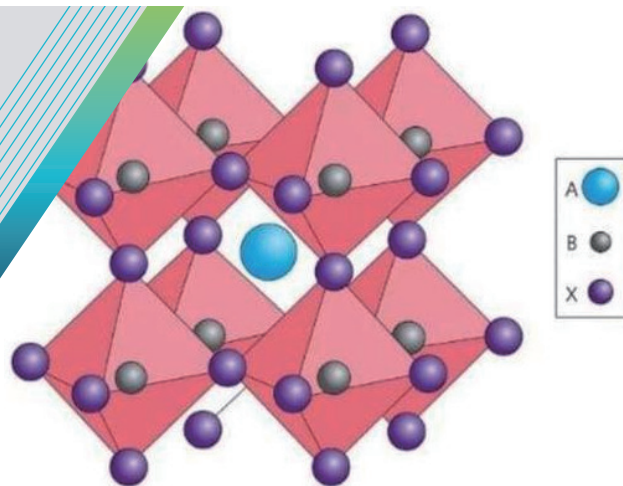


Keithley 在钙钛矿光伏器件中的测试应用



钙钛矿指的是一种具有独特物理性质和化学性质的新型无机非金属材料，作为光伏材料的钙钛矿，实际上和钙、钛、矿三个字都没太大关系，而是与钙钛矿（ CaTiO_3 ）晶体结构类似的“ ABX_3 ”化合物。其结构中 A 位是有机阳离子，B 位是金属阳离子，X 位是卤族阴离子。钙钛矿的晶体结构具有四面体的对称性，A 离子位于立方体的顶点，B 离子位于立方体的中心，X 离子位于立方体的面心。

被称为继第一代晶硅、第二代薄膜之后的第三代光伏电池技术路线。钙钛矿结构的化合物具有丰富的物理和化学性质，例如光电、磁电、热电、压电、铁电、超导等。钙钛矿结构的化合物在能源、信息、通信、环境等领域有广泛的应用和研究前景。

相较于当下主流的晶硅电池，钙钛矿是一种具有革命性的新材料，具有：

● 高能量密度

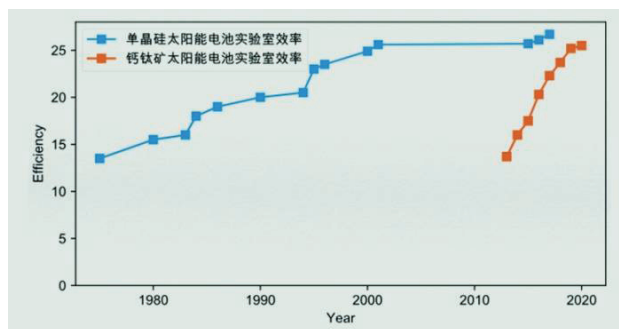
钙钛矿电池的能量密度高达 250 Wh/kg，是目前市场上商用电池中最高的。因此，在同样大小的电池体积下，可以存储更多的电能。

● 高理论效率

单层理论效率达 33%，双层可达 45% 以上，具有比晶硅更高的提升空间)

● 可期的低成本优势

钙钛矿电池原材料均为基础化工材料，由人工合成，且不含有稀有元素，相比于晶硅电池的硅料来说廉价易得。除原材料不受限，制备工艺较短。



● 应用前景广阔

在电站端，钙钛矿电池凭借弱光性以及颜色可定制的特点，满足了长时间发电、透光度以及美观性等市场需求，在 BIPV 和幕墙、阳光房等领域也拥有广阔的市场空间。

当然没有一种材料是完美的，钙钛矿也不例外。尽管存在颇多的优势，但作为一种尚未脱离实验室阶段的材料，例如：晶体结构不稳定，热稳定性差，大面积制备难度大等等，这些缺陷严重限制了其投入工业生产的能力。

