

量子效率/ 光谱响应/ IPCE

▶▶▶ Sep. 15th, 2021

▶▶▶ 在堆栈型硅薄膜太阳能电池之应用
(Thin-film Si tandem solar cell)

目录

- ◆ 什么是量子效率 (Quantum Efficiency) ?
- ◆ 为什么量子效率是创造高效率太阳能电池的最佳工具 ?
- ◆ 量子效率/光谱响应/IPCE在堆栈型硅薄膜太阳能电池 (Thin-film Si tandem solar cell) 之应用

什么是量子效率 (Quantum Efficiency) ?

在说明什么是量子效率 (Quantum Efficiency) 之前，我们先了解光谱响应。

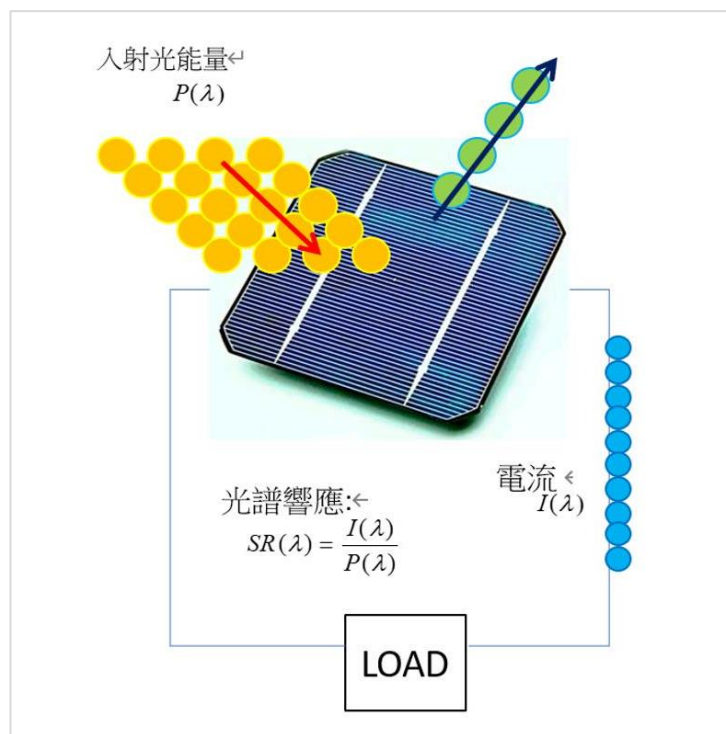
光谱响应 (Spectral Responsivity, SR) 是评价光辐射侦测组件 (如光侦测器、亮度计、太阳能电池等等) 光电转换能力的指标，也就是入射光子-电子转换的效率 (Incident Photon-Electron Conversion Efficiency, IPCE)。例如，太阳能电池也是将光转换为电能的一种光电组件，所以光谱响应也是评价其转换效率的重要指标。

光谱响应 $SR(\lambda)$ 可写为：

$$SR(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)}, \quad \left(\frac{Amp}{Watt} \right)$$

其中， $P(\lambda)$ 为各波长入射光能量，以瓦特 (Watt) 为单位；为太阳能电池收到入射光后转换成的电流，以安培 (Amp) 为单位。其物理意义为：太阳能电池接收一瓦特的光能可产生多少安培电流的能力。

光谱响应 亦可称为量子效率 (Quantum Efficiency, QE) 或 IPCE (Incident Photon-Electron Conversion Efficiency, 入射光子-电子转换效率) 。将波长 的入射光能量转换成光子数目 , 而电池产生、传递到外部电路的电流换算成电子数 , 则光谱响应可代表每一入射的光子能够转换成传输到外部电路的电子的能力 , 称为量子效率 (Quantum Efficiency, QE) , 单位以百分比来表示。这也可称为入射光子-电子转换效率 IPCE 。



