



# 天津市地方计量技术规范

JJF(津) 113—2023

## 电致发光缺陷检测仪校准规范

Calibration Specification for Electroluminescence Defect Detection  
System

2023—12—15 发布

2024—03—15 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

电致发光缺陷检测仪校准  
规范

Calibration Specification for  
Electroluminescence Defect Detection  
System

JJF(津) 113—2023

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院电  
子仪表实验所

**本规范主要起草人：**

马新新 (天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所)

任 晟 (天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所)

冯 宇 (天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所)

**参加起草人：**

楚 铭 (天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所)

杨雪辰 (天津市计量监督检测科学研究院电子仪表实验所)

# 目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
3.1 电致发光.....	(1)
3.2 缺陷 .....	(1)
3.3 线对 .....	(1)
3.4 空间分辨率.....	(1)
3.5 线对每毫米.....	(2)
3.6 空间分辨率测试板.....	(2)
3.7 正向电流.....	(2)
3.8 施加电压.....	(2)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(3)
5.1 空间分辨率.....	(3)
5.2 正向电流.....	(3)
5.3 施加电压.....	(3)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 测量标准及其他设备.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(5)
7.1 校准前检查.....	(5)
7.2 空间分辨率.....	(5)
7.3 正向电流.....	(7)
7.4 施加电压.....	(7)
8 校准结果.....	(8)
9 复校时间间隔.....	(9)
附录 A 电致发光缺陷检测仪校准原始记录参考格式 .....	(10)
附录 B 电致发光缺陷检测仪校准证书内页推荐格式 .....	(12)
附录 C 空间分辨率测试板参考样式及建议 .....	(13)
附录 D 电致发光缺陷检测仪空间分辨率测量结果不确定度评定示例 ...	(14)
附录 E 电致发光缺陷检测仪正向电流测量结果不确定度评定示例 .....	(16)
附录 F 电致发光缺陷检测仪施加电压测量结果不确定度评定示例 .....	(18)

# 引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写。

本规范为首次发布。

# 电致发光缺陷检测仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于电致发光缺陷检测仪（又称 EL 测试仪，以下简称缺陷检测仪）的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

JJF 1597-2016 《直流稳定电源校准规范》

T/CPIA 0009—2019 电致发光成像测试晶体硅光伏组件缺陷的方法

IEC TS 60904-13: 2018 光伏器件 第 13 部分：光伏组件电致发光测试 (Photovoltaic devices - Part 13: Electroluminescence of photovoltaic modules)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；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 电致发光 Electroluminescence 简称 EL，是在一定电场作用下，材料被电能激发所产生的发光现象。

3.2 缺陷 Defect

通过电致发光作用，在光伏组件中观察到的对组件性能造成不良影响的特征，通常有黑心、黑边、亮斑、裂纹、断栅等。

3.3 线对 Line pairs

具有同样方向及宽度的黑白条纹，且经过校准。

3.4 空间分辨率 Spatial resolution

表示数字图像拍摄系统或数字图像拍摄系统组件分辨空间图像细节能力的度量，图像上能够详细区分的最小单元的尺寸或大小对应的是最高的空间分辨率。进行空间分辨率测试的图案通常可以采用连续排列的线对。

### 3.5 线对每毫米 Line pairs per millimeter

空间分辨率的单位，表示为 lp/mm，是分辨能力的度量单位，采用一毫米内能分辨等间隔黑白线对数表示分辨能力的度量单位，用  $R_s$  表示。能分辨的线对数越多，其能分辨每根线的宽度也越小，分辨能力也越好。

