

宽禁带半导体器件参数特性及可靠性测试介绍

YOUR BEST POWER TESTING SOLUTION



目 录



什么是宽禁带半导体及其优势



宽禁带半导体从材料、器件
到应用阶段测试难点和方法



利用SMU实测SiC二极管I-V

➔ 什么是宽禁带半导体及其优势？

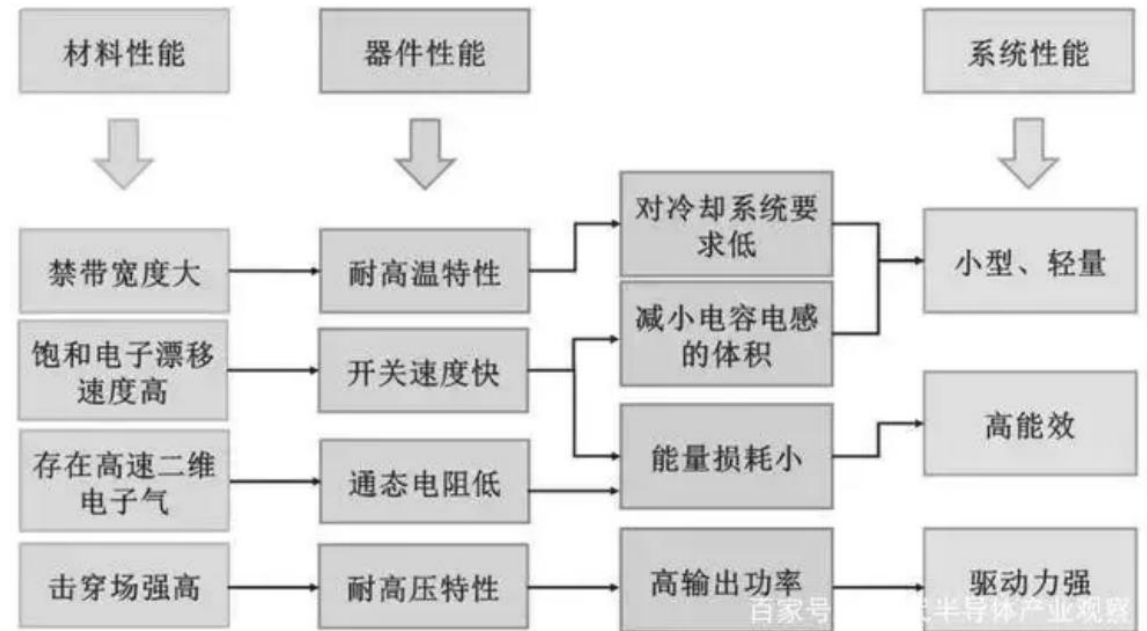
❑ 宽禁带半导体也称第三代半导体

宽禁带半导体（也称第三代半导体）主要指以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）、氧化锌（ZnO）、金刚石、氮化铝（AlN）为代表的宽禁带半导体材料。

第一代半导体：元素半导体（硅、锗）

第二代半导体：化合物半导体（砷化镓、磷化铟）

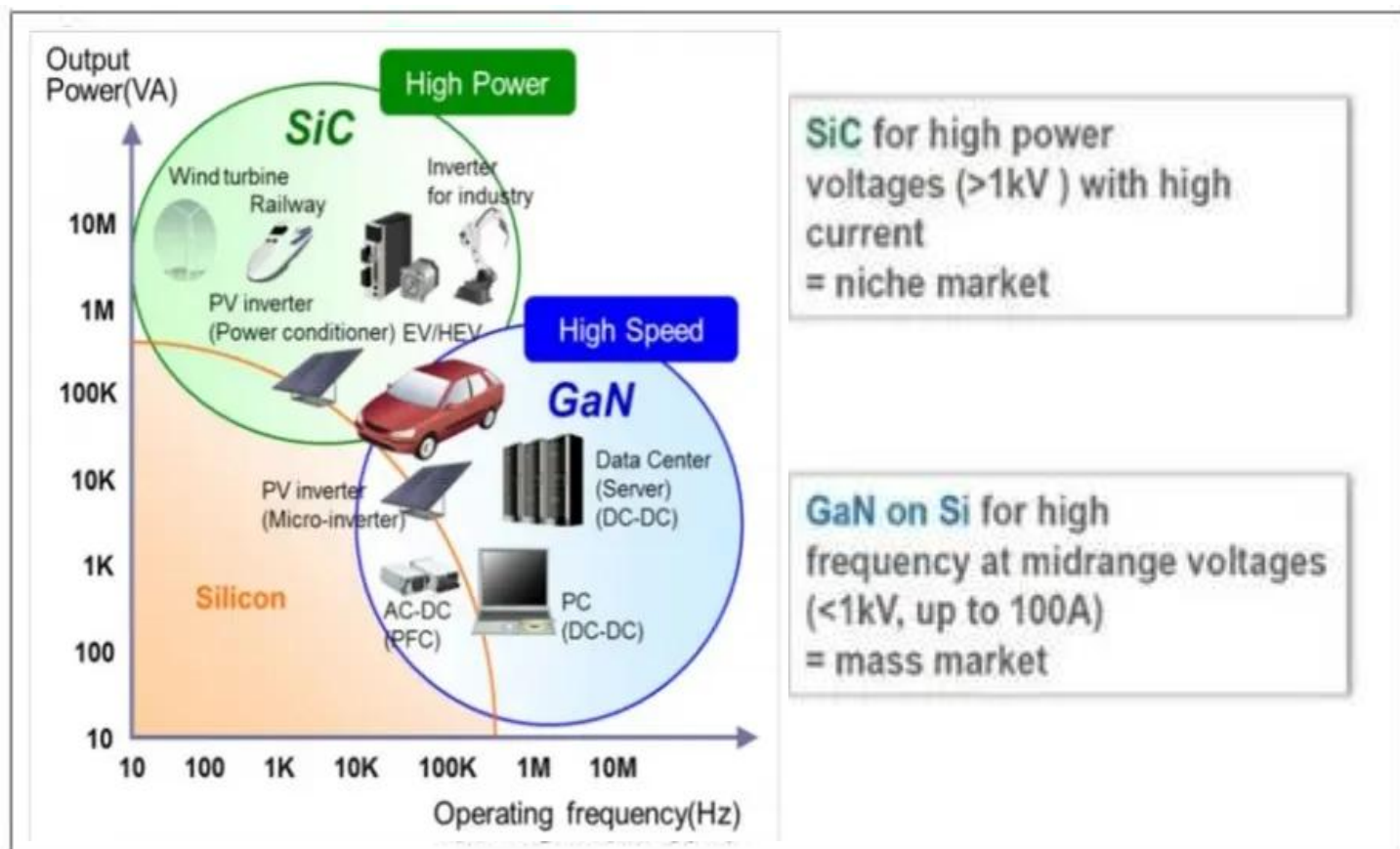
	第一代	第二代		第三代	
	Si	GaAs	InP	SiC	GaN
禁带宽度 (eV)	1.12	1.4	1.3	3.2	3.39
相对介电常数	11.7	13.1	12.5	9.7	9.8
绝缘击穿场强 (MV/cm)	0.3	0.4	0.5	2.2	3.3
电子漂移饱和速度(10^7 cm/s)	1	2	1	2	2.5
热导率 (W/cm·K)	1.5	0.5	0.7	4.5	2~3
电子迁移率 (cm^2/Vs)	1350	8500	5400	900	1000
功率密度 (W/mm)	0.2	0.5	1.8	~10	>30



