

团 体 标 准

T/ CPIA XXXX—2021

光伏电池量子效率测试系统技术要求

The technical requirements of quantum efficiency measurement systems for
photovoltaic cells

征求意见稿

2021 - - 发布

2021 - XX - 实施

中国光伏行业协会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 分类.....	2
4.1 小光斑光伏电池量子效率测试系统.....	2
4.2 大光斑光伏电池量子效率测试系统.....	2
5 组成.....	2
5.1 单色光光源.....	2
5.2 斩波器.....	2
5.3 单色仪.....	2
5.4 偏置光光源.....	3
5.5 锁相放大器.....	3
5.6 前置放大器.....	3
6 技术要求.....	3
6.1 外观.....	3
6.2 通用技术要求.....	3
7 试验方法.....	3
7.1 测试用的仪器及设备.....	4
7.2 单色光光斑和偏置光光斑不均匀性测试.....	4
7.3 偏置光稳定性测试.....	5
7.4 相对光谱响应测试.....	5
7.5 短路电流测试.....	6
7.6 反射率测试.....	6
7.7 波长测试.....	7
7.8 带宽测试.....	7
7.9 温控平台测试.....	7
8 标志和使用说明.....	7
8.1 标志.....	7
8.2 使用说明.....	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由XXXX提出。

本文件由XXXX归口。

本文件起草单位： 。

本文件主要起草人： 。

光伏电池量子效率测试系统技术要求

1 范围

本文件规定了光伏电池量子效率测试系统的通用技术要求和试验方法。
本文件适用于各种光伏电池量子效率测试系统的设计、制造、验收和使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该注日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T191-2008 包装储运图示标志
GB/T 2297-1989 太阳光伏能源系统术语
GB/T 6495.8-2002 光伏器件 第8部分：光伏器件光谱响应的测量
GB/T 38200-2019 太阳电池量子效率测试方法
DB35/T 1362-2013 太阳模拟器技术要求
JJF 1150-2006 光电探测器相对光谱响应度校准规范
IEC 60904-8 2014 光伏器件 第8部分：光伏器件光谱响应的测量
IEC 60904-9 2020 光伏器件 第9部分：太阳模拟器特性的分级

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光谱响应（光谱灵敏度） Spectral Response (Spectral Sensitivity)

指各个波长上，单位辐照度所产生的短路电流密度与波长的函数关系。

[来源：GB/T 2297-1989，3.27]

3.2

相对光谱响应(相对光谱灵敏度) Relative Spectral Response(Relative Spectral Sensitivity)

系指以某一特定的波长（通常是以光谱响应的最大值）进行归一化的光谱响应。

[来源：GB/T 2297-1989，3.29]

3.3

量子效率 Quantum Efficiency

量子效率是指太阳电池产生的电子-空穴对数目与入射到太阳能电池表面的光子数目之比（%）。量子效率 $QE(\lambda)$ 与光谱响应 $SR(\lambda)$ 和波长 λ 的关系如下式所示：

$$QE(\lambda) = \left(\frac{hc}{e}\right) \times \left(\frac{SR(\lambda)}{\lambda}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

3.4

偏置光 Bias Light

以单色光照射到太阳电池表面进行光谱响应测试时，为了模拟太阳电池的实际工作环境，有时附加一个模拟阳光照射到太阳电池表面，这个附加光照称为偏置光。

[来源：GB/T 2297-1989, 3.30]

