

JJF

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF××××—××××

## 聚焦离子束系统校准规范

Calibration Specification of Focused Ion Beam Systems

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

# 聚焦离子束系统校准规范

Calibration Specification of

Focused Ion Beam Systems

JJF ××××—202X

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：

参加起草单位：

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

# 目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
3.1 标准栅格.....	(1)
3.2 共聚焦距离.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 长度测量误差.....	(2)
5.2 长度测量重复性.....	(2)
5.3 线性失真度.....	(2)
5.4 正交误差.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
6.2 校准项目和校准用标准器.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 长度测量误差.....	(3)
7.2 长度测量重复性.....	(4)
7.3 线性度失真.....	(4)
7.4 正交误差.....	(5)
8 校准结果表达.....	(5)
9 复校时间间隔.....	(5)
附录 A 聚焦离子束系统长度测量误差的不确定度评定.....	(6)
附录 B 聚焦离子束系统校准证书(内页)格式.....	(9)

# 引 言

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1094-2002《测量仪器特性评定》共同构成支撑本校准规范制定工作的基础性系列文件。

本规范为首次发布。

## 聚焦离子束系统校准规范

### 1 范围

本规范适用于双束和多束聚焦离子束系统的校准。

### 2 引用文件

本规范引用下列文件：

GB/T 16594-2008 微米级长度的扫描电镜测量方法通则

JY/T 0583-2020 聚焦离子束系统分析方法通则

ISO 21466:2019 微束分析-扫描电子显微镜-通过 CD-SEM 评估关键尺寸的方法（Microbeam analysis-Scanning electron microscopy-Method for evaluating critical dimensions by CD-SEM）

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）适用本规范。

### 3 术语和定义

#### 3.1. 标准栅格 grating standards

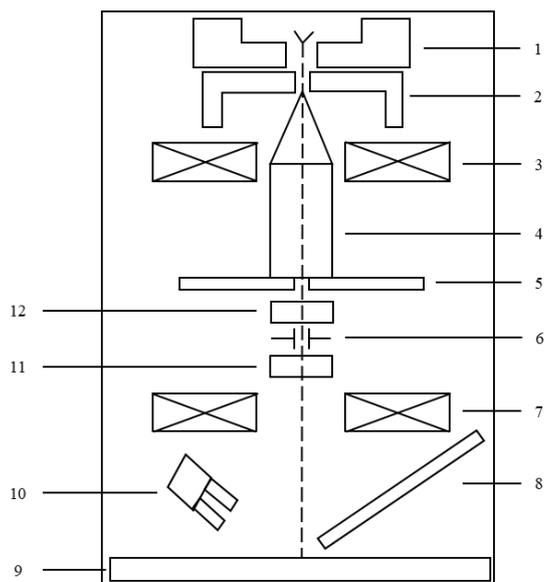
具有重复特征几何结构的栅格标准器。

#### 3.2. 共聚焦距离 coincide distance

聚焦离子/电子双束系统中电子束和离子束的交汇点与电子束系统物镜下表面的距离。

### 4 概述

聚焦离子束系统采用聚焦的离子束对样品表面进行轰击，并由计算机控制离子束的扫描或加工轨迹、步距、驻留时间和循环次数，以实现材料的成像、刻蚀、诱导沉积和注入的分析系统。其应用已经从界面检测扩展到纳米图像制备、透射样品制备、三维成像和分析、电路编辑和修复等，在材料科学、生物、半导体集成电路、数据存储磁盘等领域有广泛的应用。聚焦离子束系统结构示意图见图 1。



1—液态金属离子源 (Ga)；2—抽取极；3—静电透镜 1；4—Ga 离子束；5—光阑；6—消隐组件；7—静电透镜 2；8—气体注入；9—样品；10—二次电子探测器；11—八极偏转电极；12—四极偏转电极

图 1 聚焦离子束系统结构示意图

## 5 计量特性

### 5.1 长度测量误差

### 5.2 长度测量重复性

### 5.3 线性失真度

### 5.4 正交误差

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 温度： $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度： $< 80\%$ 。

6.1.3 实验室内环境应符合聚焦离子束系统正常工作条件，且无影响测量的振动、电磁辐射等因素。

### 6.2 校准项目和校准用标准器

聚焦离子束系统校准项目和校准用标准器见表 1。

表 1 聚焦离子束系统校准项目和校准用标准器

序号	校准项目	标准器	聚焦离子束放大倍率
1	长度测量误差	一维标准栅格 100 nm 间距	70000 倍~200000 倍
		一维标准栅格 250 nm 间距	20000 倍~80000 倍
		一维标准栅格 500 nm 间距	10000 倍~40000 倍

		一维标准栅格 1 μm 间距	5000 倍~20000 倍
		一维标准栅格 2 μm 间距	1500 倍~5000 倍
2	长度测量重复性	同上	同上
3	线性失真度	二维标准栅格 10 μm 间距	500 倍~2000 倍
4	正交误差	二维标准栅格, 角度 90.0°	500 倍~2000 倍
注: 聚焦离子束系统放大倍率与长度示值可依据数学公式进行换算。			

