

# 团 体 标 准

T/CPIA 00XX—201X

## 晶体硅光伏电池电致发光测试方法

Test method for cell defects in crystalline silicon  
photovoltaic cells by electroluminescence (EL) imaging

(草案)

(2019.2)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

201X-XX-XX 发布

201X-XX-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 成像..... 2

    4.1 设备..... 2

    4.2 操作步骤..... 4

5 EL 图像评价..... 6

    5.1 EL 原理..... 6

    5.2 图像解析..... 6

6 报告..... 7

附录 A 图像修正规程..... 8

    A.1 去除暗电流和杂散光..... 8

    A.2 渐晕..... 8

        A.2.1 渐晕修正..... 8

        A.2.2 渐晕与光轴夹角的函数关系..... 8

        A.2.3 渐晕修正..... 8

附录 B 聚焦..... 10

    B.1 综述..... 10

    B.2 Tenengrad 函数和 Sobel 算子的应用..... 10

附录 C 图像信噪比..... 11

    C.1 综述..... 11

    C.2 成像步骤..... 11

    C.3 信噪比..... 11

    C.4 SNR 标准..... 11

附录 D 定性解释晶体硅光伏电池电致发光图像..... 13

    D.1 综述..... 13

附录 E 清晰度测量..... 15

    E.1 综述..... 15

参考文献..... 17

# 前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则编写。

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。

本标准由中国光伏行业协会标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：xxxxx

本标准主要起草人：xxxxx

# 晶体硅光伏电池电致发光测试方法

## 1 范围

本标准规定了用于采集晶体硅光伏电池的电致发光图像、定量采集并处理图像以获得相关的量化指标、为定性解释图像中观察到的特征提供导则的方法。

本标准适用于未封装的晶体硅太阳能电池。

## 2 规范性引用文件

下列文件对文件的应用是必不可少的，以下文件全部或部分在本标准中规范引用。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

T/CPIA 0009-2019 电致发光成像测试晶体硅光伏组件缺陷的方法

ISO/IEC17025: 2005 检测和校准实验室能力的通用要求 (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories)

IEC 60050, 国际电工词汇表 (International Electrotechnical Vocabulary)

IEC 60904-1: 2006 光伏器件-第1部分: 光伏电流-电压特性的测量 (Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics)

IEC TS 60904-13 光伏器件-第13部分: 光伏组件的电致发光 (Electroluminescence of photovoltaic modules)

IEC/TS 61836: 太阳光伏能源系统-术语、定义和符号 (Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols)

## 3 术语和定义

本文件采用IEC 60050和IEC 61836中的定义以及下列术语。

### 3.1

#### 电致发光 electroluminescence

电致发光，简称EL，是指由于电场作用而产生的发光现象。

EL分为两种类型：一种是半导体p-n结的注入式电致发光；另一种是本征型电致发光。目前光伏产业使用较多的是太阳电池的正向偏置下少子注入式的电致发光。

### 3.2

#### 开路 open circuit

一种电路，在导电路径的某个地方，有一处断开或者“打开”。

如果电池存在缺陷或已损坏，电池就显示“开路”。这样，当外部电路连接到电池的电学连接点时，电流不会流经电池。

如果一个或所有电池的连接点未连接任何外部电路，则太阳电池本身处于开路状态。

### 3.3

#### 偏压 bias

偏压是指通过电源迫使电流流动，其中，正向偏压是指电池在测试时，电源引出线与电池的相同极性电极相连。反向偏压是指电池在测试时，电源引出线与电池的相反极性电极相连。

### 3.4

#### 桶形畸变 barrel distortion

图像的矩形特性出现扩展而导致的畸变现象，类似于曲形的桶壁。

### 3.5

#### 渐晕 vignetting

相比于图像中心，图像边缘强度减小的现象。

### 3.6

#### 动态范围 dynamic range

动态范围是最大输出信号水平与本底噪声之间的比值(本底噪声是暗场图像的均方根噪声水平)。

### 3.7

#### 清晰度 sharpness

清晰度( $S[\text{mm}]$ )是可分辨对象大小的参数，是仍可提供50%的对比度的最小真实尺寸。

### 3.8

#### 视场(FOV) field of view

视场是指从探测相机到测试平面任意点的两束入射光线之间的最大夹角。视场通常用角度表示，它描述了相机所拍摄场景的角度范围。

## 4 成像

### 4.1 设备

#### 4.1.1 电致发光成像相机

##### 4.1.1.1 相机探测器

探测器通常是焦平面阵列布置的感光像素，由电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)器件组成。这些器件通常需要热电冷却，以实现更好的信噪比。热电冷却可以减少热载流子引起的暗电流。探测器中的半导体光吸收材料必须对被测器件的EL辐射敏感。对于晶体硅，探测器应在1000nm~1300nm的波长范围内敏感。