3.5

光谱带宽 Spectra band width

指从单色器射出的单色光谱线强度轮廓曲线的二分之一高度处的谱带宽度。

4 分类

4.1 小光斑光伏电池量子效率测试系统

有效测试单色光光斑面积 < (2 cm × 2 cm)，主要用于分析电池片的精细结构性能。

4.2 大光斑光伏电池量子效率测试系统

有效测试单色光光斑面积 ≥ (2 cm × 2 cm)，根据面积大小不同，分别应用于测试标准太阳电池、单晶或多晶电池片和多结太阳电池。

5 组成

系统主要由光源、斩波器、单色仪、偏置光光源、锁相放大器、前置放大器、控制系统、数据记录和处理软件等组成。

5.1 单色光光源

为光伏电池量子效率测试系统提供 300 nm~1600 nm 连续波长的光谱；包含灯泡、集光镜和三轴调整旋钮等组成。

5.2 斩波器

将连续光源调制成脉冲光源，并提供一同步的同调讯号给锁相放大器，作为锁相放大器参考频率。

5.3 单色仪

单光仪系统主要功能是将连续波长的光，利用光栅绕射原理，分成各种不同波长的单色光，提供光谱扫描的单色光源。

5.4 偏置光光源

a)为光伏电池量子效率测试系统提供模拟太阳光的偏置光光源;b)带通波段与多结太阳电池对应的带隙组合结构相匹配的偏置光源,使待测子电池电流受限。

5.5 锁相放大器

锁相放大器是用来测量微弱调制信号的设备。测量被光调制器调制成某一特定频率的单色光入射到太阳电池后,产生的光电流讯号(也是具有相同频率 f 的 AC 电流讯号),锁相放大器会将此频率的 AC 微小讯号与其他频率的噪声分开、滤波后,仅留下频率 f 的 AC 讯号。

5.6 前置放大器

将光电流信号放大后,再将信号送到锁相放大器测量,增加信号测量的准确度。

6 技术要求

6.1 外观

系统各部分的外观完好,无缺损、无锈蚀,系统的铭牌应清晰、稳固。

6.2 通用技术要求

光伏电池量子效率测试系统主要技术要求见表1。

表1 光伏电池量子效率测试系统主要技术要求

序号	项目	技术要求
1	单色光光斑不均匀性	应 $\leq 10\%$ (当有效单色光光斑面积 $\geq 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$),小光斑仪器无要求
2	偏置光光斑不均匀性	应 $< 15\%$ (当有效单色光光斑面积 $\geq 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$),小光斑仪器无要求
3	偏置光范围和稳定性	至少覆盖(0.1~0.3) Sun 稳定性 不超过1%(10分钟)
4	相对光谱响应测量示值误差	小光斑仪器: 应不超过 $\pm 1\%$ (400~1000) nm,应不超过 $\pm 2\%$ (其它波长段); 大光斑仪器: 应不超过 $\pm 1.5\%$ (400~1000) nm,应不超过 $\pm 2.5\%$ (其它波长段);
5	光谱响应测量重复性	(400~1000) nm 内应不超过1%;(280~400) nm 和(1000~1600) nm 内应不超过2%。
6	短路电流测量示值误差	应不超过 $\pm 0.5\%$ (有效单色光光斑面积 $\geq 2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$)
7	反射率测量示值误差	应不超过 $\pm 2\%$
8	波长示值误差	应不超过 $\pm 2\text{ nm}$
9	光谱带宽	(280~1200) nm: 应 $\leq 15\text{ nm}$; (1200~1600) nm: 应 $< 50\text{ nm}$
10	温控平台示值误差、稳定性和均匀性	示值误差应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$,稳定性应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$,均匀性应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

7 试验方法

7.1 测试用的仪器及设备

7.1.1 标准太阳电池

应至少符合GB/T 6495.2-1996中规定的二级标准太阳电池的要求，为稳定的晶硅太阳电池，其短路电流变化值应不大于其初始标定值的±1%。其光谱响应范围不小于（400~1100）nm，其绝对或相对光谱响应变化值应不大于其初始标定值的±1%，FF>65%，符合 WPVS规格。

7.1.2 信号采集装置

含准确度等级为0.01级的直流数字电压表（6位半以上）和精密I/V变换器。

7.1.3 标准探测器

已知绝对或相对光谱响应的Si、Ge或InGaAs光电探测器，绝对光谱响应变化值应不大于其初始标定值的±1%。

7.1.4 参考电池片

经至少60 kWh辐照量老化的晶硅电池，其短路电流变化值应不大于其初始标定值的±1%，6英寸~12英寸。

7.1.5 标准白板或标准灰板

标准白板反射率和标准灰板反射率年变化率不超过±1.0%，直径d应≥2英寸，应至少能覆盖积分球的出光口。

7.1.6 标准线光谱光源

特征波长为253.652 nm、365.016 nm、435.833 nm、546.075 nm、696.543 nm、912.297 nm的汞-氙灯。

7.1.7 窄带宽标准滤光片

中心波长(632.7±2.0) nm、(1332.7±2.0) nm的滤光片。

7.1.8 温度测量装置

温度测量范围不小于（15~45）℃，温度测量精确度不超过±0.5℃。

7.2 单色光光斑和偏置光光斑不均匀性测试

若光伏电池量子效率测试系统(以下简称QE测量系统)的单色光斑尺寸大于等于156 mm × 156 mm，选取单色光光斑测试有效区域的上中下和左中右9个测试位置（典型示意图如图1所示），采用WPVS标准太阳电池作为光检测器，在每个测试位置测量单色光辐照度，产生与辐照度成正比的短路电流，用精密数字电压表记录经I-V转化器放大后与辐照度等效的电压信号 V_{MWij} （i和j分别是测试点所在的行数和列数），找出最大值 V_{MWmax} 和最小值 V_{MWmin} ，根据公式（2）计算单色光光斑的不均匀度 J_{MW} ：

