



利用 4200A-SCS 参数分析仪研究 光伏材料和太阳能电池的电学特性

I-V, C-V, C-f, DLCP, 脉冲 I-V, 电阻率和霍尔电压测量

应用指南



概述

随着清洁能源的需求不断增加，而太阳作为能源的巨大潜力尚未被全面开发，这使得太阳能转换技术越发重要。因此，对太阳能电池（可以将阳光直接转化为电能）的需求也越来越大。太阳能 / 光伏 (PV) 电池是由半导体材料组成的，它从阳光中吸收光子，然后释放电子，当电池连接到负载时，就会产生电流。各种测量方法被用来表征太阳能电池的性能，包括它的输出和效率。这种电特性表征是作为光伏电池和材料研发的一部分，同样也会在制造过程中进行。

在太阳能电池上进行的电气测试通常包括施加的直流电压测量电流和电容，获取相关函数；施加交流电压测试，获取频率与电容的函数。有些试验需要进行脉冲测量。这些测量通常在不同的光强和不同的温度条件下进行。从直流 / 脉冲 I-V 和 C-V 测量中可以提取出多种重要的器件参数，包括输出电流、转换效率、最大功率输出、掺杂密度、电阻率等。电学表征非常重要的是对于确定如何使电池在损耗最小的情况下达到尽可能高的效率。

4200A-SCS 参数分析仪等仪器在进行这些关键的电气测量时可以简化测试和分析。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、图形绘制和数学分析能力。4200A-SCS 非常适合进行各种测量，包括直流和脉冲电流电压 (I-V)、电容电压 (C-V)、电容频率 (C-f)、驱动级电容分析 (DLCP)、四探头电阻率 (ρ, σ) 和霍尔电压 (V_H) 测量。本应用说明描述了如何使用 4200A-SCS 对光伏电池进行这些电测量。

使用 4200A-SCS 进行电气测量

为了简化光伏材料和电池的测试，4200A-SCS 配有对应的测试和一个可以轻松地进行多项常用相关测量的项目。这些测试包括 I-V、电容和电阻率测量，还包括提取最大功率、短路电流、缺陷密度等公共参数的公式。*SolarCell* 项目（图 1）包含在所有 4200A-SCS 系统中，如果要使用光伏电池过滤器，可以在项目库中找到。这个项目中的大部分测试项也可以在 Test Library 中找到。

表 1. 太阳能电池的测试项目

Measurement	Name	Description
DC I-V	fwd-ivsweep	Performs I-V sweep and calculates I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , I_{max} , V_{max} , FF
	rev-ivsweep	Performs reversed bias I-V sweep
Capacitance	solarcell-cvssweep	Generates C-V sweep
	solarcell-c-2vsv	Generates C-V sweep and calculates $1/C^2$
	cfsweep	Sweeps the frequency and measures capacitance
	dlcp	Measures capacitance as AC voltage is swept. DC voltage is applied so as to keep the total applied voltage constant. The defect density is calculated.
Pulse-IV	solarcell-pulse-iv-sweep	Performs pulse I-V sweep using one channel of PMU
4-Probe Resistivity	hir	Uses 3 or 4 SMUs to source current and measure voltage difference for high resistance semiconductor materials. Calculates sheet resistivity.
	lor	Uses 1 or 2 SMUs to source current and measure voltage using remote sense. Calculates sheet resistivity. Uses current reversal method to compensate for thermoelectric voltage offsets.
vdp Resistivity	i1-v23	First of 4 tests that are used to measure the van der Pauw resistivity. This test sources current between terminals 1 and 4 and measures the voltage difference between terminals 2 and 3.
	i2-v34	Sources current between terminals 2 and 1 and measures the voltage difference between terminals 3 and 4.
	i3-v41	Sources current between terminals 3 and 2 and measures the voltage difference between terminals 4 and 1.
	i4-v12	Sources current between terminals 4 and 1 and measures the voltage difference between terminals 1 and 2.

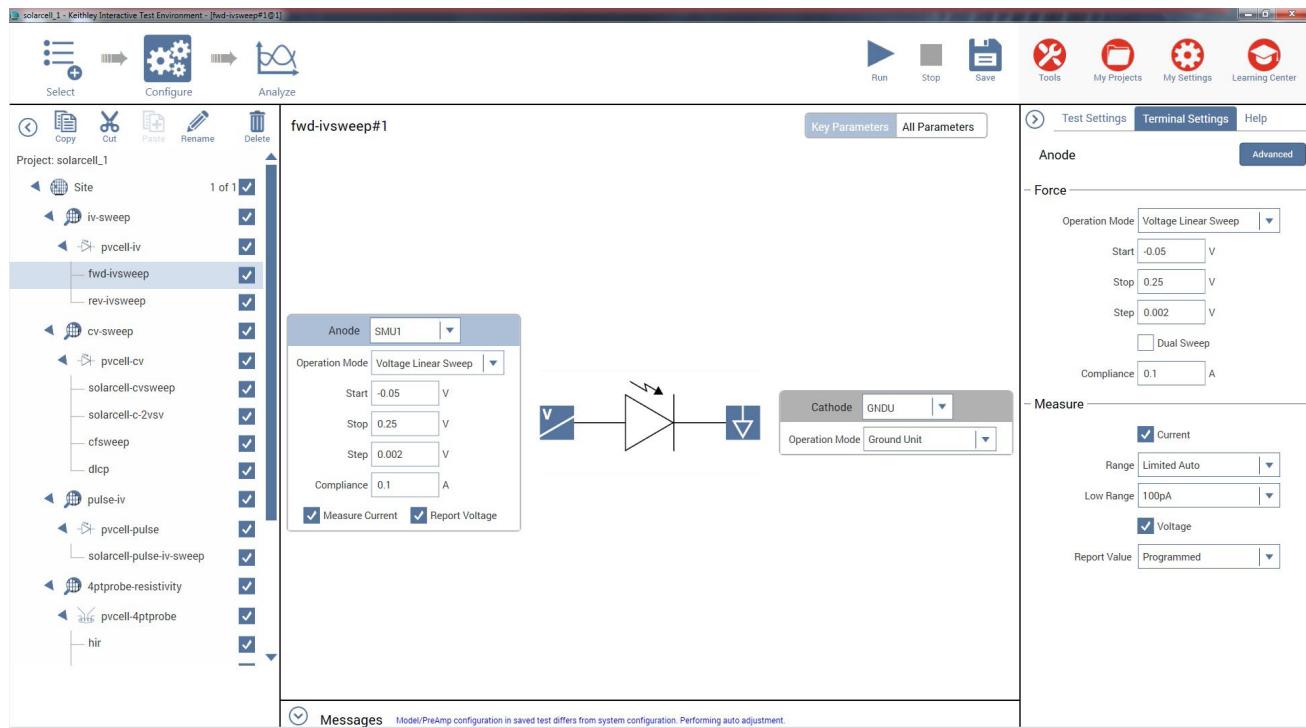


图 1. 4200A-SCS 太阳能电池项 - Solar Cell

直流电流 / 电压 (I-V) 测量

如上所述，许多太阳能电池参数可以从电池的电流 - 电压 (I-V) 测量中推导出来。这些 I-V 特性可以使用 4200A-SCS 的源测量单元 (SMU) 进行测量，该单元可以作为源和测量电流和电压。由于这些 SMU 具有四象限工作能力，因此它们可以将电池电流作为施加电压的函数来吸收。4200A-SCS 提供四种 SMU：输出 / 灌入最大为 100mA 电流的 4200-SMU 或 4201-SMU，输出 / 灌入最大为 1A 电流的 4210-SMU 或 4211-SMU。如果电池的输出电流超过这些电流水平，可能需要通过减少电池本身的面积来减小电流。然而，如果这是不可行的，吉时利的 SourceMeter® 仪器能够提供更高的电流输出 / 灌入，提供可能的替代解决方案。

从 I-V 测量得到的参数

太阳能电池可以用图 2 所示的等效电路模型来表示，该模型由光感应电流源 (I_L)、产生饱和电流 [$I_S(e^{qV/kT}-1)$] 的二极管、串联电阻 (r_s) 和分流电阻 (r_{sh}) 组成。串联电阻是由于金属触点的电阻、电池前表面的欧姆损耗、杂质浓度和结深。串联电阻是一个重要的参数，因为它既降低了电池的短路电流，也降低了电池的最大输出功率。理想情况下，串联电阻应该是 0Ω ($r_s = 0$)。分流电阻代表由于电池边缘的表面漏流或晶体缺陷造成的损耗。理想情况下，分流电阻应该是无限的 ($r_{sh} = \infty$)。

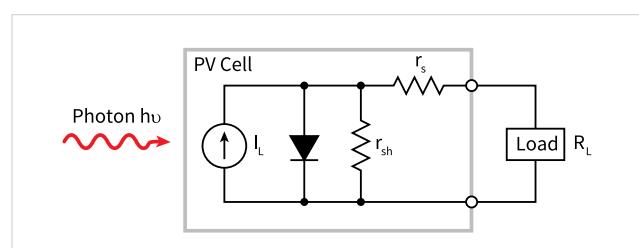


图 2. 光伏电池的理想等效电路

如果将负载电阻 (R_L) 连接到接收光照的太阳能电池上，
当

I_S = 二极管饱和电流

I_L = 光产生电流

则总电流为：

$$I = I_S(e^{qV/kT} - 1) - I_L$$

用于表征太阳能电池效率的参数，包括最大功率点 (P_{max})、能量转换效率 (η) 和填充因子 (FF)。如图 3 所示，显示了太阳能电池在光照下的典型正向偏置 I-V 曲线。最大功率点 (P_{max}) 是电池最大电流 (I_{max}) 和电压 (V_{max}) 的乘积，其中电池的输出功率最大。这个点位于曲线的“拐点”处。

