

引言

可见光二极管（LED）凭借其长寿命和高可靠性的特点，正获得越来越广泛的应用。LED目前已经用在了汽车、街灯、户外标识等方面。此外，随着新的颜色和新的关键应用的开发，采用高性价比的测试方法以确保LED可靠性的需求不断增大。随着高亮度和有机LED技术的出现，对测试设备的测量性能与产能的要求也越来越高。

LED发光是带电粒子在半导体能隙之间跃迁的结果。能隙的大小决定了发光的波长。LED的发展已经产生了表面和边缘发光技术，改变波长和功率特性等性能指标。

本文介绍了有关构建用于检验单个和多个（阵列）LED器件的生产测试系统解决方案的方法和问题。

测试介绍

高性能LED通常要进行5种测试。其中包括直流频谱上的三种测试（正向电压、反向击穿和漏电流测试）以及光谱上的两种测试（光照强度和波长检验）。在生产环境下，通常只有直流测试涉及测试产能的问题。光学测试虽然很有用，但是通常较慢，一般保留用于工程或质量控制实验。下面详细介绍各种测试和测试需求。

直流测试

图1给出了本文介绍的三种直流测试的测试点。

正向电压测试 (V_F)

V_F 测试检验可见光LED的正向工作电压。超过这一工作电压，电路电流的大幅增长将导致正向电压明显升高，如图1所示。在一段特定的时间内（例如1ms）在LED上加载特定的正向偏置电流（例如10mA），测量LED两端的电压降。测量的结果通常为几百毫伏的量级。

反向击穿电压测试 (V_R)

V_R 测试检验LED的反向击穿电压，与二极管类似。当电压高于这一电压时，反偏电流的大幅增加使反向电压变化不大。这一参数的技术指标通常是一个最小值。测试时在一段特定时间内提供一个较低的反偏电流，同时测量LED两端的电压降。测量结果通常在几伏到几十伏的量级。

漏电流测试 (I_L)

I_L 测试检验LED的漏电流，即当反向电压低于击穿电

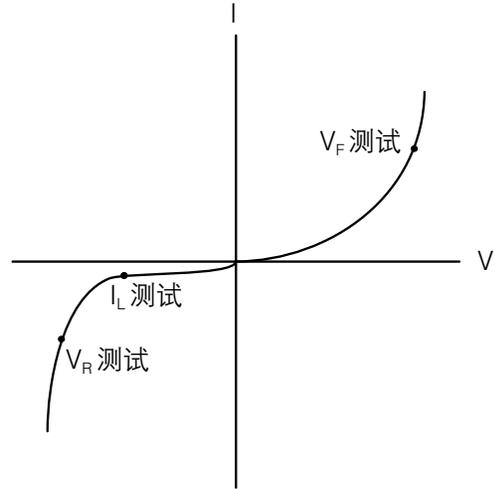


图1. 典型的LED直流I-V曲线和测试点（不用于缩放）

压时，LED中泄漏的小电流。测试时加载特定的反向电压，经过一定的时间后测量流过LED的相应电流。测试过程要检验测得的漏电流是否低于一定的阈值。这些电流的测量结果通常在纳安到毫安的量级。

光学测试

光强和辐射强度测试

发光（即光照）强度的大小通常用流明/球面度或坎德拉来表示。它的大小范围通常从毫坎德拉到几个坎德拉的量级。我们可以利用这个参数来计算辐射强度，以瓦特/球面度来表示。辐射强度测量的是LED的总输出（功率），而发光强度测量的是可见光范围内的输出（功率）。辐射强度的大小范围从略小于 $1\mu\text{W}/\text{sr}$ 到几十 mW/sr 不等。用总发光输出（流明/瓦）除以输入功率可以计算出发光效率。

光照强度通常采用光电探测器（PD）进行测量。流过PD的反向漏电流大小与照射在它上面的光强度成正比。因此，如果用LED照射PD同时测量PD上相应的漏电流，就可以推算出光照强度。采用这种方法测量光照强度时，只需使用高速直流测试仪就可以构建出能够进行直流和光学测试的整个测试系统。如果不愿意使用这种直流测试方法，就必须使用累计球，本文不再对此进行详细讨论。

