

吉时利为电化学测试方法和应用开发的仪器

应用文章

吉时利仪器拥有 60 多年的专业测量经验，是先进的电子测试仪器领域的世界领导者。我们的客户都是各种研究和工业应用中的科学家和工程师，包括许多电化学测试。吉时利制造的产品能够准确地输出和测量

电流和电压。采用吉时利仪器的电化学领域包括电池和能量存储、腐蚀科学、电化学沉积、有机电子、光电化学、材料研究、传感器及半导体材料和器件。表 1 列出了采用吉时利产品的部分测试方法和应用。

表 1. 电化学测试方法和应用

方法和测量功能	应用
循环伏安测量	电化学传感器
线性扫描伏安测量	电沉积，电镀
开路电压	pH 测量
电位测量	太阳能电池
电阻系数	离子选择电极
电流和电压方波及测量	电池充放
脉冲 I-V	半导体器件特性分析
电容电压	电化学蚀刻
源和阱电流和电压	腐蚀科学
测量 DC 电流和电压	纳米装置特性分析

循环伏安测量

循环伏安测量 (CV) 是一种电位扫描方法，也是最常用的电化学测量技术，其一般采用 3 电极电池。图 1 显示了由一块电化学电池、一块可调节的电压源 (V_s)、一个电流表 (A_M) 和一个电压表 (V_M) 组成的典型的电化学测量电路。电化学电池的三个电极是工作电极 (W_E)、基准电极 (R_E) 和反电极 (C_E)。WE 和 CE 之间应用电位扫描使用的电压源 (V_s)。RE 与 WE 之间的电位 (E) 使用电压表测量，然后调节整体电压 (V_s)，在 WE 上相对于 RE 保持希望的电位。得到的与 WE 之间的电流 (i) 使用电流表 (A_M) 测量。

