

JJF

福建省地方计量技术规范

JJF (闽) 1092-2018

太阳能电池量子效率测试仪校准规范

Calibration Specification for Solar Cell Quantum Efficiency

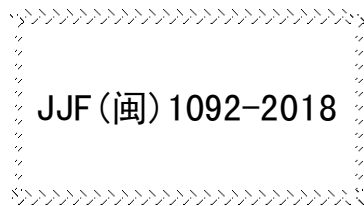
Measurement Instruments

2018—11—05 发布

2019—02—05 实施

福建省质量技术监督局 发布

太阳能电池量子效率测试仪校准 规范



Calibration Specification for Solar Cell

Quantum Efficiency Measurement Instruments

归口单位：福建省质量技术监督局

起草单位：福建省计量科学研究院

本规范委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

罗海燕（福建省计量科学研究院）

杨爱军（福建省计量科学研究院）

黎健生（福建省计量科学研究院）

参加起草人：

李 杰（福建省计量科学研究院）

陈彩云（福建省计量科学研究院）

刘燕红（福建省计量科学研究院）

王永昶（上海伟信新能源科技有限公司）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(4)
6.2 校准用设备	(4)
7 校准项目和校准方法	(5)
7.1 外观检查	(5)
7.2 单色光光斑和偏置光光斑不均匀性	(5)
7.3 偏置光光谱匹配度	(6)
7.4 相对光谱响应测量示值误差	(7)
7.5 光谱响应测量重复性	(8)
7.6 短路电流测量示值误差	(8)
7.7 反射率测量示值误差	(8)
7.8 波长示值误差	(9)
7.9 光谱带宽	(9)
7.10 温控平台示值误差、均匀性和稳定性	(9)
8 校准结果表达	(10)
9 复校时间间隔	(11)
附录 A 太阳能电池量子效率测试仪单色光和偏置光光斑不均匀性测量结果不确定度评定示例	(12)
附录 B 太阳能电池量子效率测试仪偏置光光谱匹配测量结果不确定度评定示例	(15)
附录 C 太阳能电池量子效率测试仪相对光谱响应示值误差测量结果的不确定度评定示例	(17)
附录 D 太阳能电池量子效率测试仪短路电流示值误差测量结果的不确定度评定示例	(20)
附录 E 太阳能电池量子效率测试仪反射率测量示值误差测量结果的不确定度评定示例	(22)

附录 F 太阳能电池量子效率测试仪波长示值误差校准结果的不确定度评定示例 (25)

附录 G 太阳能电池量子效率测试仪的带宽校准结果的不确定度评定示例 (27)

附录 H 太阳能电池量子效率测试仪温控平台温度示值误差测量结果的不确定度评定示例 (29)

附录 I 太阳能电池量子效率测试仪校准原始记录格式 (32)

引 言

本规范依据 JJF1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》编制，并按照 JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》的要求评定和表示测量不确定度。参考了 IEC 60904-8 2014 光伏器件 第 8 部分:光伏器件光谱响应的测量、DB35/T 1362-2013 太阳模拟器技术要求、和 JJF 1150-2006 光电探测器相对光谱响应度校准规范的部分内容。

本规范为首次发布。

太阳能电池量子效率测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于太阳能电池量子效率测试仪波长范围为(280~1600) nm的校准,包括测量单晶硅、多晶硅、薄膜和多结太阳能电池的量子效率测试设备。各类量子效率测试设备应根据具体要求有针对性地加以引用。

2 引用文件

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

JJF 1059 测量不确定度评定与表示

JJF 1150-2006 光电探测器相对光谱响应度校准规范

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

DB35/T 1362-2013 太阳模拟器技术要求

ASTM E1021-06 阻挡层光电池的谱特性的测定方法

IEC 60904-8 2014 光伏器件 第8部分:光伏器件光谱响应的测量

凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本规范;凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 术语和计量单位

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。

3.2 绝对光谱响应(绝对光谱灵敏度) Absolute Spectral Response (Absolute Spectral Sensitivity)

指在规定的波长上,短路电流密度与辐照度之比。

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

它是某一特定的波长(通常是以光谱响应的最大值)进行归一化的光谱响应。

3.4 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:

$$QE(\lambda) = \frac{1240 \times SR(\lambda)}{\lambda} \times 100\% \quad (1)$$

3.5 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。

3.6 AM1.5G 条件 AM1.5G Condition

标定和测试地面用 (大气质量 AM (Air Mass) = 1.5G) 太阳电池所规定的太阳的辐照度和光谱分布。

3.7 光谱匹配度 Spectral Match

模拟或自然光源的光谱辐照度分布相对于 AM1.5G 参考太阳光谱辐照度分布的匹配程度。

3.8 短路电流 Short-circuit current

在一定的温度和辐照度条件下, 光伏发电器在端电压为零时的输出电流, 通常用 I_{sc} 来表示。

3.9 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。通常用来表征仪器的光谱分辨率。

4 概述

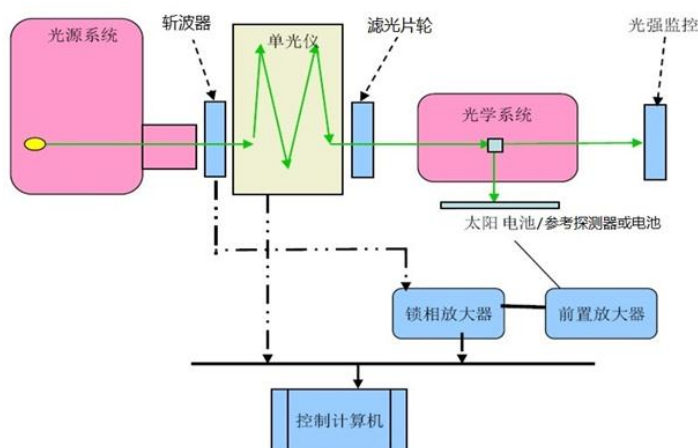


图1 太阳电池量子效率测试仪结构示意图

太阳能电池量子效率测试仪是用于测量各种太阳能电池的光谱响应、量子效率、反射率、短路电流密度等指标的测试仪器，是太阳能电池结构分析和电性能参数校准的重要测试设备。太阳能电池量子效率校准系统如图1所示，主要包括：光源、斩波器、单色仪/滤光片轮、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。太阳能电池量子效率测试仪测量原理是用强度可调的偏置光照射太阳能电池，模拟其不同的工作状态，同时测量太阳能电池在不同波长的单色光照射下产生的短路电流，从而得到太阳能电池的光谱响应。