##### 4.1.1.2 镜头

镜头上不得带有消除待测半导体材料带隙附近的红外线的吸收滤片或涂层。对于晶体硅而言，在波长范围1000nm~1300nm之间不能被吸收滤片或涂层衰减。通常使用光学玻璃。镜头焦距各不相同，采集图像时，镜头的选择取决于具体应用情况和几何尺寸。短焦广角镜与高分辨率相机搭配使用，以获得更大的视场。当距离受限时，可将相机靠近被拍摄对象。但是，部分广角镜可能会使图像出现桶形畸变，需要后处理修正。

通常，焦距较长的镜头桶形畸变较少，拍摄的图像更精确，无需后处理修正。

注：通常镜头上有一个可调整的光圈，大小用f值表示。不考虑光传输效率的差异，镜头的设置f值越大，光线聚集面积越小，投射到图像传感器的EL信号就越少。景深会随着f值的增加而增加。图像清晰度与f值有关。不合适的镜头设计会引起畸变；光本身的波动性质会引起衍射。当使用较小的f值时，很多广角镜头的边缘处会产生严重的渐晕现象。

#### 4.1.1.3 滤光片

相机镜头上的滤光片能够滤除待测波长以外的光线。可以使用850nm的长通滤光片拍摄硅的近带隙EL图像。

#### 4.1.2 暗室或环境

不强制使用暗室，但黑暗的环境有利于拍摄到高质量的图像。应预防并消除进入影像工作室中的杂散光，如使用帘子、挡板并用（黑色）吸光材料堵住缝隙。如果相机上配置滤光片，可使用LED灯，因为LED的发光光谱可被滤光片滤除。

实验室测量应在电池温度为23℃～27℃之间时进行。图像对比时，只能使用此温度范围或相同温度跨度内拍摄的图像。温度测试仪精度要求为±1℃，重复性±0.5℃。建议在拍摄EL图像之前，给电池片通电使温度达到稳定。当待测电池的温度稳定后，可以连续对比同一电池拍摄的两个图像，以判断相机探测器的温度是否稳定。

#### 4.1.3 电源

直流供电装置要求能够提供所需电流达到标准测试条件下太阳能电池的短路电流( $I_{sc}$ )。根据电池所采用的技术，达到短路电流所需的电压近似于待测太阳能电池在标准试验条件下的开路电压( $V_{oc}$ )。

建议用精度高于±2%的仪表来测量开路电压和短路电流。电池引出线的压降应控制在±2%以内，或者采用四线法单独提供电流并测量待测电池的电压。

#### 4.1.4 图像处理和显示软件

##### 4.1.4.1 图像颜色赋值

在图像中，用黑色表示最弱的EL信号，用白色表示最强的EL信号。但是，电池有效区域的图像数据不应超过上限值，以避免探测器饱和。使用假彩色标尺，给每个信号水平分配一个唯一的颜色。

##### 4.1.4.2 软件功能

软件应根据EL信号值域与对应累计数生成一个直方图，定量解释观测到的图像特征。

应用此测试方法时，软件应具有如下基本特征便于图像后处理，包括：

- 值域调整：应避免非线性对比度优化(例如灰度修正)。允许线性对比度优化，比如重置最大值和最小值；
- 裁剪图像至待分析区；
- 确定图像上任意点EL信号强度；
- 帧间差分：逐像素减除噪声信号，包括来自于暗电流或杂散光的信号；

- 去除坏像素点；
- 去除单次效应；
- 桶形畸变修正；
- 渐晕修正；
- 平行修正：通常是非直射拍摄的图像整形。

## 4.2 操作步骤

### 4.2.1 相机设置和定位

#### 4.2.1.1 电池的法平面角

相对于电池平面的视角建议相对于待测电池表面正交。相对于电池法线的最大视角应小于 $50^{\circ}$ 。

原则上，拍摄时从电池受光面拍摄。如果是双面电池，从反面拍摄也是有效的。

#### 4.2.1.2 清晰度测定

图像的清晰度取决于像素尺寸，即电池上的线性距离用像素取样。建议拍摄的图像清晰度小于0.5mm。

图像清晰度测定和分类的方法参照附录E。

### 4.2.2 相机设置

#### 4.2.2.1 通用规则

常规测量时，每个正向偏置电流下的图像强度，可通过优化总曝光时间、光圈（f值）或根据待测电池种类进行增益调整，从而保持图像强度一致。如果需要变更设置来达到理想的图像强度，应调整曝光时间并记录其变更。关于图像强度，详见4.2.2.4。

