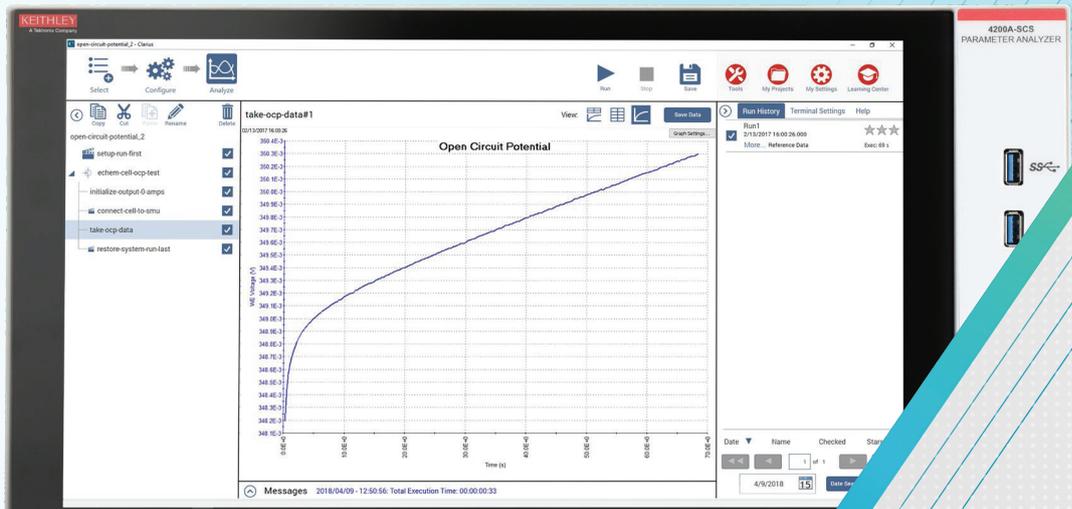


Keithley 电化学测试方法与 应用仪器

应用指南



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix[®]

Keithley 是先进电子测试仪器的全球领导者，拥有 60 多年的测量专业知识。我们的客户是广大研究和工业应用领域的科学家和工程师，这些领域中包括了许多电化学测试。Keithley 的产品可以准确地进行电流和电压的测量。Keithley 测试设备支持的电化学历学测试包括电池和储能、腐蚀科学、电化学沉积、有机电子学、光电化学、材料研究、传感器以及半导体材料和器件。表 1 列出了一些采用 Keithley 产品的测试方法和应用。

表 1 - 电化学测试方法及应用

方法和测量能力	应用
循环伏安法	电化学传感器
线性扫描伏安法	沉积，电镀
开路电压	pH 值测量
电位测量	太阳能电池
电阻率	Ion 电极选择
电压电流方波测量	电池充放电
脉冲伏安法	半导体器件表征
电容 - 电压	电化学腐蚀
输出或加载电流电压	腐蚀科学
测试直流电压电流	纳米器件特性

循环伏安法

循环伏安法 (简称 CV) 是一种电位扫描法，是最常用的电化学测量技术，通常使用 3 电极的蓄电池。图 1 展示了一个典型的电化学测量电路，它由蓄电池、可调电压源 (V_S)、电流表 (A_M) 和电压表 (V_M) 组成。蓄电池的三个电极分别是工作电极 (WE)、参比电极 (RE) 和对电极 (CE)。用于电位扫描的电压源 (V_S) 在 WE 和 CE 之间施加。用电压表测量 RE 和 WE 之间的电位 (E)，并调整总电压 (V_S) 以保持 WE 相对于 RE 的所需电位。用电流表 (A_M) 测量流入或流出 WE 的所得电流 (i)。