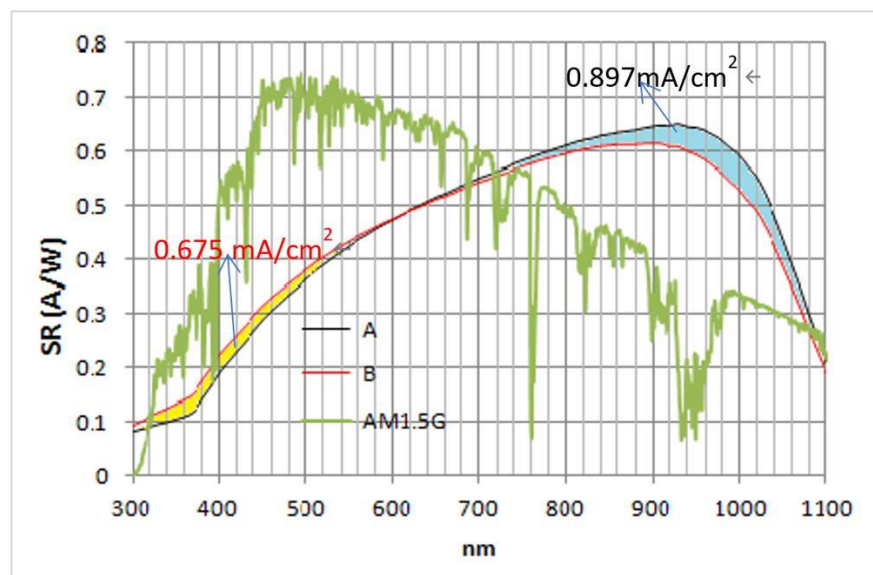
(图1) 太阳能电池量子效率/光谱响应/ IPCE原理示意图。

为什么量子效率是创造高效率太阳能电池的最佳工具？

量子效率/光谱响应反应了太阳能电池对不同波长的光电转换效率，而太阳能电池转换效率的好坏，受到了电池本身材料、制程、结构等因素影响，使其不同波长有不同的转换效率。利用光谱响应技术来检测、分析电池在不同条件下，所造成转换效率的变化，可以分析制程的优劣，并找出相关提高效率的关键因素。

(图2) 为两硅晶电池A、B经过两种制程后所测得的光谱响应A与B，由光谱响应结果可以得知A电池的效率较高，主要是因为在700~1100 nm波段的转换效率高于B电池，所贡献短路电流较B电池高0.897 mA/cm²。但在300~500 nm，A的效率略低于B电池，短路电流密度较B电池低0.675 mA/cm²。因此，A电池整体短路电流密度仍较B电池高了 (0.897-0.675) =0.222 mA/cm²。

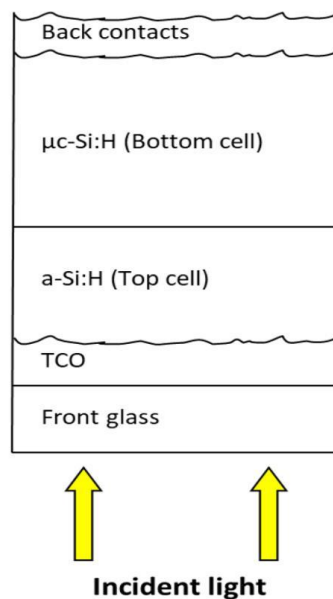
而不同波段代表电池不同层的结构与制程，将于下节中有较详细的介绍。因此，可针对不同波段反映的结果，去改进A电池在短波长段的制程，以再提升A电池的效率。由光谱响应的结果，可以相当容易的来分析太阳能电池的优劣，作为提升、改善效率的指导方针。



(图2) 不同制程条件下太阳能电池光谱响应与AM1.5G的示意图。

量子效率/光谱响应/IPCE在堆栈型硅薄膜太阳能电池 (Thin-film Si tandem solar cell) 之应用

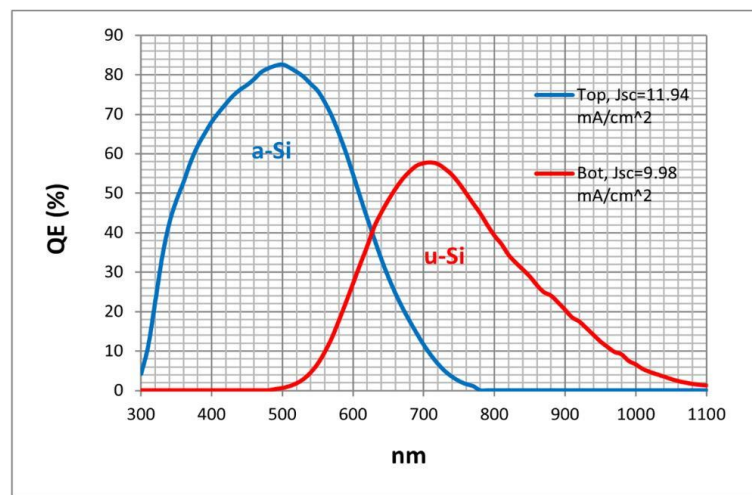
硅晶材料价格昂贵，而硅薄膜材料用料少（硅芯片 $\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ ；硅薄膜 $< 5\text{ }\mu\text{m}$ ，材料用料不到硅芯片的5%）。因此，自2006年起硅薄膜太阳能电池吸引了许多研究与厂家投入。在转换效率上，商用非晶硅薄膜模块的极限约为7%，相较于堆栈型硅薄膜太阳能电池模块能够超过10%，使得堆栈式硅薄膜太阳能电池已成市场主流。（图3）是双层堆栈型太阳能电池的组件结构。