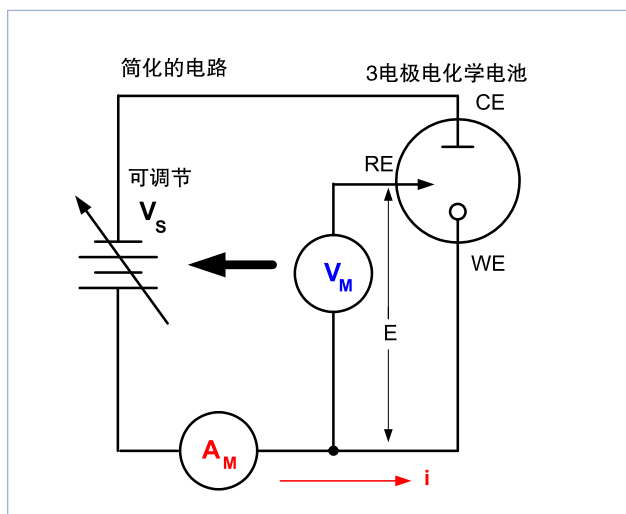


图 1. 执行循环伏安测量使用的简化的测量电路。

吉时利 SourceMeter® SMU 仪器输出电压，测量电流，特别适合循环伏安测量应用。图 2 说明了该仪器的四个端子怎样连接到 3 电极电化学电池上。

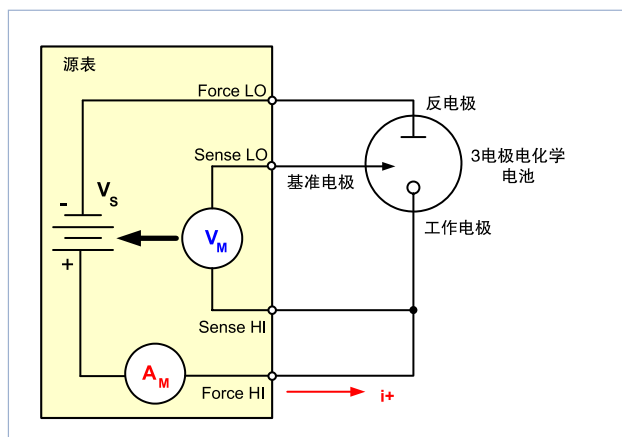


图 2. 把电化学实验室系统连接到电化学电池上，执行循环伏安测量。

在源表 SMU 仪器编程为在远程传感 (4 线) 配置中输出电压时，内置传感功能提供了一个反馈电压，将测量这个电压，并与编程电压进行对比。然后调节电压源，直到反馈电压等于编程电压。远程传感功能补偿测试线和被分析物中的电压下跌，确保为工作电极提供编程的电压。

2450-EC 和 2460-EC 电化学实验室系统拥有内置显示器，可以使用循环伏安测量测试脚本自动绘制伏安图。图 3 显示了仪器生成的伏安图。2450 和 2460 仪器包括一个测试脚本，在没有计算机的情况下执行循环伏安测量。它们还包括 LabVIEW® 代码，使用计算机执行循环伏安测量。

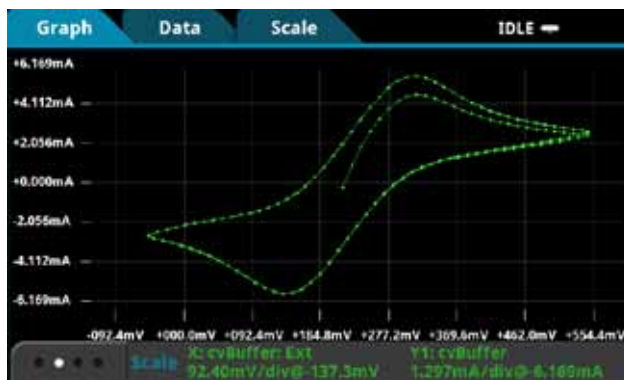


图 3. 2450 图形显示器上生成的伏安图。

2450-EC 和 Model 2460-EC 电化学实验室系统自带的其他电化学测试脚本有：开路电位测量、电位脉冲和方波及电流测量、电流脉冲和方波及电位测量、计时电流和计时电位。这些系统还包括一条电化学转换电缆，带有一套鳄鱼夹，用户可以简便地连接仪器和电化学电池。

开路电位

电化学电池的开路电位 (OCP) 是在基准电极和工作电极之间进行的一项电压测量。测量开路电位要求高阻抗的电压表，在对电池不应用电流或电压的情况下测量电压。由于输入阻抗高，源表 SMU 仪器特别适合 4 线配置下的 OCP 测量，如图 4 所示。在这一设置下，仪器配置成测量电压，输出 0A。如果先测量 OCP，后执行循环伏安测量，那么在测量之间不需要手动重新排列任何测试线，因为仪器可以在内部自动改变功能。2450-EC 和 2460-EC 标配一个测试脚本，可以执行开路电位测量。

