

JJF (皖)

安徽省地方计量技术规范

JJF (皖) 146—2023

白光干涉轮廓仪校准规范

Calibration Specification for White Light Interference Profiler

2023-01-09 发布

2023-03-01 实施

安徽省市场监督管理局 发布

白光干涉轮廓仪校准规范

Calibration Specification for White Light
Interference Profiler

JJF (皖) 146—2023

归口单位：安徽省几何量计量技术委员会

主要起草单位：安徽省计量科学研究院

安徽省长江计量所

参加起草单位：深圳市中图仪器股份有限公司

中国计量大学

合肥一焯检测技术有限公司

中乾格致精密测量技术（杭州）有限公司

本规范委托安徽省几何量计量技术委员会解释

本规范主要起草人:

丁 晨 (安徽省计量科学研究院)

童树之 (安徽省长江计量所)

邢献军 (安徽省计量科学研究院)

石 韡 (安徽省长江计量所)

蒋加平 (安徽省长江计量所)

参加起草人:

刘见桥 (深圳市中图仪器股份有限公司)

程银宝 (中国计量大学)

魏 超 (合肥一焯检测技术有限公司)

崔洪彬 (中乾格致精密测量技术(杭州)有限公司)

目 录

引言.....	III
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语.....	1
3.1 台阶高度.....	1
3.2 线间隔.....	1
4 概述.....	2
4.1 用途.....	2
4.2 构造.....	2
4.3 原理.....	2
5 计量特性.....	4
5.1 垂直 (Z) 方向示值误差.....	4
5.2 垂直 (Z) 方向示值重复性.....	4
5.3 水平 (X、Y) 方向示值误差.....	4
5.4 水平 (X、Y) 方向示值重复性.....	4
5.5 表面粗糙度 (Ra) 示值误差.....	4
6 校准条件.....	4
6.1 环境条件.....	4
6.2 测量标准及其他设备.....	4
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 垂直 (Z) 方向示值误差.....	4
7.2 垂直 (Z) 方向示值重复性.....	6
7.3 水平 (X、Y) 方向示值误差.....	6
7.4 水平 (X、Y) 方向示值重复性.....	7
7.5 表面粗糙度 (Ra) 示值误差.....	7
8 校准结果的表达.....	8

9 复校时间间隔	8
附录 A 垂直 (Z) 方向示值误差校准结果的测量不确定度评定	9
附录 B 校准证书内容及内页格式	13

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》、JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1094—2002《测量仪器特性评定》共同构成支撑本校准规范制定的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

白光干涉轮廓仪校准规范

1 范围

本规范适用于白光干涉轮廓仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 10610—2009 产品几何技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法

GB/T 39516—2020 微纳米标准样板（几何量）

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

3.1 台阶高度 step height（GB/T 39516—2020，台阶高度 3.3）

具有微纳米级准确度和均匀性的台阶或沟槽。台阶高度示意图见图 1。

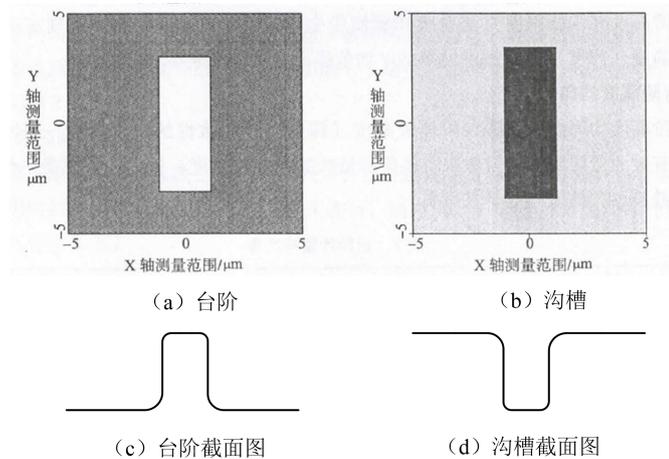


图 1 台阶高度示意图

3.2 线间隔 pitch（GB/T 39516—2020，线间隔 3.2）

具有微纳米级准确度和均匀性、刻线间距 P 不大于 $10\ \mu\text{m}$ 的周期性刻线。以相邻同侧周期性刻线边缘之间的距离或相邻周期性刻线几何结构中心之间的距离表征刻线间隔。线间隔示意图见图 2。

