

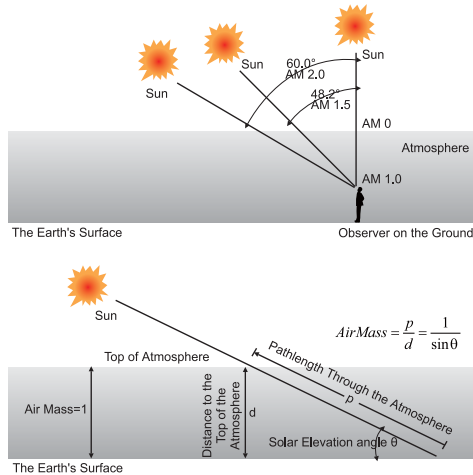
# 光电测试

## 基础知识介绍

### 太阳常数和大气质量

太阳常数和大气质量是描述太阳辐射与大气吸收情况的物理量。在地球大气层上界，与阳光垂直的单位面积上，单位时间所得到的太阳总辐射能量叫做一个太阳常数。国际标准中将太阳看成不变的光源，并且不考虑大气吸收的影响，则一个太阳常数的标准值为  $1367\text{W}/\text{m}^2$ 。

在地面上任何地方都不能排除大气吸收对太阳辐射的影响，因此引入大气质量（air mass, AM）的概念。



可以看出，当太阳高度角为  $90^\circ$  时，海平面处大气质量为 AM 1；外层空间不通过大气的情况为 AM 0；通常，接近人类生活现实的太阳高度角  $48.2^\circ$  的情况为 AM 1.5。由于当太阳光照射到地表时，由于大气和地面存在散射、折射等因素，故针对于地表光谱辐照度分布有 AM 1.5G 与 AM 1.5D 的区别。其中，AM 1.5G 为包括有散射、折射等的太阳光谱辐照度分布，而 AM 1.5D 为只包括直射的太阳光谱辐照度分布。通常，地面用光伏器件测试使用的的光谱辐照度用 AM 1.5G 光谱为标准。

### 标准测试条件和标准太阳能电池

为了使太阳能电池或组件的光伏性能测试具有可比性，太阳光伏能源系统标准化技术委员会规定了标准测试条件。如果不是在标准条件下进行测试，必须将所测数据修正到标准测试条件。

地面用太阳能电池的标准测试条件是：测试温度  $25^\circ\text{C}$ ，光源的光谱辐照度为  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，并具有标准 AM 1.5 太阳光谱辐照度分布。

航天用太阳能电池的标准测试条件是：测试温度  $25^\circ\text{C}$ ，光源的光谱辐照度为  $1367\text{W}/\text{m}^2$ ，并具有标准 AM 0 太阳光谱辐照度分布。

由于太阳能电池的响应与入射光的波长有关，入射光的光谱分布将严重影响所测太阳能电池的性能。为了减小测量的误差，需选用具有与被测电池基本相同光谱响应的标准太阳电池来调整光源的辐照度。因此，使用具有不同光谱响应范围的标准太阳电池，通过标定在标准测试条件下的短路电流，即可调整 I-V 测试系统光源的总辐照度。同时，如果标准太阳电池已经标定出绝对光谱响应曲线，则其也可以用于太阳能电池光谱响应或量子效率的测试。

标准太阳电池的标定值，必须每年由权威机构标定一次，以确保其准确性。

### 光伏电流-电压特性测试（I-V特性测试）

太阳能电池是直接把光能转换成电能的光伏器件，对电池性能的评估主要是以其光电转换性能为准。I-V 特性测试是最直接的给出太阳能电池光电性能参数的测试。

#### 短路电流 $I_{sc}$

当太阳能电池正负极短路时，电池输出的电流就是短路电流。短路电流随着光强的变化而变化，当在无光照情况下测试得到的电流值为电池的暗场电流。

#### 短路电流密度 $J_{sc}$

太阳能电池单位面积输出的短路电流，就是短路电流密度。

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{S_{cell}}$$

#### 开路电压 $V_{oc}$

当太阳能电池正负极开路时，电池正负极之间的电压就是开路电压。开路电压一般与电池片的材料有关，不随电池片的面积增减而变化。

#### 峰值功率 $P_m$

太阳能电池片在正常工作或测试条件下的最大输出功率，就是峰值功率。峰值功率取决于太阳辐照度、太阳光谱分布和电池片的工作温度等条件。IEC 规定标准测试条件为辐照度  $1000\text{W}/\text{cm}^2$ ，光谱分布符合 AM 1.5G，测试温度  $25^\circ\text{C}$ 。