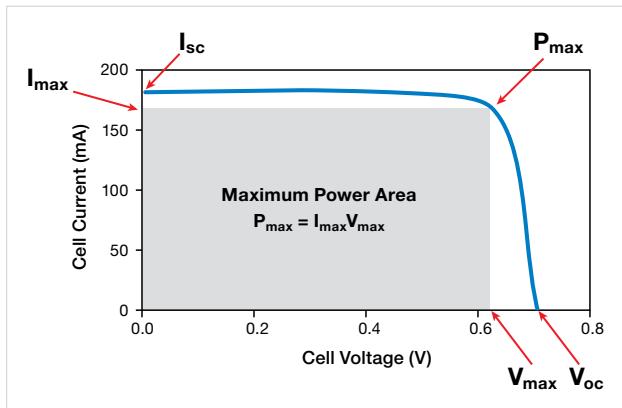


图 3. 太阳能电池典型的正偏 I-V 特性

填充因子 (FF) 是衡量实际太阳能电池的 I-V 特性与理想电池的差异程度的一个参数。填充因子定义为：

I_{max} = 最大输出功率时电流 (A)

V_{max} = 最大输出功率时电压 (V)

I_{sc} = 短路电流 (A)

V_{oc} = 开路电压 (V)

$$FF = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}}$$

按照定义，填充因子是最大功率 ($P_{max} = I_{max}V_{max}$) 与短路电流 (I_{sc}) 和开路电压 (V_{oc}) 的乘积之比。理想的太阳能电池的填充因子等于 1，但来自串联和分流电阻的损失会降低效率。

另一个重要的参数是转换效率 (η)，它被定义为最大输出功率与输入到电池的功率之比：

P_{max} = 最大输出功率 (W)

P_{in} = 输入到电池的功率定义为入射到电池表面的总辐射能 (W)

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

连接到太阳能电池进行 I-V 测量

图 4 展示了连接到 4200A-SCS 进行 I-V 测量的太阳能电池。太阳能电池的一侧连接 SMU1 的 Force 和 Sense 端子；另一端连接到 SMU2 或 GNDU (ground unit) 的 Force 和 Sense 端子，如图所示。

图 4. 4200A-SCS 连接到太阳能电池进行 I-V 测量

使用四线连接消除了引线电阻，否则会影响量的准确性。使用四线制测试，使用一对测试引线（在 Force HI 和 Force LO 之间）在太阳能电池上提供电压，并且通过第二组引线（在 Sense HI 和 Sense LO 之间）测量电池上的压降。Sense 端的引线确保整个电池的电压是程序设置的输出值，并补偿引线电阻。

4 | www.tek.com.cn

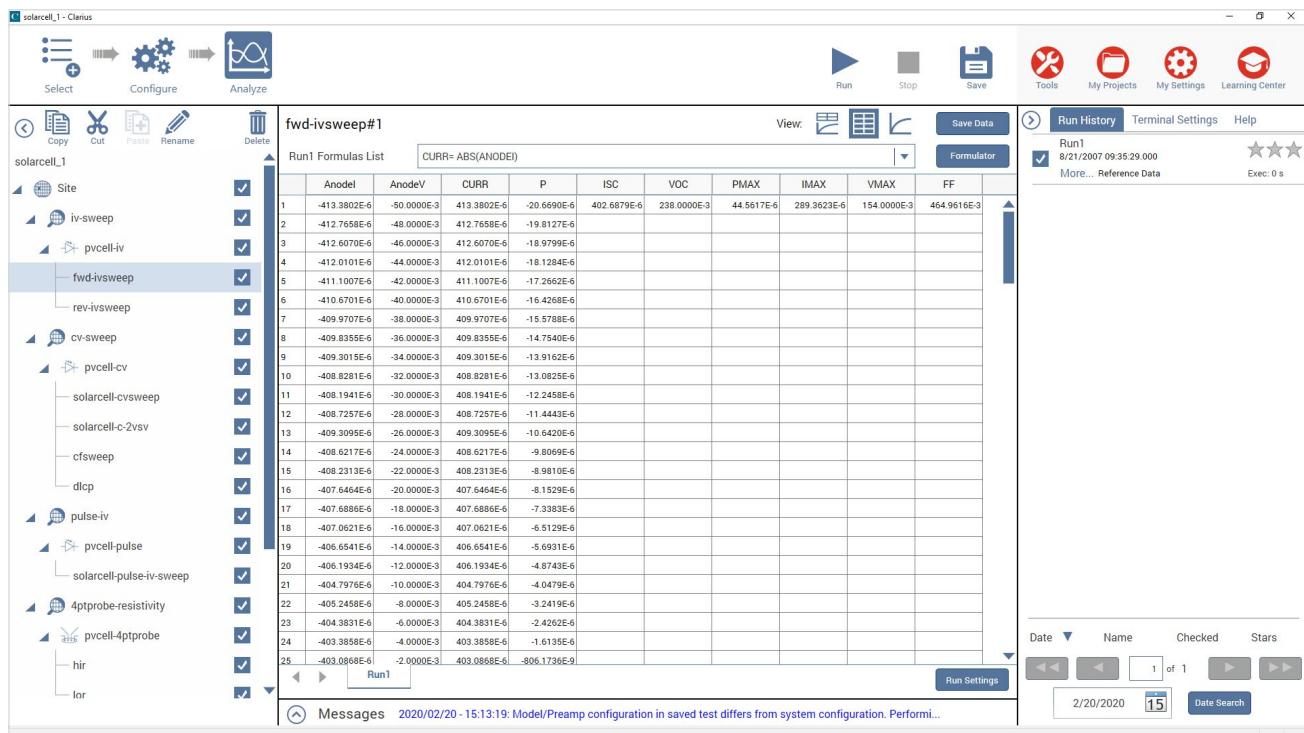


图 5. 在分析窗口的工作列表中显示计算参数的结果

正向偏置 I-V 测量

太阳能电池的正向偏置 I-V 测量是在受控光照下进行的。SMU 被设置为输出电压扫描并测量产生的电流。这种正向偏置扫描可以使用 Solar Cell Forward I-V Sweep 或 “fwd-ivsweep” 测试来执行，该测试允许将扫描电压调整到所需值。如前面图 3 所示，电压源从 $V_1 = 0$ 扫到 $V_2 = V_{OC}$ 。当电压源为 0 ($V_1 = 0$) 时，电流等于源 - 电路电流 ($I_1 = I_{SC}$)。当电压源为开路 ($V_2 = V_{OC}$) 时，电流等于零 ($I_2 = 0$)。使用 4200A-SCS 内置的数学分析工具公式器可以很容易地从扫描数据中推导出参数 V_{OC} 和 I_{SC} 。为了方便起见，Solar Cell Forward I-V Sweep 测试已经计算出了常用的派生参数，因此每次执行测试时，这些值都会自动出现在 Analyze 窗口的工作表中。图 5 显示了表格导出的参数。这些参数包括短路电流 (I_{SC})，开路电压 (V_{OC})，最

大功率点 (P_{max})，最大电池电流 (I_{max})，最大电池电压 (V_{max})，以及填充因子 (FF)。

用户可以根据需要确定所需的参数，轻松添加其他公式。

如果用户知道电池的输入功率，也可以使用公式器输入公式计算出转换效率 (η)。电流密度 (J) 也可以通过使用公式器并输入电池的面积来推导。

图 6 显示了 4200A-SCS 使用 “fwd-ivsweep” 测试生成的照明硅 PV 电池的实际 I - V 扫描。由于系统的 SMU 可以吸收电流，因此曲线通过第四象限并允许从设备 (I , V) 中提取功率。如果输出电流作为施加电压的函数跨越几十个数量级，则可能需要生成 I 与 V 的半对数图。该图支持以线性或对数尺度图形显示数据之间的轻松过渡。

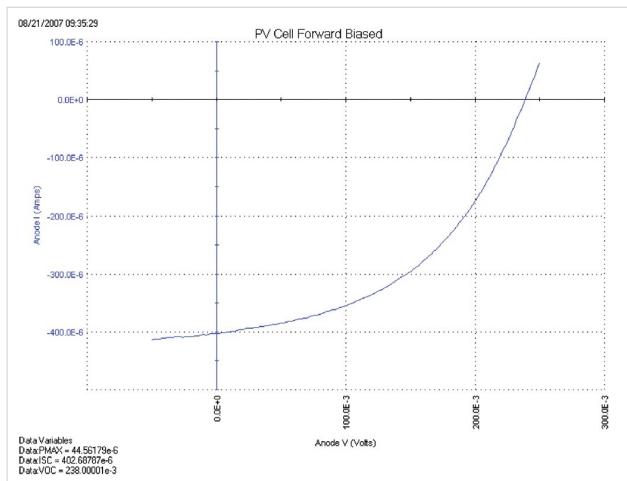


图 6. 4200-SMU 生成的硅太阳能电池的 I-V 扫描图

如果需要，图形设置功能可以很容易地创建横坐标为电压轴的倒置图形。只需进入图形设置选项卡，选择轴属性，选择 Y1 轴的选项卡，点击反转复选框即可。倒置的图形就会出现，如图 7 所示。

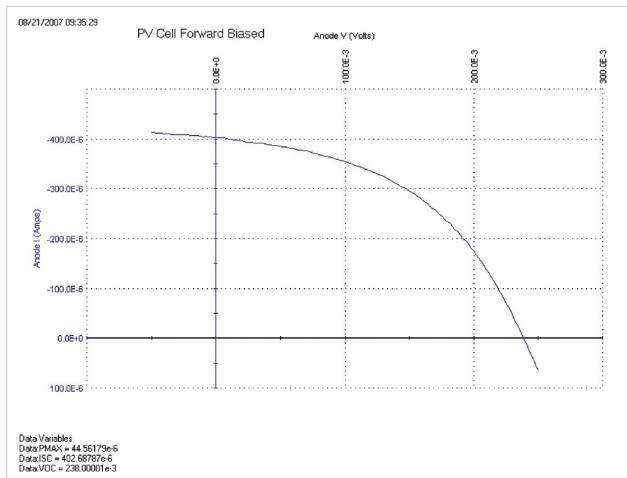


图 7. 关于电压的正向偏置 I-V 倒置曲线

串联电阻 (r_s) 可以从两个或更多光强下的正向 I - V 扫描中确定。首先，制作两种不同光照强度下的 I-V 曲线 (强度的大小并不重要)。根据正向特性当曲线变为线性的时对应的点进行连接，测量这条曲线的斜率。这个斜率的倒数就是串联电阻：

$$r_s = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

通过使用额外的光照，这种技术可以扩展到位于曲线拐点附近的多个点。如图 8 所示，生成一条斜线，可以根据斜率计算出串联电阻。

当 SMU 被视为电流表时，一个重要特征是它们的电压负荷非常低。电压负荷是测量过程中通过电流表的电压降。大多数传统的数字万用表 (DMMs) 在满量程时的电压负荷至少为 200mV。考虑到在太阳能电池测试中可能只有 mV 电压输出到样品，这可能会造成很大的误差。4200A-SCS 的 SMU 在测量电路中不会产生超过几百 uV 的电压负荷或压降。