（图3）堆栈型硅薄膜太阳能电池结构图；在TCO玻璃基板上先制作非晶硅薄膜，接着制作高掺杂浓度的接口层（intermediate layer）后，制作微晶硅薄膜与电极。

高效率堆栈型硅薄膜组件结构设计最重要的议题是需要各层电池的短路电流密度接近，称为电流匹配（current match）。在检测各层电池的短路电流密度是十分困难的，无法使用一般的电流-电压曲线仪测得各层电池的电流。量子效率/光谱响应/IPCE光谱技术是目前唯一能独立量测出各层电池短路电流密度的技术。使用量子效率/光谱响应/IPCE光谱技术测出各层的短路电流密度，当两个子电池串联时，总输出电流是由较小电流的电池来决定，并可得知目前电池的电流由哪个子电池来控制，及要提高整体效率要针对哪一个子电池的制程进行改善。

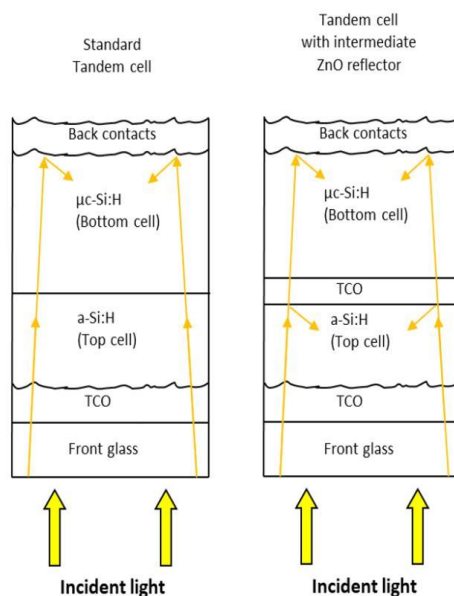
(图4) 是利用量子效率/光谱响应/IPCE光谱技术量测非晶硅-微晶硅堆栈型硅薄膜太阳能电池各层的量子效率/光谱响应/IPCE光谱，此光谱对AM1.5G标准太阳光谱做计算可以得到各层的短路电流密度。上层电池（非晶硅层）与下层电池（微晶硅层）的短路电流密度分别为 11.94 mA/cm^2 及 9.98 mA/cm^2 ，因此整体电池的输出电流密度是由下层的微晶硅电池来决定。若是利用太阳光模拟器与电流-电压曲线仪，仅能得到一个输出电流密度，无法知道各层电池的好坏，更无法订定明确的制程改善方向与目标^[2]。以(图4)的结果为例，利用量子效率/光谱响应/IPCE光谱技术测出是由下层微晶硅电池限制了整体电池的输出电流，因此可以将制程改善的方向放在下层微晶硅电池的制程，藉由提高微晶硅电池的转换效率，使得上、下层电流密度匹配，即可提高整体效率，无需再设计更多的实验条件来验证是何层电池限制了整体电池效率，可大幅提升制程开发、效率改进的时程与成本。



