

中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 43684—2024/IEC TS 62622:2012

纳米技术 光栅的描述、测量和 尺寸质量参数

Nanotechnologies—Description, measurement and dimensional
quality parameters of gratings

(IEC TS 62622:2012, Nanotechnologies—Description, measurement and
dimensional quality parameters of artificial gratings, IDT)

2024-03-15 发布

2024-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

 3.1 基本术语 1

 3.2 光栅相关术语 3

 3.3 光栅的种类 5

 3.4 光栅质量参数术语 7

 3.5 表征光栅的测量方法类别 9

4 缩略语 10

5 光栅校准和质量表征方法 10

 5.1 概述 10

 5.2 全局方法 10

 5.3 局部方法 11

 5.4 混合方法 11

 5.5 各种方法的对比 12

 5.6 光栅特征的其他偏差 12

 5.7 光栅质量表征的滤波算法 14

6 光栅表征结果的报告 14

 6.1 通则 14

 6.2 光栅规格 14

 6.3 校准程序 15

 6.4 光栅质量参数 15

附录 A（资料性） 背景信息和示例 16

附录 B（资料性） 布拉维格子 24

参考文献 27

前 言

本文件按照GB/T1.1—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。

本文件等同采用IEC TS 62622:2012《纳米技术 人造光栅的描述、测量和尺寸质量参数》，文件类型由IEC的技术规范调整为我国的国家标准化指导性技术文件。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

——将标准名称改为《纳米技术 光栅的描述、测量和尺寸质量参数》；

——将 IEC TS 62622:2012 中未被引用的术语“特征位置的相对偏差”和“特征位置的相对线性度偏差”分别调整至术语“特征位置偏差”和“特征位置的线性度偏差”的注中。

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。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国纳米技术标准化技术委员会(SAC/TC 279)归口。

本文件起草单位：中国计量科学研究院、北京大学、清华大学、苏州苏大维格科技集团股份有限公司、广纳四维(广东)光电科技有限公司。

本文件主要起草人：李伟、李适、朱振东、李群庆、陈林森、李晓军、高思田、李琪、施玉书、黄鹭、史瑞、乔文、华鉴瑜。

引 言

光栅在纳米尺度结构的制造过程以及纳米物体的表征中起着重要的作用。

在采用光刻技术的半导体集成电路批量制造中，通过光来探测掩模版和硅晶圆上的光栅图案，分析产生的光信号，并将其用于在晶圆扫描生产工具的不同光刻步骤中实现光刻掩模和晶圆的对准。在半导体制造以及其他需要纳米级高定位精度的制造过程中，通常使用基于光栅的长度或角度编码器系统提供运动轴的位置反馈。纳米技术中光栅的另一个应用领域是作为标准器，用于校准表征纳米结构所用的必要仪器，如扫描探针显微镜、扫描电子显微镜或透射电子显微镜等高分辨显微镜。

在制造工具中，用于位置反馈的光栅的质量通常影响对准系统或定位系统所能实现的精度。光栅作为校准高分辨显微镜图像放大倍率的标准器，其质量决定了校准的不确定度，从而对显微镜的最终测量不确定度起着重要作用。

本文件主要规定了光栅特征的质量参数，采用与光栅特征标称位置的偏差来表示，并提供了用于校准和表征光栅的各类测量与评价方法的应用指南。

纳米技术 光栅的描述、测量和 尺寸质量参数

1 范围

本文件界定了以光栅特征与标称位置偏差来解释光栅的全局和局部质量参数的通用术语，并提供了测定参数所用的测量与评价方法分类的指南，以及在纳米技术的不同应用领域保证生产和使用光栅质量的指南。

本文件所定义和描述的方法适用于不同类型的光栅，但本文件重点关注一维(1D)和二维(2D)光栅，以便于纳米技术领域涉及光栅尺寸质量参数表征的制造商、用户和校准实验室之间的使用。

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/T30544.1—2014 纳米科技 术语 第1部分：核心术语(ISO/TS 80004-1:2010, IDT)

ISO/IEC17025 检测与校准实验室能力通用要求(General requirements for the competence of testing and calibration laboratories)

注：GB/T27025—2019 检测和校准实验室能力的通用要求(ISO/IEC 17025:2017, IDT)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 基本术语

3.1.1

特征 feature

参考一基准面、具有明确的不同于边界以外区域的物理属性(参数)的一个连续边界内的区域。

示例：基底上一个具有梯形横截面的特征，见图1。

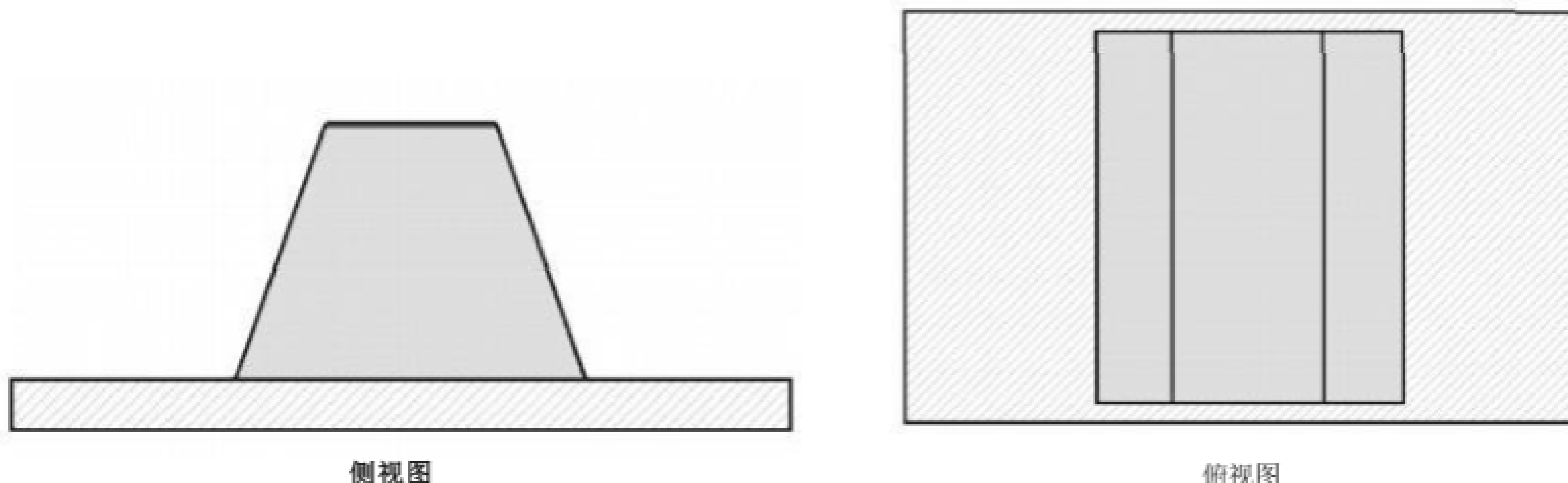


图 1 基底上梯形线特征的示例

注1:该定义改写自SEMI P35。
注2:一般情况下，特征是三维物体。它有可能是纳米物体(定义见 GB/T30544.1—2014, 2.5)。特征具有不同的形状，例如点、线、槽等；可能是对称的或非对称的；材料特性与基底可能相同或不同；可能位于基底表面或基底内(有时称为“掩埋特征”)。
注3:术语“几何特征”通常定义为点、线或面，见 ISO 17450-1:2011。