→ 什么是宽禁带半导体及其优势？

宽禁带半导体-----碳中和的新赛道

耐高压、耐高温、大功率、导电性能强、工作速度快、损耗低、开关频率高

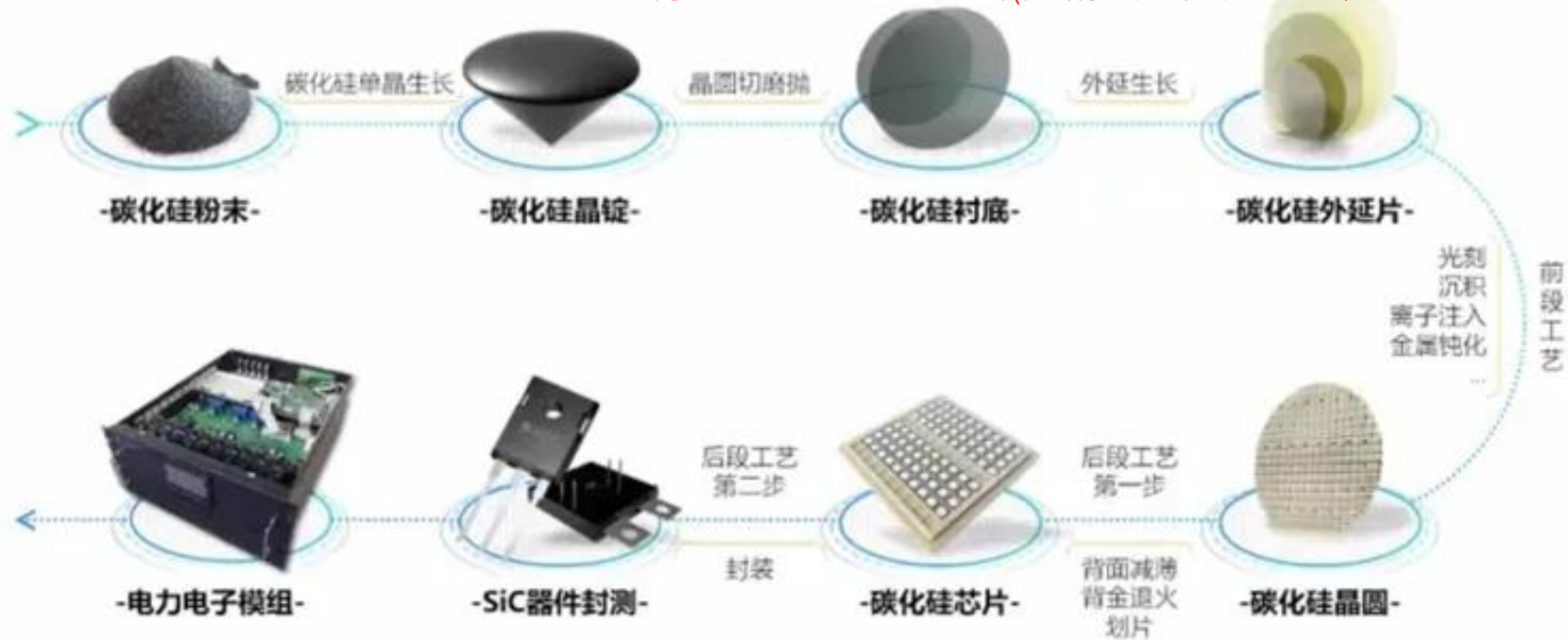


SiC适用于1kV以上的高温大电力领域，主要应用于新能源汽车、光伏储能、机车牵引、智能电网等领域。

GaN的市场应用偏向高频小电力领域，集中在1kV以下，主要应用于微波射频、5G通信及光电领域等。

宽禁带半导体从材料到器件的制备过程及相关测试

- 材料表面电阻率测试(高精度、高分辨率)



以第三代功率半导体SiC为例，功率器件的制备过程包含SiC粉末合成、单晶生长、晶片切磨抛、外延（镀膜）、前道工艺（芯片制备）、后道封装。

- Demo应用测试
 - 双脉冲测试
 - 效率测试
 - 能耗测试
- 器件级测试
 - 动静态参数
 - I-V特性测试
 - 可靠性验证
- 芯片测试
 - 电性能测试
 - 可靠性验证
- 晶圆测试
 - (电性能测试，测试机+探针台)



宽禁带半导体制造各阶段试验的测试意义

材料级测试：材料直接影响到器件的性能，因此材料的电阻率、弯曲度、粗糙度等指标需要经过严格筛选测试。

器件级电学性能测试：包括静态、动态和极限能力测试

i>静态测试：主要验证器件本征的特性指标，例如击穿电压、开启电压、输入输出特性等

ii>动态测试：主要验证功率器件在开通关断过程中的性能，例如导通延时时间、关断延时时间

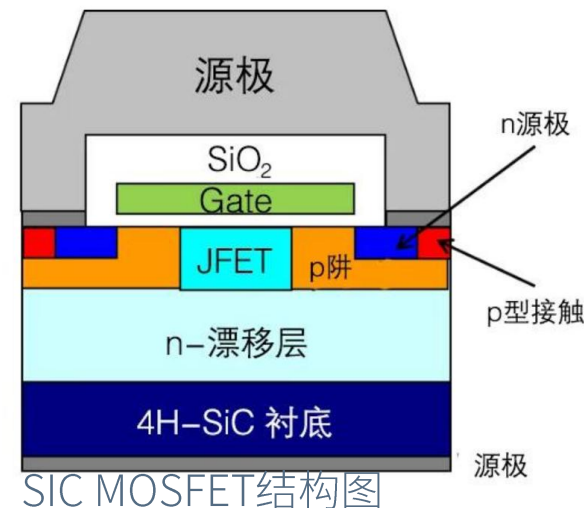
iii>极限能力测试：例如浪涌电流测试，雪崩能量测试

可靠性测试：主要包含对芯片本身和封装后的器件级可靠性测试，目的是检验工作寿命是否满足要求。

i> 芯片寿命验证：高温高湿反偏测试、高温门极反偏测试等

ii> 机械寿命验证：功率循环老化测试、热循环测试等

应用层测试：将器件/模块应用于真实的Demo样品中（如BOBC、电驱），以评估能耗、转换效率、开关损耗等在实际产品中的具体性能表现。





宽禁带半导体测试介绍

● 材料表面电阻率测试



四线制量测

高精度、高精密

使用6合一SMU能够提升测试效率

□ 表面电阻率的测试方法

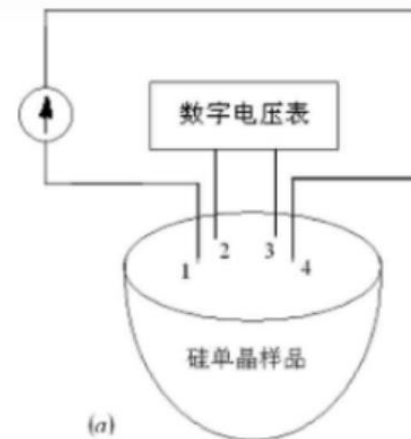
1、接触法：适用于测量硅单晶、切、磨等晶片的电阻率

- A) 两探针法
- B) 四探针法(直线四探针、方形四探针法)
- C) 范德堡法（材料形状不规则）

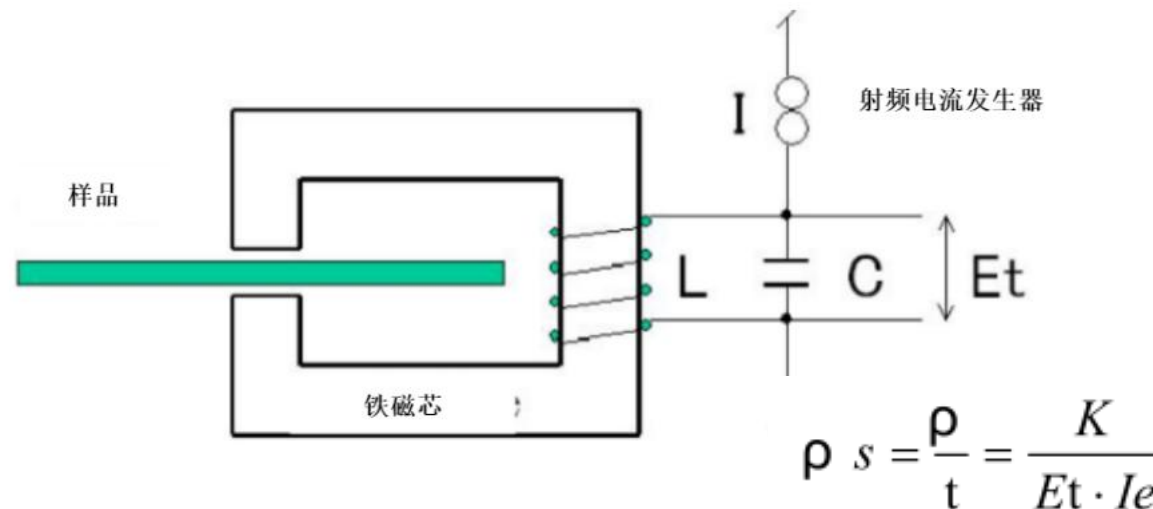
2、无接触法：适用于测量硅抛光、外延及SOI等片的电阻率

- A) C-V法
- B) 涡旋法

电阻率电导率是评价材料导电性能的重要指标，并直接影响器件的性能。



四探针法测试原理示意图



涡旋法测试原理示意图

□ 直线四探针法 (适用于形状规则的薄膜材料测试, 硅晶片, 抛光片, 衬底片等)

