

团 体 标 准

T/CASA 007—2020

电动汽车用碳化硅 (SiC) 场效应晶体管 (MOSFET) 模块评测规范

Test Specification for Silicon Carbide (SiC) Field-effect Transistors
(MOSFET) Module of Electric Vehicles

(委员会草案)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

北京第三代半导体产业技术创新战略联盟发布

目 次

前 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 要求.....	1
4.1 外观及安装尺寸.....	1
4.2 材料.....	1
4.3 额定值（极限值）.....	2
4.4 性能参数.....	2
4.5 评测程序及方法.....	3
4.6 合格文件和标记.....	5
4.7 检验批的构成.....	5
4.8 产品检验的类别.....	5
4.9 例行试验.....	5
4.10 型式试验.....	5
附录 A（规范性附录）性能参数测试方法.....	6
附录 B（规范性附录）稳态热阻测试方法.....	19
附录 C（规范性附录）评测试验方法.....	23

前 言

本规范按照 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

随着电动汽车行业的迅猛发展，对驱动系统的小型化和轻量化提出了更高的要求。基于 SiC 的方案使电动汽车驱动系统效率更高、重量更轻及结构更加紧凑，近几年已经逐渐在电动汽车行业得到应用。然而，目前国内外尚无针对 SiC 功率器件的规范和标准，缺少电动汽车行业 SiC MOSFET 模块的统一指导性文件，影响了 SiC MOSFET 模块在电动汽车行业的通用化。

本规范针对电动汽车用的 SiC MOSFET 模块，从性能参数、评测程序等方面对 SiC MOSFET 模块进行了规范，可以用于电动汽车行业对 SiC MOSFET 模块的初步评价。本规范由第三代半导体产业技术创新战略联盟标准化委员会（CASAS）制定发布，版权归 CASA 所有，未经 CASA 许可不得随意复制；其他机构采用本规范规范的技术内容制定标准需经 CASA 允许；任何单位或个人引用本规范规范的内容需指明本规范规范的标准号。

到本规范规范正式发布为止，CASAS 未收到任何有关本规范规范涉及专利的报告。CASAS 不负责确认本规范规范的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本规范规范主要起草单位：中国电子科技集团公司第五十五研究所、中国科学院电工研究所、浙江大学、扬州国扬电子有限公司、天津大学。

本规范规范主要起草人：滕鹤松、温旭辉、郭清、王玉林、张瑾、邵帅、牛利刚、吴维丽、梅云辉。

电动汽车用碳化硅 (SiC) 场效应晶体管 (MOSFET) 模块评测规范

1 范围

本规范规定了电动汽车用 SiC MOSFET 模块（以下简称 SiC 模块）参数性能、技术要求、评测要求、试验方法及测试方法等。

本规范适用于电动汽车用 SiC 模块的生产、检验和交付的依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本规范的引用而成为本规范的条款。凡是注日期的引用文件，其随后修订版均不适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本规范。

GB/T 2423.1-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 A：低温

GB/T 2423.2-2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 B：高温

GB/T 2423.5-2019 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 Ea 和导则：冲击

GB/T 2423.10-2019 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 Fc：振动(正弦)

GB/T 2423.22-2012 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 N：温度变化

GB/T 2423.50-2012 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 Cy：恒定温热

IEC 60747-2:2000 Semiconductor devices – Discrete devices and integrated circuits – Part 2: Rectifier diodes

IEC 60747-8:2010 Semiconductor devices – Discrete devices – Part 8: Field-effect transistors

SJ/T 11363-2006 电子信息产品中有毒有害物质的限量要求

3 术语和定义

GB/T 4856-1994 中界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

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，封装在一个绝缘壳体内或采用塑料封装，实现半导体分立器件功能的模块。

4 要求

4.1 外观及安装尺寸

SiC 模块表面应完整，无氧化，无变形，无破损，无裂纹等缺陷。安装尺寸应符合产品图样或订货合同要求。

4.2 材料

SiC模块所有的材料应符合相关文件规定或用户要求。所有的材料铅Pb、镉Cd、汞Hg、六价铬Cr6+、多溴二苯醚PBDE、多溴联苯PBB等有害物质，含量不超过SJ/T 11363—2006 限量要求。

4.3 额定值（极限值）

SiC模块应规定整个温度范围内适用的额定值，见表1。

表 1 额定值（极限值）

序号	名称	文字符号	单位
1	漏-源电压	V_{DS}	V
2	正向栅-源电压	V_{GSF}	V
3	反向栅-源电压	V_{GSR}	V
4	栅-漏电压	V_{GD}	V
5	漏极电流	I_D	A
6	峰值漏极电流（规定脉冲条件下）	$I_{D(pulse)}$	A
7	二极管正向电流	I_{SD}	A
8	最低和最高贮存温度	T_{stg}	°C
9	最低和最高工作温度（环境或壳温）	T_{case}	°C
10	等效结温	T_{vj}	°C
11	功率耗散	P_{tot}	W

4.4 性能参数

除另有规定外，SiC模块性能测试项目至少包括表2的规定，接受判据和测量方法见表2。

表 2 性能参数、接受判据及测量方法

序号	参数	符号	接受判据	测量方法	例行试验	型式试验
1	漏-源击穿电压	$V_{(BR) DSS}$	$V_{(BR) DSS} > LSL$	附录A.1	▲	▲
2	栅-源阈值电压	$V_{GS(th)}$	$LSL < V_{GS(th)} < USL$	附录A.2	▲	▲
3	栅-源短路时($V_{GS}=0$)的漏极电流	I_{DSS}	$I_{DSS} < USL$	附录A.3	▲	▲
4	漏-源短路时，栅极漏泄电流	I_{GSS}	$I_{GSS} < USL$	附录A.4	▲	▲
5	漏-源通态电阻	$r_{DS(on)}$	$r_{DS(on)} < USL$	附录A.5	▲	▲
6	正向跨导	g_{fs}	$LSL < g_{fs} < USL$	附录A.6	▲	▲
7	共源极短路输入电容；栅-源电容(漏-源交流短路)	C_{iss}	$LSL < C_{iss} < USL$	附录A.7	▲	▲
8	共源极短路输出电容；漏-源电容(栅-源交流短路)	C_{oss}	$LSL < C_{oss} < USL$	附录A.8	▲	▲
9	输入交流短路时的共源极反馈电容	C_{rss}	$LSL < C_{rss} < USL$	附录A.9	▲	▲
10	内部栅极电阻	r_g	$LSL < r_g < USL$	附录A.10	▲	▲
11	栅平台电荷	$Q_{GS(pl)}$	$LSL < Q_{GS(pl)} < USL$	附录A.11	▲	▲
12	栅-漏电荷	Q_{GD}	$LSL < Q_{GD} < USL$	附录A.11	▲	▲

13	总栅电荷	Q_G	$LSL < Q_G < USL$	附录A.11	▲	▲
14	开启延迟时间	$t_{d(on)}$	$t_{d(on)} < USL$	附录A.12	▲	▲
15	上升时间	t_r	$t_r < USL$	附录A.12	▲	▲
16	关断延迟时间	$t_{d(off)}$	$t_{d(off)} < USL$	附录A.12	▲	▲
17	下降时间	t_f	$t_f < USL$	附录A.12	▲	▲
18	开启能量	E_{on}	$E_{on} < USL$	附录A.13	▲	▲
19	关断能量	E_{off}	$E_{off} < USL$	附录A.14	▲	▲
20	二极管正向压降	V_{SD}	$V_{SD} < USL$	附录A.15	▲	▲
21	绝缘测试电压	V_{isol}	$V_{isol} > LSL$		▲	▲
22	结-壳热阻（MOSFET） ^{注a}	R_{thJC-M}	$R_{thJC-M} < USL$	附录B		▲
23	结-壳热阻（DIODE） ^{注a}	R_{thJC-D}	$R_{thJC-D} < USL$	附录B		▲
24	结-流体热阻（MOSFET） ^{注a}	$R_{thJFC-M}$	$R_{thJFC-M} < USL$	附录B		▲
25	结-流体热阻（DIODE） ^{注a}	$R_{thJFC-D}$	$R_{thJFC-D} < USL$	附录B		▲