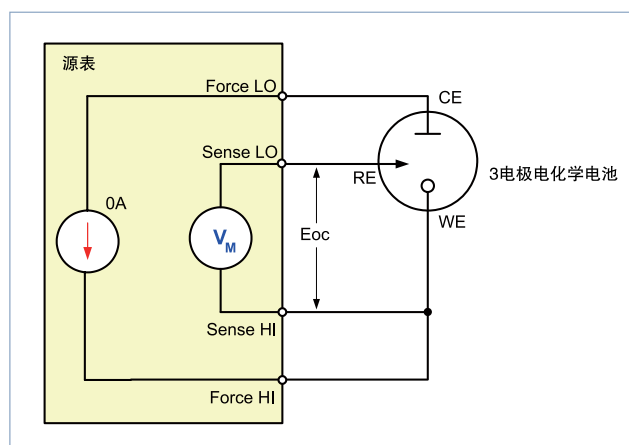


图 4. 使用电化学实验室系统，测量电化学电池的开路电位。

电阻系数

电阻系数是量化材料对电流流动反作用力的一个基本指标。确定材料电阻系数的最佳技术视涉及的材料类型、电阻幅度和样本的形状变化。

导体和半导体 – 输出电流，测量电压

通常通过输出电流，在 4 线配置中测量经过样本的电位，来确定导体或半导体的电阻系数。4 线配置最大限度地降低了导线和接触电阻，减少了其对测量准确度的影响。这种配置 (图 5) 使用两条线输出电流，使用另一组线测量经过传导样本的电压下跌。样本中的电压下跌将非常小，因此使用吉时利 Model 2182A 纳伏表来进行测量。

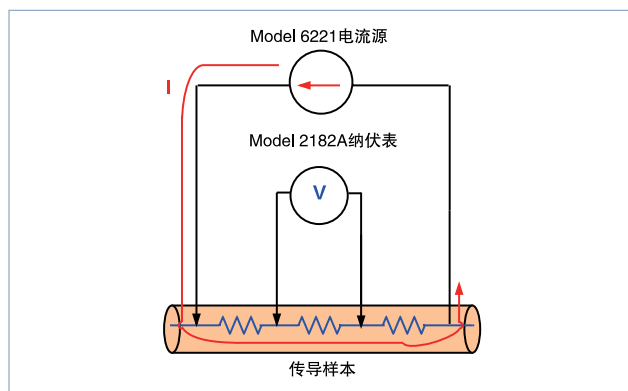


图 5. 使用电流源和纳伏表测量传导样本。

绝缘体 – 应用电位，测量泄漏电流

一般通过对未知电阻应用电位，然后测量得到的泄漏电流，来测量绝缘体的电阻系数。这是一种 2 端子测试。体积电阻系数是衡量直接经过材料的泄漏电流的指标。表面电阻系数则是指绝缘体表面的电阻。图 6 是体积电阻系数和表面电阻系数的电路图。

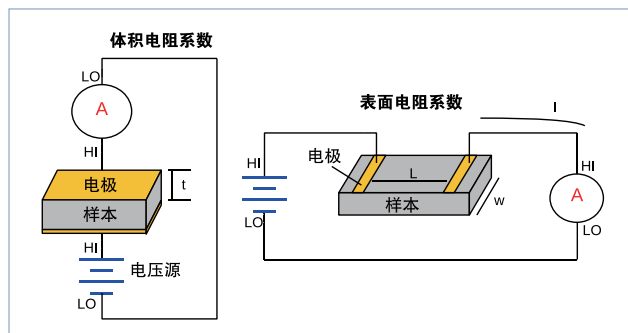


图 6. 体积电阻系数和表面电阻系数测量图。

应用文章

这些高电阻测量要求仪器能够测量超低电流，并应用电位。Model 6517B 静电计 / 电压源和 Model 6487 皮安表 / 电压源能够测量高阻抗材料的电阻系数。这些仪器能够测量最低几十或几百毫微安的电流，并拥有一个内置电压源。在测量超高电阻时，一定要正确屏蔽装置和所有线缆，避免静电干扰的影响。

电位测量

电位测量需要测量两个电极之间的电位，一般是工作电极和基准电极。我们使用高阻抗电压表或静电计测量电位差，因此任何电流流动都可以忽略不计 ($i=0$)。电位测量用于 pH 测量及使用离子选择电极进行的电压测量等应用。这些电位测量通常使用两个电极和一个高阻抗电压表进行，如 Model 6517B 或 Model 6514 静电计 (图 7)。