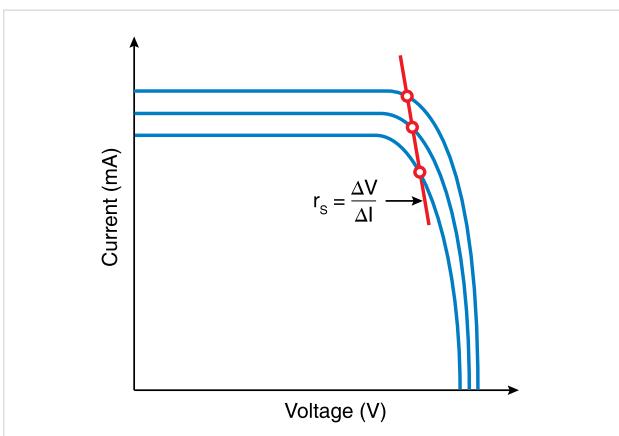


图 8. 斜率法用于计算串联电阻

反向偏置 I-V 测量

从反向偏置 I-V 数据中可以推导出漏电流和分流电阻 (r_{sh})。通常情况下，测试是在暗室中进行的。电压从 0V 到器件开始被击穿的电平。测量对应电流并绘制出电压的函数曲线。根据电池的大小，漏电流可以小到 pA。SMU 有一个前置放大器选项，允许在 pA 以下进行精确测量。在进行非常敏感的低电流测量 (nA 或更小) 时，使用低噪声电缆，并将设备放置在屏蔽盒中以屏蔽静电。该屏蔽连接到 4200A-SCS 的 Force LO 端子。Force LO 端子连接可以从三轴的外层进行接插、接地单元 (GNDU) 上的黑色接线柱、或 GNDU 上的 Force LO 三轴连接器。

确定太阳能电池并联电阻的一种方法是获取反向偏置 I-V 曲线的斜率，如图 9 所示。从这条曲线的线性区域，可以计算出分流电阻为：

$$r_{sh} = \frac{\Delta V_{Reverse\ Bias}}{\Delta I_{Reverse\ Bias}}$$

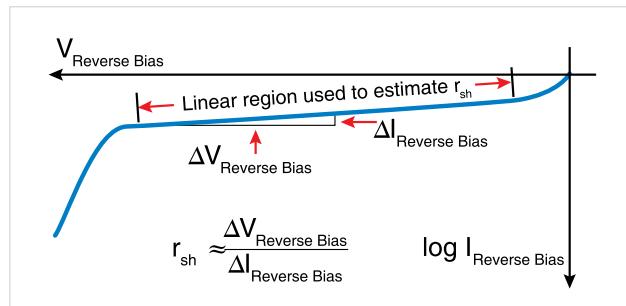


图 9. 太阳能电池典型的反向偏置特性

图 10 显示了使用 *Solar Cell Reverse I-V Sweep* 或 “rev-ivsweep” 测试生成的反向偏置太阳能电池的实际曲线。在这幅半对数图形中，显示为电流的绝对值与反向偏置电压的函数。

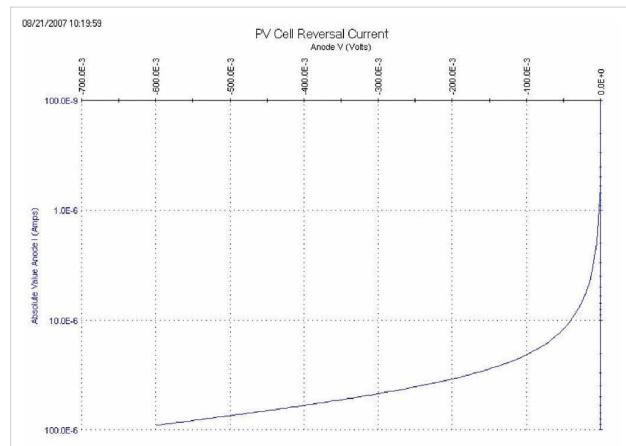


图 10. 用 SMU 测量硅太阳能电池的反向偏置 I-V

电容的测量

C-V 测量在推导太阳能装置的特定参数时是非常有用的。根据太阳能电池的类型，电容 - 电压 (C-V) 测量可用于推导掺杂浓度和结的内置电压等参数。电容 - 频率 (C-f) 扫描可用于提供耗尽区是否存在陷阱（空穴 / 阴极电容）。4200A-SCS 的可选 4210-CVU 或 4215-CVU 作为电容计，测量电容的相关函数：施加的直流电压 (C-V)，频率 (C-f)，时间 (C-t)，或施加 AC 电压。CVU 还可以测量电导和阻抗。

为了进行电容测量，如图 11 所示，将太阳能电池连接到 CVU 上。与使用 SMU 进行的 I-V 测量一样，电容测量也涉及四线连接以补偿引线电阻。HPOT/HCUR 端子连接到阳极，LPOT/LCUR 端子连接到阴极。将 CVU 的直流高压源端连接到阳极。

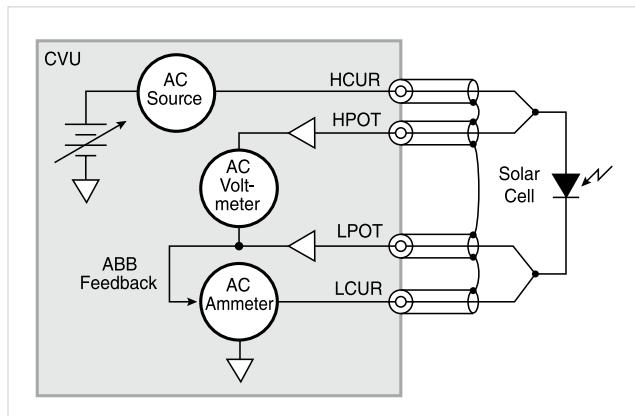


图 11. 将太阳能电池连接到 CVU 电容计

图 11 显示了来自电容计四个端子的四根同轴电缆的屏蔽连接。来自同轴电缆的屏蔽必须尽可能靠近太阳能电池连接在一起，以获得最高的精度，因为这减少了测量电路中电感的影响。这对于在更高的测试频率下进行电容测量尤其重要。

进行开路和短连接补偿将降低电缆电容对测量精度的影响。这个简单的程序在 4200A-SCS 参考手册中有所描述。

考虑到电池的电容与器件的面积直接相关，在可行的情况下，可能需要减小电池本身的面积，以避免电容可能过高而无法测量。此外，将 CVU 设置为在较低的测试频率和 / 或较低的 AC 驱动电压下测量电容，将允许测量较高的电容。

C-V 扫描

C-V 测量可以进行正向偏置或反向偏置。然而，当电池正偏时，所施加的直流电压必须受到限制；否则电导可能过高，电容计无法测量。最大直流电流不能大于 10mA；否则仪器的直流电压源将进入钳位状态，直流电压输出将达不到期望水平。

图 12 显示了 CVU 使用 Solar Cell C-Vsweep 或 “solarcell-cvsweep” 测试，生成的硅太阳能电池的 C-V 曲线。这个测试是在暗室中进行的，而电池是反向偏置的。

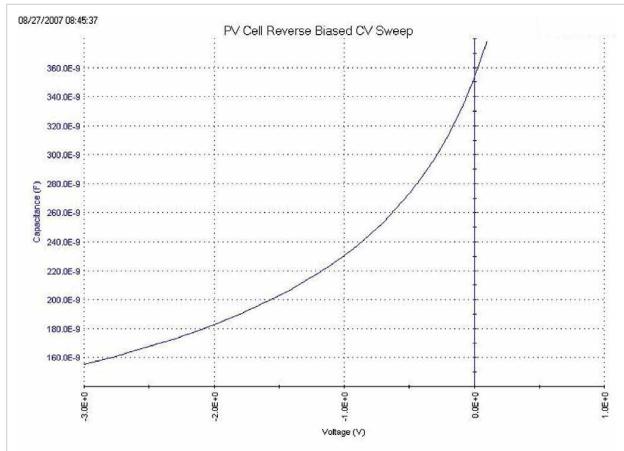


图 12. 硅太阳能电池的 C-V 扫描

与其绘制 dC/dV ，有时更希望将数据视为 $1/C^2$ vs. 电压，因为有些参数与 $1/C^2$ 数据相关。例如，可以从这

条曲线的斜率推导出掺杂密度 (N)，因为 N 与电容的关系为：

$$N(a) = \text{掺杂密度 } (1/\text{cm}^3)$$

$$q = \text{电子电荷 } (1.60219 \times 10^{-19} \text{ C})$$

$$E_s = \text{半导体介电常数 } (\text{硅为 } 1.034 \times 10^{12} \text{ F/cm})$$

$$A = \text{面积 } (\text{cm}^2)$$

$$C = \text{实测电容 } (\text{F})$$

$$V = \text{施加直流电压 } (\text{V})$$

$$N(a) = \frac{2}{qE_s A^2 [d(1/C^2)/dV]}$$

电池结的内置电压可以从 $1/C^2$ 曲线与水平轴的交点推导出来。这条曲线应该是近似直线的。使用 CVU 的 Solar Cell $1/C^2$ C-V sweep 或 “solarcell-c-2vsv” 测试生成的实际曲线如图 13 所示。公式器函数用于导出掺杂密度 (N) 和 x 轴上内置电压 (x 轴截距) 的曲线。在公式器中，掺杂密度作为电压的函数计算，并显示在 “Analyze” 窗口的工作表中。用户必须在公式器的常量区域中输入电池的面积。内置的电压源值可以在公式器中导出，也可以在图形设置中使用线性线拟合选项导出。注意，x 轴截距的值出现在图的左下角。