## 7 校准项目和校准方法

校准前, 需确保聚焦离子束系统处于正常的工作状态, 且没有影响校准计量性能的因素后方可进行校准。根据聚焦离子束系统的操作规程, 在专用样品台上装载样品后抽真空, 直到样品室的真空度达到正常工作状态, 将样品台上升至共聚焦位置处, 启动离子束/电子束进行样品观察。所有校准项目均在100万倍以下放大倍数进行。放大倍数至少包括高, 中, 低三个不同倍数。

### 7.1 长度测量误差

选择合适的放大倍数, 调整样品台, 旋转标准器使栅格的线条沿着竖直方向, 栅格间距的测量方向沿着图像的 X 轴, 并进行聚焦、调节衬度和亮度以及消像散等, 直至图像清晰, 记录扫描图像以及对应的放大倍数, 如图 2 所示。在采集的图像上选取  $N$  ( $N \geq 5$ ) 个周期结构的距离作为评定长度  $L$ , 评定长度可由“重心法”测得。同一评定长度重复测量 10 次, 计算 10 次测量值的算术平均值作为评定长度  $L$ , 被测标准器的平均间距  $P$  为:

$$P = \frac{L}{N} \quad (1)$$

式中:  $P$ —标准器平均间距的测得值, nm;

$L$ —评定长度, nm;

$N$ —评定长度对应的周期数。

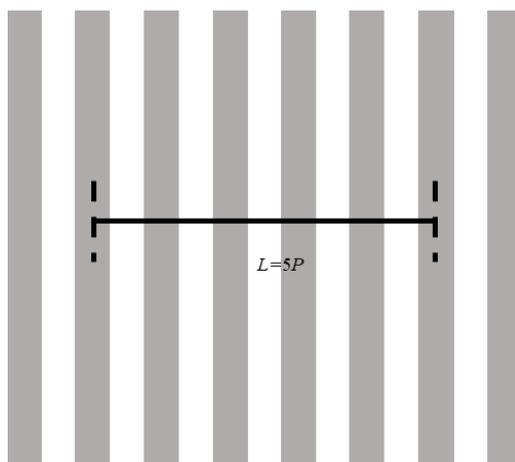


图2 长度测量示意图

聚焦离子束系统长度测量误差及相对误差：

$$\Delta P = P - P_s \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\Delta P$ —聚焦离子束系统长度测量误差，nm；

$P$ —标准器平均间距的测得值，nm；

$P_s$ —标准器平均间距的标准值，nm；

$\Delta$ —聚焦离子束系统测量相对误差，%。

## 7.2 长度测量重复性

按 7.1 的测量方法重复测量 10 次，取实验标准差  $s$ （见公式（4））作为长度测量重复性的校准结果。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

式中： $s$ —聚焦离子束长度测量重复性，nm；

$P_i$ —第  $i$  次测量的平均间距测得值，nm；

$\bar{P}$ — $n$  次平均间距测得值的算术平均值，nm；

$n$ —测量次数。

## 7.3 线性失真度

将二维标准栅格的某一栅格分别平移到图像的中心和四角，并获取相应的图像。测量 5 个位置上栅格的 X、Y 方向的宽度，分别为  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ ，并计算四角宽度与中心宽度的误差： $\Delta x_i = x_i - x_0$ ， $\Delta y_i = y_i - y_0$ ，

$i=1, 2, 3, 4$ 。X、Y 方向的最大误差值记为  $\Delta x_{\max}$ 、 $\Delta y_{\max}$ 。

X 方向线性失真度  $\alpha$ ：

$$\alpha = \frac{\Delta x_{\max}}{x_0} \times 100\% \quad (5)$$

Y 方向线性失真度  $\beta$ ：

$$\beta = \frac{\Delta y_{\max}}{y_0} \times 100\% \quad (6)$$

#### 7.4 正交误差

在二维标准栅格的图像中选取正交方向  $N(N \geq 5)$  个周期结构, 如图 3 所示, 使用专用软件 (根据“重心法”确定正交方向测量线, 并对图像中每个正交方向角度进行测量, 以其平均值作为一次测量结果) 测量正交方向的夹角角度。按此方法重复测量 3 次, 计算 3 次角度测量值的算术平均值作为角度测量结果, 该角度与二维标准栅格角度的标准值之差为聚焦离子束系统的正交误差:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_s \quad (7)$$

式中:  $\Delta\theta$ —聚焦离子束系统正交误差, °;

$\theta$ —二维标准栅格角度的测得值, °;