测试方法

四根金属探针与样品表面接触, 外侧1和4两根为通电流探针, 假设通过电流为I, 内侧2和3两根是测电压探针, 测量2、3探针之间的电位差V。S代表探针之间的间距, 假设探针在同一直线上, 且等间距离为S。

核心测试设备: IT2800系列源表SMU

电阻率公式

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} 2\pi S$$

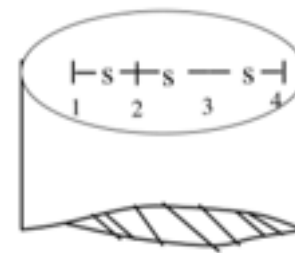


图 2-3 直线型四探针

图示

硅单晶检测标准参照GB/T 12962-2015《硅单晶》。GB/T 12962-2015中规定的硅单晶检测项目主要包括直径及允许偏差、电导率类型、电阻率测量、径向电阻率变化、载流子寿命测量、微区电阻率条纹、晶向和晶向偏差等。

DUT

硅锭



硅单晶片



□ 范德堡法四探针测量法（形状不规则的材料）

范德堡法为更通用的四探针法，也称为方形四探针法，适用于扁平、厚度均匀、任意形状，而不含有任何隔离孔的样品材料。

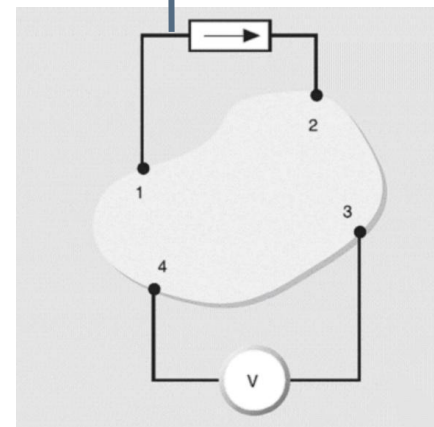
测试要求：

- 1、接触点尽可能的小
- 2、四个接触点必须位于样品的边缘位置
- 3、样品不能有任何隔离的孔
- 4、样品必须是厚度均匀的扁平形状

行业标准： 详见ASTM标准F76



IT2800系列SMU



- 1) 分辨率最高可达100nV/10fA
- 2) 提供四线制量测方案
- 3) 即可输出恒流同时实现电压量测

源表是贯穿半导体测试的重要设备

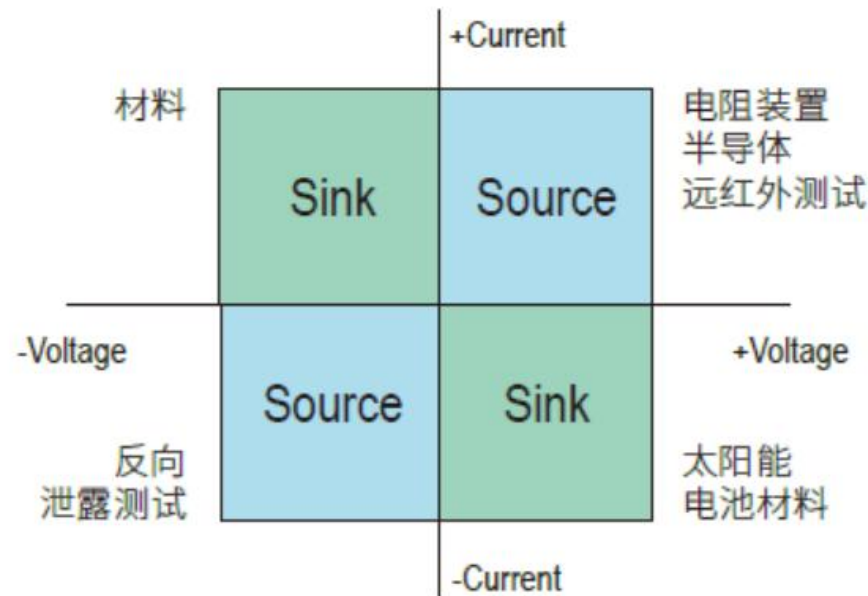
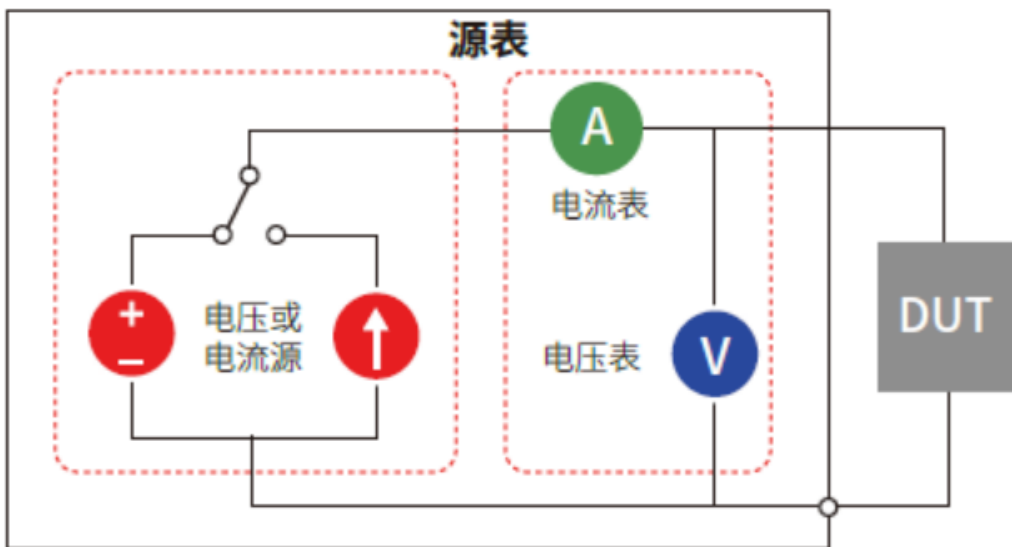
什么是源表?

- 四象限电压源
- 四象限电流源
- 6 1/2 高精密度数字万用表
- 脉冲发生器
- 电子负载
- 电池模拟器



ITECH IT2800系列高精密度源表

- IT2801: $\pm 1000V/\pm 1A/\pm 20W$ DC&Pulse
- IT2805: $\pm 200V/\pm 1.5A/\pm 20W$ DC&Pulse
- IT2806: $\pm 200V/\pm 3A$ DC 10A pulse / $\pm 20W$



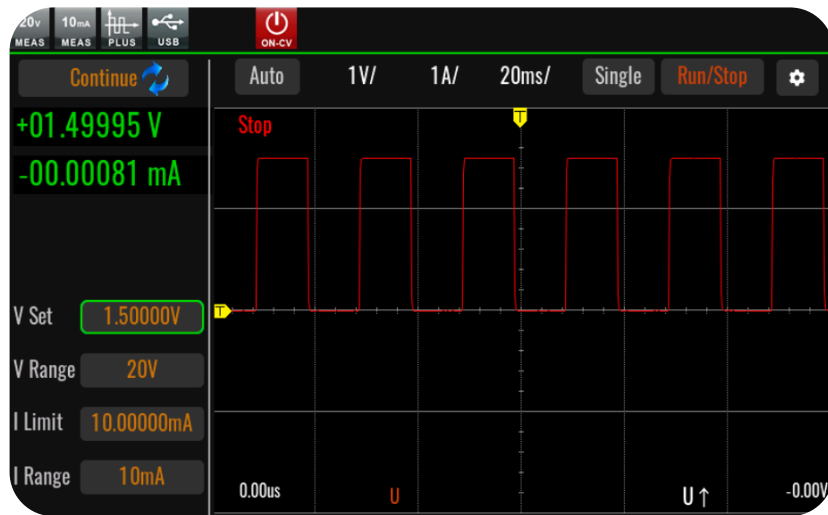
□ 新一代图形化源表的测试优势 (IT2800系列)