为了研究钙钛矿的电化学性质，提升钙钛矿的优势并且降低相应的需要对其进行电化学表征。电化学表征方法主要有以下几种：

● 循环伏安法

循环伏安法是一种用于测量电极反应动力学的电化学技术，它可以获取电极的电流 - 电压曲线，并从中分析出电极的氧化还原峰、电容、极化性等参数。循环伏安法可以用于研究钙钛矿的电荷传输行为、电极薄膜的质量和稳定性等。

● 电化学阻抗谱法

电化学阻抗谱法是一种用于测量电极界面的复杂电阻的电化学技术，它可以获取电极的阻抗 - 频率曲线，并从中分析出电极的电荷转移阻抗、双电层电容、电解质阻抗等参数。电化学阻抗谱法可以用于研究钙钛矿的电荷注入和抽取过程、电极 - 电解质界面的电子和离子交换机制等。

● 光电化学方法

光电化学方法是一种用于测量光敏电极的光电转换效率的电化学技术，它可以获取电极的光电流 - 电压曲线、光电流 - 光强度曲线、光电流 - 波长曲线等，并从中分析出电极的开路电压、短路电流、填充因子、能量转换效率等参数。光电化学方法可以用于研究钙钛矿的光吸收特性、光生载流子的寿命和迁移速度、光电极的优化设计等。

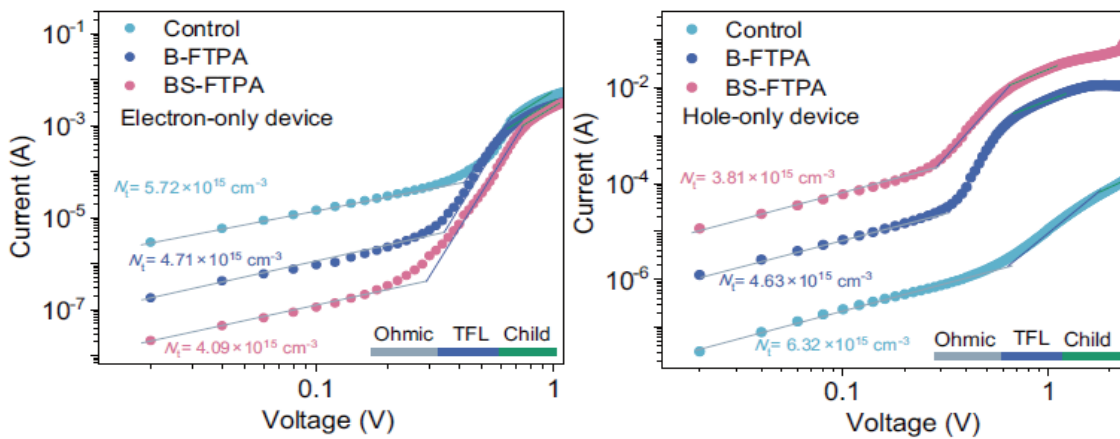
Keithley 的 2450 系列源表是业内公认的利用循环伏安法分析材料和器件的测试方案。4200A 半导体参数分析仪更多用于钙钛矿电池深能级缺陷表征和测试。

Keithley 源测量单元（SMU）是一种多功能仪器，可以提供电流或电压源，并同时测量电流和电压。它们在测试太阳能电池的 J-V 曲线方面具有多种优势，例如：

- **高精度和高分辨率：**Keithley SMU 可以测量 fA 至 A 范围内的电流和 μV 至 kV 范围内的电压，具有高精度和稳定性。
- **四象限操作：**Keithley 的源表可以在电流 - 电压平面的所有四个象限中工作，这意味着它们可以充当电流和电压的源或灌电流。能够模拟不同的负载条件，并测试太阳能电池在各种照明和温度场景下的性能。
- **扫描和脉冲模式：**Keithley 的源表可以对电流或电压执行线性、对数或自定义扫描，并测量相应的电压或电流。它们还可以生成和测量电流或电压的脉冲波形，具有可编程的宽度和占空比。这些模式可以表征太阳能电池参数，例如短路电流、开路电压、填充因子、最大功率点、串联和并联电阻、电容和迟滞。
- **遥感：**Keithley 的源表可以使用四线连接来消除引线电阻的影响，并确保准确测量太阳能电池端子上的电压。
- **数据记录和分析：**Keithley 的源表可以在图形用户界面上存储和显示测量数据，或将其导出到计算机进行进一步分析。他们还可以对数据进行计算和统计，并生成报告和绘图。

