

Application Note

Series

利用大功率数字源表构建 多源测量单元 (SMU) 系统

简介

利用高压、大电流源测量单元 (SMU) 来设计和构建功率半导体器件直流特性分析测试系统包括以下几个步骤:

- 选择满足测试要求的设备
- 选择连接待测器件 (DUT) 与仪器的电缆和夹具
- 检查系统安全和仪器保护
- 优化仪器建立, 确保测量完整性
- 控制仪器硬件

功率半导体器件的设计确保: 在开启 (ON) 状态下, 它能够为负载提供大量功率, 而自身却消耗最小的电源功率 (高效率); 在关闭 (OFF) 状态下, 它向负载提供的功率几乎为零, 同时自身也消耗最小的电源功率 (高效率) (待机电流非常小)。因此, 功率半导体器件的特性分析或直流参数测试可以分为两种: 开启状态特性分析和关闭状态特性分析。本应用笔记对这两种测试应用进行说明, 并给出利用多种吉时利数字源表源测量单元 (SMU) 仪器构建测试系统的实例。

选择满足测试要求的设备

功率器件测试通常只需要在一、两个端口接入大功率仪器。例如, 高压N-沟道MOSFET关闭状态特性分析需要在漏极提供高压电源; 所有其他端口只需保持电压较低的电源驱动。相反, 当对其开启状态性能进行特性分析时, 则需要在源极施加加大电流, 因此, 只要求这两个端口保持额定的最大功率。测试研究人员如果从较低功率器件测试转向较高功率器件测试, 可以在门极和基底端口重用某些现有的测试设备。如果多个器件能够共用同一测试仪器, 那么用户就可以实现投资回报的最大化。

为了选择适当的测试设备, 必须弄清源和测量所需电流的最小值和最大值。如果可能的话, 就选择最小值和最大值能够扩展的设备, 这样, 可以适应新器件测试发展的需求。

吉时利2600A系列源测量单元 (SMU) 是利用不断演进的测试系统进行设计的。TSP-Link®内部设备通信总线支持创建“无主机”系统, 同时在多个源测量单元 (SMU) 通道实现亚微秒同步。

2600A系列产品的最强大特性之一是利用它能够构建满足各种应用测试需求的系统, 同时保持无缝的系统性能。2600A系列源测量单元 (SMU) 包括8个型号, 它们具有多种功能和能力:

- 当脉冲功率2000W时, 电流量程为50A (利用两个SMU并联, 可以实现100A)
- 在功率60W时高达3kV的电压源, 功率180W时高达1500V的电压源
- 亚皮安测量能力
- 对较低功率SMU, 提供1A或3A直流源。非常适合对具有较大基极电流的大功率晶体管进行测试。

在现有的商用测试主机中, 这种能力通常是难得一见的, 以往往往需要配置定制或半定制自动测试设备才能完成。此外, 利用独立仪器还允许测试工程师根据测试需求的新发展来添加新的能力。独立的大功率源测量单元 (SMU) 可以扩展半导体参数分析仪的电流和电压能力, 从而扩展可测器件的范围。

选择连接待测器件与仪器的电缆和夹具

确定器件接口

过去, 大多数功率半导体制造商为了测试不得不对器件进行封装, 因为当时对晶片上器件施加数十或数千伏电压的技术尚未广泛使用。

商用探测器解决方案的应用使得诸多制造商可以对晶片上器件进行测试, 从而降低了测试成本。

有关封装器件或晶片上器件测试的决策是在探测器的巨大资本成本和测试前封装器件的较小 (但重复) 资本成本之间的一个平衡。吉时利公司的解决方案既适合封装器件测试, 又适合晶片级测试。

对于已封装器件的测试, 系统开发人员应当利用商用测试夹具, 注意支撑的器件封装以及任何定制化机会。吉时利提供8010型大功率测试夹具, 加之供应或可选的器件测试板, 可以对T0-220以及T0-247封装器件进行测试。此外, 8010型大功率测试夹具以及有关器件测试板还支持针对各种器件封装连接的定制。系统开发人员还可以创建定制电路或者使用夹子以及绝缘块连接不支持封装的器件。

8010型大功率测试夹具支持以下吉时利源测量单元 (SMU):

- 1个或2个吉时利2651A型大电流、大功率数字源表 (两个并联允许高达100A脉冲)
- 1个吉时利2657A型高压、大功率数字源表
- 1个或2个以下吉时利源测量单元 (SMU): 2611/12A型、2635/6A型、4200-SMU型、4210-SMU型

在8010型大功率测试夹具中装有适合较低电压源测量单元 (SMU) 的过压保护电路, 因此, 万一因器件故障导致2657A型源测量单元过压, 仪器也可以得到保护。利用8010型夹具, 最多可以将源测量单元 (SMU) 连接至器件的3个端口。

对于某些封装器件来说, 必须使用定制夹具来处置封装或器件类型/端口, 因为商用夹具不支持。在这种情况下, 考虑以下指南:

- 为即将测试的各种器件封装类型制定计划。
- 寻找或设计适合系统最大电压与最大电流额定值的插座。
- 对于大电流测试，使用具有开尔文连接的插座。这将确保始终为器件引脚提供4线连接，并在避免插座引线电阻带来电压误差情况下实现真正的测量。
- 对于高压测试，要保证插座采用高质量绝缘材料制造，从而确保测量是在足够低的电流下进行的。
- 对于高压测试，如果可能，请使用三轴连接。对于2657A型大功率系统数字源表，可以使用吉时利HV-CA-571-3转无端连接的高压三轴线连接无端电缆组件，利用高压三轴连接构建测试夹具。对于较高的电压爬电和电压间隙指标要求，要确保电缆正确终止。
- 导电夹具外壳要与安全接地端连接。确保非导电夹具外壳电压耐压是测试系统电压最大值的两倍。要符合其他所有安全防范措施。

对于晶片上器件的测试，可以选择在高压、大电流晶片测试方面经验丰富的探测器供应商。功率半导体器件通常采用垂直结构，在晶片后方具有高压或大电流连接端口。这个垂直方向允许器件设计人员获得更高的击穿电压。晶片通常是超薄的，这使得器件具有较低的导通电阻。为了实现器件开启状态特性分析期间的低接触电阻，知识渊博的探测器供应商都积累了丰富的夹头材料以及夹头设计经验。此外，在通过大型夹头表面获得优良低电流测量方面，他们也拥有足够的专长，而且能够就如何选择满足特殊需求的适当电缆给予指导。

仪器连接

待测器件(DUT)与仪器的连接对于获得有意义的结果是至关重要的。在使用吉时利8010型大功率测试夹具时，利用吉时利公司提供的电缆连接仪器直截了当。关于连接图，请参见本文件中“系统实例”部分的图22。如果要连接到探测器或定制夹具，请牢记下面这些指南：

1. 为大电流测试选择最佳电缆

确保测试期间使用的电缆符合测试系统最大电流额定值。在功率器件开启状态特性分析期间经常遇到大电流、低压测试，要使用能够实现这类测试所需性能的电缆。

在大电流测试时，要注意引线电阻和引线电感，以避免电压源和测量误差。

引线电阻

有些功率器件的导通电阻阻值在几个毫欧。因此，引线电阻与待测参数可能在同一数量级。当施加大电流时，这些阻值不大的引线电阻可能带来电压误差。在电压测量中的很小偏移或噪声，也可能给导通电阻测试结果带来很大的误差。

注意在图1中MOSFET器件的导通电阻测量实例，它给出仪器配置。图2说明引线电阻相对器件电阻有多大，以及引线电阻如何带来80%的测量误差。

为了消除误差，可以在电压测量中使用单线电缆，参见图3；使用额外电缆将待测器件连接到仪器的检测端口。测试电流通过一组电缆，并对通过检测线路的电压进行测量，检测线路中几乎没有电流通过。

在大电流测试中，为了对低电压和低电阻进行精确测量，必须采用4线连接——又称作开尔文连接。为了保持良好的测量，必须监控力引线电阻，以避免力引线和检测引线之间的最大电压降超过源测量单元(SMU)的性能指标。