### 3.6 空间分辨率测试板 Spatial resolution test chart

为校准成像系统的空间分辨率而规定的测试图配置的测试板。

### 3.7 正向电流 Forward current

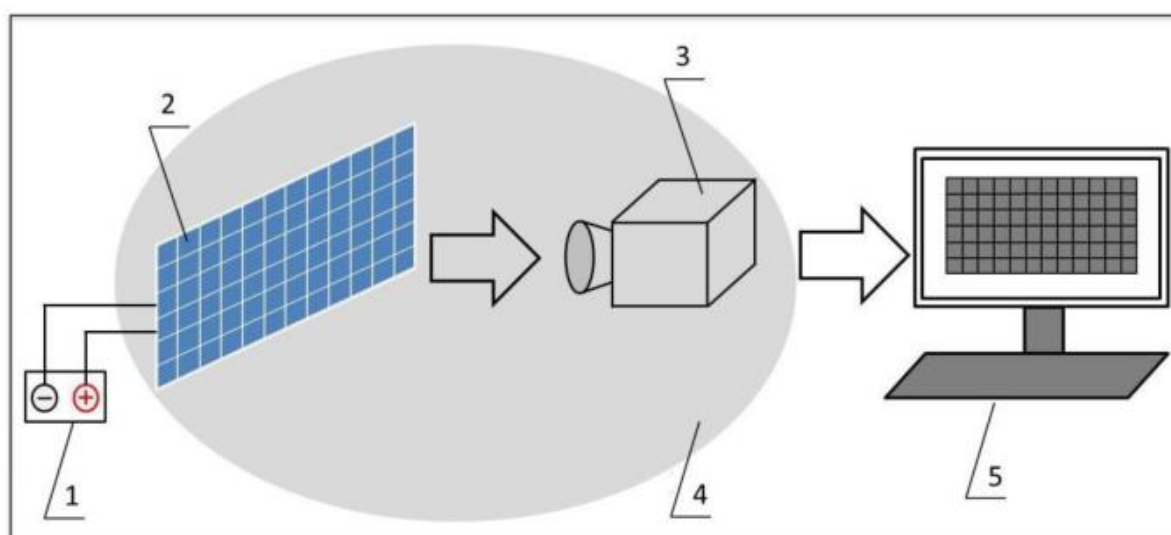
也称为偏置电流，表示电源输出的直流电流。

### 3.8 施加电压 Applied voltage

表示电源输出的直流电压。

## 4 概述

缺陷检测仪常用于光伏组件生产企业和光伏系统检测机构。该设备利用电致发光的原理，通过向光伏组件提供正向电流，使光伏组件产生电致发光现象，并使用红外相机对太阳组件的缺陷进行检测。其主要由直流电源、成像系统、暗室或遮光箱体、图像处理系统组成。典型原理如图 1 所示：



1—直流电源；2—测试样品(组件)；3—成像系统；4—暗室或遮光箱体；5—图像处理系统

图 1 缺陷检测仪典型原理图

## 5 计量特性

### 5.1 空间分辨率

缺陷检测仪的空间分辨率测量值的范围为 $(2.00 \sim 0.25)$  lp/mm, 单个条纹宽度范围为 $(0.25 \sim 2.00)$  mm。按照空间分辨率测量值将空间分辨率分为A+、A、B、C四个等级。等级分级如表1所示。

表1 空间分辨率等级

等级	空间分辨率 (lp/mm)
A+	$1.00 \leq R_s$
A	$0.50 \leq R_s < 1.00$
B	$0.25 \leq R_s < 0.50$
C	$R_s < 0.25$

### 5.2 正向电流

正向电流一般应覆盖铭牌标识的正向电流测量范围, 最大允许误差 $\pm 5\%$ 。

### 5.3 施加电压

施加电压一般应覆盖铭牌标识的施加电压测量范围, 最大允许误差 $\pm 5\%$ 。

注: 具体计量特性, 可参照被校测试仪的技术要求。以上要求不适用于合格性判别, 仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

环境温度:  $(25 \pm 5)$  °C;

环境湿度: 不大于 85%RH;

校准环境应采取遮光措施, 防止太阳、白炽光源及其他光源的干扰。

### 6.2 测量标准及其他设备

#### 6.2.1 空间分辨率测试板

空间分辨率测试板采用不同粗细具有相同宽度的黑白条纹(遮光条纹和透光条纹)作为校准图案, 线对条纹示意图如图2所示, 图中d为单个条纹宽度。

空间分辨率测试板上的线对至少具有横向和纵向两种排布方式, 每种方式应至少有19组的线对。线对组采用等比数列排列, 比例系数为 $10^{0.05}$ , 范围为 $(0.25 \sim 2.00)$  lp/mm。推荐线对组成如表2所示。其中空间分辨率与条纹宽度对应关系如式(1)。



$$R_s = \frac{1}{2 \times d} \quad (1)$$

式中:

$R_s$ ——空间分辨率, lp/mm;

$d$  ——单个条纹宽度, mm;

线对中单个条纹宽度范围为(0.25~2.00)mm, 与标称值的示值误差均不超过±0.02mm。

空间分辨率测试板参考样式如附录 C 所示。

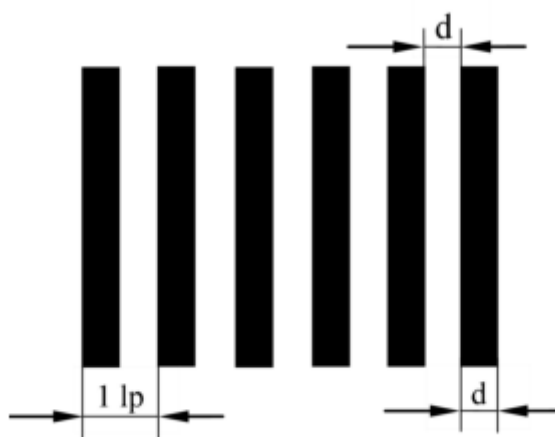


图 2 线对条纹示意图

表 2 空间分辨率测试板推荐的线对组成

线对(lp/mm)	0.25	0.28	0.31	0.35	0.40	0.44	0.50	0.56	0.63	0.70
d(mm)	2.00	1.78	1.59	1.42	1.26	1.12	1.00	0.89	0.80	0.71
线对(lp/mm)	0.79	0.89	1.00	1.11	1.25	1.39	1.56	1.79	2.00	—
d(mm)	0.63	0.56	0.50	0.45	0.40	0.36	0.32	0.28	0.25	—

### 6.2.2 电流表或电流校准装置

电流测量范围应覆盖被测对象的正向电流测量范围, 最大允许误差±1%。

### 6.2.3 电压表或电压校准装置

电压测量范围应覆盖被测对象的施加电压测量范围, 最大允许误差±1%。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准前检查

缺陷检测仪的铭牌标识应清晰、完整，应至少包括名称、型号、生产厂商或商标、出厂编号和电流、电压输出范围等内容。

缺陷检测仪成像系统零部件应清洁，无裂痕、发暗、霉斑、脱胶、开胶、脱膜等瑕疵，也不可有气泡、条纹、沙眼、斑点、污迹、尘埃、灰雾状瑕疵及其他明显瑕疵，镜头表面的镀膜应牢固均匀，无明显的擦伤现象，镀(涂)层不允许产生导致画面密度差或灰雾的内反射。