3.1.2

基准面 reference plane

用户定义的包含特征坐标系的近似基底表面的平面。

注：该定义改写自 SEMI P35。

3.1.3

特征坐标系 feature coordinate system

坐标系 coordinate system

将基准面定义为 x - y 平面的笛卡尔坐标系，其 x 轴由主光栅方向定义，原点由指定的参考位置定义。

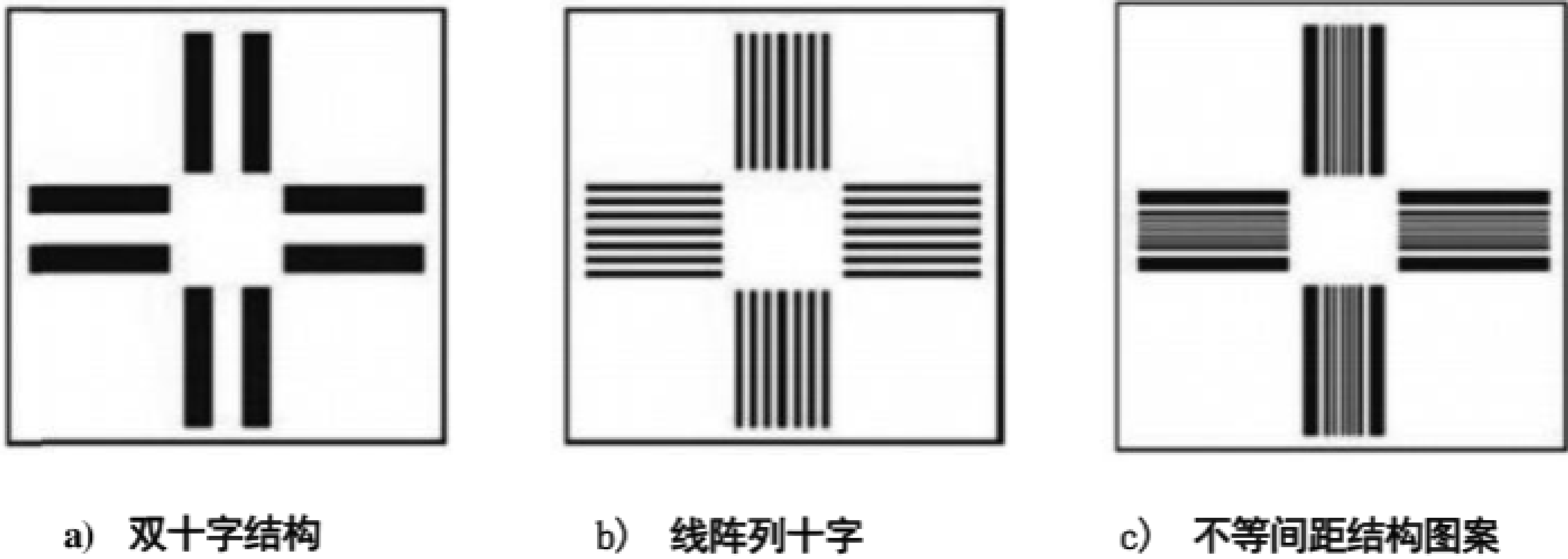
注1: 通常，选择特定特征的位置作为坐标系的原点，例如一维光栅(1D 光栅)中的第一个特征，或者二维光栅(2D 光栅)中左下角的特征。
注2: 也能够通过分析所有关注的特征位置来定义原点，例如以一维光栅(1D 光栅)在 x 方向上所有位置的平均值作为原点。对于二维光栅(2D 光栅)，原点能通过对二维光栅(2D 光栅)的所有特征全部 x 和 y 位置的最小二乘回归拟合来定义，因而允许原点平移以及整个二维光栅(2D 光栅)旋转(即多点对准)。在此情况下，特征坐标系的原点不再对应于某一特定特征。
注3: 原点也能选择为基准面内指定的对准特征或辅助特征的位置。
注4: 对于角度光栅，特征坐标系可为极坐标系 r, ϕ 或柱坐标系 r, ϕ, z 定义。

3.1.4

特征图案 feature pattern

特征的集合，由特征的数量、类型和位置规定。

示例：不同类型特征图案的示例见图2。



注：不同种类的特征通过不同的排列方式形成特征图案。这些特征图案可能相对简单，如两个正交的线特征组成的单十字结构；也可能复杂，如双十字结构或线阵列十字；或者更复杂的间隔不规则的线特征。

图 2 特征图案示例

3.1.5

特征位置 feature position

x_i, y_i, z_i

相对于指定坐标系， N 个特征中的第 i 个特征的指定点投影到基准面上的位置坐标。

注1: 对于一维光栅(1D 光栅)，假设光栅方向即单位长度上的光栅特征数量最大的方向为 x 方向，则主要关注特征的 x 位置。而对于二维光栅(2D 光栅)，关注其 x 和 y 位置。对于这两类光栅，假设基准面已经与测量仪器

的坐标轴对准的情况下，特征的z 位置通常不重要。

注2:根据选择的特征位置评价标准(见注3)，被测的特征位置取决于所用测量仪器与特征特性的相互作用，如其形状、尺寸和材料特性。

注3:特征位置的测定通常基于对特征显微图像的分析。能用不同的方式分析显微镜图像信号以测定特征位置。多数情况下关注特征的中心位置，该位置能通过计算质心或测定特征的左右两边缘的平均值等方法测定。

注4:如果仅关注特征的某一部分，例如线特征的边缘位置，则相应边缘位置的测定宜仅基于特征中所关注的部分。

注5:上述特征位置的定义也能应用于特征图案。

注6:如果分析角度光栅，用极坐标 r, ϕ 或柱坐标 r, ϕ, z 有利于表示特征位置。

3.1.6

特征间的距离 distance between features

d

在关注的方向上测定的相同或相近特征的特征位置之差。

注1: x 方向上两个连续特征 i 和 $i-1$ 之间的距离 d 为：

$$d = |x_i - x_{i-1}|$$

注2: x, y 基准面中两个连续特征之间的距离 d 通常为：

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

注3:在 x_i, y_i, z_i 和 $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$ 位置的两个连续特征之间的距离 d 一般情况为

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$$

注4:通常关注特征中心位置之间的距离。然而，某些情况下也关注特征边缘位置之间的距离。

3.2 光栅相关术语

3.2.1

光栅 grating

具有周期性间隔的相同特征的集合。

注1:在衍射光学词汇(见ISO 15902:2019, 3.3.1.2)中，光栅定义为“光学用途的周期性空间结构”。在本文件中，光栅不限于光学用途。

注2:通常光栅相邻相同特征之间的距离与其尺寸的比率接近1。但本定义并不局限于此类情况，还包括所谓的稀疏光栅，因而原则上也包括线纹尺。

注3:虽然本文件主要针对周期性光栅，但是光栅质量参数也适用于非周期光栅，如啁啾光栅(见ISO 15902:2019, 3.3.5.2)，但对于特征位置数据的空间滤波方法，可能会存在限制。

注4:有时一个光栅能够分成几个具有不同特征的子光栅。

3.2.2

间距 pitch

p

光栅相邻的特征间的距离。

注1:通常，特征中心位置用于测定间距。在某些情况下，一对特征的相同边缘之间的距离也用于测定间距值。

注2:该定义与 SEMIP35 中规定的间距定义一致。

3.2.3

标称间距 nominal pitch

p_{nom}

光栅规格表给出的预期间距值。

3.2.4

光栅特征数量 number of grating features

N ;

关注方向上光栅的所有相同特征的总和。

注：对于二维光栅(2D光栅)和三维光栅(3D光栅)，光栅特征数量在不同方向上可能不同。2D和3D光栅中的特征总数是沿着2个或3个不同方向的光栅特征数量的乘积(例如，在1D特征的情况下为点)。

3.2.5

平均间距 mean pitch

Pm

对光栅的所有相同特征测定的平均间距值。

注1:平均间距不一定是算术平均间距，也可能是其他统计方法计算的特征间距。

注2:如果光栅的所有特征位置都是已知的，则光栅的平均间距能通过将所有测量的特征位置 $x_{i,m}$ 与标称特征位置 $x_{0,m}$ 的最小二乘线性回归拟合来测定。如果测量的特征位置的不确定度相等，则能应用标准线性回归拟合。如果测量的特征位置 $x_{i,m}$ 的不确定度 u 不同，则采用加权线性回归拟合，使用方差的倒数作为权重 $[w_i=1/(u_i^2)]$ 。考虑到光栅所有特征的位置信息，回归线(给出斜率 m 和截距 b 的值)的最终斜率 m 能用于计算平均间距值 $p_m=m \cdot P_{m0,m}$ 。

注3:光栅的平均间距通常也称为光栅的周期长度或光栅常数 Λ 。

注4:对于理想光栅，平均间距、局部间距和所有相邻特征的间距值是相同的。对于真实光栅，这些值将是不同的，这取决于光栅的质量和评价局部间距值所取的不同长度范围。测量方法在非理想光栅上测定不同间距值的能力是不同的，因此测量方法可分为不同的组，见3.5。

注5:如果已知光栅的边界长度 L_1 (3.2.8)和光栅特征数量 N_r (3.2.4)，则平均间距的近似值可由 $p_m=L_1/(N_r-1)$

确定， $N_1 \geq 2$ 。如果计算所有相邻特征上所有间距值的算术平均值，则间距值相同。在求和 $\sum_{i=1}^{N-1} (x_i - x_{i-1})^2/(N-1)$ 中，为了计算光栅所有间距值的算术平均值，除了第一个和最后一个特征外，其他特征位置值 x_i 都被抵消。在这两种情况下，得到的平均间距值仅取决于光栅中第一个和最后一个特征的位置，因此线性回归拟合测定的平均间距具有更高的准确性。

3.2.6

局部间距 local pitch

phm(x,l)

光栅上以限定的特征位置 x 。为中心，在限定长度范围 l 上测定的平均间距值。

示例：对标称长度为1mm，标称间距为100nm的一维光栅(1D光栅)，如果以 $x_e=400\mu m$ 为中心位置在 $20\mu m$ 的长度范围 L ，内对局部间距 p_u 进行评价，得到的局部间距表示为 $p(400\mu m, 20\mu m)$ ，或以光栅特征数量表示为 $p_u(4001, 201)$ 。