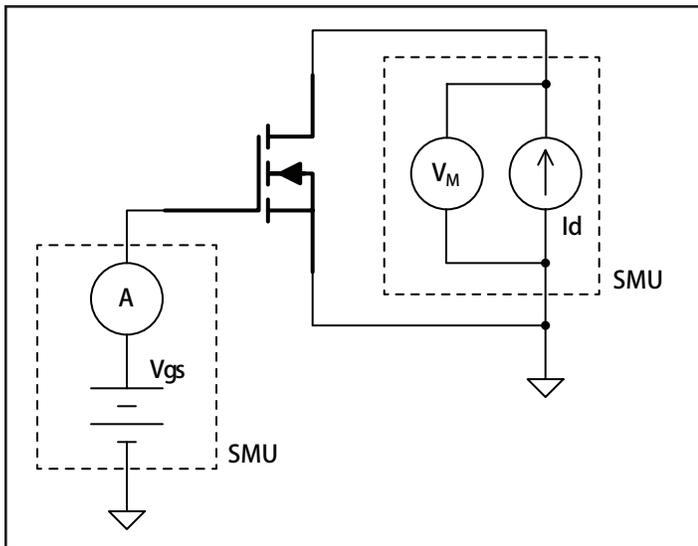


图1 功率MOSFET导通电阻测试的典型仪器配置

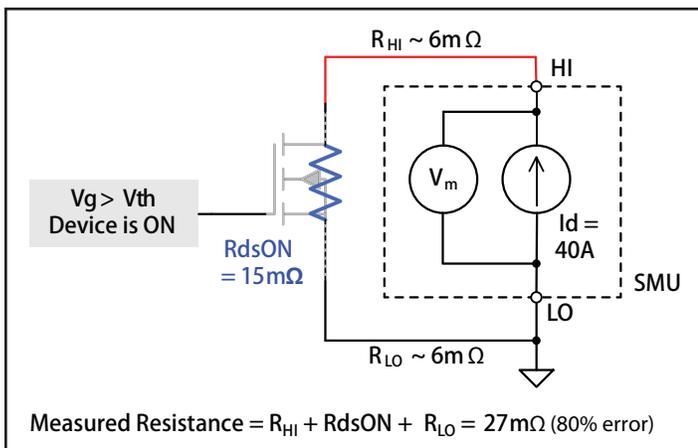


图2 相对待测器件电阻而言，引线电阻较大。由于电压测量是在二线配置中的仪器输出端口进行的，因此，测量结果包括测试引线电阻与待测器件电阻的总和。

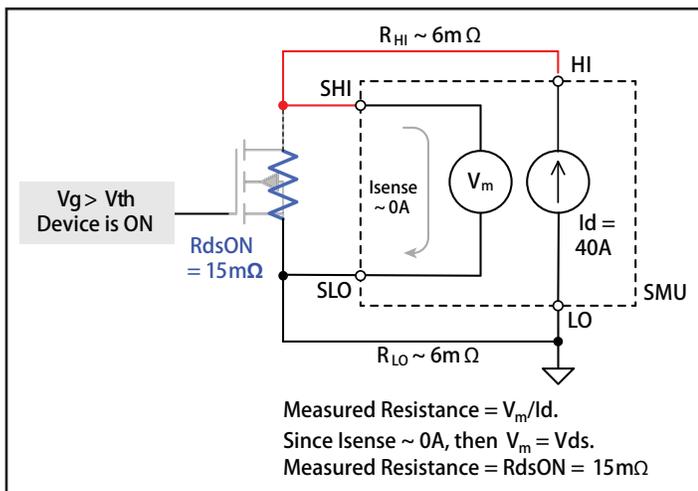


图3 使用单独测试引线将待测器件连接至仪器检测端口。在这种情况下，测得的电压只是通过器件的电压。作为结果的电阻测量将是对待测器件电阻的真正测量。

引线电感

当短时间内电流变化较大时，额外电感将导致电压过冲 ($V = L[di/dt]$)。对于脉冲测试来说，这一点尤为重要，此时dt可能很小。为了使待测器件获得期望电压，额外电感需要仪器施加更多的电压。

吉时利2651A-KIT-1型电缆具有低电阻和低电感，被推荐与2651A大功率系统数字源表一起使用。

2. 为高电压测试选择最佳电缆

确保测试期间使用的电缆符合测试系统最大电压额定值。在功率器件关闭状态特性分析期间经常遇到高压、低电流测试，要使用能够实现这类测试所需性能的电缆。

在高压测试时，要保证充分绝缘，并使漏电流和系统电容带来的影响最小化。

适当绝缘

使用电缆的耐压额定值至少是测试系统电压的最大值。为了实现低电流测量，要在测试夹具中使用高质量绝缘体。绝缘电阻与待测器件电阻并联，将带来测量误差(参见图4)。利用2657A型源测量单元(SMU)，在测试电路中可能出现高达3kV电压，因此，相对于测得的通过待测器件的电流，通过这些绝缘体产生的电流就较大。为了得到良好的测量结果，要确保绝缘电阻比待测器件电阻高几个数量级。

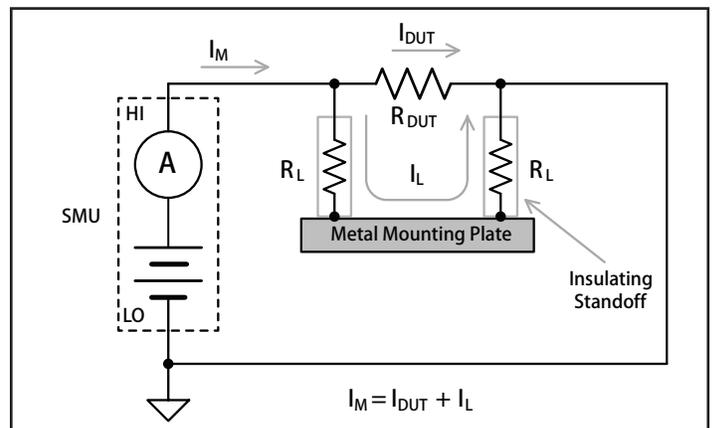


图4 绝缘体中产生的电流影响待测器件电流的测量。为了实现测量误差最小化，要确保绝缘体电阻(R_L)比待测器件电阻(R_{DUT})高得多。

漏电流与系统电容

使用保护可以把测试电路中绝缘体的影响降到最低。保护是强制将电路中的一个低阻节点与高阻输入端节点近似等电位的一种技术。在图4中，即使采用高质量绝缘体，但来自绝缘体的电流泄漏仍然存在。当测量电流在纳安范围时，这种泄露就可能带来问题。请注意保护是如何改进测量的，参见图5。漏电流将通过高阻测量节点(HI)流出，因此，测量中不包括漏电流。

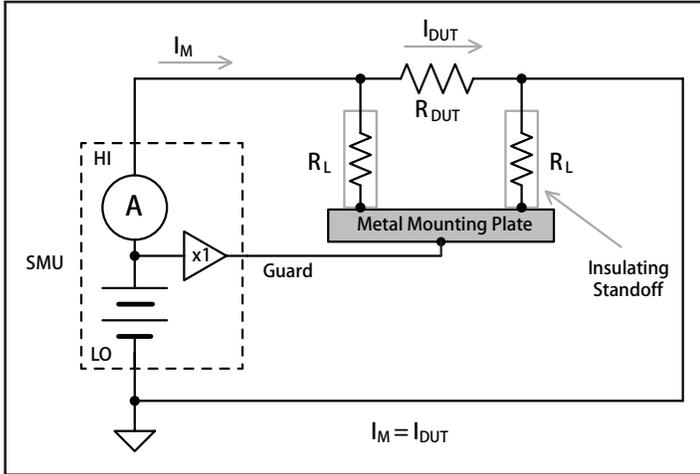


图5 利用保护可以使电路中绝缘体电压降低为接近0V，从而减少漏电流。测量中出现的任何剩余的泄露都将通过高阻测量节点流出。

由于保护端与高阻端处于同一电位，保护电压就是危险电压。因此，要使用三轴电缆布防保护电路，并保护操作人员免遭触电危险。在三轴电缆中，高阻端与中心导体连接，内部屏蔽层为保护，外部屏蔽层接地。图6给出三轴电缆截面示意图。

保护还可以使系统电容的影响降到最低。系统电容影响电压的建立和电流测量。测试设置必须允许以等于或低于预期的器件测量本底噪声对电容充电和建立电流。这些设置的高阻特性必将导致较长的建立时间。图6说明保护如何降低电缆电容的影响。常见的三轴电缆电容大约是40pF/英尺。对于一根两、三米长的电缆来说，其电容大约是几百皮法，电压建立时间是数十毫秒，具体取决于测试设置的最大电流。将保护置于三轴电缆的内部屏蔽层意味着电缆绝缘体中没有电压降。因此，这个绝缘体的电容不需要充电。在稳定状态情况下，根据2657A型源测量单元(SMU)的性能指标，高阻端(HI)的保护电压在4mV以内。吉时利HV-CA-554型产品是三轴高压电缆，能够安全地传输信号，保护电压高达3280V。吉时利HV-CA-554型电缆可以满足3kV电压、低电流测量系统需求。为了实现建立时间和泄漏电流最小化，源测量单元(SMU)的保护都直接到达器件管脚。这样做，可以避免对系统其他电容充电的需求。由于保护电压可能高达3kV，务必确保保护端处于远离其他导体的安全距离内。

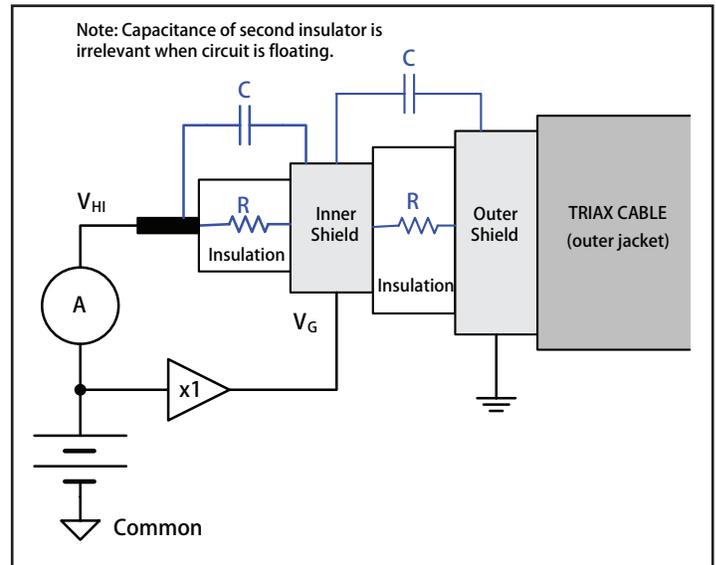


图6 当 $V_{HI} \approx V_G$ 时，电容器和电阻器的电压降是0V。事实上，保护避免了因电缆绝缘带来的漏电流，而且由于不需要对电缆电容进行充电，因此，实现响应时间最小化。