可直接获取两端半导体器件，例如SiC二极管的I-V特性曲线
可实时监测I-t, V-t曲线走势，AD采样时间最高可达10us
支持以最快100us的间隔连续记录100万点数据

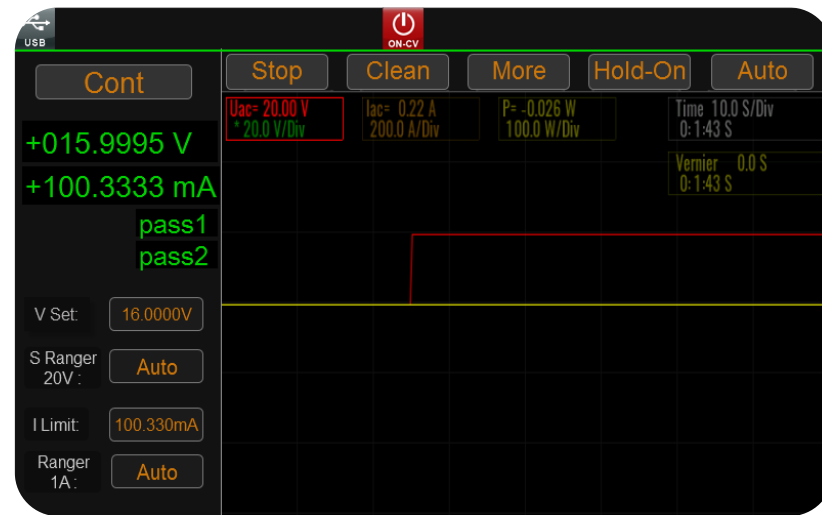
Graph View



Scope View



Record View





宽禁带半导体测试介绍

● 器件级静态参数及IV特性测试



先进的半导体测试机需要具备哪些性能？

输入输出特性测试

转移特性测试

Demo演示SiC二极管I-V特性曲线测试

.....

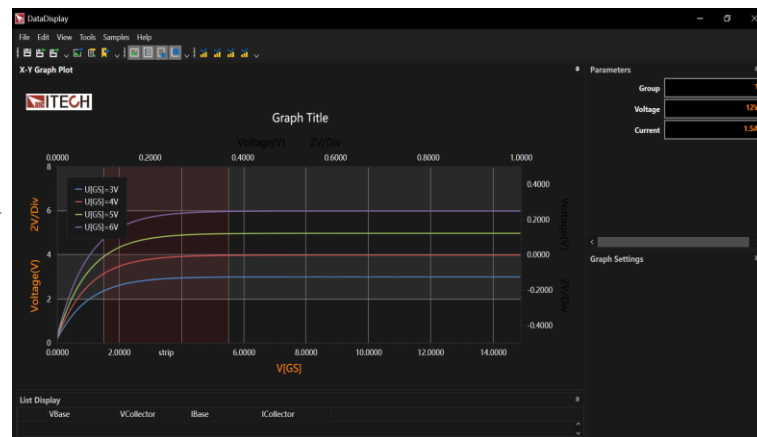
宽禁带半导体不同制程阶段的性能验证需求及测试方法

ITECH半导体晶圆、器件参数测试方案 (IT2800+SPS5000)



IT2800系列高精密度源表

半导体参数测试软件
SPS5000
适用于lab实验室、高校



- 软件内置多种半导体器件类型 (MOSFET, 晶闸管.....)
- 内置丰富的器件参数测试项目, 直接调用
- 器件特性曲线显示功能

源表集成于晶圆探针台 (第三方)

适用于晶圆厂, 封测厂



全自动探针台

- 高精度, 分辨率最高可达 100nV/10fA
- 脉冲扫描输出功能, 有效保护晶圆, 避免器件损坏
- 大容量缓存, 高速采样, AD 采样最高可达10us
- 多通道级联功能, 保持高度同步一致性
- 高达100万点缓存

衡量半导体ATE测试机先进的关键指标-----高精度度

电压精度

IT2806指标

档位	Source/Measure分辨率	设定精度	测量精度	噪声p-p (<10Hz)
±200mV	100nV	0.015%+300μV	0.015%+300μV	≤ 8μV
±2V	1μV	0.015%+300μV	0.015%+300μV	≤ 10μV
±20V	10μV	0.015%+1mV	0.015%+1mV	≤ 80μV
±200V	100μV	0.015%+10mV	0.015%+10mV	≤ 800μV

电流精度

档位	Source/Measure分辨率	设定精度	测量精度	噪声p-p (<10Hz)
±10nA	10fA	0.1%+50pA	0.1%+50pA	≤ 2pA
±100nA	100fA	0.06%+100pA	0.06%+100pA	≤ 3 pA
±1μA	1pA	0.025%+300pA	0.025%+300pA	≤ 10 pA
±10μA	10pA	0.025%+700pA	0.025%+700pA	≤ 60 pA
±100μA	100pA	0.02%+6nA	0.02%+6nA	≤ 600pA
±1mA	1nA	0.02%+60nA	0.02%+60nA	≤ 6nA
±10mA	10nA	0.02%+600nA	0.02%+600nA	≤ 60 nA
±100mA	100nA	0.02%+6μA	0.02%+6μA	≤ 600 nA
±1A	1μA	0.05%+500μA	0.05%+500μA	≤ 10 μA
±3A	10μA	0.05%+1.5mA	0.05%+1.5mA	≤ 30 μA
±10A *1	10μA	0.4%+25mA *2	0.4%+25mA *2	-

- 分辨率高达100nV/10fA
- 可以精准测到pA级电流
- 纹波噪声小，减小对测量结果的影响
- 提供高精密的香蕉头-三同轴适配器

*1 脉冲模式
*2 测量速度 0.01PLC



IT2705直流电源分析仪



ITECH IT2705是一款高度集成的模块化直流电源分析平台，专为研发测试中的动态功耗测量、电池行为模拟与电源特性研究而设计。它集成了直流电源、电子负载、任意波形发生器、示波采样与数据记录功能，支持图形化操作界面，无需二次开发即可完成复杂的测试流程。

IT2705支持多种功能模块灵活组合，包括 直流源模块、双向源模块、回馈负载模块及 SMU 精密源表模块，单模组功率范围从20W至500W，最多可配置 8 路通道。适用于 IoT 终端、芯片供电、汽车电子、智能穿戴设备等场景，帮助工程师深入解析启动波形、瞬态响应及功耗等关键特性，大幅提升测试效率与准确性。

机框 (5U)	电压	电流	功率	DC电源 (+U/+I)	双向DC电源 (+U/±I)	回馈式负载 (+U/-I)	SMU模块 (±U/±I)
IT2705	20V	3A	20W				IT27814/IT27814E
	30V	15A	200W	IT27134	IT27334	IT27534	
		30A	500W	IT27154	IT27354	IT27554	
	60V	10A	200W	IT27135	IT27335	IT27535	
		20A	500W	IT27155	IT27355	IT27555	
	150V	5A	200W	IT27137	IT27337	IT27537	
		10A	500W	IT27157	IT27357	IT27557	



宽禁带半导体不同制程阶段的性能验证需求及测试方法

IT2705直流电源分析仪---上位机软件



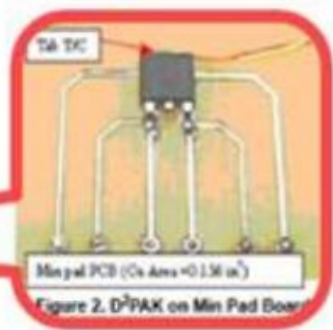
可同时控制8通道SMU，进行同步，延时控制，页面布局合理，具备示波功能，功耗分析功能。

