

利用吉时利2290系列高压电源和2600B系列系统数字源表源测量单元(SMU)仪器对高压半导体器件击穿电流和漏电流进行测量

对能源效率的重视催生了更高功率密度的电子技术的发展。在电网和工业应用领域，如交流电机控制、不间断电源(UPS)和牵引力控制(大型混合动力和电动车)，保持可控电缆规格的需求推动着功率转换向更高电压方向发展。从历史上看，对于这种电压，所选择的半导体器件是晶闸管。器件制作和材料工艺的技术进步正推动着IGBT和MOSFET的发展，其电压额定值高达数千伏。在可能的应用中，利用IGBT或MOSFET取代晶闸管可以在高开关频率实现功率转换。向更高频率的转移减少了设计中无源元件的尺寸，从而提高能源效率。

吉时利在高功率半导体器件测试领域技术领先，其高压源测量产品包括237、2410和2657A型源测量单元(SMU)仪器。最近，吉时利公司发布2290-5型5kV和2290-10型10kV高压电源。本应用笔记主要介绍这些电源在高压半导体器件测试中的应用。

高压器件测试

高压半导体器件的基本特性分析通常涉及击穿电压和漏电流研究。这两个参数有助于器件设计人员迅速确定器件是否正确制造以及器件在目标应用中是否能够有效使用。

击穿电压测量

向器件施加一个不断增加的反向电压直到达到表明器件击穿的某个测试电流时即可测得击穿电压。图1给出利用2290系列高压电源对高压二极管进行击穿测量的示意图。注意，2290系列高压电源是单级电源，为了施加反向电压，必须与二极管阴极相连。

在测量击穿电压时，通常在与器件预期额定电压相差较远的地方进行，以确保器件鲁棒性和可靠性。2290-5和2290-10型电源具有较宽的电压范围，足以对业界未来器件进行测试。

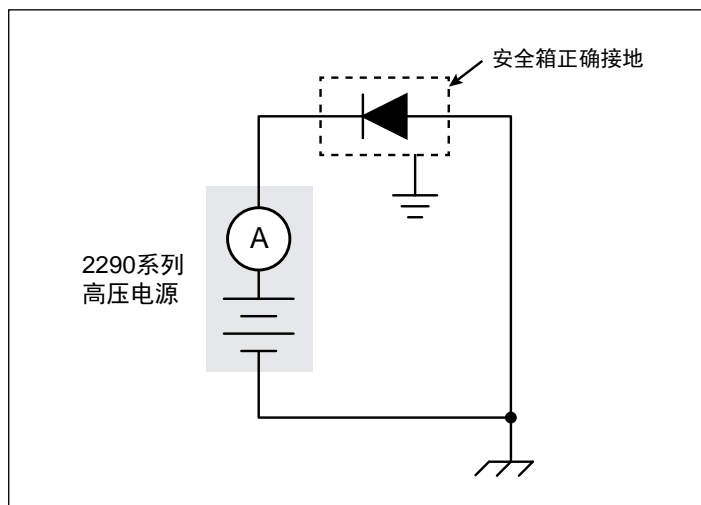


图1 利用2290系列高压电源对高压二极管击穿电压进行测量。

安全考虑

在进行高压测试时，安全是最重要的问题。2290系列电源电压高达10kV，因此必须采取预防措施，以确保操作者不会暴露在危险的电压下：

- 封闭待测器件(DUT)，任何外露接头都要以正确的方式接地。
- 使用安全联锁。2290系列电源是完全联锁的，因此如果联锁未启用(联锁开关关闭)，将禁止高压输出。电源联锁电路应当连接到常开开关，只有当系统中的用户接入点关闭时，常开开关才关闭，以确保操作人员无法接触与待测器件相连的高压。例如，打开测试夹具的盖子应当打开开关/继电器，使2290系列电源的联锁关闭。
- 使用额定值为系统最大电压的电缆和连接器。2290系列电源提供多种适当额定值的附件，测试系统设计人员可以利用这些附件与待测器件(DUT)进行连接。