在某些系统中，必须转换至同轴连接。对于高压测试来说，SHV是工业标准同轴连接器。吉时利公司提供的SHV-CA-553电缆组合允许从高压三轴向SHV的转换。这些电缆组合使用三轴电缆，因此，在连接至SHV之前，可以尽可能地实施保护。使用同轴连接将导致性能降级，因为从保护截止端点起，保护带来的益处将丧失殆尽。这意味着必须对残存的电缆电容和测试系统电容进行充电。

在设计测试夹具时，用户可能采取措施，通过缩短布线长度以及三轴-同轴转换后器件连接长度的办法实现电容最小化。

在探测台上，转换至同轴连接的影响可能更大，在这里，线缆和连接取决于晶片的大小以及器件方向(纵向或横向)。如果把电缆电容考虑在内，探测台中的电容可能轻易达到纳法量级，从而导致较长的电容充电时间和测量建立时间。

3. 为源测量单元 (SMU) 建立公共基准

在测试系统问题中，被误解最多的就是接地。这里，“接地”定义为到接地端的连接。不过，许多人往往使用“接地”一词表示测试电路中源测量单元 (SMU) 的基准点。在本应用笔记中，这个基准点被称作“电路公共端”。

接地

为了安全，大部分系统都有一个接地点，以确保仪器或测试系统内的任何故障都不会使用户置身于触电危险之中。出于类似的原因，在高压系统中，导电测试夹具及其相关附件也必须与接地端连接。

电路公共端

为了获得精确的电源值和测量，确定电路公共端非常重要。当将多个电源与待测器件连接时，重要的是这些电源以同一点为基准，这样，待测器件的每个接线端才会获得期望的电压。具体实例参见图7。

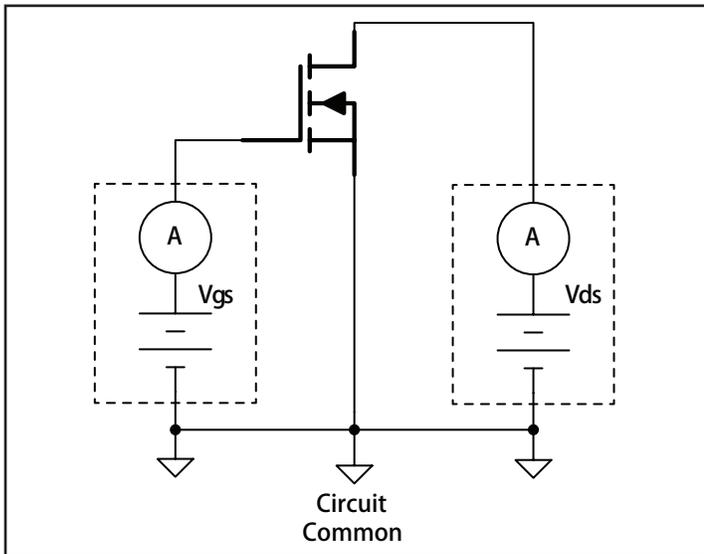


图7 当使用独立仪器时，输出必须具有相同的基准，这样，待测器件才能得到正确的电压和电流。在本例中，FET的电源接线端必须同时与门极LO端以及电压源LO端相连，这样， V_{gs} 和 V_{ds} 才是准确的。因为两个仪器的LO端都连接到电源接线端，所以，这是电路（或测量）公共端。

下面基于VDS与VGS之间的关系来说明器件性能。我们将从两种测试配置的角度来考虑与电路公共端的连接：2651A型源测量单元 (SMU) 开启状态特性分析（漏极）以及2657A型源测量单元 (SMU) 关闭状态特性分析（漏极）。

使用吉时利2651A型大电流源测量单元 (SMU) 进行开启状态特性分析时，要创建电路公共端“选择连接待测器件与仪器的电缆和夹具”部分说明为什么大电流仪器需要4线连接。当源测量单元 (SMU) 与功率晶体管基极或者MOSFET或IGBT门极连接时，也推荐使用4线连接，即使这时流过门极的电流很小。下面探讨一下如此推荐的原因，因为它与电路公共端连接有关。

注意图8中的测量配置。在此，将对功率MOSFET进行开启状态特性分析。这个配置可能用于为MOSFET生成系列曲线。当门极SMU (SMU 1) 与漏极SMU (SMU 2) 的LO端相连时，就建立了电路公共端。由于流经门极-源极环路的电流很小或者没有，门极SMU进行测量并根据其力端子的测量结果对输出电压进行校正，该结果是门极端与电流公共端（图8中的S'节点）电压之差。电路公共端通过测试引线与FET电源端（图8中的S节点）相连，该引线电阻是 R_{slead} 。由于流经漏极-源极环路电流较大（最高50A脉冲），因此，我们不能忽略 R_{slead} 。在这里，即使 $1m\Omega$ 的电阻，也可能带来50mV的 V_{gs} 与 $V_{gs'}$ 电位差。某些器件对门极-源极电压变化非常敏感。50mV的VGS电压差就可能引起数百毫安甚至1安培的漏电流变化。为了对电路公共端连接与实际器件接线端之间的电压降进行补偿，可以将门极SMU的检测端与待测器件单独连接，如图9所示。¹由于流经检测引线的电流接近为零，因此，门极SMU将准确测量FET器件源极端口的电压，并对输出电压进行校正，以维持期望的器件 V_{gs} 电压。

在某些情况下，为了补偿门极电路中的振铃或振荡，必须减缓门极SMU响应。当门极SMU采用大电容模式时，就要这么做。不过，延长的响应时间可能减缓检测电压测量与输出电压校正之间的反馈。在这种情况下，要把门极SMU的LO端和检测LO端都连接到漏极SMU的检测LO端。由于流经门极-源极环路的电流很小或者没有，因此就没有电压测量误差。不过，在测试功率晶体管时，则不应该这么做，因为此时流经其基极和发射极的电流可能非常大。

¹ 由于流经检测电路电流几乎为零，因此，门极SMU与漏极SMU的检测LO端可以相连，而不会给电压测量带来任何影响。

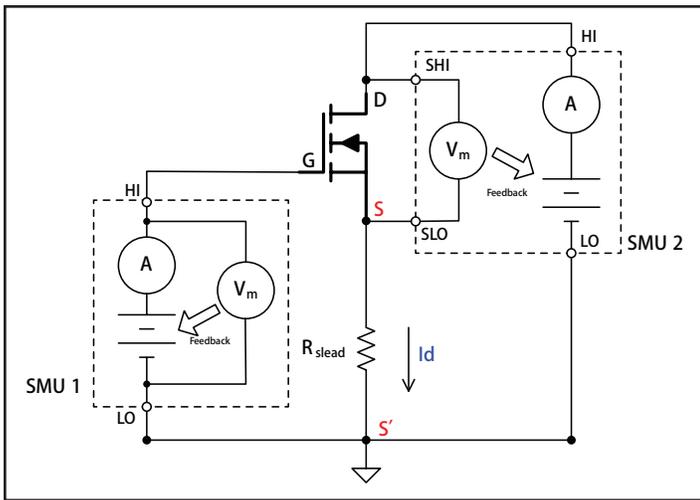


图8 由于大电流流经电路公共端，所以电路公共端与FET源端之间的电阻 (R_{slead}) 将造成电路公共端与FET源端测量的电压差异。因此，当使用两线连接方式连接门极SMU (SMU 1) 与待测器件时， $V_{es} \neq V_{es}'$ 。

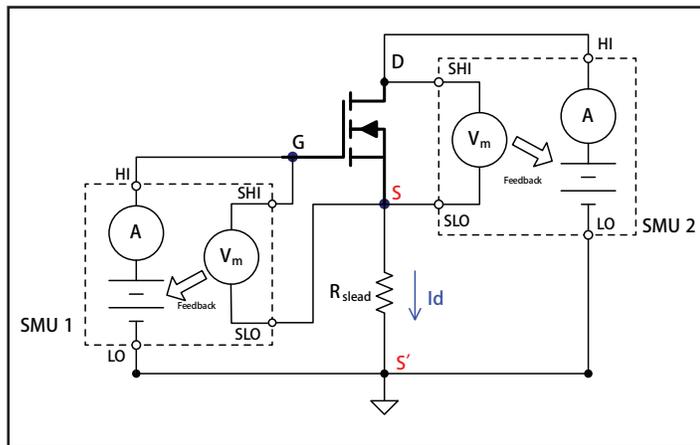


图9 采用四线连接方式连接门极SMU，可以消除因 R_{slead} 引起的电压误差。通过这种方式，门极SMU可以对输出电压进行校正，使之保持在期望的 V_{es} 。

使用吉时利2657A型高压源测量单元 (SMU) 进行关闭状态特性分析时，要创建电路公共端

对于关闭状态的特性分析，门极和漏极SMU以及待测器件之间的连接参见图7。如果希望采用4线连接，只需将门极和漏极SMU的检测LO端连接即可。器件故障可能导致在较低电压端出现高电压。因此，门极、源极以及基底的连接必须采用高压连接器。为了便于两个仪器LO与检测LO之间的连接，吉时利公司推出2657A-LIM-3型LO互连模块作为可选择附件。通过2657A-LIM-3型LO互联模块，可以很容易实现3个源测量单元的LO与检测LO的连接。只要对连接稍作改动，还可以连接其他源测量单元 (SMU)。(欲了解更多信息，请参考吉时利公司在常见问题解答或咨询吉时利公司现场应用工程师。)

