

Application Note Series

利用吉时利高功率系统数字源表[®] 源测量单元 (SMU) 仪器对功率 半导体器件进行测试

概述

电子控制与电子功率转换在各行业(如发电、工业马达驱动与控制、运输及IT)发展迅速,正推动着功率半导体器件设计与测试的增长。为了证明技术改进,必须对新器件与现有器件能力进行对比。非硅半导体材料的使用需要采用新工艺,而且,为了可持续发展,这些新工艺必须能够交付已知的结果,并具有高产量。随着新器件设计的发展,必须对诸多器件进行更长周期的可靠性测试。因此,测试工程师必须找到具有高精度、可扩展和高费效比的测试设备。

功率模块设计工程师——分布式功率半导体器件用户——正致力于功率半导体器件测试工作。为了开发DC-DC转换器、逆变器、LED控制器、电池管理芯片以及诸多其他器件,他们在设计中采用分立功率半导体器件。为了实现更高的电源效率,他们必须对来自供应商的器件进行质量检验,确保其符合应用环境的要求,并预测器件对功率模块效率的影响,最后验证最终产品的性能。

吉时利源测量单元(SMU)仪器,可为器件测试工程师及功率模块设计工程师提供测量所需的工具。不论他们对曲线跟踪仪、半导体参数分析仪或示波器是否熟悉,都能简单而迅速地得到精确的结果。本应用笔记介绍了某些最常见的测试、相关挑战以及吉时利源测量单元(SMU)仪器怎样简化测量流程,特别是与吉时利参数曲线跟踪仪配置进行集成时。

功率器件特性分析背景

开关电源是电源管理产品中使用的常见电子电路。在最简单的开关电源(图1)中,其主要组成包括半导体(如功率MOSFET)、二极管和一些无源元件(包括电感和电容)。许多开关电源还包括变压器,用于实现输入和输出之间的电子隔离。功率开关管和二极管以受控的占空比轮流导通和关断,生成期望的输出电压。

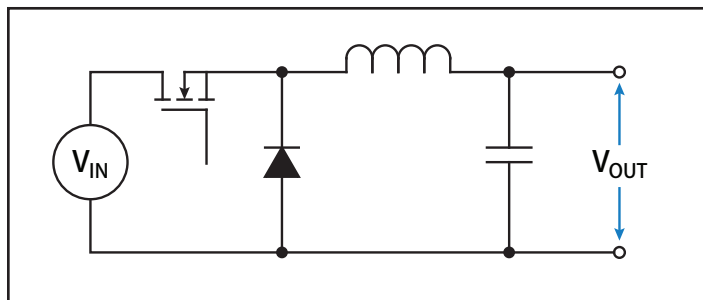


图1 某开关电源示意图

在对电源效率进行评估时,理解开关损耗(在器件改变开关状态的短暂时间内出现的能量损耗)和导通损耗(当器件处于开启或关闭状态时出现的能量损耗)非常重要。基于吉时利源测量单元(SMU)仪器的解决方案,可以帮助测试工程师对影响传输损耗的器件参数进行评估。

功率器件常常用于电路保护。例如,某些晶闸管器件用作过压保护。为了实现这一目标,这类器件必须在适当的预期电压或电流触发,必须经受预期电压,必须以最小的电流消耗在电路中发挥作用。为了证明这些器件合格,必须使用高功率仪器。

本应用笔记重点是对静态功率器件参数进行特性分析。¹ 这些参数可以分为两类:一类在器件处于导通状态时决定其性能,另一类在器件处于关断状态时决定其性能。表1给出吉时利源测量单元(SMU)仪器支持的几种功率半导体器件常见的导通状态和关断状态参数。吉时利ACS基本版本软件可对测试系统中所有源测量单元(SMU)仪器配置和数据采集进行管理,从而简化测试配置。与通用启动软件不同,ACS基本版本软件是为功率器件特性分析而专门设计的,它包括测试知识库;用户可以致力于测试和器件参数而非源测量单元(SMU)仪器配置。利用PCT配置中包含的ACS基本版本软件,可得到本应用笔记中包括的测试结果。