#### 4.2.2.2 推荐的相机设置值（焦点、增益、f值）

首先在可见光下粗调聚焦，然后需要根据待测EL信号的波长进行微调优化。利用红外校正镜头可简化调焦过程。这种情况下，EL图像与可见光下图像的焦点设置相同。根据第4.2.1.2中定义的理想清晰度水平要求，相机的焦点设置应能清晰地拍摄对象的特征。利用附录B中给出的算法，可以计算出最佳的镜头焦点位置。

其他建议设置值包括：

- 调整增益设置值，以便获得电池图像的最佳像素深度分辨率；
- 待对比的图像之间，不应更改f值。如果f值可以调整，当待测样品在相机前方中心且光轴通过电池中心时，默认选择最小f值。如果认为其他的f值能够产生更好的图像，可以选定一个不同的f值，例如可以减少渐晕、增加清晰度、增加斜视时的拍摄景深等。

#### 4.2.2.3 视场

优化的视场，电池周围不产生EL的面积应小于20%。

#### 4.2.2.4 图像强度

优化（增大）曝光时间以达到最大的信噪比，但需限制曝光时间保证像素点不饱和（见4.1.4.1 图像颜色赋值）。在分析像素饱和时忽略单次效应和随机噪声。

#### 4.2.2.5 电池对比

不同类型和不同衰减过程的电池片会显示不同的EL特征。为了对比衰减前和衰减后的电池，使用同样的条件测试衰减后的电池，或者重新优化设置测试衰减后电池。用这种方法，对比衰减后和未衰减的电池，只能重新优化曝光时间，不得更改电流。在额外的图像后处理前，完成所有需要的图像帧间差分。当使用目测对比不同曝光时间拍摄的电池时，需要后续处理像素的强度，按照曝光时间与像素强度成反比调整。在这种对比中，最亮的图像强度应根据第4.1.4.1和4.2.2.4的规定设置。

### 4.2.3 成像

#### 4.2.3.1 电路连接

将直流供电装置的(+)和(-)电引线连接到电池平台上，电源的(+)引线 with 样品的(+)电极匹配。探针的布置必须匹配电池的主栅线图形，以便在相机视野范围内获得均匀分布的电池输出。建议在每个主栅线上排布多个电流探针，确保电流均匀分配。对无主栅结构，或者背接触太阳电池，建议使用合适的导电系统以便电流均匀分布。

#### 4.2.3.2 偏置和成像

为了图像信息提取最大化，需连续在两个偏置电流下获取图像。在进行帧间差分时（第4.1.4.2条软件功能），需要获取一张电池断开偏置的图像（即背景图像）。因为相同类型电池的短路电流可能不一致，偏置电流在达到4.1.3中规定的精度要求的同时还需满足

- 高注入： $I_{sc} \pm 3\%$
- 低注入： $0.1 \times I_{sc} \pm 5\%$
- 无偏置电流 - 背景图像

根据4.2.2.3内容，优化每个偏压电流的曝光时间。每个偏置电流下拍摄的图像解释，见附录D。在电池上施加 $I_{sc}$ 正向偏置，根据需要施加电压，但不要超过电池制造商规定负载或实验室安全限值。拍摄EL图像，在获取图像后断开正向偏置电流。对于 $0.1 \times I_{sc}$ （低电流）图像，重复此步骤。最后，在相同曝光时间条件下拍摄一幅背景图像，用作帧间差分。如果采用不同的曝光时间，则应在每个曝光时间条件下拍摄一幅背景图像。

#### 4.2.4 图像修正

采集图像后，对图像进行修正，显示和优化，以达到期望的图像质量。如需对图像进行定量分析，必须对图像进行修正。这些图像修正方法包括：

- 帧间差分法



## ● 渐晕修正

逐个像素对电致发光图像和背景图像进行帧间差分。注意，背景图像的拍摄条件必须与4.2.3.2中规定的条件（包括f值、位置、曝光时间）一致。

渐晕校准和修正程序参照附录A。

## 5 EL 图像评价

### 5.1 EL 原理

EL是半导体材料在电流注入下的发光现象。光发射来自于自由载流子的辐射复合，主要发生在亚带隙区域。局部缺陷的存在影响局部区域采集的EL强度，因此EL可以检测太阳能电池包括其缺陷在内的很多信息。