注：局部间距也能在以索引为 N 的一个指定特征为中心，数量为 N 的特征上定义。在这种情况下，局部间距的符号记为 $p_{um}(N,N)$ 。

3.2.7

光栅的标称长度 nominal length of grating

Lnom

光栅规格表中给出的光栅预期长度。

注：光栅的长度沿光栅的方向定义，即该方向上单位长度的光栅特征数量最大。

3.2.8

光栅的边界长度 boundary length of grating

L_b

光栅第一个和最后一个特征之间的距离。

注：默认为中心到中心的距离。

3.2.9

光栅的特征长度 characteristic length of grating

L_c

基于平均间距和光栅特征数量计算的光栅长度： $L_c = p_m \cdot (N_r - 1)$ 。

注：对于理想光栅，标称长度、边界长度和特征长度值是一样的。然而，对于真正的光栅，三者是不同的。

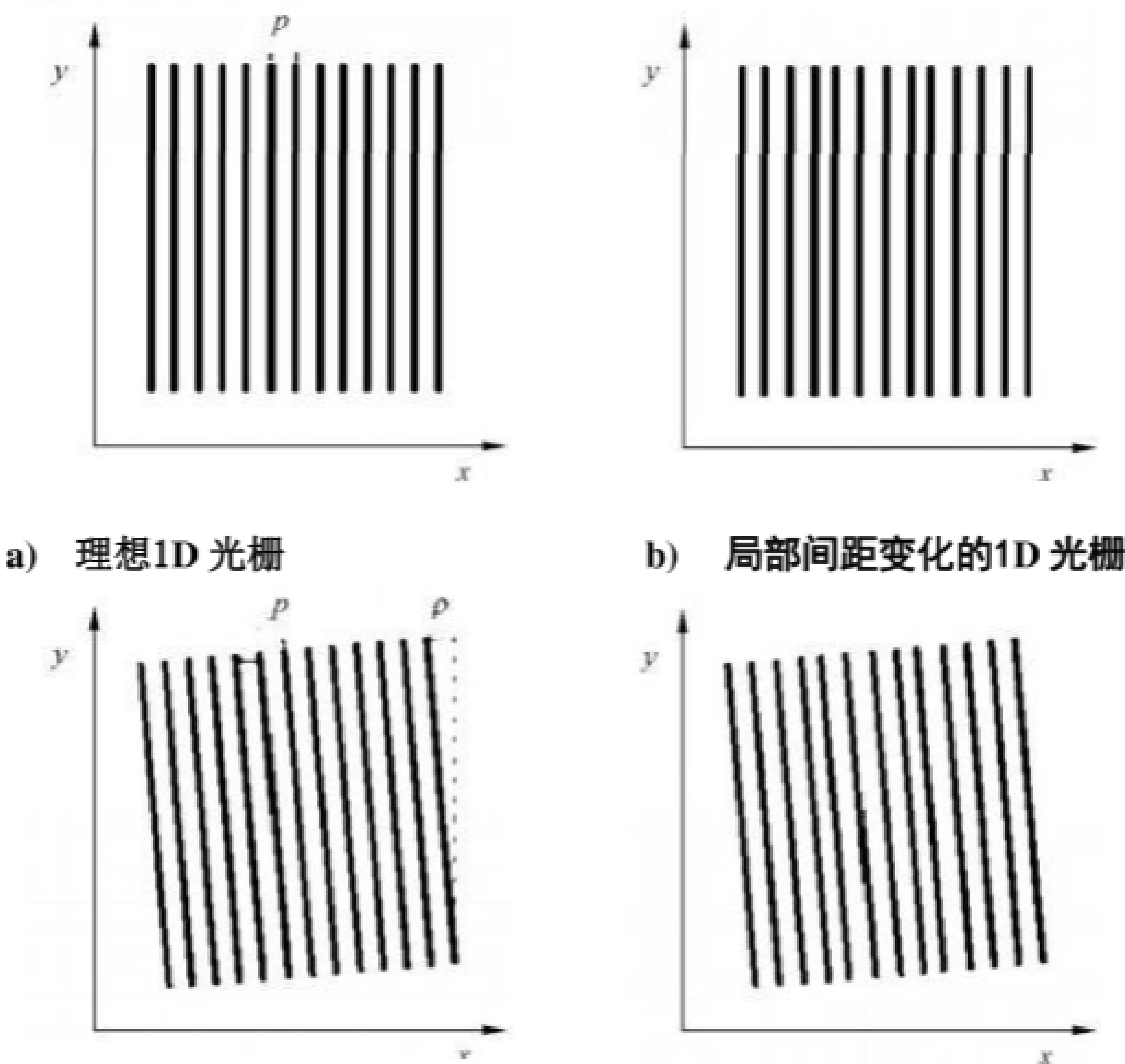
3.3 光栅的种类

3.3.1

一维光栅 1D grating

特征在基准面内仅沿一个方向重复的光栅。

示例：一维(1D)线光栅的示例见图3。



c) 与仪器 x 和 y 轴的角度偏差为 p 的理想1D 光栅 d) 局部间距变化且与仪器扫描轴不一致的1D 光栅
标引符号说明：

p ——光栅的方向上定义间距。

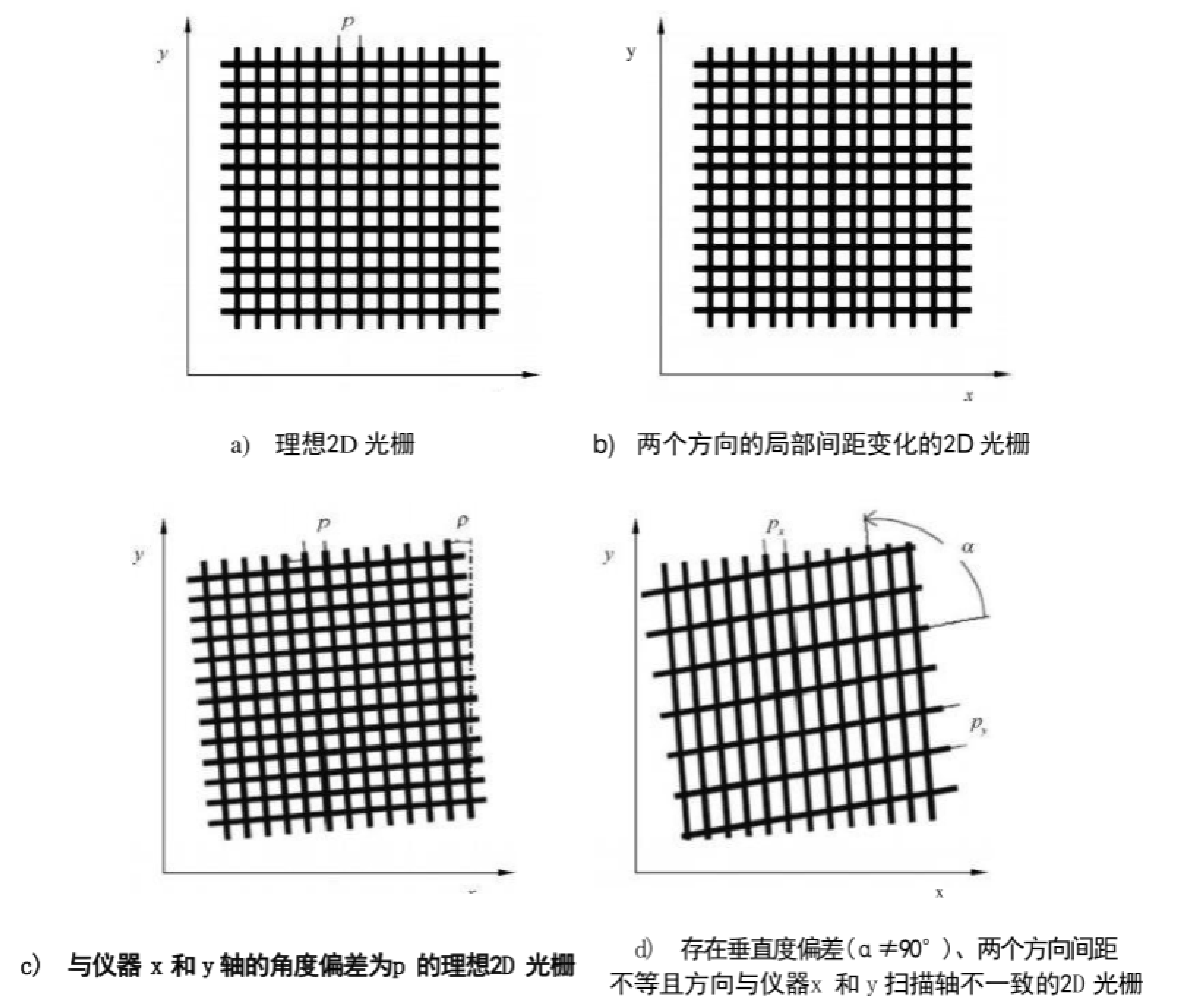
图 3 一维(1D) 线光栅示例

3.3.2

二维光栅 2D grating

特征在基准面内沿两个不平行方向重复的光栅。

示例：二维光栅(2D 光栅)的示例见图4。



标引符号说明:

p_x ——光栅的 x 方向上定义间距;

