

ICS 29.220

CCS K 80

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

柔性砷化镓太阳能电池光电转换效率测试方法

Testing method for photovoltaic conversion efficiency of flexible gallium
arsenide solar cells

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 技术要求 错误！未定义书签。

4.1 一般要求 错误！未定义书签。

4.2 温热性能要求 错误！未定义书签。

4.3 红外辐射性能要求 错误！未定义书签。

4.4 EMS 微电流性能要求 错误！未定义书签。

4.5 振动按摩性能要求 错误！未定义书签。

4.6 计时与控制功能要求 错误！未定义书签。

4.7 电气安全要求 错误！未定义书签。

4.8 电磁兼容要求 错误！未定义书签。

4.9 环境适用性要求 错误！未定义书签。

4.10 可靠性要求 错误！未定义书签。

5 试验方法 错误！未定义书签。

5.1 试验条件 错误！未定义书签。

5.2 温热性能试验 错误！未定义书签。

5.3 红外辐射性能试验 错误！未定义书签。

5.4 EMS 微电流性能试验 错误！未定义书签。

5.5 振动按摩性能试验 错误！未定义书签。

5.6 计时与控制功能试验 错误！未定义书签。

5.7 电气安全试验 错误！未定义书签。

5.8 电磁兼容试验 错误！未定义书签。

5.9 环境适应性试验 错误！未定义书签。

5.10 可靠性试验 错误！未定义书签。

6 检验规则 错误！未定义书签。

6.1 检验分类 错误！未定义书签。

6.2 出厂检验 错误！未定义书签。

6.3 型式检验 错误！未定义书签。

7 标志、包装、运输与贮存 错误！未定义书签。

7.1 标志 错误！未定义书签。

7.2 包装 错误！未定义书签。

7.3 运输 错误！未定义书签。

7.4 贮存 错误！未定义书签。

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专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

柔性砷化镓太阳能电池光电转换效率测试方法

1 范围

本文件规定了柔性砷化镓太阳能电池光电转换效率测试的测试条件、测试设备、测试样品、测试程序、计算方法和测试报告。

本文件适用于单结及多结柔性砷化镓太阳能电池（含单体电池和组件），在自然阳光或模拟阳光下进行光电转换效率测试。

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/T 2297 太阳光伏能源系统术语
- GB/T 25075 太阳能电池用砷化镓单晶
- GB/T 6495.1 光伏器件 第1部分：光伏电流-电压特性的测量
- GB/T 6495.101 光伏器件 第1-1部分：多结光伏器件电流-电压特性的测量
- GB/T 6495.2 光伏器件 第2部分：标准光伏器件的要求
- GB/T 6495.3 光伏器件 第3部分：基于标准光谱辐照度数据的地面光伏器件测量原理
- GB/T 6495.5 光伏器件 第5部分：用开路电压法确定光伏器件的等效电池温度（ECT）
- GB/T 6495.7 光伏器件 第7部分：光伏器件测量的光谱失配修正计算方法
- GB/T 6495.8 光伏器件 第8部分：光伏器件光谱响应的测量
- GB/T 6495.801 光伏器件 第8-1部分：多结光伏器件光谱响应的测量
- GB/T 6495.9 光伏器件 第9部分：太阳模拟器特性分级
- GB/T 6495.10 光伏器件 第10部分：线性相关性和线性特性测量方法
- GB/T 38200 太阳能电池量子效率测试方法
- GB/T 46982 光伏器件 I-V特性的温度和辐照度修正方法

3 术语和定义

GB/T 2297 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光电转换效率 photovoltaic conversion efficiency

在规定的 spectra 辐照度、总辐照度、电池温度和样品状态下，柔性砷化镓太阳能电池输出的最大电功率与入射到其有效受光面积上的太阳辐射功率之比。

3.2

外量子效率 external quantum efficiency (EQE)

在给定波长下，被外电路收集的光生载流子数与入射到电池受光面的光子数之比，按公式（1）计算。

$$EQE(\lambda) = \frac{N_e(\lambda)}{N_{ph}(\lambda)} \dots\dots\dots (1)$$

或根据短路光电流按公式（2）计算：

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda) \times h \times c}{q \times \lambda \times E(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

λ ——入射单色光波长，单位为米（m）；

$N_e(\lambda)$ ——被外电路收集的光生载流子数；

$N_{ph}(\lambda)$ ——入射光子数；

$J_{ph}(\lambda)$ ——给定波长下的光生电流密度，单位为安培每平方米（A/m²）；

h ——普朗克常数；

c ——真空中光速；

q ——基本电荷；

$E(\lambda)$ ——给定波长下的单色光辐照度，单位为瓦每平方米（W/m²）。

3.3

内量子效率 internal quantum efficiency (IQE)

在给定波长下，被外电路收集的光生载流子数与被太阳电池吸收的光子数之比，按公式（3）计算。

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{A_{abs}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

当不考虑透射损失，且反射率为 $R(\lambda)$ 时，可按公式（4）计算：

$$IQE(\lambda) \approx \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$A_{abs}(\lambda)$ ——电池在给定波长下的吸收光子比例。

注1：外量子效率包含电池表面反射、窗口层吸收、栅线遮挡、封装层透射损失等外部光学损失影响；内量子效率主要反映被吸收光子产生并收集载流子的能力。

注2：对于多结柔性砷化镓太阳电池，应分别测量或给出各子结的量子效率。测量某一子结时，应采用适当偏置光使非待测子结不限制电流。

注3：量子效率曲线可用于计算各子结在规定光谱下的短路电流密度，并用于判断多结电池的限流结、电流匹配和光谱失配情况。

3.4

光谱响应 spectral response

在给定波长的单色光照射下，柔性砷化镓太阳电池产生的光电流与入射单色光辐射功率之比。光谱响应通常用 $SR(\lambda)$ 或 $S(\lambda)$ 表示，单位为安培每瓦（A/W），按公式（5）计算。

$$SR(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{P_\lambda} \quad \dots\dots\dots (5)$$