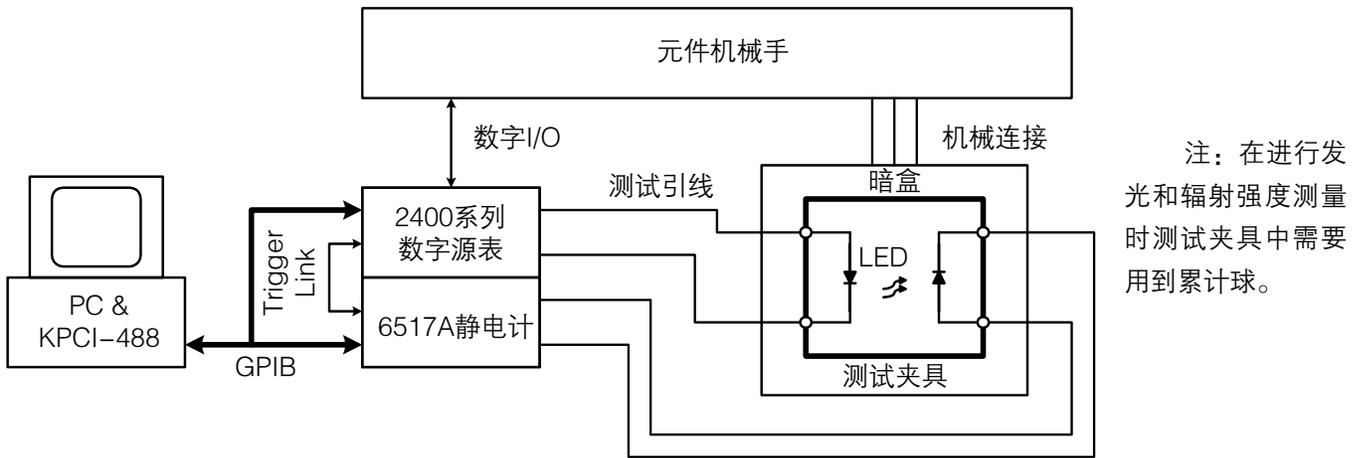


图2. 基于数字源表/静电计的可见光LED生产测试典型测试系统的模块图

波长和色彩测试

我们通常采用分光计来测量波长，它测量的是LED输出的主要和峰值波长。LED的输出频谱称为远场图（far-field pattern, FFP），类似于一条以LED峰值波长为中心的正态曲线。半最大值处全宽度（Full width at half maximum, FWHM）计算作为半光强下的频谱带宽，用于表示LED的工作波长范围。采用ISO/CIE标准色度系统可以测得LED输出的色彩信息，这种系统可以测量出基于三基色（红、蓝和绿）大小的输出色彩。

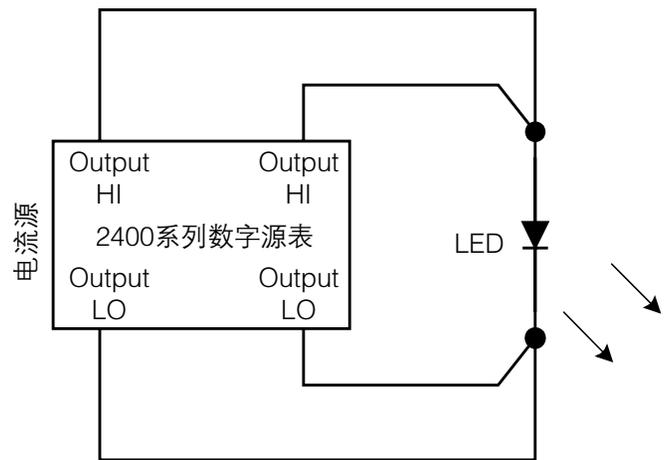


图3a. LED测量电路

测试系统介绍

单LED测试系统

LED被放测试夹具中，连接数字源表的输入端。放置器件和连接待测器件（DUT）的操作通常是由元件机械手完成的，以实现自动化的生产流程。测试夹具通常是避光的，以防止由于环境光线的影响导致测试数据出错。光电探测器（PD）集成在测试夹具中，当机械手将LED放入测试夹具中时，就对其进行测试。图2给出了上述的典型直流特征分析系统结构。

数字源表能够对LED进行三种直流测试。由于这种仪器能够提供任意极性的电流源或电压源，因此无须翻转或移动放置在最初测试位置上的LED即可完成所有直流特征分析测试。数字源表和静电计结合使用，能够测出光照强度的大小。要对LED的光照强度进行特征分析，数字源表需要在LED的工作（电压）范围内进行多点电流扫描（如图3a所示），利用一台6517A通过PD即可测出发光情况（如图3b所示）。对于高产能应用，人们一般只在一个或少数几个测试点上测量光照强度。