¹ Tektronix公司可提供功率器件瞬态特性分析解决方案。欲了解更多信息,请访问:
www.tek.com。

表1 常见半导体器件与测试

测试种类	器件与测试					吉时利SMU I-V能力
	二极管	MOSFET	BJT	IGBT	晶闸管级器件 (如SCR, Triac)	
开启状态	$V_F - I_F$	$V_{DS} - I_D$ V_{TH} $V_{GS} - I_D$ $R_{DS(on)}$	$V_{CE} - I_C$ Gummel图	$V_{CE} - I_C$ $V_{GE} - I_C$	V_T I_H I_L	电压: -40V~+40V 电流: 最高 100A (脉冲)
关闭状态	I_R	I_{GSS} I_{DSS} BV_{DSS} BV_{DG}	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO} BV_{CBO}	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO}	V_{bo} V_{DRM} V_{RRM}	电压: -3kV~+3kV 电流: 1fA以下

导通状态特性分析

导通状态特性分析通常使用能够为低级电压测试提供源和测量的大电流仪器。如果器件拥有3个端口，那么，第二个源测量单元（SMU）仪器用在器件控制端，使器件处于导通状态。关于功率MOSFET导通状态参数特性分析的典型配置，参见图2。

吉时利源测量单元（SMU）仪器包含功率半导体器件所需的多种电流。2600A与2600B系列系统数字源表源测量单元（SMU）仪器包括用于直流特性分析的1.5A直流和10A脉冲以上的能力。对于极高电流的器件，可以并联使用两部2651A型高功率数字源表源测量单元（SMU）仪器，生成高达100A的电流脉冲。

下面，我们看一下导通状态参数测试的详细配置及测量挑战。

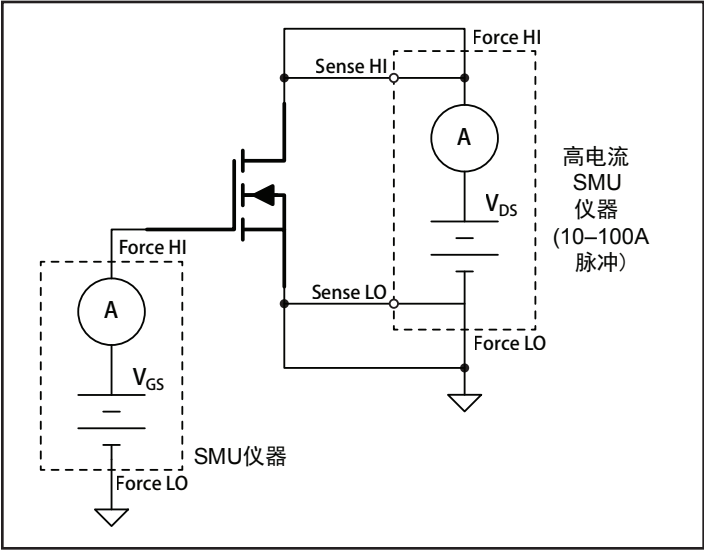


图2 功率器件导通状态特性分析的典型源测量单元（SMU）配置

输出特性

最容易辨认的半导体器件测试结果之一就是输出特性图。在器件数据手册中，输出特性通常以图的形式给出，它描绘了输出电压和电流之间的关系。对于栅极功率半导体开关，如MOSFET、IGBT或BJT，输出特性通常指“系列曲线”。图3给出ACS基本版本软件生成的功率IGBT测试结果。

在功率半导体测试中，脉冲测试是常见的，因为直流测试可能引起器件自发热，这可能改变测得的特征。利用多个源测量单元（SMU）仪器实施脉冲测试，要求对源调整和测量的定时进行精密控制，而其往往需要利用计算机程序进行协调。要取得一致的结果，验证系统很重要。只需向系统发送一个脉冲源并测量器件的响应即可。采集作为时间函数的完整的脉冲波形，允许选择适当的源和测量延迟，这样在系统设定后可以适当开启器件并进行测量。2650A系列高功率系统数字源表源测量单元（SMU）仪器中的高速A/D转换器对于监控器件电压和电流非常有用，因为它们与时间相关。ACS基本版本2.0软件的诊断特性允许轻松捕获系列曲线中单点的脉冲形状。图4给出IGBT集电极电压和电流相对于时间的脉冲瞬态特性分析结果。对于这个具体实例，为确保在测量之前对系统进行设立，要在脉冲启动后100μs进行测量，这将使得测试之间的结果更一致。