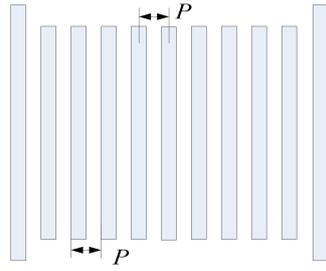


图2 线间隔示意图

4 概述

4.1 用途

白光干涉轮廓仪主要用于样品微纳级表面粗糙度、台阶高度等表面形貌特征的测量和分析，在纳米科学、材料科学等研究领域以及半导体、微电子等行业中广泛应用。

4.2 构造

白光干涉轮廓仪主要由光学系统、运动电机、扫描模块和测量软件等组成，其光学系统主要有照明光路和成像光路两个部分，光路构造示意图如图3所示。

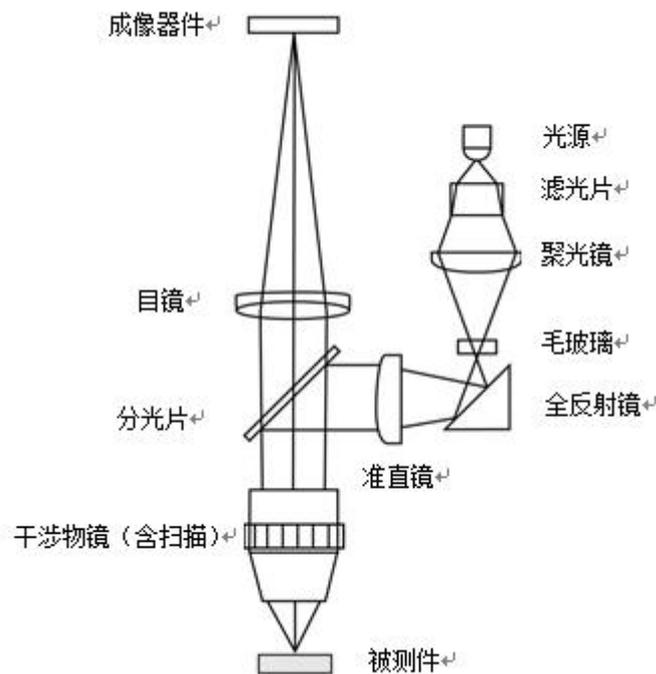


图3 白光干涉轮廓仪光路构造示意图

4.3 原理

白光干涉轮廓仪结构示意图见图4。光源发出的光经过扩束准直后进入到干涉物镜，在分光板的作用下分为两束，其中反射到参考板上的光称为参考光，透过分光板入射到样品表面的光称为测试光，参考光经参考板反射和经样品表面发射的测试光在分光板合束，满足干涉条件则在物镜表面形成干涉条纹并出射，被成像系统成像。