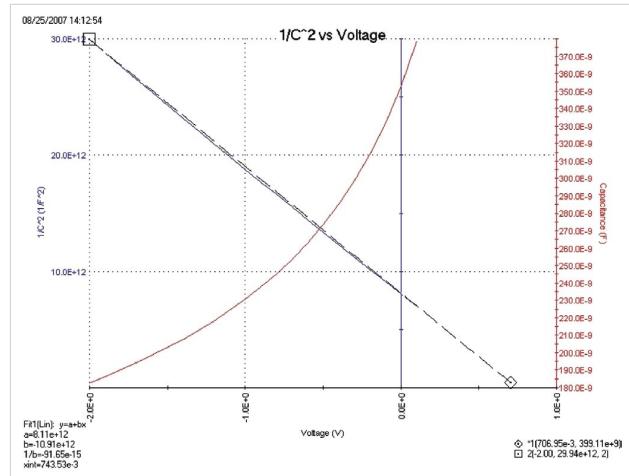


图 13. $1/C^2$ vs. 硅太阳能电池的电压

C-f 扫描

CVU 选项还可以测量电容、电导或阻抗与测试频率的函数。频率范围从 1 kHz 到 10 MHz。图 14 中的曲线是使用 Solar Cell C-f sweep 或 “cfsweep” 测试生成的。扫描频率的范围和偏置电压都可以调节。所需的参数，如陷阱密度，可以从电容与频率的数据中提取。测量可以在不同温度下重复进行。

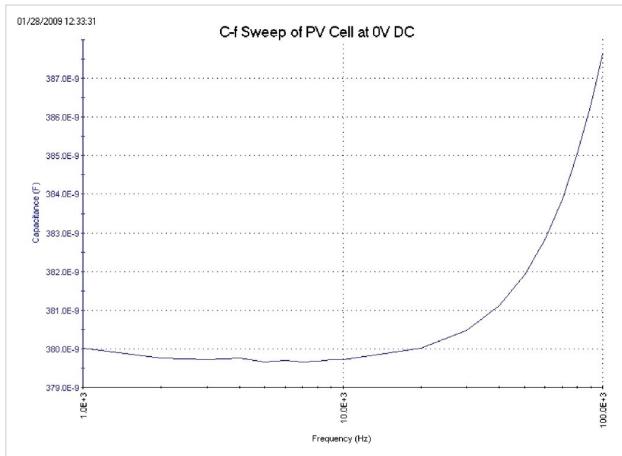


图 14. Solar Cell 的 C-f 扫描

驱动级电容分析 (DLCP)

驱动级电容分析 (DLCP) 是一种确定陷阱密度 (N_{DL}) 作为光伏电池结深函数的技术¹。在 DLCP 测量期间，施加的 AC 电压 (峰峰值) 进行扫频，直流电压在测量电容时发生变化。对比传统的 C-V 测量技术，在这种测试中，AC 电压的有效值是固定的，扫描直流电压。

在 DLCP 中，直流电压自动调节以保持总施加电压 (AC+ 直流) 恒定，而 AC 电压进行扫频输出。通过保持恒定的总偏置，材料内部的裸露电荷密度 (ρ_e) 在固定位置 (X_e) 保持恒定，其定义为当 $E_F - E_V = E_e$ 的位置到表面的距离。并且与传统的 C-V 测量解析对比，传统测试分析的假设是电荷密度变化仅发生在耗尽区域的末端。¹

因此，在 DLCP 中，可以通过调整直流电压对样品的偏置来改变位置 (x_e)。这也允许确定陷阱密度作为距离的函数，或特殊分析。测量的测试频率和温度也可以改变，以显示一个基于能量的分析。

一旦测量完成，C-V 数据的二次拟合与给定耗尽深度下的杂质密度有关，对于 p 型半导体如下所示：

$$N_{DL} = \text{缺陷密度 } (\text{cm}^{-3})$$

$$C_1, C_0 = \text{C-V 数据的二次拟合系数}$$

$$q = \text{电子电荷 } (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})$$

$$\epsilon = \text{介电常数 } (\text{F/cm})$$

$$A = \text{太阳能电池面积 } (\text{cm}^2)$$

$$\rho_e = \text{电荷密度 } (\text{C/cm}^3)$$

$$P = \text{空穴密度 } (\text{cm}^{-3})$$

$$x_e = \text{到界面的距离，其中 } E_F - E_V = E_e$$

$$N_{DL} = \frac{C_0^3}{2q\epsilon A^2 C_1} = \frac{|\rho_e|}{q} = P + \int_{E_F^0}^{E_V + E_e} g(E, x_e) dE$$

系数 C_0 和 C_1 是通过进行完整的最小方乘最佳拟合来确定数据对应的二次方程：

$$dQ/dV = C_2 (dV)^2 + C_1 * (dV) + C_0$$

然而，在分析中只使用了 C_0 和 C_1 系数。

Solar Cell DLCP 或 “dlcp” 测试允许对驱动级电容分析进行 C-V 测量。在这些测量过程中，总施加电压保持恒定，因为直流电压偏差随着 AC 电压驱动电压幅度的变化而自动调整。AC 幅度可在 10 mVrms 至 100 mVrms (14.14 mV 至 141.4 mVp-p) 范围内调节。频率范围也可以从 1 kHz 到 10 MHz 设置。电容是在 AC 电压扫频时进行测量的。

¹ J. T. Heath, J. D. Cohen, W. N. Shafarman, “Bulk and metastable defects in CuIn1-xGaxSe2 thin films using drive-level capacitance profiling,” Journal of Applied Physics, vol. 95, no. 3, p. 1000, 2004

表 2 列出了测试中使用的输入参数、输入值的允许范围和描述。这个测试是从 DLCP 用户库和 ACSweep 用户模块创建的。用户输入总施加电压 (VmaxTotal)，AC 启动，停止和步进电压 (VacppStart, VacppStop 和 VacppStep)，电压步进之间的时间 (SweepDelay)，测试频率 (Frequency)，测量速度 (Speed)，测量范围 (CVRange) 和偏移补偿 (OpenComp, ShortComp, LoadComp 和 LoadVal)。

表 2. dlc 测试的可调参数 (ACsweep 用户模块)

Parameter	Range	Description
VmaxTotal	-10 to 10 volts	Applied DC Volts and ½ AC Volts p-p
VacppStart	.01414 to .1414	Start Vac p-p
VacppStop	.02828 to .1414	Stop Vac p-p
VacppStep	.0007070 to .1414	Step Vac p-p
SweepDelay	0 to 100	Sweep delay time in seconds
Frequency	1E+3 to 10E+6	Test Frequency in Hertz
Speed	0, 1, 2	0=Fast, 1=Normal, 2=Quiet
CVRange	0, 1E-6, 30E-6, 1E-3	0=autorange, 1 μ A, 30 μ A, 1 mA
OpenComp	1, 0	Enables/disables open compensation for CVU
ShortComp	1, 0	Enables/disables short compensation for CVU
LoadComp	1, 0	Enables/disables load compensation for CVU
LoadVal	1 to 1E+9	Load value

一旦执行测试，电容，AC 电压，直流电压，时间戳，频率，和陷阱密度 (NDL) 被测量，它们的值会列在表中。陷阱密度在公式编辑器中使用 C-V 数据的二次曲线拟合来计算。二次方程的系数 (C_0 和 C_1) 也列在表格中。用户将待测太阳能电池的面积和介电常数输入到公式编辑器的常量 / 数值 / 单位区域。

图 15 显示了电容与 AC 电压峰峰值的测量结果。可以看到，导出的二次曲线拟合系数和陷阱密度显示在图中。

电容测量可以在施加各种总电压的情况下重复进行，以便改变 x_e 的位置。能量 (E_e) 可以通过改变测试频率 (1 kHz 到 10 MHz) 或温度来实现。为了改变测量的温度，用户可以通过 4200A-SCS 的 GPIB 接口在项目上

添加一个操作来控制温度控制器。4200A-SCS 提供用于操作 Temprtronics, Lakeshore 和 Triotek 温度控制器的用户库。

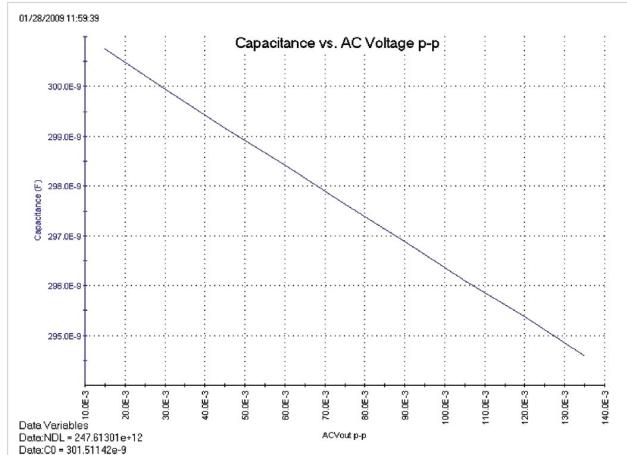


图 15. 太阳能电池的电容与 AC 电压峰峰值的关系

脉冲式 I-V 测量

脉冲式 I-V 测量可以用来研究太阳能电池的参数。特别是业内一直使用脉冲式 I-V 测量，确定转换效率、最小载流子寿命和电池电容的影响。4225-PMU 是 4200A-SCS 选配的超快速 I-V 模块，可以输出脉冲式电压，测量电流，并可以在时域中捕获超高速电流或电压波形。除提供脉冲式电压外，PMU 还吸收电流，因此可以测量太阳能电池的电流输出。