注a：SiC模块内部包含MOSFET芯片、二极管芯片时，应分别对热阻进行测试；当模块的散热结构包括pin fin时，不需要测量结-壳热阻，但需要测量结-流体热阻。

注1：USL——模块厂商数据手册上限值；LSL——模块厂商数据手册下限值。

注2：由于某些失效机理引起的特性变化可完全或部分地被其他测量的影响掩盖，宜以表2列出的顺序测量特性。这些特性通常在公开的详细规范中给出。它们可能超出初始产品试验规定值。

4.5 评测程序及方法

除非另有规定，否则模块的评测程序及方法应当按照表3进行。表3中各项评测程序前后均应当按照表4完成相应的测试，并记录。

表3 评测程序及方法

序号	试验项目	试验条件	试验方法	允许失效数
1	高温阻断	$T_a = T_{j\max} - T_{(P_V)}^a$, $V_{GS}=0V, V_{DS} \geq 80\% V_{DS\max}$, $\geq 1000\text{hrs}$	附录 C.1	0
2	高温门极偏置 (+) ^b	$T_a = T_{j\max}$, $V_{DS}=0V, V_{GS}=+V_{GS\max}$, $\geq 1000\text{hrs}$	附录C.2	0
3	高温门极偏置 (-) ^b	$T_a = T_{j\max}$, $V_{DS}=0V, V_{GS}=-V_{GS\max}$, $\geq 1000\text{hrs}$	附录C.2	0
4	高温高湿反偏	$T_a=85^\circ\text{C}, \text{RH}=85\%$, $V_{GS}=0V, V_{DS}=80\% V_{DS\max}$, $\geq 1000\text{hrs}$	GB/T 2423.50-2012	0
5	间歇工作寿命（秒级）	$\Delta T_j = 60^\circ\text{C}, T_{j\min} = T_{j\max} - 60^\circ\text{C}$ $0.5s < t_{\text{cycle}} < 5s$ $150\,000\text{cycles}$	附录C.3	0

6	间歇工作寿命（分钟级）	$\Delta T_C = 60^\circ\text{C}$, $T_{C\min} = 50^\circ\text{C}$, $1\text{min} < t_{\text{cycle}} < 6\text{min}$ 15 000cycles		0
7	低温贮存	$T_a = T_{\text{stg,min}} \leq -40$ 1000hrs	GB/T 2423.1-2008	0
8	高温贮存	$T_a = T_{\text{stg,max}} \geq 125$ 1000hrs	GB/T 2423.2-2008	0
9	温度冲击	$T_{\text{stg,min}} \sim T_{\text{stg,max}}$ $T_{\text{change}} < 30\text{s}$, $T_{\text{stg}} > 20\text{min}$, $N_c > 1000\text{cycles}$	GB/T 2423.22-2002	0
10	振动	正弦波, $5 \sim 200\text{Hz}$, 5g , X/Y/Z 每方向30hrs	GB/T 2423.10-2008	0
11	机械冲击	半正弦波, 30g , 18ms , X/Y/Z 每方向3次	GB/T 2423.5-1995	0
12	引出端可焊性	$235 \pm 5^\circ\text{C}$, $t = 10 \pm 1\text{s}$	GB/T 2423.28-2005	0
13	耐焊接热	$260 \pm 5^\circ\text{C}$, $t = 10 \pm 1\text{s}$	GB/T 2423.28-2005	0
注 ^a T_{Pv} 定义为由于器件漏电流引起的温升。				
注 ^b 每模块抽测1/2数量的MOSFET器件。				

表4 模块测试

序号	试验项目	阶段	外观 检验	焊层超 声检查	静态电参 数测试	动态电参 数测试	热阻 测试	短路 测试	绝缘耐压 测试
1	高温反向偏压	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
2	高温栅极偏压（+）	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
3	高温栅极偏压（-）	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
4	高温高湿反偏	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
5	功率循环（秒级）	0c	▲		▲	▲	▲	▲	▲
		失效/ 150 000c	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
6	功率循环（分钟级）	0c	▲		▲	▲	▲	▲	▲
		失效/ 15 000 c	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
7	低温贮存	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
8	高温贮存	0h	▲		▲	▲		▲	▲
		1000h	▲		▲	▲		▲	▲
9	温度冲击	0h	▲		▲	▲	▲	▲	▲

		500h	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
		1000h	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
10	振动	试验前	▲		▲	▲		▲	▲
		试验后	▲		▲	▲		▲	▲
11	机械冲击	试验前	▲		▲	▲		▲	▲
		试验后	▲		▲	▲		▲	▲
注：试验及测试环境条件：①温度 T：18℃~28℃；②相对湿度：50%±15%									

4.6 合格文件和标记

每只模块应经检验合格后才能出厂，并附有证明产品质量合格证或标记。

4.7 检验批的构成

检验批应由同一型号的模块构成，这些模块应是在六周的批累积期内封装生产的。

4.8 产品检验的类别

试验分为例行试验、型式试验两种。例行试验的项目按4.9，型式试验的项目按4.10，未规定时按表2、表3和表4进行评测。

4.9 例行试验

SiC模块的例行试验适用于现行生产或交付的产品，应至少按表2所列例行试验项目（热阻除外）进行100%试验，以验证SiC模块满足参数表中规定的额定值（极限值）和特性。

4.10 型式试验

SiC模块的型式试验适用于新研制产品，应至少按照表2所列型式试验项目进行试验，并应至少按照表3和表4所列项目进行评测。

附录 A
（规范性附录）
性能参数测试方法

A.1 漏-源击穿电压 ($V_{(BR)DSS}$) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.1)

-目的

为了测量在特定条件下漏极到源极的击穿电压。

-电路原理图

如图 A.1 所示。

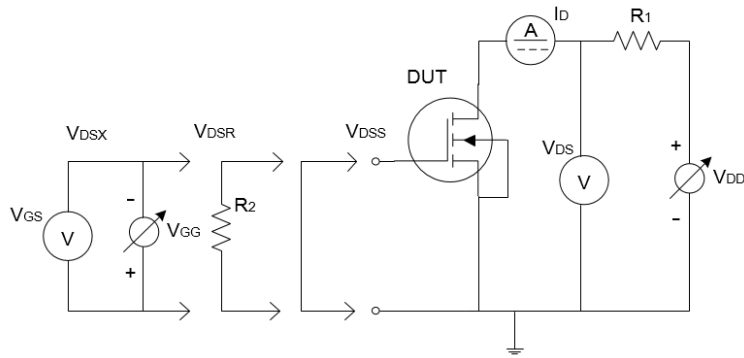


图 A.1 测量漏-源击穿电压的电路原理图

-电路描述和基本条件

V_{DD} 和 V_{GS} 是直流电源， R_1 是电路保护电阻。

-测量步骤

栅-源极被设为特定的偏置情况，增加 V_{DD} 直到电流表 A 测量到关闭状态下漏极电流达到特定的值 I_{DS} 。击穿电压 V_{DS} 由电压表 V 测得。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 栅-源极偏置情况:
 - sx:施加栅-源极电压;
 - sr:电阻连接到栅-源极之间 (R_2);
 - ss:栅-源极短路。
- 关断状态下最大漏极电流 $I_{DS*,max}$ 。

A.2 栅-源关断电压 ($V_{GS(off)}$) (类型 A 和 B)，栅-源阈值电压 ($V_{GS(th)}$) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.2)