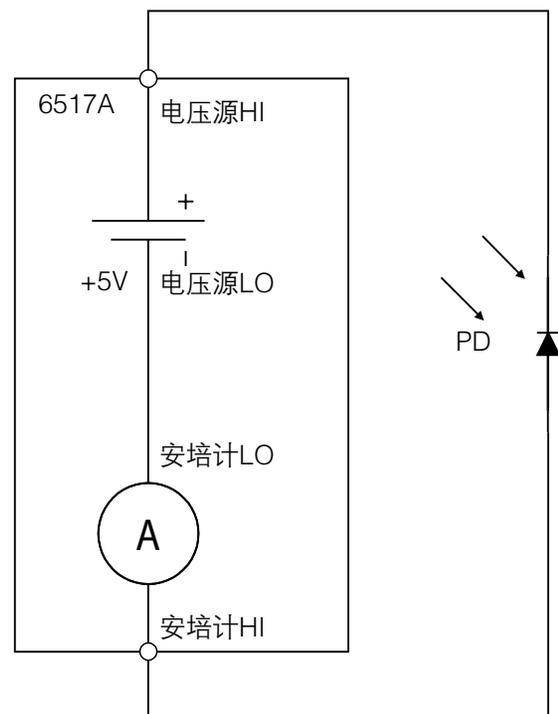


图3b. 光电探测器电源电路

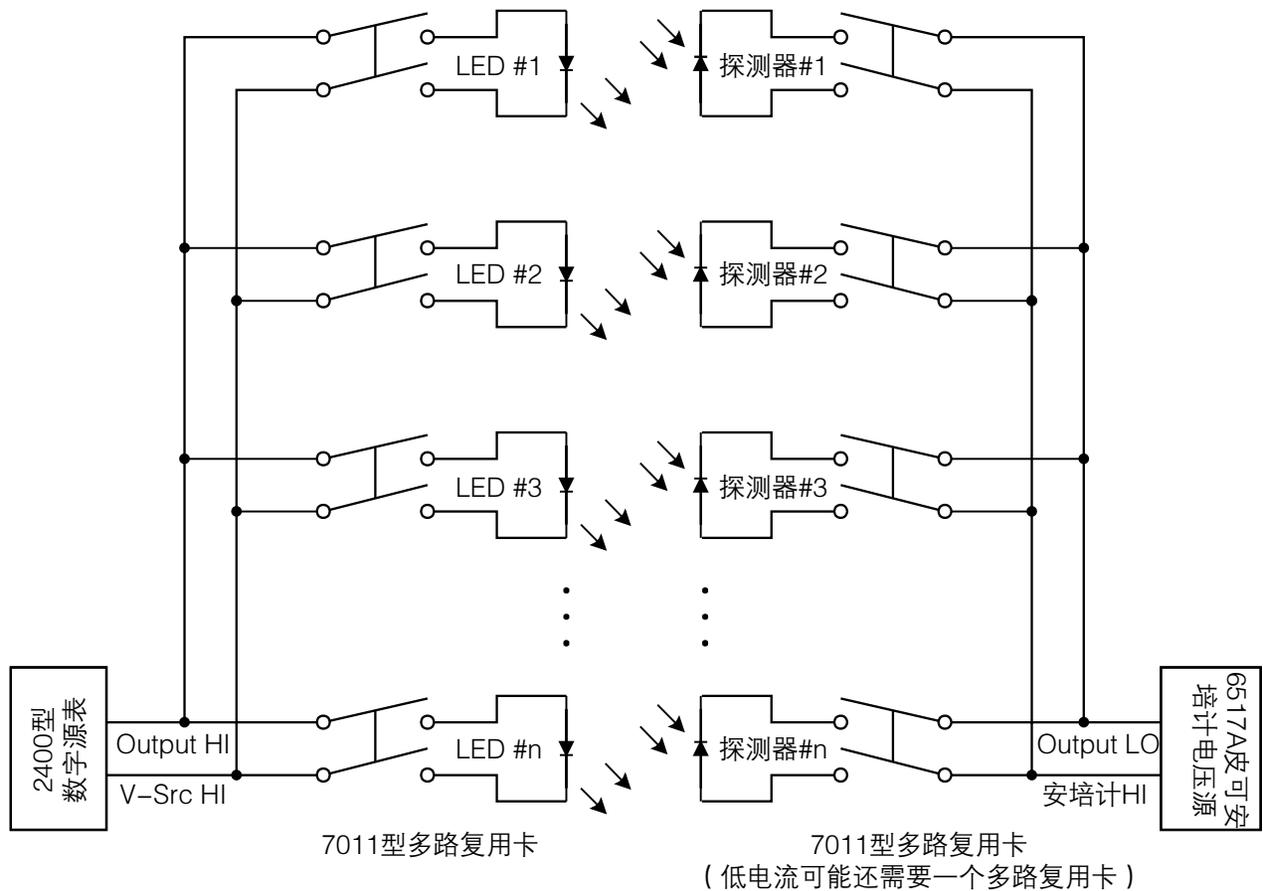


图4. 多个LED到一台2400型数字源表的切换以及多个PD到6517A型静电计的切换

多/阵列式LED系统

对于LED阵列、多管芯封装或老化测试应用，我们常常需要同时测试很多LED。一次测试多个器件性价比最高的方式就是在测试系统中集成开关。老化测试通常需要对LED进行延时通电，这需要不带开关的专用电源功能。老化测试系统中PD的测量一般采用多路复用的方式监测不同时刻的LED性能。图4给出了一种LED开关测试系统配置的例子。实际的系统可以配置任意数量的二极管，支持各种电气指标。

在多器件测试系统中，每次选择单个LED进行测试，与该LED和用于检测光照强度的PD对应的继电器闭合。数字源表进行所需的直流测试，然后加载足够的电流点亮LED，当LED点亮时，6517A测量PD增大的漏流。当这一测试过程完成后，再选择用于下一个器件的开关通道。

7011型多路复用卡的偏移电流指标是 $<100\text{pA}$ ，这个值可能超出了测试系统的误差容限。因此，用7158（或7058）型低电流扫描卡代替7011，可以将偏移量降低到 $<1\text{pA}$ （ $<30\text{fA}$ 典型值）。注意，重要的是采用低电流卡将会降低系统可用的通道密度。低电流卡只有10个通道可用于扫描，这意味着当用它们替代7011时，需要使用的卡的数

量将增加四倍。

集成器件

目前很多传感器都在同一个封装内集成了LED和PD，用于构成反射目标传感器、光开关或其它一些混合器件。集成器件需要同时测试LED和PD的性能。其中要使用外部PD或者其它光敏器件单独监测LED的输出。直流测试利用数字源表完成，但是当测量光照强度时，内部和外部PD都要进行测量。不仅LED必须要通过所有所需的直流和光学测试，而且内部PD数据也必须与从“标准”外部器件上获取的数据关联起来。图5给出了一个采用三台数字源表的这类测试系统实例。

根据测试规范所需的电流灵敏度，我们可以采用2400或者6517A测量PD。2400对于精确测量低至 10nA 的电流是很有用的，而6517A能够可靠地测量低于 10fA 的电流。