为在太阳能电池上进行脉冲式 I-V 测量，把 4225-PMU 连接到电池上，如**图 16** 所示。每个 PMU 有两条通道，因此既可以使用一条通道，也可以使用两条通道连接太阳能电池。在如图所示的 1 通道情况下，电池的一端连接到 PMU CH1 的 HI 端子上，电池的另一侧连接到同轴电缆的屏蔽层上，也就是 PMU 的 LO 端子。

与 DC I-V 和 C-V 测量不同，4225-PMU 使用 2 线技术。可以使用短路补偿功能，“清零”电缆引起的电压下跌，因此不一定要使用 4 线测量技术。

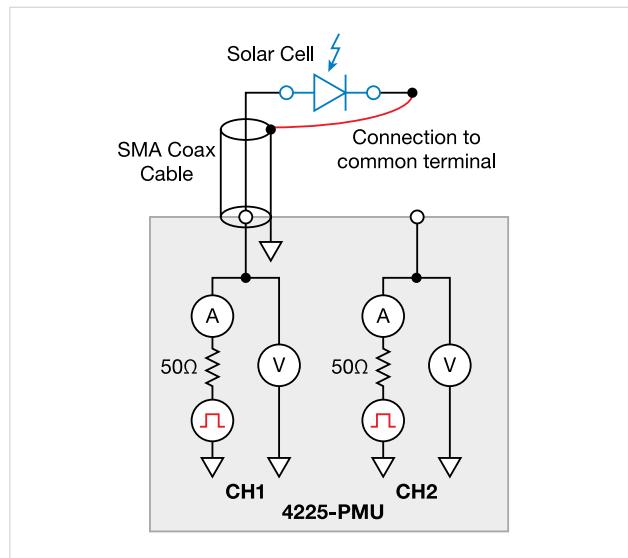


图 16. 将太阳能电池连接到 4225-PMU 超快速 I-V 模块

由于太阳能电池具有相当大的容性，因此确保脉冲宽度足够长以进行脉冲 I-V 扫描是非常重要的。波形捕获模式应用于在产生脉冲 I-V 扫描之前验证脉冲宽度。波形捕获模式能够进行基于时间的电流和 / 或电压测量，通常是捕获脉冲波形。这可用于对电池进行动态测试，或用作在脉冲 I-V 模式中选择适当脉冲设置的诊断工具。考虑到更大的太阳能电池具有更大的电容，可能需要减少电池本身的面积，以避免测量中较长的稳定时间。

在硅太阳能电池上产生脉冲 I-V 测量扫描的结果如图 17 所示。可以看到，电流曲线位于第四象限。这表明 PMU 正在吸收电流；换句话说，电流从太阳能电池流出并流入 PMU。

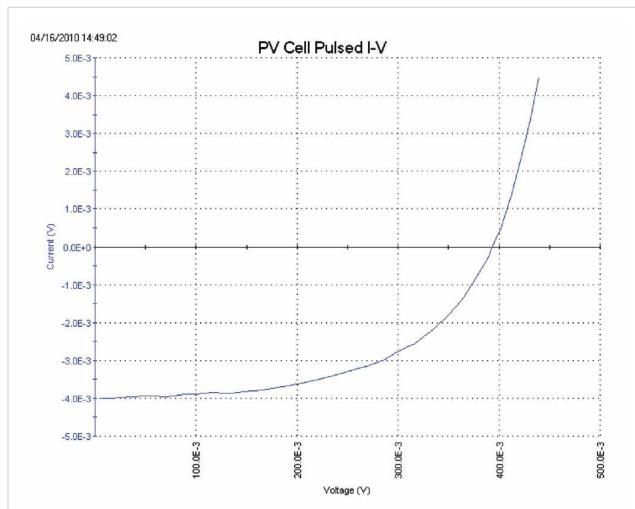


图 17. 使用 4225-PMU 对太阳能电池进行脉冲 I-V 测量

电阻率和霍尔电压测量

考虑到电阻率的大小直接影响电池的性能，确定太阳能电池材料的电阻率是一种常见的电测量。半导体材料的电阻率测量通常使用四探针方式进行。使用四探针方法可以消除由于探头电阻、每个探头下的扩展电阻以及每个金属触点与半导体材料之间的接触电阻而产生的误差。测定太阳能电池材料电阻率的两种常用技术是四探针法和范德堡法。SolarCell 项目包含了进行这两种类型测量的几项测试，将在接下来的几段中进行描述。并且测试库还包含用于进行范德堡系数和霍尔系数测量的单独测试。可以通过在 Select 视图的搜索栏中输入这些测试的名称来查找这些测试：vdp-surface-resistivity, vdp-volume-resistivity, 或者 hall-coefficient。这些测试在 Keithley 应用说明“使用 4200A-SCS 参数分析仪进行范德堡电阻率和霍尔电压测量”中进行了描述。

四探针测量法

四探针技术是将四个等间距的探针与阻值未知的材料接触。如图 18 所示，探针阵列被放置在材料的中心。两个外部探针用于加载电流源，两个内部探针用于测量通过材料表面产生的电压差。

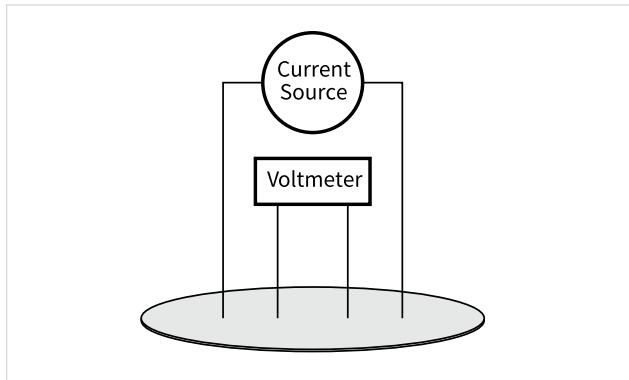


图 18. 四探针测电阻率

已知加载电流和被测电压计算表面或薄膜电阻率：

$$\sigma = \text{表面电阻率 } (\Omega/\square)$$

$$V = \text{回读电压 } (V)$$

$$I = \text{加载电流 } (A)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\ln^2} \times \frac{V}{I}$$

注意：表面电阻率的单位表示为每平方欧姆 (Ω/\square)，以区别于电阻测量 (V/I)，电阻测量仅表示为欧姆。对于极薄或极厚的样品，或样品的直径相对于探头间距较小的情况下，可能需要对电阻率计算引入修正因子。

如果样品的厚度已知，则体电阻率可以按如下方式计算：

$$\rho = \text{体电阻率 } (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$t = \text{样品厚度 } (\text{cm})$$

k = 修正因子 * 基于探针间距与晶圆直径之比以及晶圆厚度与探针间距之比

$$\rho = \frac{\pi}{\ln^2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

* 修正因子可以在标准四探针电阻率测试程序中找到，例如 *Semi MF84: Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an In-Line Four-Point Probe* (用直线四点探头测量硅晶圆电阻率的标准测试方法)，该标准最初由 ASTM International 发布。

使用四探针测试

Solar Cell High Resistance 或 “hir” 测试或 *Solar Cell Low Resistance* 或 “lor” 测试都使用四探针测量。“hir” 测试可用于宽电阻范围内的材料，~1 mΩ 到 1 TΩ。4200-PA 前置放大器用于进行高电阻测量 (>1 MΩ)。“lor” 测试用于测量低电阻材料 (~1 mΩ 到 1 kΩ)。

四探针电阻率的 “hir” 试验截图如图 19。

Solar Cell High Resistance 测试 (hir) 使用三个或四个 SMU 进行电阻率测量。一个 SMU (SMU1) 和接地单元 (GNDU) 用于外部两个探针之间加载电流源。另外两个 SMU (SMU2 和 SMU3) 用于测量两个内部探针之间的压降。每个 SMU 的 Force HI 端子分别连接到四个探针上。SMU 的配置如图 20 所示。

在公式编辑器中，计算了 SMU2 和 SMU3 之间的电压差，并根据电压差推导出电阻和表面电阻率。测试结果线上在测试的分析面板中的表格里。

在进行高电阻测量时，为了获取最佳测量结果，需要考虑潜在的误差来源。使用探针时，探针之间的绝缘电阻阻值要比被测材料的阻值高很多。这有助于防止通过探头的泄漏电流对测量产生的误差。通过将电路封闭在金属屏蔽层中，确保测量电路屏蔽掉静电，防护罩接在 4200A 的 LO 端子上。LO 端子位于 GNDU 或三轴连接器的外层上。使用三轴电缆产生一个 guard 测量电路，这将防止线缆漏电流带来的误差并大大减少了测试时间。最后，4200-PA 的前置放大器选项需要提供非常小的电流 (nA 和 pA 范围)，并提供高输入阻抗 (>1E16Ω)，以避免测量电压时引入的负载误差。