□ 先进半导体自动化测试系统----测试功能模块

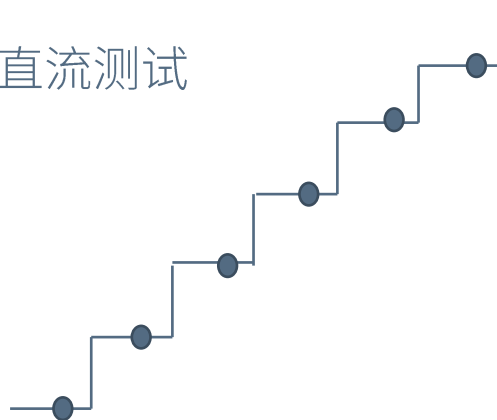
- ✓ Standard扫描模式：线性步阶、对数步阶、脉冲线性步阶、脉冲对数步阶
- ✓ 自定义扫描模式：即列表LIST模式，最多支持99999点
- ✓ 扫描方向：单向（Single）、双向（Up&Down）



敏感型功率器件测试

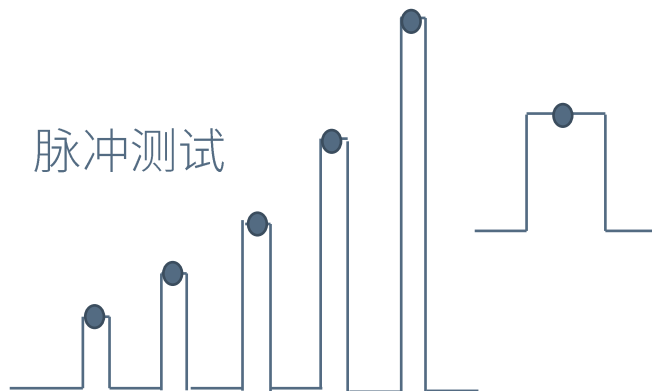


直流测试



功率器件长时间在直流偏置下，会导致器件发热，特性开始改变，最坏的情况下，会损坏DUT。

脉冲测试



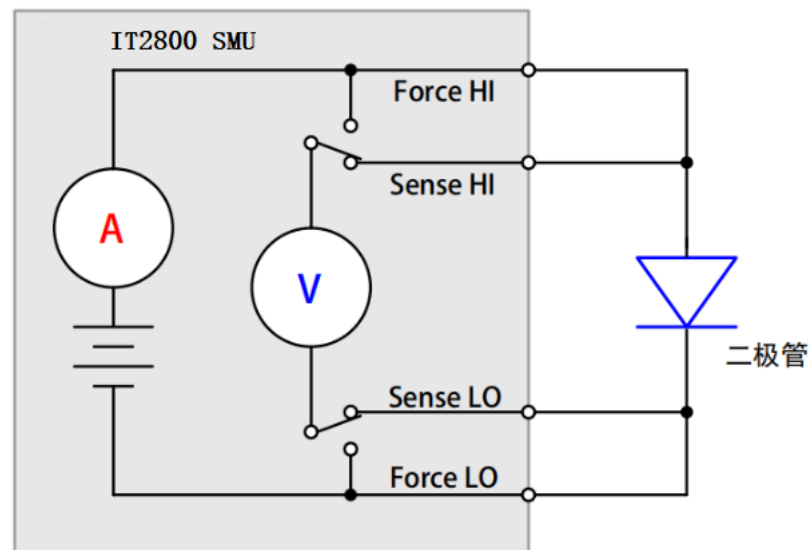
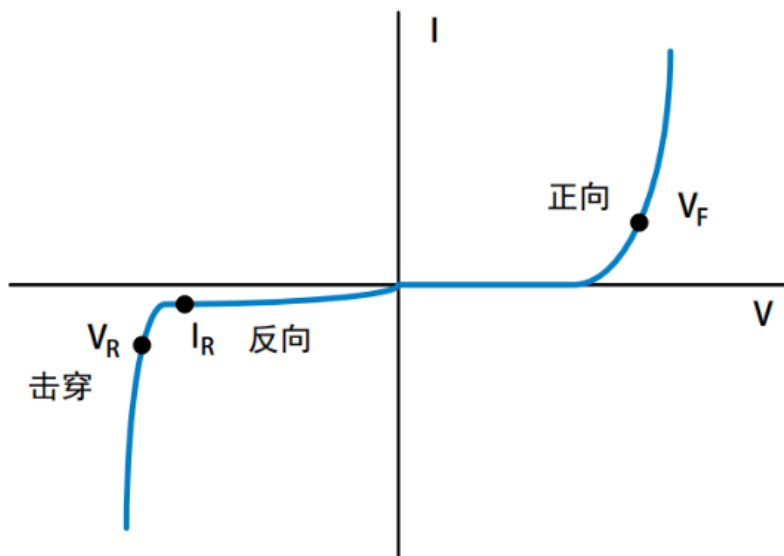
快速的脉冲测试（微秒至毫秒级别），减少功率器件在电压/电流偏置下的Stress时间，从而最小化例如芯片/晶圆的发热效应，从而既达到测试目的又同时保护DUT。