测试系统安全性

很多电子测试系统或仪器能够测量或提供危险的电压或功率。还有可能的是，在单故障条件下（例如编程错误或者仪器失效），即使系统显示不存在危险也会输出危险电平。

8505型Trigger Link Y型适配器

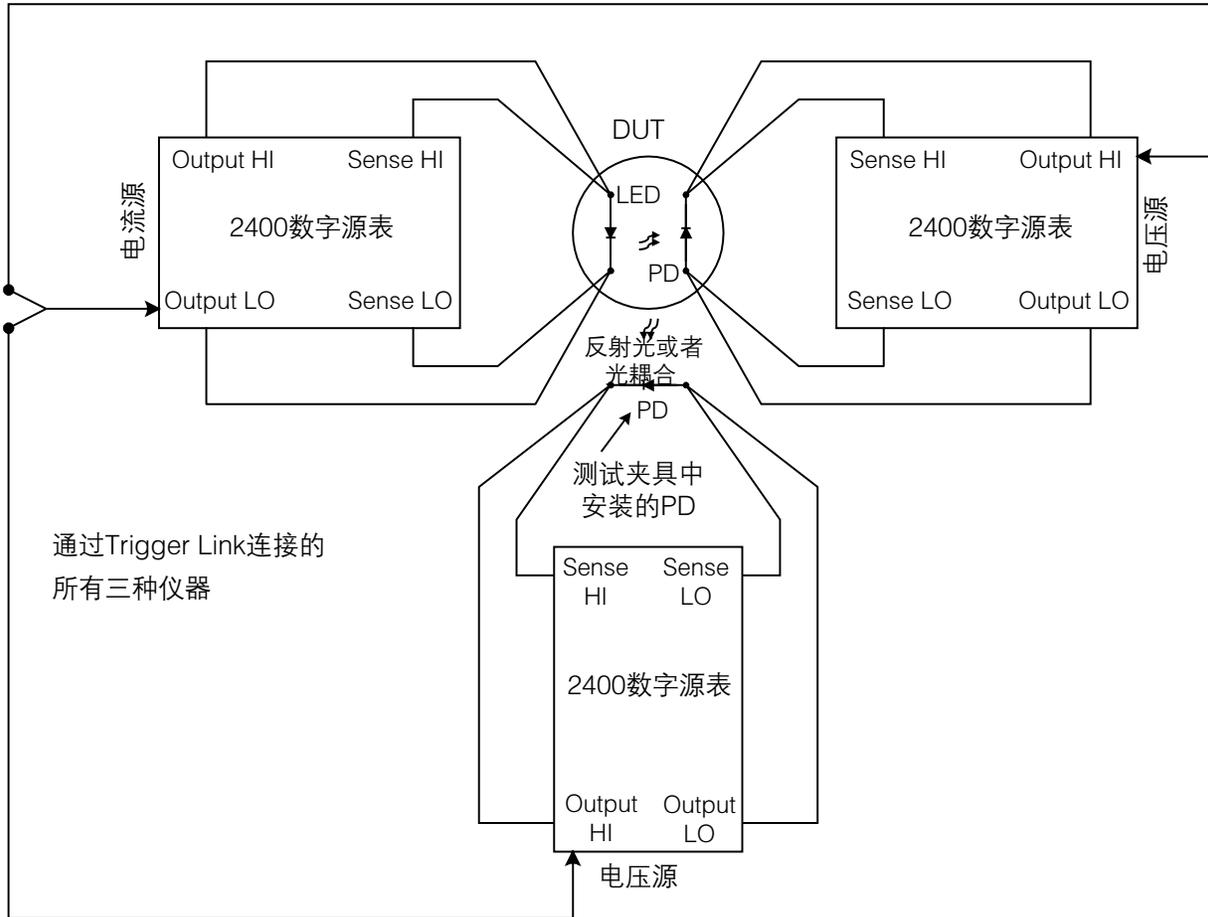


图5. 利用2400数字源表测量集成式LED/PD器件

对于这些高电压和高功率，很有必要始终保护操作人员避免这些危险。

保护方法包括：

- 设计测试夹具防止操作人员接触任何危险电路。
- 确保待测器件完全密封以保护操作人员免遭飞出碎片的伤害。例如，电容和半导体器件在电压过高的情况下会发生爆炸。
- 对操作人员可能接触到的所有电气连接进行双层绝缘。双层绝缘能够确保即使一层绝缘失效仍然能够保护操作人员。
- 当测试夹具外壳打开时，采用高可靠、失效保护式互锁开关断开电源。
- 如果可能，尽量采用自动化的机械手，这样操作人员就不必接触测试夹具的内部或者打开保护装置。
- 对所有系统用户进行探测器操作培训，使得他们明白所有潜在的危险，并知道如何保护自己不受伤害。
- 测试系统的设计者、集成者和安装者要负责确保对操作人员和维护人员的保护措施到位且有效。

方法与技术

基于Trigger Link的同步

Trigger Link是测试系统中的仪器使用的一种硬件握手总线，以确保实现正确的测试序列。它是所有最新吉时利仪器的标准功能，包括本文中提到的所有仪器。当电表和开关主机通过Trigger Link线缆连接起来时，它们就可以相互触发，实现更快的测试操作。这种内置总线不需要PC直接控制大多数系统功能。当正确使用Trigger Link功能时，PC需要完成的唯一功能就是初始化测试以及从系统中检索数据。

要想知道有关如何利用Trigger Link配置同步测试系统的详细方法，请查阅吉时利2217号应用笔记“多台数字源表的触发同步”。

接触检查

数字源表接触检查功能能够帮助用户消除由于接触疲劳、破损或污染，连接松动或断裂，继电器失效等问题导致的测量误差和假产品失效。在开始执行每个自动测试序列之前，要检验与待测器件（DUT）的接触情况，这有助于降低加工和假故障带来的成本。