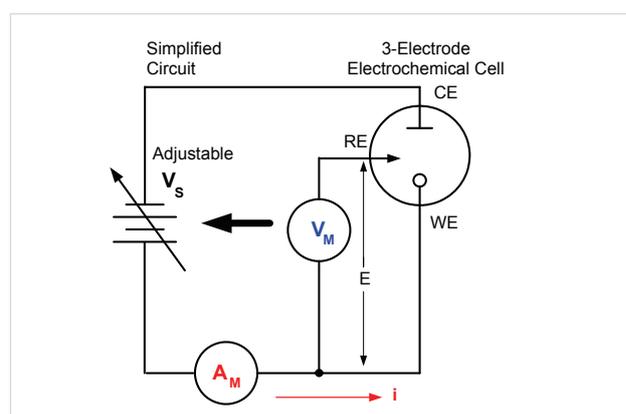


图 1 - 循环伏安法测试的简化电路

Keithley SMU 源表可以输出电压和测量电流，这使得它们非常适合循环伏安法应用。图 2 说明了仪器的四个端子如何连接到 3 电极电化学电池。

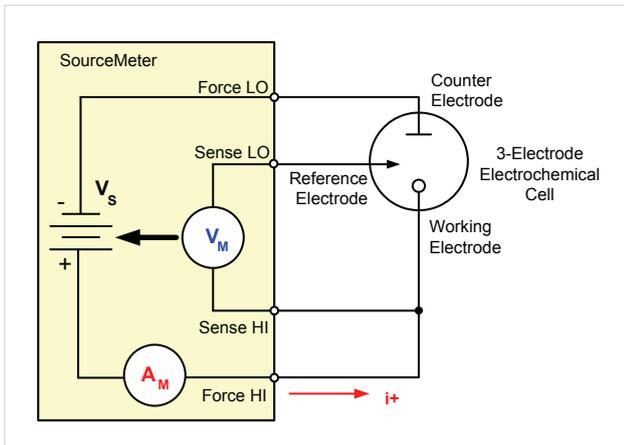


图 2 - 源表连接蓄电池进行循环伏安法测试

当编程控制 SMU 在源电压使用感测 (4 线) 配置时, 内部传感提供电压测试的反馈值并与编程设置的电压大小进行比较。SMU 调整电压源, 直到反馈电压等于编程电压。遥感补偿了测试引线和分析物电路中的压降, 确保将设置电压加载到工作电极上。

2450-EC, 2460-EC 和 2461-EC 电化学源表具有内置显示屏, 可以使用其循环伏安法测试脚本自动绘制伏安图。图 3 显示了该仪器生成的伏安图形。2450、2460 和 2461 仪器包括一个测试脚本, 可以在没有计算机的情况下执行循环伏安法。

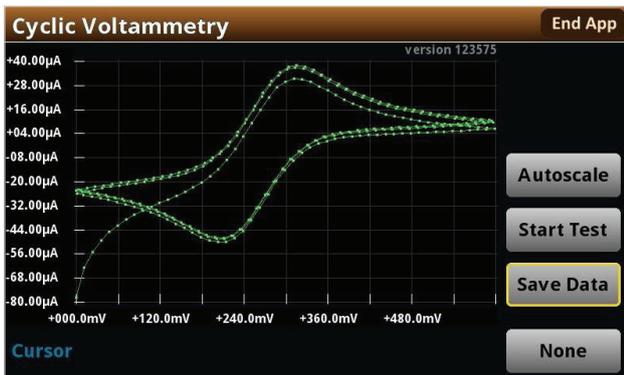


图 3 - 在 2450 上生成的伏安图形

2450-EC, 2460-EC 和 2461-EC 电化学实验室系统中还包含其他电化学测试脚本: 开路电压, 加载电压脉冲或方波与电流测量, 电流脉冲或方波与电压测量, 电流随时间变化和电压随时间变化。这些设备还包括一个带鳄鱼夹的测试电缆, 使用户能够轻松连接仪器和被测物。

开路电压

电化学电池的开路电位 (OCP) 是在参考电极和工作电极之间进行的电压测量。测量开路电位需要一个高阻抗的电压表来测量没有电流或电压施加到电池上的电压。由于其高输入阻抗, SourceMeter SMU 仪器在配置为 4 线制配置时非常适合 OCP 测量, 如图 4 所示。在此设置中, 该仪器配置为测量电压和源 0A。如果在进行循环伏安法之前测量 OCP, 则不需要在测量之间手动重新排列任何测试引线, 因为仪器可以在内部自动改变功能。2450-EC, 2460-EC 和 2461-EC 带有执行开路电位测量的测试脚本。