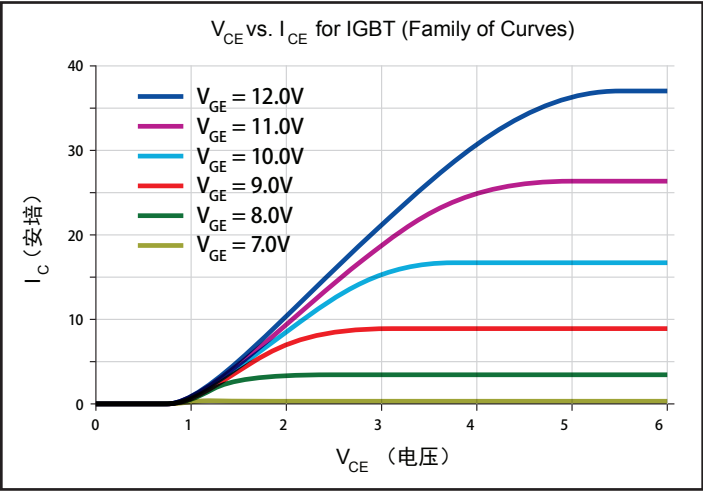


图3 测得的商用IGBT输出特性

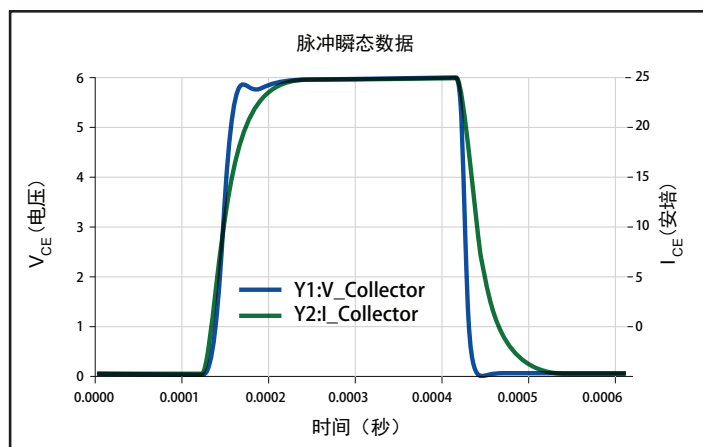


图4 IGBT集电极电压和电流的脉冲瞬态数据

功率半导体器件往往是高增益器件，对这类器件进行特性分析时，示波器是常见的仪器，其测试结果也是不稳定的。2650A系列源测量单元（SMU）仪器的高速A/D转换器与ACS基本版本软件的脉冲瞬态特性，对校验示波器图形是非常有用的。示波器校验包括通过串联方式为器件控制或输入端——如MOSFET或IGBT的门极，添加电阻器。吉时利8010型高功率夹具适合添加分立电阻器。

导通电压

半导体器件的导通电压直接影响着导通损耗。导通电压实例包括功率二极管的前向电压(V_F)、BJT或IGBT的导通饱和电压(V_{CEsat})以及晶闸管的导通电压(V_T)。器件消耗或损失的功率等于导通电压与负载电流的乘积。

这个功率不传至器件。通常，器件制造商希望对导通电压与导通损耗怎样随着温度和负载电流而发生变化进行特性分析。吉时利源测量单元（SMU）仪器经常用于这些特性分析。

为了测量导通电压，需要对高电流源测量单元（SMU）仪器进行配置，以向器件输出电流，并测量电压。对于BJT和IGBT，需要在基极或门极使用第二个低功率源测量单元（SMU）仪器，以使器件处于导通状态。由于功率半导体通常是大电流器件，往往利用脉冲激励来测量导通电压，以避免因直流测试电流导致的器件自发热给器件参数带来任何变化。