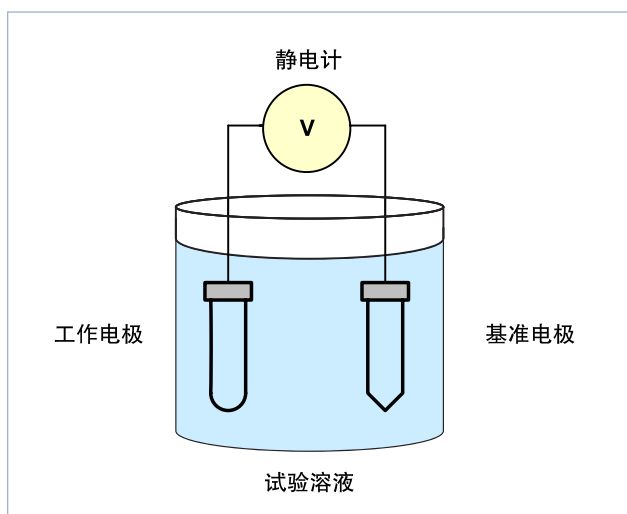


图 7. 测量两个电极之间电位差的静电计。

电化学传感器

电化学传感器用于各行各业的各种应用，包括环境和气体监测、医疗应用（如确定葡萄糖浓度）以及汽车和农业产业。电化学传感器分成各种不同的设计，可以有两个或三个电极，可以是电位测量传感器，也可以是电流测量传感器，还可以是电压测量传感器。

某些传感器基于有机电子器件或纳米结构。选择最优的测试设备对电化学传感器研发至关重要。例如，测量电位传感器的输出可能要求超高阻抗电压表，如吉时利静电计，其输出阻抗很高 ($>10^{14}$ 欧姆)。测试电流测量气体传感器可能需要使用非常灵敏的电流表，如皮安表、静电计或源表 SMU 仪器。

图 8 显示了简单的电流测量气体传感器。在气体接触工作电极 (WE) 时，会发生化学反应，包括氧化或还原反应，具体视传感器而定。在电流测量传感器中，电流在反电极 (CE) 和工作电极 (WE) 之间流动。电流输出使用灵敏的电流表测得，其与气体浓度有关。在必要时，可以在传感器中增加第三个电极，即基准电极，应用电位。

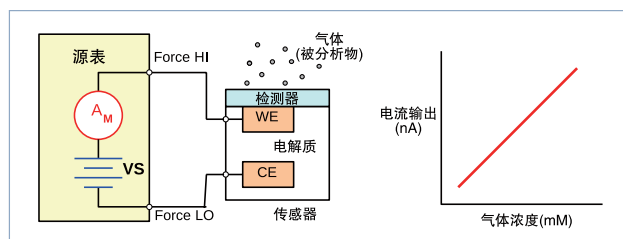


图 8. 源表 SMU 仪器测量 2 电极电流测量气体传感器的电流输出。

太阳能电池

为了满足不断提高的清洁能源需求，光伏研究人员正在努力改善电池效率，降低成本。新兴技术包括染料敏化太阳能电池、有机太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、甚至 3D 太阳能电池。分析太阳能电池的电气特点对确定怎样以最小损耗实现电池的最大效率至关重要。

在太阳能电池上执行的部分常见电气测试中，需要相对于应用的 DC 电压测量电流和电容，并相对于频率或 AC 电压测量电容。某些测试要求脉冲式电流电压测量。这些测量通常在各种光线强度和温度下进行。可以从这些测量中提取重要的装置参数，包括输出电流、转换效率、最大功率输出、掺杂密度、电阻系数、等等。图 9 是可以从太阳能电池典型的前向偏置 I-V

电流曲线中提取的多个参数，包括最大电流 (I_{max})、短路电流 (I_{sc})、最大功率 (P_{max})、最大电压 (V_{max}) 和开路电压 (V_{oc})。

