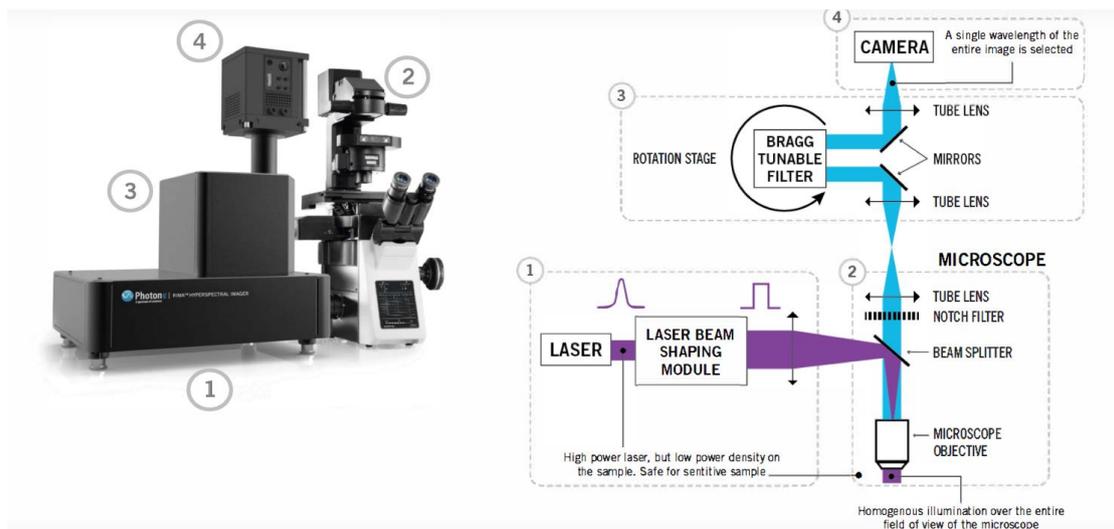


## 高速荧光成像设备在光伏电池领域的应用

太阳能电池是一种通过光电效应或光化学反应直接把光能转化为电能装置。由于太阳能是一种清洁能源，因此光伏技术近年来备受关注。光伏材料的转换效率随着技术的发展也有了显著的提高。例如自从 2009 年日本科学家 Miyasaka 首次报道钙钛矿太阳能电池以来，在短短的几年内，钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从 3.8% 上升到 22.7%。尽管钙钛矿电池拥有诸多优点，但是由于材料的不均一性和无法低成本大规模生产限制了钙钛矿电池的发展。为了解决这些问题，研究人员需要高性能和专业的测试工具研究材料性能的空间分布。

为了解决这些问题，加拿大 Phonton 公司和法国光电能源研究和发展研究所为太阳能电池分析共同研发了高光谱成像设备（IMA™）。基于独特的体布拉格光栅滤波片技术，采用革新的二维成像技术，不同于常规的荧光成像设备，这是一款一次性可全视野成像的设备，可快速获得钙钛矿电池的荧光成像和电致发光成像，用于研究产品的缺陷、约束条件和光电特性的。



与传统的共聚焦显微成像设备相比，高光谱成像设备拥有以下优势：

- 1) 单次整视场成像。与常规的共聚焦显微镜需要逐点扫描或逐行推扫所不同，该高光谱成像系统允许在显微镜下获取整个视场不同波长的像。使用百万像素相机，通过滤波后图像的采集可提供样品表面数百万个点上的光谱信息。这种成像方式将大大减小图像采集时间，与传统成像方式比较时间将减少 2-3 个数量级。例如，采集  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  光谱信息，使用高光谱成像设备只需要大概 8 分钟，但是使用常规共聚焦设备需要几百个小时才能完成。
- 2) 在 PL 成像实验中该系统的激发光源在视野中的强度是均匀分布的。在传统的共聚焦设备中，激发光源是聚焦在一个点上 ( $\sim 1 \mu\text{m}^2$ )，这将导致载流子向没有激光照射的区域迁

移造成载流子复合，使得 PL 信号明显降低，需要将激发光的功率提高到 1000 个太阳的光照这与光伏材料的工作环境严重不符，并对结果的提取与解释带来诸多影响。由于高光谱成像设备的光源是均匀的照射到样品上的，因此避免了上述情况，并且光源功率可从 1-500 个太阳的光照可调。

- 3) 可获得光谱强度的绝对值。PL (photoluminescence) 和 EL (Electroluminescence) 包含了材料或器件的诸多信息，但是传统荧光技术表征提供的数据单位都是 arbitrary units，这并不是一个绝对的数值，这将大大限制了对光谱结果的深度挖掘。为了解决该问题，IRDEP 和 Photon 研发了绝对校准办法，使该高光谱设备可以确定在固定能量的激发光下，样品每个点发射光子的绝对数值。通过这种校准，研究人员可进一步探究普朗克定律，和太阳能电池的外部量子效率 (EQE) 和在给定电压下电致发光的相互关系。以及  $V_{oc}$  和饱和电流等。