$$J_{MW} = \frac{V_{MWmax} - V_{MWmin}}{V_{MWmax} + V_{MWmin}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中作为光检测器的标准太阳电池也可以替换成其他符合要求的检测器。典型的单色光评估波长为400 nm、550 nm、650 nm和900 nm。可根据需求选择检测其他波长。

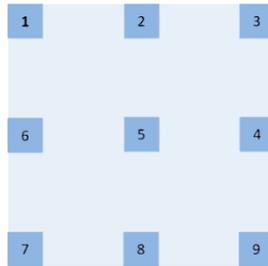


图 1 (156 mm×156 mm) 光斑测试区域内 9 个测试位置示意图

若 QE 测量系统的单色光斑面积小于 156 mm × 156 mm，则检测器的有效感光面积的边长应不大于待评估光斑短边边长的八分之一。应根据实际情况和检测需求划检测区域和选择试验的检测器。

偏置光光斑的不均匀度采用类似前述单色光光斑的不均匀度试验方法进行检测。将偏置光光斑测试有效区域划分成 9 个测量位置，采用标准太阳电池作为检测器，在每个测试位置测量辐照度，产生与辐照度成正比的短路电流，用精密数字电压表记录短路电流经 I-V 转化器放大后的与辐照度等效的电压信号 V_{BWij} (i 和 j 分别是测试点所在的行数和列数)，找出最大值 V_{BWmax} 和最小值 V_{BWmin} ，根据公式 (3) 计算偏置光光斑的不均匀度 J_{BW} ：

$$J_{BW} = \frac{V_{BWmax} - V_{BWmin}}{V_{BWmax} + V_{BWmin}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

不均匀性试验采用的点数，也可在上述要求的基础上根据试验需求增加测量点进行检测。

7.3 偏置光稳定性测试

将 WPVS 标准太阳电池作为光检测器，在测试区域中心点位置测量偏置光的稳定性，用精密数字电压表记录经 I-V 转化器放大后与辐照度等效的电压信号，每隔 1s 记录一次数据，记录 10 min，找出最大值 V_{max} 和最小值 V_{min} ，根据公式 (4) 计算偏置光的稳定性 W_{BW} ：

$$W_{BW} = \frac{(V_{max} - V_{min})}{(V_{max} + V_{min})} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

7.4 相对光谱响应测试

7.4.1 相对光谱响应测量示值误差

对于只能产生小光斑单色光的仪器或工作在产生小光斑单色光状态的仪器，在其样品台放置标准光电探测器进行相对光谱响应测量。280 nm~1000 nm 波段采用标准 Si 光电探测器，1000 nm~1600 nm 波段采用标准 Ge 光电探测器或 InGaAs 光电探测器。重复测量 3 次，记录以光谱响应的最大值进行归一化的相对光谱响应值，取其算术平均值 作为仪器的相对光谱响应的测量值，按式(5)计算仪器的相对光谱响应相对示值误差。取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

$$\delta_{SR} = \frac{\overline{SR} - SR_s}{SR_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

\overline{SR} ——仪器 3 次相对光谱响应测量值的平均值；

SR_s ——标准探测器的相对光谱响应标准值。

对于大光斑的仪器,采用光谱响应测量模式,在其样品台放置标准太阳电池进行相对光谱响应测量,重复测量3次,记录以光谱响应的最大值进行归一化的光谱响应值,取其算术平均值作为仪器的相对光谱响应的测量值,按式(4)计算仪器的相对光谱响应相对示值误差 δ_{SR} 。取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