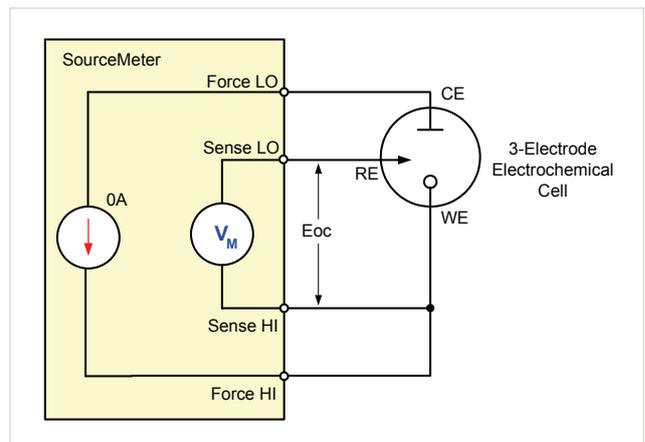


图 4 - 使用电化学系统测量蓄电池的开路电压

电阻率

电阻率是材料的一种基本特性，它量化了材料与电流的对抗。确定材料电阻率的最佳技术取决于所涉及材料的类型、电阻的大小和样品的几何形状。

导体 / 半导体 — 加电流测电压

导体或半导体的电阻率通常是 4 线配置，输入电流和测量样品的电压来确定的。4 线配置最大限度地减少引线 and 接触电阻，以减少它们对测量精度的影响。在这种配置中 (图 5)，两根引线用于产生电流，另一组引线用于测量导电样品上的压降。样品上的压降会非常小，因此使用 Keithley 2182A 纳伏表进行测量。

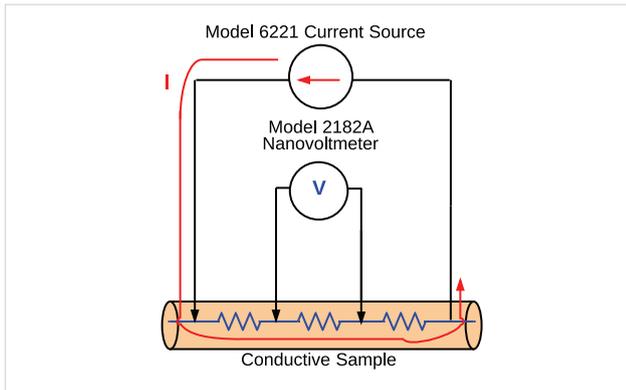


图 5 - 使用电流源和纳伏表测量导电样品

绝缘体 — 加电压测电流

绝缘体的电阻率通常是通过对未知电阻施加电压并测量产生的泄漏电流来测量的。这是一个双端测试。体电阻率是直接测量通过材料的泄漏电流。表面电阻率被定义为绝缘体表面的电阻。图 6 显示了体积电阻率和表面电阻率的电路图。

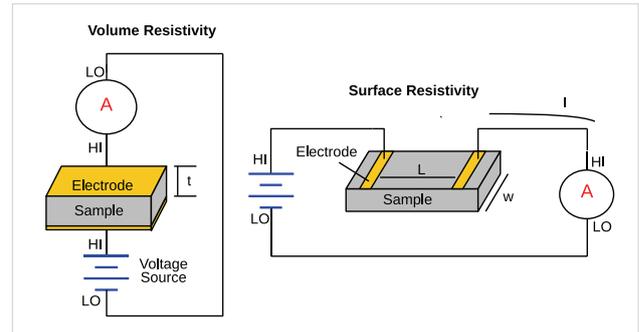


图 6 - 体电阻率和表面电阻率测量图

这些高电阻测量需要一种可以测量到非常低电流并且可以施加电压的仪器。6517B 和 6487 都能够测量高阻材料的电阻率。这些仪器可以测量低至数十或数百 fA 的电流，并具备内置电压源。需要注意的是在测量非常高的电阻时，必须正确屏蔽设备和测试电缆，以避免静电干扰的影响。

电压测定

电压 / 电位测定是测量两个电极之间的电位，通常是工作电极和参比电极。电位差是用高阻抗电压表或静电计测量的，因此任何电流都可以忽略不计 ($i=0$)。电位测定法用于诸如使用离子选择电极进行的 pH 测量和电压测量等应用。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，例如 6517B 或 6514 静电计 (图 7)。

