



ENLITECH
enlighten your idea.

一下就懂！ 太陽光模擬器基礎原理

為何要使用太陽光模擬器!?
跟真實的太陽光有甚麼不同!?
3A級太陽光模擬器，哪3A!?

光焱科技

ENLI TECHNOLOGY CO., LTD.

Introduction

- 太陽光模擬器 (Solar Simulator) 主要用途為呈現真實的太陽幅射光譜分佈、光斑大小、輻照強度、輻照均勻性、輻照穩定性等等物理特徵。
- 隨著太陽能的延伸利用與技術開發，人們在各式應用領域，使用太陽光模擬器進行材料、生物化學、建築、環境研究等相關測試。



Outline

1. 太陽光模擬器原理

- 太陽光頻譜
- 大氣質量：AM0、AM1、AM1.5
- AM 1.5G與AM 1.5D

2. 太陽光模擬器國際規範

- 常見國際標準規範
- 輻射照度、光譜匹配度、輻照不均勻度、輻照不穩定度

3. 如何選擇太陽光模擬器

- 穩態模擬器、多次閃光模擬器、單脈衝模擬器
- 3A 穩態太陽光模擬器

Outline

1. 太陽光模擬器原理

- 太陽光頻譜
- 大氣質量：AM0、AM1、AM1.5
- AM 1.5G與AM 1.5D

2. 太陽光模擬器國際規範

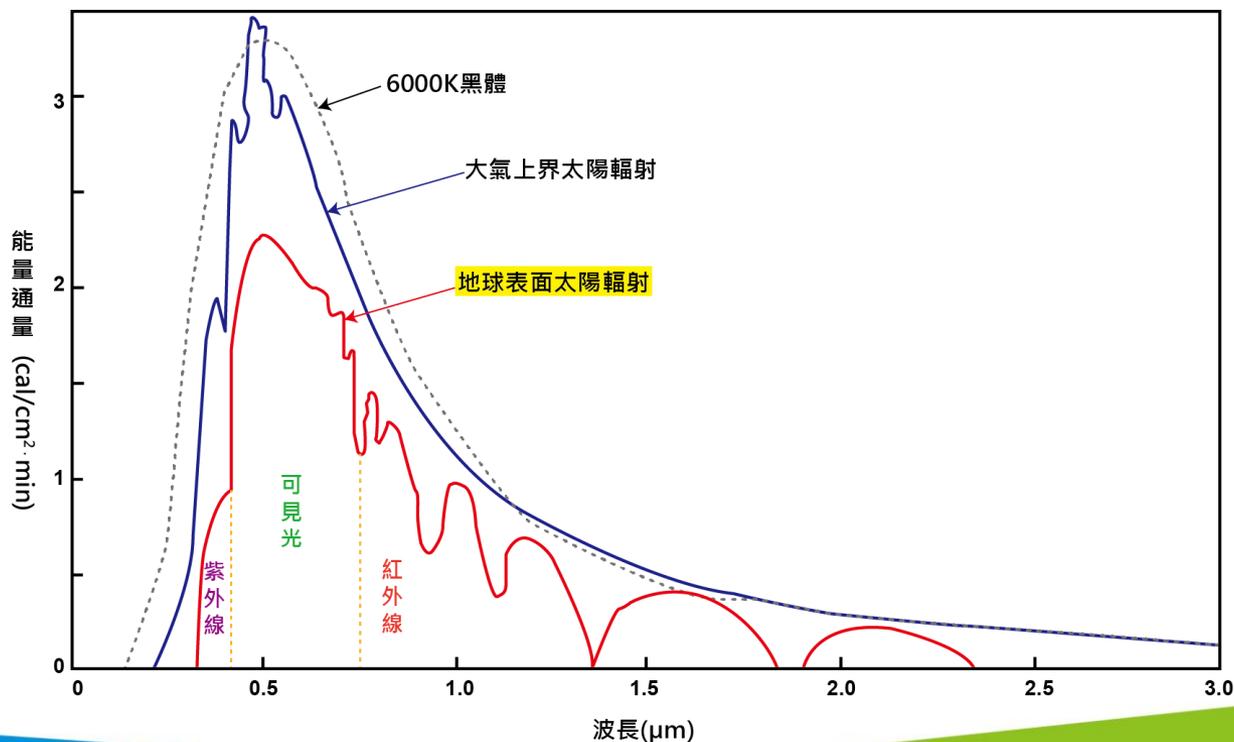
- 常見國際標準規範
- 輻射照度、光譜匹配度、輻照不均勻度、輻照不穩定度

3. 如何選擇太陽光模擬器

- 穩態模擬器、多次閃光模擬器、單脈衝模擬器