漏电流测试

在典型的功率转换应用中，半导体器件用作开关。漏电流测量将给出半导体与理想开关的接近程度。此外，当对器件可靠性进行测试时，通过漏电流测试还可以给出器件降级，并预测器件寿命周期。

半导体研究人员正在寻觅实现更高质量开关的材料，生产具有极低漏电流的器件。这类电流可能低于2290系列电源的测量能力。在这种情况下，可将2290系列电源精确源能力与吉时利源测量单元（SMU）仪器的精确低电流测量能力相结合。利用吉时利源测量单元（SMU）仪器可以提高低电流测量分辨率和精度，同时提高电流限幅精度。例如，吉时利2635B型和2636B数字源表®源测量单元（SMU）仪器在1 μ A以下具有4个电流量程。吉时利源测量单元（SMU）仪器的电流限幅可以配置为量程的10%。¹

当对低于1 μ A电流进行测量时，为了避免不期望的测量误差，应当使用三同轴电缆和采取静电屏蔽措施。三同轴电缆非常重要，主要因为它允许与电流测量仪器保护端子连接。保护可将漏电流从测量端旁路，从而消除系统漏电流的影响。使用静电屏蔽可以从测量端分流静电电荷。静电屏蔽是一个包围电路和任何外露连接的金属箱。安全测试箱可以起到静电屏蔽的作用。有关优化低电流测量的更多提示，请参阅吉时利《低电平测量手册》（第7版）。

安全配置

每增加一个新的要素，都要检查系统安全性，在这种情况下，源测量单元（SMU）仪器与测试电路相连。在测试击穿电压时要考虑安全问题，2600B系列源测量单元（SMU）仪器还能生成高达200V的电压。与2290系列电源类似，吉时利2600B系列源测量单元（SMU）仪器具有安全联锁，以确保操作人员在改变测试设置期间的安全。为了实现最佳的系统安全性，2600B系列源测量单元（SMU）仪器的联锁应当与2290系列电源进行并联，如图2所示。

作为系统安全检查的一部分，要考虑器件故障的所有可能结果。在同时使用2290系列电源和2600B系列源测量单元（SMU）仪器进行测量时，器件击穿可能导致在源测量单元（SMU）仪器输入端出现高压。因为源测量单元（SMU）仪器无法应对这些更高的电压，必须针对高压电源可能带来的损害实施保护。为此，可以使用2290-PM-200型防护模块。无论测试电路中是否使用2290-5型5kV或2290-10型10kV高压电源，都可以使用该防护模块，参见图3。图4给出测试电路中2290-PM-200型防护模块的用法。

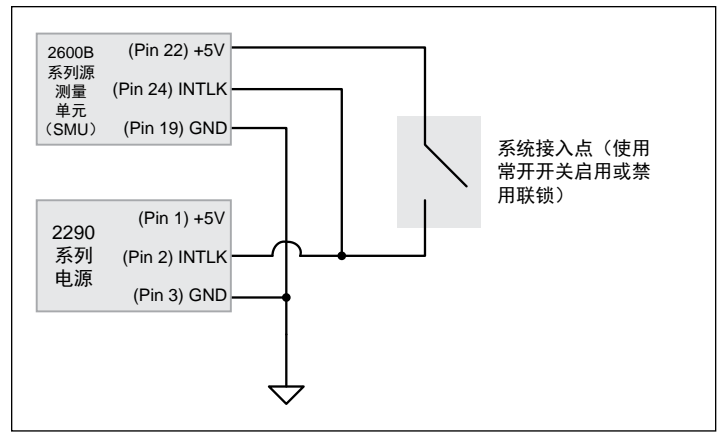


图2 2600B系列源测量单元（SMU）仪器与2290系列电源联锁与单一系统接入点（如测试夹具盖）的正确接法。



图3 2290-PM-200型防护模块实现200V源测量单元（SMU）仪器与测试电路的安全连接。无论测试电路中是否使用2290-5型5kV或2290-10型10kV高压电源，都可以使用该防护模块。

测试设置如图4所示，图5给出高压二极管漏电流的实际测量结果。在室温条件下施加3300V电压时，二极管最大反向电流为10 μ A。该结果表明二极管满足其性能指标。反向电流随着反向电压的增加而以更快速度增加，表明二极管接近击穿。