### 5.2 图像解析

附录D中，对晶体硅光伏电池EL图像提供了一份不完全的定性解释。

#### 5.2.1 串联电阻

EL信号在串联电阻较大的区域会减弱，因为在这些区域内注入载流子供应不足。反之，固定电流，在串联电阻较小的区域会注入更多的载流子，EL信号增强。当少数载流子扩散长度一定时，EL信号将随着电池中电势的变化而变化。假设其他参数不变，两点 $x_1$ 和 $x_2$ 之间的电势差，EL强度  $K(x_1)$ 和 $K(x_2)$ 与EL图像中的串联电阻有关，关系如式（1）：

$$\Delta V(x_1, x_2) = V(x_1) - V(x_2) = kT/[e \cdot (\ln(K(x_1))) - \ln(K(x_2)))] \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$K$ ——玻尔兹曼常数；

$T$ ——为开尔文温度；

$E$ ——基本电荷常数。

EL强度 $K(x)$ 正比于 $V(x)$ ，其关系式如公式（2）：

$$K(x) \sim \exp [V(x)/(kT/e)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

#### 5.2.2 少数载流子寿命和扩散长度

EL强度正比于有效扩散长度。正向偏置时可以看到与少数载流子寿命有关的典型效应。

#### 5.2.3 分流电阻

电池pn结的分流提供了一个近带边复合之外的路径，这会影响EL信号。器件注入高电流（例如： $I_{sc}$ ），分流相关的漏电路径饱和，因此EL图像明亮仅在分流区变暗。当器件注入电流减小时（例如： $0.1 \times I_{sc}$ ），不饱和的分流路径（取决于其程度）会降低少数载流子总密度和EL整体强度。

#### 5.2.4 根本原因解析

虽然缺陷在EL图形中可以很容易通过图形识别（例如裂纹），但在一定正向电流和温度下拍摄的EL图像，并不能用一个唯一的物理现象解释。为了进一步分析不同的EL信号的根本原因，可以使用两个偏置电流获取的EL信号，结合红外热成像法、光致发光、或者激光光束诱导电流法进行。广义的缺陷分类包括：

- 在高偏置电流下，分流或非发光复合区域将被定位，反之低偏置电流下电池图片会整体较暗。
- 在低偏置电流下，串联电阻差异引起对比度较低，但在高偏置电流下可以看到对比度升高。

### 6 报告

测试报告由测试实验室或机构编制。报告应包含太阳能电池的详细规格。每份测试报告至少应包括以下信息：

- a) 标题；
- b) 测试实验室的名称和地址，以及测试的地点；
- c) 唯一的认证报告；
- d) 客户的姓名及地址；
- e) 测试项目的说明、特征、测试条件和标识；
- f) 测试项目的接收日期及测试日期；
- g) 测量设备的标识，包括相机、检测器，镜头和种类；
- h) 图像修正的信息，包括但不限于对单次效应和坏像素点的处理，以及背景去除，滤光片增强或其他对原始图像文件的处理；
- i) 取样过程；
- j) 与第4和5部分描述的测试方法的任何偏离、附加和排除项，以及其他任何有关具体测试的信息，例如环境条件；
- k) 测试的偏置电流和电压、电池温度、相机设置、工作距离、成像角度（法向角）和环境光线状况；
- l) 报告内容负责人的签名或等效标识，职称和日期；
- m) 制造商应保留此报告的副本以供参考。

## 附录 A

## (规范性附录)

## 图像修正规程

## A.1 去除暗电流和杂散光

在进行其他修正前，所有拍摄的图像应去除暗电流和杂散光的影响（例如渐晕）。这可以通过将每张图像减去未通电电池的图像完成（例如帧间差分）。见4.1.4.1和4.2.4。

## A.2 渐晕

## A.2.1 渐晕修正

渐晕是指一种相机拍摄的图像其强度由中心向边缘逐渐下降的现象。当光线倾斜进入时，相机的光圈有效面积减小。一些相机（或其相关软件）可能配有内置的渐晕修正。如果图像未修正，渐晕会与太阳能电池本身边角的低发光相混淆。为了简化，假设待成像的太阳能电池正交并居中放置在相机前方。

## A.2.2 渐晕与光轴夹角的函数关系

图像（经帧间差分处理后）被分为 $i \times j$ 的矩阵 $Z_{vig}$ ，在逐像素基础上，修正图像强度与光轴距离的影响关系见式A.1~A.3：

$$Z_{vig} = A \cdot (1 - \alpha \cdot D) \cdots \cdots (A.1)$$

$$A = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{D}{f}\right)^2\right)^2} \cdots \cdots (A.2)$$

$$D = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \cdots \cdots (A.3)$$

式中：

$f$ ——焦距；

$\alpha$ ——经验几何渐晕因子；

矩阵  $D$ ——光学图像中心 $(x_0, y_0)$ 到像素 $(x, y)$ 的距离，用笛卡儿坐标表示。

运算符 $(\cdot)$ 代表逐像素相乘：如果  $C = A \cdot B$ ，像素值表示为  $i \times j$   $C_{ij} = A_{ij} \cdot B_{ij}$ 。