- 3A 穩態太陽光模擬器

1-1 太陽光譜分布

- ▶ **太陽光譜**：太陽發射的電磁輻射在大氣頂上，隨波長的分布就稱為太陽光譜。
- 太陽光譜會隨著時間、大氣層厚度、雲層厚度等因素，影響太陽光頻譜分布與強度，經由空氣分子的散射也會產生許多漫射光。
- 在光伏產業的應用，關注的是**地球表面太陽輻射（太陽光在地表上頻譜分布與輻射照度）**。由於太陽輻射穿過大氣層時，受到大氣層中的空氣分子、水氣、灰塵所散射；且受到大氣層中的氧、臭氧、水和CO₂的吸收，因此，太陽輻射經過大氣而達到地面有顯著的衰減。

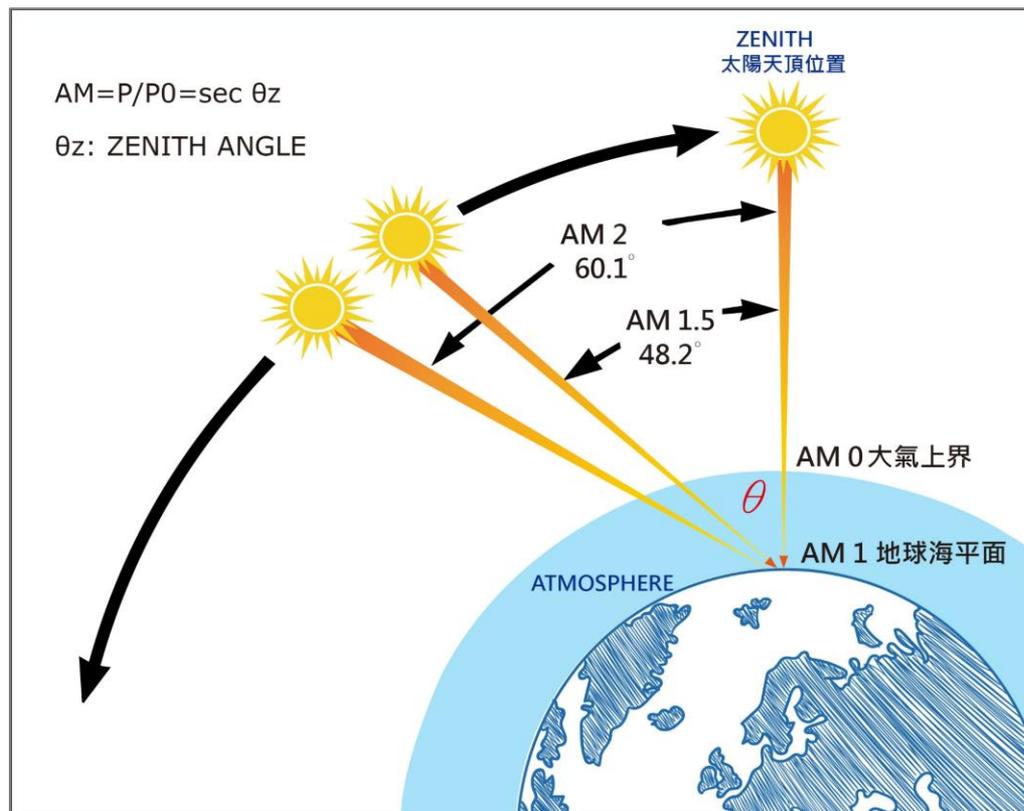


1-2 大氣質量 AM0、AM1、AM1.5

▼ 大氣質量(Air Mass, AM)：定義為大氣對地球表面接收太陽光的影響程度；不同的Air Mass亦代表不同的太陽光譜。

- 太陽光的仰角將隨時間而變動；當太陽在不同仰角時，光線會經過不同厚度的大氣層，亦即Air Mass。

- **AM 0**：當太陽光垂直地表時，大氣層以外的太陽光平均照度（亦稱為太陽常數）。
- **AM 1**：太陽光垂直入射，穿過大氣層到達地表的平均輻射照度。
- **AM 1.5**：太陽光以夾角 $\theta=48.2^\circ$ 穿過1.5倍大氣層，到達地表的平均輻射照度。
- **AM 2**：太陽光以夾角 $\theta=60.1^\circ$ 穿過2倍大氣層，到達地表的平均輻射照度。