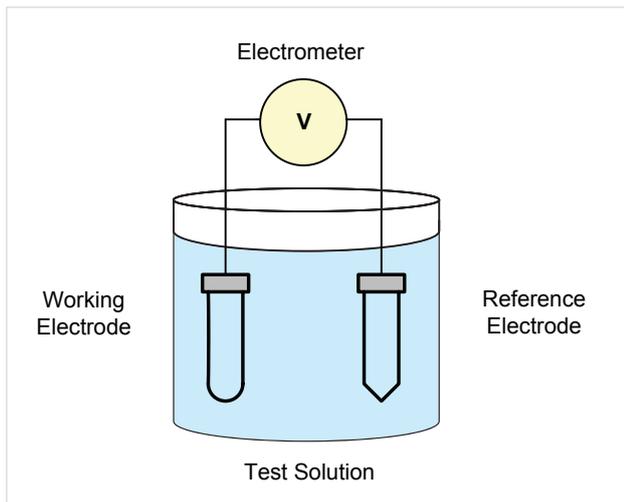


图 7 - 静电计测量两个电极之间的电位差。

电化学传感器

电化学传感器用于不同行业的许多应用，包括环境和气体监测，医疗应用，如测定葡萄糖浓度，以及汽车和农业行业。电化学传感器有各种不同的设计；它们可能有两个或三个电极，可以是电位计、安培计或伏安计。有些传感器是基于有机电子器件或纳米结构的。

选择最优的测试设备对于电化学传感器的研发至关重要。例如，测量电位传感器的输出可能需要非常高阻抗的电压表，例如具有高输入阻抗 ($>10^{14}$ 欧姆) 的 Keithley 静电计。测试安培式气体传感器可能需要使用非常灵敏的安培计，如皮安计、静电计或源表。

图 8 显示了一个简单的安培气体传感器。当气体与工作电极 (WE) 接触时，根据传感器的不同，会发生氧化或还原的化学反应。在安培传感器中，电流在对电极 (CE) 和工作电极 (WE) 之间流动。电流输出与气体浓度有关，由灵敏的安培计测量。如有必要，可在传感器上加第三个电极，即参比电极，施加电势。

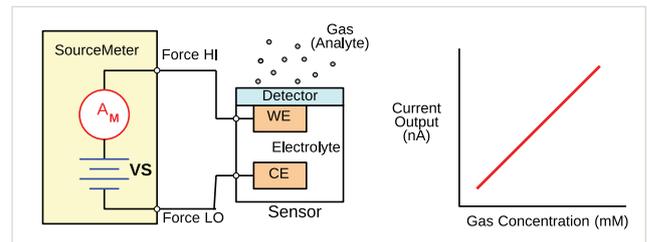


图 8 - SourceMeter SMU 仪器测量 2 电极安培气体传感器的电流输出。

太阳能电池

为了满足人们对清洁能源日益增长的需求，光伏研究人员正在努力提高电池效率，降低成本。新兴技术包括染料敏化 / 燃料感光、仿生、钙钛矿，甚至 3D 太阳能电池。太阳能电池的电学表征对于确定如何使电池，在尽可能小的损耗下尽可能提高效率至关重要。

通常在太阳能电池上进行的一些电学测试包括测量电流和电容作为施加直流电压的函数。电容测量是作为频率或交流电压的函数进行的。有些测试需要脉冲电流 - 电压测量。这些测量通常在不同的光强和温度下进行。从这些测量中可以提取出重要的器件参数，包括输出电流、转换效率、最大功率输出、掺杂密度、电阻率等。图 9 显示了从太阳能电池上典型的正向偏置 I-V 曲线中可以提取的几个参数，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})。

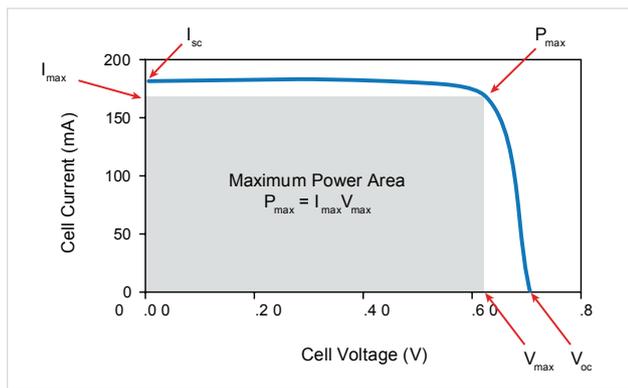


图 9 - 光伏电池典型的正向偏置 I-V 曲线。

像 4200A-SCS 参数分析仪这样的仪器可以在进行这些关键的电气测量时简化测试和分析。4200A-SCS 是一个集成系统，包括用于进行直流和超快速 I-V 和 C-V 测量的仪器，以及控制软件，图形和数学分析能力。4200A-SCS 可以进行广泛的太阳能电池测量，包括直流和脉冲电流电压、电容电压、电容频率、驱动级电容分析 (DLCP) 和四探针电阻率。

