试；
 - 2) 若器件失效，则记录此时的 I_{AV} ，作为器件的极限雪崩击穿电流值 Limit I_{AV} 。

6.5 基于测试电路 II 的极限单脉冲雪崩击穿能量测试程序

基于测试电路 II 的极限单脉冲雪崩击穿能量按照如下流程进行测试：

- a) 根据 SiC MOSFET 单管功率器件的芯片或封装形式，选择合适的探针台或测试夹具；
- b) 在测试装置中设置充电电流峰值 I_{AV} 的初始值 I_{AV0} ，其他测试参数与 6.3.1 相同；
- c) 施加充电电压 V_{DD} ，在栅极施加电压 V_G ，使器件处于导通状态，接通高速开关 S， V_{DD} 向电感充电；
- d) 对漏极电流 I_D 进行监测， I_D 达到充电电流峰值 I_{AV} 的初始值 I_{AV0} 时，断开高速开关 S，将器件关断；
- e) 按照与 6.3.1 相同的判断方法，对器件是否失效进行判断：
 - 1) 若器件未失效，则回到步骤 b)，将 I_{AV} 增加一个步长 ΔI_{AV} ，并等待器件结温及器件的电性能回到起始结温初始值后，再继续进行测试；
 - 2) 若器件失效，则记录此时的 I_{AV} ，作为器件的极限雪崩击穿电流值 Limit I_{AV} 。

7 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) 记录在测试中使用的充电电流峰值 I_{AV} ，即雪崩击穿电流值；
- b) 依据雪崩击穿电流 I_{AV} 等参数，计算雪崩击穿能量 EAS。

8 测试报告

测试报告至少应给出以下几个方面的内容：

- a) 测试对象；
- b) 样品器件数量；
- 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) 对于雪崩击穿能量验证测试，应给出在规定的充电电流峰值条件下，器件是否通过了测试；
 - 2) 对于极限雪崩击穿能量测试，应给出器件的极限雪崩击穿电流值 Limit I_{AV} 和极限雪崩击穿能量测试结果。
- g) 观察到的异常现象；
- h) 测试日期。

附 录 A
(资料性)

SiC MOSFET 非钳位电感开关 (UIS) 测试记录表

SiC MOSFET非钳位电感开关 (UIS) 测试记录参考表A.1。

表A.1 SiC MOSFET 非钳位电感开关 (UIS) 测试记录表示例

器件名称				器件数量	
器件型号				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	℃ %
测试电路		☐ 测试电路 I ☐ 测试电路 II			
测试项目	能量验证			极限值测试	
	☐ EAS	☐ EAR		☐ Limit EAS	
测试条件	电感 L :			电感 L :	
	充电电压 V_{DD} :			充电电压 V_{DD} :	
	栅极开通电压 $V_{G(ON)}$:			栅极开通电压 $V_{G(ON)}$:	
	栅极关断电压 $V_{G(OFF)}$:			栅极关断电压 $V_{G(OFF)}$:	
	栅极电阻 R_G :			栅极电阻 R_G :	
	充电电流峰值 I_{AV} : (产品手册或详细规范等文件中的规定值)			充电电流峰值初始值 I_{AV0} :	
	脉冲时间间隔 T : (仅EAR测试需记录)			充电电流峰值步长 ΔI_{AV} :	
测试结果		是否通过测试		极限雪崩击穿电流 Limit I_{AV}	
样品序号	1	☐ 是	☐ 否		
	2	☐ 是	☐ 否		
	3	☐ 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] 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
- [2] 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
- [3] IEC 60747-8—2010 Semiconductor devices—Discrete devices—Part 8: Field-effect transistors
- [4] MIL-STD-750E METHOD 3470.2 SINGLE PULSE UNCLAMPED INDUCTIVE SWITCHING