1-3 AM 1.5G與AM1.5D的差異

- 太陽輻射是指太陽向宇宙空間發射的電磁波和粒子流。地球所接受的太陽輻射能量僅為太陽總輻射量的二十億分之一。
- 常見的太陽輻射名詞為：
 - **直達輻射(Direct)**：太陽光穿透大氣層時，一部分直達地面，不改變其輻射方向。
 - **漫射輻射(Diffuse)**：另一部分被大氣層反射和散射後發生方向改變的太陽輻射。
 - **全空輻射(Global)**：經過大氣層削弱後到達地面的太陽直達輻射和漫射輻射之總和。

其三者關係如下：

$$\text{Global} = \text{Direct} * \cos(\theta) + \text{Diffuse}$$

- **AM 1.5D**：太陽光以夾角 $\theta=48.2^\circ$ 穿過1.5倍大氣層厚度，**直達**測試平面的直達輻射。
- **AM 1.5G**：太陽光以夾角 $\theta=48.2^\circ$ 穿過1.5倍大氣層厚度，到達測試平面的**全部輻射照度**，包含直達輻射和各角度的漫射輻射。

-
- 由於太陽能電池主要是受光照影響，在不同地區、不同時間，太陽能電池的發電效果則明顯不同。
 - 為了統一評價太陽能電池的發電效果，制訂國際標準測試條件：

AM 1.5, 1000W/m², 25 °C (AM=1/cosθ)

太陽常數 (Solar Constant) : AM 0 =1366 W/m²

▼ **太陽常數(Solar Constant)**：單位面積受到垂直入射的平均太陽輻射強度。

■ 以人造衛星測得的數值是每平方米約1366瓦特

■ 地球的截面積是127,400,000 平方公里，故整個地球接收到的功率是 1.740×10^{17} 瓦特。

■ 由於太陽表面常有有黑子等太陽活動，故太陽常數並不是固定不變的數值；一年當中變化幅度約在1 %左右。

Outline

1. 太陽光模擬器原理

- 太陽光頻譜
- 大氣質量：AM0、AM1、AM1.5
- AM 1.5G與AM 1.5D

2. 太陽光模擬器國際規範

- 常見國際標準規範
- 輻射照度、光譜匹配度、輻照不均勻度、輻照不穩定度

3. 如何選擇太陽光模擬器

- 穩態模擬器、多次閃光模擬器、單脈衝模擬器
- 3A 穩態太陽光模擬器

2-1 太陽光模擬器國際規範

- 由於太陽光穿過大氣層厚度不同，故太陽光頻譜分布與強度，會經過空氣分子的散射而產生許多漫射光，因此各種國際標準對於太陽光模擬器的頻譜分布亦不大相同，[詳見下表](#)：

AM條件	國際規範	輻射照度(W/m ²)
AM 0	ASTM E490	1366.1
AM 1.5 G	ASTM E173	1000.4
AM 1.5 D	ASTM E173	900.1
AM 1.5 G	IEC 60904-3	1000

- **ASTM (美國材料與試驗協會)**：ASTM E173 提供了AM1.5G和AM1.5D的標準太陽光譜輻照度分布，用來評估地表用太陽能組件與材料的模擬與評價。
- **IEC (國際電工委員會)**：IEC 60904-3國際標準定義的AM1.5G光譜輻照度數據，常用以地面**光伏太陽能裝置**或**太陽能電池相關測量**領域。

2-2 太陽光模擬器 IEC 60904標準規範

- 一般太陽能電池應用領域中，太陽光模擬器遵循IEC 60904標準規範之四大項目：



輻射照度(irradiance)

符合 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的輻射照度的模擬太陽光。且 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 是由標準元件，如標準太陽能電池(reference cell)測得的數值為標準值。



光譜匹配度(Spectral Match)

符合IEC 60904 中AM1.5光譜在波長 $400\sim 1,100\text{ nm}$ 的能量分布比例。



輻照不均勻度(Non-uniformity)