或以电流密度形式表示为式（6）：

$$SR(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{E_\lambda} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$SR(\lambda)$ ——波长 λ 处的光谱响应，单位为安培每瓦（A/W）；

$I_{ph}(\lambda)$ ——波长 λ 处的光生电流，单位为安培（A）；

P_λ ——入射到有效受光面积上的单色光辐射功率，单位为瓦（W）；

$J_{ph}(\lambda)$ ——波长 λ 处的光生电流密度，单位为安培每平方米（A/m²）；

E_λ ——波长 λ 处的单色光辐照度，单位为瓦每平方米（W/m²）。

光谱响应与外量子效率之间的关系为：

$$SR(\lambda) = \frac{EQE(\lambda) \times q \times \lambda}{h \times c} \quad \dots\dots\dots (7)$$

当 λ 以纳米 (nm) 为单位时, 可近似表示为式 (8):

$$SR(\lambda) = \frac{EQE(\lambda) \times \lambda}{1240} \dots\dots\dots (8)$$

注 1: 光谱响应表征太阳能电池对不同波长入射光的电流输出能力, 是进行光谱失配修正和多结电池子结电流匹配分析的重要参数。

注 2: 对于柔性碲化镉太阳能电池, 光谱响应可能受到外延结构、窗口层、减反射膜、柔性衬底、转移工艺、封装材料及弯曲状态的影响。

注 3: 对于多结柔性碲化镉太阳能电池, 应分别给出各子结的光谱响应。各子结光谱响应可用于计算标准光谱或指定光谱下的子结光生电流, 并判断限流结。

4 测试原理

4.1 光电转换效率基本测试原理

4.1.1 测试原理

在规定的光谱辐照度、总辐照度、电池温度和样品状态下, 对被测电池进行电流-电压特性测量, 获得其短路电流、开路电压、最大功率点电流、最大功率点电压和最大输出功率, 并由最大输出功率与入射到有效受光面积上的辐射功率之比计算光电转换效率。

4.1.2 测试步骤

具体要求如下:

- a) 测试时, 采用自然阳光或太阳模拟器向被测电池受光面提供规定光照;
- b) 入射光子被碲化镉太阳能电池吸收后, 当光子能量大于材料相应带隙时, 在电池内部产生电子-空穴对;
- c) 在内建电场作用下, 光生载流子被分离并由外电路收集, 形成光生电流;
- d) 调节外部负载或源表扫描电压, 记录电池输出电流随电压变化的关系, 得到 I-V 特性曲线;
- e) 由 I-V 曲线进一步得到 P-V 特性曲线, 并确定最大功率点。

4.2 单结柔性碲化镉太阳能电池测试原理

具体测试原理如下:

- a) 测试结果主要取决于入射光谱、总辐照度、电池温度、有效受光面积和 I-V 扫描条件;
- b) 测试中应保证被测样品与标准器件处于等效测试平面, 电气连接稳定, 并根据需要进行辐照度、温度和光谱失配修正。

4.3 多结柔性碲化镉太阳能电池测试原理

具体测试原理如下:

- a) 由于各子结串联堆叠连接, 器件输出电流受产生最小光电流的子结限制;
- b) 测试原理除符合单结电池 I-V 测试基本要求外, 还应考虑各子结的光谱响应、光谱匹配和电流匹配关系;
- c) 测试光谱应尽可能使各子结产生的光电流与规定报告光谱下的光电流一致;
- d) 必要时, 应测量或引用各子结量子效率或光谱响应数据, 计算光谱失配因子、匹配因子和子结电流平衡, 并识别限流结。

4.4 柔性结构特殊测试原理

具体测试原理如下:

- a) 样品在测试过程中应保持规定的平展状态或弯曲状态, 避免因夹持、翘曲、褶皱、接触压力、局部遮光或弯曲应力引起 I-V 曲线异常;
- b) 若在弯曲状态下测试, 应记录弯曲半径、弯曲方向、夹持方式和受光面状态, 并将其作为测试结果对应的样品状态条件。

4.5 量子效率与光谱响应辅助测试原理

量子效率和光谱响应测试可作为光电转换效率测试的辅助表征方法, 具体要求如下:

a) 量子效率反映不同波长光子产生并被收集为载流子的能力，光谱响应反映单位入射光功率产生的光电流。

b) 对于多结柔性砷化镓太阳能电池，量子效率和光谱响应数据可用于计算各子结在规定光谱下的短路电流密度，判断限流结，评估光谱失配，并为光电转换效率测试条件的设定和修正提供依据。

5 测试条件

5.1 光谱条件

5.1.1 测试光源

可采用自然阳光或太阳模拟器，应满足以下要求：

- a) 用于柔性砷化镓太阳能电池光电转换效率测试的入射光谱应与规定报告条件相匹配；
- b) 地面应用产品宜采用 AM1.5G 标准光谱；
- c) 空间应用产品宜采用 AM0 标准光谱，或采用供需双方约定的其他光谱条件。

5.1.2 光谱范围

应满足以下要求：

- a) 太阳模拟器的光谱范围应覆盖被测柔性砷化镓太阳能电池的有效光谱响应范围；
- b) 对于单结柔性砷化镓太阳能电池，测试光谱应覆盖其主要吸收波段；
- c) 对于多结柔性砷化镓太阳能电池，测试光谱应覆盖各子结的光谱响应范围。

5.1.3 多结电池光谱匹配

用于多结柔性砷化镓太阳能电池测试时，宜采用光谱辐照度可调的太阳模拟器。测试光谱应使各子结在测试条件下产生的光电流与报告光谱条件下的光电流相匹配。各子结匹配因子 Z_i 应在 1.00 ± 0.03 范围内。