#### 最大工作电流 $I_m$

太阳能电池片工作在峰值功率状态时的电流，就是最大工作电流。

#### 最大工作电压 $V_m$

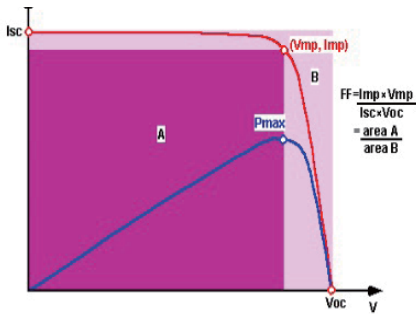
太阳能电池片工作在峰值功率状态时的电压，就是最大工作电压。

### 填充因子 (Filling Factor, FF)

填充因子是太阳能电池品质的量度，定义为实际最大输出功率与理想输出功率的比值。

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

FF 是太阳能电池 I-V 特性曲线内所含最大功率面积与开路电压短路电流响应的矩形面积做比的量度。FF 应尽可能接近 100%，但太阳能电池的 p-n 结特性会阻止 FF 达到 1。FF 越大，电池的品质越高。太阳能电池典型的 FF 值为 60%-80%，并且与太阳能电池的材料与器件结构相关。



### 光电转化效率 $\eta$

光电转换效率是太阳能电池最重要的综合特性参数，经常简称为效率。光电转换效率是太阳能电池最大输出功率与入射光功率之比。

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}}$$

### 太阳模拟器等级评价标准：

质量	方法	等级		
		A	B	C
光谱匹配度	计算6个波段内 (400-500-600-700-800-900-1100) 的光谱辐照度占总波段的光谱辐照度百分比	0.75-1.25	0.6-1.4	0.4-2.0
不均匀度	计算在有效辐照面内最大和最小光强的比例	≤2%	≤5%	≤10%
不稳定性	计算在一段时间有效辐照面最大和最小光强的比例	≤2%	≤5%	≤10%

## 光谱响应与量子效率测试 (QE)

在太阳能电池光电性能测试中，光谱响应特性包含着太阳能电池光电转换能力等许多重要信息。它不但能反映太阳能电池内各层材料的质量，也能反映减反膜、辐照损伤和各个界面的质量。

### 光谱响应 (Spectral Response, SR)

太阳能电池的光谱响应表示对应不同波长入射光能转换成电能的能力，通常光谱响应的定义为输出电流与入射光功率之比，单位为安培每瓦特 (A/W)。

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)}$$

### 外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)

当不同波长的光子入射到太阳能电池的光敏区域时，光子会激发光敏材料产生电子和空穴，当有外电路时即形成电流。此时产生的电子个数与入射的光子个数之比，称为太阳能电池的外量子效率。

$$EQE(\lambda) = \frac{N_e(\lambda)}{N_p(\lambda)} = \frac{hcI_{sc}(\lambda)}{e\lambda P_{in}(\lambda)} = \frac{hcR(\lambda)}{e\lambda}$$

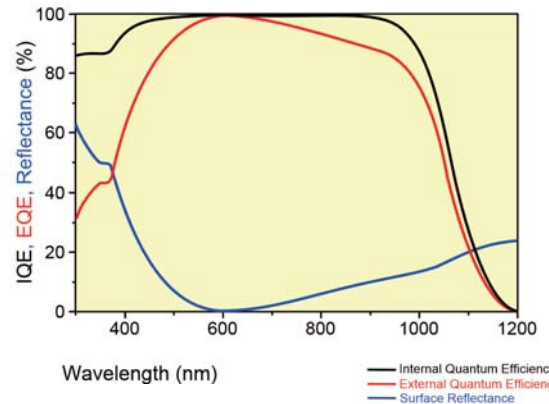
当上式中波长单位为 nm 时，外量子效率与光谱响应有如下简化公式。

$$EQE(\lambda) \approx \frac{1240R(\lambda)}{\lambda}$$

### 内量子效率(Internal quantum efficiency, IQE)

当不同波长的光子入射到太阳能电池的光敏区域时，被吸收的光子会激发光敏材料产生电子和空穴，当有外电路时即形成电流。此时产生的电子个数与被吸收的光子个数之比，称为太阳能电池的内量子效率。

$$IQE(\lambda) = \frac{N_e(\lambda)}{N_p(\lambda) \cdot Absorption(\lambda)} = \frac{EQE(\lambda)}{Absorption(\lambda)} = \frac{EQE(\lambda)}{1 - Reflectanc e(\lambda)}$$