对于使用吉时利2651A与2657A型大功率源测量单元 (SMU) 的系统，要创建电路公共端

考虑到功率半导体器件的全面测试包括开启状态特性分析以及关闭状态特性分析，因此测试设置很可能涉及2651A型以及2657A型大功率源测量单元 (SMU)。为了保证两种配置中测量的完整性，要将2651A型大功率源测量单元 (SMU) 的检测LO端与待测器件单独连接。将2651A型大功率源测量单元 (SMU) 的检测LO端连接至2657A-LIM-3，这样就可以与测试设置中的其他源测量单元 (SMU) 共用。将2657A-LIM-3的输出LO端与2651A的LO端连接，并尽可能靠近待测器件。在“系统实例”部分的图21中将对这些连接给予详细说明。

在对晶片上器件进行开启状态特性分析时，前面推荐的连接方式可能导致3个探针向下触及连接FET源端的衬垫。不过，实施这些连接可能是个问题，不仅因为衬垫上没有容纳3个探针的足够空间，而且因为衬垫寿命将随着探针的下触而缩短。利用2657A-LIM-3型产品中的自动检测电阻，有可能解决这个问题。自动检测电阻通过100kΩ电阻器将2657A-LIM-3的输出检测LO端与输出LO端连接到一起 (参见图10)。虽然待测器件测试没有保持真正的4线连接，但这对FET或IGBT门极接线端电压的影响不大，因为门极电流非常小，而且2651A型产品的LO是单独连接到电路公共端的。² 本应用笔记“系统实例”部分的图21假设：通过2657A-LIM-3的自动检测电阻，将其输出LO端与检测LO端进行连接。

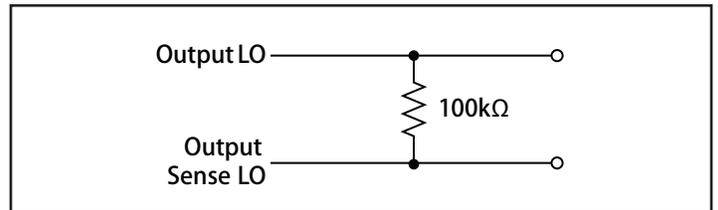


图10 在2657A-LIM-3型产品中，通过一个100kΩ电阻器将输出检测LO端与输出LO端连接到一起。在待测器件没有足够空间实施4线连接情况下，这样，可以实现准开尔文连接。如果期望完全的开尔文连接，只需利用电缆单独连接检测LO端与输出LO端，从本质上讲，100kΩ电阻器可以忽略。

² 如果待测器件没有采用真正的4线连接，测量功率晶体管时，因基极电流较高，可能出现电压误差。

检查系统安全和仪器保护

当进行布线和夹具设计时，考虑系统安全性也很重要。为了确定操作人员以及仪器会遇到什么危险，要对各种故障情况进行思考，包括因操作人员失误以及因器件状态变化而带来的故障。

大电流测试的潜在危险之一是火灾或烧伤危险。在大电流测试期间，要使待测器件处于封闭状态，这样，即使器件出现故障，也可以使用户免遭火灾或飞溅物体的伤害。

触电危险是高压测试的潜在危险之一。如果仪器（或器件）能够输出42V以上的直流电压，那么随时都存在触电危险。正确的测试系统配置必须包括保护操作人员和未受训练用户免遭触电危险的装置。

上电后，用户应当无法接入内部有高压的系统。安全互锁是限制接入的一种装置。吉时利的所有现代源测量单元（SMU）都包括互锁装置，因此，只有当互锁线路工作时，才会启动大功率。互锁旨在与每个系统接入点的常开开关一起使用。当使用多个具有触电危险的仪器时，要将这些仪器连接在一起，这样，如果系统接入点开启，所有仪器的输出都被禁用。

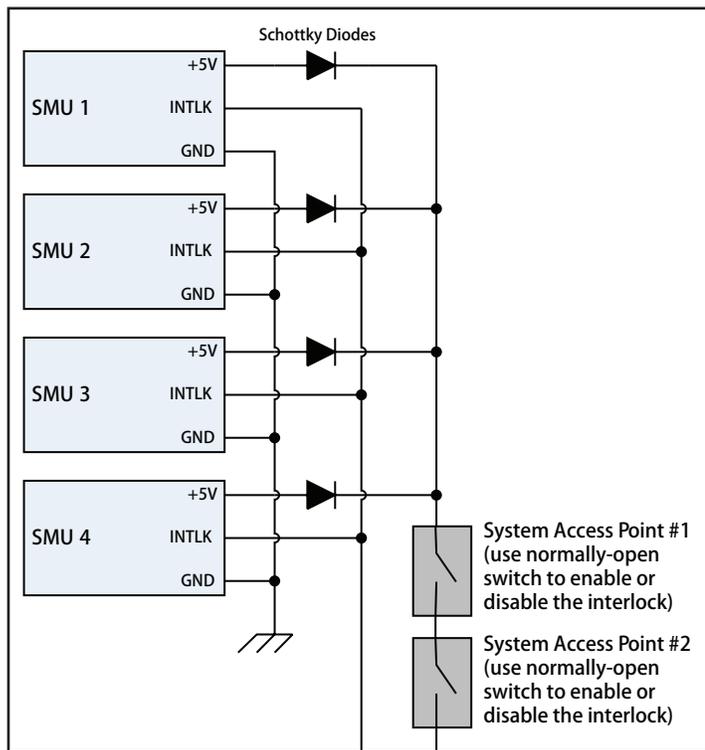


图11 一个具有多个接入点的系统连接多个源测量单元（SMU）时的配置

当遇到多个接入点时，每个接入点都需要单独的开关，而且所有这些开关都应当串联。具体说明参见图11。

所有仪器的5V电源都是组合的，从外部通过开关连接，并用于启动互锁。当使用多个源测量单元（SMU）的5V电源时，可以使用肖特基二极管，以防止每个源测量单元（SMU）的5V电源彼此后驱动。肖特基二极管是首选，因为它们具有较低的正向电压；因此，它们不太可能影响启动互锁线路所需的电压。

根据测试设置中源测量单元（SMU）的数量，一个源测量单元（SMU）的5V电源可能驱动系统中另一个源测量单元（SMU）的互锁线路。为此，要核对仪器指标中的安全互锁引脚，以确定驱动每个源测量单元（SMU）互锁引脚所需的电流大小。此外，还要核对5V电源引脚指标，以确定其电流容量。作为选择，可以使用外部电源来驱动源测量单元（SMU）的互锁线路。

除了操作人员的安全，保护系统测试仪器安全也很重要。要认真考虑器件故障的可能影响。图12给出N-沟道FET在漏极-源极击穿电压附近进行关闭状态漏电流测试的常见配置。在门极端电压较低的源测量单元（SMU），确保器件处于关闭状态。在源极端电压较低的源测量单元（SMU）将对源端电流进行直接测量。不过，如果在漏极-源极之间出现意外击穿，那么3kV的源测量单元（SMU）有可能损坏200V的源测量单元（SMU）。在门极和漏极之间也存在着同样的受损可能。

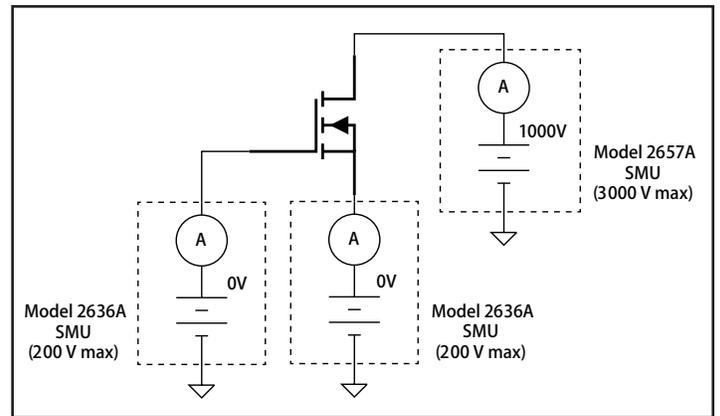


图12 在器件击穿或故障情况下，2657A型源测量单元（SMU）有可能损坏任何一个2636A型源测量单元（SMU）

为了在器件击穿或器件故障情况下保护耐压较低的源测量单元（SMU），可以使用过压保护器件。在正常情况下，过压保护器件应当不会给测试电路带来什么影响，但遇到过压情况时，将对电压进行嵌位。吉时利2657A-PM-200型200V保护模块，可以用于包含2657A型以及电压较低源测量单元（SMU）的测试系统。在过压情况下，该保护模块将在微秒之内将外部高压源嵌位在2V左右。在非嵌位情况下，在较低电压的源测量单元（SMU）中将保持皮安级电流源和测量能力。³

³ 吉时利2657A-PM-200型保护模块的过压保护在~220V触发。因此，对于最大输出电压能力不到200V的源测量单元（SMU），不推荐使用。另外，也不推荐使用2657A-PM-200保护模块来保护2651A型大功率系统数字源表的HI端和LO端。该保护模块额定值不适合2651A型产品最大输出电流。