两个重要因素有助于确保导通电压测试的成功：(1)精确的电压测量；(2)适当的电缆和连接。精确的电压测量非常适合超功率应用，因为它具有极低的导通电压(<2V)，同时传输的电流可能超过100A。在测试器件，这种大电流可能在测试引线以及仪器与待测器件（DUT）之间的测试引线连线产生电压降。这些额外电压可能给电压测量带来误差。四线或开尔文连接因采用单独的测试引线连接电压计，从而消除了其中的大部分测量电压误差。由于流经这些引线的电流微乎其微，在仪器与待测器件（DUT）之间没有电压降，因此仪器测量的电压就是待测器件（DUT）电压。

在对大电流器件进行测试时，采用低电感电缆有助于确保良好的脉冲保真度(也就是，短的上升时间和下降时间)，这可以在指定脉宽内提供更多的测量时间。2651A型高功率系统数字源表源测量单元（SMU）仪器，包括特殊的低电阻、低电感电缆组合，可以在50A电流时生成100μs脉冲。

传输特性

利用器件传输特性可以评估其跨导，进而评估其携带电流的能力。传输特性与确定开关时间和评估开关损耗具有间接关系。为了测量温度对器件最大电流处理能力的影响，通常需要对传输特性与温度关系进行监控。测量传输特性时，需要两部源测量单元（SMU）仪器：一部仪器对器件控制端的输入电压进行扫描，另一部仪器对器件输出端进行偏置，并测量输出电流。对于MOSFET ($V_{DS}-I_D$) 来说，典型的传输特性测量包括栅极电压与漏极电流图；对于IGBT ($V_{GE}-I_C$) 来说，典型的传输特性测量包括栅极电压vs.集电极电流图；对于BJT (V_{BE} 与 I_C, I_B)来说，典型的传输特性测量包括Gummel图。

在某些情况下，需要测量多个输出电流。特别是对BJT的Gummel图来说，其电流横跨几个数量级。在这些情况下，2651A型仪器非常有用，因为它可以测量从纳安到50A范围的电流。图5给出在BJT器件集电极使用2651A型仪器、在基极使用2636B仪器生成的Gummel图。

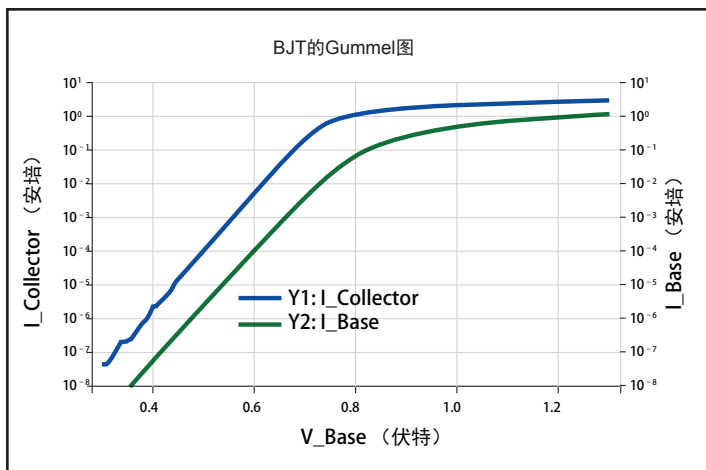


图5 使用吉时利2651A型和2636B型源测量单元（SMU）仪器生成的典型功率BJT的Gummel图

导通电阻

功率MOSFET的品质因数是导通电阻($R_{DS(on)}$)与门极电荷(Q_g)的乘积。导通电阻是功率MOSFET导通损耗的重要决定因素。其导通损耗 $=I_D \cdot R_{DS(on)}$ 。在大电流时，较新器件的导通电阻范围是几毫欧到几十毫欧。这要求在漏极端要有非常敏感的电压测量能力。测量导通电阻需要两部源测量单元（SMU）仪表：一部源测量单元（SMU）仪表将门极驱动至导通状态，另一部源测量单元（SMU）仪表在漏极发出定义的电流脉冲，并测量作为结果的电压。导通电阻的计算采用欧姆定律，它等于预置的漏极电流和测得的漏极电压的乘积。这种计算可以由软件自动设定。

导通电阻通常取决于漏极电流或门极电源。利用软件，可以触发两部源测量单元（SMU）仪器并进行扫描，因此这个测量可通过一次测试完成。图6给出计算的 $R_{DS(on)}$ 与漏极电流结果。这是一次 $R_{DS(on)}$ 测试中完成的。对于电流极高的器件，可以并联使用两部2651A型仪表生成高达100A的电流脉冲。利用ACS基本版本软件，可对两部源测量单元（SMU）仪器的配置和数据采集进行管理。