5 计量特性

太阳能电池量子效率测试仪的计量特性包括：单色光光斑不均匀性、偏置光光斑不均匀性、偏置光光谱匹配度、相对光谱响应测量示值误差、光谱响应测量重复性、短路电流测量示值误差、反射率测量示值误差、波长示值误差、光谱带宽、温控平台示值误差、稳定性和均匀性。各项技术指标见表1。

表1 太阳能电池量子效率测试仪主要技术指标

序号	校准项目	技术指标
1	单色光光斑不均匀性	≤5% (有效单色光光斑面积≥2 cm×2 cm)
2	偏置光光斑不均匀性	<10% (有效单色光光斑面积≥2 cm×2 cm)
3	偏置光光谱匹配度	不超出 C 级 (仅针对晶硅电池测试的白偏置光) 小光斑仪器 (有效单色光光斑面积小于 2 cm×2 cm):
4	相对光谱响应测量示值误差	不超过±1% (400~1000) nm, 不超过±2% (其它波长段); 大光斑仪器 (有效单色光光斑面积大等于 2 cm×2 cm): 不超过±1.5% (400~1000) nm, 不超过±2.5% (其它波长段);
5	光谱响应测量重复性	(400~1000) nm 内不超过 0.5%; (280~400) nm 和 (1000~1600) nm 内不超过 2%。
6	短路电流测量示值误差	不超过±0.5% (有效单色光光斑面积≥2 cm×2 cm)
7	反射率测量示值误差	不超过±0.5%
8	波长示值误差	不超过±1 nm
9	光谱带宽	(280~1200) nm≤15 nm; (1200~1600) nm<50nm
10	温控平台示值误差、稳定性和均匀性	示值误差不超过±1℃, 稳定性不超过±1℃, 均匀性不超过±1℃

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(25 ± 5) °C，相对湿度：≤80% RH；

6.1.2 电源：(220 ± 10) V，频率：(50 ± 1) Hz；

6.1.3 无明显机械振动，无电磁干扰，无易燃易爆和腐蚀性气体，无影响辐照度和光谱测量的杂散光。

6.2 校准用设备

6.2.1 WPVS (World Photovoltaic Scale) 标准太阳电池

短路电流校准不确定度 $U_{rel}(I_{sc}) \leq 2.2\%$ ($k=2$)；光谱响应范围 (280~1200) nm，绝对或相对光谱响应校准不确定度：(280~400) nm: $U_{rel}(SR) \leq 3\%$ ($k=2$)，(400~1200) nm: $U_{rel}(SR) \leq 2\%$ ($k=2$)。

6.2.2 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。

6.2.3 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，绝对光谱响应校准不确定度 (280~300) nm: $U_{rel} \leq 1.5\%$ ($k=2$)；(300~1200) nm: $U_{rel} \leq 0.5\%$ ($k=2$)；(1200~1600) nm: $U_{rel} \leq 5\%$ ($k=2$)。

6.2.4 6 英寸参考电池片

经至少 60 kWh 辐照量老化的晶硅电池，短路电流校准不确定度: $U_{rel}(I_{sc}) \leq 2.5\%$ ($k=2$)；相对光谱响应度校准不确定度：(300~400) nm: $U_{rel} \leq 2.5\%$ ($k=2$)；(400~1100) nm: $U_{rel} \leq 2.0\%$ ($k=2$)。

6.2.5 标准白板或标准灰板

标准白板反射率校准不确定度: $U \leq 2.0\%$ ($k=2$)， $d \geq 2$ 英寸 (应能覆盖积分球的洞口)。

标准灰板反射率校准不确定度: $U \leq 5.0\%$ ($k=2$)， $d \geq 2$ 英寸 (应能覆盖积分球的洞口)。

6.2.6 光谱仪

光谱分布测量范围不小于 (400~1100) nm，校准不确定度: $U_{rel} \leq 8.0\%$ ($k=2$)。

6.2.7 标准线光谱灯源

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

6.2.8 窄带宽标准滤光片

中心波长 632.7 nm, $U \leq 0.6$ nm ($k=2$); 中心波长 1332.7nm, $U \leq 0.6$ nm ($k=2$)。

6.2.9 温度测量标准器

数字温度计: 温度误差不超过 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, $U \leq 0.5^\circ\text{C}$ ($k=2$)。

7 校准项目和校准方法

7.1 外观检查

用目视和手动检查。内容包括: 制造厂名或商标、出厂编号、仪器名称、型号; 辐照度、温度测量和显示装置能正常工作。辐照度测试仪应满足 5.1 条件后再开始校准。

以下 7.2-7.11 校准项目应按照仪器使用说明书的要求开机预热, 待仪器稳定后进行校正。

7.2 单色光光斑和偏置光光斑不均匀性

若被校仪器的单色光斑面积大于等于 $156\text{ mm} \times 156\text{ mm}$, 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 2 所示), 采用 WPVS 参考太阳能电池作为检测器, 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 $V_{MWi,j}$ (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} :

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

其中作为检测器的 WPVS 硅太阳能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 单色光。可根据校准需求选择校准其他波长。

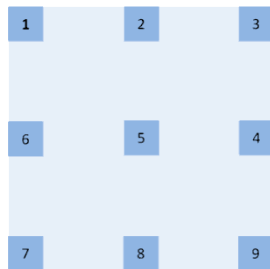


图2 (156 mm×156 mm) 光斑测试区域内9个测试位置示意图

若被校仪器的单色光斑面积小于 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ ，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。应根据实际情况和校准需求划分校准区域和选择校准的检测器。

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校准方法进行校准。将偏置光光斑测试有效区域划分成 9 个测量位置，采用 WPVS 参考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} ：

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

不均匀性校准采用的点数，也可在上述要求的基础上根据校准需求增加测量点进行校准。

7.3 偏置光光谱匹配度

将光谱仪分别垂直置于测试区域的 ABCDE 五个位置 (如图 3 所示)，测量光斑在 (400~1100) nm 内各个波长范围的光谱辐照度分布，计算各波长间隔内的光谱辐照度分布 (即占积分辐照度的百分比)，与表 2 中 AM1.5G 标准光谱辐照度分布的百分比之比值为光谱匹配度；