当器件故障致使仪器遭受大电流时，也可能造成仪器损坏。要确保所有接入端的仪器都能够处置器件端口正常出现的电流。为了限制器件故障导致较大电流而带来的仪器损坏，要使用串联电阻限制通过任意仪器的最大电流。在击穿电压或漏电流特性分析期间，用户必须小心限制通过器件的电流大小，这样才能保证测试不是破坏性的。虽然源测量单元（SMU）具有设定的电流限制，但在对负载变化做出响应时，这些主动限制会耗费一定的时间（所谓的“瞬态响应时间”）。当负载阻抗变化非常迅速时，可能出现超出设定限制的电流。增加串联电阻，可以迫使该端口在瞬态条件下也能保持最大电流的平稳。

要保证选择满足测试系统最大电流、最大电压和最大功率额定值的电阻器。这种电阻器一般将起到两个作用。在晶体管开启状态特性分析期间，通常与门极串联的方式添加电阻，从而使高增益器件中常见的门极电压振铃和振动达到最小。此外，在晶体管关闭状态特性分析中，通常利用电阻器来限制击穿期间流过的最大电流，防止过早的器件故障。

优化仪器建立，确保优良测量

一旦系统建立完毕，就要对其功能进行测试，并优化仪器建立，以获得最佳测量。

对于开启状态特性分析

在当今进行的大部分开启状态特性分析中，为了实现最小热量，都对器件施加脉冲信号。此外，许多功率半导体器件的最终应用也都是在脉冲条件下工作的。让源测量单元（SMU）的输出脉冲通过测试系统，并捕获器件端口响应，使测试系统具备合格的脉冲信号能力。吉时利2651A型大功率系统数字源表内含高速模数转换器（ADC），可以同时电流波形和电压波形进行数字化。这些模数转换器（ADC）对确定系统脉冲性能非常有益。如果脉冲形状出现异常，要检查电缆，确保引线电感最小化。尽可能使用吉时利公司提供的低阻抗同轴电缆，同时要使其其他引线的感应环路面积最小。

对于关闭状态特性分析

了解系统的源和测量建立时间。进行器件关闭状态测量时通常使用高压源，其中电流较低，器件处于高阻抗状态。不过，可能存在无法避免的系统电容，而且器件本身也有一定电容。功率半导体晶体管输出电容一般在100pF以上。在关闭状态，器件电阻可能达到1GΩ以上，使得单一RC时间常数为100毫秒或更长。注意图13中充电电容器的电压时间曲线图。为了生成设定的读数，必须等待至少4~6个时间常数（4个时间常数 = 99%）的时间，这可能意味着需要将近1秒钟的建立时间。在估算生产吞吐量或长时间测试（如器件可靠性测试）所需时间时，要考虑这个建立时间。

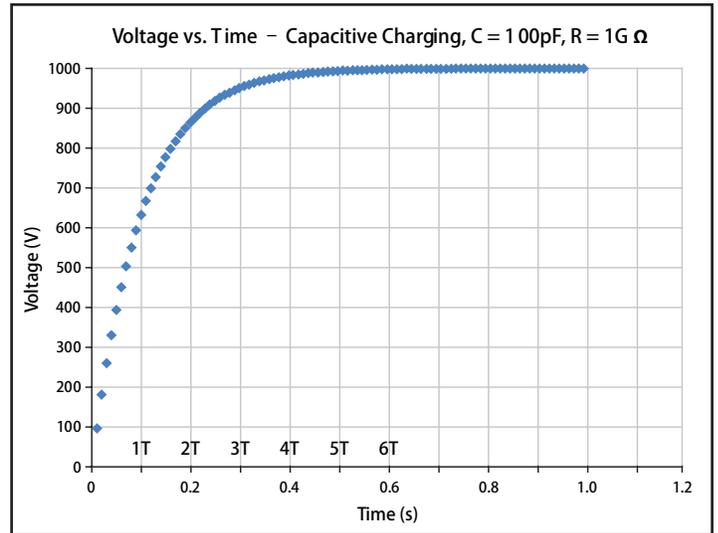


图13 100pF电容器充电的电压时间曲线。读数为时间常数的4~6倍。T = RC时间常数。

如果使用同轴连接取代三轴连接，要清楚：为了获得精确和可重复的低电流测量，还需要额外的建立时间。除了器件的RC，现在建立时间还包括电缆以及测试台或夹具的RC时间常数。通过在测试系统输入端施加电压阶跃，并测试输出端的电流随时间延迟，就可以分析整个建立时间。吉时利2657A型或2651A型数字源表采用最快的模数转换器（ADC），为用户提供迅速而简捷的获得建立时间信息的方法。器件测试时，通过观察电流下降至低于器件预期本底噪声的时间，来选择测量延迟。

控制仪器硬件

当同时使用多个仪器时，对待测器件的源和测量时序进行协调非常重要。因此，利用可用的软件方案、以简化和/或避免昂贵的编程，是非常有利的。

利用商家提供的免费启动软件验证测试系统配置和功能。2600A与2650A系列源测量单元（SMU）提供一款TSP® Express软件，这是通过仪器web界面使用的免费软件。当使用TSP-Link接口创建仪器网络时，可以利用TSP Express软件来控制网络中的所有仪器。图4给出3个源测量单元（SMU）之间的通信设置图实例。利用TSP Express软件，用户可以轻松地对一个或多个源测量单元（SMU）设置直流和脉冲扫描，同时，为其他源测量单元（SMU）分配输出静态偏置电压，或者对每个扫描的偏置电压阶跃变化进行编程。内置的简化绘图软件，允许用户迅速对测量结果进行绘图，并对所有布线、连接以及参数是否正确配置进行评估。图15和图16对TSP Express软件能力进行说明。

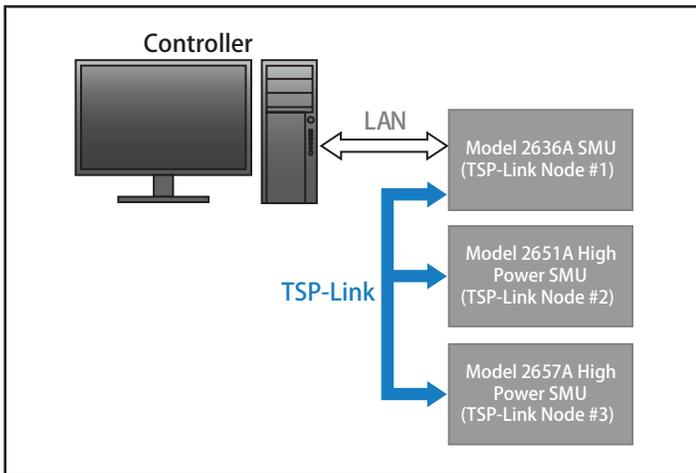


图14 TSP-Link技术提供无主机系统扩展，并支持仪器之间的通信、精确定时以及严格的通道同步。

TSP Express软件还可以访问2651A与2657A型大功率源测量单元（SMU）快速模数转换器（ADC）能力。利用TSP Express软件，可以从2651A型源测量单元（SMU）输出一个脉冲通过测试系统，并获得响应。利用这些结果可以设置所需的源和测量延迟，确保脉冲负峰期间的数据采集。

利用参数测试软件还可以简化分立半导体器件测试。这类软件包括测试数据库（含预先确定的测试），可以简化各种器件的数据采集。如果采用多个源测量单元（SMU）系统对于半导体器件进行测试，并使用手动探测器或测试夹具接触器件，那么推荐使用吉时利ACS基础版软件。如果利用半自动或自动探测器接触器件，则推荐使用吉时利ACS标准软件。

系统实例

这一部分提供几个实例配置的详细连接。欲了解有关这些实例具体应用的更多信息，请与当地吉时利现场应用工程师联系。在本应用笔记后面给出世界各地的联系信息，也可以登录公司网站：www.keithley.com。

利用测试夹具对封装器件进行测试

吉时利8010型大功率器件测试夹具与2651A以及2657A型大功率系统数字源表一起完善了功率半导体器件测试解决方案。图22给出源测量单元（SMU）仪器与8010型夹具的连接图。在8010型互连参考指南（IRG）中给出详细的器件测试配置实例，可以登录公司网站下载该指南：www.keithley.com。

定制测试夹具可以包括任意数量的测试用源测量单元（SMU）。对于大电流测试，利用2651A型产品提供的Phoenix螺丝压线端子连接器，可以轻易实现连接。对于使用2657A型产品的最高完整度高压测量，吉时利公司提供定制墙壁型HV三轴连接器，其一端已经与三轴电缆组件连接在一起。这样设计的目的是可以安装在安全机箱内。这些连接很容易与设备焊接，或者适合另外的连接器。详细说明参见图17。图18中的图标适用于这个定制夹具连接实例。

在探测台上对晶片级器件进行测试

少数探测器供应商为大功率半导体器件测试提供商用解决方案，其他供应商则提供定制解决方案。至于哪种类型的探测解决方案适合具体测试应用所需的电流、电压或功率，可以向探测台供应商进行咨询。关于如何使用定制高压三轴电缆和连接器的信息，探测器制造商可以与吉时利仪器公司联系。

最近我们检查了探测台解决方案，发现banana插头和插座普遍用于大电流测试，还发现SHV已成为大电流连接的工业标准。Phoenix大电流螺丝压线端子连接器很容易适应banana连接器。为了适应SHV解决方案，吉时利公司推出SHV-CA-553型产品，这个电缆组件的一端是线缆高压三轴线连接器，另一端是SHV（同轴）连接器。后面的几个图说明利用banana和SHV连接方式对晶片级器件进行测试的3个实例配置连接。