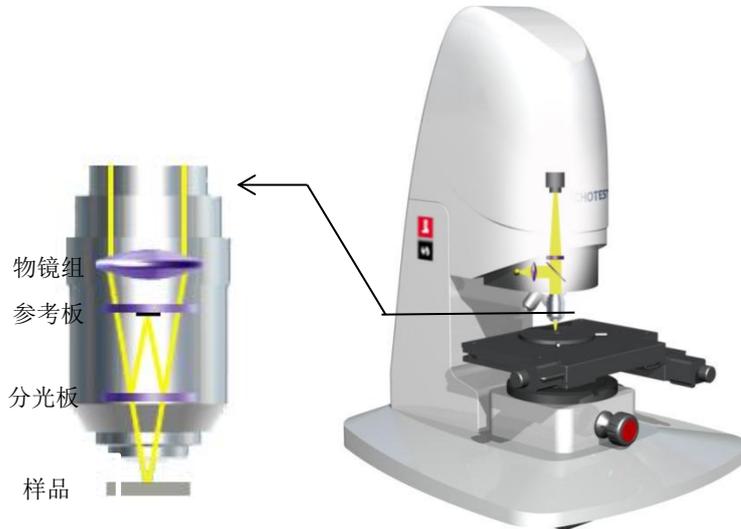


图4 白光干涉轮廓仪结构示意图

当参考光和测试光的光程差满足如下条件，如公式(1)所示。 m 为奇数时，光程差为半波长偶数倍，形成亮条纹， m 为偶数时，光程差为半波长奇数倍，形成暗条纹，光程差为0时，形成的则是0级条纹，0级条纹光强最大。扫描模块带动光学系统对被测样品表面(测量区域内)从低到高进行扫描，获取每一个点在整个测试光和参考光的光程差处于相干长度范围内时形成的干涉条纹图像。提取测量区域内每一个点在整个扫描过程中获取的所有干涉条纹图像中的光强值，并进行拟合，求出每个点处于零级条纹时所对应的位置，则可知道每个点的相对高度，即可完成样品表面三维形貌的测量。

$$\Delta L = (m+1)\lambda/2 \quad (1)$$

式中：

ΔL —— 光程差；

λ —— 光源中心波长；

m —— 整数。

5 计量特性

5.1 垂直(Z)方向示值误差

5.2 垂直(Z)方向示值重复性

5.3 水平 (X、Y) 方向示值误差

5.4 水平 (X、Y) 方向示值重复性

5.5 表面粗糙度 (Ra) 示值误差

6 校准条件

6.1 环境条件

温度: (20±2) °C, 温度变化 ≤1°C/h, 湿度: ≤80%RH。

6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。允许使用满足测量不确定度要求的其他测量标准及其他设备进行校准。

表1 测量标准及其他设备

序号	测量标准及其他设备名称	技术要求
1	微纳米台阶高度标准样板	$U=0.002 \mu\text{m}+0.5\%H, k=2$
2	微纳米线间隔标准样板	$U=0.002 \mu\text{m}+0.3\%P, k=2$
3	单晶硅超光滑样块	$U=1.5 \text{ nm}, k=2$

7 校准项目和校准方法

校准前首先检查外观和各部分相互作用, 确定没有影响计量特性因素后再进行校准。

7.1 垂直 (Z) 方向示值误差

垂直 (Z) 方向示值误差使用白光干涉轮廓仪对微纳米台阶高度标准样板的台阶高度直接测量后得出。如图 5 所示, 选取微纳米台阶高度标准样板的中心测量线作为台阶高度的测量位置, 图中 W 代表台阶可测宽度, 以 A、B、C 三个区域为测量区域, 选取测量台阶可测宽度的三倍进行测量, 即 A、B、C 三个区域选取均为台阶可测宽度, 测量时采用相对 A、B、C 测量区域中心点对称的三分之一 W 宽度作为有效计算区域。

台阶高度单次测量值按公式 (2) 计算:

$$H_j = \frac{\Delta a_j + \Delta c_j}{2} \quad (2)$$

式中:

H_j ——台阶高度单次测量值, μm ;

Δa_j ——区域 B 相对于区域 A 的台阶差值, μm ;