p_y ——光栅的 y 方向上定义间距。

注 1:通常两个方向名义上相互垂直,例如沿 x 和 y 方向。

注2:二维光栅(2D光栅)的垂直度偏差见3.4.13和参考文献[5]中的描述。

图 4 二维光栅(2D 光栅)示例

3.3.3

三维光栅 3D grating

特征在包含基准面的三个非平行方向重复的光栅。

注1:通常三个方向名义上相互垂直,例如沿 x 、 y 和 z 方向。

注2:三维光栅(3D 光栅)光栅的一个示例是3D光子晶体。

3.3.4

角度光栅 angular grating

在基准面内沿圆周方向延伸的光栅。

注1:多数情况下角光栅在 $2\pi\text{ rad}(360^\circ)$ 的整个角度范围内延伸,即角度光栅的第一个和最后一个特征是相邻特征。

注2:角度光栅也称为径向光栅。

3.3.5

复杂光栅 complex grating

在关注的方向上具有一个以上标称间距值的光栅。

3.3.6

双间距光栅 double pitch grating

在关注的方向上具有两个不同标称间距值的复杂光栅。

3.3.7

啁啾光栅 chirped grating

在关注的方向上间距值单调变化的复杂光栅。

注：单调变化意味着间距值沿着关注的方向一直增大或减小。

3.4 光栅质量参数术语

3.4.1

边界长度偏差 deviation in boundary length

δL

测量的边界长度与标称长度的差，计算如下：

$$\delta L = L_{b.m} - L_{nom}$$

式中：

$L_{b.m}$ ——测量的边界长度；

L_{nom} ——标称长度。

3.4.2

边界长度的相对偏差 relative deviation in boundary length

$\delta L_{b.rel}$

边界长度与标称长度的相对偏差，计算如下：

$$\delta L_{b.rd} = \delta L_b / L_{nom}$$

3.4.3

特征长度偏差 deviation in characteristic length

δL

测量的特征长度与标称长度之差，计算如下：

$$\delta L_o = L_{c.m} - L_{nom}$$

式中：

$L_{o.m}$ ——测量的特征长度；

L_{nom} ——标称长度。

注：特征长度偏差 δL 是光栅的一个质量参数。然而，在某些应用中，光栅的特征长度 L 只是次要参数，在此情况下， δL 并不重要。

3.4.4

特征长度的相对偏差 relative deviation in characteristic length

δL_{re}

特征长度与标称长度的相对偏差，计算如下：

$$\delta L_{e,ra} = \delta L_c / L_{nom}$$

3.4.5

特征位置偏差 deviation in feature position

δx ；

测量的特征位置与基于标称间距计算的标称特征位置之差，计算如下：

$$\hat{O}x_i = x_{i.m} - p_{nom} \cdot (i-1)$$

式中：

$x_{i,m}$ ——光栅中沿着x 方向第*i* 个测量的特征位置；

p_{som} ——光栅的标称间距。

注1:该定义假设光栅具有一个标称间距值。但是，只要规定了所有标称特征位置，它也能扩展到复杂光栅，例如双间距光栅、啁啾光栅。

注2:如果光栅特征的方向沿其他方向，则能相应地修改定义，即 δy_i 、 δe_i 。

注3: 对于360° 角度光栅，角度特征位置所有偏差 $\delta \alpha_i$ 的总和始终为零，因为圆周角 $2\pi \text{ rad}(360^\circ)$ 是一个自然、不变且无误差的角度标准。这是误差分离技术应用的基础，使得角度光栅特征位置偏差的测量不确定度达到 $n \text{ rad}$ 。

注4:特征位置的相对偏差 $\delta x_{i,nl}$ 为特征位置偏差 δx_i 与标称特征位置 $p_{m(i-1)}$ 的比值。

3.4.6

特征位置的线性度偏差 feature position deviation from linearity

$\delta x_{i,nl}$

测量的特征位置与基于测量的平均间距值计算的特征位置之差，计算如下：

$$\delta x_{i,m} = x_{j_1,m} - [p_m \cdot (i-1) + b]$$

式中：

$x_{i,m}$ ——光栅中第*i* 个被测特征的特征位置；

p_m ——测量的光栅平均间距；

b ——线性最小二乘回归线的截距，按3.2.5 的注2确定。

注1: 作为平均间距定义的结果，所有特征位置偏离光栅线性值的总和为零。

注2:特征位置的相对线性度偏差 $\delta x_{i,nl}$ 为特征位置的线性度偏差相对于标称特征位置 $p_{m(i-1)}$ 的比值。

3.4.7

线性度峰谷偏差 peak-to-valley deviation from linearity

$\delta L_{nt,p-v}$

特征位置偏差的最大值和最小值之差或与全部光栅特征线性度的偏差范围，计算如下：

$$\delta L_{m,p-v} = \delta x_{i,nl,max} - \delta x_{i,nl,min}$$

式中：

$\delta x_{i,nl,max}$ ——所有特征位置偏离线性的最大值；

$\delta x_{i,nl,min}$ ——所有特征位置偏离线性的最小值。

3.4.8

线性度相对峰谷偏差 relative peak-to-valley deviation from linearity

$\delta L_{n,p-v,rel}$

相对于光栅标称长度的线性度峰谷偏差，计算如下：

$$\delta L_{ni,p-v,rel} = \delta L_{nl,p-v} / L_{nom}$$

式中：

$\delta L_{nt,p-v}$ ——线性度峰谷偏差；

L_{nom} ——光栅的标称长度。

3.4.9

线性度均方根偏差 rms deviation from linearity

$\delta L_{nt,rms}$

对光栅的全部 N_i 个特征，特征位置与线性度之差的均方根，计算如下：

式中：
$$\delta L_{nt,rms} = \left[\sum_{i=1}^{N_i} (\delta x_{i,nl})^2 / N_i \right]^{1/2}$$

$\delta x_{i,nl}$ ——光栅中第*i* 个特征位置与特征线性度的位置偏差；

N_1 —— 光栅特征数量。

3.4.10

线性度相对均方根偏差 relative rms deviation from linearity

$\delta L_{nl,rms,rel}$

相对于光栅标称长度的线性度均方根偏差，计算如下：

$$\delta L_{nl,ms} = \delta L_{nl,ms} / L_{nom}$$

式中：

$\delta L_{nl,ms}$ —— 光栅所有特征的线性度均方根偏差；

L_{nom} —— 光栅的标称长度。

3.4.11

垂直度偏差 deviation from orthogonality

δa_{ortho}

二维光栅或三维光栅与垂直方向的标称值 $\pi/2$ rad(90°) 的偏差。

注：垂直度也经常被用作正交性的同义词。

3.4.12

滤波后的光栅偏差 filtered grating deviation terms

$\delta X_{Y^2}(\lambda_e, P)$

用滤波后的特征位置偏差值测定3.4中定义的光栅偏差：

$\delta X_{Y^2}(\lambda_e, \beta, P)$

其中：

X—— 通用符号，对特定情况用3.4中定义参数之一代替；

Y—— 通用下标符号，对特定情况用3.4中定义的指数之一代替；

F —— 通用上标符号，用合适的术语来代替，明确地描述了用于分析光栅特征位置偏差的滤波算法的特性；

λ_e —— 所用滤波器的临界滤波长度的参数；

β —— 滤波器特性的附加(可选)参数；

P—— 所要分析的滤波数据的频谱部分的参数，用LP 代表低通，HP 代表高通，或者 BP 代表带通。

示例 1: 如果在使用临界波长 λ_e 的任意滤波算法F 后分析光栅的特征位置偏差 δx_i ，并且将高通特性用于原始数据，则滤波后的特征位置偏差由 $\delta x_i F(\lambda_e, HP)$ 表示。

示例 2: 如果在线性轮廓的情况下，光栅与线性度的相对均方根偏差 $\delta L_{nl,ms}$ 是有意义的，将具有高斯低通滤波器特性且假设截止波长为80 nm 的滤波器应用于原始数据，滤波后的线性度相对均方根偏差应表示为 $\delta L_{nl,ms} PLG(80 \text{ nm}, LP)$ (FPLG代表线性轮廓高斯滤波器)。

注：第5章更详细地讨论了适用于光栅偏差术语的各类现有滤波器算法。

3.5 表征光栅的测量方法类别

3.5.1

全局方法 global methods; GM

将光栅作为整体探测的测量方法。

注1：属于GM类别的光栅表征方法示例在第5章和附录 A 中A.2 给出。

注2：全局方法有时也称为整体方法。

3.5.2

局部方法 local methods; LM

仅在局部小区域探测光栅，不具备充分的位移计量能力将依次测量的光栅信息相位关联地拼接起

来的测量方法。

注：属于LM类别的光栅表征方法的示例在第5章和A.2中给出。

3.5.3

混合方法 hybrid methods;HM

在局部小区域探测光栅，并且通过适当的位移计量，将依次测量的整个光栅的信息拼接起来的测量方法。

注：属于 HM类别的光栅表征方法的示例在第5章和 A.2 中给出。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

- AFM: 原子力显微术(atomic force microscopy)
- CCD: 电荷耦合器件(charge-coupled device)
- DOE: 衍射光学元件(diffractive optical element)
- DUV: 深紫外(deep ultraviolet)
- EUV: 极紫外(extreme ultraviolet)
- GM: 全局方法(global method)
- GPS: 产品几何规范(geometrical product specifications)
- HM: 混合方法(hybrid method)
- HR-OM: 高分辨光学显微术(high resolution optical microscopy)
- IR: 红外光(infrared)
- LER: 线边缘粗糙度(line edge roughness)
- LM: 局部方法(local method)
- LWR: 线宽粗糙度(line width roughness)
- OD: 光学衍射(optical diffraction)
- OM: 光学显微术(optical microscopy)
- SEM: 扫描电子显微术(scanning electron microscopy)
- SPM: 扫描探针显微术(scanning probe microscopy)
- TEM: 透射电子显微术(transmission electron microscopy)
- Vis: 可见光谱(visible spectrum)