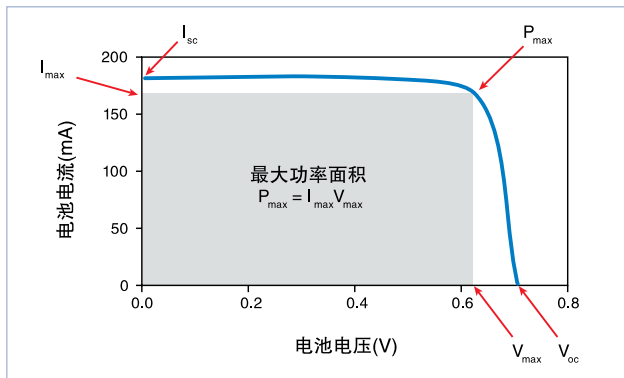


图 9. 光伏电池典型的前向偏置 I-V 曲线。

在进行这些关键电气测量时，Model 4200-SCS 参数分析仪之类的仪器可以简化测试和分析。Model 4200-SCS 是一种集成系统，包括进行 DC 及超快速 I-V 和 C-V 测量的仪器，以及控制软件、图表和数学分析功能。Model 4200-SCS 可以进行各种太阳能电池测量，包括 DC 和脉冲电流电压、电容电压、电容频率、驱动电平电容曲线 (DLCP) 和 4 探头电阻系数。

图 10 显示了一块太阳能电池连接到 Model 4200-SMU 上进行 I-V 测量。四线连接消除了测量电路中的引线电阻。一旦电池连接到输出端子上，4200-SCS 的交互软件可以简便地设置电压扫描，自动生成 I-V 曲线，如图 11 所示的光伏电池的前向偏置 I-V 曲线。

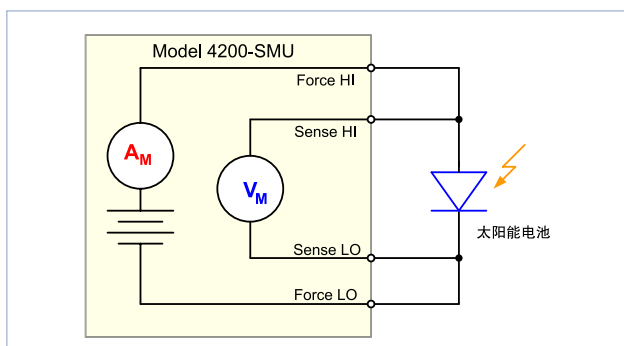


图 10. 太阳能电池连接到 Model 4200-SMU 参数分析仪上。

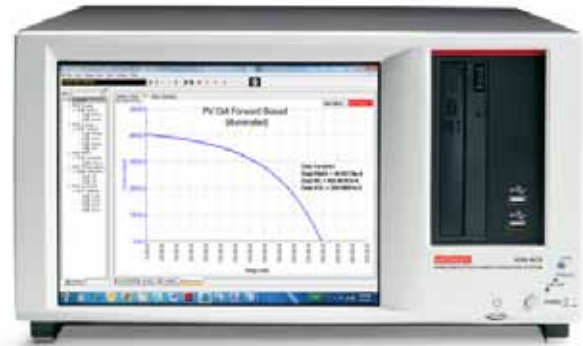


图 11. Model 4200-SCS 参数分析仪测量太阳能电池的前向偏置 I-V 特点。

充电电池的充放

吉时利源表 SMU 仪器可以简化电池测试，因为它们能够同时输出和测量电流和电压。这些仪器可以灵活地输出和接收电流，测量电压和电流，为电池充放测试提供了完美的解决方案。