用于发光的组件或电池片应能正常工作且发光良好，不存在裂痕、暗斑、发暗等影响成像的瑕疵，表面应清洁，无明显的擦伤、污迹及尘埃。

### 7.2 空间分辨率

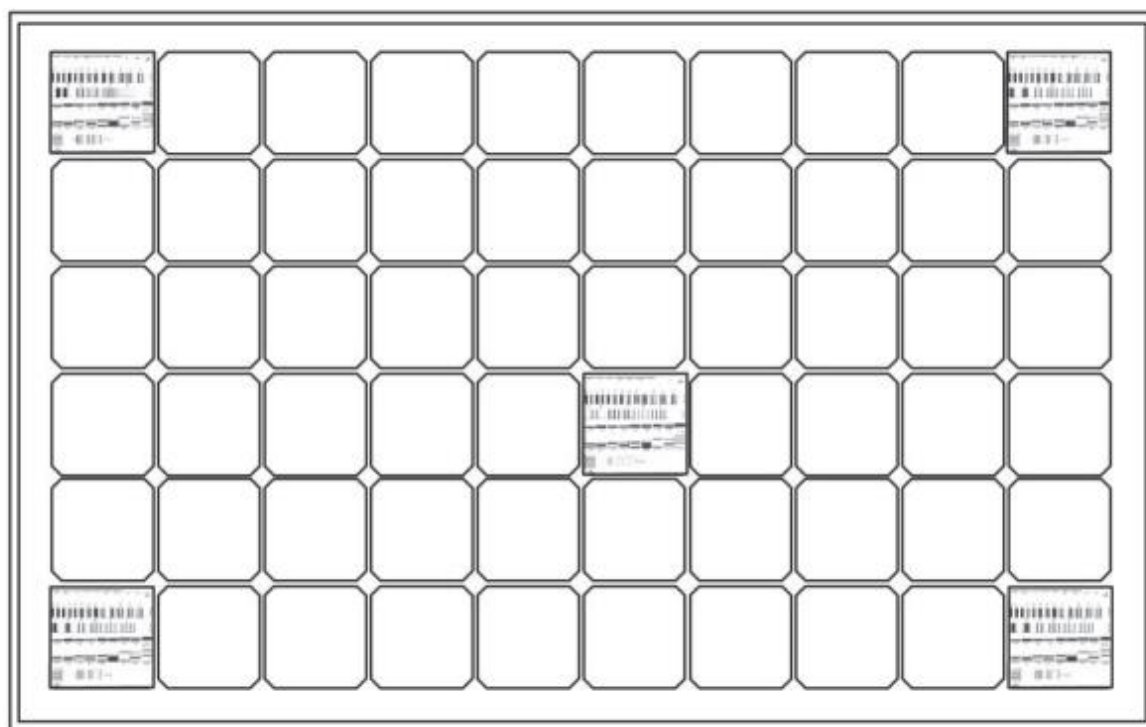


图3 组件空间分辨率测试板粘贴位置示意图

测量组件电致发光缺陷检测仪时，采用光组件作为辅助，将空间分辨率测试板粘贴在组件的大致中心位置以及边角位置的电池上，粘贴时用手拿取测试板的边缘部分，将测试

板与被选取电池的几何中心对齐，再用双面胶或胶带将测试板平整地粘贴在组件上。粘贴空间分辨率测试板时应当在选取的 5 个位置上各粘贴一张，总计 5 张。若使用一张空间分辨率测试板，则可以对同一个组件分多次粘贴并成像。粘贴位置示意图如图 3 所示。

将缺陷检测仪电源输出端的正负极分别与组件连接端的正负极对应连接，然后打开并调整电源输出电流和电压，再使用空间分辨率测试板进行校准。

以组件发出的光作为背景光，透过空间分辨率测试板对图像进行拍摄，获取 EL 原始图像。获取原始图像后，采用软件对原始图像进行缩放操作，以满足人眼的最佳观察条件和目视检测需求。采取目视方法，当条纹图案中有两条以上的线不粘合在一起视为能够分辨，记录相应的空间分辨率。

目视 EL 图像中各个位置空间分辨率测试板的成像情况，分别记录各对应位置的空间分辨率 $R_{si}$ 。根据各个位置的测试结果，取其中数值最小的作为缺陷检测仪的空间分辨率结果：

$$R_s = \min\{R_{si}\} \quad (2)$$

式中：

$R_s$ ——缺陷检测仪的空间分辨率结果，lp/mm；

$R_{si}$ ——第  $i$  个位置时，能够分辨的空间分辨率，lp/mm；

$i$  ——空间分辨率测试板放置位置编号， $i=1, 2, \dots, 5$ 。

测量电池片电致发光缺陷检测仪时，采用单个电池片封装组件作为辅助，将空间分辨率测试板粘贴在电池片的几何中心位置上，粘贴位置示意图如图 4 所示。目视 EL 图像中空间分辨率测试板的成像情况，记录能够分辨的空间分辨率，作为缺陷检测仪的空间分辨率结果。



图 4 电池片空间分辨率测试板粘贴位置示意图

空间分辨率结果参照表 1 将不同的缺陷检测仪分为 A+、A、B、C 四个等级。

## 7.3 正向电流

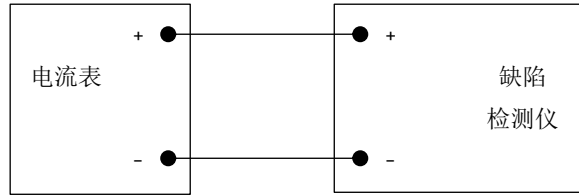


图5 正向电流连接示意图

将电流表与缺陷检测仪的输出端正负极相连,如图5所示。设置缺陷检测仪控制软件,使得电源能够持续输出直流电流,等待数值稳定后,开始读取电流表上的电流值 $I_0$ ,同时记录被校缺陷检测仪示值 $I$ 。一般校准正向电流的10%、50%和100%量程值点,也可按照现场要求选择校准点,正向电流相对误差为:

$$\delta_I = \left( \frac{I - I_0}{I_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$\delta_I$ ——正向电流相对误差, %;