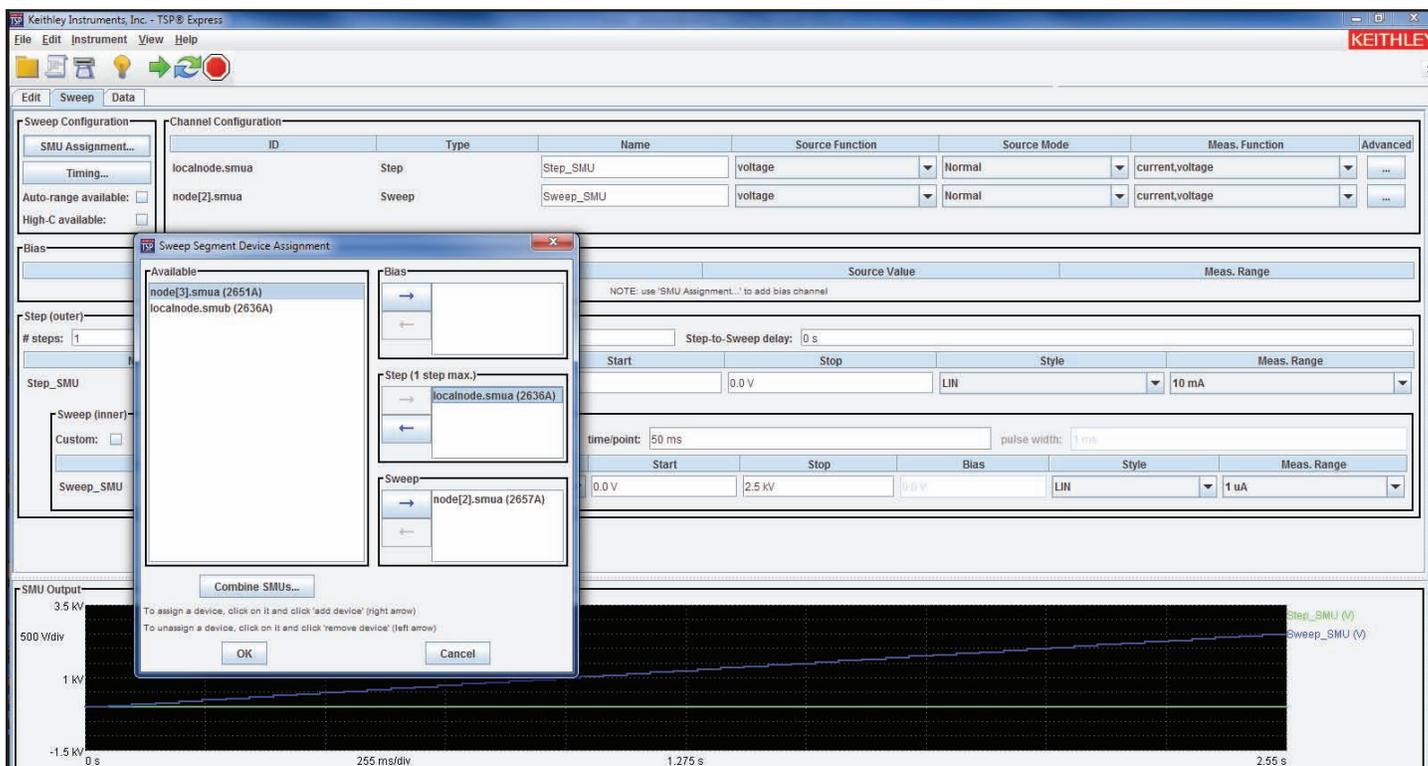


图15 TSP Express软件允许对通过TSP-Link网络连接的所有仪器的源和测量参数进行快速设置

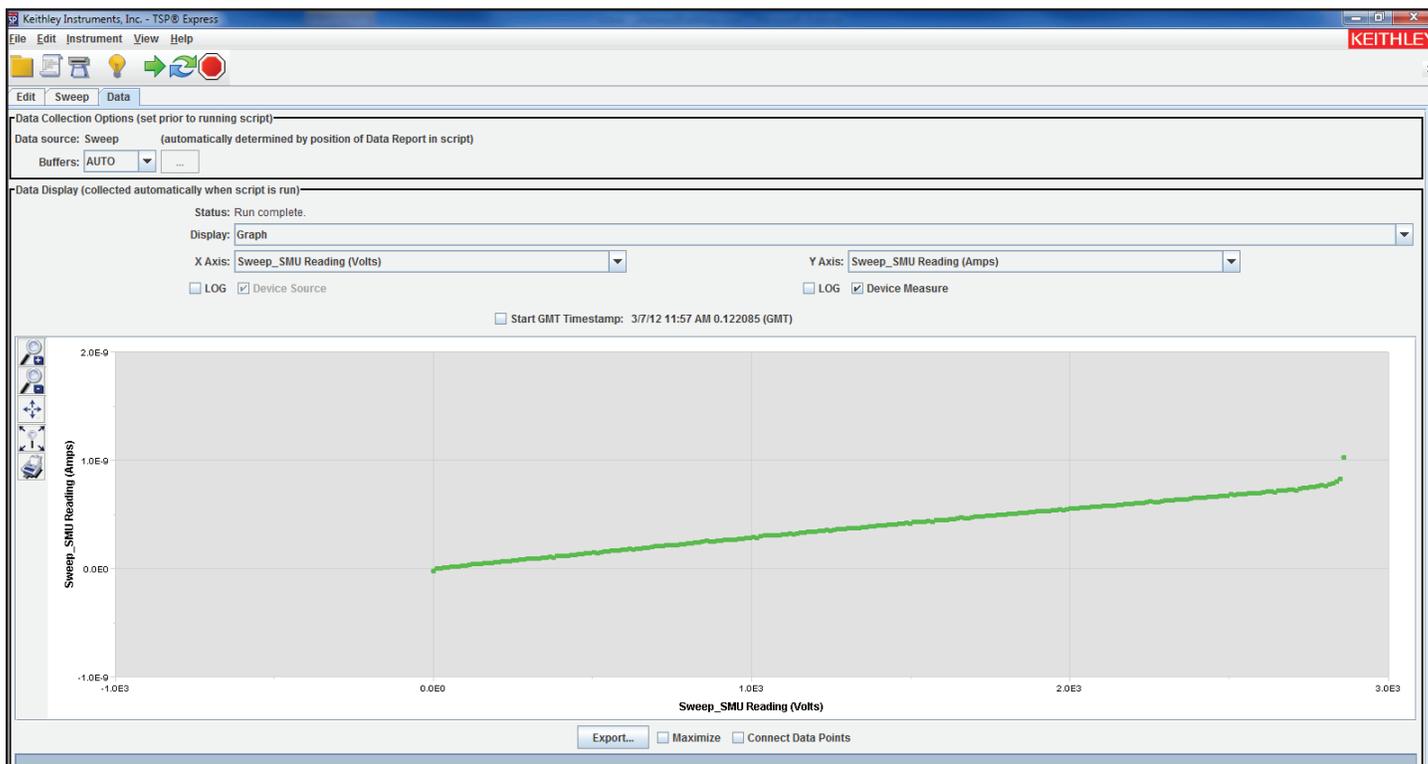


图16 TSP Express软件允许用户迅速和容易地绘制测量图，如这里给出的IGBT (BV_{ces} 额定值为2500V)的 $V_{ces}-I_c$ 曲线。