5.1.4 光谱失配修正

测试光谱条件下的限流结宜与报告光谱条件下的限流结一致。若测试光谱与报告光谱存在偏差，应根据被测电池和标准器件的光谱响应数据进行光谱失配修正，并在测试报告中给出光谱失配因子、匹配因子及修正方法。

5.1.5 光谱响应辅助条件确定

当采用量子效率或光谱响应数据辅助确定测试条件时，应按 GB/T 38200 或相应光谱响应测试方法获得各子结的光谱响应曲线，并用于计算各子结短路电流密度、电流匹配情况和限流结。

注：对于柔性砷化镓太阳能电池，减反射膜、柔性衬底、临时支撑层、封装膜层和弯曲状态均可能影响有效入射光谱，应在测试状态中保持一致并记录。

5.2 温度条件

5.2.1 基准测试温度

无特殊规定时，被测柔性砷化镓太阳能电池的测试温度应为 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。

5.2.2 温度传感器布置

温度测量传感器应尽可能靠近被测电池结区或能够代表电池实际工作温度的位置。对于裸电池或薄膜柔性电池，可将温度传感器布置在样品背面靠近有效受光区域的位置；对于封装样品，应考虑封装层、胶层和柔性基底导致的温度梯度。

5.2.3 温度记录与修正

测试过程中应记录被测样品温度、标准器件温度和环境温度。若被测样品温度与报告温度存在显著偏差，应按适用方法进行温度修正，并将修正方法、温度系数及修正前后结果写入测试报告。

5.2.4 太阳模拟器测试温度控制

采用稳态太阳模拟器测试时，应注意连续光照导致的样品升温。应在样品达到热稳定后测量，或在规定时间窗口内完成 I-V 扫描并记录温度变化。采用脉冲太阳模拟器测试时，应保证触发前样品处于规定温度，并评估脉冲期间升温对测试结果的影响。

5.2.5 弯曲状态样品温度要求

对于弯曲状态下测试的柔性样品，应保证弯曲夹具或支撑结构不引入明显局部温差。若夹具具有控温功能，应说明控温方式、设定温度和温度测量位置。

5.3 测试环境

5.3.1 总体环境与杂散光控制

测试应在清洁、稳定、无明显杂散光干扰的环境中进行。测试区域应避免外界光源、反射面、热辐射源和气流扰动对测试结果产生影响。量子效率或光谱响应辅助测试时，单色光光路、被测样品和辐照度探测器宜采取遮光措施，杂散辐射强度宜小于总辐射强度的 0.1%。

5.3.2 实验室环境参数要求

实验室测试环境宜满足下列要求：

- a) 环境温度：23℃～27℃，或满足测试设备和样品温度控制要求；
- b) 相对湿度：不大于 75%，且样品表面无凝露；
- c) 环境压力：常压；
- d) 测试台面：稳定、无明显振动；
- e) 电磁环境：不应影响微弱电流和电压信号采集。

5.3.3 安装平面

被测柔性砷化镓太阳能电池与标准器件应处于等效测试平面。受光面与测试平面的夹角偏差应满足测试方法要求；被测样品、标准器件和辐照度监测器的有效受光面宜保持共面。

5.3.4 样品装夹要求

柔性样品应固定在专用样品夹具或样品台上。夹具不应遮挡有效受光面积，不应造成样品褶皱、翘曲、压痕、划伤、脱层或电极损伤。平展状态测试时，样品应保持平整；弯曲状态测试时，应保持规定弯曲半径和弯曲方向，并在整个测试过程中保持稳定。

5.3.5 自然阳光测试环境要求

自然阳光下测试时，应同步记录总辐照度、光谱辐照度、样品温度、环境温度、风速、太阳入射角和测试时间。测试期间光照应稳定，云影、遮挡、强反射或快速辐照度波动不应影响 I-V 曲线采集。必要时，应使用辐照度监测器对测试期间的辐照度波动进行修正。

6 测试设备

6.1 太阳模拟器

6.1.1 通用性能要求

太阳模拟器应能够在被测柔性砷化镓太阳能电池的有效受光区域内提供稳定、均匀且光谱匹配的模拟太阳辐照。太阳模拟器的光谱匹配度、辐照度空间不均匀性和辐照度时间不稳定性应符合 GB/T 6495.9 或 IEC 60904-9 的要求。

6.1.2 柔性砷化镓太阳能电池专项要求

用于柔性砷化镓太阳能电池光电转换效率测试的太阳模拟器宜满足下列要求：

- a) 光谱范围应覆盖被测电池的主要光谱响应范围；
- b) 测试平面有效照射面积应不小于被测样品、标准器件和辐照度监测器所需面积；
- c) 测试平面辐照度应能够调节至规定报告辐照度；
- d) 辐照度时间稳定性应满足 I-V 曲线采集要求；
- e) 稳态或脉冲光源均可使用，但应保证 I-V 测试结果接近稳态性能。

6.1.3 单结与多结电池光谱适配要求

对于单结柔性砷化镓太阳能电池，太阳模拟器应能提供与规定报告光谱相匹配的入射光谱。对于多结柔性砷化镓太阳能电池，宜采用光谱辐照度可调太阳模拟器，使各子结在测试光谱下产生的光电流与报告光谱下相匹配。各子结匹配因子 Z_i 应满足测试条件要求。

6.1.4 脉冲太阳模拟器附加要求

采用脉冲太阳模拟器时，脉冲宽度、光强稳定性和数据采集速率应满足完整 I-V 曲线测量要求。若单次脉冲不能获得稳定、完整的 I-V 曲线，可采用多脉冲分段扫描或单点阶梯扫描方法，并在测试报告中说明。