$\theta_s$ —二维标准栅格角度的标准值, °。

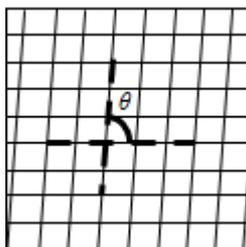


图 3 角度测量示意图

#### 8 校准结果表达

经过校准的聚焦离子束系统出具校准证书。校准结果应至少包含下列内容: 校准项目名称和校准结果。

#### 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔一般为 1 年。

## 附录 A

## 聚焦离子束系统长度测量误差的不确定度评定

聚焦离子束系统长度测量误差的不确定度受到测量重复性、图像像素分辨率和标准器不确定度等因素的影响。本附录为聚焦离子束系统中电子束长度测量误差的不确定度评定。

## A.1 聚焦离子束系统长度测量误差的测量不确定度计算

## A.1.1 测量模型

采用标准器进行测量时，聚焦离子束系统长度测量误差结果可以表示为：

$$\Delta P = P - P_s \quad (\text{A.1})$$

式中： $\Delta P$ —聚焦离子束系统长度测量误差，nm；

$P$ —标准器平均间距的测得值，nm；

$P_s$ —标准器平均间距的标准值，nm。

## A.1.2 灵敏系数和合成方差

因为  $\Delta P = P - P_s$ ，所以灵敏系数  $c_i$ ：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta P}{\partial P} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta P}{\partial P_s} = -1$$

$u(P)$ 、 $u(P_s)$ 分别为  $P$  和  $P_s$  的标准不确定度，因  $u(P)$ 、 $u(P_s)$ 相互独立，其合成方差  $u_c^2$  可以表示为：

$$u_c^2 = u^2(P) + u^2(P_s) \quad (\text{A.2})$$

式中： $u(P)$ —聚焦离子束系统测量引入的不确定度；

$u(P_s)$ —标准器引入的不确定度。

## A.1.3 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u^2(P) + u^2(P_s)} \quad (\text{A.3})$$

## A.1.4 扩展不确定度

$$U = k u_c, \quad k=2 \quad (\text{A.4})$$

## A.2 计算示例

本示例评定以聚焦离子束系统放大倍率为 20000 倍时，测量平均间距标准值

500 nm ( $U=2.8$  nm,  $k=2$ ) 的一维标准栅格为例, 对聚焦离子束系统长度测量误差结果不确定度评定。

#### A.2.1 聚焦离子束系统测量引入的不确定度 $u(P)$

聚焦离子束系统测量引入的不确定度包括测量重复性引入的不确定度分量  $u_1$  和图像像素分辨率引入的不确定度分量  $u_2$ 。

##### A.2.1.1 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1$

聚焦离子束系统的测量重复性引入的不确定度分量可以通过 10 次重复连续测量得到, 计算单次实验标准差为

$$s=0.50 \text{ nm}$$

实际测量时采用 10 次重复测量结果的平均值, 则

$$u_1 = \frac{0.50}{\sqrt{10}} \text{ nm} = 0.16 \text{ nm}$$

##### A.2.1.2 图像像素分辨力引入的标准不确定度分量 $u_2$

图像像素分辨力  $R$  为每个像素对应的长度尺寸:

$$R=W/N_p=13.48 \text{ nm}$$

式中:  $W$ —记录的图像中被测标准器的长度尺寸;

$N_p$ —与标准器长度尺寸对应的像素数。

测量周期为 5 个, 由图像像素分辨力引入的标准不确定度分量为均匀分布, 则

$$u_2 = \frac{13.48}{5 \times 2 \times \sqrt{3}} \text{ nm} = 0.77 \text{ nm}$$

##### A.2.1.3 聚焦离子束系统测量引入的不确定度 $u(P)$

$u_1$  和  $u_2$  取其中较大者,

$$u(P) = u_2 = 0.77 \text{ nm}$$

#### A.2.2 标准器引入的不确定度 $u(P_s)$

标准器引入的不确定度可根据校准证书给出的扩展不确定度来计算。由标准器校准证书给出的扩展不确定度  $U=2.8$  nm,  $k=2$ , 则

$$u(P_s) = \frac{2.8}{2} \text{ nm} = 1.4 \text{ nm}$$

#### A.2.3 标准不确定度分量一览表

输入量的标准不确定度分量汇总表见表 A.1。

表 A.1 不确定度分量一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值/nm
$u(P)$	聚焦离子束系统测量引入的不确定度	0.77
$u(P_s)$	标准器引入的不确定度	1.4

#### A.2.4 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u^2(P) + u^2(P_s)} = \sqrt{0.77^2 + 1.4^2} \text{ nm} = 1.60 \text{ nm}$$

#### A.2.5 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 1.60 \text{ nm} = 3.2 \text{ nm}$$

## 附录 B

## 聚焦离子束系统校准证书（内页）格式

证书编号：××××—××××

## 校准结果

## 1、长度测量误差

放大倍率	长度测量误差/nm	长度测量误差的扩展不确定度( $k=2$ )/nm

## 2、长度测量重复性

放大倍率	长度测量重复性/nm

## 3、线性失真度

放大倍率	X 方向/%	Y 方向/%

## 4、正交误差

放大倍率	正交误差/°