图6给出对4000V IGBT的集电极-发射极截止电流进行测量时的实际测试结果。在测试中，对栅极和发射极端子进行短路，以确保器件保持关闭(图7a)。利用源测量单元（SMU）仪器可以方便地设置栅极电压。如果想在器件处于硬关闭时(栅极端偏置低于0V)进行漏电流测量，那么使用源测量单元（SMU）仪器非常有益。图7b给出利用两部源测量单元（SMU）仪器和2290系列电源进行测试时的连接。

¹ 源测量单元（SMU）仪器的电流限幅是有源电流限幅，具有有限的响应时间。为了限制电路中可能的最大电流，使用串联电阻器。

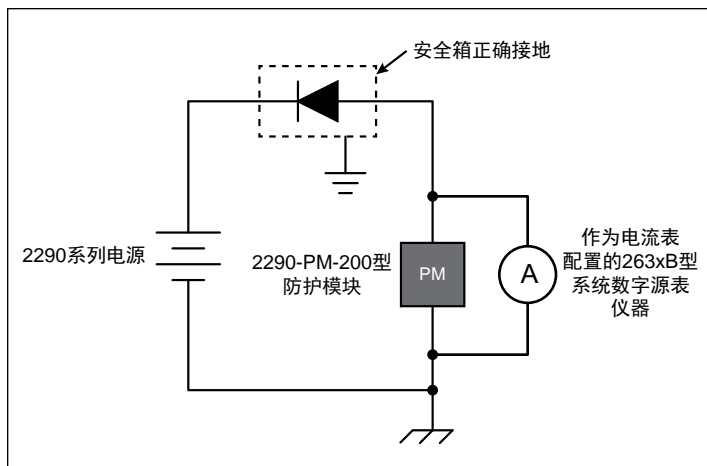


图4 使用2290系列电源和263xB型源测量单元（SMU）仪器，对高压二极管漏电流进行特性分析。使用源测量单元（SMU）仪器可以提高电流测量和电流限幅的分辨率和精度。

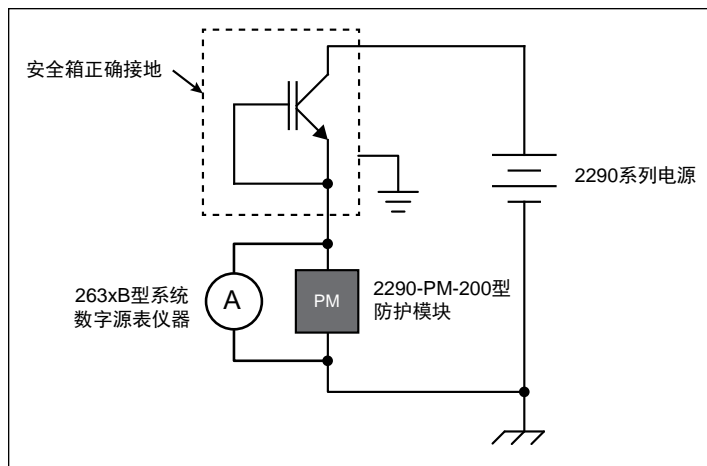


图7a 利用2290系列电源和263xB型数字源表源测量单元（SMU）仪器对截止电流(I_{CES})进行测量的设置。对栅极和发射极进行短路可以使器件处于关闭状态。