举例：

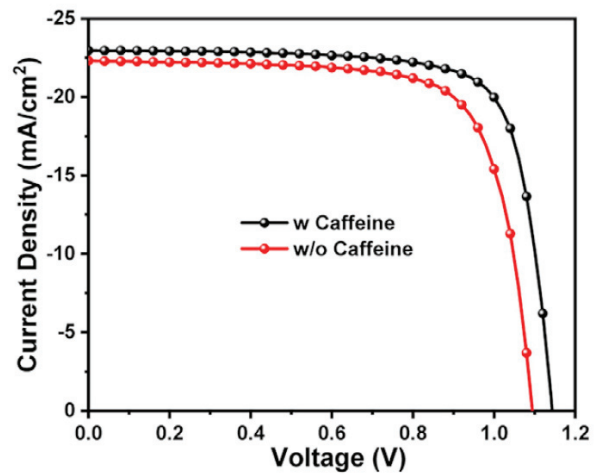
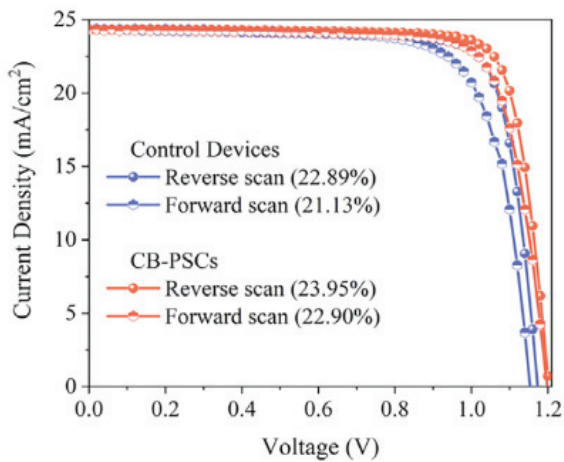
使用 Keithley 2450 记录空间电荷限制电流（SCLC）

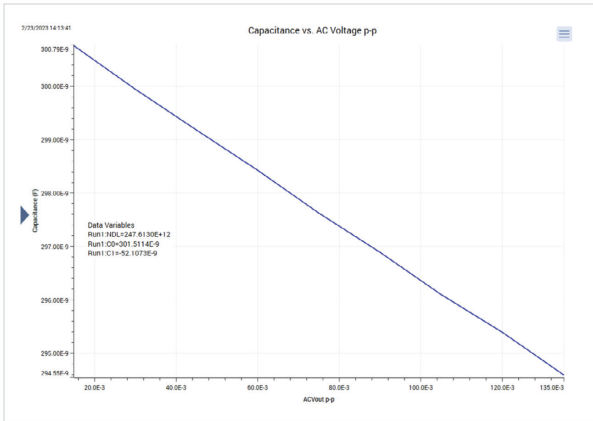


在低电压时 IV 呈现线性关系，2450 最小测量 nA 量级电流，准确稳定的表征低压线性关系；再高压时 IV 呈现二次方关系。为了使得更高分辨率描述平方关系，电压扫描可以设置为对数关系，可以更精确的刻画电流快速变化率。