-目的

为了测量在特定条件下栅极到源极的关断电压。

-电路原理图

如图 A.2 所示。

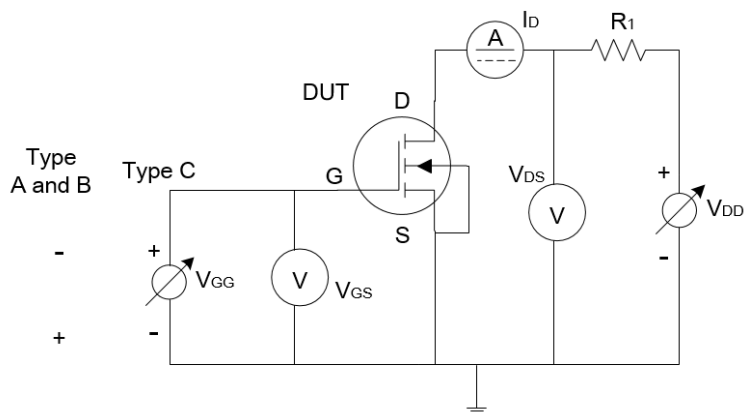


图 A.2 测量漏-源关断电压和阈值电压的电路原理图

-电路描述和基本条件

V_{DD} 和 V_{GG} 是直流电源， R_1 是电路保护电阻。

-测量步骤

施加一定的漏-源极电压后，将栅-源极电压调整为当漏极电流等于特定值时的值。 V_{GS} 测量的电压分别是栅-源极关断电压（类型 A 和 B）和栅-源极阈值电压（类型 C）。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ；
- 漏-源极电压 V_{DS} ；
- 漏极电流 I_{DS} 。

A.3 漏极漏电流（直流）（ I_{DS*} ）（类型 C），漏极截止电流（直流）（ I_{DSX} ）（类型 A 和 B）（idt IEC 60747-8:12010 6.3.3）

-目的

为了测量在特定条件下漏极（关断状态下）漏电流（直流） I_{DS*} 或在施加栅-源电压条件下漏极截止电流（直流） I_{DSX} 。

注：* = R, S 或 X

-电路原理图

如图 A.3 所示。

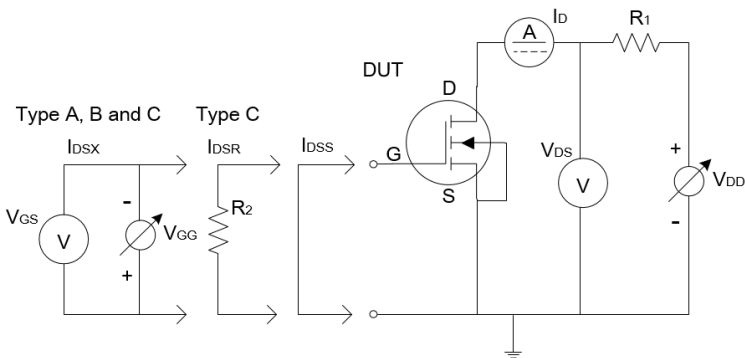


图 A.3 测量漏极（关断状态下）漏电流和漏极截止电流的电路原理图

-电路描述和基本条件

V_{DD} 和 V_{GG} 是直流电源， R_1 是电路保护电阻。

-测量步骤

栅-源极设置为特定的偏置条件。增加 V_{DD} 直到通过电压表 V_{DS} 测量的漏-源极电压达到特定值为止。

通过电流表漏极（关断状态下）漏电流 I_D 。如果需要，可以根据公式 $r_{DS(off)} = V_{DS} / I_{Dx}$ 计算 $r_{DS(off)}$ 。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 栅-源极偏置情况:
 - s_x :施加栅-源极电压;
 - s_r :电阻连接到栅-源极之间 (R_2);
 - s_s :栅-源极短路。
- 漏-源极电压: 小于击穿电压。

A.4 栅极截止电流 (I_{GS*}) (类型 A), 栅极漏电流 (I_{GS*}) (类型 B 和 C) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.4)

-目的

为了测量在特定条件下栅极截止电流或栅极漏电流。

-电路原理图

如图 A.4 所示。

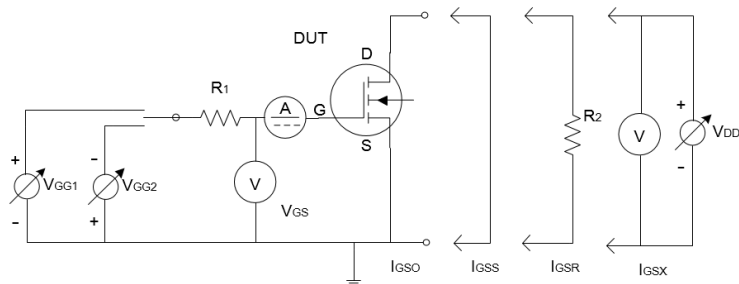


图 A.4 测量栅极截止电流或栅极漏电流的电路原理图

-电路描述和基本条件

整个电路应放置在静电屏蔽内。电流表 A 的电压降取决于内部电阻, 并且 I_{GS} 的值应小于 V_{GS} 的 1%。

-测量步骤

将漏-源极设置为指定的偏置条件。增加 V_{GG} , 直到在电压表 V_{GS} 上测得的栅-源极电压达到指定的栅-源极电压 V_{GS*} 。栅极截止电流或栅极漏电流在电流表 A 上测量。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 漏-源极偏置情况;
- I_{GSx} 在类型 B 和 C 下仅应用于反向偏置 V_{GG2} ;
- 栅-源极电压: 类型 A 仅应用于反向偏置 V_{GG2} 。

A.5 (静态) 漏-源通态电阻($r_{DS(on)}$)或漏-源通态电压($V_{DS(on)}$) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.5)

-目的

为了测量在特定耗散不可忽略条件下的漏-源通态电阻或漏-源通态电压。

-电路示意图

如图 A.5.1 所示。

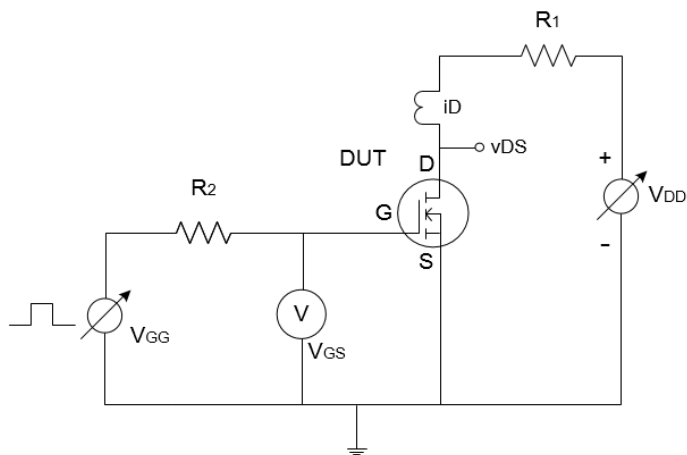


图 A.5.1 测量漏-源通态电阻基本电路图

-电路描述与基本条件

V_{DD} 是一个栅脉冲发生器。 V_{DD} 是可变电压源，提供漏-源极电流。 R_1 是保护电阻。

-测量步骤

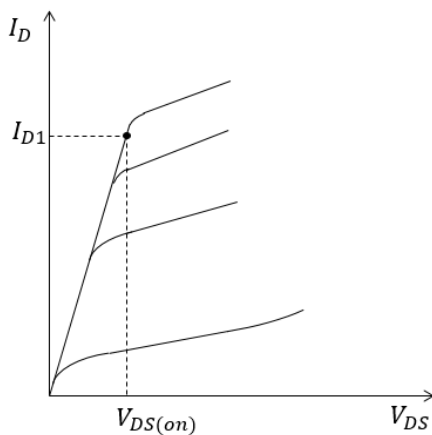


图 A.5.2 通态电阻

调节温度至额定值。设置 V_{GS} 为额定值。在漏极施加一电流脉冲，使其在正向特性曲线的线性部分（见图 A.5.2）。测量 I_{D1} 与 $V_{DS(on)}$ 。通过公式 $r_{DS(on)} = V_{DS(on)} / I_{D1}$ 计算 $r_{DS(on)}$ 。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 漏-源电压或漏极电流;
- 栅-源电压。