对这一测试，源表 SMU 仪器的端子采用 4 线方式连接到电池上 (图 12)，以消除引线电阻的影响。



图 12. Model 2460 源表 SMU 仪器的图形显示器上显示的电池放电结果。

在充放测试中，仪器配置成提供电压，测量电流。尽管仪器配置成提供电压，但它可以在恒定电流模式下运行。图 13 显示了充放测试中简化的电路图。

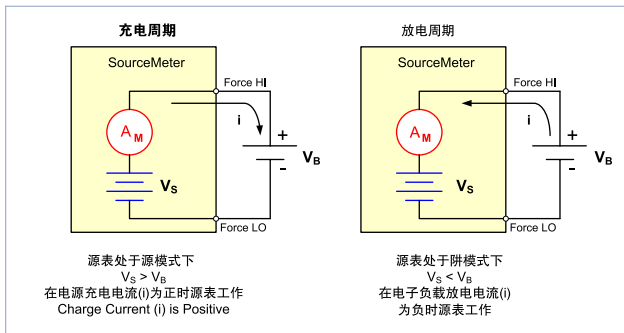


图 13. 充放电电路图。

电流通常使用恒定电流充电，因此源表 SMU 仪器配置成把电压源设置为电池的额定电压，把输出极限设置成希望的充电电流。在测试开始时，电池电压小于仪器的电压输出设置。这种电压差会驱动电流，这个电流直接受到用户自定义的电流极限限制。在电流极限范围内，仪器作为恒定电流源工作，直到达到编程的电压。

在电池放电时，源表 SMU 仪器作为接收装置使用，因为它耗散功率，而不是供电。仪器的电压源设置成低于电池电压，电流极限设置成放电速率。在启用输出时，来自电池的电流流入仪器的 Hi 端子。结果，电流读数将为负。图 14 显示了 2500 mAh 电池放电特点的测量结果。

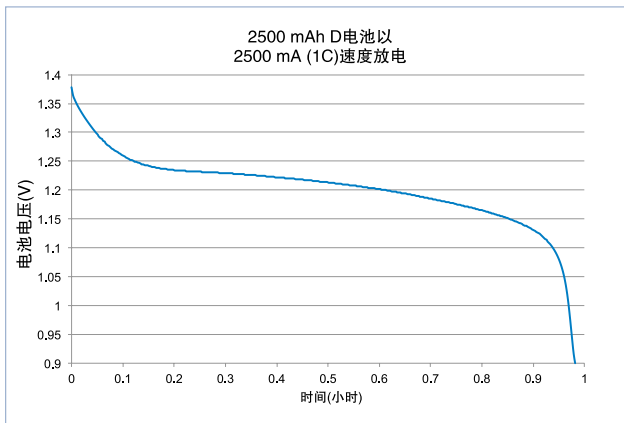


图 14. 使用 Model 2460 测量的 2500 mAh D 电池的放电特点。

电气装置特性分析

源表 SMU 仪器和 Model 4200-SCS 参数分析仪特别适合分析电气装置特点，因为它们可以输出和测量电流和电压。除包含多台 SMU 仪器外，参数分析仪还可以包括一个电容电压单元或脉冲测量单元。可以表征的元器件包括碳纳米结构和装置、传感器、太阳能电池、有机半导体器件和其他结构。

特定应用需要的 SMU 仪器数量取决于装置的端子数量和要求的测量。在图 15 所示的有机 FET (OFET) 实例中，要求两台 SMU 仪器分析器件特性。在这种情况下，一台仪器 (SMU1) 连接到栅极端子上，第二台仪器 (SMU2) 连接到器件的漏极端子上。OFET 的源极端子连接到公共位置。通过使用 SMU1 步进栅极电压，使用 SMU2 扫描漏极电压，测量漏极电流，可以确定 OFET 的传递特点。