### 光子电子转换效率 ( Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE)

光子电子转换效率，即入射单色光子 - 电子转换效率，定义为单位时间内外电路中产生的电子数与入射的单色光子数之比。IPCE 的概念更多用在光电化学类器件上，在定义上与 EQE 是类似的。

### 外量子效率积分短路电流密度

对于太阳能电池的短路电流密度  $J_{sc}$ ，也可以通过该器件的积分外量子效率 EQE 进行理论计算。

$$J_{sc} = \int R(\lambda)E(\lambda)d\lambda = \int EQE(\lambda)E(\lambda) \frac{q\lambda}{hc} d\lambda$$

其中  $E(\lambda)$  为标准太阳光谱。但是通过积分 EQE 理论计算得到的  $J_{sc}$  可能会与 I-V 特性测试系统测量得到的  $J_{sc}$  存在差异，产生差异的主要原因有多种，主要的可能原因是由于太阳能电池对于单色光响应的非线性度，或者测试时使用的太阳模拟器光谱辐照度与标准太阳光谱辐照度之间存在差异。

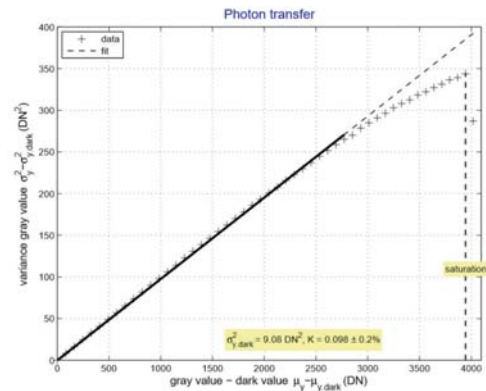
# CCD相机特性参数基础知识

CCD（电荷耦合器件）是一种用电荷量表示信号大小，用耦合方式传输信号的探测元件，具有自扫描、感受光谱范围宽、畸变小、体积小、重量轻、系统噪声低、功耗小、寿命长、可靠性高等一系列优点，广泛应用在数码摄影、天文学以及光谱探测领域。

欧洲机器视觉协会发布了 EMVA1288 图像传感器和相机的特性标准，涵盖了具有线性光响应特性的单色与彩色数字相机，适用于面扫描或线扫描相机。EMVA1288 包含如下 CCD 特性参数的测量标准。

## 系统增益

在相机电子学中，光子辐射积累得到的电荷转化成电压，经放大和模数转换器转变成数字信号。假设整个过程是线性的，通过一个量值来描述，即系统整体增益。



## 平均灰度值 ( $\mu_y$ )

相同辐照度条件下，截取两幅图像，计算每个像素的平均值，再计算所有像素的平均灰度值。

## 灰度值的时域方差 ( $\sigma_y$ )

相同辐照度条件下，每个像素点的方差求平均，即灰度值的时域方差。

## 读出噪声

读出噪声是在最小曝光时间内，相机所能探测到的最小信号。

## 暗电流噪声

曝光时间内，暗场平均灰度值

## 满井容量

每个像素的势井所能容纳的最大电子数

## 等效噪声功率

信噪比为 1 时的辐照功率

## 动态范围

饱和辐射光功率与等效噪声功率之比

## 信噪比SNR

$\mu_y$ : 平均灰度值

$\mu_y \text{ dark}$ : 暗场平均灰度值

$\sigma_y$ : 标准差

## 量子效率

每个像素点产生电子个数与入射光子数之比

## 响应度

量子效率与系统增益的乘积

## 空间非均匀性和光响应非均匀性

非均匀性有两种基本形态。其一是不同像素的暗信号不同，为空间非均匀性；其二是不同像素的灵敏度不同，为光响应非均匀性。

## 死像元

像元响应率小于平均响应率 1/2 的像元

## 过热像元

像元噪声电压大于平均噪声电压 2 倍的像元