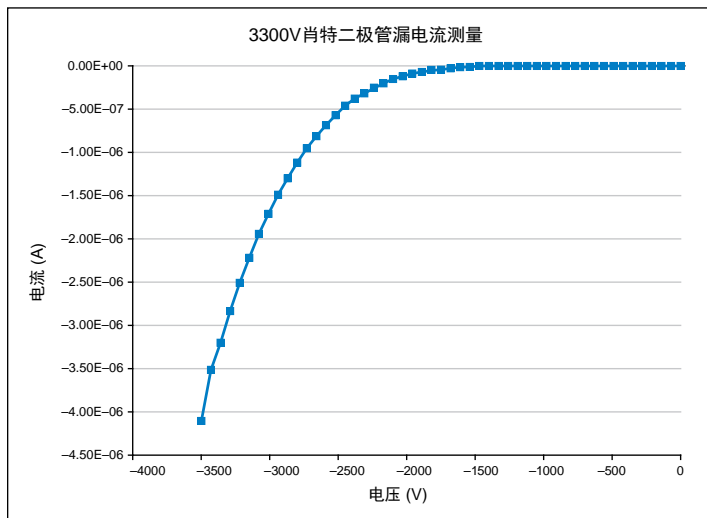


图5 3300V碳化硅肖特二极管漏电流测量。通过2290-5 5kV型电源施加电压，并使用2636B型系统数字源表源测量单元（SMU）仪器测量电流。

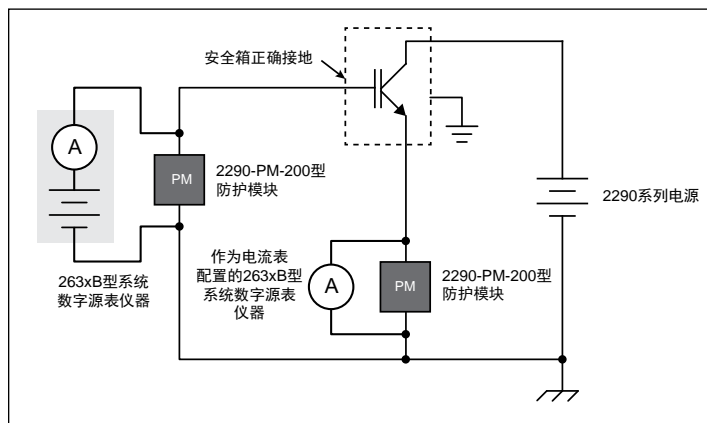


图7b 利用2290系列电源和263xB型数字源表源测量单元（SMU）仪器对IGBT截止电流(I_{CES})进行测试的设置。与栅极端相连的源测量单元（SMU）仪器可以为栅极施加一定偏置，即使器件进入硬截止状态。

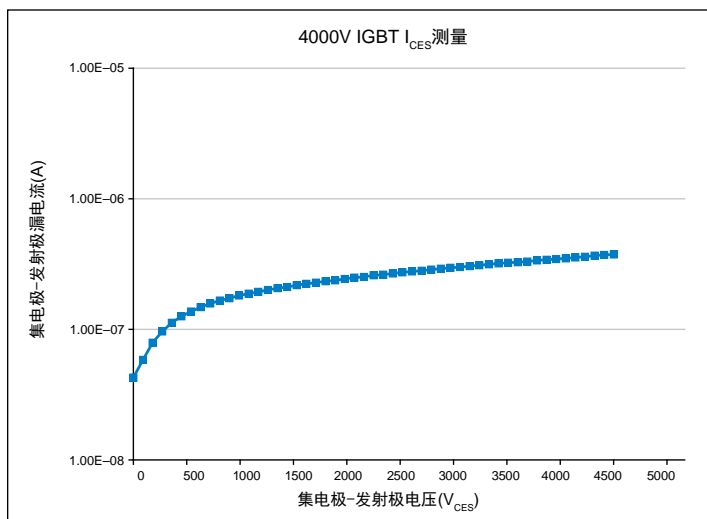


图6 4000V IGBT I_{CES} 测量。通过2290-5型电源施加 V_{CES} ，利用263xB型数字源表源测量单元（SMU）仪器测量 I_{CES} 。对栅极和源端进行短路。

这个IGBT在4000V电压时的最大截止电流为100 μ A。该IGBT的性能优于其指标。实际上，甚至在4500V电压时，其截止电流也没有迅速增加，因此这表明该器件尚未出于击穿中。

附录给出生成图5和图6中结果的指令序列，在图5中使用2290-5型电源和2636B型数字源表源测量单元（SMU）仪器，在图6中使用2290-10型和2636B型数字源表源测量单元（SMU）仪器。注意，利用Python™2 开源语言将信息传送到GPIB接口。