Δc_j ——区域 B 相对于区域 C 的台阶差值, μm 。

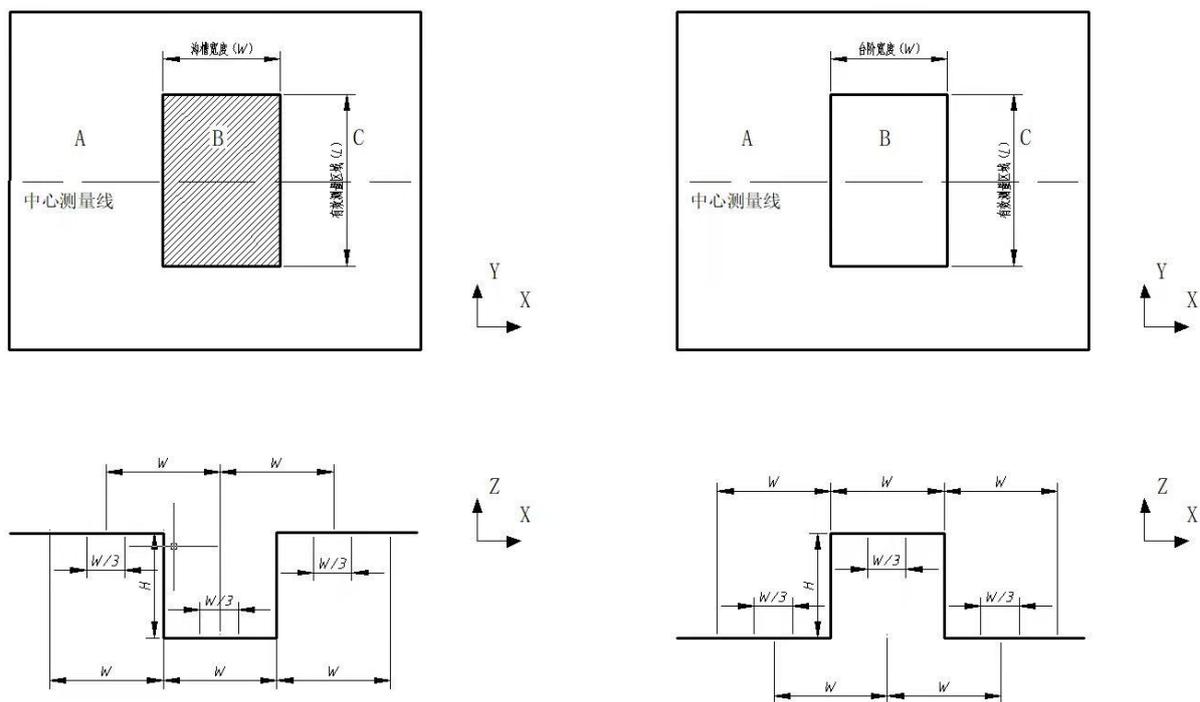


图5 台阶高度测量示意图

连续重复测量 10 次，按公式（3）计算其测量数据的平均值作为台阶高度标准样板的台阶高度测量结果。

$$H = \frac{\sum_{j=1}^m H_j}{m} \quad (3)$$

式中：

H ——台阶高度测量结果， μm ；

m ——重复测量次数，此处 $m = 10$ 。

按公式（4）计算仪器垂直（ Z ）方向示值误差：

$$e_h = (H - H_0) / H_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中：

e_h ——垂直（ Z ）方向示值误差，%；

H ——台阶高度测量结果， μm ；

H_0 ——台阶高度标准样板的标准值， μm 。

7.2 垂直 (Z) 方向示值重复性

将 7.1 的台阶高度重复测量 10 次测得的数据, 用公式 (5) 计算其相对标准偏差, 作为白光干涉轮廓仪的垂直 (Z) 方向示值重复性。

$$r = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (H_j - \bar{H})^2}{m-1}}}{H_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

r ——白光干涉轮廓仪垂直 (Z) 方向示值重复性, %;

H_j ——台阶高度单次测量值, μm ;

\bar{H} ——台阶高度测量平均值, μm ;

H_0 ——台阶高度标准样板的标准值, μm ;

m ——重复测量次数, 此处 $m=10$ 。

7.3 水平 (X、Y) 方向示值误差

水平 (X、Y) 方向示值误差使用白光干涉轮廓仪对微纳米线间隔样板的线间隔直接测量后得出。如图 6 所示, 在微纳米线间隔标准样板的有效测量区域内, 选取多个周期的线间隔长度作为数据采集区。选取依据如下:

对于线间隔小于 $1 \mu\text{m}$ 的微纳米线间隔标准样板, 在微纳米线间隔标准样板的有效测量区域内选取任意 10 个线间隔的长度作为数据采集区; 对于其它尺寸的微纳米线间隔标准样板, 可以在微纳米线间隔标准样板的有效测量区域内选取 2~10 个线间隔长度作为数据采集区。

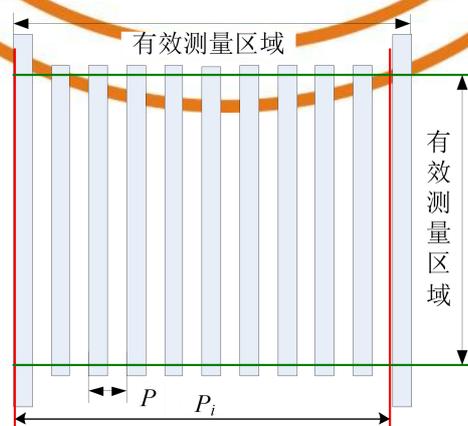


图6 微纳米线间隔样板有效测量区域选择示意图

P —线间隔尺寸实测值; P_i — m 个周期线间隔第 i 次测量结果

在数据采集区的同一位置连续重复测量 10 次, 按公式 (6) 计算其测量数据的平均值作为微纳米线间隔标准样板的线间隔测量结果。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{m \times n} \quad (6)$$

式中:

P —— 线间隔测量结果, μm ;

P_i —— m 个周期线间隔单次测量值, μm ;

m —— 选取的周期数;

n —— 重复测量次数, 此处 $n=10$ 。

按公式 (7), 计算水平 (X 、 Y) 方向示值误差。

$$e_p = P - P_0 \quad (7)$$

式中:

e_p —— 水平 (X 、 Y) 方向示值误差, μm ;

P —— 线间隔测量结果, μm ;

P_0 —— 线间隔标准值, μm 。

7.4 水平 (X 、 Y) 方向示值重复性

将 7.3 的线间隔重复测量 10 次测得的数据, 用公式 (8) 计算其标准偏差, 作为白光干涉轮廓仪的水平 (X 、 Y) 方向示值重复性。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P})^2}{m-1}} \quad (8)$$

式中:

s —— 白光干涉轮廓仪水平 (X 、 Y) 方向示值重复性, μm ;

P_i —— m 个周期线间隔单次测量值, μm ;

\bar{P} —— m 个周期线间隔测量平均值, μm ;

m —— 重复测量次数, 此处 $m=10$ 。

7.5 表面粗糙度 (R_a) 示值误差

白光干涉轮廓仪表面粗糙度示值误差选用单晶硅超光滑样块进行校准。在超光滑样

块有效区域内任意选取一条中心线进行测量，按公式（9）计算白光干涉轮廓仪表面粗糙度示值误差。

$$e_{R_a} = R_a - R_{a_0} \quad (9)$$

式中：

e_{R_a} ——表面粗糙度示值误差，nm；

R_a ——表面粗糙度测量结果，nm；

R_{a_0} ——单晶硅超光滑样块有效区域表面粗糙度，nm。

按上述方法连续重复测量 10 次，按公式（10）计算其测量数据的平均值作为白光干涉轮廓仪表面粗糙度测量结果。

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^m R_{a_i}}{m} \quad (10)$$

式中：

R_{a_i} ——表面粗糙度单次测量值，nm；

R_a ——表面粗糙度测量结果，nm；

m ——重复测量次数，此处 $m = 10$ 。

8 校准结果的表达

校准后的白光干涉轮廓仪出具校准证书。校准证书内容及内页格式参见附录 B。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由器具的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此委托方可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议不超过一年。