指在指定測試區域的輻照度應達到一定的均勻性。



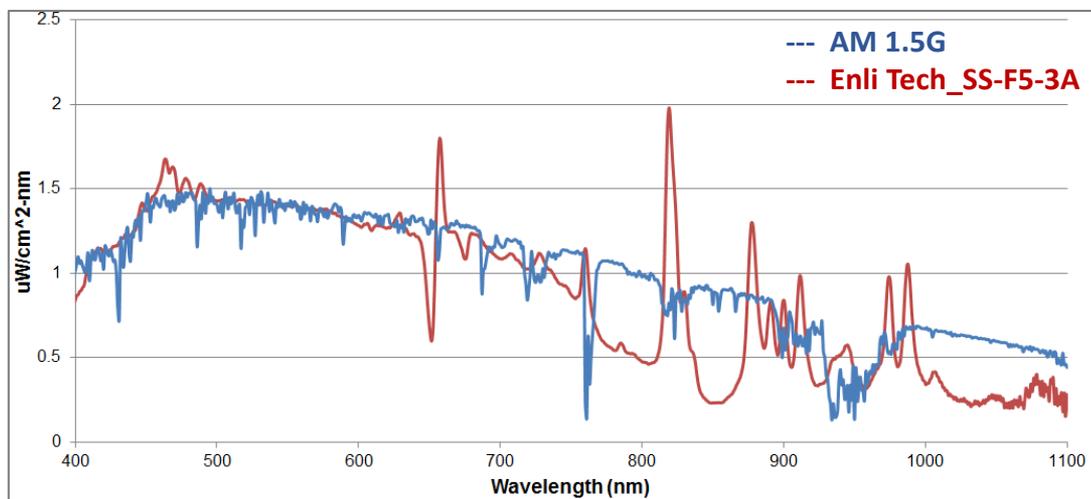
輻照不穩定度(Temporal Instability)

太陽光模擬器輸出光束長時間保持穩定的光照度，以確保太陽能電池效率測試之準確性。

➤ 光譜匹配度 (Spectral Match)

- 一般常見的矽晶太陽能電池，其有效的吸收頻譜在400~1,100 nm。在此波長範圍外的太陽光無法使電池產生電流發電，因此IEC 60904-9規範中，只規範在400~1,100 nm範圍內。
- AM 1.5G的太陽光光譜能量在波長400~1,100 nm的能量分布比例，太陽光模擬器的光頻譜應符合下表中所示的百分比，規範中也有訂定誤差範圍，依照誤差值評定太陽光模擬器的等級。

波長範圍 (nm)	輻射照度比例
400~500	18.4 %
500~600	19.9 %
600~700	18.4 %
700~800	14.9 %
800~900	12.5 %
900~1,100	15.9 %



➤ 輻照不均勻度 (Non-uniformity)

- 太陽光模擬器在照射平面上的不均勻度，可利用偵測器，例如標準太陽能電池量測照射面上的輻射照度分布後，再經由下列公式計算：

$$\text{Non-uniformity (\%)} = \frac{[\text{Max Irradiance} - \text{Min Irradiance}]}{[\text{Max Irradiance} + \text{Min Irradiance}]} \times 100\%$$

- IEC 60904-9針對偵測輻照度的偵測器尺寸亦有以下規範：

偵測器面積需小於測試平面面積除以64，且應小於400 cm²。

3.75E-03	3.75E-03	3.75E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.75E-03	3.75E-03
3.76E-03	3.76E-03	3.77E-03	3.77E-03	3.76E-03	3.77E-03	3.75E-03	3.75E-03
3.77E-03	3.77E-03	3.78E-03	3.78E-03	3.79E-03	3.77E-03	3.75E-03	3.75E-03
3.78E-03	3.78E-03	3.80E-03	3.81E-03	3.80E-03	3.79E-03	3.76E-03	3.76E-03
3.79E-03	3.80E-03	3.81E-03	3.82E-03	3.81E-03	3.79E-03	3.75E-03	3.76E-03
3.78E-03	3.79E-03	3.80E-03	3.82E-03	3.82E-03	3.78E-03	3.76E-03	3.75E-03
3.76E-03	3.77E-03	3.79E-03	3.77E-03	3.79E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.75E-03
3.75E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.76E-03	3.75E-03	3.75E-03

MAX=0.00382

MIN=0.00375

Non-uniformity=± 0.92%

➤ 輻照不穩定度(Temporal Instability)