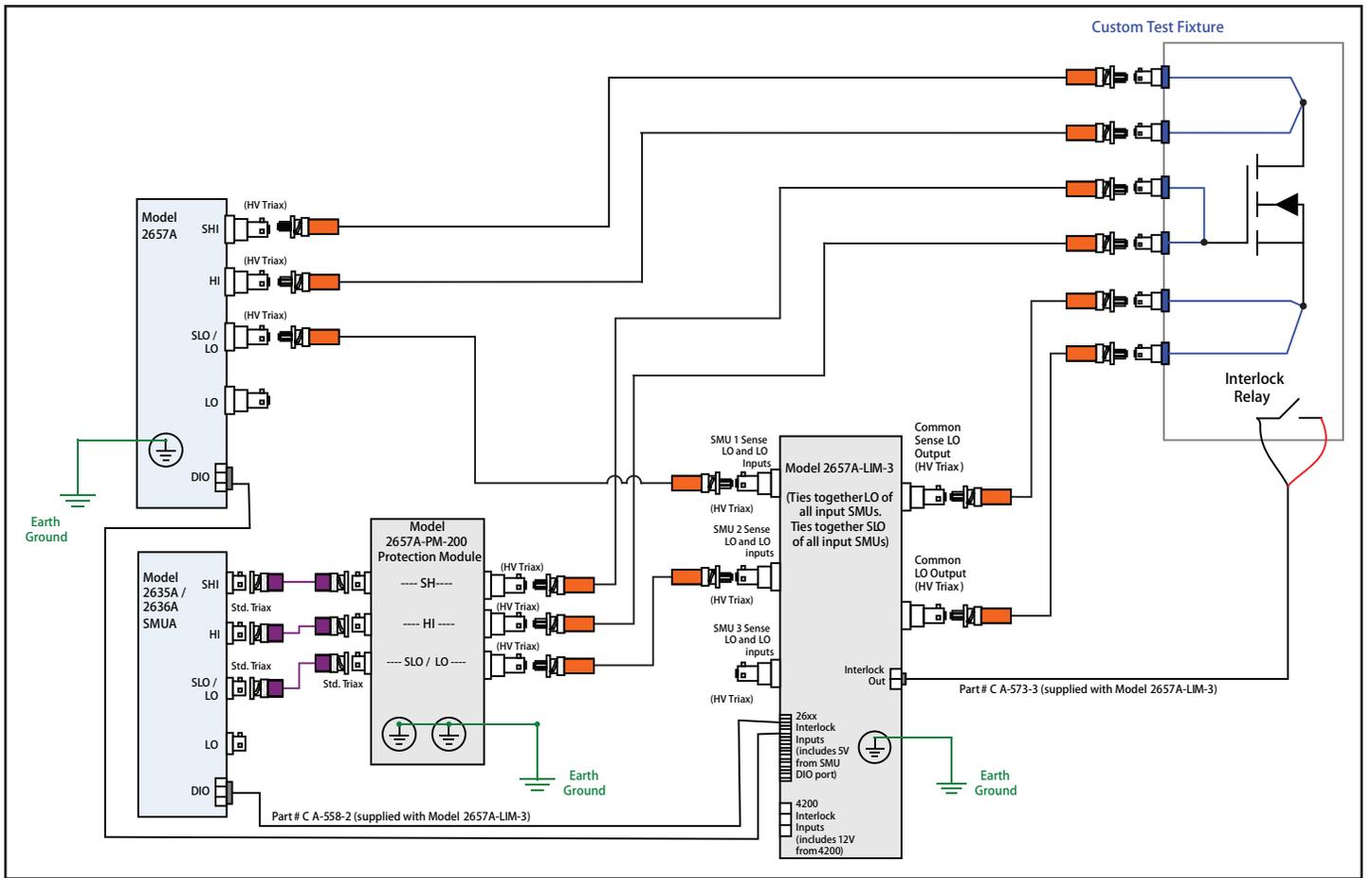


图17 用于高压测试的定制夹具连接实例

图18中的图标适用于晶片级器件连接实例。

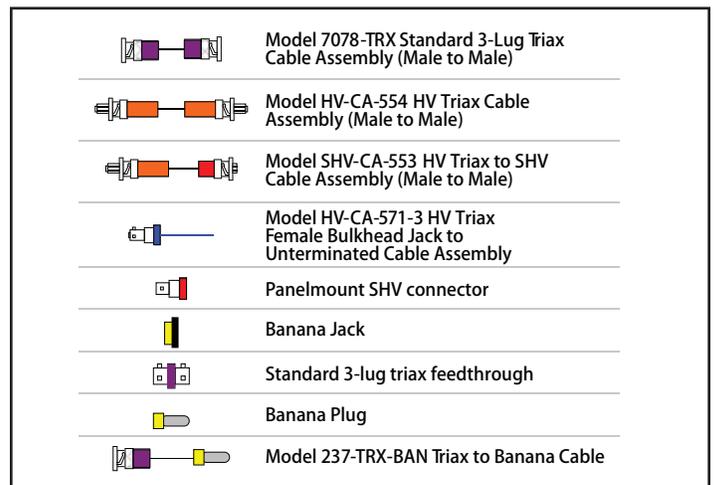


图18 晶片级器件连接实例图图标

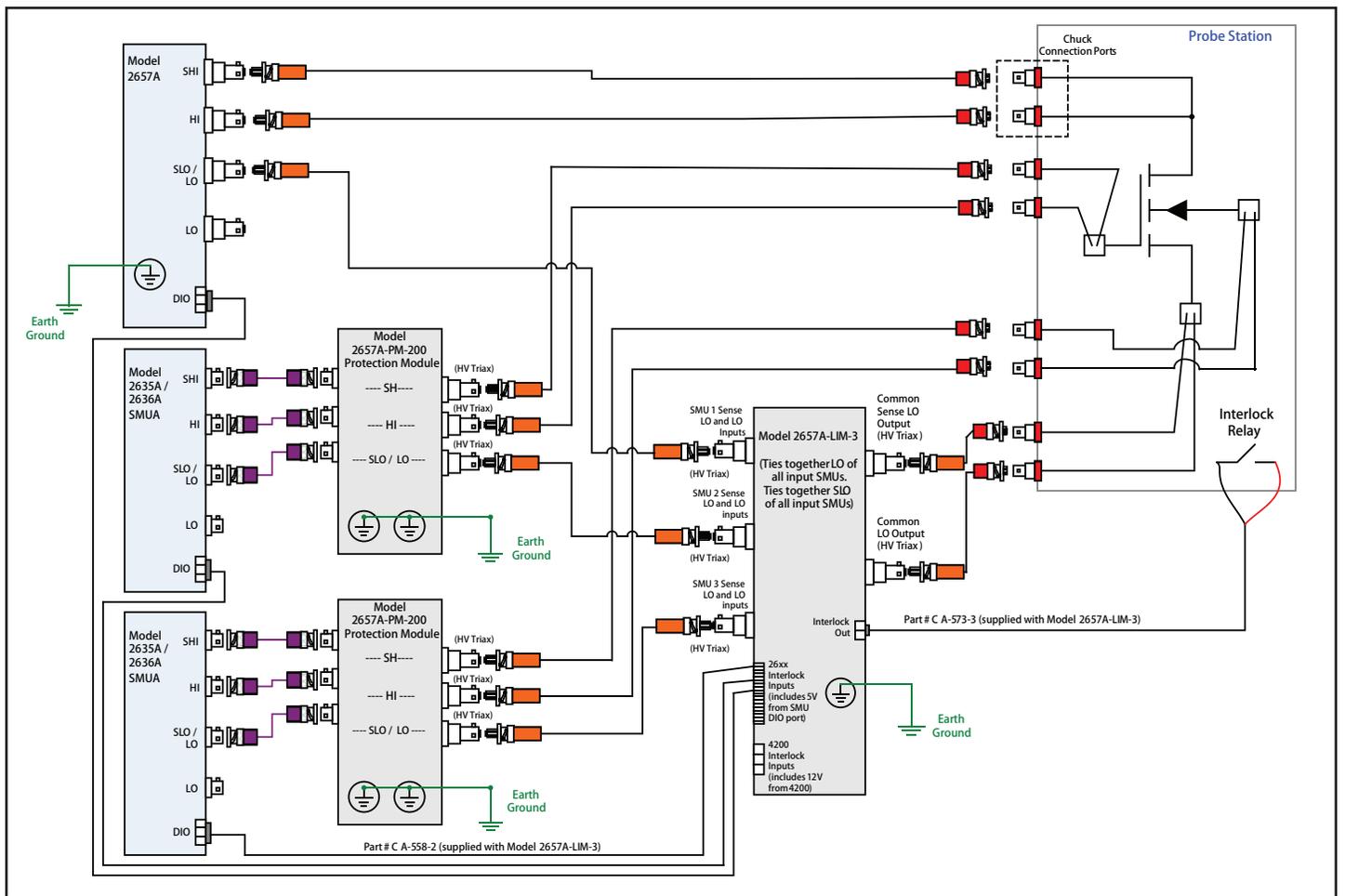


图19 采用SHV连接方式，只对晶片级器件进行高压测试的连接

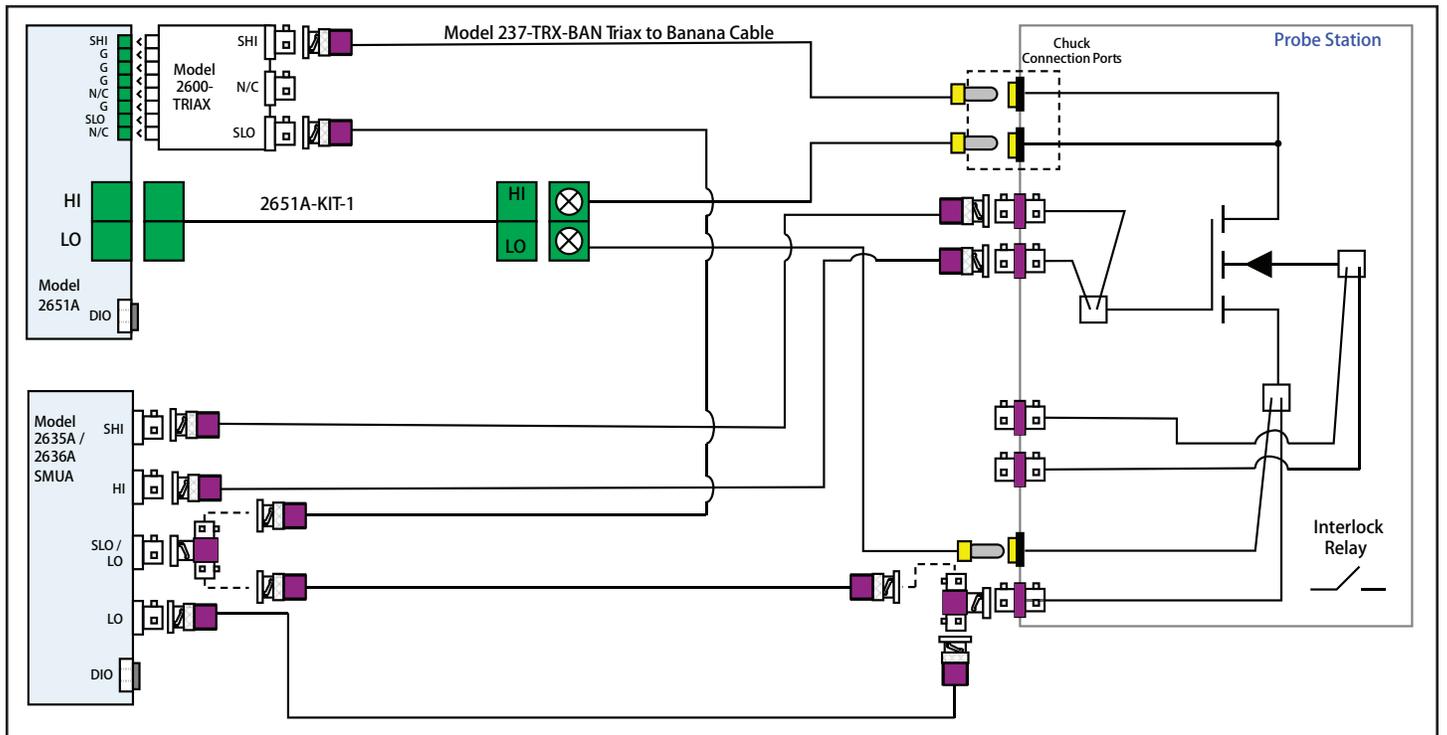


图20 采用banana连接方式，只对晶片级器件进行大电流测试的连接

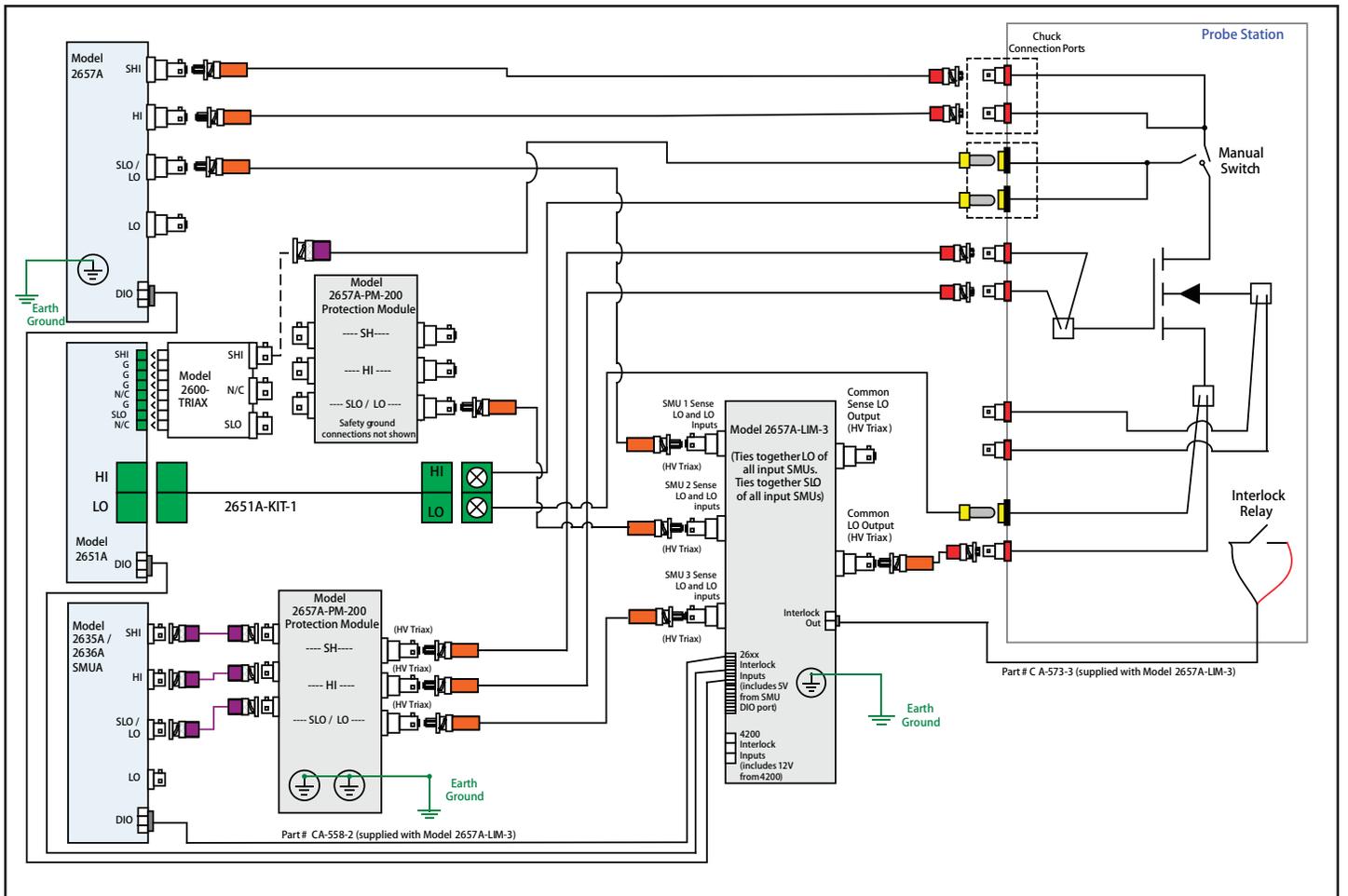


