

超越硅基：钙钛矿太阳能革命中的质量控制



不知你是否还记得，学生时代课堂上那台太阳能计算器？用手捂住传感器，屏幕上的数字便会渐渐隐去，直至完全消失……可一旦手移开，重见光亮，它又瞬间恢复了生机。那感觉，真是奇妙！

自那时起，这些小小的太阳能电池已经历了几次更新迭代，如今，它们已成为企业和家庭不可或缺的可再生能源来源之一。在全球范围内，太阳能行业在8年时间内发电量从100 TWh增长到1000 TWh，不到十年就增长了十倍。而从1000 TWh增长到2000 TWh更是仅用了三年时间^[1]。这一快速发展不仅源于对清洁和可再生能源的需求，也得益于成本的显著降低。在20世纪70年代末，单晶硅电池的价格约为每瓦77美元，而到2018年降至每瓦0.13美元^[2]，这是一个相当显著的变化。

虽然传统的硅基太阳能电池在市场上占据主导地位，但钙钛矿太阳能电池正作为一种强大的替代品而崛起。钙钛矿最初指的是钛酸钙（ CaTiO_3 ），但现在泛指任何具有类似晶体结构的化合物。

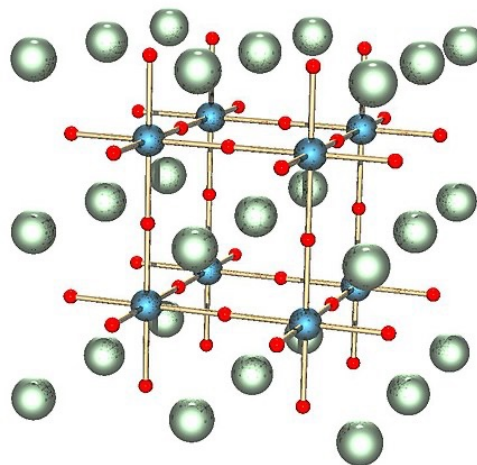


图1: 钙钛矿晶体结构

钙钛矿是指具有 ABX_3 晶体结构的化合物总称，其中A和B是阳离子，X是阴离子。最常用的钙钛矿材料是甲胺铅卤化物（Methylammonium Lead Trihalide），其中甲胺代表A，铅代表B，卤素（如溴或氯）代表X。



OceanOptics

钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从2010年前的不足4%跃升至2020年后的25%以上^[3]，其材料制备相对简便，应用场景多样，商业化前景广阔。

稳定的品质是任何制造工艺的基石，太阳能电池生产也不例外。光谱技术可以用于检测钙钛矿太阳能电池的缺陷和杂质，从而确保其质量和性能。钙钛矿材料在近红外区域具有独特的反射特性，通过分析900-1700 nm波长范围内的光谱数据，可以评估钙钛矿薄膜的厚度、缺陷和杂质等关键质量信息。这可以使用标准反射探头进行精确的点测量，也可以使用积分球来表征更广泛的区域。

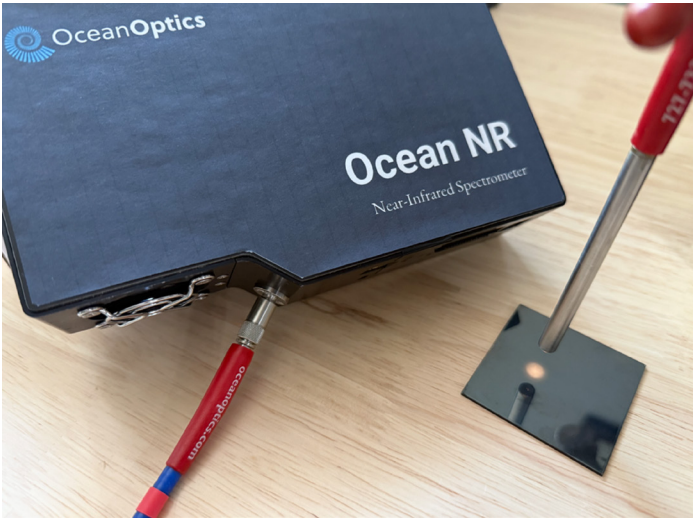


图2：使用反射探头分析钙钛矿板

实验装置

光谱仪	NR 1.7
光源	卤钨灯
光纤	600 μm NIR
采样附件	400 μm NIR 反射探头/积分球
样品	四块工艺参数略有不同的钙钛矿板

反射探头的主要优势在于能够精确控制测量点，并能灵活地改变距离和角度。但如果夹具未固定紧发生意外移动，这些距离和角度的变化可能会导致测量结果不佳。积分球则有一个宽达10 mm的端口，可以提供其暴露区域的整体反射信息，并保持恒定的测量距离和90°测量角，从而获得重复性更高的数据，尽管会牺牲聚焦于特定测量点的能力。