A.6 小信号短路正向跨导（A、B、C 型）（idt IEC 60747-8:2010 6.3.16）

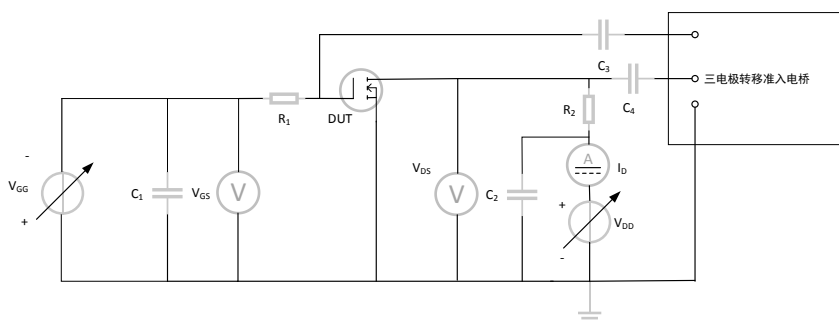
-目的

在特定条件下测量小信号短路正向跨导。

方法 1：零点法

-电路示意图

如图 A.6.1 所示。

图 A.6.1 短路正向跨导 g_{fs} 测量电路(方法 1: 零点法)**-电路描述与基本条件**

所有施加的偏置电源电压应在测量频率下充分解耦。 ωC_1 的值要远大于 $|y_{is}|$ ， ωC_2 的值要远大于 $|y_{os}|$ 。为了不影响测量的准确性， R_1 应远大于电桥的内部阻抗， R_2 应远大于传感器的内阻，但仍应远小于 $1/y_{fs}$ ，以免影响测量灵敏度。 ωC_3 与 ωC_4 要远大于 $|y_{fs}|$ 。电压表 V_{DS} 的内阻要远大于 V_{DS}/I_D 。这种方法需要一个三极传输导纳电桥，它的优点是 g_{fs} 能够在低频条件下测得， $y_{fs} = g_{fs} + jb_{fs}$ 能在高频条件下测得。此外，它保证了输出端的真正短路。

-测量步骤

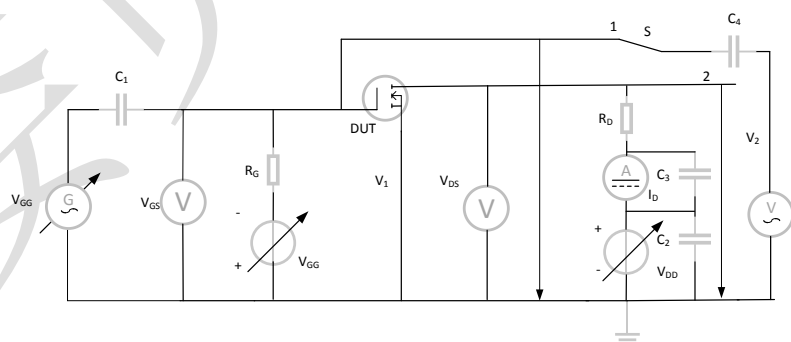
在测量电路中没有被测件的情况下，对电桥进行零点调整。然后将需要测量的器件放到电路中； V_{DS} 和 V_{GS} （或者 I_D ）调整到特定值，此时电桥平衡，可以得到 g_{fs} 、 $\text{Re}(y_{fs})$ 、 $\text{Im}(y_{fs})$ 的值。

-额定条件

- 参考点或结温 T_{vj} ；
- 漏源电压 V_{DS} ；
- 门极与源极的电压 V_{GS} 或者漏极电流 I_D ；
- 测量频率 f 。

方法 2: 双电压表法**-电路示意图**

如图 A.6.2 所示。

图 A.6.2 短路正向跨导 g_{fs} 测量电路(方法 2: 双电压表法)**-电路描述与基本条件**

应使用合适的振荡器，其频率应足够低。阻抗 ωC_3 和 ωC_2 要远大于 $1/R_D$ 。 ωC_1 的值也要很大。电阻 R_G 的值并不重要，但最好不要太大。电阻 R_D 需要小于 $\left| \frac{1}{y_{os}} \right|$ 。电压表 V 应具有足够的灵敏度；对于低 g_{fs} 值的测量，需要精密的测量仪器。这种方法只是简单地测量 y_{fs} 的模量，对于足够低的频率，它与 g_{fs} 相同。

-测量步骤

将被测件设置在测量电路中； V_{DS} 和 V_{GS} （或者 I_D ）调整到特定值。当开关 S 在位置 1 时， $V_1 = V_{gs}$ ；当开关 S 在位置 2 时， $V_2 = I_D R_D$ 。

此时：

$$|y_{fs}| \approx \frac{I_D}{V_{GS}} = \frac{V_2}{V_1 R_D}$$

对于足够低的频率： $|y_{fs}| \approx g_{fs}$

-额定条件

- 参考点或结温 T_{vj} ；
- 漏源电压 V_{DS} ；
- 门极与源极的电压 V_{GS} 或者漏极电流 I_D ；
- 测量频率 f 。

A.7 共源短路输入电容 (C_{iss}) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.10)

-目的

为了测量在特定条件下待测器件（DUT）的输入电容。

-电路示意图

如图 A.7 所示。

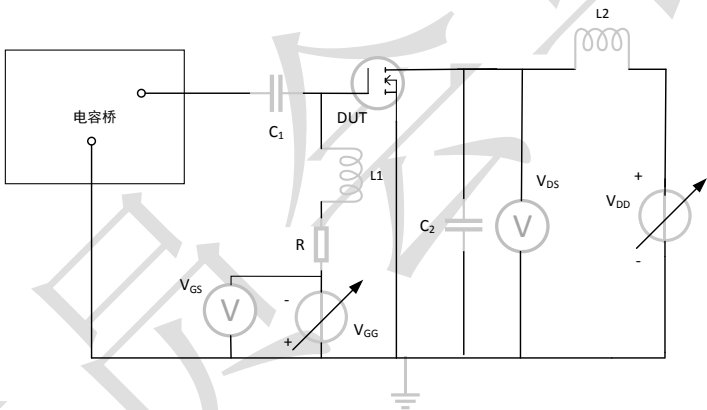


图 A.7 测量短路输入电容的基本方法

-电路描述与基本条件

电容 C_1 与 C_2 满足以下条件时，在测量频率下相当于短路。 L_1 与 R 的阻抗在测量频率下应当足够大，使得测量值不受影响：

$$\begin{aligned} |y_{is}| &\gg 1/\omega L_1 \text{ 及 } \omega C_1 \gg |y_{is}| \\ |y_{os}| &\gg 1/\omega L_2 \text{ 及 } \omega C_2 \gg |y_{os}| \end{aligned}$$

-测量步骤

在没有待测器件（DUT）时，电容桥零偏。当 DUT 被接入电路， V_{DS} 与 V_{GS} 被设置为指定值。电容重新平衡。调节前后的电容读数差值为输入电容 C_{iss} 的值。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ；
- 漏-源电压 V_{DS} ；
- 栅-源电压 V_{GS} ；
- 测试频率 f_0 ；

A.8 共源短路输出电容 (C_{oss}) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.11)

-目的

为了测量在特定条件下待测器件（DUT）的输出电容。

-电路示意图

如图 A.8 所示。

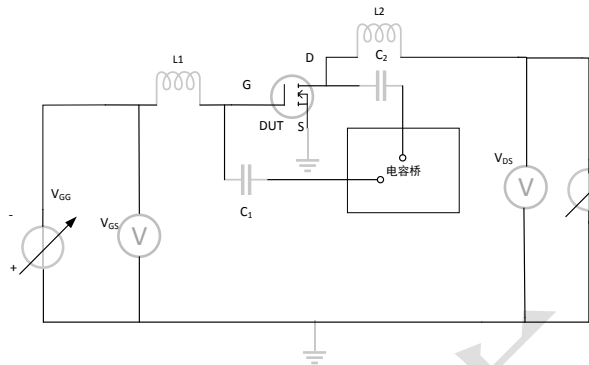


图 A.8 测量短路输出电容的基本方法

-电路描述与基本条件

通过电容桥的零位测量法进行测试。 C_2 远大于 C_{oss} ， ωC_1 远大于 $|y_{is}|$ 。 L_1 与 L_2 的感抗应当足够大，足以平衡电桥调节：

$$\begin{aligned} |y_{is}| &\gg 1/\omega L_1 \text{ 及 } \omega C_1 \gg |y_{is}| \\ |y_{os}| &\gg 1/\omega L_2 \text{ 及 } \omega C_2 \gg |y_{os}| \end{aligned}$$