图21 用于高压和大电流测试的晶片级器件连接

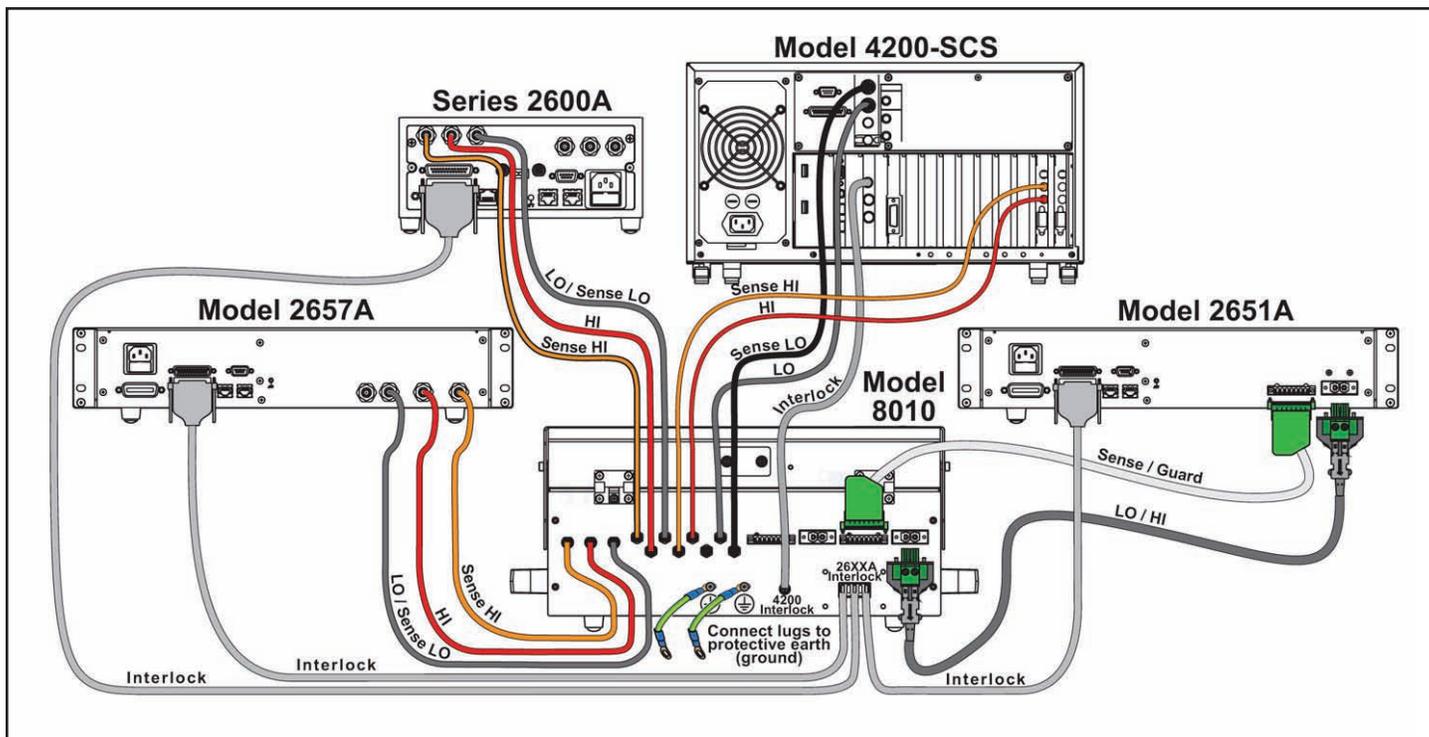


图22 源测量单元 (SMU) 仪器与8010型大功率器件测试夹具的连接

技术规格如有变更，恕不另行通知。
 所有吉时利商标和商品名是吉时利公司的财产。
 所有其它商标和商品名是其各自公司的财产。
 此版本为中文译本，仅供参考。

KEITHLEY

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

美国吉时利仪器公司
 全国免费电话：400-650-1334/800-810-1334
 邮箱：china@keithley.com
 网址：www.keithley.com.cn