图 3 (156 mm×156 mm) 光斑测试区域内 5 个测试位置示意图

表 2 标准光谱辐照度分布

波长范围(nm)	占有效波段内积分辐照度的百分比 AM1.5G 条件 (有效波段 400 nm ~ 1100 nm)
400~500	18.4

500~600	19.9
600~700	18.4
700~800	14.9
800~900	12.5
900~1100	15.9

将 5 个位置各波段的比值与表 2 中的标准光谱对应波段的辐照度百分比相除得到对应的偏离范围 P，根据表 3 评定光谱匹配度等级，由最差的光谱匹配度等级确定偏置光的光谱匹配级别。

表 3 光谱匹配等级划分

等级	光谱匹配特性 P (与表 1 中 AM1.5G 条件下百分比的偏离范围)
A	$0.75 \leq P \leq 1.25$
B	$0.6 \leq P < 0.75, 1.25 < P \leq 1.4$
C	$0.4 \leq P < 0.6, 1.4 < P \leq 2.0$

7.4 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。重复校准 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校准值，按式(4)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。

$$\delta_{SR} = \frac{\overline{SR} - SR_s}{SR_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中： \overline{SR} ——仪器 3 次相对光谱响应校准值的平均值；

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 WPVS 参考太阳电池进行相对光谱响应测量，重复校准 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校准值，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校准。

7.5 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 ，计算平均值 \overline{SR} 按式 (5) 计算重复性 $s(SR)$ 。

$$s(SR) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (SR_i - \overline{SR})^2}{6-1}} \times 100\% \quad (5)$$

也可以采用已知光谱响应的 WPVS 进行小光斑的光谱响应重复性的校准。

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。

7.6 短路电流测量示值误差

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 WPVS 参考太阳电池进行测量，重复校准 3 次，取其算术平均值作为仪器的短路电流的校准值，按式 (6) 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。

$$\delta_{I_{sc}} = \frac{\overline{I_{sc}} - I_{scs}}{I_{scs}} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $\overline{I_{sc}}$ ——仪器 3 次校准值的平均值；

I_{scs} ——标准 6 吋参考电池片或者 WPVS 参考太阳电池的短路电流标准值。

7.7 反射率测量示值误差

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 (7) 计算仪器的反射率示值误差。

$$\delta_R = \overline{R} - R_s \quad (7)$$

式中： \bar{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。

7.8 波长示值误差

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 (8) 计算仪器的波长示值误差 δ_λ 。

$$\delta_\lambda = \bar{\lambda} - \lambda_s \quad (8)$$

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光谱仪或标准线光谱光源进行校准。设置仪器的单色光为 360 nm、550 nm、900 nm 和 1300 nm，用光谱仪测量波长示值与标称值进行比较，重复测量 3 次，根据平均值计算波长示值误差。

将标准线光谱灯光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。

7.9 光谱带宽

光谱带宽采用光谱仪、标准线光谱光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 。

$$BW = (BW_1 + BW_2 + BW_3) / 3 \quad (9)$$

7.10 温控平台示值误差、稳定性和不均匀性

选取温控平台测试有效区域的中心点位置，采用标准铂电阻作为标准器，用数字多用表记录标准器温度示值 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 (10) 计算温控平台温度的示值误差 δ_T ：

$$\delta_T = T_i - \bar{T}_s \quad (10)$$

之后每隔 2 min 记录一次中心点位置标准器的温度示值，记录 30 min，找出最大值 T_{max} 和最小值 T_{min} ，根据公式 (11) 计算温控平台温度的稳定性 W_T ：

$$W_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100\% \quad (11)$$

选取温控平台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 2 所示), 采用标准铂电阻作为检测器, 在每个测试位置测量温度, 用精密数字电压表记录标准器温度示值 T_{ij} (i 和 j 分别是测试点所在的行数和列数), 找出最大值 T_{ijmax} 和最小值 T_{ijmin} , 根据公式 (12) 计算温控平台温度的不均匀性 J_T :

$$J_T = \frac{T_{ijmax} - T_{ijmin}}{T_{ijmax} + T_{ijmin}} \times 100\% \quad (12)$$

8 校准结果表达

根据校准结果出具校准证书, 校准证书应包括校准结果及其测量不确定度。校准结果的表达按照 JJF 1071—2010 技术规范的要求。至少应包含以下信息:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识(如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- j) 校准环境的描述;
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- l) 对校准规范的偏离的说明;
- m) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- n) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- o) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔建议不超过 1 年，更换重要部件（特别是光源）、维修或对仪器性能有怀疑时，应随时校准。

附录 A

太阳能电池量子效率测试仪单色光光斑不均匀性和

偏置光光斑不均匀性测量结果不确定度评定示例

A.1 太阳能电池量子效率测试仪单色光光斑不均匀性测量结果不确定度评定

A.1.1 概述

A.1.1.1 测量依据: JJG (闽) ××—×××× 《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

A.1.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

A.1.1.3 测量用标准器: WPVS 参考太阳电池、信号采集装置。

A.1.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

A.1.2 测量模型

A.1.2.1 太阳能电池量子效率测试仪单色光光斑不均匀性 J_{MW} 按下式计算:

$$J_{MW} = \frac{V_{MW \max} - V_{MW \min}}{V_{MW \max} + V_{MW \min}} \times 100\%$$

式中:

$V_{MW \max}$ ——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的最大值, mV;

$V_{MW \min}$ ——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的最小值, mV。

A.1.3 标准不确定度分量的评定

A.1.3.1 WPVS 参考太阳电池检测器不稳定性引入的不确定度 u_1

将检测器放置于高稳定度光源下, 稳定 30 分钟后, 测量其 10min 内输出信号 9 次:

$I_{\max} = 19.3584$ mV, $I_{\min} = 19.3342$ mV。检测器不稳定性引入的不确定度 u_1 计算如下:

$$u_1 = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \times 100\% = 0.06\%$$