-测量步骤

在没有待测器件（DUT）时，电容桥零偏。当 DUT 被接入电路， V_{DS} 与 V_{GS} （或 I_D ）被设置为指定值。电桥重新平衡。调节前后的电容读数差值为输出电容 C_{oss} 的值。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ；
- 漏-源电压 V_{DS} ；
- 栅-源电压 V_{GS} ；
- 测试频率 f 。

A.9 共源短路转移电容 (C_{rss}) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.5) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.12)

-目的

为了测量在特定条件下待测器件（DUT）的转移电容。

-电路示意图

如图 A.9 所示。

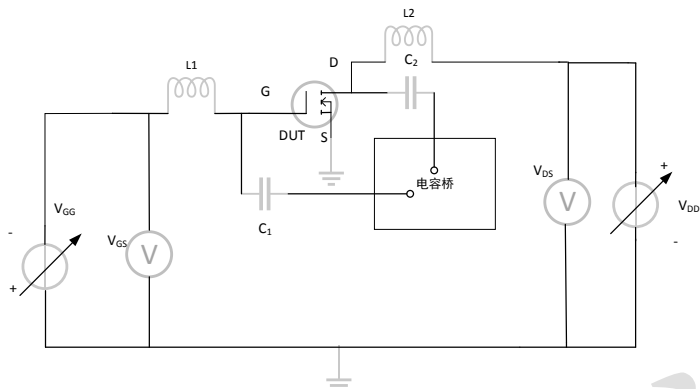


图 A.9 测量短路输出电容的基本方法

-电路描述与基本条件

电容 C_1 , C_2 , L_1 , L_2 应当足够大, 使得对测量结果不产生影响。不论测量端与地之间存在任何阻抗, 电容桥都应当能够正确独立地测量电容。

-测量步骤

在没有待测器件 (DUT) 时, 电容桥零偏。当 DUT 被接入电路, V_{DS} 与 V_{GS} (或 I_D) 被设置为指定值。电桥重新平衡。调节前后的电容读数差值为输出电容 C_{rss} 的值。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 漏-源电压 V_{DS} ;
- 栅-源电压 V_{GS} ;
- 测试频率 f 。

A.10 内部栅极电阻 (r_g) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.13)

-目的

为了测量在特定条件下待测器件 (DUT) 的内部栅极电阻。

-电路示意图

如图 A.10 所示。

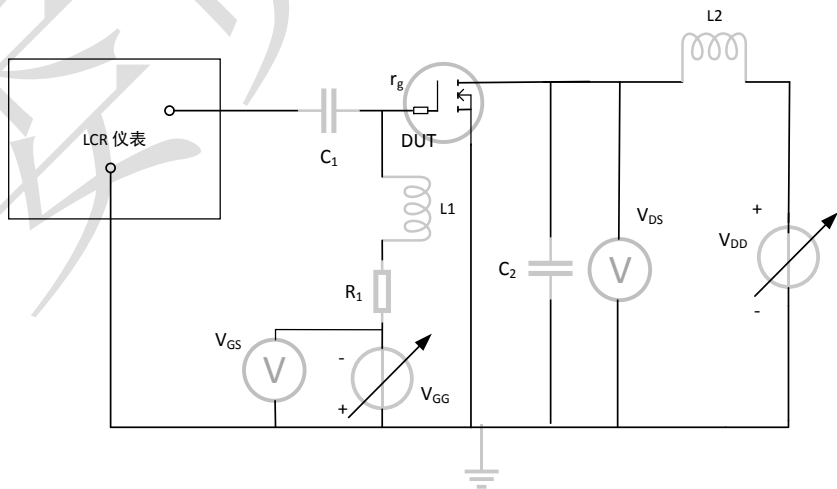


图 A.10 测量内部栅极电阻的电路图

-电路描述与基本条件

使用 LCR 数字电桥零位测量法。 C_2 远大于 C_{oss} , ωC_1 远大于 $|y_{is}|$ 。 L_1 , L_2 的感抗足够平衡电桥的调

节。

$$|y_{is}| \gg 1/\omega L_1 \text{ 及 } \omega C_1 \gg |y_{is}|$$
$$|y_{os}| \gg 1/\omega L_2 \text{ 及 } \omega C_2 \gg |y_{os}|$$

-测量步骤

待测器件的漏-源电压 V_{DS} 与栅-源电压 V_{GS} 被设置为指定值，内部栅极电阻 r_g 可通过栅电容与栅极电阻串联的 LCR 数字电桥进行测量。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 漏-源电压 V_{DS} ;
- 栅-源电压 V_{GS} ;
- 测试频率 f 。

A.11 栅电荷 ($Q_G, Q_{GD}, Q_{GS(th)}, Q_{GS(pl)}$) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.9)

-目的

为了测量待测器件 DUT 在特定条件下的栅电荷。

-电路示意图

如图 A.11 所示。

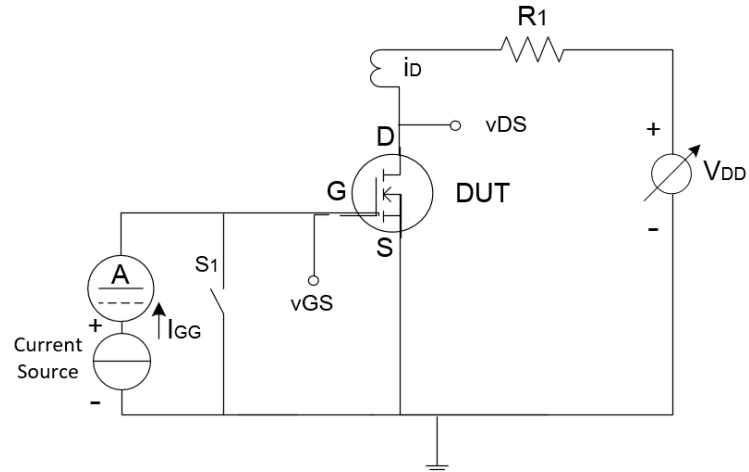


图 A.11 测量栅电荷电路图

-电路描述及要求

I_{GG} 为恒流源。 S_1 可以控制栅脉冲的脉宽长度。 R_1 为限流负载电阻。

-测量步骤

波形如图 1 所示。开关 S_1 在 t_0 时刻打开，栅极有持续的电流灌入，直至栅-源极电压达到某一固定值， S_1 闭合。然后，总栅电荷，栅-源电荷与栅-漏电荷可以通过 IEC60747-8 中 3.3.7.1 至 3.3.7.4 节中的表达式计算。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 漏极电流 I_D ;
- 漏-源电压 V_{DS} ;
- 栅电流 I_{GG} 。

A.12 开关时间参数($t_{d(on)}$, t_r , $t_{d(off)}$ 和 t_f) (idt IEC 60747-8:2010 6.3.6)