5 光栅校准和质量表征方法

5.1 概述

光栅在纳米尺度结构的制造和表征中发挥着重要作用。GB/T30544.1—2014, 2.1 中将术语“纳米尺度”定义为“处于1 nm 至100 nm 之间的尺寸范围”。本章给出了用于光栅质量的表征和校准的不同测量方法分类；提供了选择最佳测量方法类别的指南，以符合根据特定光栅的全局和局部质量参数来表征的要求。

5.2 全局方法

全局方法是探测整个光栅的测量方法。这类方法都基于利用具有已知波长的电磁辐射来探测整个光栅，主要在光学波段但不排除其他波段。分析反射光、衍射光或透射光的测量结果，以提取关于光栅尺寸参数的信息。下面是一些全局方法的简述。

在衍射测量术中，测试中的光栅由单色光照射，该单色光光斑尺寸超过光栅尺寸。然后分析衍射光的衍射角。通常，在利特罗结构中测量衍射光，负一级衍射光束的方向平行于入射光束的方向，并且使用多个波长 λ 。在大多数情况下，衍射光束的方向是通过转台来测量的，而光电探测器或CCD用于测量光束强度。衍射仪通常只测量衍射光束的衍射角，由此能以很小的不确定度测定光栅的平均间距。然而，它通常不提供关于光栅的局部间距变化的信息。在衍射测量结果中，要考虑激光的辐射带宽以及在空间和时间上的部分相干性。

在散射测量术中，除了衍射角外(如在衍射测量中)，有时也测量由光栅衍射的光辐射的强度和偏振，来提取关于光栅的几何特性以及光栅的光学材料特性信息[8]。散射计有不同类型，既仅有入射辐射波长变化而入射光束和检测器方向的夹角不变的散射计(光谱散射计)，又有以单色辐射入射且仅改变衍射角测量衍射强度的散射计(测角散射计)，或两者的结合[9]。散射测量不探测非镜面方向的衍射光，因此光栅间距的探测灵敏度大为降低，但提高了对特征尺寸的灵敏度。散射测量法在光谱的不同波段都有所应用，波长从IR到Vis到DUV和EUV，因此可分析间距值具有较大变化的不同光栅产生的宽光谱。

为了充分利用散射测量术测得的信息，测量结果通常由严格的光学衍射计算方法模拟衍射光谱得到。模拟的光谱由光栅形貌的一些几何形状模型计算，将测量的光谱与模拟的光谱进行比较。改变模型参数，可获得与测量光谱的密切相关性。除了光栅的平均间距之外，还可得出光栅上间距值的变化以及关于光栅特征的平均高度、宽度和侧壁角度的信息[10]。

光栅表征的全局测量方法的另一个例子是使用斐索干涉测量法，其中光栅以利特罗结构布置[u]。在这种结构中，干涉仪对由孔径内光栅间距变化引起的波前畸变敏感，因此光栅的局部间距变化可通过这种方法测定。

全局方法能够在整个光栅上实现快速测量。用相对简单的光学装置(衍射仪)测定平均间距，有可能获得非常小的不确定度。其他测定间距局部变化的光学结构(斐索干涉仪)用于间距局部变化发生在大于装置横向分辨率的长度范围的情况。在专用(散射计)装置中，为了从测得的光栅衍射信号分析中测定光栅参数集合(除特征间距、间距变化外，还有高度、宽度和侧壁角度)，需要应用复杂严格的光学建模方法。

5.3 局部方法

局部方法是探测光栅小区域的测量方法，但不提供足够的位移计量能力将来自连续测量的光栅信号拼接起来。要测定光栅在两个不同位置拍摄的顺序图像中测得的周期性光栅信号的相位差，应高精度地测定光栅样本相对于显微镜在两个图像之间的相对位移(相位关联)。

局部方法的实例是各类高分辨显微方法，在由显微镜所选的放大率限定的视场内对光栅的一部分进行成像。用于光栅表征的典型显微方法包括AFM、SEM、TEM和OM。

在视场内，局部方法能够测量光栅的局部间距以及可能的间距变化。为了测定光栅的平均间距，并使用局部方法估计整个光栅上局部间距的变化，应使用显微镜在光栅的不同位置进行重复测量。

局部方法能够提供关于单个特征质量的信息，例如特征平行度、线边缘粗糙度和缺陷以及视场内的局部间距。由于视野有限，局部方法测量平均间距的不确定度通常比全局方法大。此外，完整表征光栅的测量速度相对较慢，特别是SPM方法。

5.4 混合方法

混合方法是在小区域中探测光栅，并且通过使用适当的位移计量，以拼接方式在整个光栅上将依次测量的信息关联起来的测量方法。

与局部方法一样，混合方法的特征在于应用高分辨显微术对单个光栅特征进行测量，但是又与高精度定位系统相结合，能够确定依次定位和成像步骤之间的光栅位移，其精度允许不同视场中光栅幅度信

号的相位相干拼接。

混合方法结合了局部方法(表征个体特征质量的能力)和全局方法(以较小的不确定度测定整个光栅的间距平均值)二者的优点。混合方法也具有检测光栅周期性相位跳变的能力。然而混合方法除了需要高分辨率显微术,还需要高精度定位和位移计量系统。

在参考文献[12]中给出了基于扫描电镜和激光控制定位平台的混合系统的示例,该系统用于表征标称间距为100 nm 的一维光栅,并在 A.2 中进行了讨论。在参考文献[13]中,描述了通过混合校准方法校准标称间距值比为1:4的两个光栅的平均间距和线性度偏差,以及将它们用作光刻透镜组1:4放大倍率标准的应用。参考文献[14]中给出在标称间距为25 nm 的光栅标准器上进行双边比对的结果,所用的混合方法是计量型 SPM。还宜提到的是,线纹尺的校准也是基于混合方法的应用。

5.5 各种方法的对比

表1列出了用于光栅校准和光栅表征的不同测量方法的特性以及分类。表1与5.2~5.4 中的描述、参考文献和 A.2 中的信息共同提供了根据光栅检定的一组特定要求而选择一种或一组合适的表征方法的指南。

表 1 不同类别光栅表征方法的比较

方法类别	方法类型	平均间距 不确定度	局部栅距 变化测量 能力	单一特征 尺寸测量 能力	光栅的特 征尺寸测 量能力	测量速度	测量装置 复杂性与 测量 工作量	数据分析 复杂度
全局方法	衍射测量	极好	不满足	不满足	不满足	极好	低	中
全局方法	散射测量: ——测角型; ——光谱型	极好 满足	好 差	不满足 不满足	极好 极好	好 极好	高 中	极高 极高
全局方法	利特罗结构的 斐索干涉	满足	好	差		极好	高	中
局部方法	OM	差	好	好	好	满足	低	低
局部方法	SPM	差	极好	极好	极好	差	中	中
局部方法	SEM	差	极好	极好	好	满足	高	中
局部方法	TEM	不满足	极好	极好	极好	不满足	极高	高
混合方法	HR-OM, SEM, SPM, TEM	极好	极好	极好	极好	满足 差 不满足	极高	高

5.6 光栅特征的其他偏差

5.6.1 概述

在第3章中光栅偏差术语的定义中,假设光栅特征仅在光栅方向上偏离其标称位置。其他影响光栅质量和限制光栅测量不确定度的参数如下。在本文件中,仅仅提出这些影响因素,但不作详细讨论和分析。

5.6.2 轴外偏差

5.6.2.1 概述

垂直于光栅方向延伸的偏差。例如，若一维光栅(1D 光栅)的预定方向是 x 方向，则轴外偏差沿 y 方向。

5.6.2.2 非平行线特征

如果线特征在整个光栅上不平行，则特征位置偏差的测量结果将依赖于沿光栅线所选测量区域。如果在光栅上沿着栅线平行方向的偏差发生变化，局部栅距值的变化量将增大。

5.6.2.3 曲线特征

如果线特征在整个光栅上是弯曲的，则特征位置偏差的测量结果将依赖于沿光栅线所选测量区域。如果线特征与理想形状的偏差在整个光栅上发生变化，局部栅距值的变化量将增大。

5.6.3 平面外偏差

5.6.3.1 概述

垂直于光栅平面延伸的偏差。例如，若一维(1D) 或二维光栅(2D 光栅)的预期方向在 x - y 平面内，则平面外偏差沿 z 方向，垂直于 x - y 平面。

5.6.3.2 形貌特征

光栅上特征高度的变化可能对第3章中定义的光栅质量参数只有很小的影响。对于光栅表征所用的不同测量方法，应单独分析高度变化的影响。

5.6.3.3 基底的形貌

从线纹计量已经知道，由于安装的基底在重力作用下的弯曲等因素，形貌变化 $x(x,y)$ 影响特征位置测量偏差(见参考文献[15])。在分析直线和角度编码器的测量结果时，要考虑该基底弯曲效应。

5.6.4 其他特征偏差

5.6.4.1 概述

在本条中，主要讨论特征的尺寸、形状和材料变化对光栅质量和光栅参数测量不确定度的其他影响。

5.6.4.2 线边缘粗糙度和线宽粗糙度

线边缘粗糙度(LER) 描述了线特征轮廓与理想直线的偏差。线宽粗糙度(LWR) 描述了线特征的局部宽度与理想常数值值的偏差。随着线特征宽度减小，LER 和 LWR 的相对重要性增大，并成为光刻进一步发展的主要问题[16]。这两种效应导致特征位置偏差的测量结果依赖于沿线所选的测量区域，此外还导致局部间距值的变化量增大。