图 10 显示了 4200-SMU 连接太阳能电池进行 I-V 测量。四线制连接消除了测量电路的引线电阻。一旦电池连接到输出端子，4200A-SCS 的软件可以轻松设置电压扫描，自动生成 I-V 曲线，如图 11 所示光伏电池的正向偏置 I-V 曲线。

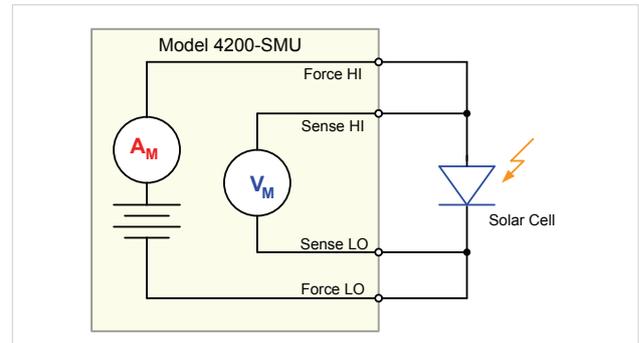


图 10 - 4200-SMU 与光伏电池连接示意图



图 11 - 4200A-SCS 参数分析仪测量的太阳能电池正偏 I-V 特性

可充电电池充电 / 放电

Keithley 源表可以简化电池测试，因为它们能够同时加载和测量电流电压。源表可以灵活的设置输出源和吸收电流，以及测量相应的电压和电流，使其成为电池充放电循环测试的完美解决方案。

对于此测试，源表通过 4 线连接连接到电池 (图 12)，以消除引线电阻的影响。

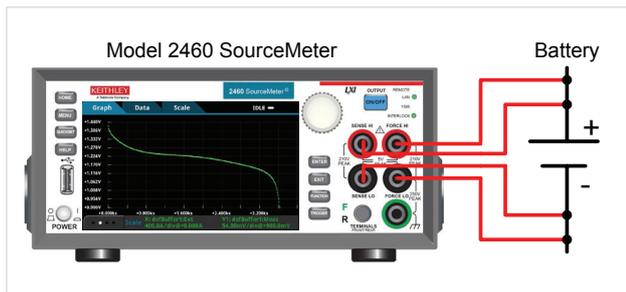


图 12 - 源表 2460 测试电池充放电连接图

对于充电和放电周期，该仪器配置为加载电压和测量电流。即使仪器配置为电压源，它也将在恒流模式下工作。图 13 显示了充电和放电循环的简化电路图。

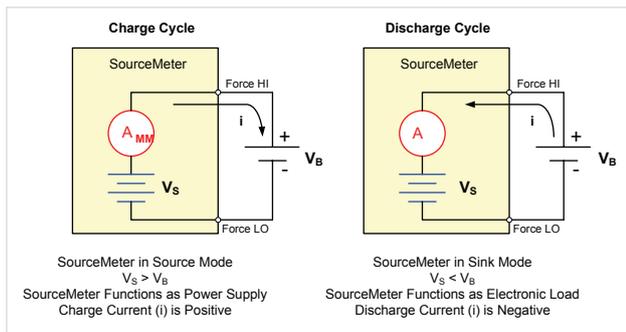


图 13 - 充放电电路图

电池通常是使用恒流充电，因此我们将源表配置为电压源设置为电池的额定电压，并将源限制设置为所需的充电电流。在测试开始时，电池电压小于仪器的电压输出设置。这个电压差驱动一个电流，该电流立即被限制在用户定义的电流限值内。当处于电流限制时，仪器作为恒流源工作，直到达到我们设定的电压水平。

当电池放电时，源表将作为接收器来使用，因为它是耗散功率而不是输入功率。仪器电压源设置为低于电池电压的电平，电流限制设置放电速率。当使能输出时，来自电池的电流流入仪器的 Hi 端子。因此，电流读数将为负。图 14 所示为测量 2500mAh 电池放电特性的结果。