附录 A

白光干涉轮廓仪垂直 (Z) 方向示值误差测量结果不确定度评定

A.1 概述

A.1.1 测量方法

以台阶高度标称值为 $2\ \mu\text{m}$ 的微纳米台阶高度标准样板为例, 使用白光干涉轮廓仪对微纳米台阶高度样板的台阶高进行测量, 利用白光干涉轮廓仪 10 次测量数据的平均值作为测量结果与样板标准值计算得到白光干涉轮廓仪的垂直 (Z) 方向示值误差。

A.1.2 环境条件: 实验室温度 $(20\pm 2)\ ^\circ\text{C}$, 室温的变化 $\leq 1\ ^\circ\text{C}/\text{h}$, 湿度 $\leq 80\%\text{RH}$ 。

A.2 测量模型

垂直 (Z) 方向示值误差的测量模型见公式 (A.1):

$$e_h = \frac{H - H_0}{H_0} \times 100\% = \frac{H}{H_0} - 1 \quad (\text{A.1})$$

式中:

e_h ——垂直 (Z) 方向示值误差, %;

H ——台阶高度测量值, μm ;

H_0 ——台阶高度标准样板的标准值, μm 。

A.3 不确定度传播律

$$u_c^2(e_h) = c^2(H) \cdot u^2(H) + c^2(H_0) \cdot u^2(H_0) \quad (\text{A.2})$$

灵敏系数:

$$c(H) = \frac{\partial e_h}{\partial H} = \frac{1}{H_0}, \quad c(H_0) = \frac{\partial e_h}{\partial H_0} = -\frac{H}{H_0^2} \approx -\frac{1}{H_0}$$

A.4 不确定度来源

不确定度主要来源于台阶高度测量值和台阶高度标准样板值两个方面, 具体分析如下:

A.4.1 垂直方向测量重复性引入的不确定度

A.4.2 垂直方向测量分辨力引入的不确定度

A.4.3 微纳米台阶高度标准样板台阶高度标准值引入的不确定度

A.4.4 温度变化导致台阶高度样板尺寸变化引入的不确定度

A.5 不确定度分量的评定

A.5.1 垂直方向测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(H)$

使用白光干涉轮廓仪对 2 μm 台阶高度标准样板台阶高度重复测量 10 次, 测量数据见表 A.1。

表 A.1 重复 10 次测量结果

第 j 次测量	1	2	3	4	5
实测值/ μm	1.964	1.963	1.964	1.966	1.963
第 j 次测量	6	7	8	9	10
实测值/ μm	1.962	1.966	1.974	1.964	1.965

用贝塞尔公式计算单次测量数据的标准偏差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (H_j - \bar{H})^2}{m-1}} = 3.38\text{nm}$$

式中:

s ——白光干涉轮廓仪垂直 (Z) 方向示值重复性, nm ;

H_j ——台阶高度单次测量数据, μm ;

\bar{H} ——台阶高度测量平均值, μm ;

m ——测量次数。

由正文可知, 以 10 次测量数据的平均值作为测量结果, 故标准不确定度:

$$u_1(H) = s / \sqrt{10} = 1.07\text{nm}$$

A.5.2 垂直方向测量分辨力引入的标准不确定度 $u_2(H)$

白光干涉轮廓仪的垂直方向测量分辨力为 0.01nm, 按均匀分布, 则白光干涉轮廓仪分辨力引入的标准不确定为:

$$u_2(H) = 0.01\text{nm} / 2\sqrt{3} \approx 0.003\text{nm}$$

由于测量重复性所引入的标准不确定度大于仪器分辨力引入的标准不确定度, 所以后者已包含在重复性标准不确定度中, 即台阶高度测量值引入的标准不确定度为:

$$u(H) = u_1(H) = 1.07\text{nm}$$

A.5.3 微纳米台阶高度标准样板台阶高度标准值引入的标准不确定度 $u_1(H_0)$

由校准证书可知, $2\mu\text{m}$ 微纳米台阶高度标准样板台阶高度测量值的扩展不确定度为 $U=0.002\mu\text{m}+0.5\%H$, $k=2$ 。