6.2 电子负载

6.2.1 总体功能要求

电子负载、源表或 I-V 测试仪应能够在规定光照条件下对被测柔性砷化镓太阳电池进行电流-电压特性扫描,并准确获得短路电流、开路电压、最大功率点电流、最大功率点电压和最大输出功率。

6.2.2 设备性能指标要求

电子负载宜满足下列要求:

- 电压和电流量程应覆盖被测样品从短路点至开路点的工作范围;
- 支持正向扫描、反向扫描、阶梯扫描或指定电压点测量;
- 电压、电流采样速率应与太阳模拟器光源类型相匹配;
- 电流和电压测量不确定度宜优于 0.2%;
- 应支持四线法测量,减少引线电阻和接触电阻引起的误差;
- 对小面积或低电流样品,应具有足够低的噪声和分辨率。

6.2.3 接线与测点布置要求

对于柔性砷化镓裸电池或薄膜电池,宜采用四线法连接。电压采样点应尽可能靠近电池输出端或规定接触点,电流导线应尽可能短,避免引线压降影响填充因子和最大功率点。

6.2.4 电容效应样品扫描设置

当被测样品存在明显电容效应时,应合理设置扫描速率、扫描方向和采样延时。必要时,应通过比较正反向扫描结果或不同扫描速率结果,确认电子负载设置不会造成明显测试偏差。

6.3 温度测量与控制装置

6.3.1 总体性能要求

温度测量与控制装置应能够测量并维持被测柔性砷化镓太阳电池、标准器件及测试环境的温度。温度测量装置的测量不确定度应不大于 0.5℃。

6.3.2 装置专项要求

温度测量与控制装置宜满足下列要求:

- 温度传感器应尽可能靠近被测电池结区或有效受光区域;
- 温度传感器不应遮挡有效受光面积;
- 控温样品台应能使样品达到规定测试温度;
- 控温过程不应引起样品褶皱、翘曲、脱层或电极损伤;
- 应能够记录测试前、测试中或测试后的样品温度。

6.3.3 传感器布置要求

对于裸片或薄膜柔性样品,可将温度传感器布置在样品背面靠近有效受光区域的位置。对于封装样品,应考虑封装层、胶层、柔性衬底和夹具引起的温度梯度。

6.3.4 不同模拟器工况温度处理

采用稳态太阳模拟器测试时,应注意连续光照造成样品温升。采用脉冲太阳模拟器测试时,应保证触发前样品温度符合规定要求。若测试温度与报告温度存在偏差,应按适用方法进行温度修正,并在报告中说明。

6.4 辐照度测量装置

6.4.1 装置用途与器件溯源要求

辐照度测量装置用于确定或监测测试平面上的入射辐照度。可采用标准太阳电池、标准子电池、标准组件、光伏标准器件、总辐射表或光谱辐射计。所用标准器件应具有有效溯源的校准证书,并在校准有效期内使用。

6.4.2 装置性能要求

辐照度测量装置宜满足下列要求:

- 标准器件应符合 GB/T 6495.2 或 IEC 60904-2 的要求;
- 标准器件校准应具有量值溯源性;
- 标准器件光谱响应应尽可能与被测电池相匹配;
- 辐照度监测器应具有足够快的时间响应;
- 测试期间应记录辐照度变化;

f) 需要光谱失配修正时, 应测量或获得测试光谱辐照度分布。

6.4.3 单结、多结电池标准器件选用

对于单结柔性砷化镓太阳电池, 可采用光谱响应相匹配的标准太阳电池。对于多结柔性砷化镓太阳电池, 宜采用与各子结光谱响应匹配的标准子器件; 当采用宽光谱标准器件时, 应进行光谱失配修正, 并将修正因子和不确定度纳入测试报告。

6.4.4 光谱辐射计配置要求

当进行自然阳光下测试或需要进行光谱失配修正时, 应配备光谱辐射计。光谱辐射计的测量范围应覆盖被测样品和标准器件的光谱响应范围。

6.5 柔性样品夹具

6.5.1 夹具功能总体要求

柔性样品夹具用于固定被测柔性砷化镓太阳电池, 使其在测试过程中保持规定的平展状态或弯曲状态, 并提供稳定的电接触。夹具设计不应改变被测样品的有效受光状态, 不应引入明显光学、电学或热学误差。

6.5.2 夹具设计与性能要求

柔性样品夹具应满足下列要求:

- 能使样品保持平展状态, 或保持规定弯曲半径和弯曲方向;
- 不遮挡有效受光面积;
- 不造成样品褶皱、翘曲、压痕、划伤、脱层或电极损伤;
- 能提供稳定、低接触电阻的电连接;
- 支持四线法测试;
- 夹具材料在被测光谱范围内不应产生明显反射、散射或杂散光;
- 夹具结构不应造成样品局部过热或明显温度梯度;
- 对弯曲测试, 应能在整个 I-V 扫描过程中保持弯曲状态稳定。

6.5.3 平展与弯曲状态装夹要求

应满足以下要求:

- 平展状态测试时, 宜采用真空吸附平台、平整导热支撑板或边缘夹持方式固定样品。采用真空吸附时, 应避免吸附孔、台面纹理或局部压力造成样品形变。
- 弯曲状态测试时, 夹具应具有确定的弯曲半径。弯曲半径、弯曲方向、受光面朝向、弯曲轴与栅线或互连方向的关系应在测试报告中记录。

6.5.4 电接触方式及控制要求

夹具的电接触方式可采用焊带、探针、弹性压接、导电夹具或其他适用方式。对于柔性薄膜样品, 应控制接触压力, 避免因接触压力变化造成串联电阻变化或局部机械损伤。

7 测试样品

7.1 样品要求

7.1.1 样品总体范围

被测样品应为结构完整、状态明确、可进行电流-电压特性测试的柔性砷化镓太阳电池, 包括单结柔性砷化镓太阳电池、多结柔性砷化镓太阳电池、柔性电池串或小型柔性组件。

7.1.2 样品基本技术要求

样品应满足下列要求:

- 样品应具有明确的型号、编号、批次、结构类型和结数;
- 样品受光面应清洁、干燥, 无明显污染、划伤、裂纹、脱层、褶皱或电极损伤;
- 样品电极应完整, 正负极标识清晰, 能够进行稳定电连接;
- 样品有效受光面积应能够确定;
- 样品在测试过程中不应发生明显光致变化、热致变化或机械形变;
- 多结样品应提供各子结设计信息、光谱响应或量子效率数据, 必要时用于光谱匹配和限流判断;

g) 弯曲状态测试样品应具有规定的弯曲半径、弯曲方向和允许弯曲次数等信息。

7.1.3 附加结构及多结样品特殊要求

应满足以下要求：

a) 若样品带有封装层、柔性衬底、临时支撑膜、减反射膜、保护膜或互连结构，应在测试记录中说明其状态。测试时保留或去除相关膜层，应按产品技术文件、试验方案或供需双方约定执行；

b) 对于多结柔性砷化镓太阳能电池，应确认测试光谱能够覆盖各子结光谱响应范围。若需要进行光谱失配修正，应获得被测样品及标准器件的光谱响应或量子效率数据。

7.2 样品准备

7.2.1 测试前准备

测试前应对样品进行外观检查、电极检查和基本电性能检查。样品受光面如有灰尘或轻微污染，可采用不损伤表面膜层和电极的方式清洁。不得采用可能改变减反射膜、封装层或柔性基底性能的清洁方法。

7.2.2 样品准备步骤

样品准备应包括下列步骤：

- 核对样品编号、型号、结构类型、结数和测试状态；
- 检查样品受光面、电极、互连区、封装边缘和柔性衬底是否完好；
- 确定用于效率计算的有效受光面积；
- 根据测试要求安装掩模或限定光斑面积；
- 按规定方式连接正负极，并优先采用四线法连接；
- 将样品固定在柔性样品夹具或样品台上；
- 使样品达到规定的平展状态或弯曲状态；
- 使样品温度达到规定测试温度；
- 必要时进行稳定化处理或预照射处理。

7.2.3 平展及弯曲状态样品装夹要求

应满足以下要求：

a) 平展状态测试时，样品应平整固定，不应出现明显翘曲、褶皱或局部悬空。采用真空吸附、边缘夹持或平面支撑时，不应造成有效受光区遮挡或局部机械损伤；

b) 弯曲状态测试时，应使用规定半径的弯曲夹具。样品应沿规定方向弯曲，并在整个 I-V 扫描期间保持弯曲状态稳定。测试记录中应注明弯曲半径、弯曲方向、受光面朝向、弯曲轴与栅线或互连方向的关系。

7.2.4 稳态化处理与多结样品预处理

应满足以下要求：

a) 样品若具有亚稳态特性、明显光照响应变化或电容效应，应在测试前按产品技术文件或试验方案进行稳定化处理。未进行稳定化处理的，应在测试报告中说明。

b) 对于多结柔性砷化镓太阳能电池，测试前宜确认各子结光谱响应或量子效率数据。需要测量各子结量子效率时，应按 GB/T 38200 的要求设置单色光、偏置光和偏置电压。

7.3 样品数量

7.3.1 样品数量应根据测试目的确定。用于单件样品效率测试时，可对同一样品进行不少于三次重复 I-V 测量，并以重复测试结果评价测试稳定性。

7.3.2 用于产品评价、型式试验、批次一致性评价或方法验证时，样品数量应按产品标准、技术协议或试验方案规定。无明确规定时，宜每种结构或每个批次选取不少于 3 件样品。

7.3.3 确认原则

样品数量宜按下列原则确定：

- 单件委托测试：不少于 1 件，每件样品重复测试不少于 3 次；
- 批次性能评价：每批次不少于 3 件；
- 弯曲状态影响评价：每种弯曲半径或弯曲方向不少于 3 件；
- 多结光谱匹配验证：每种结构不少于 3 件，必要时增加量子效率或光谱响应测试样品；

e) 方法重复性或实验室比对：样品数量应满足统计分析要求。

7.3.4 测试与报告记录

应满足以下要求：

a) 当同一样品需进行平展状态和弯曲状态对比测试时，宜先进行平展状态测试，再进行弯曲状态测试。若弯曲测试可能对样品造成不可逆影响，应使用独立样品或在报告中说明测试顺序及其可能影响。

b) 测试报告中应记录实际测试样品数量、有效测试样品数量、剔除样品及剔除原因。

8 测试程序

8.1 设备预热与校准

8.1.1 设备状态检查基本要求

应满足以下要求：

a) 测试前应检查太阳模拟器、电子负载或源表、辐照度测量装置、温度测量与控制装置、数据采集系统和柔性样品夹具的工作状态；所有用于量值传递的标准器件和测量仪器应经校准或检定，并在有效期内使用。

b) 太阳模拟器应按设备说明书规定进行预热，直至光源输出达到稳定状态；稳态太阳模拟器应确认辐照度时间稳定性满足 I-V 曲线采集要求；脉冲太阳模拟器应确认脉冲宽度、脉冲重复性、光强稳定性和数据采集触发同步满足测试要求。

8.1.2 操作步骤

设备预热与校准应按下列步骤进行：

- a) 开启太阳模拟器、电子负载或源表、温度控制装置、辐照度监测器和数据采集系统；
- b) 按设备要求完成预热，使光源输出、电测系统和温控系统达到稳定；
- c) 将标准器件放置于测试平面，使其有效受光面与测试平面一致；
- d) 调整太阳模拟器辐照度，使测试平面总辐照度达到规定报告辐照度；
- e) 记录标准器件输出、标准器件温度、辐照度监测器输出和太阳模拟器状态；
- f) 如有必要，将标准器件校准结果传递至辐照度监测器；
- g) 检查测试平面辐照度空间均匀性和时间稳定性；
- h) 检查电压、电流测量通道零点、量程和采样设置；
- i) 确认四线法连接、极性和接触状态正确。