结束语

高压半导体器件测试设计测试系统安全、宽电压范围和精确电流测量等问题。利用吉时利2290系列电源和吉时利数字源表源测量单元（SMU）仪器及有关附件可以满足这些需求，并进一步促进高压材料和半导体器件研究。

附录

在Python环境下输入pyVisa和时间模块

```
import visa
import time
```

在2290电源GPIB的14地址
和263xB仪器26地址开启VISA会话

```
ki2290 = visa.instrument("GPIB::14")
ki263x = visa.instrument("GPIB::26")
```

重置和清除263xB状态

```
ki263x.write("reset()")
ki263x.write("*CLS")
```

重置和清除2290错误

```
ki2290.write("*RST")
ki2290.write("*CLS")
ki2290.write("*RCL 0")
```

将263xB配置为电流表，设置电流限幅
和电流测量量程

```
ki263x.write("smua.source.rangev = 0.2")
ki263x.write("smua.source.levelv = 0")
ki263x.write("smua.source.limiti = 1e-3")
ki263x.write("smua.source.autorangei = 1")
ki263x.write("smua.measure.lowrangei = 100e-9")
```

配置263xB显示屏，开启输出

```
ki263x.write("display.screen = display.SMUA")
ki263x.write("display.smua.measure.func = display.
MEASURE_DCAMPS")
ki263x.write("smua.source.output = smua.OUTPUT_ON")
```

为预置输出电压和测量的电流读数定义扫描变量

```
voltage = 0
currReading = ""
currRdgList = []
# 开启2290时间扫描的输出(1)
time.sleep(1)
ki2290.write("HVON")

print "Running Sweep . . ."

# 从0至4500V进行扫描，并对量程中每个扫描点
的电流进行测量
对于量程(0,51)中的n:
    ki2290.write("VSET " + str(voltage))
    time.sleep(2) # Allow new voltage level to stabilize
    currReading = ki263x.ask("print(smua.measure.i())")
    time.sleep(1) # Allow measurement to be taken
    currReading = float(currReading)
    currRdgList.append(currReading)
    voltage = voltage + 100
```

将2290电源电压设置为0V，并关闭其输出

```
ki2290.write("VSET 0")
ki2290.write("HVOF")

# 关闭263xB型仪器输出
ki263x.write("smua.source.output = smua.OUTPUT_OFF")
```

打印电流测量结果

```
print "Sweep Complete. Current Measurements: ",
currRdgList
```

说明书如有变动不另行通知。所有吉时利的注册商标或 商标名称都是吉时利仪器的财产。
所有其它注册商标或商标名称都是相应公司的财产。
此版本为中文译本，仅供参考。您购买或使用前请务必仔细阅读本文件的英文原件。



更自信的测试

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. ■ 28775 AURORA RD. ■ CLEVELAND, OH 44139-1891 ■ 440-248-0400 ■ Fax: 440-248-6168 ■ 1-888-KEITHLEY ■ www.keithley.com

BENELUX
+31-40-267-5506
www.keithley.nl

FRANCE
+33- 01-69 -86-83-60
www.keithley.fr

ITALY
+39-049-762-3950
www.keithley.it

MALAYSIA
60-4-643-9679
www.keithley.com

SINGAPORE
01-800-8255-2835
www.keithley.com.sg

BRAZIL
55-11-4058-0229
www.keithley.com

GERMANY
+49-89-84-93-07-40
www.keithley.de

JAPAN
81-120-441-046
www.keithley.jp

MEXICO
52-55-5424-7907
www.keithley.com

TAIWAN
886-3-572-9077
www.keithley.com.tw

CHINA
400-820-5835
www.keithley.com.cn

INDIA
080-30792600
www.keithley.in

KOREA
82-2-6917-5000
www.keithley.co.kr

RUSSIA
+7-495-664-7564
www.keithley.ru

UNITED KINGDOM
+44-1344-39-2450
www.keithley.co.ukw

有关如何购买或寻找销售合作伙伴的更多信息，请访问<http://www.keithley.com.cn/company/bizcenter>。