接触检查功能检验HI/LO测试引线对之间的电阻是否低于一定的阈值。接触检查要在Output HI/LO、Sense HI/LO和Guard/Guard Sense对之间进行。通过使用脉冲变换器和参考电阻，我们可以非常快地进行接触检查（通常在 $350\mu\text{s}$ 之内）。参考电阻可以设置为三个不同的值（ 5Ω 、 15Ω 、 50Ω ）。接触检查功能并不在DUT上传输信号——只在上述三对HI/LO引线之间。如果发现接触检查失效，该测试操作将被忽略并通过面板、IEEE-488接口总线和数字I/O端口给出失效指示。

验证LED极性

我们可以在测试集中增加一种极性测试。极性测试可以在完成功能测试之前安全而快速地判断出LED的方向。我们可以通过两种方式利用LED的击穿特性判断LED的极性。一种是在LED中通过正电流，测量电压。如果电压值低于1V（典型情况下）表示二极管是正向极性，而高电压表示击穿和反向极性。另外一种方法是，在LED中通过负电流，如果测出的电压小于1V表示反向极性，高电压表示击穿和正向极性。具体选择哪种方法测试极性主要取决于测试程序的整体结构。

要想详细了解如何利用极性测试的结果以及各种可选的数字源表和元件机械手，请查阅吉时利1805号应用笔记“基于2400系列数字源表的二极管生产测试”。

常见误差源

结自热

随着测试时间的增加，LED的半导体结往往会发热。对结发热最敏感的两种测试是正向电压测试和漏电流测试。当结发热时，电压会下降，更重要的是，在稳压测试过程中漏电流会增大。因此，在不降低测量精度或稳定性的情况下尽量缩短测试时间是很重要的。

数字源表系列可以配置测量之前的器件浸透时间（soak time）以及获取输入信号的时间。浸透时间使得电路电容能够在测量开始前稳定下来。测量积分时间取决于电源线性周期数（NPLC）。如果输入电源频率为60Hz，那么1NPLC测量将需要 $1/60$ 秒，即 16.667ms 。积分时间决定了模-数转换器（ADC）获取输入信号的时间，它体现了速度和精度二者之间的折衷。

VF测试的典型浸透时间从1毫秒到5毫秒不等，IL测试为5毫秒到20毫秒。利用这些较短的测试时间，可以减少由于结发热导致的误差。此外，通过进行一系列测试并只改变测试时间可以确定结发热的特性。

引线电阻

常见的一种电压测量误差源是从仪器到LED连接的测试引线带来的串联电阻。当采用2线连接方式时（如图6a所示），这种串联电阻就会加入测量。当连接线较长并且采用高电流时，引线电阻的影响就特别有害，因为引线电阻上产生的电压降相比所测的电压就很大了。

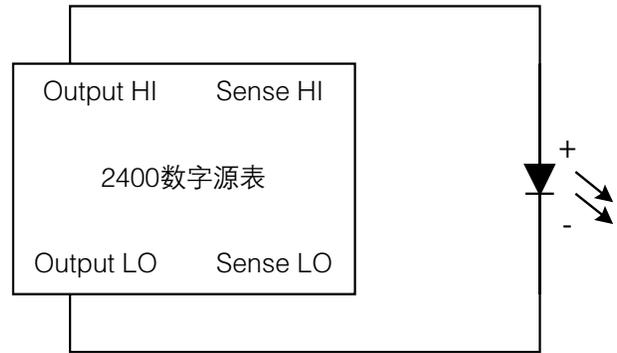


图6a. 双线连接

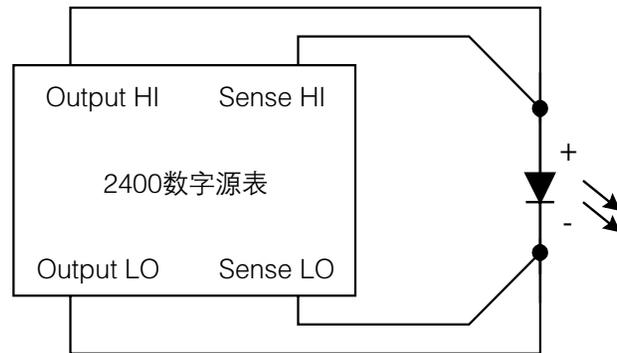


图6b. 四线连接

要解决这个问题，最好采用四线远程检测方法而不是双线技术。采用四线连接方法（如图6b所示），电流经由Output HI/LO测试引线流过LED，利用Sense HI/LO引线测量LED上的电压。这样，测得的就只是LED上的电压降了。