则 $2\mu\text{m}$ 台阶高度标准样板台阶高度标准值引入的不确定度分量为:

$$u_1(H_0) = \frac{0.002\mu\text{m} + 0.5\%H}{2} = 6\text{nm}$$

A.5.4 温度变化导致台阶高度样板尺寸变化引入的标准不确定度 $u_2(H_0)$

校准时的室温条件为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$, 微纳米台阶高度样板的台阶高度使用的是硅基材料制作而成, 膨胀系数 $\alpha=2.5\times 10^{-6}\text{C}^{-1}$ 。假设校准时室温为 22°C , 校准时室温相对于 20°C 的差值 $\Delta t=2^\circ\text{C}$, 按均匀分布, 则:

$$u_2(H_0) = L \cdot \alpha \cdot \Delta t / \sqrt{3} = 2\mu\text{m} \times 2.5 \times 10^{-6}\text{C}^{-1} \times 2^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 0.06\text{nm}$$

由 A.5.3 和 A.5.4 可知, 台阶高度标准样板值引入的标准不确定度为:

$$u(H_0) = \sqrt{u_1^2(H_0) + u_2^2(H_0)} = \sqrt{(6\text{nm})^2 + (0.06\text{nm})^2} \approx 6.00\text{nm}$$

A.6 不确定度分量的计算

A.6.1 台阶高度测量值引入的不确定度分量 u_1

$$u_1 = c(H) \cdot u(H) = \frac{1}{H_0} \cdot u(H) \approx \frac{1}{2000\text{nm}} \cdot 1.07\text{nm} \approx 0.054\%$$

A.6.2 台阶高度标准值引入的不确定度分量 u_2

$$u_2 = c(H_0) \cdot u(H_0) = -\frac{1}{H_0} \cdot u(H_0) \approx -\frac{1}{2000\text{nm}} \cdot 6\text{nm} \approx -0.300\%$$

不确定度分量一览表见表 A.2

表 A.2 不确定度分量一览表

不确定度分量 u_i	不确定度来源	不确定度分量值
台阶高度测量值引入的不确定度分量 u_1	垂直方向测量重复性引入的不确定度	0.054%
	垂直方向测量分辨力引入的不确定度 (忽略不计)	
台阶高度标准值引入的不确定度分量 u_2	微纳米台阶高度标准样板台阶高度标准值引入的不确定度	-0.300%
	温度变化导致台阶高度样板尺寸变化引入的不确定度	

A.7 合成标准不确定度 $u_c(e_h)$

各输入量之间相互独立，互不相关，因此：

$$u_c(e_h) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{(0.054\%)^2 + (-0.300\%)^2} \approx 0.30\%$$

A.8 扩展不确定度 U_{rel}

取包含因子 $k = 2$ ，

$$U_{rel} = ku_c = 0.30\% \times 2 = 0.60\%$$

附录 B

校准证书内容及内页格式

B.1 校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点；
- d) 证书或报告的唯一性标识（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和应用有关时，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。

B.2 校准证书内页格式见表 B.1。

表 B.1 校准证书内页格式

序号	校准项目	校准结果
1	垂直（Z）方向示值误差	校准值：
		测量不确定度：
2	垂直（Z）方向示值重复性	
3	水平（X、Y）方向示值误差	校准值：
		测量不确定度：

4	水平 (X 、 Y) 方向示值重复性	
5	表面粗糙度 (Ra) 示值误差	校准值:
		测量不确定度:

校准员:

核验员:

注: 校准证书的内容应符合 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》的要求。由于各实验室对校准证书有自己的设计, 本附录仅建议与校准结果相关部分的内页格式。其中的部分内容可以由于实验室的证书格式不同而在其他部分表述。