A.1.3.2 位置重复性引起的不确定度 u_2

由于划分区域与检测器对位有一定差异, 因放置位置不同引入的不确定度估算为 $u_2 =$

0.5%。

A.1.3.3 单色光光源重复性引起的不确定度 u_3

在30min内,在光斑同一区域内重复测量,其辐照度重复性引入的不确定度估算为 $u_3=0.6%$ 。

A.1.3.4 信号采集装置引入不确定度 u_4, u_5

信号采集装置中的数表和放大器引入的不确定度分别为 $u_4=0.0020\%/2=0.0010%$ 和 $u_5=0.005\%/2=0.0025%$ 。

A.1.3.5 信号采集装置读数有效位数引起的不确定度 u_6

使用的信号采集装置中的数表为七位半分辨率,由其读数有效位数引起的不确定度 u_6 可忽略不计。

A.1.4 单色光光斑辐照度不均匀度校准的合成不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关,因此合成标准不确定度为:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 0.78\%$$

A.1.5 相对扩展不确定度为:

$$U_{rel}=1.6\% (k=2)$$

A.1.6 结果及其不确定报告

单色光光斑不均匀性校准结果扩展不确定度: $U_{rel}=1.6\%$, $k=2$ 。

A.2 太阳能电池量子效率测试仪偏置光光斑不均匀性测量结果不确定度评定

A.2.1 概述

A.2.1.1 测量依据:JJG(闽)××-××××《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

A.2.1.2 测量环境条件:环境温度:(25 ± 5)℃,相对湿度:≤80% RH。

A.2.1.3 测量用标准器:WPVS参考太阳电池、信号采集装置。

A.2.1.4 测量对象:太阳能电池量子效率测试仪。

A.2.2 测量模型

太阳能电池量子效率测试仪单色光光斑不均匀性 J_{BW} 按下式计算:

$$J_{BW} = \frac{V_{BW \max} - V_{BW \min}}{V_{BW \max} + V_{BW \min}} \times 100\%$$

式中:

V_{BWmax} ——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的最大值, mV;

V_{BWmin} ——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的最小值, mV。

A. 2.3 标准不确定度分量的评定

A. 2.3.1 检测器不稳定性引入的不确定度 u_7

将检测器放置于高稳定性光源下, 稳定 30 分钟后, 测量其 10min 内输出信号 9 次:

$I_{max} = 19.3584$ mV, $I_{min} = 19.3342$ mV。检测器不稳定性引入的不确定度 u_7 计算如下:

$$u_7 = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \times 100\% = 0.06\%$$

A. 2.3.2 位置重复性引起的不确定度 u_8

由于划分区域与检测器定位有一定差异, 因放置位置不同引入的不确定度 $u_8 = 0.5\%$ 。

A. 2.3.3 偏置光光源重复性引起的不确定度 u_9

在 30min 内, 在偏置光同一区域重复测量, 其辐照度的重复性引入的不确定度 $u_9 = 0.4\%$ 。

A. 2.3.4 标准器引入不确定度 u_{10}, u_{11}

信号采集装置中的数表和放大器引入的不确定度分别为 $u_{10} = 0.0020\% / 2 = 0.0010\%$ 和 $u_{11} = 0.005\% / 2 = 0.0025\%$ 。

A. 2.3.5 信号采集装置读数有效位数引起的不确定度 u_{12}

使用的信号采集装置中的数表为七位半分辨率, 由其读数有效位数引起的不确定度 u_{12} 可忽略不计。

A. 2.4 偏置光光斑辐照度不均匀度校准的合成不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关, 因此合成标准不确定度为:

$$u = \sqrt{u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2} = 0.64\%$$

A. 2.5 相对扩展不确定度为:

$$U_{rel} = 1.3\% \quad (k = 2)$$

A. 2.6 结果及其不确定报告

偏置光光斑不均匀性校准结果扩展不确定度: $U_{rel} = 1.3\%$, $k = 2$ 。

附录 B

太阳能电池量子效率测试仪偏置光光谱匹配

测量结果不确定度评定示例

B.1 概述

B.1.1 测量依据: JJG(闽) ××—×××× 《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

B.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

B.1.3 测量用标准器: WPVS 参考太阳能电池。

B.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

B.2 测量模型

根据光谱匹配度定义和光纤光谱仪测量原理, 太阳能电池量子效率测试仪偏置光光谱匹配度 P_i 测量的数学模型为:

$$P_i = (E_i / E_\Sigma) / E_{i/\Sigma}$$

式中:

E_i ——400nm~100nm 光谱范围内 6 个波长范围的各个辐照度积分, W/m^2 ;

E_Σ ——400nm~1100nm 光谱范围内的辐照度总和, W/m^2 ;

$E_{i/\Sigma}$ ——AM1.5G 规定的各个波长范围辐照度与总辐照度的百分比, %。

B.3 输入量的标准不确定度评定

B.3.1 测量重复性引入的不确定度 u_1

重复测量同一太阳能电池量子效率测试仪偏置光的辐照度光谱匹配 P_i , 测量结果如表 1 所示, 以最大的标准偏差作为测量重复性引入的不确定度 u_1 , $u_1 = 1.59\%$ 。

表 B1 测量重复性引入的不确定度 u_1 分析表

项目	400-500 (nm)	500-600 (nm)	600-700 (nm)	700-800 (nm)	800-900 (nm)	900-1100 (nm)
P_{i1}	0.361	0.913	1.462	1.535	1.025	0.792
P_{i2}	0.358	0.903	1.450	1.523	1.020	0.830
P_{i3}	0.361	0.913	1.461	1.531	1.023	0.799
P_{i4}	0.360	0.910	1.458	1.530	1.023	0.810

P _{i5}	0.361	0.912	1.462	1.535	1.025	0.792
P _{i6}	0.359	0.903	1.450	1.523	1.021	0.831
P _{i7}	0.361	0.913	1.461	1.531	1.023	0.799
P _{i8}	0.360	0.911	1.458	1.530	1.023	0.810
P _{i9}	0.361	0.912	1.462	1.535	1.025	0.799
P _{i10}	0.358	0.909	1.450	1.523	1.020	0.831
标准偏差 (%)	0.12	0.39	0.53	0.50	0.19	1.59

B.3.2 光纤光谱仪辐射照度校准结果引入的标准不确定度 u_2

光纤光谱仪经过中国计量科学研院校准，辐射照度校准结果不确定度：400nm: $U_{rel}=6.0\%$, $k=2$; 400nm~1050nm: $U_{rel}=5.0\%$, $k=2$; 1050nm~1100nm: $U_{rel}=6.0\%$, $k=2$ 。则，400nm: $u_2=3.0\%$; 400nm~1050nm: $u_2=2.5\%$; 1050nm~1100nm: $u_2=3.0\%$ 。