5.6.4.3 材料属性的变化

改变光栅特征或基底的材料特性将影响特征位置和平均间距的测量结果。然而，该影响的严重程度取决于表征光栅所用的测量技术，因此不能以通用方式估算。

5.7 光栅质量表征的滤波算法

为了表征光栅的质量，通常需要对特征位置偏差的原始测量数据应用合适的滤波算法。例如，在某个应用中可能主要关注光栅特征位置偏差的高频变化(空间波长较小)，而在另一种应用中，可能关注具有较大空间波长的位置偏差，而较高频率的偏差能被具有低通特性的滤波器有效地抑制。

尚不存在用于评价光栅特征位置偏差的标准滤波算法。特征位置偏差测量数据的评价与表面结构轮廓数据的分析具有一些相似之处。表面结构测量，已有一系列关于区域(3D)和轮廓(2D)表面结构数据滤波的文件，并将进一步发展。GB/Z26958.1—2011[7] 提供了关于滤波和不同滤波算法分类的系列文件指南。参考文献[18]对 ISO 标准的 GPS 框架内给出的滤波器的历史发展和最新趋势的综述。如果将表面结构领域的轮廓滤波器算法应用于特征位置偏差的分析，则它们的名称宜参照 GB/Z 26958.1—2011。

尚未充分研究何种表面结构计量学的标准轮廓滤波器[线性滤波器(高斯、样条、样条小波)、形态学滤波器和鲁棒滤波]能够用于分析光栅特征位置的偏差。除了表面结构计量外，为其他目的开发的轮廓滤波器算法原则上也能用于分析光栅的特征位置。

在参考文献[4]中给出了一个简单的用于消除位置偏差数据轮廓波纹的移动平均相位校正滤波器的示例。在参考文献[19]中描述了一种多点线性误差补偿方案，该方案可减少编码器误差在位置控制应用中的影响。在 A.2 中，给出了一些应用样条滤波器进行评价来测量光栅特征位置偏差的示例。

为了评价光栅特征位置的数据，所应用的滤波算法宜提供以下能力：对端部效应不敏感(在需要分析整体光栅的情况下)，根据特征波长或波段确定数据的频谱范围(HP、BP 或 LP 滤波器)，相位校正滤波、位置数据中的相位跳变的检测灵敏度、对异常值的鲁棒性、对纳米级特征位置偏差的适用性以及可应用于复杂光栅的能力。

注：如果光栅是通过基于重新定位基底并在基底上依次拼接刻写区域的顺序方法制造的，则有可能发生相位跳变。相位跳变难以探测，但是对于光栅的应用有可能是关键的。

6 光栅表征结果的报告

6.1 通则

光栅表征结果的报告应符合 ISO/IEC 17025 的规定。本文件还规定了对校准结果进行充分记录的通用要求。

除了关于校准实验室的名称和地址及客户、样品接收日期、校准日期和报告发布日期的必要信息外，校准报告还应提供关于样品细节、校准程序(仪器细节、操作条件、所用软件、验证)和测量结果及其不确定度的充分信息。下文以光栅的表征及其质量参数的测定为例说明以上要求。

6.2 光栅规格

校准报告宜包含待表征光栅的必要信息：

- 光栅制造商(如果有)；
- 光栅类型(1D、2D、3D、角度、复杂)；
- 光栅的标称间距 p_{nom}
- 光栅的标称长度 L_{nom} ；
- 光栅特征的类型(直线、正方形、圆点等)、材料、标称宽度和高度；
- 光栅的基底材料；
- 用于光栅定向的任何对准特征。

6.3 校准程序

校准报告宜包含用于光栅表征的测量仪器和程序的必要信息：

- 测量方法类别(GM、LM、HM)；
- 校准所用测量仪器的描述；
- 测量的溯源性；
- 校准程序(描述、重复测量次数等)；
- 操作条件。

6.4 光栅质量参数

校准报告宜包含光栅质量参数测量结果及其不确定度的必要信息。应事先在客户和校准实验室之间澄清3.4中定义的对客户应用光栅具有重要意义的应测光栅质量参数。下面列出了光栅的一些质量参数：

- 平均间距测量值 p_m (可选参数：局部间距测量值 p_{lo})；
- 边界长度偏差 δL
- 特征长度偏差 δL_c ；
- 线性度峰谷偏差 $\delta L_{nl,p-v}$ ；
- 线性度均方根偏差 $\delta L_{a,m}$ ；
- 质量参数的相对偏差，即偏差相对于 L_{mm} 的比值；
- 滤波后的质量参数。

附录 A
(资料性)
背景信息和示例

A.1 纳米级长度可溯源性的背景信息

纳米技术涵盖了在纳米尺度广泛的各种应用。纳米尺度本身在 GB/T30544.1—2014, 2.1 中定义为“处于1nm 至100 nm 之间的尺寸范围”，即它指的是长度的国际单位。

自1983年以来，长度的国际单位制单位——米(m) 被定义为光在1/299792458 s 的时间间隔内在真空中传播的路径长度。因此，光速正好是299792458 m/s，长度单位取决于时间单位，即秒(s)。

根据这个定义，长度单位的复现有不同的可能。有两种方法用于复现：

- a) 测量光或其他类型电磁辐射的传播时间，这种方法主要用于长距离测量，例如大地测量、天文学或卫星导航系统；
- b) 使用具有已知激光辐射的干涉测量技术(例如，HeNe 激光器标称波长为633 nm)，实现了基于分析干涉仪信号的强度调制的长度测量，该强度调制又取决于干涉仪在选定环境中的光波长。

第二种方法提供了一种非常直接的溯源至长度单位定义的方法，并且相应的不确定度较小，因此广泛用于不同的测量和生产设备中。正如单位制复现中所述，宜使用不同的激光辐射来复现米(m)。

然而，如果要求大气条件下长度测量的不确定度最小，激光波长随空气参数(如温度、压力、湿度和残余气体成分)的变化可能是不利因素。此外，还宜考虑激光干涉仪设备的成本。因此，通常以人造或天然光栅为基础的可替代的一些长度计量方法也在使用，如果这些光栅经过校准，则可用作长度标准或长度的实物量具。

在 ISO 15902:2019中，光栅被定义为“用于光学用途的周期性空间结构”，并且作为不同类型的衍射光学元件(DOE) 的基本组件，以光的衍射作为其工作原理。通过定义振幅 DOE、相位 DOE、透射 DOE、反射 DOE 和主动 DOE, 实现了不同的 DOE。有源衍射光学元件的技术实现的一个示例是声光调制器，声驻波在器件的材料内产生特征，该特征以限定的方式使入射光发生衍射。然而，在本文件中，光栅并不仅限于光学用途。

光栅在纳米尺度结构的制造和表征过程中发挥着重要作用。例如，在借助光刻技术的半导体集成电路的批量制造中，在晶圆扫描生产工具的不同光刻生产步骤中，光栅结构被用作光掩模与硅晶圆的对准。两次图形曝光技术目前对光栅和特征位置表征方法提出新的要求。如今晶片上的最小结构尺寸已经小于30 nm, 在集成电路的制造过程中要达到几纳米(nm) 的套刻公差。

纳米技术中光栅的另一个应用领域是用作高分辨显微技术的校准标准器，这是纳米尺度结构表征的必要工具。间距小于100 nm 的高质量光栅校准标准器的制造和表征是当前的挑战。已经发布或正在制定的几个规范性文件描述了使用基于光栅的物理标准来校准不同类型的高分辨显微镜的图像放大率，如 ISO 29301:2017中的透射电镜[21]、ISO 16700:2016 中的扫描电镜[22]、ISO 11952:2019 中的扫描探针显微镜[23]或 ISO 25178-70 中的光学显微镜[24]。

然而，在ISO 29301:2017、ISO 16700:2016、ISO 11952:2019 和 ISO 25178-70 中，光栅标准器被认为是理想的，因为没有考虑光栅结构与其标称值之间可能的偏差。在第5章中，对用于校准光栅和测定特征位置偏差的不同类型的仪器进行了分类和描述。此外，还为选择测量方法类别以符合光栅特定应用的光栅质量要求提供了指导。

除光栅外，天然晶格也可用作纳米技术中的长度标准，前提是测量方法可分辨晶格结构，如透射电子显微镜或X 射线衍射。由于良好的可用性和高纯度，硅单晶材料在纳米测量中起着重要的作用。硅

原子晶格平面之间的距离在亚纳米范围($d_{\text{SiSi}} \approx 0.192 \text{ nm}$)[25],由此可见,硅原子晶格是纳米尺度长度计量的一个有意义的固有基准。例如,它经常被用作高分辨透射电镜图像的放大倍率标准。

表面和体自然晶格是定义明确的结构,已经在晶体学、固态物理学和表面科学中研究了数十年,关于2D和3D布拉维格子的概述见附录B。在本文件的上下文中,与人造的光栅相比,晶格可被看作自然光栅。此外,特征位置与其标称值没有任何偏差的光栅也可使用晶格的术语来描述。