## A.2.3 渐晕修正

信号强度从图像中心到边缘下降应予以修正。

图像的渐晕程度可凭经验判定，如下两者之一：

a) 单个电池在目标平面内以  $9 \times 9$  阵列为单元依次平移（在视野极值范围内），或者

- b) 需要修正渐晕的区域至少拍摄 15 个图像取平均，拍摄时正交于相机镜头的光轴。对于每个图像，设备都应轻微移动（包括旋转动作）以获得不均匀性的均值。

当拍摄电池 EL 图像时，信号强度由中间向边缘下降，可用公式 A.1 表示，并将其用于渐晕修正。与此同时对太阳能电池的 EL 进行成像。上述方法收集的图像可以确定一个数字化的修正矩阵，需要渐晕修正的图像除以代表性的图像最大值，这个最大值可由最亮的  $5 \times 5$  像素区域的中位数获得。公式 A.1 形式的修正矩阵可用于方程中的一个起始点，获得无渐晕的图片，但需要根据特定的相机和图像设置确认并调整。

## 附录 B

## (资料性附录)

## 聚焦

## B.1 综述

优化聚焦来获得 4.2.1.2 中所需的图像清晰度。

## B.2 Tenengrad 函数和 Sobel 算子的应用

本附件中所述的算法可用于电学方式确定最佳镜头焦点。

最佳焦点可通过一系列图像的清晰度进行判定。图像清晰度的相对量度如公式 B.1 所示：

$$Tenengrad(EL_z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N} (G_x^2 + G_y^2) \dots\dots\dots (B.1)$$

其中  $G_x$  和  $G_y$  是图像中正交方向上的一阶导数（图像强度梯度）。为了减少噪声的影响，使用 Sobel 算子，即结合高斯平滑与微分运算。其中，这里对每个图像像素进行卷积，取决于方向(x × y)的 3 × 3 卷积核，如下所示：

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \cdot EL \text{ 以及 } G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \cdot EL$$

若  $Tenengrad(EL)$  最大则图像聚焦。绝对值  $Tenengrad(EL)$  取决于图像场景，无法给出图像的绝对清晰度。 $Tenengrad(EL)$  可以使用完整的图像或待分析区来计算（如图 B.1）。只要图像包含可聚焦的细节，则其最大值代表了最优聚焦。

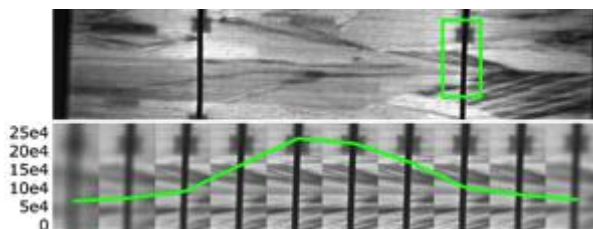


图 B.1 太阳能电池的 EL 图像

注：绿色方块表示计算区。下方显示了不同焦距计算出的相应图像 Tenengrade (EL)

附录 C  
(规范性附录)  
图像信噪比

C.1 综述

信噪比（SNR）是影响图像质量的重要因素。

导致 EL 信号失真的噪声源有多种：

- a：相机传感器中的电子热能引起的暗电流或热噪声；
- b：物体发射光子的统计波动引起的光子噪声和散射噪声；
- c：其他电学噪声如读出噪声、放大器噪声和量化噪声。

SNR 是可用信号与不可用信号的比率。它的倒数与像素亮度的相对不确定性直接相关。

根据 4.2.3.2，信噪比可使用待分析电池在不同偏置电流下的三张图像决定。

C.2 成像步骤

- a) 根据 4.2 要求放置电池和准备相机，按照本技术规范的要求报告每一步设置的方法和特征。报告中，确定 SNR 的电池应与待测电池具有相同的设计。确定 SNR 的图像也应纳入最终报告。但是，应该排除电池的背景区域，图像应主要包含电池的有效发光区域。在拍摄图像期间，相机和电池都不能移动，以便图像能直接应用。如果有轻微的移动，则必须进行手动调整，以便图像逐像素准确对齐；
- b) 给电池施加正向偏置电流，直到电池温度稳定，然后以相同的正向偏置电流依次获取两个 EL 图像，将获得的图像用于研究。EL 图像是一个未解码灰阶像素阵列，需要解码和灰度调整。用于计算的数据类型应该以 64 位浮点数进行传输，以防止出现数字错误；
- c) 使用相同的相机和成像参数，在电池开路状态下，测试一张背景图像；
- d) 按照第 4.2.3.2 条对每个偏置电流重复成像并记录。