- 穩定度指標，要求太陽光模擬器輸出光束長時間保持穩定的光照度，以確保太陽能電池效率測試之準確性；其計算公式如下：

$$Instability (\%) = \frac{[Max Irradiance - Min Irradiance]}{[Max Irradiance + Min Irradiance]} \times 100\%$$

- 穩定度依照IV測量系統的不同，可細分為：
 - **瞬時不穩定度(Short-term Instability, STI)**：在IV量測過程中，每一個資料點包含光照度、電壓、電流等三筆資訊，如果這三筆資料由不同channel量測，並且取值的時間點差在10 ns之內，瞬時穩定度即為Class A等級。
 - **長時不穩定度(Long-term Instability, LTI)**：在整個IV量測時間內，整個資料擷取時所量測到的資料組的光照度變化。

2-3 太陽光模擬器等級評定標準

- 依據光譜匹配度、輻照不均勻度、輻照穩定度項目，訂定誤差範圍，按照誤差值評定太陽光模擬器的等級，共分為A、B、C三級，A級的光譜符合度最佳！
- 太陽光模擬器等級評定標準表：

項目 \ 等級		Class A	Class B	Class C
光譜匹配度		0.75-1.25	0.6-1.4	0.4-2.0
輻照不均勻度		$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$
輻照不穩定度	STI	$\leq 0.5\%$	$\leq 2\%$	$\leq 10\%$
	LTI	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$

Outline

1. 太陽光模擬器原理

- 太陽光頻譜
- 大氣質量：AM0、AM1、AM1.5
- AM 1.5G與AM 1.5D

2. 太陽光模擬器國際規範

- 常見國際標準規範
- 輻射照度、光譜匹配度、輻照不均勻度、輻照不穩定度

3. 如何選擇太陽光模擬器

- 穩態模擬器、多次閃光模擬器、單脈衝模擬器
- AAA穩態太陽光模擬器

3-1 三種太陽光模擬器

- 根據太陽模擬器光源的脈衝特性和產生光的方式可以將太陽模擬器分為：



穩態太陽光模擬器 (Steady-State)

採用穩態光源作為太陽模擬器光源，大多在科研領域實驗室測量太陽能電池效率所使用，優點是提供連續的穩態光輸出，測量IV曲線時，能更加準確及穩定。



多次閃光太陽光模擬器 (Multi-Flash)

通過一個持續時間為毫秒級的光脈衝完成IV曲線，對測試速度要求很高；缺點是光譜測量困難。。



單脈衝太陽光模擬器 (Single-Pulse)

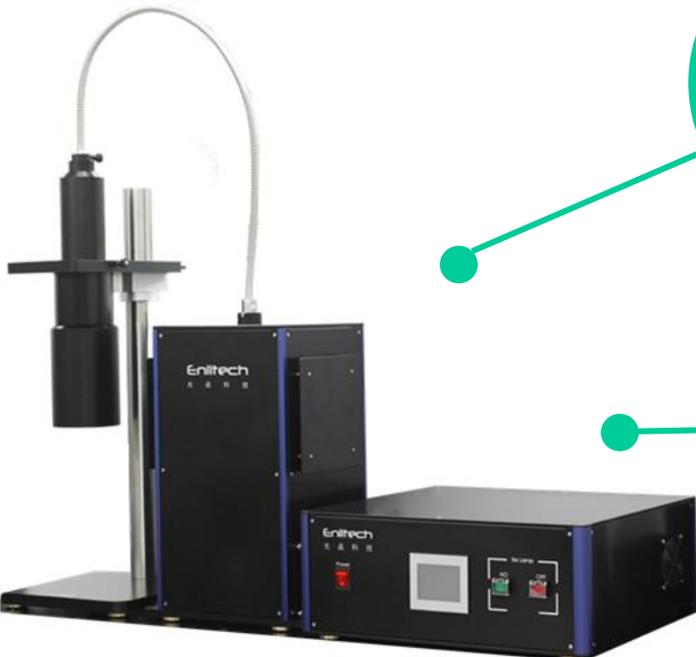
通過多次的閃光測量完成一個IV曲線上信號的採集，由於每次閃光的光強可能不同，測試的速度慢且重複性不高。