因此，反射探头在研究和实验室环境中广受欢迎，而积分球则在制造环境中的快速质量检查方面具有重要价值。

本研究考察了四块工艺参数略有不同的钙钛矿板，用于探究工艺差异在光谱特征中的体现。通过反射探头测量发现，所有样品在900至1700 nm波段均呈现出可重复的正弦波动趋势。值得注意的是，与其他三个光谱特征更为相似的样品相比，样品1的特征峰整体向短波方向移动，呈现出明显的“蓝移”现象，表明光谱对工艺参数的变化高度敏感。

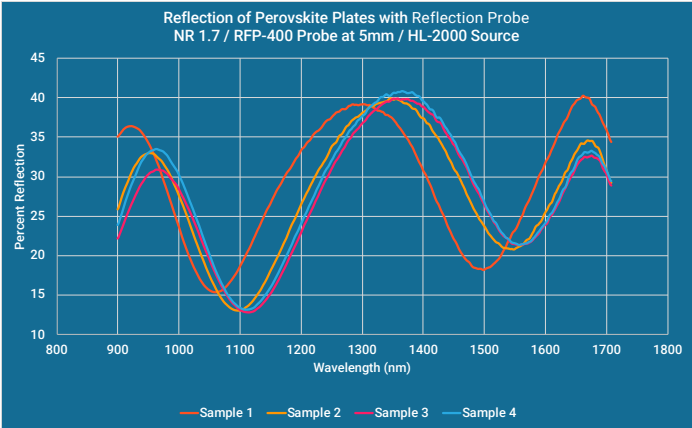


图3：使用反射探头分析钙钛矿板的光谱响应曲线

随后，我们采用积分球对同一样品组进行测量，同样观察到了上述趋势，这验证了两种方法都是有效的。但积分球测得的曲线更为平滑，后三个样品的数据分布也更为集中。这一结果印证了前文所述的积分球测量重复性更高的优势，凸显了其在质量控制（QC）环境中的应用价值。

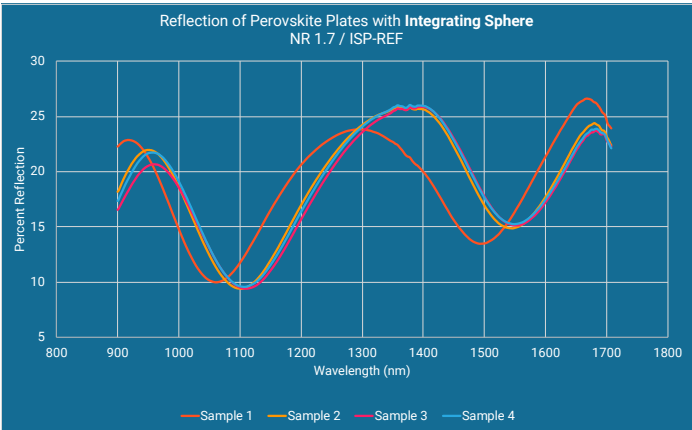


图4：使用积分球分析钙钛矿板的光谱响应曲线

这些光谱曲线并非随机出现，而是光与钙钛矿电池各层结构相互作用的指纹。通过分析这些光谱的位置及偏移量，制造商可以精确调控薄膜厚度、识别缺陷并优化器件的整体性能。

此类小型光谱系统（如本实验使用的NR1.7）兼具科研实验室所需的紧凑性与生产线所需的坚固性，因此非常适用于研发与制造环境。这确保了在研发与生产两种场景间切换时，能够获得一致且有意义的结果，而无需为特定工艺进行大型定制系统的数据转换。

若您从事钙钛矿或相关技术领域，需要在实验室或生产线上进行分析，欢迎联系我们，以深入了解这些系统如何满足您的特定需求。

参考文献

- 1 <https://www.pv-tech.org/ember-global-solar-generation-exceeds-2000twh-2024/>
- 2 “PriceQuotes”. pv.energytrend.com. Archived from the original on 30 June 2014. Retrieved 26 June 2014.
- 3 Kojima, Akihiro; Teshima, Kenjiro; Shirai, Yasuo; Miyasaka, Tsutomu (May 6, 2009). “Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells”. *Journal of the American Chemical Society*. 131 (17): 6050–6051. Bibcode:2009JACHS.131.6050K. doi:10.1021/ja809598r. PMID 19366264.