- 目的
为了测量在特定条件下开通和关断的开关时间参数。
- 电路示意图与波形
如图 A.12.1 和 A.12.2 所示。

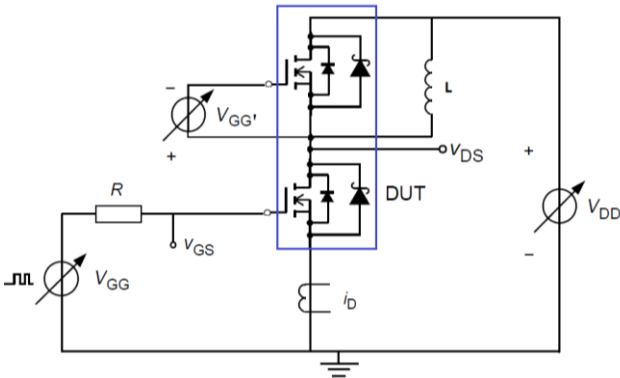


图 A.12.1 测量开关时间参数的电路示意图

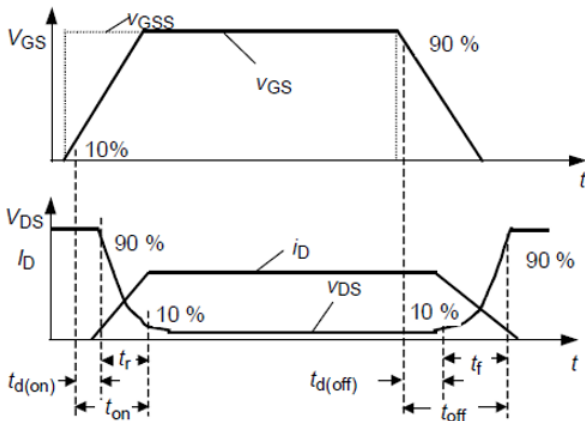


图 A.12.2 开关波形和时间参数示意图

-电路描述与基本条件

V_{GG} 可以产生锯齿波，其内阻小于栅电阻 R ，锯齿波的上升和下降时间比待测器件（DUT）的开关时间短。 $V_{GG'}$ 是施加在 DUT 对管栅-源之间的负压源，保证 DUT 对管元件可靠处于关断状态。 L 为负载电感。在实际应用中，应尽量减小寄生分布电感。无特殊说明情况下，默认设置为共源极结构。

-测量步骤

栅脉冲电压 V_{GG} 、漏-源电压源 V_{DD} 与负压源 $V_{GG'}$ 被设置为额定值，调节 R 使达到指定的漏极电流 I_D ，记录漏-源电压 V_{DS} 的波形与栅-源电压 V_{GS} 的波形，根据图 A.12.2 所示测量开通和关断时间参数。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ；
- 漏-源电压 V_{DS} ；
- 开通和关断后栅-源电压 V_{GS} 的脉冲形状；
- 栅-源脉冲宽度、脉冲上升和下降时间、脉冲重复率；

- 电阻 R_1 和 R_2 ;
- 漏极电流 I_D 。

A.13 开通损耗 (P_{on}), 开通能量 (每个脉冲) (E_{on}) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.7)

-目的

为了测量指定感性负载条件下待测器件 (DUT) 开通时的能量损耗和/或每个脉冲的开通能量。

-电路示意图

如图 A.13 所示。

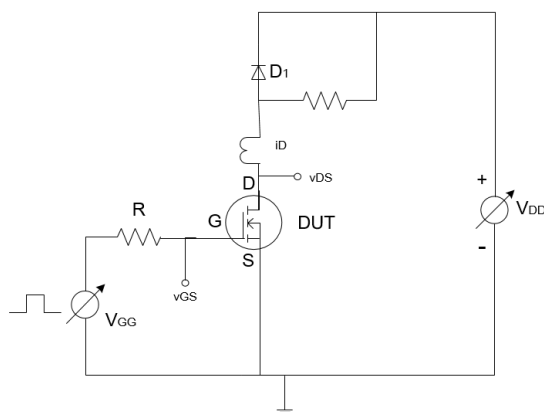


图 A.13 测量开关损耗/能量电路图

-电路描述及要求

V_{GG} 可以产生锯齿波, 其内阻与栅电阻 R 相比可以忽略不计。锯齿波的上升沿比待测器件 (DUT) 的开关时间短。 D_1 为特定续流二极管, L 为负载电感。在实际应用中, 应尽量减少寄生分布电感。

-测量步骤

栅脉冲电压 V_{GG} 与漏-源电压源 V_{DD} 被设置为额定值。记录漏极电流 I_D 波形与漏-源电压 V_{DS} 波形。每个脉冲的开通能量为两者乘积在时域上的积分。在某一频率下的开通损耗为此频率与单脉冲开通能量的乘积。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 开通前漏-源电压 V_{DS} ;
- 开通后漏极电流 I_D ;
- 栅极电阻 R ;
- 栅-源脉冲: 幅值、上升时间、脉宽;
- 续流二极管 D_1 的特性 (型号)。

A.14 关断损耗 (P_{off}), 关断能量 (每个脉冲) (E_{off}) (idt IEC 60747-8:12010 6.3.8)

-目的

为了测量指定感性负载条件下待测器件 (DUT) 关断时的能量损耗和/或每个脉冲的关断能量。

-电路示意图

如图 A.13 所示。

-电路描述及要求

V_{GG} 可以产生锯齿波, 其内阻与栅电阻 R 相比可以忽略不计。锯齿波的下降沿比待测器件 (DUT) 的开关时间短。 D_1 为特定续流二极管, L 为负载电感。在实际应用中, 应尽量减少寄生分布电感。

-测量步骤

栅脉冲电压 V_{GG} 与漏-源电压源 V_{DD} 被设置为额定值。记录漏极电流 I_D 波形与漏-源电压 V_{DS} 波形。每个脉冲的关断能量为两者乘积在时域上的积分。在某一频率下的开通损耗为此频率与单脉冲开通能量的乘积。

-额定条件

- 参考结温 T_{vj} ;
- 关断前漏极电流峰值 I_D ;
- 关断前漏-源电压 V_{DS} ;
- 感性负载 L ;
- 栅极电阻 R ;
- 栅-源脉冲：幅值、上升时间、脉宽。

A.15 正向导通压降 (V_F , V_{FM}) (idt IEC 60747-2:12000 7.1.2)

方法 1：直流偏置法

正向导通压降的基本测试电路如图 A.15.1 所示，向二极管施加一定的正向导通电流后，可测量一定条件下二极管两端正向导通压降。

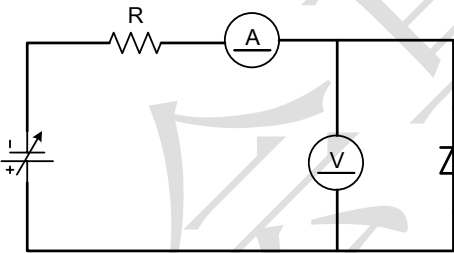


图 A.15.1 正向导通压降测试电路（直流偏置法）

方法 2：示波器法

瞬时正向导通压降的基本测试电路如图 A.15.2 所示，向二极管施加一个半周期正弦波的正向导通电流后，可在示波器上读取电压电流波形。

应注意保证测试在热稳定条件下进行。

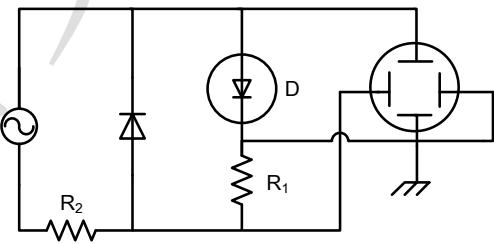


图 A.15.2 正向导通压降测试电路（示波器法）

图中 D 为待测二极管， R_2 为小电阻。

方法 3：脉冲法

-目的

为了用脉冲法测量在特定条件下整流二极管的正向导通压降。

-电路示意图

如图 A.15.3 所示。

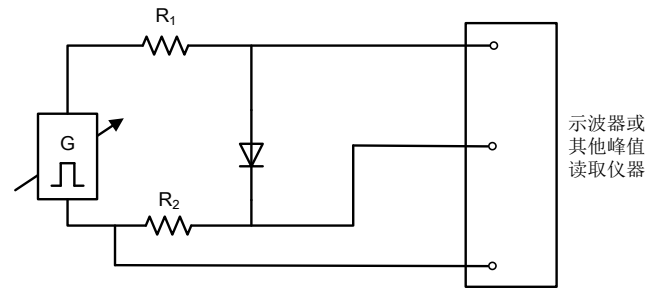


图 A.15.3 电路示意图

-电路描述与基本条件

D : 待测二极管;