在增量式长度或角度编码器测量系统中,线性或角度光栅被用作相对平移或旋转运动的标准。编码器系统的读出取决于光学设计的细节,但是一般情况下,长度信息从读取头的信号中得出,读取头的信号基于光栅结构的周期长度。这些类型的测量系统有时也称为“光栅干涉仪”。所谓的X射线干涉仪是利用自然光栅的“光栅干涉仪”的一个示例,这是由单晶材料如硅制成的特殊类型的干涉仪。该干涉仪分析X射线在包含两个固定薄片和一个可移动薄片的系统中衍射时X射线强度信号的变化[28]。

将用于放大倍率标准和长度编码器系统的光栅结构与基于刻度的经典长度标准(即线纹尺)进行比较是有益的。线纹尺传统上被用作长度标准,在今天的计量基础设施中仍然发挥着重要作用。现在已经有过时的线纹尺标准文件,明确处理刻度线位置的偏差[2]。

在法制计量学中,有OIMLR98的建议,它涉及高精度线长度测量的规范和分类。对于精度等级0级~3级,线纹尺的任意两个标记之间的距离的最大允许制造误差规定在 $\pm(0.5 \mu\text{m} + 5 \times 10^{-2}L)$ 和 $\pm(5 \mu\text{m} + 5 \times 10^{-6}L)$ 之间,其中L是这两个刻度之间的标称长度值,单位为米(m)。计量级的线纹尺是高稳定性的量具,其制造误差没有规定,但在证书中进行了测量和指示。

在国际计量委员会长度咨询委员会(CIPM/CCL)的支持下,近年来对一维光栅(1D光栅)和二维光栅(2D光栅)[5]以及280 mm长的高精度刻度线纹尺[30]进行了国际比对。纳米尺寸计量领域一系列关键国际比对提供了关于各国家计量院(NMI)现有测量能力的宝贵信息,以支持新兴的纳米技术领域。

A.2 纳米技术中光栅的应用和表征实例

光栅在纳米技术领域有多种应用。在其中一些应用中,光栅的总长度接近标称总长度值,特别是当光栅用作长度编码器系统中的长度实物标准或高分辨显微镜的放大倍率标准器时。而在其他应用领域,总长度是次要的,但是在关注的所有长度刻度(滤波)上测定的非线性偏差宜尽可能小。

示例1:基于光栅的长度编码器系统($L_{\text{mm}}=280 \text{ mm}$)。

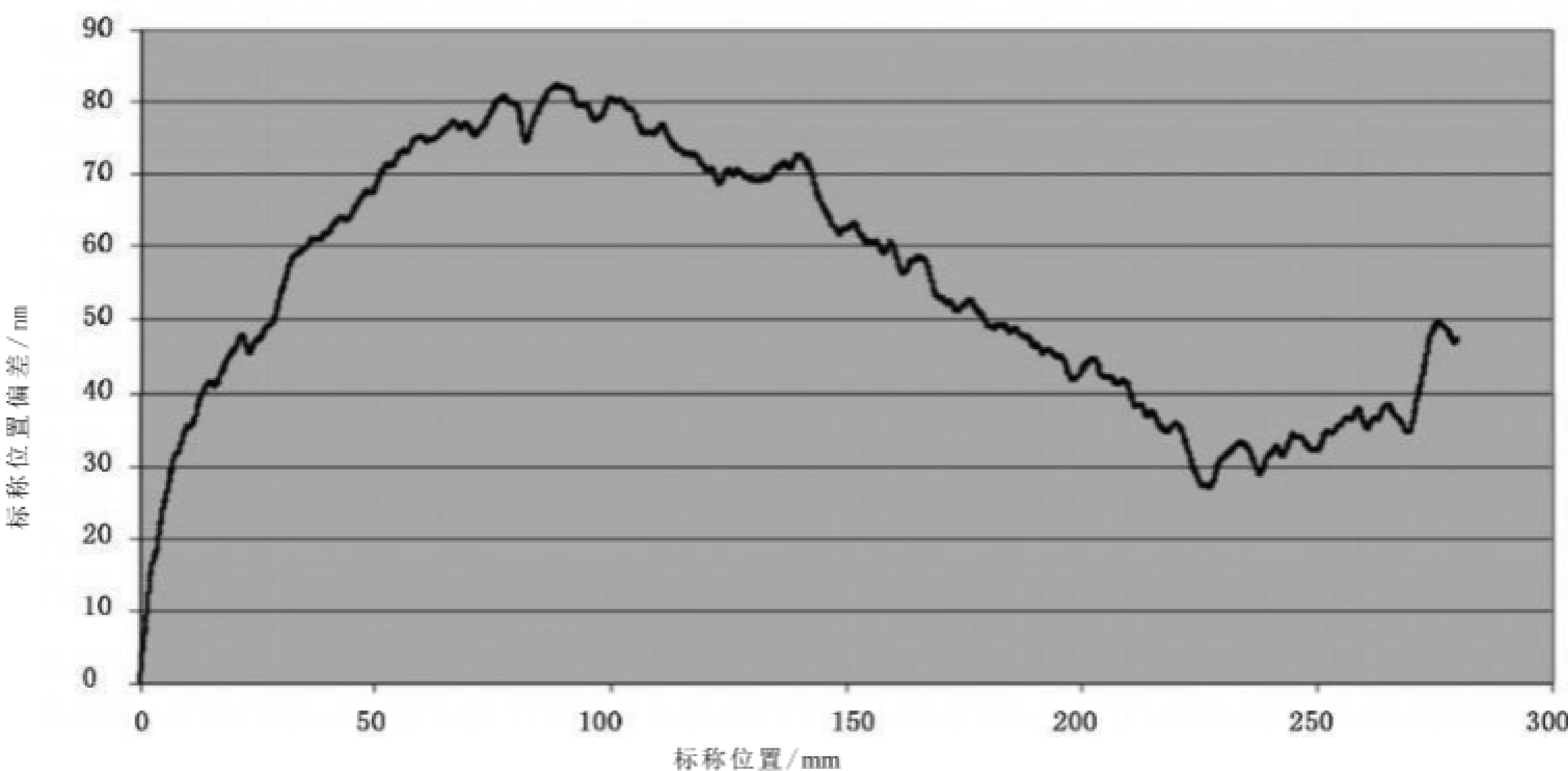


图 A.1 280mm 长编码器系统的校准结果(在国际比对中用作传递标准)[31]

示例1为用作长度实物标准器的光栅。图 A.1 显示了在长度编码器系统上使用真空长度比较器对

三部分进行测量比较的一个测量结果，该长度编码器系统被用作传递标准[3]。传递标准由一个1D(相位)光栅构成，其标称间距为512 nm, 特征线宽为256 nm, 在零膨胀玻璃基底上总长度280 mm。干涉式读取头在光栅上相对移动，并提供128 nm 的位移测量光学分辨率，在电子插值4096 倍后，提供约30 pm 的位移测量分辨率。这种类型的高分辨率长度编码器系统广泛用于不同的高精度制造过程中轴位置的反馈，包括纳米尺度制造应用。图 A.2 为对图1的偏差滤波后的光栅偏差。