8.1.3 修正要求

标准器件与被测样品宜位于同一测试平面。若标准器件和被测样品不能同时放置，应分别放置在等效位置进行测量，并利用辐照度监测器修正短期辐照度波动。若二者同时放置，应确保有效受光面共面，并评估辐照度空间非均匀性对测量结果的影响。

8.1.4 设备确认及修正数据记录

对于多结柔性砷化镓太阳电池，应在 I-V 测试前确认测试光谱满足多结器件测量要求，应满足以下要求：

- a) 宜采用光谱辐照度可调太阳模拟器，使各子结匹配因子 Z_i 满足规定范围，若采用固定光谱太阳模拟器，应通过光谱响应或量子效率数据确认测试条件满足多结测试要求；
- b) 当测试结果需要修正至报告条件时，应记录用于修正的原始数据，包括测试辐照度、测试光谱、标准器件温度、被测样品温度、光谱失配因子及相关修正参数。

8.2 温度控制

8.2.1 温度控制总体要求

被测柔性砷化镓太阳电池、标准器件和测试环境的温度应在测试前达到稳定。被测样品温度应控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

8.2.2 温度传感器布置要求

温度传感器应尽可能靠近被测电池结区或有效受光区域，且不得遮挡有效受光面积。对于裸电池或薄膜柔性样品，温度传感器宜布置在样品背面靠近有效受光区的位置；对于封装样品，应考虑封装层、胶层、柔性衬底和夹具引起的温度梯度。

8.2.3 温度控制操作步骤

温度控制应按下列步骤进行：

- a) 将样品安装在柔性样品夹具或控温样品台上；
- b) 设置样品台或夹具温度至规定测试温度；
- c) 等待样品、夹具和标准器件达到热稳定；
- d) 记录测试前样品温度、标准器件温度和环境温度；
- e) 在 I-V 曲线采集期间或采集前后立即记录样品温度；
- f) 若温度偏离报告温度，应按适用方法进行温度修正。

8.2.4 不同模拟器及弯曲样品温度特殊要求

8.2.4.1 采用稳态太阳模拟器测试时，应注意连续光照导致的样品升温。可在样品达到热平衡后进行测试，或在规定时间内快速完成 I-V 扫描，并记录测试期间温度变化。

8.2.4.2 采用脉冲太阳模拟器测试时，应保证触发前样品处于规定温度。若脉冲光照引起的温升可忽略，可记录触发前温度作为测试温度；若温升不可忽略，应评估其对 I-V 参数和效率结果的影响。

8.2.4.3 对于弯曲状态测试的柔性样品，应保证弯曲夹具不会引入明显局部温差。若样品弯曲后与控温台接触不充分，应在测试报告中说明温度测量位置和可能的不确定度影响。

8.3 I-V 特性曲线测试

8.3.1 I-V 测试总体要求

8.3.1.1 I-V 特性曲线测试应在规定光谱辐照度、总辐照度、电池温度和样品状态下进行，测试应覆盖从短路点至开路点的电压范围，并获得足够数据点用于确定短路电流、开路电压、最大功率点电流、最大功率点电压、最大输出功率、填充因子和光电转换效率。

8.3.1.2 测试前应确认被测样品受光面清洁、无遮挡，样品处于规定平展或弯曲状态，电极连接稳定。宜采用四线法连接被测样品，电压采样点应尽可能靠近电池输出端或规定接触点，避免引线电阻和接触电阻影响填充因子及最大功率点。

8.3.2 I-V 特性曲线测试操作步骤

I-V 特性曲线测试应按下列步骤进行：

- a) 将被测样品固定在柔性样品夹具或样品台上；
- b) 确认样品有效受光面积、掩模状态和受光面状态；
- c) 连接电流、电压测试线路，确认极性正确；
- d) 调整样品温度至规定测试温度；
- e) 开启太阳模拟器或移除遮光装置，使样品接受规定光照；
- f) 按设定扫描方式采集 I-V 曲线；
- g) 同步记录辐照度监测器输出、样品温度和必要的环境参数；
- h) 根据 I-V 曲线计算 P-V 曲线并确定最大功率点；
- i) 保存原始数据、修正数据和计算结果。

8.3.3 扫描方式与数据点设置要求

8.3.3.1 I-V 扫描方式可采用正向扫描、反向扫描、阶梯扫描或指定电压点测量。

8.3.3.2 数据点应覆盖短路电流点、最大功率点和开路电压点，最大功率点附近以及最大功率点至开路电压之间宜设置较高的数据点密度，以提高最大输出功率和填充因子的提取准确性。

8.3.4 电容效应及多结电池专项测试要求

应满足以下要求：

a) 对于高效砷化镓太阳电池、多结太阳电池或具有明显电容效应的样品，应合理选择扫描速率、扫描方向和采样延时。扫描速率过快可能导致 I-V 曲线偏离稳态条件，从而影响最大功率点和填充因子。必要时应采用阶梯扫描、多脉冲分段扫描或降低扫描速率的方法。

b) 对于多结柔性砷化镓太阳电池，I-V 曲线测试前应确认测试光谱下各子结的电流匹配情况。测试光谱条件下的限流结宜与报告光谱条件下的限流结一致。若存在光谱失配，应根据各子结光谱响应或量子效率数据进行修正，并报告匹配因子、光谱失配因子和限流结信息。