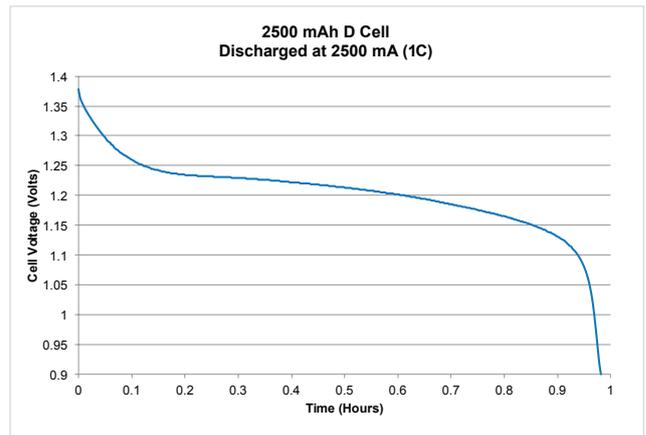


图 14 - 使用源表测试 2500mAh D 芯电池放电特性

电气器件特性

源表和 4200A-SCS 半导体参数分析仪是电气设备表征的理想选择，因为它们可以产生和测量电流和电压。4200A-SCS 除了包含多个 SMU 外，还可以包括电容电压单元 CVU 或脉冲测量单元 PMU。可以表征的组件可以包括碳纳米结构和器件、传感器、太阳能电池、有机半导体器件和其他结构。

特定应用所需的源表数量取决于设备上的终端数量和所需的测试应用。在图 15 所示的有机场效应管 (OFET) 示例中，需要两台 SMU 仪器来表征器件。在这种情况下，SMU1 连接到栅极终端，SMU2 连接到器件的漏极终端。OFET 的 Source 端接到 common。OFET 的传输特性是通过使用 SMU1 步进栅极电压和使用 SMU2 扫过漏极电压并测量漏极电流来确定的。

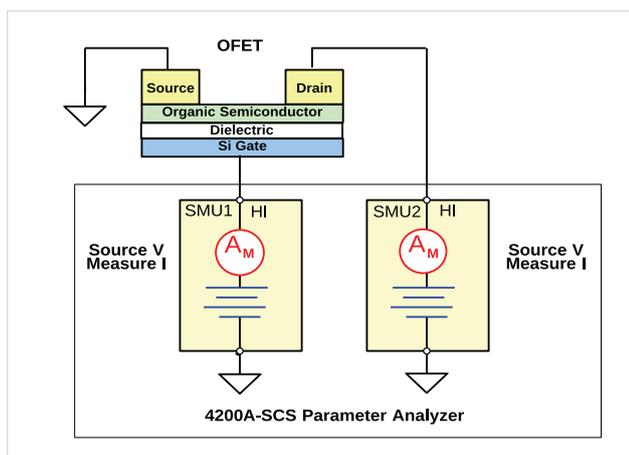


图 15 - 使用 4200A-SCS 表征 OFET I-V 特性

4200A-SCS 参数分析仪测量并绘制的 OFET 传输特性如图 16 所示。

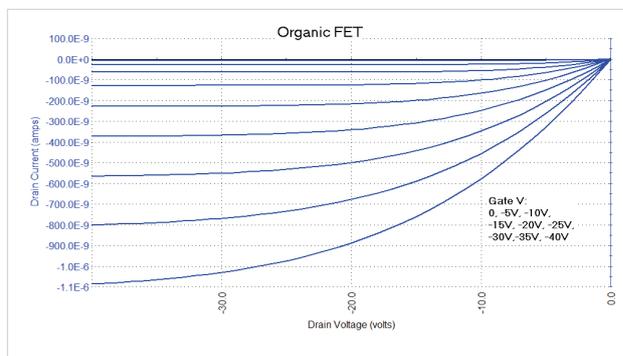


图 16 - 4200A-SCS 参数分析仪测量的 OFET 传输特性
注：OFET 由肯特州立大学提供

4200A-SCS 半导体参数分析仪为电气表征器件提供了许多优点。这种可配置的测试系统可以简化敏感的电气测量，因为它将多个仪器集成到一个系统中，包括交互式软件，图形和分析功能。