也可以采用已知光谱响应的6吋参考电池片进行大光斑的相对光谱响应示值误差的检测。

7.4.2 相对光谱响应测量重复性

对于小光斑的仪器,在其样品台放置标准光电探测器进行光谱响应重复性测量,280 nm~1000 nm波段采用标准Si光电探测器,1000 nm~1600 nm波段采用标准Ge光电探测器或InGaAs光电探测器,重复测量6次,记录每次的光谱响应值 SR_i ,计算平均值 \overline{SR} 按式(6)计算重复性 $s(SR)$ 。

$$s(SR) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (SR_i - \overline{SR})^2}{6-1}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

也可以采用已知光谱响应的标准太阳电池进行小光斑的光谱响应重复性的测量。

对于大光斑的仪器,采用性能稳定的6吋参考电池片进行光谱响应重复性测量,重复测量6次,按式(5)计算重复性。

7.5 短路电流测试

采用短路电流测量模式,在其样品台放置标准6吋参考电池片或者标准太阳电池进行测量,重复测量3次,取其算术平均值作为仪器的短路电流的测量值,按式(7)计算仪器的短路电流相对示值误差 $\delta_{I_{sc}}$ 。取绝对值最大的示值误差为示值误差结果。

$$\delta_{I_{sc}} = \frac{\overline{I_{sc}} - I_{scs}}{I_{scs}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$\overline{I_{sc}}$ ——仪器3次测量值的平均值;

I_{scs} ——标准6吋参考电池片或者标准太阳电池的短路电流标准值。

7.6 反射率测试

经自校后的仪器,采用反射率测量模式,在其样品台放置标准白板或灰板进行反射率示值误差测量,重复测量3次,取算术平均值作为仪器的反射率测量值,按式(8)计算仪器的反射率示值误差。

$$\delta_R = \overline{R} - R_s \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

\overline{R} ——仪器3次反射率测量值的平均值;

R_s ——标准白板或灰板反射率标准值。

7.7 波长测试

经自校后的仪器，采用透射率测量模式，在其样品台放置中心波长约为632.7 nm和1332.7 nm的标准滤光片进行波长示值误差测量，重复测量3次，取测得波峰的中心波长算术平均值作为仪器的波长测量值，按式(9)计算仪器的波长示值误差 δ_λ 。

$$\delta_\lambda = \bar{\lambda} - \lambda_s \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$\bar{\lambda}$ ——仪器 3 次波长测量值的平均值；

λ_s ——标准滤光片中心波长标准值。

波长准确度也可采用标准线光谱灯源进行测量。将标准线光谱灯灯源对准仪器的探测器接收口，采用透射率测量模式，记录仪器显示的中心波长示值，重复测量3次，根据平均值计算波长示值误差。

7.8 带宽测试

光谱带宽采用光谱仪、标准线光谱灯源或者窄带宽标准滤光片进行测量。重复测量3次，根据3次测量值 BW_1 、 BW_2 和 BW_3 的平均值计算光谱带宽 BW 。

$$BW = (BW_1 + BW_2 + BW_3) / 3 \quad \dots\dots\dots (10)$$

7.9 温控平台测试

选取温控平台测试有效区域的中心点位置，采用温度测量装置记录温度示值 T_s ，重复测量3次，求平均值 \bar{T}_s ，与温控平台的温度示值 T_i 比较，根据公式(11)计算温控平台温度的示值误差 δ_T ：

$$\delta_T = T_i - \bar{T}_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

之后每隔 2 min 记录一次中心点位置温度测量装置的温度示值，记录 30 min，找出最大值 T_{max} 和最小值 T_{min} ，根据公式(12)计算温控平台温度的稳定性 W_T ：

$$W_T = T_{max} - T_{min} \quad \dots\dots\dots(12)$$

选取温控平台测试有效区域的上中下和左中右 5 个测试位置（典型示意图如图 2 所示），在每个测试位置测量温度，采用温度测量装置记录温度示值 T_i ，找出最大值 $T_{i,max}$ 和最小值 $T_{i,min}$ ，根据公式(13)计算温控平台温度的不均匀性 J_T ：

$$J_T = T_{i,max} - T_{i,min} \quad \dots\dots\dots(13)$$

8 标志和使用说明

8.1 标志

测试系统表面应有产品铭牌，且包含下列清晰耐久标志：

- a) 产品名称。
- b) 型号。

- c) 制造厂名称或商标。
- d) 生产日期。

8.2 使用说明

每个测试系统应附有产品使用说明，且包含下列内容：

- a) 安全要求。
 - b) 产品的主要性能和参数。
 - c) 使用操作说明。
 - d) 维修与保养事项。
-