8.3.5 数据修正要求

若测试条件与报告条件不一致，应按适用方法对 I-V 曲线进行辐照度、温度或光谱失配修正。修正

前后数据均应保存，并在测试报告中说明修正方法和修正参数。

8.4 重复测试

8.4.1 重复测试总体要求

为评价测试重复性和样品状态稳定性，同一样品在相同测试条件下应进行不少于三次 I-V 曲线测试。每次测试前应确认样品位置、接触状态、温度、辐照度和样品形态未发生异常变化。

8.4.2 重复测试执行要求

重复测试应按下列要求进行：

- 每次重复测试应采用相同的光谱条件、辐照度条件、温度条件和样品状态；
- 每次测试均应记录 I-V 曲线、P-V 曲线、样品温度和辐照度监测数据；
- 每次测试后应检查样品是否出现褶皱、翘曲、脱层、电极松动或接触异常；
- 若重复测试结果差异明显，应检查光源稳定性、温度控制、接触电阻、样品夹持和扫描参数；
- 对异常数据应说明原因，不应无依据剔除。

8.4.3 重复性判据与电容效应评估

8.4.3.1 同一样品三次重复测试所得最大输出功率或光电转换效率的相对极差宜不超过 1.0%。若超过该限值，应重新检查测试系统和样品状态，并重新进行测试。对于高准确度测试或仲裁测试，可根据试验方案规定更严格的重复性要求。

8.4.3.2 当需要评估电容效应或瞬态响应影响时，宜进行不同扫描速率或正反向扫描对比测试。若扫描速率加倍后主要 I-V 参数变化不超过 0.5%，或正向扫描与反向扫描所得主要 I-V 参数差异不超过 0.5%，可认为该测试条件下电容效应对结果的影响可接受。

8.4.4 弯曲样品重复测试及结果报告要求

8.4.4.1 对于弯曲状态测试，应在每次重复测试前后确认弯曲半径、弯曲方向和夹持状态保持一致。若重复测试过程中样品发生不可恢复的形变、开裂、脱层或电性能突变，应终止测试，并在报告中记录异常现象。

8.4.4.2 重复测试结果宜报告平均值、标准偏差或相对标准偏差。用于单件样品效率标定时，可将满足重复性要求的多次测试结果的算术平均值作为最终结果；用于状态对比测试时，应分别报告各状态下的重复测试结果。

9 计算方法

9.1 光电转换效率计算

光电转换效率按式（9）计算：

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times A} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

η —光电转换效率，单位为百分数（%）；

$P_{\max}$ —柔性砷化镓太阳能电池在规定测试条件下的最大输出功率，单位为瓦（W）；

G —入射到测试平面的总辐照度，单位为瓦每平方米（W/m²）；

A —用于效率计算的有效受光面积，单位为平方米（m²）。

注 1：有效受光面积可为器件有效光电转换区域面积、由不透明掩模限定的光斑面积，或供需双方约定的指定照射面积。

注 2：对于多结柔性砷化镓太阳能电池，光电转换效率应在各子结光谱匹配满足规定要求的条件下获得。必要时，应进行光谱失配修正、辐照度修正和温度修正。

注 3：对于柔性样品，应在报告中说明测试时样品处于平展状态或弯曲状态；若为弯曲状态，应记录弯曲半径、弯曲方向和夹持方式。

9.2 填充因子计算

填充因子表征太阳电池 I-V 曲线的方正程度，按式（10）计算：

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中：

FF —— 填充因子，单位为百分数（%）；

P_{max} —— 最大输出功率，单位为瓦（W）；

V_{oc} —— 开路电压，单位为伏（V）；

I_{sc} —— 短路电流，单位为安培（A）。

最大输出功率按式（11）计算：

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中：

V_{mp} —— 最大功率点电压，单位为伏（V）；

I_{mp} —— 最大功率点电流，单位为安培（A）。

注：填充因子应由修正至报告条件后的 I-V 曲线参数计算。若未进行辐照度、温度或光谱失配修正，应在报告中说明测试条件与报告条件的偏差。

9.3 串联电阻计算

串联电阻可由 I-V 曲线在开路电压附近的局部斜率估算。按式（12）计算：

$$R_s = - \left(\frac{dV}{dI} \right) | V \approx V_{oc} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中：

R_s —— 串联电阻，单位为欧姆（Ω）；

dV/dI —— I-V 曲线在开路电压附近的微分斜率。

实际计算时，可在开路电压附近选取若干数据点进行线性拟合，按式（X）计算：

$$R_s = - \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad \dots\dots\dots(13)$$

注 1：串联电阻计算结果与拟合区间、扫描方向、接触方式和数据噪声有关，应在测试报告中说明计算方法和拟合范围。

注 2：对于柔性碲化镉太阳电池，电极接触压力、焊带状态、探针位置、弯曲半径和互连结构可能影响串联电阻。

9.4 并联电阻计算

并联电阻可由 I-V 曲线在短路电流附近的局部斜率估算。按式（14）计算：

$$R_{sh} = - \left(\frac{dV}{dI} \right) | V \approx 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中：

R_{sh} —— 并联电阻，单位为欧姆（Ω）。

实际计算时，可在短路点附近选取若干数据点进行线性拟合，按式（15）计算：

$$R_{sh} = - \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad \dots\dots\dots(15)$$

注 1：并联电阻主要反映器件漏电特性。柔性碲化镉太阳电池若存在边缘损伤、局部裂纹、封装缺陷或弯曲诱导缺陷，可能导致并联电阻降低。

注 2：若 I-V 曲线在短路点附近存在明显非线性，应说明拟合区间，并将其对不确定度的影响纳入评价。

9.5 光谱失配修正

当标准器件与被测柔性砷化镓太阳电池的光谱响应不同,或测试光谱与报告光谱不一致时,应进行光谱失配修正。

光谱失配因子可按式(16)计算:

$$M = \left[\frac{\int E_{ref}(\lambda) \cdot S_t(\lambda) d\lambda}{\int E_{test}(\lambda) \cdot S_t(\lambda) d\lambda} \right] \left[\frac{\int E_{test}(\lambda) \cdot S_t(\lambda) d\lambda}{\int E_{ref}(\lambda) \cdot S_r(\lambda) d\lambda} \right] \quad \text{.....(16)}$$