(图4) 非晶硅-微晶硅堆栈型硅薄膜太阳能电池上层电池与下层电池的量子效率/光谱响应/IPCE光谱。

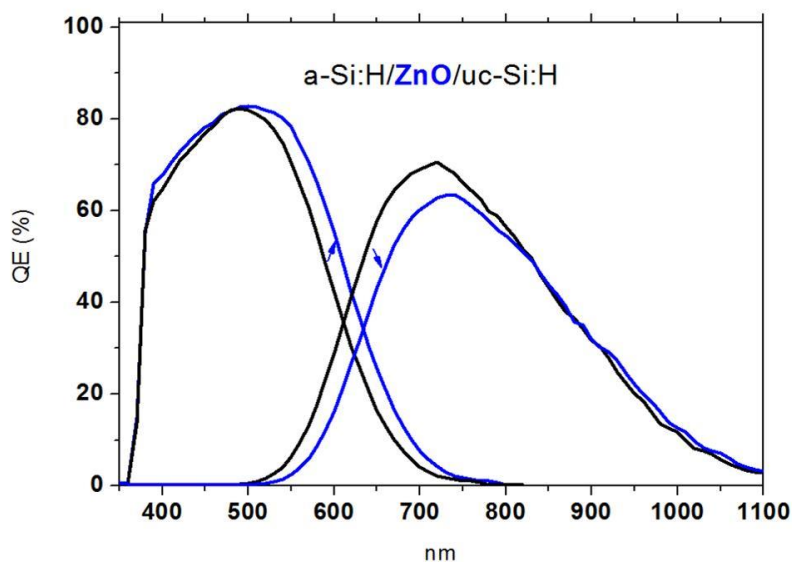
任何在堆栈型太阳能电池制程上参数的改变，均可由量子效率/光谱响应/IPCE光谱得知改善结果。以非晶硅-微晶硅堆型型太阳能电池为例，假设上层电池的电流密度小于下层电池的电流密度，输出电流密度由上层电池来决定。若要调整上下层电池彼此的电流密度，以达到接近1：1最佳的电流密度匹配条件，可由电池的结构来着手。

例如，为增加上层电池的电流密度，可以在上下层电池间增加一层中间反射层如 ZnO，将原本会穿透上层非晶硅电池的光部分反射回上层电池中，形成光线捕捉（Light trapping）的功用，提升上层电池的电流密度。（图5）即为在标准双层非晶硅-微晶硅堆栈型太阳能电池中增加中间层ZnO做为光线捕捉的结构。



（图5）标准双层堆栈型电池结构及增加中间层ZnO做为光线捕捉的结构。

(图6) 为两种结构的量子效率/光谱响应/IPCE光谱测试的结果。由(图6)可以观察到增加了ZnO层后，上层非晶硅电池在500 nm ~ 700 nm波段效率显著提升，如所预期的ZnO达到光线捕捉的功能，也使上层非晶硅电池的短路电流密度增加。由于500 nm ~ 700 nm波段的光被捕捉在上层电池，使得进到下层电池的500 nm ~ 700 nm波段的光线减少，因此下层微晶硅电池在此波段的电流密度降低，以致短路电流密度下降。因此，我们可以调整ZnO层的条件，并利用量子效率/光谱响应/IPCE光谱来作为结果的检测，将上下层电池在短路电流密度上调整的更佳匹配，以提升整体电池的输出效率。我们可以了解到量子效率/光谱响应/IPCE光谱可以容易的检测出堆栈型硅薄膜电池微结构上的变化，做为制程改进上的有力依据。[3]



(图6) 增加ZnO中间层制程前后的光谱响应/量子效率光谱。

在现今竞争激烈的太阳能产业中，不断地降低成本，提高光电转换效率，是太阳能厂商脱颖而出的必要条件！太阳能电池转换效率的提升，关键在于制程及材料的改善。测量太阳能电池的量子效率/光谱响应/IPCE，能了解太阳能电池在不同光波长下光电转换效率的情形，使用者可依据光谱响应的结果快速找到制程的问题点加以改善，更有助于效率的提升。

光焱科技提供专业量子效率系统及太阳能电池量子效率测量解决方案，如有相关需求欢迎与我们联系，我们的专业团队将为您提供协助！

阅读更多：

- ◆ [QE-R 量子效率系统](#)
- ◆ [量子效率/光谱响应/IPCE量测技术 01：创造高效率电池的绝佳工具](#)

参考文献

[1] www.enli.com.tw

[2] A.V. Shah et al./Solar Energy Materials & Solar Cells 78 (2003) 469-491

[3] Oerlikon Solar – Constantine, 24 Sep 08

**Thank you for your
time and attention.**

ENLITECH CONFIDENTIAL



ENLITECH
光焱科技



ENLITECH

光焱科技股份有限公司

- 量子效率/光谱响应/IPCE 测量科学仪器研发生产
- 影像感测/光二极管领域/半导体领域测试系统
- ISO/IEC 17025 (TAF) 校正实验室 [QE/SR/Jsc认证服务](#)
- R&D 创新研发、技术整合、客户端解决方案

Visit our website: www.enlitechnology.com



致力于光电测量和钙钛矿电池领域，提供整合解决方案与创新服务



台湾总公司：高雄市路竹区路科五路96号1楼
TEL/ +886-7-6955669

中国销售服务中心：上海市浦东新区祖冲之路1505弄100号3幢5楼1室
TEL/+86-21-31338780 / 18512186724

Email: geservice@enli.com.tw