测试案例：SiC二极管的I-V特性测试

典型二极管的I-V曲线，包括正向区、反向区和击穿区，以及常见的测试点、正向电压(V_F)、漏电流(I_R)和击穿电压(V_R)。

正向特性：正向电压(V_F)测试，二极管在正向偏置电流条件下，然后测量作为结果的电压降。

反向特性：漏电流(I_R)测试，二极管在反向电压 V_R 条件下，测量其泄漏的电流。

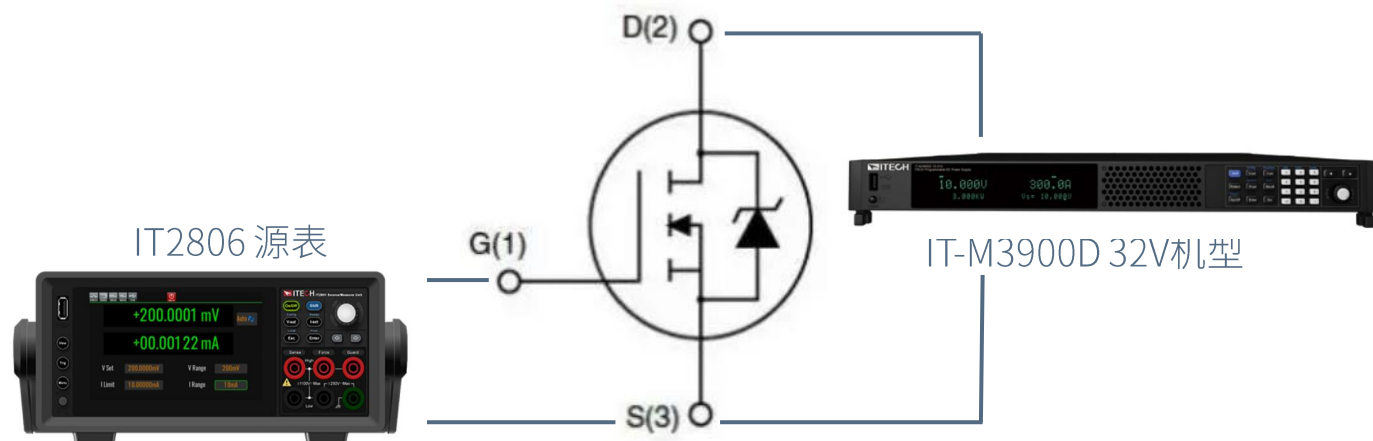


测试案例: SiC MOSFET转移特性测试

测试目的: 验证栅极电压 V_{GS} 对 I_{DS} 的控制作用。

测试方法: 在漏源极之间施加特定的 V_{DS} 值, 通过SMU扫描 V_{GS} , 并量测ID, 随着 V_{GS} 的增大, ID也会增大。

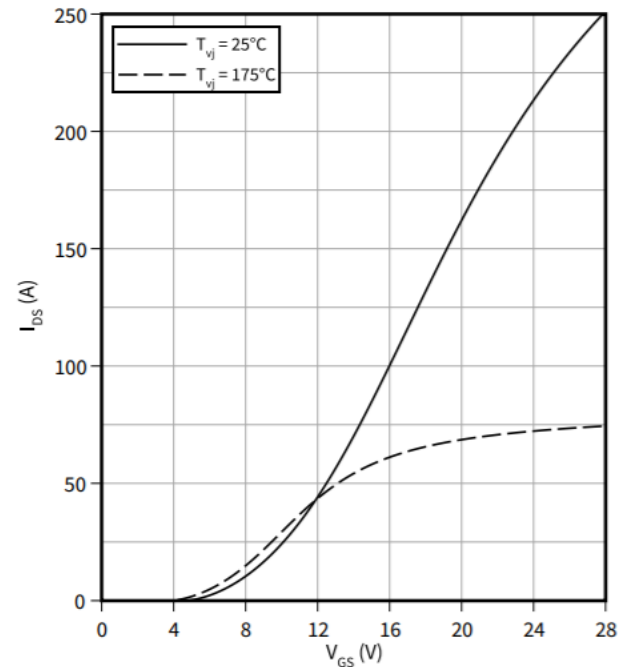
转移特性曲线: $V_{GS}-I_D$



Typical transfer characteristic

$$I_{DS} = f(V_{GS})$$

$$V_{DS} = 20 \text{ V}, t_p = 20 \mu\text{s}$$





宽禁带半导体测试介绍

● 器件级可靠性测试



芯片寿命考核测试
机械连接寿命考核测试

□ 宽禁带半导体可靠性验证

为了保证产品的耐久性能，也就是产品使用的寿命。功率器件厂家在产品定型前都会做一系列的可靠性试验，以确保产品的长期耐久性能。

寿命相关测试可以分成两部分，一部分是对于芯片本身寿命的考核，另一部分是对机械连接的考核

芯片寿命考核试验

- 1) HTRB, 高温高压反偏测试, 测试IGBT芯片耐高压可靠性;
- 2) HTGB, 高温门极反偏测试, 测试IGBT芯片门极的耐压可靠性
- 3) H3TRB, 高温高湿反偏测试
- 4) HV-H3TRB, 高压高温高湿反偏测试, 加速芯片钝化层的腐蚀

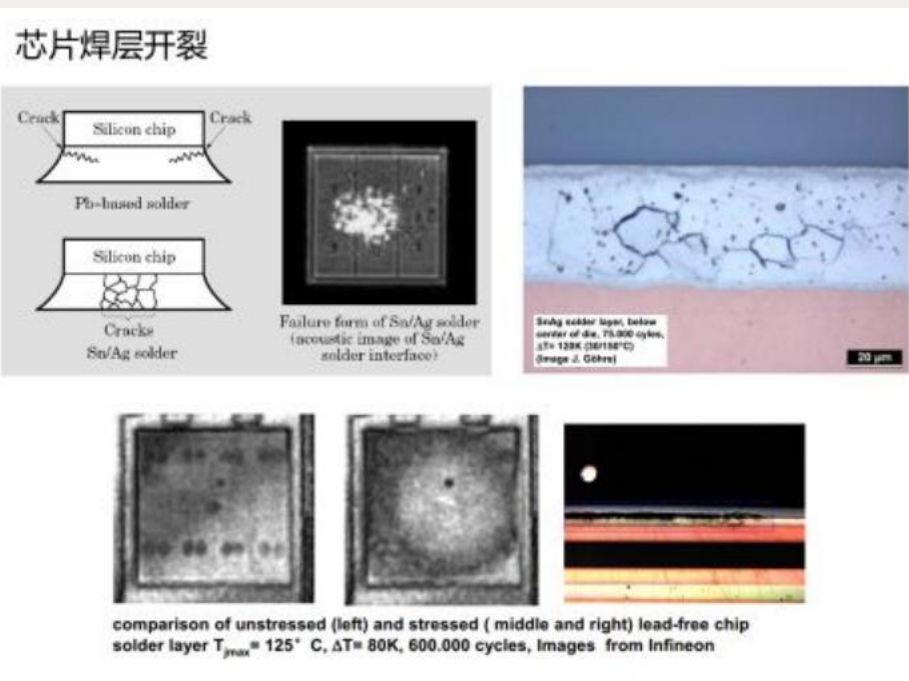
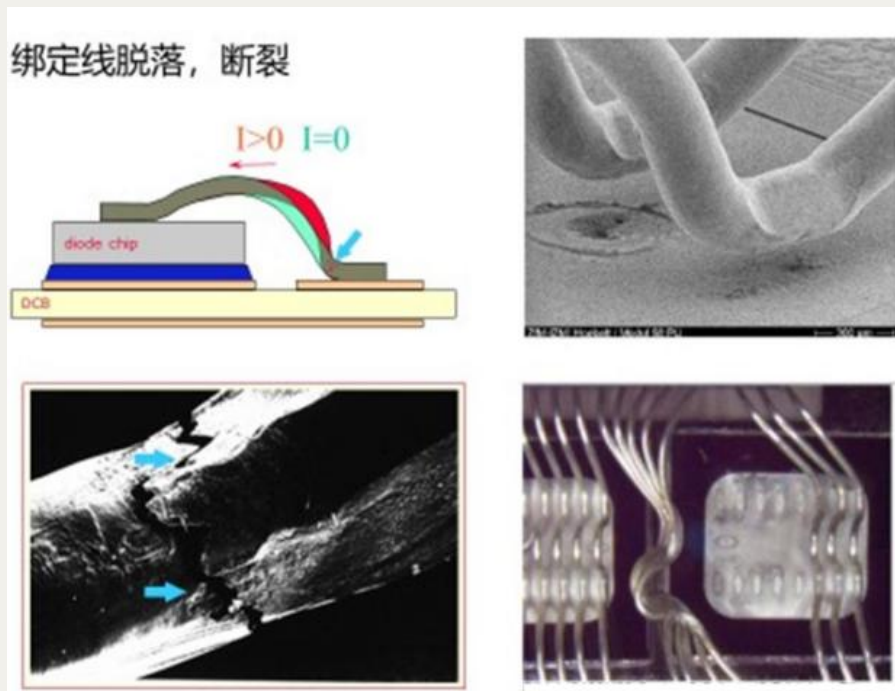
机械连接考核方法

- PC (Power cycling) 功率循环测试
- TC (Temperature cycling) 热循环测试—外加温箱

□ power cycling功率循环老化测试

顾名思义就是让芯片间歇流过电流产生间隙发热功率，从而使芯片温度波动。因为热源为芯片自身发热，所以一般称之为主动加热。功率循环的周期一般为3~5秒。

功率循环对SiC功率模块损伤的机理，主要是铜绑定线热膨胀系数与芯片表面铝层热膨胀系数不同，芯片热膨胀系数与DBC板不同导致的。损伤的结果主要是绑定线脱落，断裂，芯片焊层分离。



测试标准:

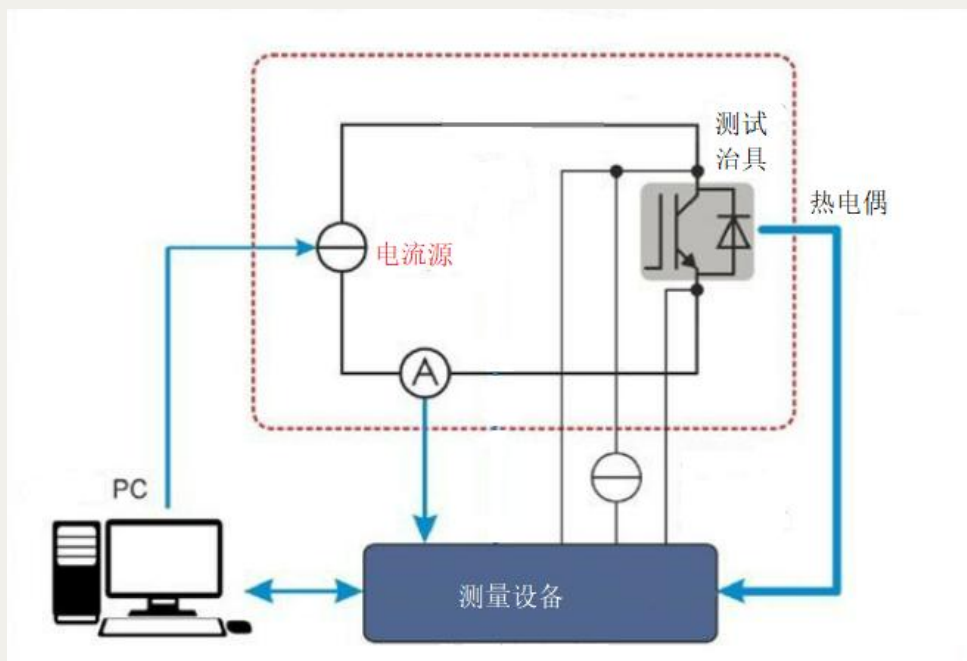
IEC60749-34: 实验的方法, 如何搭建硬件测试平台。

IEC60747-9: 器件参数的测试方法, 通过此方法来测试功率循环后的IGBT模块是否失效。

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(IGBT)