G : 脉冲发生器;

R_1 : 保护电阻;

R_2 : 矫正过的电流检测电阻;

OSC : 示波器或其他峰值读取仪器。

脉冲发生器的脉冲宽度和重复率的设置应满足内部散热在测量时可以忽略,满足该条件时脉冲宽度一般设置为 $100\mu s$ 至 $500\mu s$,对于高额定功率的二极管,一般设置基区宽度可达 $1ms$ 的正弦波来建立载流子平衡。

-测量步骤

设置脉冲发生器初始输出为零,设置温度为特定值,增加脉冲发生器的输出电压使正向导通电流达到特定值,正向导通压降可在示波器上测量。除示波器以外可以使用其他峰值读取仪器,但必须满足正向导通电流达到峰值时同时测量相应的正向导通压降峰值。

-额定条件

应说明下列测试条件的值:

——正向导通电流;

——环境温度、壳温或指定参考点温度。

方法 4: 平均正向导通压降法

平均正向导通压降的基本测试电路如图 A.15.4 所示,可调电流源的阻抗应足够大,保证正向半周期正弦电流流经待测二极管。平均正向导通压降通过动圈式仪表测量,整个测试在特定条件下进行。

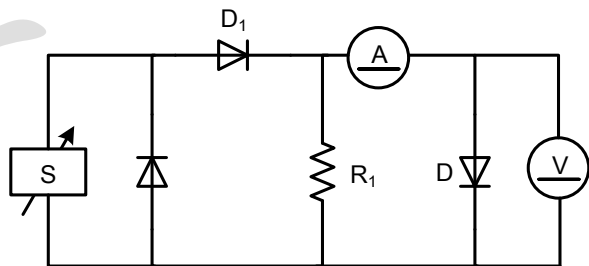


图 A.15.4 平均正向电压法测试电路

图中 D 为待测二极管, S 为可调高阻抗电流源, R_1 和 D_1 应满足当待测二极管和 D_1 反向偏置耐压时,由 D_1 承担几乎所有的电压。

附录 B
(规范性附录)
稳态热阻测试方法

B.1 结-壳热阻 R_{thJC-M}

-测试原理

如图 B.1 所示。

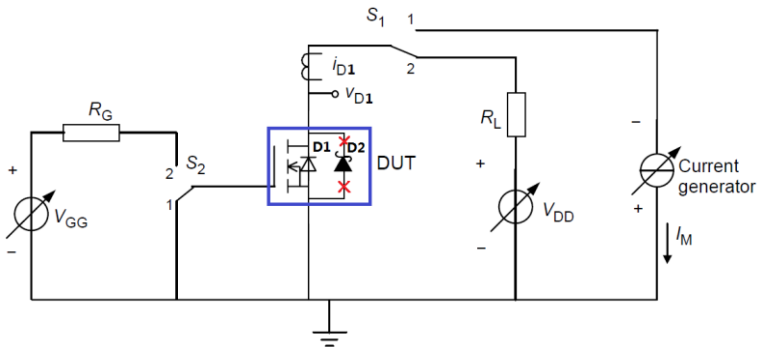
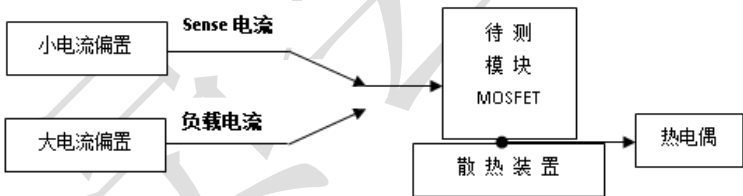


图 B.1.1 结-壳热阻 R_{thJC-M} 测试原理图

应该规定被测器件的栅压 V_{GS} ，选取体二极管 $D1$ 的正向压降 V_{F1} 作为热敏参数，对于额外并联有二极管 D_2 的 SiC 模块，应该将并联二极管 D_2 的阳极或阴极断开。

-测试方法

如图B.2所示。



图B.1.2 结-壳热阻 R_{thJC-M} 测试框图

-测量步骤

- a) 确定小测量电流 I_{D1} 下的体二极管正向压降 V_{D1} 温度系数 α_{VF1} ;
- b) 测量被测器件DUT对内部耗散功率 P_v 阶跃变化的响应特性。

-额定条件

- 可调电压源 V_{GG} ;
- 可调电压源 V_{DD} ;
- 基准(直流)电流发生器 I_M ;
- 同步开关 S_1 、 S_2 ;
- 漏极电流ID的限流电阻 R_L ;
- 保护电阻 R_G 。

-温度采样点

a) 无底板、有底板 SiC 模块壳温 T_c 采样点位置:

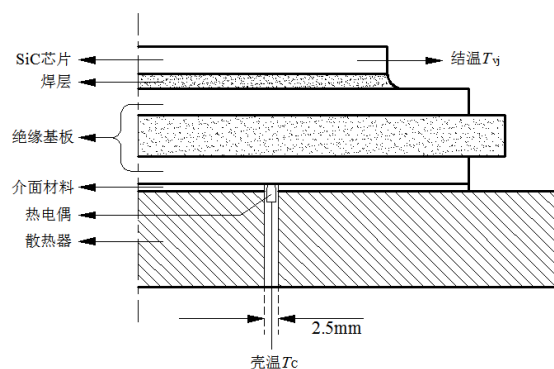
壳温采样点位置对壳温 T_c 产生直接影响, 应当记录壳温采样点位置。

温度传感器应当紧贴功率模块底部, 如图B.5、图B.6所示, 并按下面的公式计算热阻:

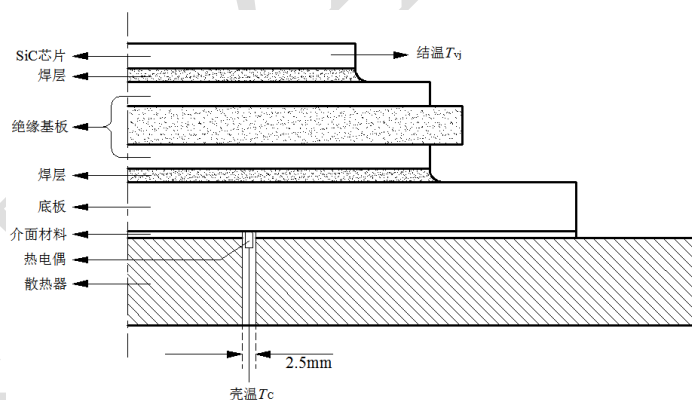
$$R_{thJC} = \frac{T_{vj} - T_c}{P_v}$$

式中 P_v 为内部耗散功率。

测量壳温 T_c 时, 应当将温度传感器设置在 SiC 芯片的正下方, 散热器用于设置温度传感器的孔直径为 2.5mm。



图B.1.3 无底板SiC模块壳温 T_c 采样点位置



图B.1.4 有底板SiC模块壳温 T_c 采样点位置

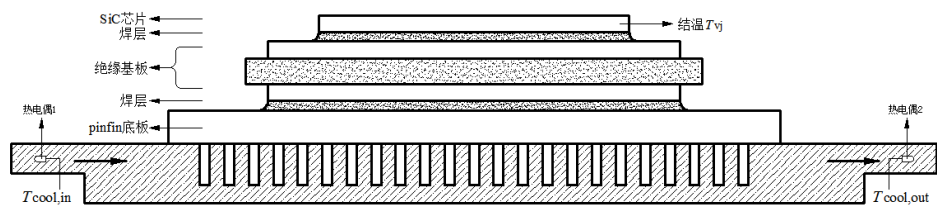
b) Pin fin 底板 SiC 模块冷却介质温度 T_{cool} 采样点位置:

pin fin底板的SiC模块, 底板与冷却介质直接接触, 因此采用结温 T_{vj} 与冷却介质温度 T_{cool} 来表征热阻, 符号为 R_{thJF} 。