C.3 信噪比

使用以下信号和噪声的比值来确定成像场景的平均信噪比， $SNR_{50}$ ：

$$SNR_{50} = \frac{\sum_k (0.5 \cdot (EL_1(k) + EL_2(k)) - BG(k))}{\sum_k \left( |EL_1(k) - EL_2(k)| \cdot \sqrt{0.5 \cdot \left(\frac{2}{\pi}\right)^{-0.5}} \right)} \dots\dots\dots (C.1)$$

在相关的图像阵列中，对所有的图像进行操作，图像 $EL_1$ ， $EL_2$ 和 $EL_{BG}$ 逐像素（k）计算确定信噪比。该信号定义为图像 $EL_1$ ， $EL_2$ 去除背景图像 $EL_{BG}$ 后的平均值。

注：噪声水平是从两幅 EL 图像的平均绝对偏差中获得的。平均绝对偏差对异常值具有较高的稳定性，可以通过常数  $\left(\frac{2}{\pi}\right)^{-0.5}$  缩放到均方根偏差。由于噪声水平取决于两幅图像的噪声差异，所以因子 $\sqrt{0.5}$ 对这个方差总和进行统一。

C.4 SNR 标准

在可控环境中，图像 $SNR_{50}$ 可以低于 45。 $SNR_{50}$ 低于 5 不适用于图像的定性解释（见附录 D）。

确定的图像 SNR 应按照第 6 章要求写入报告。

图 C.1 为 $SNR_{50} = 45$  的示例：

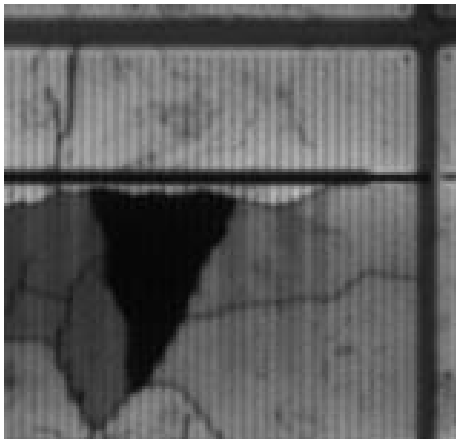


图 C.1  $SNR_{50} = 45$  时拍摄的多晶硅太阳能电池图像

附录 D

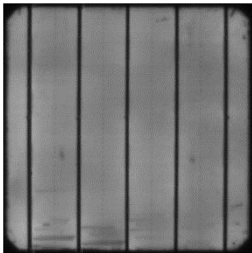
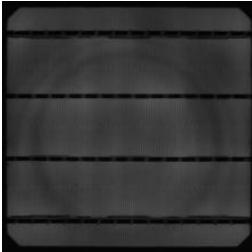


(规范性附录)

定性解释晶体硅光伏电池电致发光图像

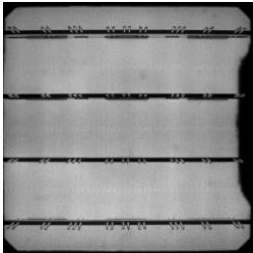
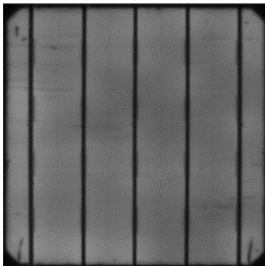
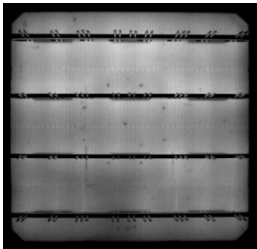
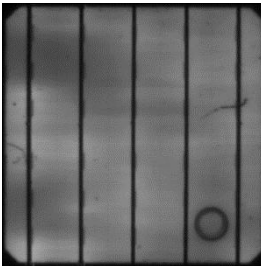
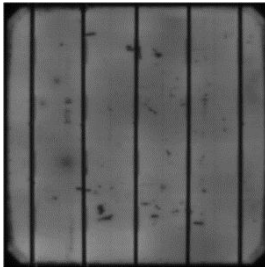
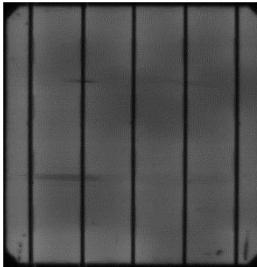
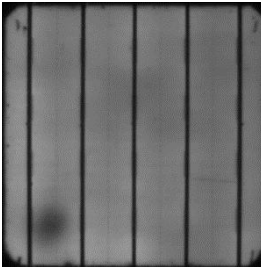
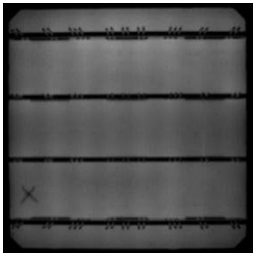
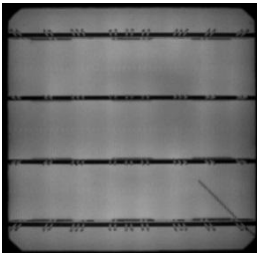
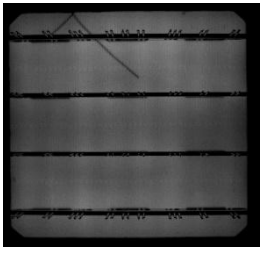
D.1 综述