电镀 / 电沉积

电镀是将金属薄膜涂在导电表面上的过程。该工艺有许多应用，包括装饰涂层，防腐，甚至纳米线和纳米结构制造。传统上，该工艺涉及连接两个电极（阳极和阴极）之间的电流源。电流驱动金属离子从阳极流向阴极，如图 17 所示。在这个简单的例子中，6220 电流源使阳极的 Ag^+ 离子被吸引到阴极。

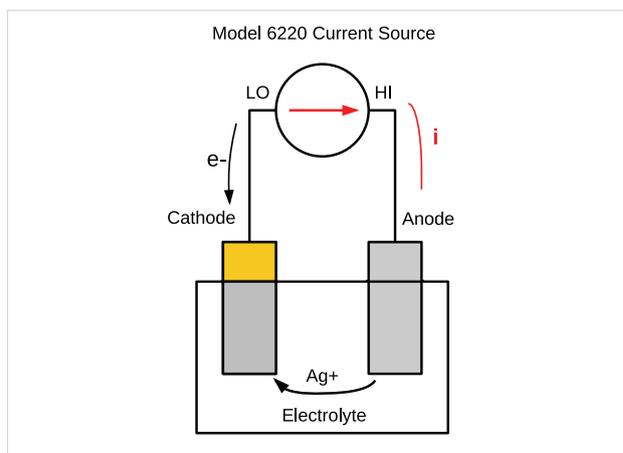


图 17 - 采用恒流源进行电镀的电路

电沉积可能需要使用恒定的直流电流或电压，或者可能需要脉冲或阶梯信号去控制沉积时间。除了提供电流或电压外，特定应用可能还需要监测电流或电压。2400 系列或 2600B 系列源表可以自动控制源的参数，以及监控电路中产生的电流或电压。四线制控制从仪器到电极的两端可以用来消除引线电阻的影响。

小结

Keithley 生产适用于各种电化学应用的灵敏设备，包括 I-V 特性测试，低电阻率和高电阻率测量，电池测试，电位测定法，电沉积，电气器件特性以及其他涉及加载和测量电流和电压以及高精度测量电容的测试。Keithley 仪器可以通过远程控制实现自动化测试，多台同步和定时控制。

Keithley 产品对电化学测试方法和应用

型号	测试仪器	描述	测试方法 / 应用程序
2450-EC, 2460-EC, 2461-EC	电化学测试仪器	使用内置脚本测试电化学	循环伏安法，开路电压、加载电压脉冲或方波测试电流，加载电流脉冲或方波测试电压， di/dt ， dv/dt ；其他非 EC 测试项：器件表征，电位计，传感器，电沉积，光伏电池，腐蚀，电阻率等等
2400 系列，2600B 系列	源表	源表是加载测量电压电流，获取相关测试结果：功率、电阻、电压、电流，具备高速和精度	开路电压，电池充放电，器件表征，电位计，传感器，电沉积，光伏电池，腐蚀，电阻率等等
4200A-SCS	半导体参数测试仪	模块化，集成了多台仪器的功能，可以进行材料和器件的电气特性。使用软件可以直观的进行参数提取，测试配置和分析。测试模块包括大功率直流模块，超高速脉冲发生器和电容阻抗测试。	半导体器件表征，碳基器件表征，漏电流，传感器，光伏电池，纳米材料，电阻率，电业测定
6517B, 6514	静电计	多功能测试仪器，可以测量高阻电压，低电流 (<1pA)，电荷和高阻，特性指标远远优于多用表。	电压测试，绝缘电阻 / 电阻率测试，漏电流测试，电荷测试，
6485, 6587	皮安表	为了更精确的测试小电流的仪表，常用于高阻测试	高阻测试，漏电流测试，传感器
6220, 6221	电流源	旨在为被测器件提供指定的电流，在确保输出功率的情况下，不限制电压	电阻 / 电阻率 (配合电压表)，电沉积，传感器，霍尔效应
2182A	纳伏表	测试到 nV 级的电压表，用于低电源电阻的测量	电阻 / 电阻率 (配合电流源)，极低电压输出特性测试，传感器，霍尔效应
DMM6500, DAQ6510, DMM7510, 2000, 2750, 2010, 3706A	多用表	多用表：直流 / 交流电压、直流 / 交流电流、电阻、温度等	电阻，传感器，腐蚀



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

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

北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
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) 8620 3028
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L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8836 0984
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718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) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

KEITHLEY

A Tektronix Company

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

© 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。

042518.SBG 1KC-60158-1