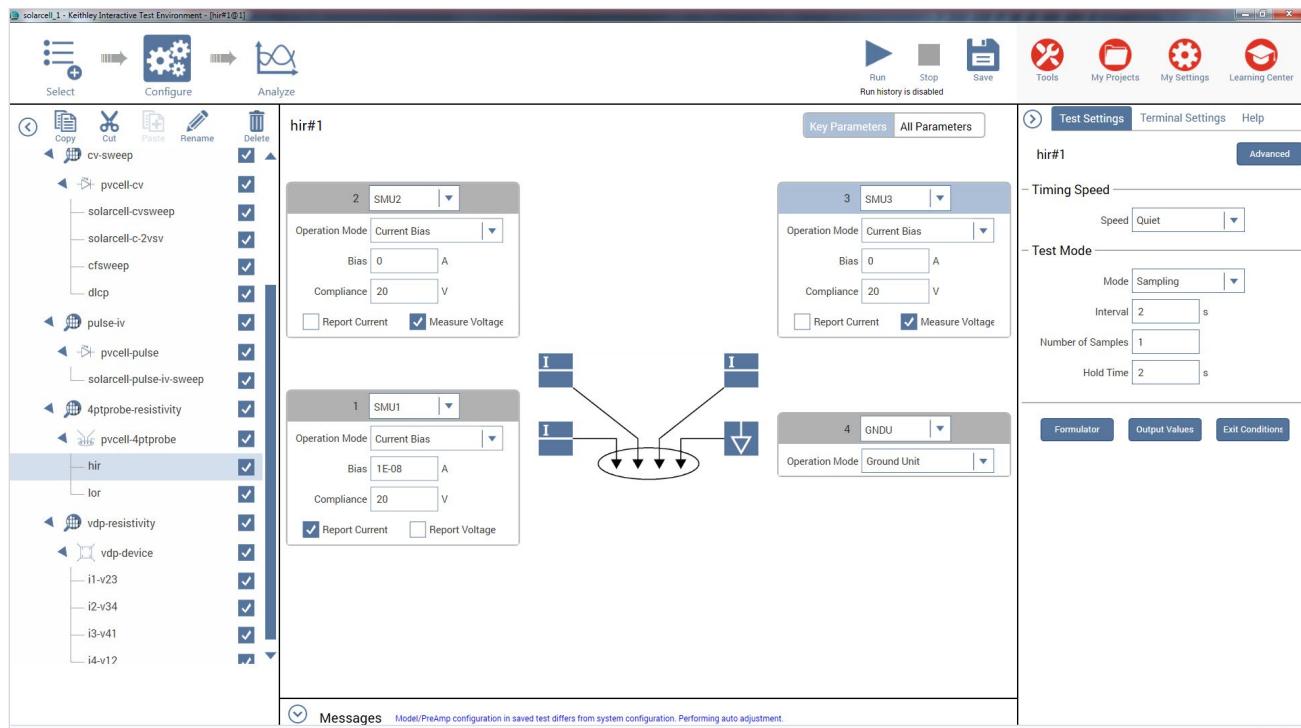


图 19. 用于测量电阻率的“hir”测试模块

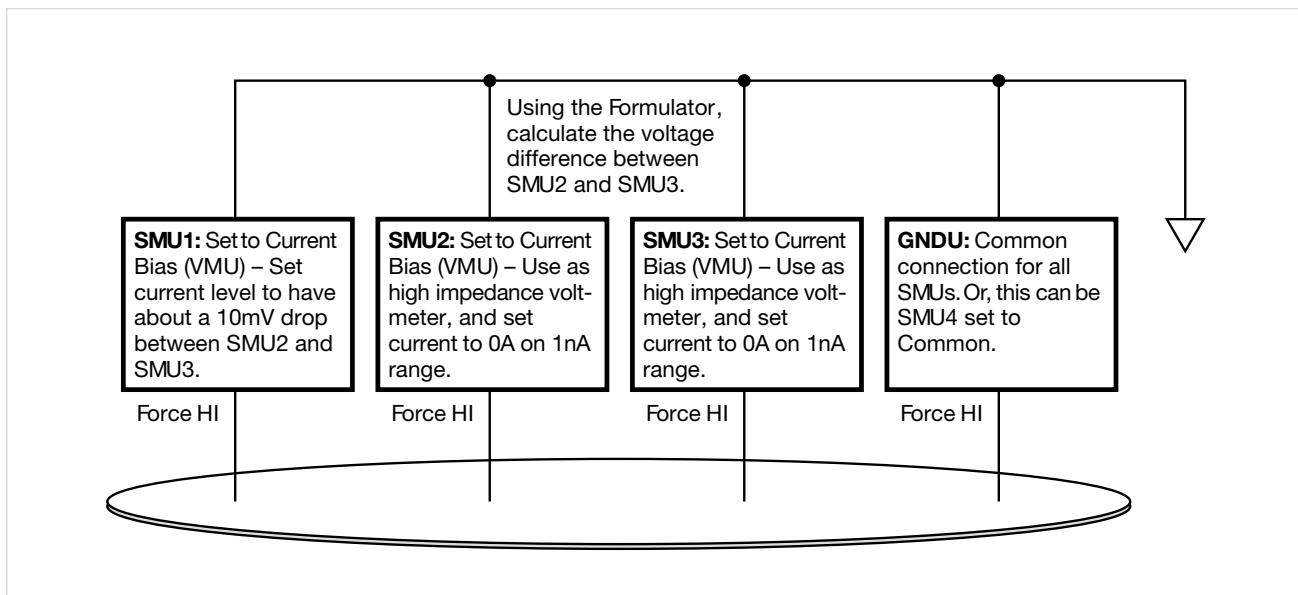


图 20. 指定 SMU 进行四探针测试

Solar Cell Low Resistance (lor) 测试仅用于低电阻材料，只需要一个或两个 SMU。在这种情况下，SMU 的 Force 和 Sense 端子连接到四点探头，如图 20 所示。

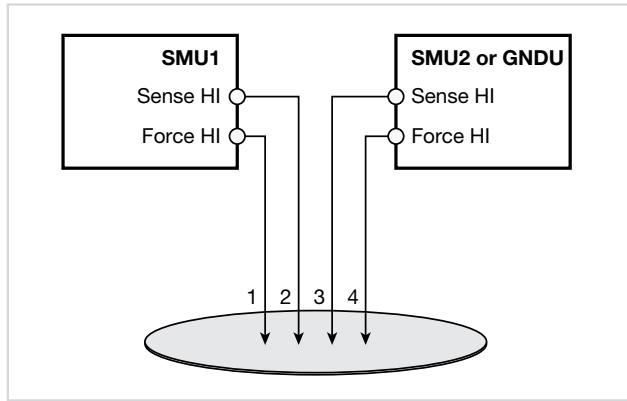


图 21. 连接两个 SMU 进行四探针测量

在图 21 所示的配置中，SMU1 子通过 Force HI 端为 PIN1 提供电流。通过两个 SMU 的 Sense 端子测量 PIN2 和 PIN3 之间的电压差。

为了补偿热电动势构成的偏移电压，用极性相反的电流进行两次电压测量。将这两个测量值结合并取平均值以抵消热电动势。*Solar Cell Low Resistance (lor)* 测试通过在列表扫描中查找两个电流值，然后在公式编辑器中对偏移量进行数学校正，自动执行偏移量校正。校正后的电阻和表面电阻率显示在表格中。

用范德堡法测量电阻率

范德堡 (vdp) 技术测量电阻率使用四个孤立的触点在一个扁平的，任意形状的样品。电阻率是根据图 22 所示在样品周围进行的 8 次测量得出的。

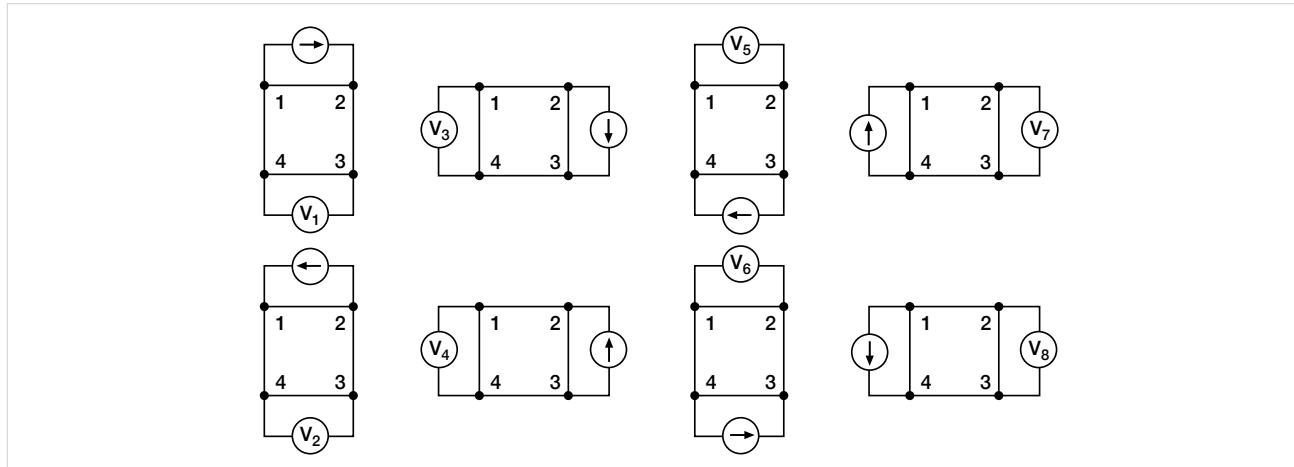


图 22. 范德堡电阻率测量方法

一旦完成了所有的电压测量，就可以推导出两个电阻率值 ρ_A 和 ρ_B :

$$\rho_A = \frac{p}{\ln^2} f_A t_s \frac{(V_2 + V_4 - V_1 - V_3)}{4I}$$

$$\rho_B = \frac{p}{\ln^2} f_B t_s \frac{(V_6 + V_8 - V_5 - V_7)}{4I}$$

其中，

ρ_A 、 ρ_B 为体积电阻率，单位为 Ω/cm ；

t_s 为样品厚度，单位为 cm ；

V_1-V_8 表示电压表测得的电压；

I 是通过样品的电流，单位为 A ；

f_A 和 f_B 是基于样本对称性的几何因子，与两个电压比 Q_A 和 Q_B 有关，如下式 (当 $f_A = f_B = 1$ 时，为完全对称)。

Q_A 和 Q_B 是利用测量的电压计算得到的，如下所示：

$$Q_A = \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3}$$

$$Q_B = \frac{V_6 - V_5}{V_8 - V_7}$$

并且， Q 和 f 的相关关系如下：

$$\frac{Q - 1}{Q + 1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arc cosh} \left(\frac{e^{0.693/f}}{2} \right)$$