漏电流

在测量极低的电流时，例如漏电流，线缆和夹具中的杂散漏流也是一种误差源。为尽量减少这种问题的影响，应该采用高电阻材料制作测试夹具。

另外一种减少漏电流的方法是采用数字源表内置的保护电路。这种保护电路是电路中的一个低阻抗点，它与待保护的高阻抗点几乎具有相同的电位。图7中的例子很好地说明了这一原理。

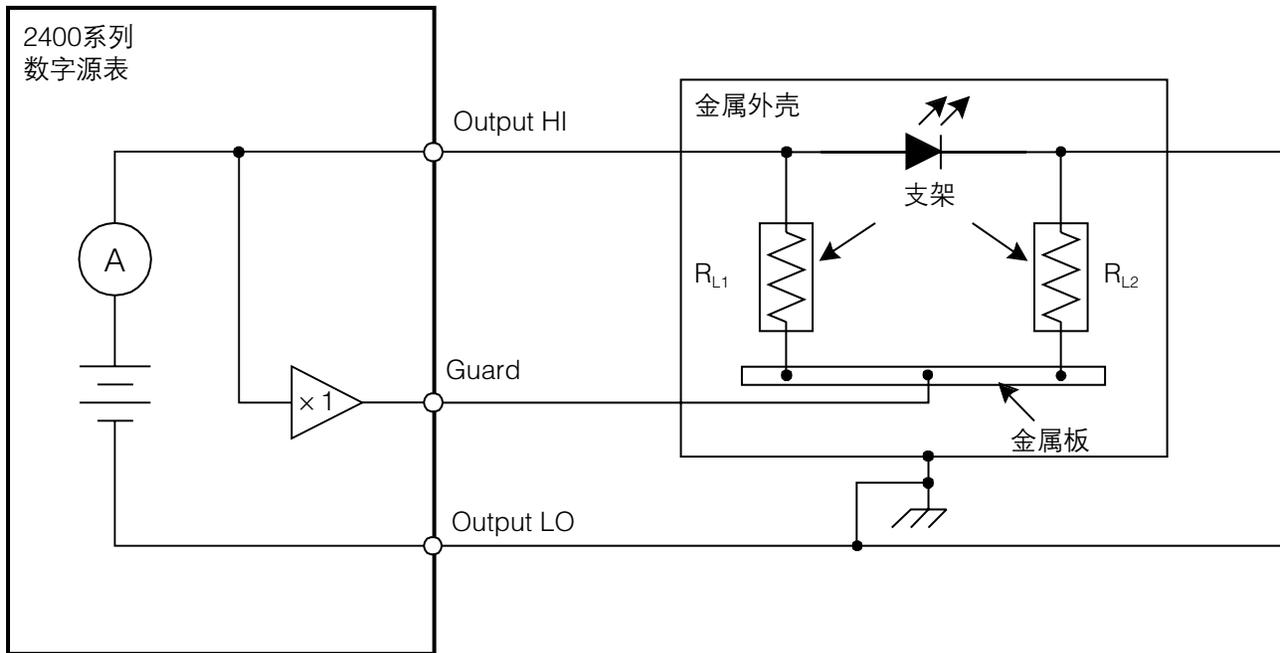


图7. 2400系列的保护技术

在这个例子中，待测的LED安装在两个绝缘支架上（ R_{L1} 和 R_{L2} ）。这个电路中使用的保护电路能够确保所有的电流都流过二极管，不会流过支架。一般而言，当产生的电流源或测量的电流小于 $1\mu\text{A}$ 时都应该采用线缆保护措施。将仪器的Guard端与金属板相连以保护这种电路。这样就使得绝缘体 R_{L1} 和 R_{L2} 的底部与顶部几乎具有相同的电位。由于绝缘体的两端几乎具有相同的电位，因此没有明显的电流流过其中。所有的电流都像我们希望的那样流过LED。

警告：Guard端与Output HI端具有相同的电位。因此，如果Output HI存在危险电压，那么Guard端上也存在这一危险电压。

静电干扰

当把一个带电的物体靠近另一个不带电的物体时，高电阻测量容易受到静电干扰的影响。要想减少静电场的影响，可以采用一个屏蔽罩将待测电路封装起来。如图7所示。一个接地的金属屏蔽罩包裹着待测的LED。数字源表的Output LO端必须连接金属屏蔽罩，以防止由于共模干扰和其它干扰造成的噪声。采用这类屏蔽罩还有助于防止操作人员接触支架金属板，因为这个金属板也具有保护电位。