配合光源模拟器，使用 Keithley 2602B 对钙钛矿电池进行测试 J-V 曲线

或者使用 Keithley 2400 系列原标进行 J-V 曲线测试

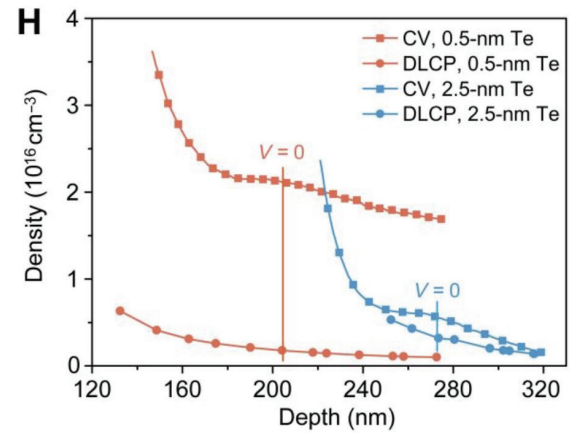




通过该曲线可以表征钙钛矿电池的开路电压、短路电流、最大功率点 MPP 以及 QE 等重要参数。

驱动级电容分析 (DLCP) 是一种确定缺陷密度 (NDL) 作为光伏电池深度函数的技术。在 DLCP 测量期间，施加的变化的交流电压信号，而直流电压随电容的变化而变化。这与传统的 C-V 形成对比，其中交流电压是固定的，直流电压是扫描变化的。

在 DLCP 中，直流电压自动调节以保持总施加电压 (交流 + 直流) 恒定，而进行交流电压扫描。通过保持恒定的总偏置，材料内部暴露的电荷密度 (e) 保持恒定，最高可达一个固定的位置 (xe)，定义为 $E_F - E_v = E_e$ 到界面的距离。这也与传统的 C-V 分析相反，后者的分析假设唯一的电荷密度变化发生在耗尽区的末端。



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 (xe)。这也允许确定缺陷密度作为距离的函数，或特殊的轮廓。测量的测试频率和温度也可以改变，以显示与能量相关的轮廓。

4200A 内置的钙钛矿电池 DLCP 测试允许进行 C-V 测量驱动电平电容剖析。交流幅度可在 10 ~ 100 mVrms (14.14 mV ~ 141.4 mV -p) 范围内调节。频率范围也可以从 1kHz 到 10MHz 进行设置。

通常 CV 和 DLCP 两种测试方法都会使用，表征的参数有一定的区别，具体如下：

- **DLCP：**如果您的研究目标是深入了解材料内部的陷阱态分布、深层缺陷或频率依赖的电荷动态。
- **CV：**如果您的研究目标是快速获取材料的表面 / 界面电学特性、掺杂分布或耗尽层宽度。

Keithley 产品在钙钛矿光伏电池领域的优势体现在其高精度、高效率、自动化、稳定性测试能力和灵活的测试方案上。这些特点使得 Keithley 的仪器在科研、开发和质量控制过程中，能够提供精确的测量和有效的数据管理，从而推动钙钛矿光伏电池技术的进步和商业化应用。

- **高精度电流电压测量：**Keithley 的 Source Measure Units(SMUs) 如 2400 系列和 2600 系列能够进行高精度的电流 - 电压 (I-V) 测量。这对于准确评估钙钛矿光伏电池的性能，如开路电压 (Voc)、短路电流 (Isc)，PE 等，至关重要。
- **低电流测量能力：**这些仪器具备在极低电流（皮安级）下的测量能力，能够精确检测暗态电流和漏电流，帮助研究钙钛矿电池的暗电流特性和漏电流。

- **快速 I-V 扫描：**支持自动化 I-V 扫描，能够以高速度和高分辨率获取电池的 I-V 曲线。快速测试有助于减少环境因素的影响，提高实验效率。
- **多通道测量：**可以同时测量多个样品，有效提高测试效率和产能。例如，Keithley 4200A-SCS 支持多通道测量，有助于高通量筛选和测试。
- **可靠的寿命和稳定性测试：**支持长时间、稳定的性能测试，帮助评估钙钛矿光伏电池的长期稳定性和降解行为。这对于研究电池的耐久性和稳定性非常重要。
- **兼容外部设备：**Keithley 产品可以与外部光源和温度控制设备无缝集成，进行光照下的电流 - 电压特性分析，模拟实际工作条件下的电池性能。
- **瞬态光伏响应：**支持瞬态光伏响应测试，有助于研究钙钛矿光伏电池的动态行为和响应特性。
- **环境控制：**结合 Keithley 系列产品与环境控制设备，可以在不同的温度和湿度条件下进行测试，模拟实际工作环境。