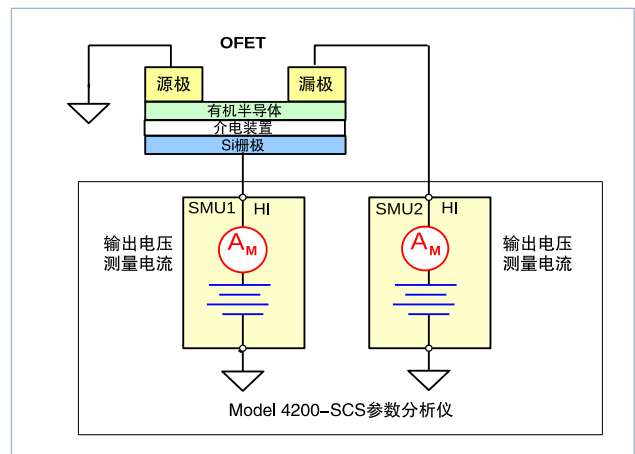


图 15. Model 4200-SCS 参数分析分析有机 FET I-V 的特点。

图 16 显示了 Model 4200-SCS 参数分析仪测量和绘制 OFET 的传递特点。

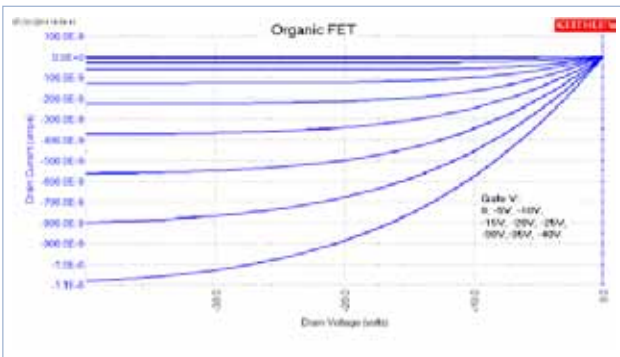


图 16. Model 4200-SCS 参数分析仪测量的 OFET 的传递特点。注：OFET 由肯特州立大学提供。

Model 4200-SCS 参数分析仪在分析器件电气特点方面拥有许多优势。这种可以配置的测试系统能够简化灵敏的电气测量，因为它把多台仪器整合到一个系统中，包括交互软件、图形和分析功能。

电沉积、电镀

电沉积是把一层金属薄膜应用到传导表面的工艺。这一工艺有许多应用，包括装饰涂层、防腐蚀、甚至纳米线和纳米结构铸造。传统上，这一工艺需要在两个电极之间连接一个电流源，一个阴极，一个阳极。电流驱动金属离子从阳极流向阴极，如图 17 所示。在这个简单的实例中，Model 6220 电流源引导 Ag^+ 离子从阳极吸收到阴极。

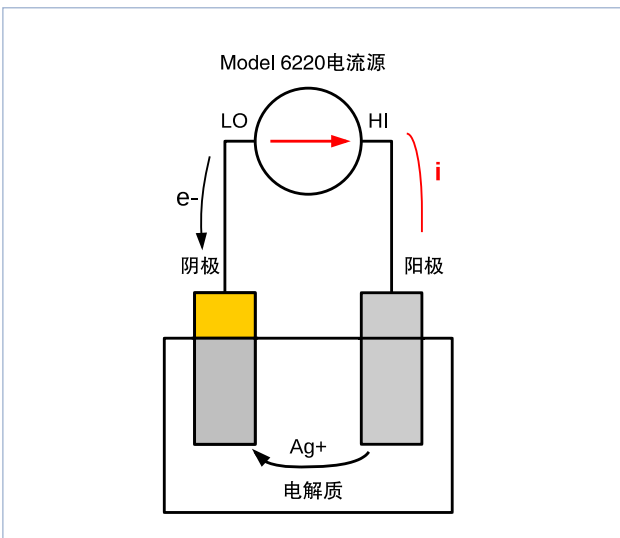


图 17. 采用恒定电流源的电镀电路。

电沉积可能要求使用恒定 DC 电流或电压，也可能要求沉积时间受控的脉冲式或步进式信号。除提供电流或电压外，特定应用可能要求监测电流或电压。Series 2400 或 Series 2600B 源表 SMU 仪器可以自动控制源参数，并监测电路中得到的电流或电位。可以使用从仪器到 2 电极配置的四线控制，消除引线电阻的影响。