B.3.3 光纤光谱仪探测器余弦修正后引入的标准不确定度 u_3

按照 B 类不确定度评定，通过改变光谱仪探头角度，确定由余弦修正带来的误差。角度偏差 15° 以内，其不确定度估算为 $u_3 = 0.7\%$ 。

B.3.4 温度偏差引入的不确定度 u_4 ，按照 B 类不确定度评定

在 10℃、25℃和 30℃环境温度条件下分别测量同一太阳电池量子效率测试仪偏置光的光谱辐照度分布，温度偏差引入的不确定度估算为 $u_4 = 0.7\%$ 。

B.4 合成标准不确定度

B.4.1 合成标准不确定度汇总表

表 B2 合成标准不确定度汇总表

不确定度分量 u_i	类别	u_i 来源	u_i 的数值
u_1	A	测量重复性	1.59%
u_2	B	光纤光谱仪辐射照度校准结果不确定度	2.5%~3.0%
u_3	B	光纤光谱仪探测器余弦修正	0.7%
u_4	B	温度偏差	0.7%

B.4.2 合成不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关，因此合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$$

则有：400 nm~1100 nm: $u_c=(3.1\% \sim 3.5\%)$, $k=2$ 。

B.5 相对扩展不确定度

400 nm~1100 nm: $U_{rel}=(6.2\% \sim 7.0\%)$, $k=2$ 。

B.6 结果及其不确定报告

偏置光光谱匹配校准结果扩展不确定度: 400 nm~1100 nm: $U_{rel}=(6.2\% \sim 7.0\%)$, $k=2$;

附录 C

太阳电池量子效率测试仪相对光谱响应示值误差

测量结果的不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 测量依据: JJG(闽) ××—×××× 《太阳电池量子效率测试仪校准规范》

C.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

C.1.3 测量用标准器: 标准探测器、标准线光谱光源。

C.1.4 测量对象: 太阳电池量子效率测试仪。

C.2 测量模型

以小光斑相对光谱响应测量不确定度评定为例, 相对光谱响应示值误差按如下计算:

$$\delta_{SR} = \frac{\overline{SR} - SR_s}{SR_s} \times 100\%$$

式中:

δ_{SR} ——相对光谱响应示值误差;

\overline{SR} ——仪器 3 次相对光谱响应校准值的平均值;

SR_s ——标准探测器的相对光谱响应标准值。

C.3 标准不确定度分量的评定

C.3.1 标准光电探测器相对光谱响应度测量 10 次重复性引起的相对标准不确定度分量 u_1

(300~400) nm: $u_1 = 0.35\%$;

(400~1100) nm: $u_1 = 0.20\%$;

(1100~1600) nm: $u_1 = 0.24\%$;

C.3.2 标准光电探测器的光谱响应度校准结果引起的标准不确定度分量 u_2

标准光电探测器的光谱响应度校准结果的相对扩展不确定度为 $U_{rel}(Ref) = (0.30\% \sim 1.1\%)$ ($k=2$)。因此, 由于标准探测器的光谱响应度引起的标准不确定度分量 u_2 为:

$$u_2 = \frac{U_{rel}(Ref)}{k}$$

(300~400) nm: $u_2=0.55\%$;

(400~1100) nm: $u_2=0.23\%$;

(1100~1600) nm: $u_2=0.77\%$;

C.3.3 单色仪带宽误差引入的不确定度分量 u_3

当标准光电探测器和被检仪器自带参考光电探测器的光谱响应的斜率不同时, 单色仪带宽会引进误差。此项不确定度约为: $u_3=0.04\%$ 。

C.3.4 光电测量部分的非线性引入的不确定度分量 u_4

当测量装置通过对辐射源进行调制, 并用锁相放大器进行测量, 可以减小杂散光的影响, 提高测量准确度。但锁相放大器有可能引进非线性误差。可用双孔径法对带光电二极管的锁相放大器进行非线性测量, 其非线性 $<0.1\%$ 。估算 $u_4=0.1\%$ 。

C.3.5 波长误差引入的不确定度分量 u_5

采用特征谱线灯对单色仪的波长偏差进行标定, 最大偏差 0.2nm 。此项不确定度为: $u_5=0.2\%$ 。

C.3.6 杂散辐射带来的不确定度分量 u_6

单色仪的杂数辐射为 10^{-10} , 用截止滤光片测量单色仪的杂数辐射, 在 460nm 测量, 大于此波长的杂数辐射应该更小, 该项误差可忽略。通带外的杂散辐射, 因采用了调制锁相方法测量, 影响也很小, 误差可忽略。因此, $u_6 = 0$ 。

C.3.7 辐射源和参考光电探测器表面均匀性影响引入的不确定度 u_7

因为每次装调探测器的位置不同, 引入误差, 实际中使用重复装调的方法验证该误差。实际测量, Si 光电探测器均匀性影响约为 0.2% , 此项不确定度取: $u_7=0.2\%$ 。

C.3.8 标准光电探测器吸收系数引起的不确定度 u_8

(300~400) nm: $u_8=0.3\%$;

(400~1100) nm: $u_8=0.2\%$;

(1100~1600) nm: $u_8=0.3\%$ 。

量子效率测试仪相对光谱响应度测量的标准不确定度分量汇总见表 C1:

表 C1 量子效率测试仪相对光谱响应度测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (%)
1	相对光谱响应度测量重复性	u_1	0.35; 0.20; 0.24

2	标准光电探测器的光谱响应度校准引起的标准不确定度	u_2	0.55; 0.23; 0.77
3	单色仪带宽误差	u_3	0.04
4	光电测量部分的非线性	u_4	0.1
5	波长误差	u_5	0.2
6	杂散辐射带来的误差	u_6	0
7	辐射源和参考光电探测器表面均匀性影响	u_7	0.2

表 C1 续 量子效率测试仪相对光谱响应度测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (%)
8	标准光电探测器吸收系数引起的误差	u_8	0.3; 0.2; 0.3

C.4 太阳能电池量子效率测试仪相对光谱响应度的合成标准不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关，因此合成标准不确定度为：

$$u_c(R) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2}$$

C.5 扩展不确定度

$$U = k \times u_c(R)$$

波长 (300~400) nm:

$$U = 2 \times \sqrt{0.00235^2 + 0.0055^2 + 0.0004^2 + 0.0011^2 + 0.002^2 + 0.0003^2} = 1.6\% (k=2);$$