$I$ ——被校缺陷检测仪电流示值, A;

$I_0$ ——电流表测得的电流值, A。

## 7.4 施加电压

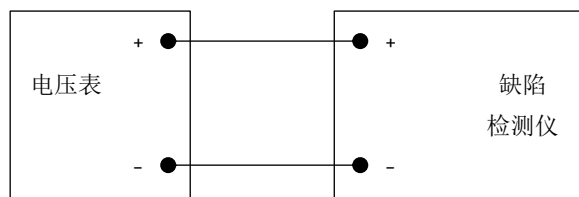


图6 施加电压连接示意图

将电压表与缺陷检测仪电源的输出端正负极相连,如图6所示。设置缺陷检测仪控制软件,使得电源能够持续输出直流电压,等待数值稳定后,开始读取电压表上的电压值 $U_0$ ,同时记录被校缺陷检测仪示值 $U$ 。一般校准施加电压的10%、50%和100%量程值点,也可按照现场要求选择校准点,施加电压相对误差为:

$$\delta_U = \left( \frac{U - U_0}{U_0} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\delta_U$ ——施加电压相对误差，%；

$U$ ——被校缺陷检测仪电压示值，V；

$U_0$ ——电压表测得的电压值，V。

## 8 校准结果

### 8.1 校准证书

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- 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) 如果与校准结果的有效性应用相关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 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

建议复校时间间隔为 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量问题等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

## 附录 A

## 电致发光缺陷检测仪校准原始记录参考格式

证书编号: \_\_\_\_\_ 原始记录编号: \_\_\_\_\_

客户名称: \_\_\_\_\_ 客户地址: \_\_\_\_\_

仪器名称: \_\_\_\_\_ 型号规格: \_\_\_\_\_

制造厂: \_\_\_\_\_ 出厂编号: \_\_\_\_\_

校准地点: \_\_\_\_\_

校准依据: \_\_\_\_\_

环境条件: 温度: \_\_\_\_\_ 相对湿度: \_\_\_\_\_ 校准日期: \_\_\_\_\_

校准员: \_\_\_\_\_ 核验员: \_\_\_\_\_

标准器名称	编号	不确定度或准确度等级 或最大允许误差	证书编号	证书有效期

## A.1 空间分辨率

竖直条纹各位置空间分辨率 (lp/mm)	中心	左上	左下	右上	右下
水平条纹各位置空间分辨率 (lp/mm)	中心	左上	左下	右上	右下
选取所有空间分辨率最小值, 作为电致发光缺陷测试仪空间分辨率的结果。 结果为 $R_s=$ _____ lp/mm, 评级结果为 _____ 级。 测量不确定度 _____ 。					

拍摄图:

## A.2 正向电流

被校仪器显示值 (A)	实际值 (A)	相对误差 (%)	测量不确定度

## A.3 施加电压

被校仪器显示值 (V)	实际值 (V)	相对误差 (%)	测量不确定度





## 附录 C

## 空间分辨率测试板参考样式及建议

## C.1 空间分辨率测试板参考样式

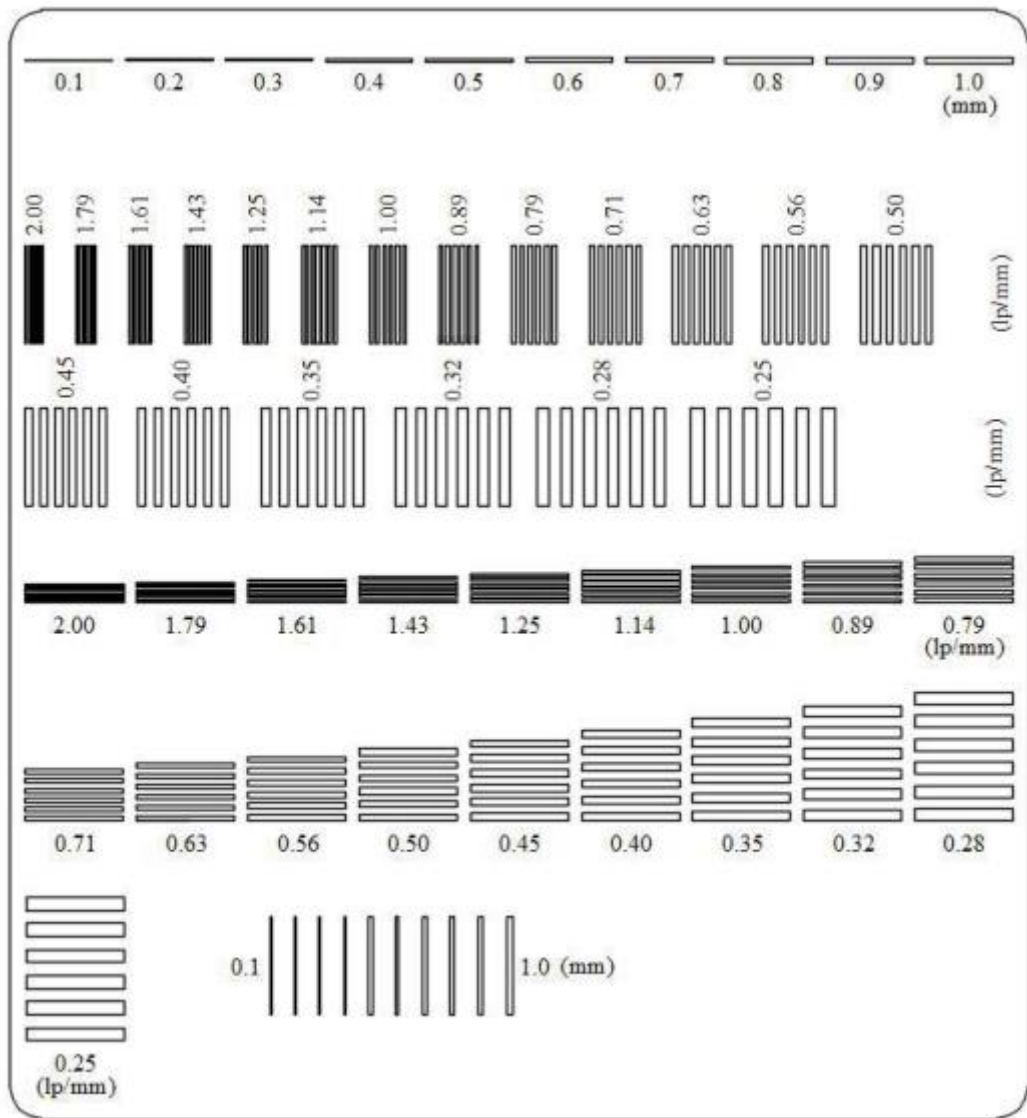


图 C1 空间分辨率测试板参考样式

## C.2 建议

空间分辨率测试板厚度建议为 (0.1mm~0.5mm)，推荐测试板厚度宜为 0.1mm。

## 附录 D

## 电致发光缺陷检测仪空间分辨率测量结果不确定度评定示例

## D.1 测量模型

$$R_s = \frac{1}{2 \times d}$$

式中：

$R_s$ ——空间分辨率，lp/mm；

$d$ ——单个条纹宽度，mm；

## D.2 灵敏系数

$$\frac{\partial R_s}{\partial d} = -0.5d^{-2}$$

D.3  $u(d)$ 的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ ；空间分辨率测试板引入的不确定度分量  $u_2$ ；人眼判断引入的不确定度分量  $u_3$ 。

D.3.1 测量重复性引入的不确定度  $u_1$ 

空间分辨率测试板粘贴在组件某一固定位置上，在稳定的外部温湿度和光照环境下，使用缺陷检测仪进行测量并获得目视结果。重复进行 10 次，测量数据见表 D1：

表 D1 10 次测量数据

次数	1	2	3	4	5
最小目视可分辨线对单条纹宽度 (mm)	0.56	0.56	0.56	0.50	0.50
次数	6	7	8	9	10
最小目视可分辨线对单条纹宽度 (mm)	0.56	0.56	0.50	0.56	0.56