导通电阻随着击穿电压而增加，因此增加击穿电压的任何工艺调整，都会牵扯到随后的导通电阻测试，以评估工艺变化的整体影响。要获得在更高电压时具有更高效率的器件，已成为SiC和GaN器件深入研究的动力之一，这类器件在高耐压的导通电阻比硅器件小。

关断特性分析

为了争取理解整个产品的效率，必须研究器件关断时其对整个电路的影响。对于高功率器件，关断状态特性分析往往涉及使用能够提供数百或数千伏电压并测量低电流的高压仪器。关断状态往往在出现在器件的两个端口之间（不论器件端口数量有多少），因此一部源测量单元（SMU）仪器就足矣完成这项测量。不过，可以利用另一部源测量单元（SMU）仪器强制器件进入关断状态，或者为某些端口添加应力。

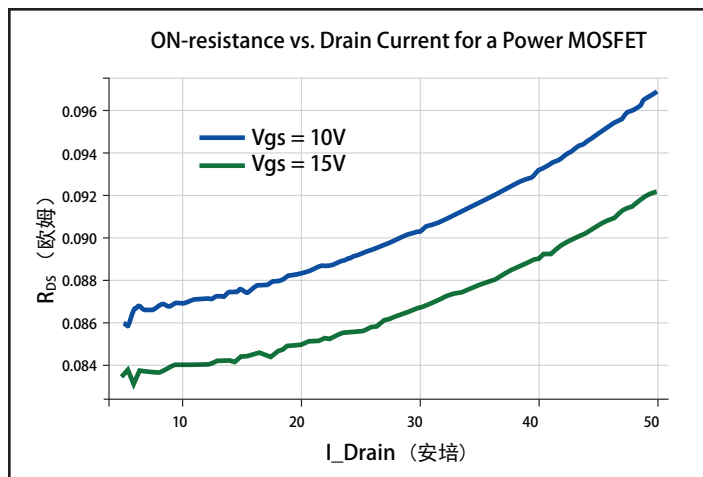


图6 功率MOSFET导通电阻测量结果，它取决于两个栅极电压的漏电流

吉时利数字源表源测量单元（SMU）仪器包括功率半导体器件关断状态特性分析所需的多种电压和电流。2635B与2636B型源测量单元（SMU）仪器，可提供电压200V、电流测量能力达飞安级的特性分析。2657A型源测量单元（SMU）仪器可提供3kV的高压特性分析，具有极低的电流测量分辨率和较高的精度。

当器件关断时，可进行两项测试：击穿电压和漏电流。下面分别介绍。

击穿电压

器件关断状态的击穿电压决定着可以为其施加的最大电压。电源管理产品设计人员感兴趣的初级耐压是MOSFET漏极和源极之间的击穿电压，或IGBT或BJT集电极和发射极之间的击穿电压。对MOSFET而言，栅极可以短路或强制处于“硬”关断状态，如向n-型器件施加负电压或向p-型器件施加正电压。这是极简单的测试，使用一、两部源测量单元（SMU）仪器即可完成。功率较低的源测量单元（SMU）仪器与栅极连接，并强制晶体管关断。对于栅极短路测试，可以强制0V电压或强制用于指定的偏置电压。利用高压源测量单元（SMU）仪器，如2657A型仪器，可强制电流进入漏极，并测量作为结果的漏极电压。