本附录应与 5.1 和 5.2 中的信息一起用于理解图像缺陷的根本原因。理解电流偏置水平与分流或高串联电阻区域的关系。针对 EL 可以识别的缺陷，给出可能的建议（包括缺陷是否影响组件电学稳定性）。具体图像示例和诊断结果见表 D.1。

表 D.1 晶硅太阳能电池电致发光图像示例与解析

缺陷类型和诊断	图像		
<b>栅线缺失或断开</b>  栅线缺失或断开（可通过肉眼观测确认）通常是稳定的，其影响会反映到电池的测试效率上。这种缺陷通常影响太阳能电池的串联电阻，在高注入条件下更加明显。  随着时间的推移，栅线粘附力会持续衰减，影响电池性能表现。不建议这种电池使用在光伏组件封装中。	断栅		
			
<b>少数载流子寿命下降-硅片铸锭或切割原因</b>  存在于特定的晶粒或区域，这些区域有高缺陷、杂质浓度或者硅片切割痕。随着时间推移，这些现象是稳定的，他们的影响会在电池的初始效率中反映。  EL 图像并不能提供这些缺陷的精确原因。可使用少子寿命测试或 IV 测试其对电池性能的影响。  同心圆 P 型电池不建议使用到组件封装中，因为高浓度氧可能引起光致衰减。  多晶黑边和准单晶晶粒影响电池效率，这些现象来自于硅片铸锭，不建议使用这两种电池封装组件。	同心圆	准单晶晶粒	黑边
			
<b>部分流缺陷</b>	局部分流		



<p>局部的 pn 结分流通常源自于生产过程中引起的缺陷。这些缺陷会进一步衰减或发展成热斑，一般电池发电时不希望有这种缺陷。低分流电阻提供了载流子的另一个传输路径，减少了 pn 结中的电流大小。在 EL 图像中，分流区域看上去是黑色的。</p> <p>不建议使用有明显分流现象的电池封装组件。EL 图像并不能精确确定分流位置。建议结合其他测试方法例如红外热成像和 IV 测试确认分流现象。</p>			
<p><b>硅片或电池污染以及摩擦痕迹</b></p> <p>局部区域的低 EL 信号，有可能来自于硅片/电池例如污染，摩擦痕迹和操作设备的擦伤。这些缺陷在电池生产时具有系统性。随着时间推移，这些现象是稳定的，他们的影响会在电池的初始效率中反映。</p> <p>在使用这些电池封装组件之前，需要确定这些缺陷是否影响组件电学稳定性。</p>	划伤	吸盘印	吸笔印
			
	框印	皮带印	黑点
			
<p><b>电池裂纹</b></p> <p>如果裂纹延长，效率容易进一步衰减。裂纹是严重的缺陷，裂纹延长会最终隔离电池的一部分，影响电池的性能。一般，单个裂纹的影响小于多个裂纹。</p> <p>不建议组件封装使用有裂纹的电池。</p>	十字裂纹	45° 裂纹	边缘裂纹
			

附录 E  
(规范性附录)  
清晰度测量

### E.1 综述

下文中描述的测试包括计算由发光表面上的不透明掩模产生的两条边线 $L_1$ 、 $L_2$ 的夹角 $\alpha$ 和距离 $r_{50}$ 。确定清晰度所需公式见 (E. 3)。