十次测量平均值： $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 0.542$  mm

单次实验标准差：

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 0.029$$
 mm

则由测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ 为：

$$u_1 = s(x_i) = 0.029$$
 mm

D.3.2 空间分辨率测试板引入的不确定度分量  $u_2$

根据空间分辨率测试板说明书和溯源证书可知，其条纹宽度最大允许误差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，区间半宽度值为 $a_2=0.02\text{mm}$ ，认为服从均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。则空间分辨率测试板引入的标准不确定度为：

$$u_2 = a_2/k = 0.012 \text{ mm}$$

#### D. 3.3 人眼判断引入的不确定度分量 $u_3$

对于（0.25~2.00）mm 的图案中，人眼判断引入的误差为 0.03mm，区间半宽度值为 $a_3=0.015\text{mm}$ ，认为服从均匀分布，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。则人眼判断引入的标准不确定度为：

$$u_3 = a_3/k = 0.009 \text{ mm}$$

#### D. 4 $u(d)$ 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 D2 所示

表 D2 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$ c_i $	$ c_i  u(x_i)$
$u_1$	测量重复性	0.029 mm	1	0.029 mm
$u_2$	空间分辨率测试板	0.012 mm	1	0.012 mm
$u_3$	人眼判断	0.009 mm	1	0.009 mm

各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u(d) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.033 \text{ mm}$$

#### D. 5 $u(R_s)$ 合成标准不确定度的评定

$$u(R_s) = \sqrt{\left[\frac{\partial R_s}{\partial d}\right]^2} u^2(d) = \sqrt{[-0.5d^{-2}]^2 \times [0.033]^2} = 0.0165 \times d^{-2}$$

#### D. 5 扩展不确定度的评定

对应  $p$  约为 95% 包含概率，取  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.0165 \times d^{-2} = 0.033d^{-2} \text{ lp/mm}$$

代入  $d$  值，空间分辨率扩展不确定度为： $U=0.11 \text{ lp/mm}$ ， $k=2$ 。

## 附录 E

## 电致发光缺陷检测仪正向电流测量结果不确定度评定示例

## E.1 数学模型

$$\delta_1 = \left( \frac{I - I_0}{I_0} \right) \times 100\%$$

式中：

$\delta_1$ ——正向电流相对误差，%；

$I$ ——被校缺陷检测仪电流示值，A；

$I_0$ ——数字万用表测得的电流值，A。

## E.2 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ ；标准器引入的不确定度分量  $u_2$ ；数显分辨率引入的不确定度分量  $u_3$ 。

E.2.1 测量重复性引入的不确定度  $u_1$ 

设置电致发光缺陷检测仪控制软件，使得直流电源能够持续输出电流 2A，测量条件固定，用数字万用表独立重复测量电流 10 次，测量数据见表 F1：

表 F1 10 次测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果 (A)	1.998	1.999	2.001	1.999	1.998	2.000	2.001	1.999	1.998	1.998

十次测量平均值： $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1.9991 \text{ A}$

单次实验标准差：

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 1.20 \times 10^{-3} \text{ A}$$

则由测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$  为：

$$u_1 = s(x_i) = 1.20 \times 10^{-3} \text{ A}$$

E.2.2 标准器引入的不确定度分量  $u_2$ 

数字万用表测量电流 2A 的最大允许误差为  $\pm 0.0046\text{A}$ ；即区间半宽度值为  $a_2 = 0.0046\text{A}$ ，认为服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。则标准器引入的标准不确定度为：

$$u_2 = a_2 / k = 2.66 \times 10^{-3} \text{ A}$$

### E.2.3 数显分辨率引入的不确定度分量 $u_3$

数显分辨率为 0.001A，即区间半宽度值为  $a_3 = 5 \times 10^{-4} \text{ A}$ ，认为服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。则标准器引入的标准不确定度为：

$$u_3 = a_3 / k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ A}$$

### E.3 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 F2 所示

表 F2 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$ c_i $	$ c_i  u(x_i)$
$u_1$	测量重复性	$1.20 \times 10^{-3} \text{ A}$	1	$1.20 \times 10^{-3} \text{ A}$
$u_2$	标准器	$2.66 \times 10^{-3} \text{ A}$	1	$2.66 \times 10^{-3} \text{ A}$
$u_3$	数显分辨率	$2.89 \times 10^{-4} \text{ A}$	1	$2.89 \times 10^{-4} \text{ A}$