散热器内部用于采样冷却介质温度的采样点位于入口和出口附近, 如图B.7所示。热阻的计算公式为:

$$R_{thJF} = \frac{T_{vj} - \left(\frac{T_{cool,in} - T_{cool,out}}{2} \right)}{P_v}$$

式中 P_v 为内部耗散功率。



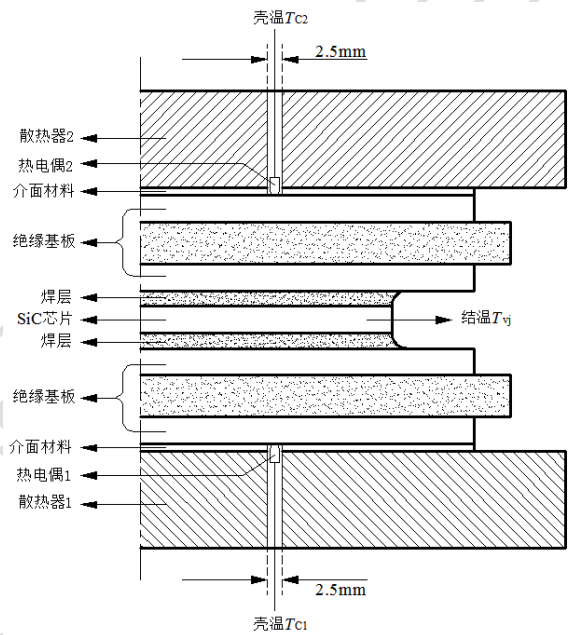
图B.1.5 Pin fin底板SiC模块冷却介质温度 T_{cool} 采样点位置

c) 双面冷却 SiC 模块壳温 T_{C1} 、 T_{C2} 采样点位置:

双面冷却SiC模块两侧设置有散热器，测量壳温 T_{C1} 、 T_{C2} 时，温度传感器分别设置在SiC芯片的上、下两侧，散热器用于设置温度传感器的孔直径为2.5mm。温度传感器应当紧贴功率模块上、下绝缘基板的外侧，如图B.8所示。结-壳热阻 R_{thJC} 的计算公式如下：

$$R_{thJC} = \frac{T_{vj} - \left(\frac{T_{C1} + T_{C2}}{2} \right)}{P_v}$$

式中 P_v 为内部耗散功率。



图B.1.6 双面冷却SiC模块壳温 T_{C1} 、 T_{C2} 采样点位置

B.2 结-壳热阻 R_{thJC-D}

-测试原理

如图B.2所示。

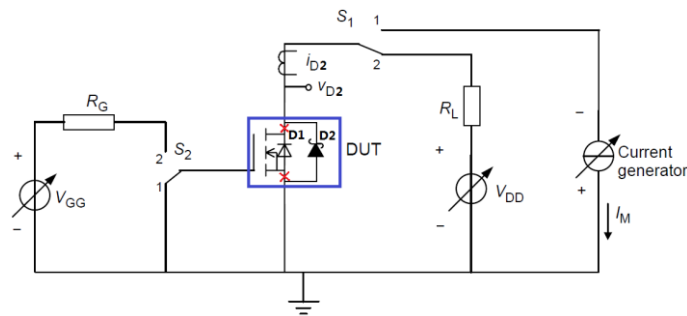


图 B.2.1 结-壳热阻 R_{thJC-D} 测试原理图

选取并联二极管 D2 的正向压降 V_{F2} 作为热敏参数，并将与其并联 MOSFET 的源极、漏极断开。

-测试方法

如图B.2.2所示。

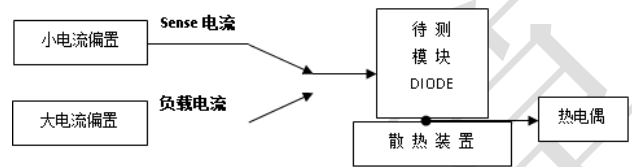


图 B.2.2 结-壳热阻 R_{thJC-D} 测试框图

-测量步骤

- a) 确定小测量电流 I_{D2} 下的并联二极管正向压降 V_{F2} 温度系数 α_{VD2} ;
- b) 测量被测器件 DUT 对内部耗散功率 P_v 阶跃变化的响应特性。

-额定条件

- 可调电压源 V_{GG} ;
- 可调电压源 V_{DD} ;
- 基准(直流)电流发生器 I_M ;
- 同步开关 S_1 、 S_2 ;
- 漏极电流 I_D 的限流电阻 R_L ;
- 保护电阻 R_G 。

-温度采样点

按照 B.1 结-壳热阻 R_{thJC-M} 温度采样点的方法进行。

附录 C
(规范性附录)
评测试验方法

C.1 高温阻断 (HTRB) (idt IEC 60747-8:2010 7.3.1)

该测试按 IEC 60749-23:2004 中的子条款 5.2.3.3 进行。

-电路示意图

如图 C.1，电阻 R 是限流电阻。

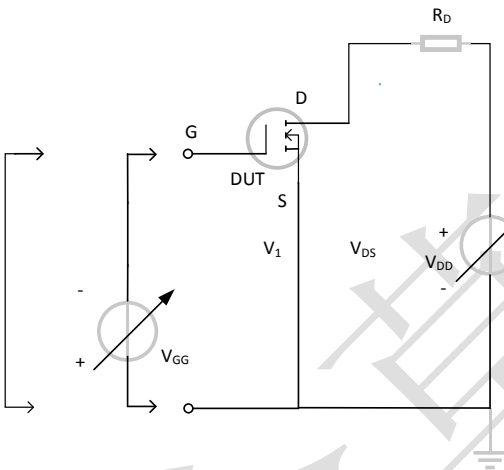


图 C.1 高温阻断试验电路

C.2 高温门极偏置 (HTGB) (idt IEC 60747-8:2010 7.3.2)

该测试按 IEC 60749-23:2004 中的子条款 5.2.3.4 进行。

-电路示意图

如图 C.2 所示。

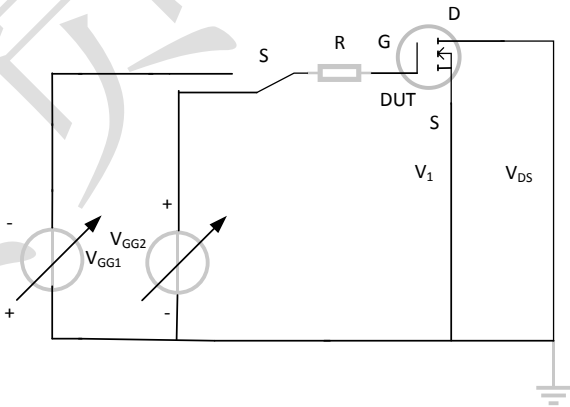


图 B.2 高温门极偏置试验电路

C.3 间歇工作寿命 (负载循环) (idt IEC 60747-8:2010 7.3.3)

该测试按 IEC 60749-34 中的条款进行。

-电路示意图

如图 C.3 所示。

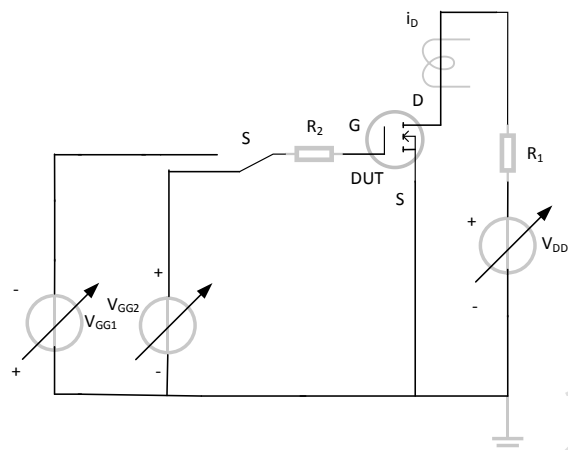


图 C.3 间歇工作寿命试验电路