图 23 给出了这个函数的曲线图。一旦计算出 Q ，就可以从这幅图中找到 “ f ” 的值。

一旦知道 ρ_A 和 ρ_B ，平均电阻率 (ρ_{AVG}) 就可以确定了：

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2}$$

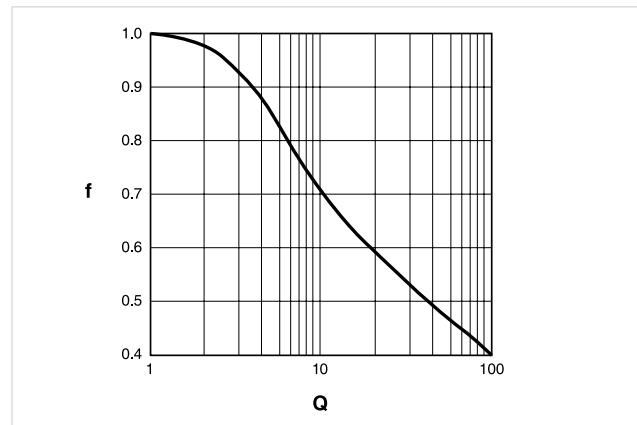


图 23. f vs. Q

采用 vdp-resistivity subsite 和 vdp 法进行测试

为了实现 vdp 电阻率测量的自动化，solarcell 项目有一个 vdp-resistivity subsite，包含四个测试 “*i1-v23*”、“*i2-v34*”、“*i3-v41*” 和 “*i4-v12*”。测试的截图如图 24 所示。

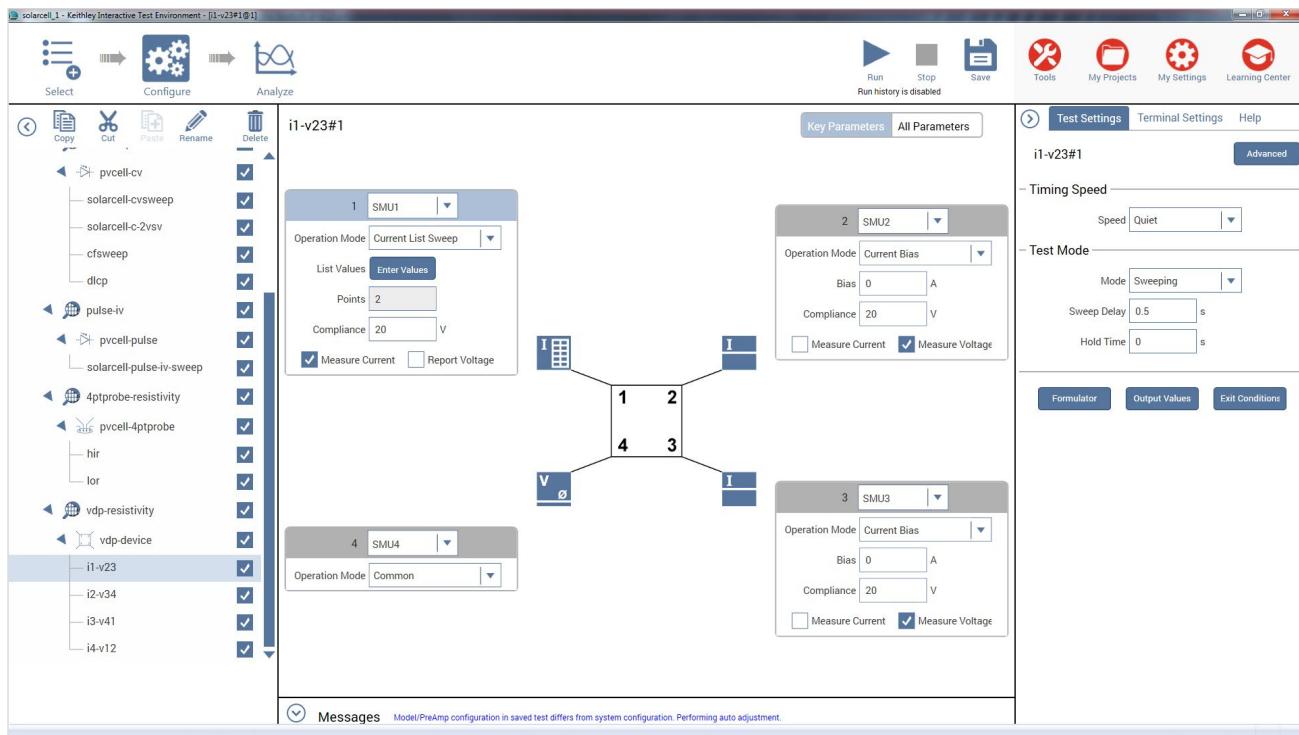


图 24. 范德堡测试的截图

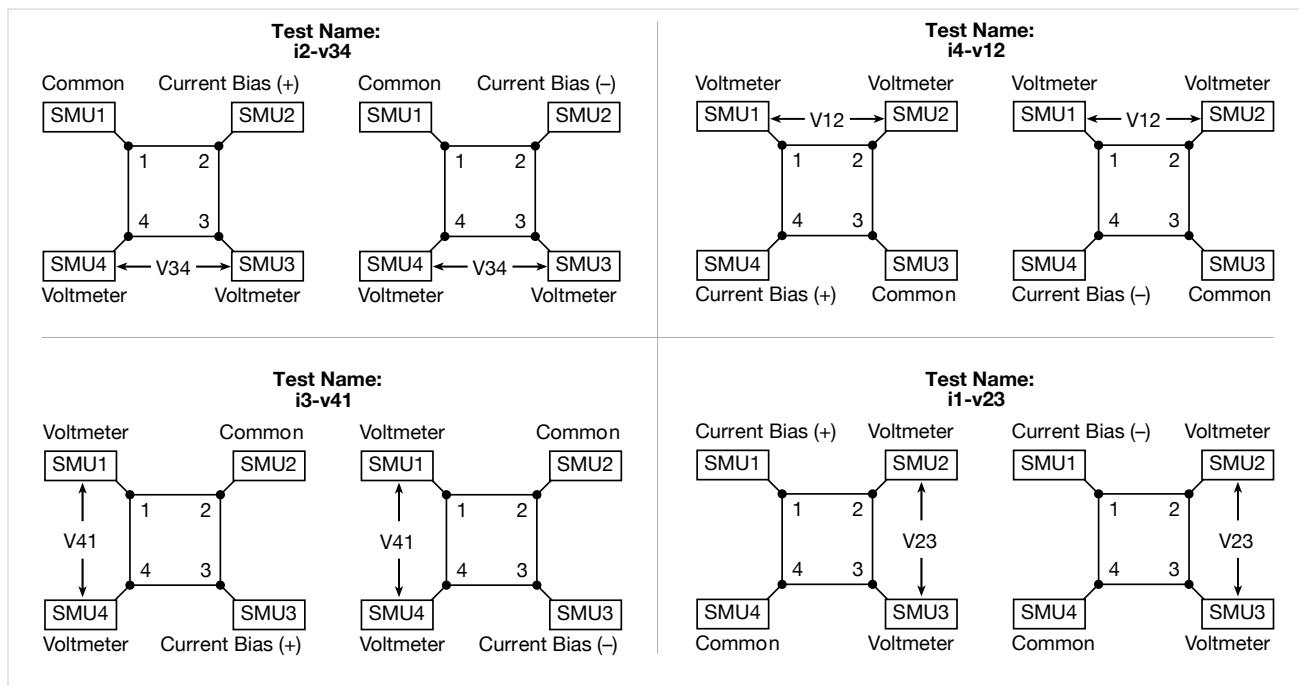


图 25. 范德堡测量的 SMU 配置

样品的每个端子都连接到 SMU 的 Force HI 端子，因此需要带有四个 SMU 的 4200A-SCS。四个 SMU 在每个测试中的配置不同：一个 SMU 提供测试电流，两个配置为电压表，一个设置为公共端。在样品周围重复此测量设置，四个 SMU 中的每一个都在四个测试中的每个测试中发挥不同的功能。**图 25** 显示了每次测试中每个 SMU 的功能。

调整测试参数

在执行测试之前，必须根据要测试的样本调整一些测试参数。特别是要指加载电流、积分时间、材料厚度。

输入电流源：在项目运行前，根据预期的样品电阻输入电流源值。调整电流，使电压差不超过 $\sim 25\text{mV}$ ，以保持样品处于热平衡状态。在四次测试中，每一次都输入测试电流的两个极性。每次测试必须使用相同的量程。

输入积分时间：对于高电阻样品，需要确定测量的积分时间。这可以通过创建一个测试来完成，该测试将电流注入样品的两个端子，并测量相邻两个端子上的电压降。通过多次读取电压读数，然后绘制电压差随时间变化的图形，可以确定稳定时间。

这个稳定时间测试可以通过复制然后修改现有的 vdp 测试中的一个来生成。将源函数从扫描模式切换到采样模式。然后，在测试设置窗口中，以 1s 的延迟时间后进行几百次左右的读数。一定要选中“Report Timestamps”框。读数完成后，在图表上绘制电压差与时间的关系。通过观察图表并找到读数在最终值的期望百分比内的时间来确定积分时间。

输入样品的厚度：将样品的厚度输入到 subsite 的 Calc 表格中。选择子项目 vdp_resistivity，进入 subsite 数据 vdp-device 表格。其包含电压差和测试电流的输出值。在计算选项卡中，可以调整厚度。默认厚度为 1 cm。

输入校正系数：根据计算表中的电阻率公式，在必要时也可以输入校正系数。电阻率乘以这个数字，这个数字可能是基于样品的几何形状或均匀性。默认的校正因子为 1。

运行项目

范德堡电阻率测量必须在 subsite 级别进行。确保 vdp 测试右侧的四个复选框（“i1-v23”、“i2-v34”、“i3-v41”、“i4-v12”）全部选中，然后选择 vdp_resistivity。点击 Run 按钮执行项目。每次运行测试时，subsite 数据都会更新。四个测试中每个测试的电压差将显示在“Subsite Data vdp-device”表格选项卡中。电阻率将显示在 subsite 数据计算表中，如**图 26** 所示。