考虑到被校电致发光缺陷检测仪的测量重复性和数显分辨率存在重复，在合成标准不确定度时将二者中较小值舍去。各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 2.92 \times 10^{-3} \text{ A}$$

### E.4 扩展不确定度的评定

对应  $p$  约为 95% 包含概率，取  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 \times 2.92 \times 10^{-3} \text{ A} = 5.84 \times 10^{-3} \text{ A} \approx 0.006 \text{ A}$$

换算至相对扩展不确定度为： $U_{rel} = 0.3\%$ ， $k=2$ 。

## 附录 F

## 电致发光缺陷检测仪施加电压测量结果不确定度评定示例

## F.1 数学模型

$$\delta_U = \left( \frac{U - U_0}{U_0} \right) \times 100\%$$

式中：

$\delta_U$ ——施加电压相对误差，%；

$U$ ——被校缺陷检测仪电压示值，V；

$U_0$ ——数字万用表测得的电压值，V。

## F.2 各输入量的标准不确定度的分析与评定

不确定度主要来源：测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$ ；标准器引入的不确定度分量  $u_2$ ；数显分辨率引入的不确定度分量  $u_3$ 。

F.2.1 测量重复性引入的不确定度  $u_1$ 

设置电致发光缺陷检测仪控制软件，使得直流电源能够持续输出电压 2V，测量条件固定，用数字万用表独立重复测量电压 10 次，测量数据见表 E1：

表 E1 10 次测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果 (V)	1.999	2.000	2.001	1.999	1.998	2.000	2.000	1.999	1.998	1.998

十次测量平均值： $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1.9992 \text{ V}$

单次实验标准差：

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{10-1}} = 1.03 \times 10^{-3} \text{ V}$$

则由测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$  为：

$$u_1 = s(x_i) = 1.03 \times 10^{-3} \text{ V}$$

F.2.2 标准器引入的不确定度分量  $u_2$ 

数字万用表测量电压 2V 的最大允许误差为  $\pm 0.0002\text{V}$ ；即区间半宽度值为  $a_2 = 0.0002\text{V}$ ，认为服从均匀分布，取包含因子  $k = \sqrt{3}$ 。则标准器引入的标准不确定度为：

$$u_2 = a_2/k = 1.15 \times 10^{-4} \text{ V}$$

### F.2.3 数显分辨率引入的不确定度分量 $u_3$

数显分辨率为 0.001V，即区间半宽度值为  $a_3=5 \times 10^{-4}$ V，认为服从均匀分布，取包含因子  $k=\sqrt{3}$ 。则标准器引入的标准不确定度为：

$$u_3 = a_3/k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$$

### F.3 合成标准不确定度的评定

主要标准不确定度汇总表如表 D2 所示

表 D2 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$ c_i $	$ c_i  u(x_i)$
$u_1$	测量重复性	$1.03 \times 10^{-3} \text{ V}$	1	$1.03 \times 10^{-3} \text{ V}$
$u_2$	标准器	$1.15 \times 10^{-4} \text{ V}$	1	$1.15 \times 10^{-4} \text{ V}$
$u_3$	数显分辨率	$2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$	1	$2.89 \times 10^{-4} \text{ V}$

考虑到被校电致发光缺陷检测仪的测量重复性和数显分辨率存在重复，在合成标准不确定度时将二者中较小值舍去。各不确定度分量独立不相关，则合成标准不确定度  $u_c$  为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ V}$$

### F.4 扩展不确定度的评定

对应  $p$  约为 95% 包含概率，取  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 \times 1.04 \times 10^{-3} \text{ V} = 2.08 \times 10^{-3} \text{ V} \approx 0.002 \text{ V}$$

换算至相对扩展不确定度为： $U_{rel} = 0.1\%$ ， $k=2$ 。