QC-T 1136-2020 电动汽车用绝缘栅双极晶体管模块环境试验要求及试验方法

测试平台



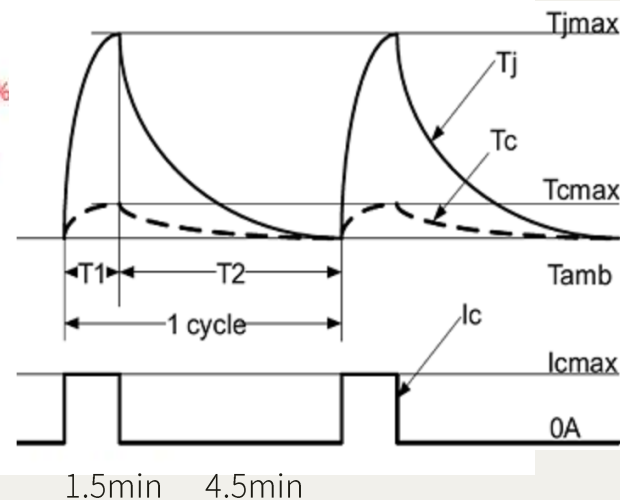
判定条件

怎么做功率循环、热循环测试?

- 测试标准: IEC60749-34
- 判别标准: IEC60747-9

失效判据:

- VCEsat增加 $\geq 5\%$
- VF增加 $\geq 5\%$
- Rth增加 $\geq 20\%$

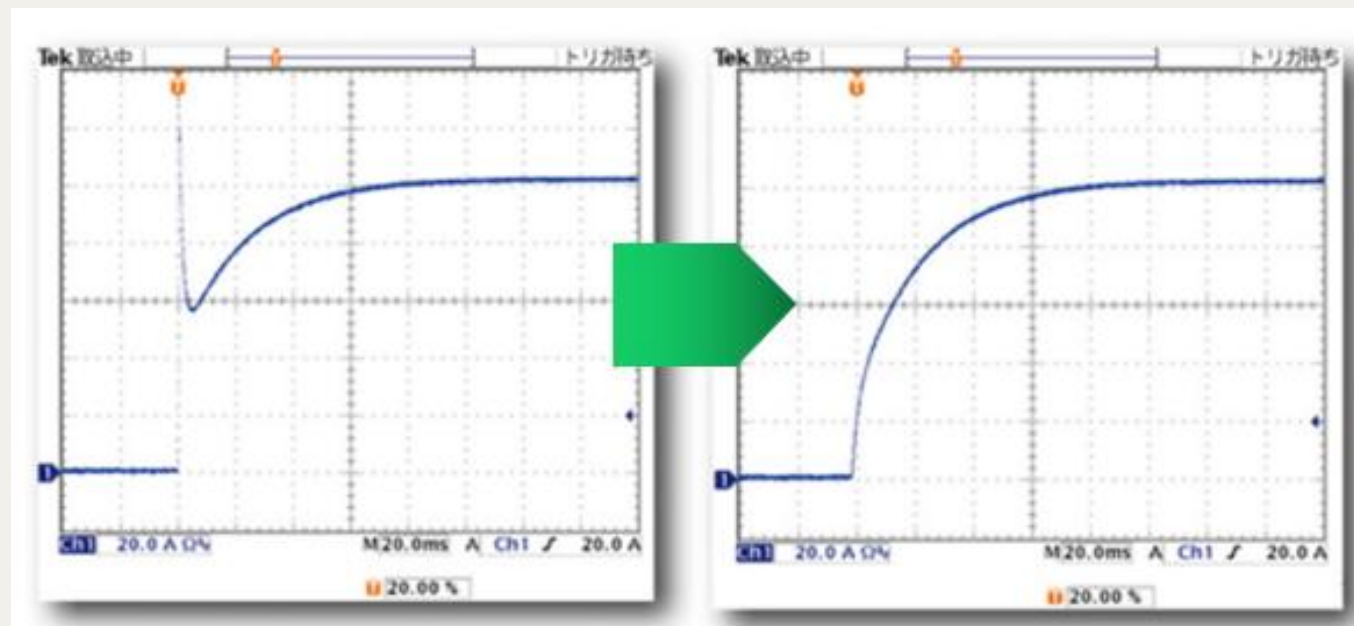


□ 功率循环测试对电源的要求:

IGBT/MOSFET 在功率循环测试时,电源间歇性的开启、关闭。如果电源在ON/OFF时出现过大的冲击电流,则会发生过电流现象会对测试造成影响,从而无法准确完成测试,甚至烧坏产品、测试失败。

□ IT-M3900 在功率循环测试中的应用

- 宽范围设计,单机最大电流可以达到1020A。满足IGBT/MOSFET不同功率段的测试需求;
- CC优先权的设定,可以有效抑制电源在ON/OFF过程中发生过大的电流过冲。



xx用户 IGBT功率循环测试, CC优先模式下的电流波形



芯片自身可靠性测试

测试项目	HTRB 高温反偏测试	HTGB 高温门极反偏测试	H3TRB 高温高湿反偏测试
测试条件	1000个小时, 95% VCE(max), 125°C < Tc < 145 °C	1000个小时, VGE=20V (+/-方向都需 测试, 各一半测试样品) ,Tj=Tj(max)	1000个小时, 环境温度85°C, 相对 湿度85%, VCE=80V
原理图			
判定条件	验证长期稳定情况下芯片的漏电流, 考验对象是IGBT边缘结构和钝化层的弱点或退化效应。	高温门极反偏测试主要用于验证栅极漏电流的稳定性, 考验对象是IGBT栅极氧化层。	高温门极反偏测试主要用于验证栅极漏电流的稳定性, 考验对象是IGBT栅极氧化层。
电源选型	高压源: IT-M3140 IT-M3906D-1500-12等	高精度源: IT-M3200 IT6400 IT2800	IT-M3140-80V IT-M3900



宽禁带半导体测试介绍

● 器件级应用Demo测试



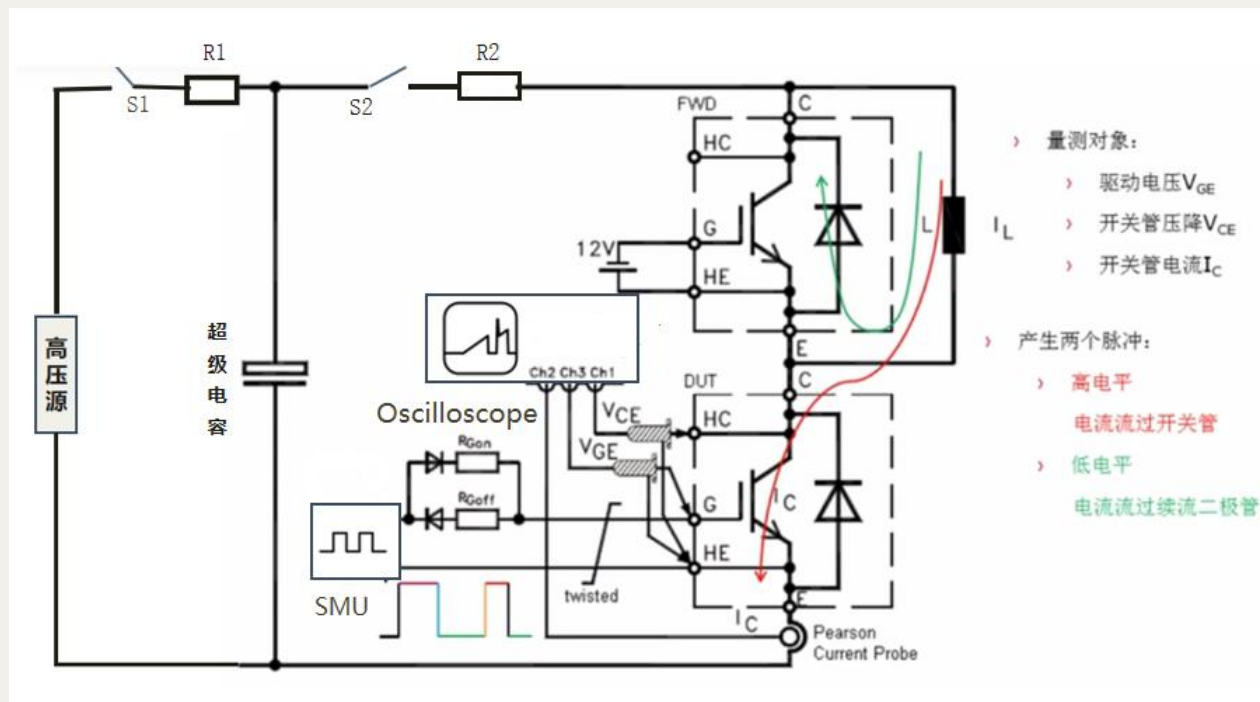
双脉冲测试介绍

□ SiC MOSFET Double Pulse Test

双脉冲测试(Double Pulse Test), 双脉冲是分析功率开关器件动态特性的基础实验方法, 贯穿器件的研发, 应用和驱动保护电路的设计。合理采用双脉冲测试平台, 你可以在系统设计中从容的调试驱动电路, 优化动态过程, 验证短路保护。