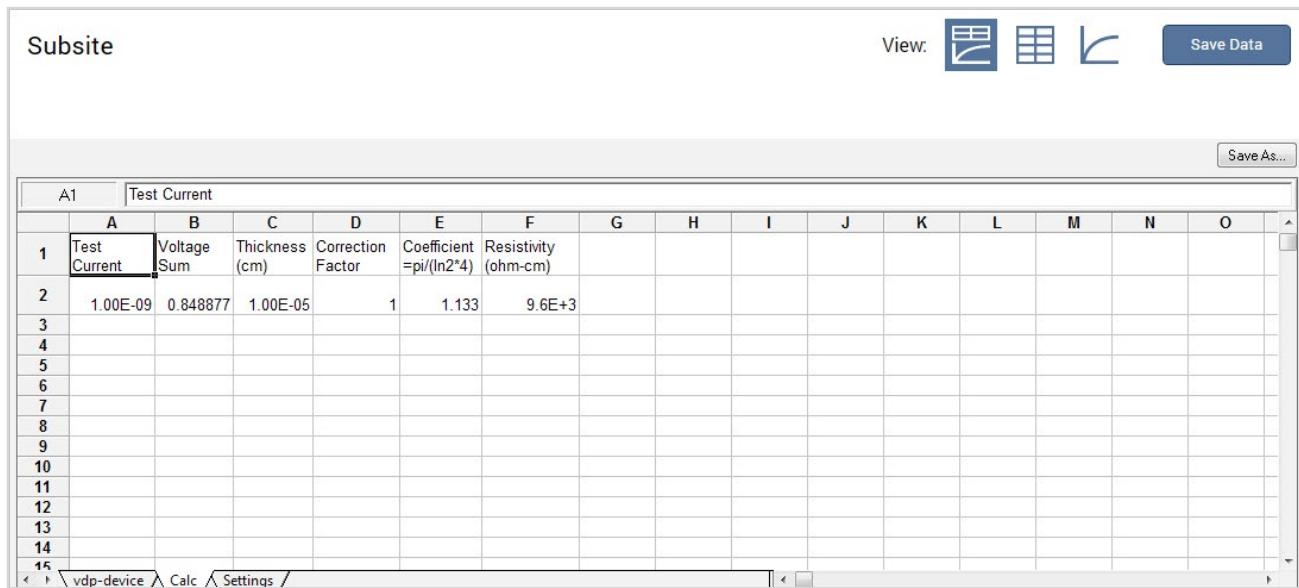


图 26. VDP 电阻率计算

霍尔电压测量

霍尔效应测量对于半导体材料的表征很重要，因为霍尔电压可以导出导电类型、载流子密度和霍尔迁移率。在外加磁场的情况下，可以使用图 27 所示的配置来测量霍尔电压。

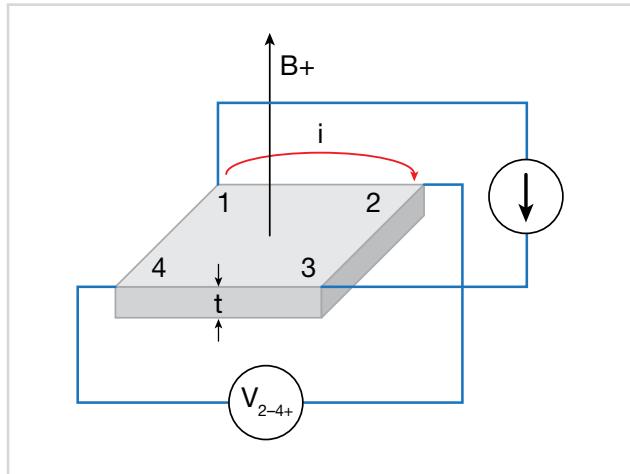


图 27. 霍尔电压测量

用正磁场 ($B+$)，在样品的 1 和 3 端子之间施加电流，并测量 2 和 4 端子之间的电压降 (V_{2-4+})。反转电流，测量电压降 (V_{4-2+})。接下来，在 2 和 4 端子之间施加电流，并测量 1 和 3 端子之间的电压降 (V_{1-3+})。将电流反向，再次测量电压降 (V_{3-1+})。

反转磁场 ($B-$) 并重复程序，测量四个电压： (V_{2-4-}) ， (V_{4-2-}) ， (V_{1-3-}) ，和 (V_{3-1-}) 。表 3 总结了霍尔电压的测量配置。

表 3. 霍尔电压测量汇总

Voltage Designation	Magnetic Flux	Current Forced Between Terminals	Voltage Measured Between Terminals
V_{2-4+}	$B+$	1-3	2-4
V_{4-2+}	$B+$	3-1	4-2
V_{1-3+}	$B+$	2-4	1-3
V_{3-1+}	$B+$	4-2	3-1
V_{2-4-}	$B-$	1-3	2-4
V_{4-2-}	$B-$	3-1	4-2
V_{1-3-}	$B-$	2-4	1-3
V_{3-1-}	$B-$	4-2	3-1

从 8 次霍尔电压测量中，可以计算出平均霍尔系数如下：

$$R_{HC} = \frac{t(V_{4-2+} - V_{2-4+} + V_{2-4-} - V_{4-2-})}{4BI}$$

$$R_{HD} = \frac{t(V_{3-1+} - V_{1-3+} + V_{1-3-} - V_{3-1-})}{4BI}$$

其中：

R_{HC} 、 R_{HD} 为霍尔系数，单位： cm^3/C ；

t 为样品厚度，单位：cm；

V 表示测量的电压，单位：V；

I 为通过样品的电流，单位：A；

B 为磁通量，单位： Vs/cm^2

一旦计算出 R_{HC} 和 R_{HD} ，平均霍尔系数 (R_{HAVG}) 可以确定如下：

$$R_{HAVG} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2}$$

从电阻率 (ρ_{AVG}) 和霍尔系数 (R_H)，可以计算出霍尔迁移率 (μ_H)：

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho_{AVG}}$$

使用 4200A-SCS 测量霍尔电压

SolarCell 项目不包括测量霍尔电压的具体测试，然而，可以在 subsite 上增加四个测试，以确定霍尔系数和迁移率。考虑到霍尔测量的配置与范德堡电阻率测量非常相似，可以复制和修改 vdp 测试以进行霍尔电压测量。这些修改涉及改变 SMU 的功能。图 28 说明了如何在测试中配置四个 SMU 来测量霍尔电压。使用每个测试的“测试设置”窗口上的“输出值”复选框，将霍尔电压返回到 subsite 的 Calc 表。

必须添加一个自定义测试来控制磁体。对于 GPIB 控制的电磁铁，用户可以使用 KULT(Keithley 用户库工具) 编写用户模块来控制电磁铁的大小和极性。代码可以在项目内部的自定义测试中打开。4200A-SCS 参考手册提供了使用 KULT 编写代码的信息。

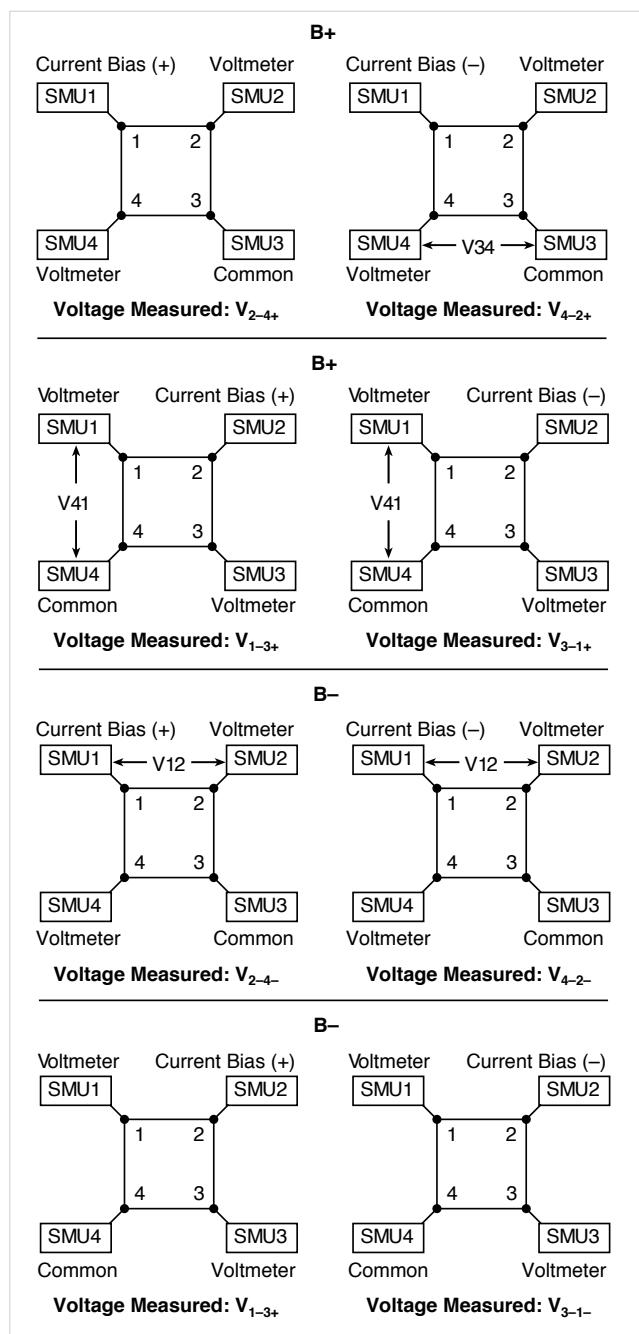


图 28. 用于霍尔电压测量的 SMU 配置

如果使用永磁体，则可以使用动作库中的动作来创建一个对话框项目提示，该对话框将停止项目树中的测试序列，并指示用户更改应用于样品的磁场性。项目提示符是一个对话框窗口，它暂停项目测试序列并提示用户执行某些操作。有关如何使用对话框动作的说明，请参阅 4200A-SCS 参考手册。

最后，在 subsite 的 Calc 表中推导出霍尔系数和迁移率。这些数学函数可以加到其他公式中，用于测定电阻率。

结论

测量太阳能电池的电特性对于确定设备的输出性能和效率至关重要。4200A-SCS 通过自动化 I-V、C-V、脉冲 I-V 和电阻率测量来简化电池测试，并提供图形和分析功能。对于大于 1A 的电流测量，Keithley 提供可用于太阳能电池测试的源表仪器。有关这些设备的信息和太阳能电池测量的进一步信息可以在公司的网站上找到：www.tek.com.cn。

代替使用四个独立的测试在 subsite 的 Cals 表格中进行霍尔电压测量，从库中添加霍尔系数测试，它将所有测量和参数提取合并到一个测试中。



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。

040320.SBG 1KC-60642-0