**注：** 基于一组直线（黑-白-黑组），此方法是辐条目标的修改版本，也称为西门子星和扇形星目标。在这里这个方法被修改为只对明亮区域进行检测。

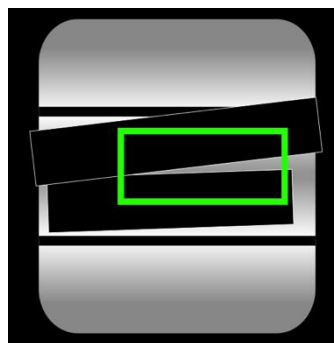
在单晶硅太阳能电池的 EL 图像上创建两个边缘。如图 E. 1，可以用薄金属板或不透明带（例如铝膜）来实现。两条边线之间的夹角 $\alpha$ 应该在  $3^\circ \sim 9^\circ$  之间。以边缘长度为 10cm 为例，对应终点开口处两个边缘之间的距离为 0.5cm~1.6cm。如图 E. 2，边缘线穿过边缘梯度图像 $G_{Edge}$ 的局部最大值。虽然可以使用简单的线性衍算，附录 B 中讨论的 Sobel 算子可以用来确定 $G_{Edge}$ 。中线 $L_2$ 是从 $L_1$ 、 $L_3$ 的交点 $p_0$ 到 $p_1$ 、 $p_3$ 的中点 $p_2$ 的连线。沿着 $L_2$ 所有绘制的 EL 图像强度值中，距离 $r_{50}$ 通过点 $p_0$ 到直线 $L_2$ 上强度降低到 50%的点的距离测量，如图 E. 3 所示。 $\overline{p_0 p_1}$ 为在点等式 (E. 2) 中线段 $p_0$ 、 $p_1$ 之间的长度。

为了减少测量的不确定性，在不同的旋转角度和设备位置，至少重复测量 5 次。最终结果 S 用所有结果的中位数计算。

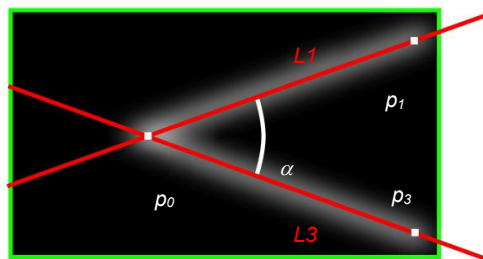
$$S = 0.5 \cdot \alpha \cdot r_{50} \dots\dots\dots (E. 1)$$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\overline{p_0 p_1}^2 + \overline{p_0 p_3}^2 - \overline{p_1 p_3}^2}{2 \cdot \overline{p_0 p_1} \cdot \overline{p_0 p_3}} \right) \dots\dots\dots (E. 2)$$

$$G_{Edge} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \dots\dots\dots (E. 3)$$



图E. 1 使用铝带引入两个边缘的EL图像



图E.2 来自EL图像 (E.1) 的边缘梯度图像  $G_{Edge}$  正交方向上的一阶导数  $G_{x,y}$

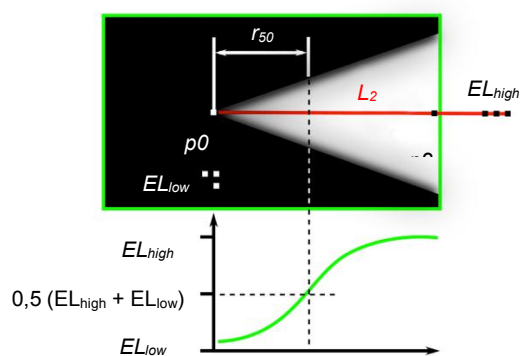


图 E.3 EL图像 (E.1) 的部分和直线  $L_2$  线图像强度值的绘制

## 参考文献

- [1] A. C. Parr, "A National Measurement System for Radiometry, Photometry, and Pyrometry Based upon Absolute Detectors," *NIST Technical Note 1421*, September, 1996
  - [2] T. Fuyuki, et. al., "Analytic findings in the electroluminescence characterization of crystalline silicon solar cells," *J. Appl Physics* 101, 023711, 2007
  - [3] Y. Zheng, Lin. S., S. B. Kang, "Single-Image Vignetting Correction," *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)* 1(1), pp. 461–468, 2006
  - [4] S. Spataru, P. Hacke, D. Sera, S. Glick, T. Kerekes, and R. Teodorescu, "Quantifying Solar Cell Cracks in Photovoltaic Modules by Electroluminescence Imaging," *42<sup>nd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, June 14-19 2015, New Orleans, 2015.
  - [5] M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser and B. Bjørneklett, "Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks, proceedings," *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 6-10, September 2010
  - [6] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, 1979
-