式中:

M —— 光谱失配因子;

$E_{ref}(\lambda)$ —— 报告条件或标准条件下的光谱辐照度;

$E_{test}(\lambda)$ —— 测试条件下的光谱辐照度;

$S_t(\lambda)$ —— 被测电池的光谱响应;

$S_r(\lambda)$ —— 标准器件的光谱响应;

λ —— 波长。

被测电池短路电流或 I-V 曲线电流可按式(17)进行光谱失配修正:

$$I_{corr} = I_{meas} \times \frac{G_{ref}}{G_{meas}} \times M \quad \text{.....(17)}$$

式中:

I_{corr} —— 修正至报告光谱和报告辐照度条件下的电流;

I_{meas} —— 实测电流;

G_{ref} —— 报告条件下的总辐照度;

G_{meas} —— 测试时由标准器件测得的总辐照度。

对于多结柔性砷化镓太阳电池,应分别计算各子结的光谱失配因子和匹配因子。各子结匹配因子可按式(18)表示:

$$Z_i = \frac{G_{ref}}{G_{i,meas} \times MM_i} \quad \text{.....(18)}$$

式中:

Z_i —— 第 i 个子结的匹配因子;

$G_{i,meas}$ —— 第 i 个标准子器件测得的辐照度;

MM_i —— 第 i 个子结对应的光谱失配因子。

各子结 Z_i 应满足测试条件规定。若任一子结超出规定范围,应调整光谱条件,或在报告中说明偏离及其不确定度影响。

9.6 温度修正

当被测柔性砷化镓太阳电池的测试温度与报告温度不一致时,应进行温度修正。温度修正宜按 GB/T 46982 或适用的 I-V 温度修正方法进行。

在温度偏差较小且器件线性关系已验证的情况下,可采用温度系数进行近似修正。

短路电流修正按式(19)计算:

$$I_{sc,0} = I_{sc,m} + \alpha_I \times (T_0 - T_m) \quad \text{.....(19)}$$

开路电压修正按式(20)计算:

$$V_{oc,0} = V_{oc,m} + \beta_V \times (T_0 - T_m) \quad \text{.....(20)}$$

最大输出功率修正按式(21)计算:

$$P_{max,0} = P_{max,m} \times [1 + \gamma_P \times (T_0 - T_m)] \quad \text{.....(21)}$$

式中:

$I_{sc,0}$ 、 $V_{oc,0}$ 、 $P_{max,0}$ —— 修正至报告温度 T_0 后的短路电流、开路电压和最大输出功率；
 $I_{sc,m}$ 、 $V_{oc,m}$ 、 $P_{max,m}$ —— 测试温度 T_m 下的实测短路电流、开路电压和最大输出功率；
 T_0 —— 报告温度，通常为 25 °C；
 T_m —— 测试时被测电池温度；
 α_I —— 短路电流温度系数，单位为安培每摄氏度（A/°C）；
 β_V —— 开路电压温度系数，单位为伏每摄氏度（V/°C）；
 γ_P —— 最大功率相对温度系数，单位为每摄氏度（°C⁻¹）。

注 1：砷化镓太阳电池的开路电压通常随温度升高而降低，因此 β_V 一般为负值。
注 2：多结柔性砷化镓太阳电池的温度修正应考虑各子结带隙、光谱响应和限流结变化。若温度变化可能引起限流结改变，不宜采用简单线性修正。
注 3：弯曲状态测试时，应注意夹具与样品接触状态可能导致温度分布不均。温度测量位置和温度修正方法应在报告中说明。

10 测试报告

测试报告至少应包括下列内容：

序号	项目	主要内容
1	基本信息	报告编号、测试机构、委托单位、测试日期、签发日期、测试依据。
2	样品信息	样品名称、型号、编号、批次、结构类型、结数、封装状态、柔性衬底或载体信息。
3	样品状态	平展或弯曲状态、弯曲半径、弯曲方向、夹持方式、测试前后外观状态。
4	有效受光面积	面积类型、面积数值、面积测量方法、是否使用掩模。
5	测试条件	报告光谱、测试光谱、总辐照度、样品温度、环境温度、相对湿度。
6	测试设备	太阳模拟器、标准器件、I-V 测试仪、温控装置、辐照度测量装置和柔性样品夹具。
7	I-V 测试方法	扫描方向、扫描速率、采样延时、数据点数量、电气连接方式、重复测试次数。
8	多结补充信息	各子结匹配因子 Z_i 、光谱失配因子 MM_i 、测量辐照度 $G_{i, meas}$ 、限流结信息。
9	数据处理	辐照度修正、温度修正、光谱失配修正、曲线拟合或插值方法。
10	测试结果	I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_{mp} 、 V_{mp} 、 P_{max} 、FF、 η ，适用时给出 R_s 、 R_{sh} 和 J_{sc} 。
11	曲线图表	I-V 曲线、P-V 曲线，适用时给出量子效率或光谱响应曲线。
12	不确定度	光电转换效率测量不确定度、覆盖因子和主要不确定度来源。
13	说明	方法偏离、异常情况、结果适用范围和报告声明。

T/CEATEC XXX—XXXX

中 华 人 民 共 和 国
团 体 标 准

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

T/CEATEC XXX—XXXX

*

中国欧洲经济技术合作协会

网址 <https://www.ceatec.org.cn/>

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 XXX 千字

2026 年 X 月第一版 2026 年 X 月第一次印刷

*

如有印装差错 由中国欧洲经济技术合作协会调换

版权专有 侵权必究

举报电话：010-64516951



T/CEATEC XXX—2026