波长 (400~1100) nm:

$$U = 2 \times \sqrt{0.00220^2 + 0.0023^2 + 0.0004^2 + 0.0011^2 + 0.002^2 + 0.0002^2} = 1.0\% (k=2);$$

波长 (1100~1600) nm:

$$U = 2 \times \sqrt{0.00224^2 + 0.0077^2 + 0.0004^2 + 0.0011^2 + 0.002^2 + 0.0003^2} = 1.9\% (k=2)。$$

C.6 结果及其不确定报告

相对光谱响应示值误差校准结果扩展不确定度: (300~400) nm=1.6%, $k=2$; (400~1100) nm=1.0%, $k=2$; (1100~1600) nm=1.9%, $k=2$ 。

附录 D

太阳能电池量子效率测试仪短路电流示值误差测量结果的不确定度评定示例

D.1 概述

D.1.1 测量依据: JJG (闽) ××—××××《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

D.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

D.1.3 测量用标准器: WPVS 参考太阳电池、标准探测器。

D.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

D.2 测量模型

$$\delta_{I_{sc}} = \frac{\overline{I_{sc}} - I_{scs}}{I_{scs}} \times 100\%$$

式中:

$\overline{I_{sc}}$ ——仪器 3 次校准值的平均值;

I_{scs} ——WPVS 参考太阳电池的短路电流标准值。

D.3 标准不确定度分量的评定

D.3.1 短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

此项为 A 类不确定度, 测量 WPVS 电池短路电流 6 次, 数据见表 D1, 通过下式计算太阳能电池量子效率测试仪短路电流实验标准偏差作为短路电流测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1 。

表 D1 WPVS 电池短路电流重复测量 6 次的的数据

序号	总辐照度(W·m ⁻²)
1	146.8
2	147.1
3	146.9
4	146.9
5	147.0
6	147.1
平均值 (mA)	147.0
$S(I)$ (%)	0.082

$$u_1 = \frac{S(I)}{\sqrt{3}} = 0.05\%$$

D. 3.2 WPVS 参考太阳电池校准引入的不确定度分量 u_2

此项为 B 类不确定度。WPVS 参考太阳电池证书中的扩展不确定度为 $U_{rel}=2.2\%$ ， $k=2$ ，因此由 WPVS 参考太阳电池校准引入的不确定度分量 $u_2=2.2/2=1.1\%$ 。

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果，因此，由重复性引入的标准不确定度分量 $u_2(r)$ 为：

D. 3.3 单色光均匀性引起的不确定度 u_3

由于标准探测器的受光面积与 WPVS 的受光面积存在差异，而单色光在受光面积内不可能完全均匀，对测量结果有一定影响，单色光均匀性引起的不确定度 u_3 估算为 0.2%。

D. 3.4 单光仪波长准确性造成标准器测量的偏差引起的不确定度 u_4

根据单光仪的性能指标，其分光准确度为 0.2nm，因此需要评估单光仪波长准确性引起的不确定度。计算 280nm~1200nm 范围内，以 5nm 为步进，每一个波长往前和往后偏移 0.2nm 引起的误差，取两者的最大值进行评估。该项不确定度分量按均匀分布评估，该因素对 WPVS 短路电流测量引起的相对不确定度分量估算为 $u_4=0.2\%$ 。

D. 3.5 温度造成标准器测量偏差引起的不确定度 u_5

分别测量标准硅探测器和标准锗探测器跨越 25 °C 的温度系数，分别为：0.0001 mA/°C 和 0.0004 mA/°C。测量过程中允许标准器的温度波动范围为 2 °C，以 800nm 为分界点，计算 280nm~1200nm 范围内温度偏差对两个标准器光谱响应测量的影响，估算 $u_5=0.2\%$ 。

D. 3.6 标准器摆位造成的不确定度 u_6

按照 B 类不确定度评定。标准器摆放时存在人为测量待测件电池片与标准器受光面共面的误差，按 0.5mm 估算。这一项的相对标准不确定度分量约为 $u_6=0.20\%$ 。

D. 4 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下式计算：

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 1.17\%$$

D. 5 扩展不确定度

短路电流示值误差扩展不确定度 $U(I)$ 采用下式计算：

$$U_{rel}(I) = u \times k = 2.4\%, \quad k=2$$

D. 6 结果及其不确定报告

短路电流示值误差校准结果扩展不确定度: $U_{\text{rel}}=2.4\%$, $k=2$;

附录 E

太阳电池量子效率测试仪反射率测量示值误差测量结果的不确定度评定示例

E.1 概述

E.1.1 测量依据: JJG (闽) ××—××××《太阳电池量子效率测试仪校准规范》

E.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

E.1.3 测量用标准器: 白板标准物质。

E.1.4 测量对象: 太阳电池量子效率测试仪。

E.2 测量模型

$$\delta_R = \bar{R} - R_s$$

式中:

δ_R ——反射率测量示值误差;

\bar{R} ——白板标准物质在被检仪器上 3 次反射率测量值的平均值;

R_s ——白板标准物质反射率标准值。

E.3 方差与灵敏系数

\bar{R} 、 R_s 是非相关量, 因此不确定度传播律为:

$$u_c(\delta_R) = \sqrt{c_1^2 u_1^2(\bar{R}) + c_2^2 u_2^2(R_s)}$$

$$\text{其中, } c_1 = \frac{\partial \delta_R}{\partial \bar{R}} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \delta_R}{\partial R_s} = 1。$$

E.4 标准不确定度分量的评定

E.4.1 反射率测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(R_1)$

此项为 A 类不确定度, 测量白板标准物质在 (300~1600) nm 波长范围内反射率 6 次, 测量结果的实验标准偏差如表 E1 所示。

表 E1 不同波长范围内反射率实验标准差

波长 (nm)	$s(R)$ (%)
300-400	1.414

400-1100	1.202
1100-1600	1.496

通过下式计算该反射率测试仪的反射率测量重复性引起的标准不确定度分量 $u(R_1)$ 。

$$u(R_1) = \frac{S(R)}{\sqrt{3}}$$

式中, $S(R)$ 为实验标准偏差。

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果, 因此, 由重复性引入的标准不确定度分量 $u(R_1)$ 采用式 (3) 计算, 结果如表 E2:

表 E2 不同波长范围内反射率标准不确定度分量

波长 (nm)	$u(R_1)$ (%)
300-400	0.816
400-1100	0.694
1100-1600	0.864

E. 4. 2 标准器白板标准物质的反射率校准结果引起的标准不确定度分量 $u(R_2)$

此项为B类不确定度。标准器白板标准物质的反射率校准结果的扩展不确定度为 $U=1.0\%$ ($k=2$)。校准时直接采用标准器白板标准物质的反射率作为太阳电池量子效率测试仪的调整参考, 因此, 由于标准器白板标准物质的反射率引起的标准不确定度分量 $u(R_2)$ 为:

$$u(R_2) = \frac{U}{k} = 0.5\%$$

E. 4. 3 标准白板的年变化量带来的的不确定度分量 $u(R_3)$

此项为 B 类不确定度分量。按 JJG 453-2003《标准色板检定规程》中一级色板的要求, 年变差应小于 0.5%, 按均匀分布处理, 其标准不确定度为:

$$u(R_3) = \frac{U}{k} = 0.5\% / \sqrt{3} = 0.29\%$$

反射率测量的标准不确定度分量汇总见表 E3:

表 E3 反射率测量的标准不确定度分量汇总表

序号	测量不确定度来源	标准不确定度符号	数值 (%)
1	反射率测量重复性	$u(R_1)$	(300~400) nm: 0.816 (400~1100) nm: 0.694 (1100~1600) nm: 0.864

2	标准器白板标准物质的校准	$u(R_2)$	0.5
3	标准白板年变化量	$u(R_3)$	0.29

E.5 合成标准不确定度

合成标准不确定度 $u(R)$ 采用式 (6) 计算, 结果如表 E4:

$$u(R) = \sqrt{u(R_1)^2 + u(R_2)^2 + u(R_3)^2}$$

表 E4 不同波长范围内反射率合成标准不确定度分量

波长 (nm)	$u(R)$ (%)
300-400	1.00
400-1100	0.90
1100-1600	1.04

E.6 扩展不确定度

扩展不确定度 $U(R)$ 采用下式计算, 结果如表 E5:

$$U(R) = u(R) \times k$$

表 E5 不同波长范围内反射率扩展不确定度分量

波长 (nm)	$U(R)$ (%)
300-400	2.0
400-1100	1.8
1100-1600	2.1

E.7 结果及其不确定报告

反射率测量示值误差校准结果扩展不确定度: (300~400) nm=2.0%, $k=2$; (400~1100) nm=1.8%, $k=2$; (1100~1600)nm=2.1%, $k=2$ 。

附录 F

太阳能电池量子效率测试仪波长示值误差校准结果的不确定度评定示例

F.1 概述

F.1.1 测量依据: JJG (闽) ××—×××× 《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

F.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

F.1.3 测量用标准器: 窄带宽标准滤光片。

F.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

F.2 测量模型

$$\delta_{\lambda} = \bar{\lambda} - \lambda_s$$

式中:

δ_{λ} ——波长示值误差;

$\bar{\lambda}$ ——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。

F.3 方差与灵敏系数

$\bar{\lambda}$ 、 λ_s 是非相关量, 因此不确定度传播律为:

$$u_c(\delta_{\lambda}) = \sqrt{c_1^2 u_1^2(\bar{\lambda}) + c_2^2 u_2^2(\lambda_s)}$$

其中 $c_1 = \frac{\partial \delta_{\lambda}}{\partial \bar{\lambda}} = 1$, $c_2 = \frac{\partial \delta_{\lambda}}{\partial \lambda_s} = 1$ 。

F.4 标准不确定度分量的评定

F.4.1 波长测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

此项为 A 类不确定度, 测量滤光片波长 6 次, 测量结果如表 F1 所示, 通过下式计算太阳能电池量子效率测试仪波长测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1 。

表 F1 波长重复测量 6 次数据

标准值 (nm)	测量值 (nm)						均值 (nm)	S(λ) (nm)
	1	2	3	4	5	6		
632.7	631.6	631.8	632.2	631.6	631.5	631.5	631.7	0.27

$$u_1 = \frac{S(\lambda)}{\sqrt{3}} = 0.15 \text{ nm}$$

F. 4.2 滤光片校准引入的不确定度分量 u_2

此项为 B 类不确定度。滤光片校准证书中的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=0.3 \text{ nm}$, $k=2$, 因此由滤光片校准引入的不确定度分量 $u_2=0.3 \text{ nm} / 2=0.15 \text{ nm}$ 。

测量时采用 3 次测量数值的平均值作为测量结果, 因此, 由重复性引入的标准不确定

F. 5 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下计算:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.21 \text{ nm}$$

F. 6 扩展不确定度

波长示值误差扩展不确定度 $U(\text{SR})$ 采用下式计算:

$$U_{\text{rel}}(\text{I}) = u \times k = 0.21 \text{ nm} \times 2 = 0.42 \text{ nm} \approx 0.5 \text{ nm}, \quad k=2$$

F. 7 结果及其不确定报告

波长示值误差校准结果扩展不确定度: $U_{\text{rel}}=0.5 \text{ nm}$, $k=2$;

附录 G

太阳能电池量子效率测试仪的带宽校准结果的不确定度评定示例

G.1 概述

G.1.1 测量依据: JJG(闽) ××—×××× 《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

G.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

G.1.3 测量用标准器: 窄带宽标准滤光片。

G.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

G.2 测量模型

$$BW = (BW_1 + BW_2 + BW_3) / 3$$

式中:

BW ——带宽的校准结果, nm;

BW_1 、 BW_2 和 BW_3 ——分别为三次带宽的测量值, nm。

以三次测量的带宽的平均值作为被校太阳能电池量子效率测试仪测得的标准光电探测器光谱响应值。带宽校准的不确定度分量包括被校带宽示值的测量重复性; 被校量子效率测试仪的波长分辨率引入的不确定度。以上分量彼此不相关。

G.3 校准不确定度评定

G.3.1 被校仪器带宽测量重复性引入的不确定度 u_1 , 由 6 次测试获得, 为 A 类评定。对 550 nm 波长下进行测量, 测量值见表 G1。通过下式计算太阳能电池量子效率测试仪带宽测量重复性引起的相对标准不确定度分量 u_{1rel} 。