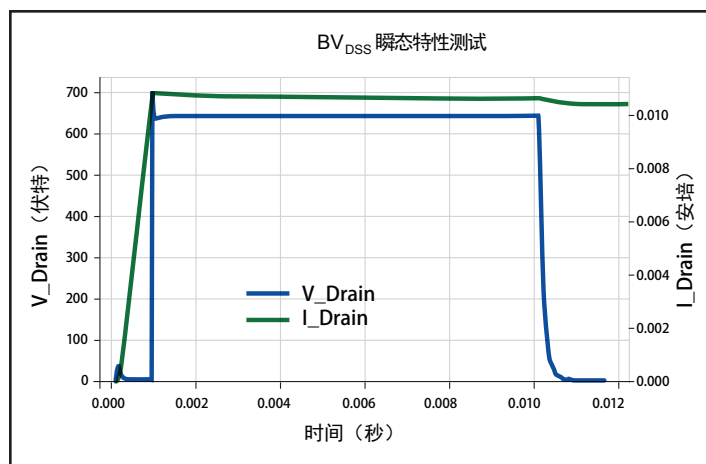


图7 利用2657A型仪器快速A/D转换器采集 BV_{DSS} 测试的电压和电流。采样间隔 10 μ s。

大多数MOSFET的击穿电压都高于数据手册中给出的数值。因此，将漏极源测量单元（SMU）仪器的电压限度定义为高于给定击穿电压的某个值是非常有益的。此外，随着漏极端驱动电压越来越接近雪崩电压，待测器件(DUT)的电流和电压行为可能开始发生变化。这些情况可以利用2650A系列源测量单元（SMU）仪器高速A/D转换器的优势。无需任何其他设备，就可以迅速采集待测器件(DUT)电流和电压的瞬态行为。图7是对商用600V硅功率MOSFET漏极和源极击穿电压进行测试的瞬态特性分析实例。2657A型仪表用于向MOSFET发送脉冲电流，然后以10 μ s间隔测量电压和电流。该图表明，器件实际击穿电压接近680V。

击穿电压特性分析的另一种方法包括在感兴趣端口（如MOSFET的漏极和源极）施加电压，并测量作为结果的电流。击穿电压被定义为电流超过指定阈值（如1mA）时的电压。为了防止测试期间给器件带来破坏，应当限制最大电流。与传统曲线跟踪仪和电源不同，吉时利数字源表源测量单元（SMU）仪器包括内设的可编程特性，可以精确而迅速地限定最大电压和电流。与任何保护器件一样，源测量单元（SMU）仪器的限幅控制具有限定的响应时间。某些器件可能具有极快而强烈的击穿行为，使器件阻抗在极短时间内出现几个数量级的变化。当器件击穿快于源测量单元（SMU）仪器做出的响应时，可以使用串联电阻器分压，从而限制通过器件的最大电流。

安全性必须成为功率半导体器件特性分析需要考虑的首要问题之一。务必牢记所有端口、连接器和电缆的电压额定值。例如，吉时利数字源表源测量单元（SMU）仪器是电浮动的，这意味着测量公共端不与保护接地（安全接地）相连。当用户将测量公共端与安全接地连接，如果源测量单元（SMU）仪器产生的电压超过42V时，必须在所有端口采取高压保护措施。

当对此测试系统进行配置时，重要的是包括操作人员免受电击。为此，一个重要方法是采用安全测试外壳，它可以包围待测器件（DUT）和任何暴露的连接。利用吉时利8010型高功率测试夹具，可在高达3kV的高压下实现高功率半导体器件的安全测试。综合利用安全外壳和安全互锁，可以将用户改变测试连接时的电击风险降至最低。吉时利源测量单元（SMU）仪器配有安全互锁；如果正确安装，当用户开启测试夹具或访问测试台中的晶圆时，这个互锁可以确保危险电压的隔离。

除了保护操作人员，还要考虑与器件端口连接的所有仪器之间的交互，这也是非常重要的。在击穿电压特性分析期间，如果电压较低的源测量单元（SMU）仪器与器件相连，那么器件故障可能导致在该源测量单元（SMU）仪器中出现高电压。吉时利8010型高功率测试夹具包括内置的保护措施，可以对这类应用中电压较低的源测量单元（SMU）仪器予以保护。

漏电流

漏电流是器件处于关断时流经其两个端口的电流大小。漏电流包括最终产品的待机电流。在大多数情况下，感兴趣端口的温度和压力将影响漏电流。实现漏电流最小化，将把器件关断时的功耗损失降至最低。这个功耗是器件消耗的，而不是输出至负载的，因此不产生功率效率。当使用晶体管或二极管进行开关或整流时，重要的是清楚开启与关断状态之间的区别；因此，较低的漏电流意味着具有更好的开关能力。