➤ 穩態太陽光模擬器的優點

- 在光伏產業，採用太陽光模擬器進行太陽能電池/組件效率性能測試，搭配[電流電壓特性曲線測量軟體](#)，測量太陽能電池的IV曲線，獲得太陽能電池的各式參數（ $I_{sc}/J_{sc}/J_{max}/V_{oc}/P_{max}/V_{max}/I_{max}/Efficiency/FF/R_s/R_{sh}$ 等）；研究人員利用這些參數，評價太陽能電池的性能、製備工藝及效率研究。
- 因此，選擇一台可靠、高信價比的[穩態太陽光模擬器](#)，能準確地測量出太陽能電池的特性結果，不僅能幫助研究員進行製備工藝的改進，更能提升太陽能電池效率的研發。

項目	優點	測試範圍
穩態太陽光模擬器 (Steady-State Solar Simulator)	<ol style="list-style-type: none">1. 擁有長時間連續的穩態光源輸出2. 電子負載可通用精確源表3. 對電池響應無時間要求4. 不同光斑大小可供選擇 (Beam Size: 50 mm/ 70 mm/ 100 mm/ 160 mm/ 200 mm)	<ol style="list-style-type: none">1. 太陽能電池/組件2. 熱斑測試 hot-spot test3. 光浸潤實驗 light soaking

3-2 選擇穩態太陽光模擬器 三大要點



IEC 60904
國際規範

- AAA級太陽光模擬器標準

- 光譜匹配度 (A)
- 輻照不均勻度 (A)
- 輻照不穩定度 (A)

高穩定
光強

- 光源分布均勻
- 自動調光強功能

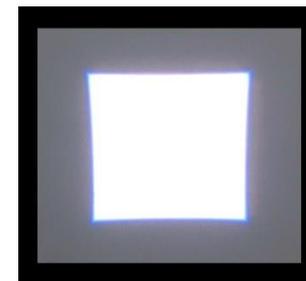
高機動性
整合應用

- 光纖導光功能
- 自由調整出光方向
(上下左右)
- 與手套箱整合應用

Enli Tech AAA穩態太陽光模擬器

- SS-F5-3A穩態太陽光模擬器 (光斑尺寸：50 x 50 mm)

為光焱科技以高端先進技術，研發出最接近真實太陽光頻譜分布，具備最長效之人造模擬光源，專為量測太陽能電池轉換效率。



- 符合IEC 60904-9與ASTM E927國際標準之輻射照度、光譜匹配度、不均勻度和時間穩定度的AAA級穩態太陽能模擬器，是最適合做為檢測實驗室及國家質量單位的穩態太陽光模擬器。



IEC 60904-9 國際標準	A 級範圍	Enli Tech SS-F5-3A 等級
光譜匹配度	0.75-1.25	A
輻照不均勻度	2 %	A
輻照不穩定度	2 %	A

➤ 自由調整出光方向，整合應用實驗室設備

- SS-F5-3A採用光纖導光功能，將光源均勻分布於照射面積上。
- 高機動性能，可配合實驗室需求與場所，任意移動機台並自由調整出光方向，並可與手套箱整合使用，適用各式領域應用。
- 選配光強度調整光圈，量測自動光強度變化，[適用於各式太陽能電池研究開發](#)。



向上出光 ↑ ↑ ↑



向下出光 ↓ ↓ ↓

→更多應用方案：www.enlitechnology.com

➤ 多種光斑尺寸的太陽光模擬器

- 您可依照測試太陽能電池之尺寸需求，選擇不同的光斑尺寸：
- 適用於各式太陽能電池測試
 - [鈣鈦礦太陽能電池](#)
([Perovskite Solar Cells](#))
 - 晶硅太陽能電池
 - 非晶硅薄膜太陽能電池
 - 染料敏化太陽能電池
 - 銅銦鎵硒太陽能電池
 - III-V族多元化合物太陽能電池
 - 有機太陽能電池



致力於光電測量和鈣鈦礦電池領域，提供整合解決方案與創新服務



ENLITECH
光 焱 科 技

- 量子效率/光譜響應/IPCE 測量科學儀器研發生產
- 鈣鈦礦太陽能電池(Perovskite Solar Cell)應用服務
- ISO/IEC 17025 (TAF) 校正實驗室 [QE/SR/Jsc認證服務](#)
- 太陽能電池、發光材料/器件測樣服務
- R&D 創新研發、技術整合、客戶端解決方案

Visit our website: www.enlitechnology.com



台灣總公司：高雄市路竹區路科五路96號1樓
TEL/ +886-7-6955669
geservice@enli.com.tw