表 1 光谱带宽 6 次测量结果

波长 (nm)	被校仪器光谱带宽测量值 (nm)						平均值 (nm)	S(BW) (nm)
	1	2	3	4	5	6		
550	9.6858	9.6849	9.6855	9.6857	9.6855	9.6850	9.6854	0.0004

$$u_{1rel} = \frac{S(BW)}{\sqrt{3}(BW)} = 0.0022\%$$

G.3.2 光谱带宽校准用的光谱仪引入的不确定度 u_2 , 为 B 类评定。光谱仪经校准所给定的扩展不确定度为 5%, $k=2$, 则标准不确定度为:

$$u_{2rel} = 5\% / 2 = 2.5\%$$

G. 4 合成标准不确定度

合成标准不确定度 u 采用下式计算:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.0022\%^2 + 2.5\%^2} = 2.5\%$$

G. 5 扩展不确定度

光谱带宽校准相对扩展不确定度 $U(\text{SR})$ 采用下式计算:

$$U_{\text{rel}}(\text{I}) = u \times k = 2.5\% \times 2 = 5\%, \quad k=2$$

带宽附近的测量不确定度为 $U_{\text{rel}} = 5\%$ ($k=2$)。

G. 6 结果及其不确定报告

光谱带宽附近校准结果扩展不确定度: $U_{\text{rel}} = 5\%$, $k=2$

附录 H

太阳能电池量子效率测试仪温控平台温度示值误差测量结果的不确定度评定示例

H.1 概述

H.1.1 测量依据: JJG(闽) ××—×××× 《太阳能电池量子效率测试仪校准规范》

H.1.2 测量环境条件: 环境温度: (25 ± 5) °C, 相对湿度: ≤80% RH。

H.1.3 测量用标准器: 窄带宽标准滤光片。

H.1.4 测量对象: 太阳能电池量子效率测试仪。

H.2 数学模型

$$\Delta T = T - T_0$$

式中:

ΔT ——温度示值误差, °C;

T ——被校太阳能电池量子效率测试仪温控平台的温度示值, °C;

T_0 ——标准器显示温度实际值, °C。

H.3 不确定度来源

不确定度来源包括: 标准器测量重复性的不确定度, 标准器校准结果引起的不确定度, 被校太阳能电池量子效率测试仪温度示值重复性引起的不确定度等。下面的测量不确定度评定以温度设定值 25°C 为例。

H.4 标准不确定度分量的评定

H.4.1 测量重复性引起的不确定度 $u_1(t)$ 评定

通过标准器对温控平台中心点温度进行 10 次独立的重复测量, 得到测量数据如表 H1 所示:

表 H1 标准器测量重复性数据

序号(i)	温度(°C)	序号(i)	温度(°C)
1	25.25	6	25.25
2	25.26	7	25.26

3	25.26	8	25.26
4	25.25	9	25.25
5	25.24	10	25.24

其算术平均值:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum T_i = 25.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

单次试验标准差:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T})^2 / (10 - 1)} = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

可得到:

$$u_1(T) = s = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

H. 4. 2 标准器校准溯源引起的标准不确定度 $u_2(T)$

标准器的温度部分校准不确定度为 $U=0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($k=2$), 则 $u_2(T)=0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

H. 4. 3 被校准太阳能电池量子效率测试仪温控平台温度示值重复性引入的标准不确定度 $u_3(T)$

用被校准仪器内置的温度传感器对环境试验箱内温度进行15次独立的重复测量, 通过被校准设备的显示设备上读数得到测量数据如表H2:

表 H2 被校辐照度测试仪温度读数的重复性数据

序号(i)	温度 (°C)	序号(i)	温度 (°C)	序号(i)	温度 (°C)
1	25.0	6	25.0	11	25.0
2	25.1	7	25.1	12	24.9
3	25.0	8	25.1	13	25.0
4	25.0	9	25.1	14	25.0
5	24.9	10	25.0	15	25.0

其算术平均值:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum T_i = 25.01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

单次试验标准差:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T})^2 / (15 - 1)} = 0.06^{\circ}\text{C}$$

可得到:

$$u_3(T) = s = 0.06^{\circ}\text{C}$$

由于各影响量彼此独立不相关, 因此合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{\sum_1^6 (u_i(r))^2} = 6.98 \text{ W m}^{-2}$$

H. 5 标准不确定度的评定

H. 5.1 标准不确定度分量一览表

表 H3 标准不确定度分量与灵敏系数计算列表

分量 $u(i)$	不确定度来源	标准不确定度分量 ($^{\circ}\text{C}$)
$u_1(r)$	标准器测量重复性引起的不确定度	0.01
$u_2(r)$	标准器的温度部分校准溯源引起的不确定度	0.03
$u_3(r)$	校准太阳能电池量子效率测试仪温控平台温度示值重复性引起的不确定度	0.06

H. 6 合成标准不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关, 因此合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{\sum_1^3 (u_i)^2} = 0.08^{\circ}\text{C}$$

H. 7 扩展不确定度的确定

取置信概率 $p = 95\%$, 取 $k=2$, 本次校准测量结果的相对扩展不确定度为:

$$U = 0.08^{\circ}\text{C} \times 2 = 0.16^{\circ}\text{C} \quad (k=2)$$

H. 8 结果及其不确定报告

温控平台温度示值误差校准结果扩展不确定度: $U=0.16^{\circ}\text{C}$, $k=2$ 。

附录 I

太阳能电池量子效率测试仪校准原始记录格式

证书编号_____ 记录编号_____

委托单位_____ 委托单位地址_____

仪器型号 / 规格_____ 出厂编号_____

光源类型_____ 制造厂_____

校准地点_____

校准依据_____

校准环境条件：温度_____℃ 相对湿度_____%RH

表 11 校准使用设备

序号	主标准器名称	型号规格	编号	不确定度或准确度等级或最大允许误差	证书编号	有效期至

- D1 外观检查：_____
- D2 单色光光斑不均匀性：_____
- D3 偏置光光斑不均匀性：_____
- D4 偏置光光谱匹配度：_____
- D5 相对光谱响应示值误差：_____
- D6 光谱响应测量重复性：_____
- D7 短路电流示值误差：_____
- D8 反射率测量示值误差：_____

D9 波长示值误差: _____

D10 光谱带宽: _____

D11 温控平台示值误差: _____

D12 温控平台稳定性: _____

D13 温控平台均匀性: _____

校准结果不确定度:

校准员_____ 核验员_____

校准日期_____