光干扰

LED的测试需要检测LED发光的大小和强度，因此测试夹具应该避光。一般地，我们可以将测试夹具的内部喷成黑色，以减少夹具内部的光线反射。

程序范例

吉时利开发了一套Microsoft® Visual Basic范例程序，实现了图4中测试系统的多点LED/PD测试。用户可以从<ftp://ftp.keithley.com/pub/instr/SourceMeter/VisibleLED.zip>免费下载范例程序。此外，还可以从同一目录中下载3x2400.zip文件，其说明了图5中给出的触发机制和测试系统。这些程序范例有效说明了如何针对各个测试参数配置2400和6517A，以及如何采用Trigger Link进行快速测试定序。

注意：所提供的这些测试程序旨在帮助说明本文所述的有关概念。要想符合所需的测试参数与时序的要求可能要对这些程序进行一定的修改。

设备列表

配置图2中的系统需要下列设备：

1. 2400型数字源表
2. 6517A型静电计/高电阻系统
3. 8501型Trigger Link线缆
4. 两条7007型IEEE-488接口线
5. KPCI-488型IEEE-488计算机PC接口板
6. 带校准光电探测器的避光外壳
7. 用于连接数字源表9针公D型辅助接头与元件机械手的定制数字I/O线
8. 用于连接测试设备与DUT和光电探测器的定制线束

配置图4中的系统需要下列设备：

1. 2400型数字源表
2. 6517A型静电计/高电阻系统
3. 7001型（或7002型）开关主机
4. 7011型四1x10多路复用卡（每个卡可支持20对LED/PD）
5. 三条8501型Trigger Link线缆
6. 三条7007型IEEE-488接口线
7. KPCI-488型IEEE-488计算机PC接口板
8. 用于连接测试设备与待测器件的定制线束

配置图5中的系统需要下列设备：

1. 2400型数字源表
2. 两条8501型Trigger Link线缆
3. 8505型Trigger Link Y型适配器
4. 三条7007型IEEE-488接口线
5. KPCI-488型IEEE-488计算机PC接口板
6. 安装在测试夹具中的经过校准的光电探测器
7. 用于连接测试设备与待测器件的定制线束

Specifications are subject to change without notice.

All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments, Inc.

All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.



Keithley Instruments, Inc. • 28775 Aurora Road • Cleveland, Ohio 44139 • 440-248-0400 • Fax: 440-248-6168 • www.keithley.com

BELGIUM:	Keithley Instruments B.V.	Bergensesteenweg 709 • B-1600 Sint-Pieters-Leeuw • 02/363 00 40 • Fax: 02/363 00 64
CHINA:	Keithley Instruments China	Yuan Chen Xin Building, Room 705 • 12 Yumin Road, Dewai, Madian • Beijing 100029 • 8610-62022886 • Fax: 8610-62022892
FRANCE:	Keithley Instruments Sarl	B.P. 60 • 3, allée des Garays • 91122 Palaiseau Cédex • 01 64 53 20 20 • Fax: 01 60 11 77 26
GERMANY:	Keithley Instruments GmbH	Landsberger Strasse 65 • D-82110 Germering • 089/84 93 07-40 • Fax: 089/84 93 07-34
GREAT BRITAIN:	Keithley Instruments Ltd	The Minster • 58 Portman Road • Reading, Berkshire RG30 1EA • 0118-9 57 56 66 • Fax: 0118-9 59 64 69
INDIA:	Keithley Instruments GmbH	Flat 2B, WILOCRISSA • 14, Rest House Crescent • Bangalore 560 001 • 91-80-509-1320/21 • Fax: 91-80-509-1322
ITALY:	Keithley Instruments s.r.l.	Viale S. Gimignano, 38 • 20146 Milano • 02/48 30 30 08 • Fax: 02/48 30 22 74
NETHERLANDS:	Keithley Instruments B.V.	Postbus 559 • 4200 AN Gorinchem • 0183-635333 • Fax: 0183-630821
SWITZERLAND:	Keithley Instruments SA	Kriesbachstrasse 4 • 8600 Dübendorf • 01-821 94 44 • Fax: 01-820 30 81
TAIWAN:	Keithley Instruments Taiwan	1 Fl. 85 Po Ai Street • Hsinchu, Taiwan, R.O.C. • 886-3572-9077 • Fax: 886-3572-9031