当对器件的关断状态进行测试时，通常希望测试栅极漏电流及漏极或集电极漏电流。对于功率器件而言，这些值通常在纳安和毫安范围，因此，利用吉时利源测量单元（SMU）仪器的敏感电流测量能力，可以对这些漏电流进行测量。使用宽禁带材料（如碳化硅、氮化镓和氮化铝）制作的器件，通常比硅器件具有更高的击穿电压和更低漏电流，当对这些器件进行测试时，吉时利源测量单元（SMU）仪器的敏感电流测量能力就非常有用。图8给出商用SiC功率MOSFET在关断状态的漏极电压和漏极电流测试结果。

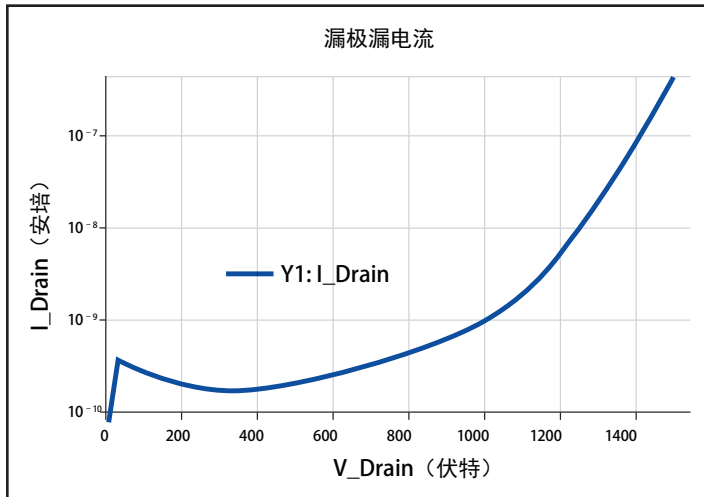


图8 当晶体管处于关断状态时，对漏极电压进行扫描测得的漏极漏电流

三轴电缆对实现精确地低电流测量必不可少，主要是因为它们允许携带保护端。保护可以使漏电流从测量端旁路，从而消除系统漏电流的影响。此外，保护避免了对电缆电容进行充电，从而缩短了高压应用中的建立时间。利用得到保护的测试夹具或探针，可以将保护的益处扩大至待测器件（DUT）。² 吉时利为其所有的源测量单元（SMU）仪器提供三轴电缆和连接，它们都是为低电流测量而量身打造的，如2636B型和2657A型源测量单元（SMU）仪器。适合2657A型仪器的专用高压三轴电缆，可以在3kV高压进行测量，分辨率高达1fA。8010型测试夹具包括至器件测试板的保护连接，允许对低至皮安的电流进行测量。

静电屏蔽是低电流测量需要考虑的另一个重要问题。静电屏蔽是包围电路和任何暴露连接的一个金属罩。该屏蔽罩与测量公共端相连，使静电电荷远离测量节点。当利用8010型高功率测试夹具进行器件测试时，测试夹具底板起到静电屏蔽的作用。

最后，对低电流特性分析来说，系统验证非常重要，其目的是确保测量的建立。建立时间随着期望电流的降低而增加。吉时利产品具有自动延迟设置功能，可以设置合理的延迟，实现良好测量，并考虑仪器的建立特性。不过，还要考虑未保护的系统电容，要利用步进电压进行测量验证，并测量通过系统的电流。利用验证结果，可以设置源和测量延迟，以实现一致的测量。

结束语

吉时利数字源表源测量单元（SMU）仪器可以与ACS基本版本软件配合使用，为高功率半导体分立器件测试提供全面解决方案。ACS基本版本软件包括适合各种功率器件的测试知识库，包括FET、BJT、IGBT、二极管、电阻器及晶闸管。此外，吉时利还提供适当的电缆辅件和测试夹具，实现安全、精确和可靠的测试。虽然这些仪器和辅件可能要单独购买，它们还可以作为吉时利参数曲线跟踪仪配置的一部分而获得。欲了解更多信息或寻求系统配置帮助，请登录吉时利公司 (www.keithley.com.cn) 或与吉时利驻当地代表联系。

² 欲了解更多信息，参见吉时利应用笔记#3163，[Creating Multi-SMU Systems with High Power System SourceMeter SMU Instruments](#)。（利用高功率系统数字源表源测量单元（SMU）仪器，构建多个源测量单元（SMU）系统）。