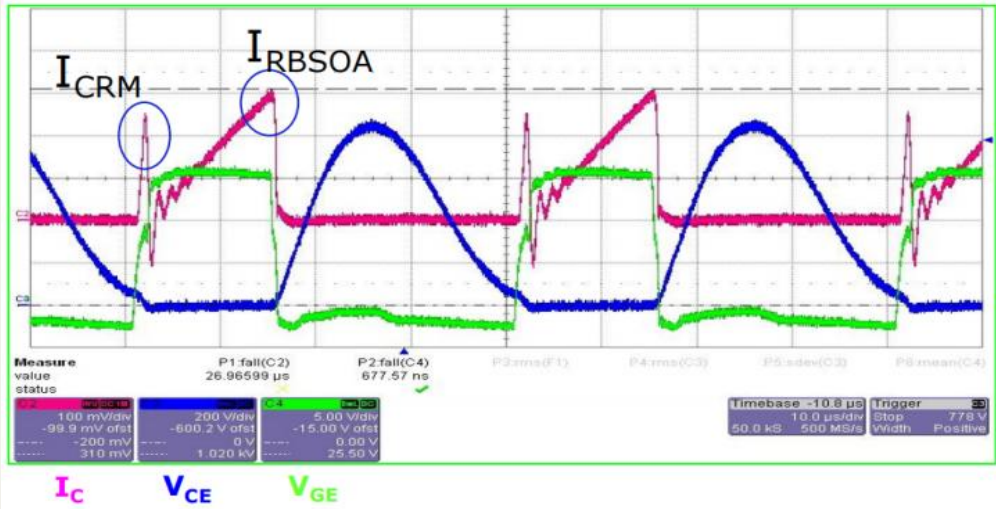
主要测试设备:

1. 高压电源: [IT-M3147/IT6000D/IT-M3906](#)
2. 电容组
3. 负载电感
4. 示波器
5. 高压差分电压探头(1000:1)
6. 电流探头
- 7 可编程信号发生器或SMU: [IT2806](#)

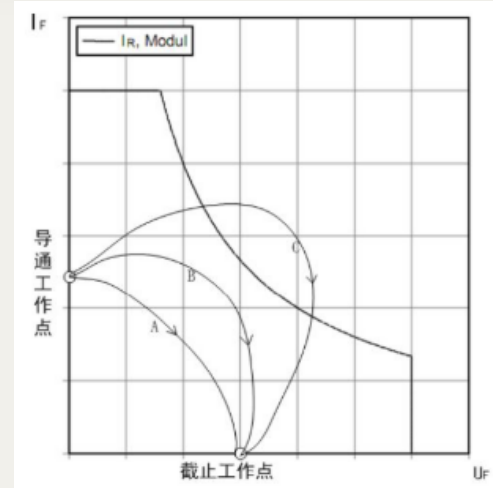


通过双脉冲实验我们可以得到什么？

Tip 1. 获取ICRM (最大峰值电流) IRBSOA(最大关断电流)

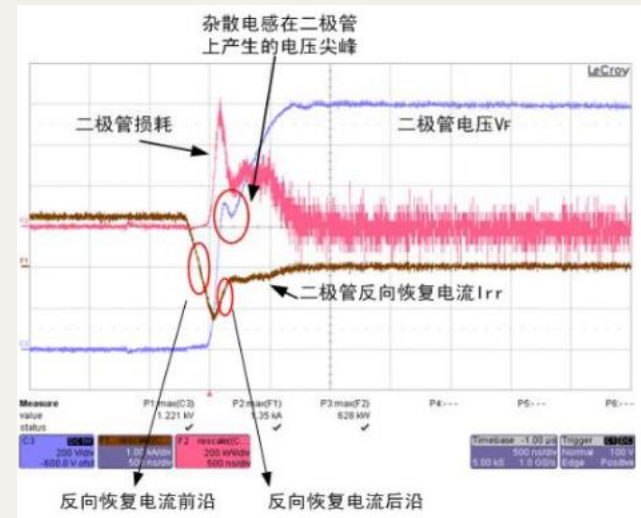
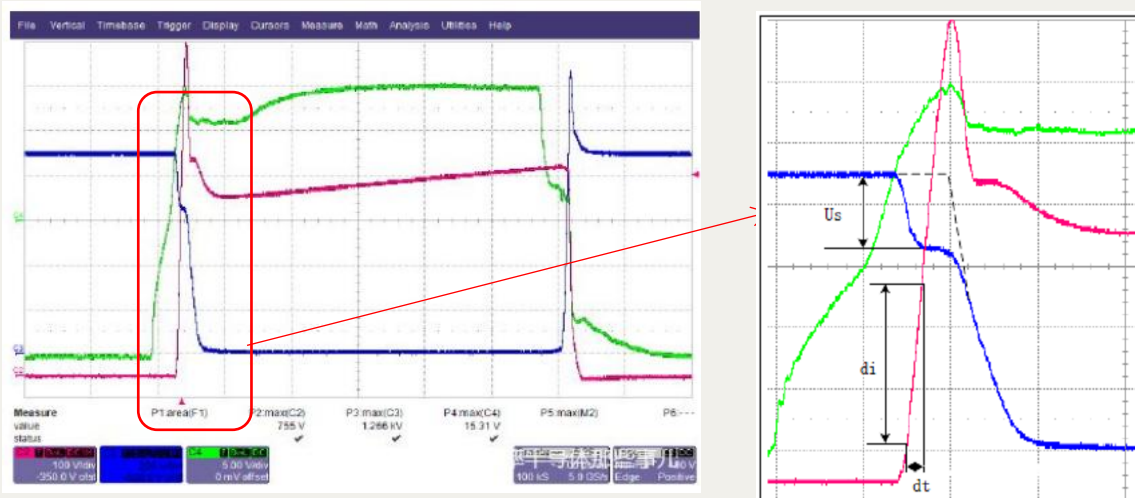


Tip 3. 评估续流二极管的风险

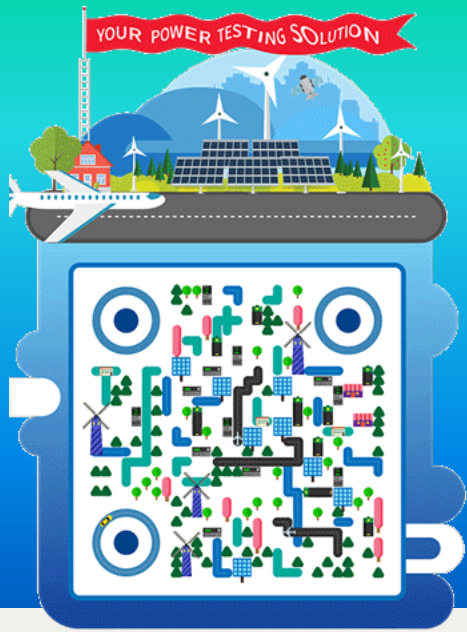


安全工作区SOA

Tip 2. 测量主电路杂散电感: $U_s = L_s \cdot di/dt$



二极管反向恢复时



ITECH



 **ITECH**

YOUR POWER TESTING SOLUTION





Thank you

YOUR BEST POWER SOLUTION