总结

吉时利仪器公司制造适合各种电化学应用的灵敏设备，包括伏安测量、低电阻系数和高电阻系数测量、电池测试、电位测量、电沉积、电气装置特性分析以及涉及以高精度提供和测量电流和电压及测量电容的其他测试。可以远程控制吉时利仪器，自动完成测试、同步和定时控制。

吉时利为电化学测试方法和应用提供的产品

吉时利型号	测试仪器	说明	测试方法 / 应用
2450-EC 2460-EC	电化学实验室系统	2450 或 2460 源表 SMU 仪器，带有内置测试脚本，电化学转换电缆，装有 LabView 代码的 U 盘，用于循环伏安测量。	循环伏安测量，开路电位，电位脉冲和方波及电流测量，电流脉冲和方波及电位测量，计时电流，计时电位，电池充放，器件特性分析，电位测量，传感器，电沉积，纳米科技，电化学蚀刻，太阳能电池，腐蚀，电阻系数
Series 2400 和 2600B	源表源测量单元 (SMU) 仪器	SMU 仪器为提供电流或电压、同时以高速度和高精度测量电流、电压和 / 或电阻提供了高度精密解决方案。	开路电位，电池充放，器件特性分析，电位测量，传感器，电沉积，纳米科技，电化学蚀刻，太阳能电池，腐蚀，电阻系数
4200-SCS	参数分析仪	全面集成的模块化参数分析仪，分析材料和器件的电气特点。直观的软件可以方便地提取参数，进行测试配置和分析。模块包括中高功率 DC、超快速脉冲式 DC 和电容 / 阻抗。	有机半导体器件特性分析，碳器件特性分析，泄漏电流，传感器，太阳能电池，纳米科技，电阻系数，电位测量
6517B, 6514	静电计	多功能仪器，测量电压和高输入阻抗、低电流 (<1pA)、电荷和高电阻，超越了传统数字万用表的功能。	电位测量，绝缘材料的电阻系数，传感器，pH 测量，离子选择电极
6485, 6487	皮安表 (电流测量)	为精确测量小电流优化的电流表。通常用于高电阻测量中。高电阻系数，泄漏电流，传感器	
6220, 6221	电流源 (恒电流)	为被测器件输出指定电流，并应用该电流要求的任何电压而设计的仪器。	电阻系数 (使用电压表)，电沉积，传感器，霍尔效应
2182A	纳伏表	为提供纳伏灵敏度优化的电压表。从低源电阻中测量接近理论极限值的电压。	电阻系数 (使用电流源)，超低电压输出特点，传感器，霍尔效应
DMM7510, 2000, 2750, 2010	数字万用表	多功能测量仪器：DC 和 AC 电压和电流，电阻，温度	电阻系数，传感器，腐蚀

使用 Model 2450-EC 或 2460-EC 电化学实验室系统执行循环伏安测量

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编: 201206
电话: (86 21) 5031 2000
传真: (86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编: 100088
电话: (86 10) 5795 0700
传真: (86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市徐汇区宜山路900号
科技大楼C座7楼
邮编: 200233
电话: (86 21) 3397 0800
传真: (86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市福田区南园路68号
上步大厦21层G/H/I/J室
邮编: 518031
电话: (86 755) 8246 0909
传真: (86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编: 610063
电话: (86 28) 6530 4900
传真: (86 28) 8527 0053

泰克西安办事处
西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层C座
邮编: 710065
电话: (86 29) 8723 1794
传真: (86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编: 430074
电话: (86 27) 8781 2760

泰克香港办事处
香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话: (852) 2585 6688
传真: (852) 2598 6260

如需进一步信息。泰克维护着完善的、且不断扩大的资料库, 其中包括各种应用指南、技术简介和其它资源, 帮助工程师开发尖端技术。详情请访问: cn.tek.com 和平共处 www.keithley.com。



© 2015 年泰克公司版权所有, 侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更, 恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

11/15 KI

KIC-60158-0

KEITHLEY
A Tektronix Company