## 高光谱成像设备在光伏领域应用实例

### 1) CIS 太阳能电池

如图 2 显示了 CIS 样品的光致发光图像，其中使用的激发光波长为 532nm。整视野成像可以快速探测样品空间上不均匀性，通过该技术研究人员可以监控不同属性在空间上的分布。图 1，为图 2 上所选区域的光谱信息。此外，通过光谱的绝对校正还可以得到设备的光电特性（例如：EQE， $V_{oc}$  等）

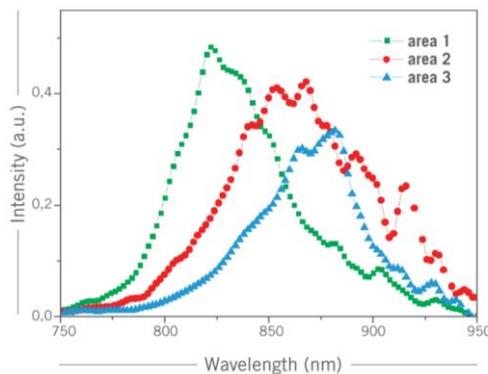


FIG. 1 Spectra from different locations

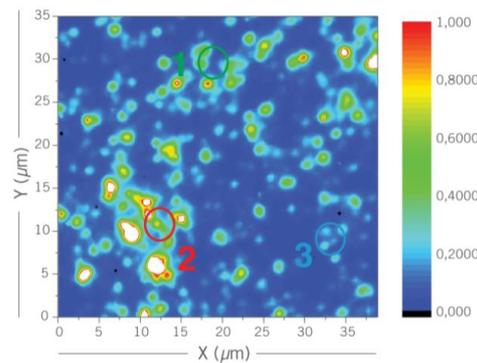


FIG. 2 Integrated photoluminescence intensity  $\lambda_{exc} = 532 \text{ nm}$

### 2) CIGS 微电池

我们主要利用高光谱设备探究了 CIGS 太阳能电池的光致发光光谱成像（532nm，激光强度为 580 个太阳辐射）和电致发光光谱成像（使用源表，

$V_{app} = 0.95 \text{ V}$  )。图 1, 显示了 CIGS 的 PL 和 EL 光谱, 并通过绝对校正, 结合广义普朗克定律分别获得了准费米能级分裂  $\Delta\mu_{eff}$ , 并利用太阳能电池和 LEDS 之间的相互关系, 通过 EL 图谱可以推导出 EQE, 等信息。

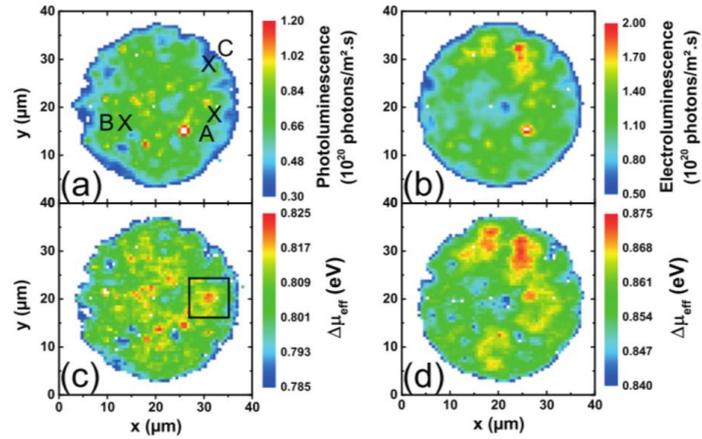


FIG. 1 Hyperspectral images of (a) integrated PL and (b) integrated EL. Using the generalized Planck's law, we deduce (c) and (d)  $\Delta\mu_{eff}$  maps - Credit IRDEP [1].

### 3) GaAs 太阳能电池

我们利用高光谱成像设备采集了 GaAs 太阳能电池的光致发光光谱成像, 利用该设备独有的绝对校准技术, 可以获得在固定能量的激发光下, 样品每个点发射光子的绝对数值, 这一功能可以是科研人员可以从 PL 图像中直接获得太阳能电池的准费米能级分裂图  $\Delta\mu_{eff}$ 。准费米能力具有重要意义, 因为它与电池的最大电压和饱和电流相关。如图 1, 为 GaAs 的准费米能级分裂  $\Delta\mu_{eff}/q$  的二维图, 这是利用 GaAs 太阳能电池的绝对光致发光图谱根据广义普朗克定律计算出来。测量的准费米能级分裂为  $\Delta\mu_{eff} = 1.1676 \pm 0.010 \text{ eV}$ , 在电接触附近 (图 1 中间的垂直蓝线) 和电池的外部边界附近有稍微下降。结果与之前的 GaAs 文献中的研究结果一致。

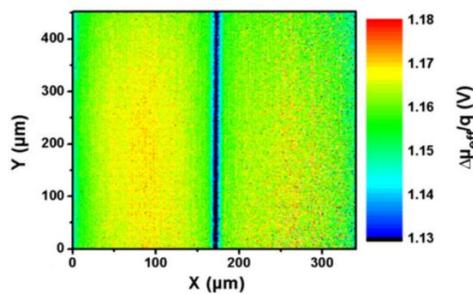
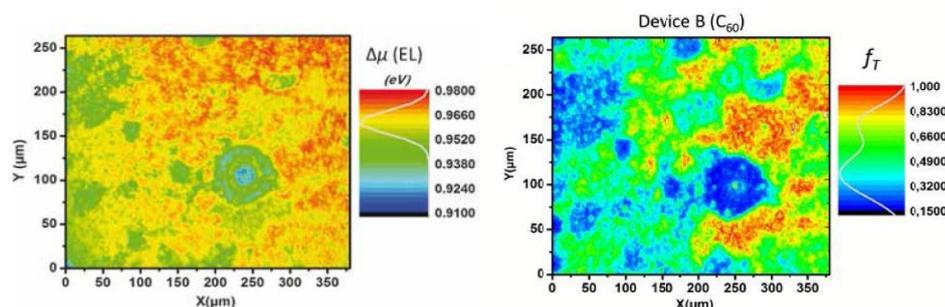


FIG. 1 GaAs quasi-fermi level divided by the charge map ( $\Delta\mu_{eff}/q$ ). This map was calculated from Planck's law using the absolute PL measurements - Credit IRDEP [1,2].

#### 4) 钙钛矿设备

近年来，以  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  为代表的具有钙钛矿晶型的有机金属卤化物在光电领域的应用吸引了广泛的研究兴趣。作为一种新兴的半导体光电转换材料，它具有高消光系数 ( $10^5 \text{ cm}^{-1}$ )、长载流子寿命 ( $\sim \mu\text{s}$ )、低缺陷态浓度、低激子束缚能以及可低成本溶剂制备等诸多优点。基于该类材料的薄膜太阳能电池 (钙钛矿太阳能电池) 的光电转换效率已经超过 22%，超过了多晶硅太阳能电池，具有较好的应用前景。同时，该材料在光电探测、发光、高能射线探测及非线性光学等方面均展现出良好的性能，成为光电物理、材料 (器件) 物理和化学等交叉领域的研究热点。但是关于钙钛矿电池的诸多工作机制还不是很清楚，因此利用高光谱成像设备研究了  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  太阳能电池的主要性能，进行了空间和光谱分辨的 EL 和 PL 成像。EL 采用源表施加的电压范围是 1.05 至 1.2V，PL 使用的是 532nm 的激光 (约 30 个太阳辐射)。通过绝对校准，从 EL 和 PL 光谱直接获得了准费米能级分裂和电子传输效率，如下图所示。



#### 5) 钙钛矿晶体

随着有机钙钛矿太阳能电池快速发展，过去几年寻求灵活，廉价且易于加工的光伏材料取得了新的进展它们具有高载流子迁移率，可见和可调谐带隙的强吸收性使其成为生产低成本太阳能电池板的理想选择。然而，有一个缺点：它们的稳定性是不稳定的，那么更好地了解光物理学和退化机制至关重要。Phonton 公司的高光谱成像平台提供了有力的工具。通过光学测量的办法该设备可以快速表征 2D 和 3D 钙钛矿或全部光伏设备的结构。此外该设备还可以检测以下特性：表面缺陷、相分离、晶界等。如图 1，为钙钛矿晶体的荧光图谱

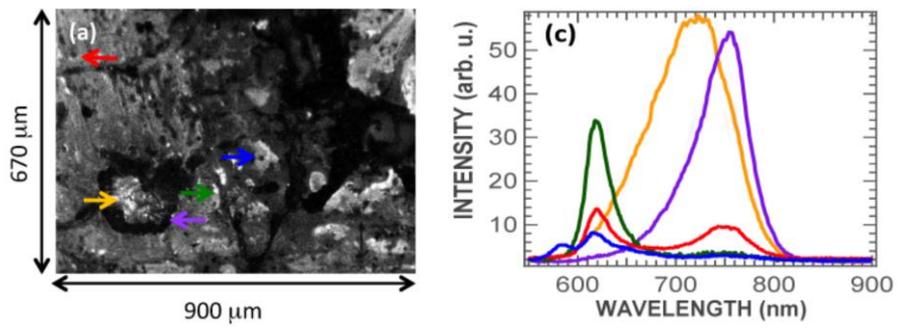


图 2，为钙钛矿材料的透射率成像