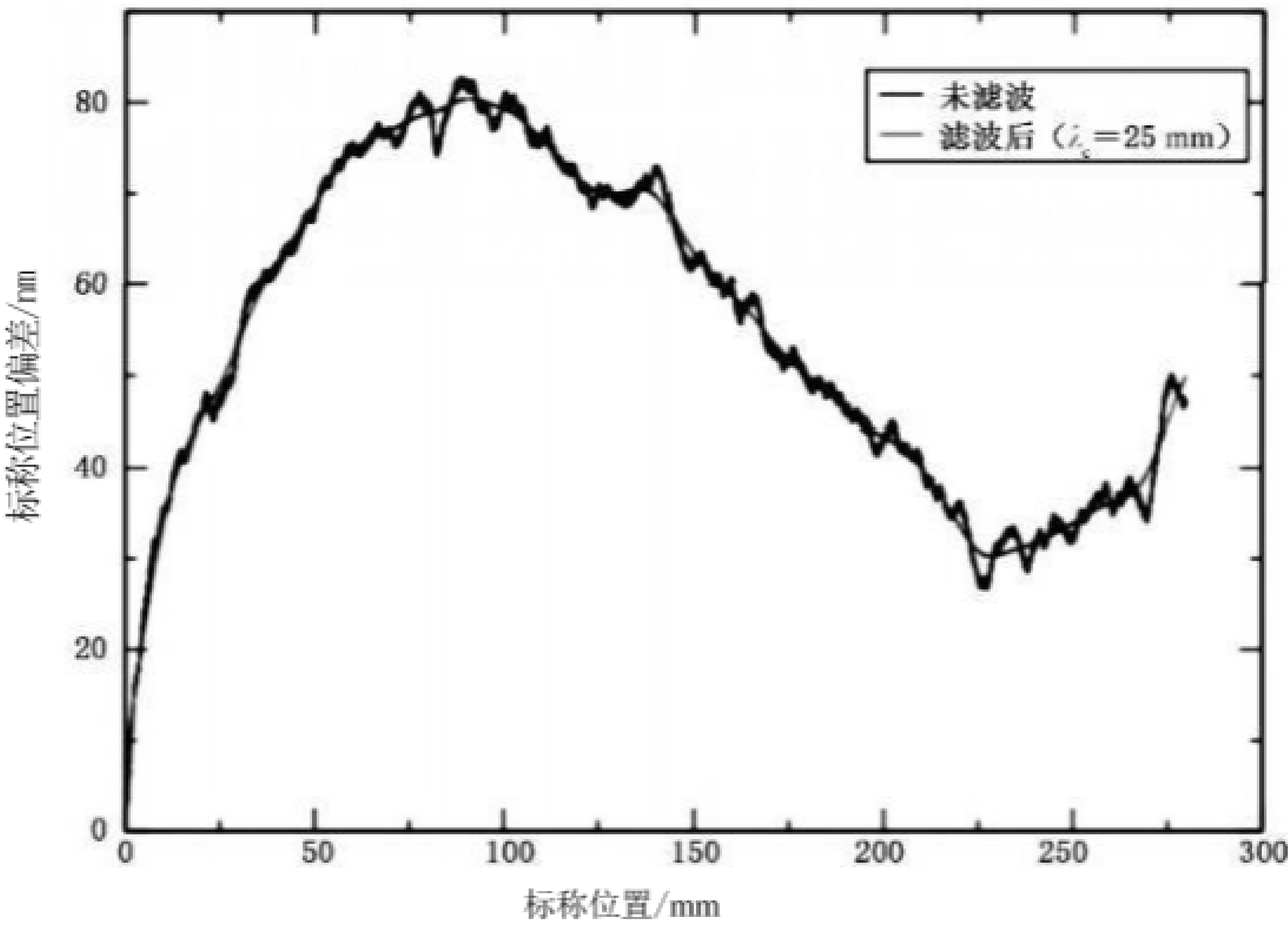


图 A.2 图 A.1 的滤波结果(λ_c=25 mm的线性轮廓样条滤波器)

表 A.1 给出了图 A.1 和图 A.2 中与测得的光栅质量参数相关的数据分析。高通滤波数据(未滤波数据、低通滤波数据)仅针对线性度偏差参数进行分析。

表 A.1 图 A.1 和图 A.2 中光栅的光栅质量参数

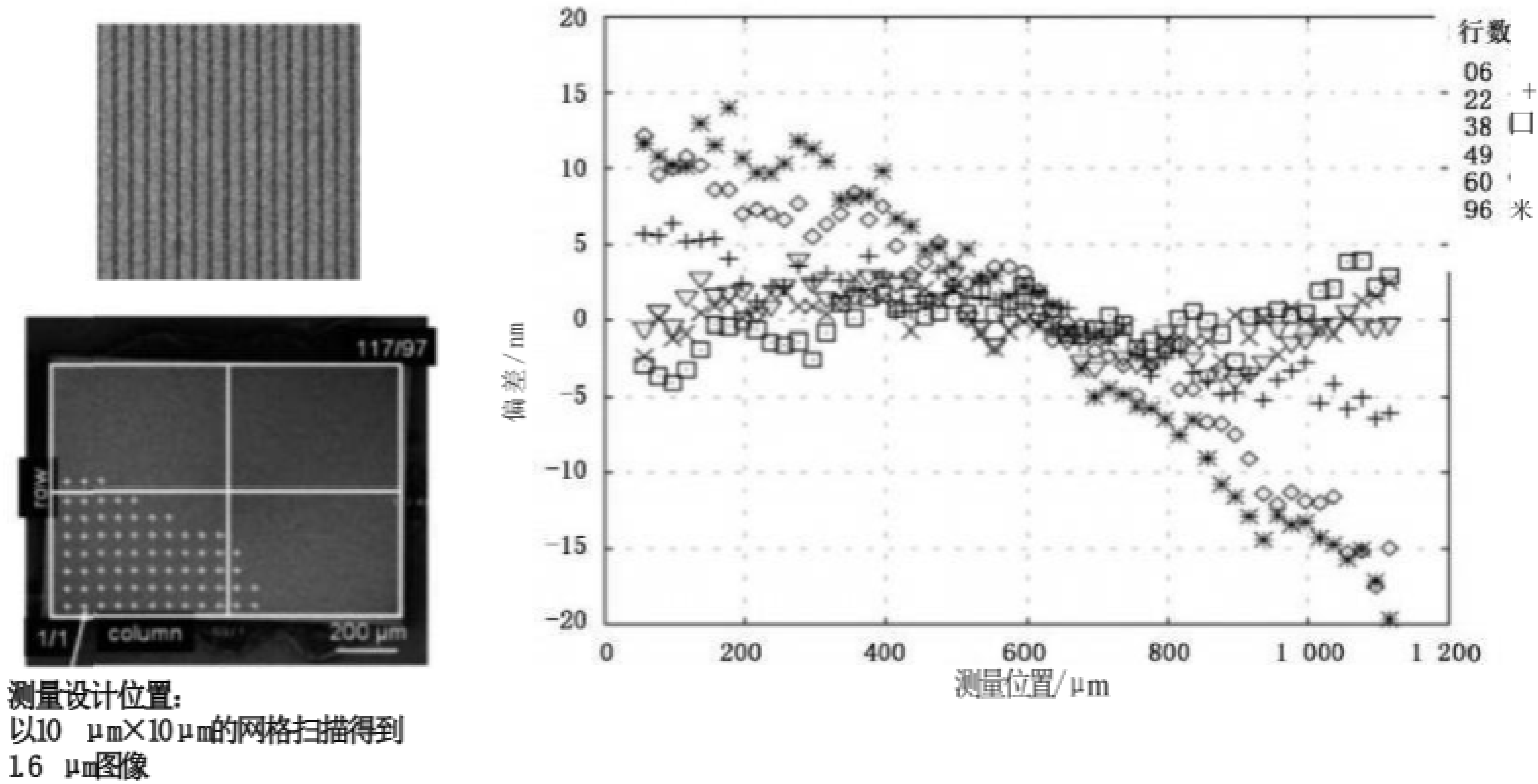
光栅质量参数: 图A. 1中的光栅, L =280 mm Pwm=512 nm	测量结果 (未滤波)	测量不确定度 (k=2)	测量结果 (样条滤波: 25 mm, β =0, LP)	测量不确 定度 (k=2)	测量结果 (样条滤波: 25 mm, β =0, HP)	测量不确 定度 (k=2)
测量的平均间距pm nm	511. 99995	0. 00001	511. 99995	0. 00001	—	—
边界长度偏差 δ L, nm	47	5	43	5	—	—
边界长度的相对偏差 δ Lh. e1	1. 7×10 ⁻⁷	1. 8×10 ⁻⁸	1. 5×10 ⁻⁷	1. 8×10 ⁻⁸	—	—
特征长度偏差 δ L。 nm	-28	5	-28	5	—	—
特征长度的相对偏差 δ Lc, e	—1. 0×10 ⁻⁷	1. 8×10 ⁻⁸	—1. 0×10 ⁻⁷	1. 8×10 ⁻⁸	—	—
线性度峰谷偏差 δ Ln1. p-\ nm	91	4	82	4	4	4
线性度峰谷相对偏差 δ Lalp-Y, re	3. 3×10 ⁻⁷	1. 4×10 ⁻⁸	2. 9×10 ⁻⁷	1. 4×10 ⁻⁸	1. 4×10 ⁻⁸	1. 4×10 ⁻⁸

表 A. 1 图 A. 1 和 图 A. 2 中光栅的光栅质量参数（续）

光栅质量参数： 图A. 1中的光栅， Lnom=280 mm， Pom=512 nm	测量结果 (未滤波)	测量不确定度 (k=2)	测量结果 (样条滤波： 25 mm， β =0, LP)	测量不确定度 (k=2)	测量结果 (样条滤波： 25 mm， β =0, HP)	测量不确定度 (k=2)
线性度均方根偏差 δ Lnl, ms nm	16	4	16	4	0.4	4
线性度相对均方根偏差 δ Lnl. ms. el	5.6×10 ^{-e}	1.4×10 ⁻⁸	5.6×10 ⁻	1.4×10 ⁻	1.4×10 ⁻	1.4X10 ⁻

示例2:范围大于1 mm 的一维光栅(1D 光栅) (pmom=100 mm)。

示例2和示例3涵盖了作为高分辨显微镜放大倍率标准的精密一维光栅(1D 光栅)和二维光栅(2D 光栅)的表征与使用。图 A.3 显示了测量方法的原理，以及在硅片上覆盖约1 mm 区域范围标称间距为100 nm 的一维光栅(1D 光栅)的测量结果。该样品在具有集成2D 激光控制台的计量扫描电镜上进行校准[12]。测量策略是在大约1.6 μm 的视场中对光栅的局部进行成像，从图像信号中测定光栅的局部相位，然后在激光干涉仪的控制下，按规定的步骤将样品移至后续位置，在此位置再次从记录的扫描电镜图像中分析光栅信号的局部相位。通过将激光干涉仪信号和光栅的局部相位信息组合，整个光栅可通过这种混合测量方法在整个1 mm² 的样品面积上进行表征，见5.4。



注：使用来自样品定位台的激光干涉仪和来自扫描电镜图像的光栅局部相位信息的组合信息，通过计量扫描电镜对标称间距为100 nm 的约1 mm 尺寸的一维光栅(1D 光栅)进行校准的结果。图示为水平方向上不同行的间距与平均间距(99.947 nm)的偏差随位置变化的函数。更多详情见参考文献[12]。

图 A. 3 通过计量扫描电镜校准一维光栅(1D 光栅)

图 A.3 中关于光栅质量参数的数据分析如表 A.2 所示。

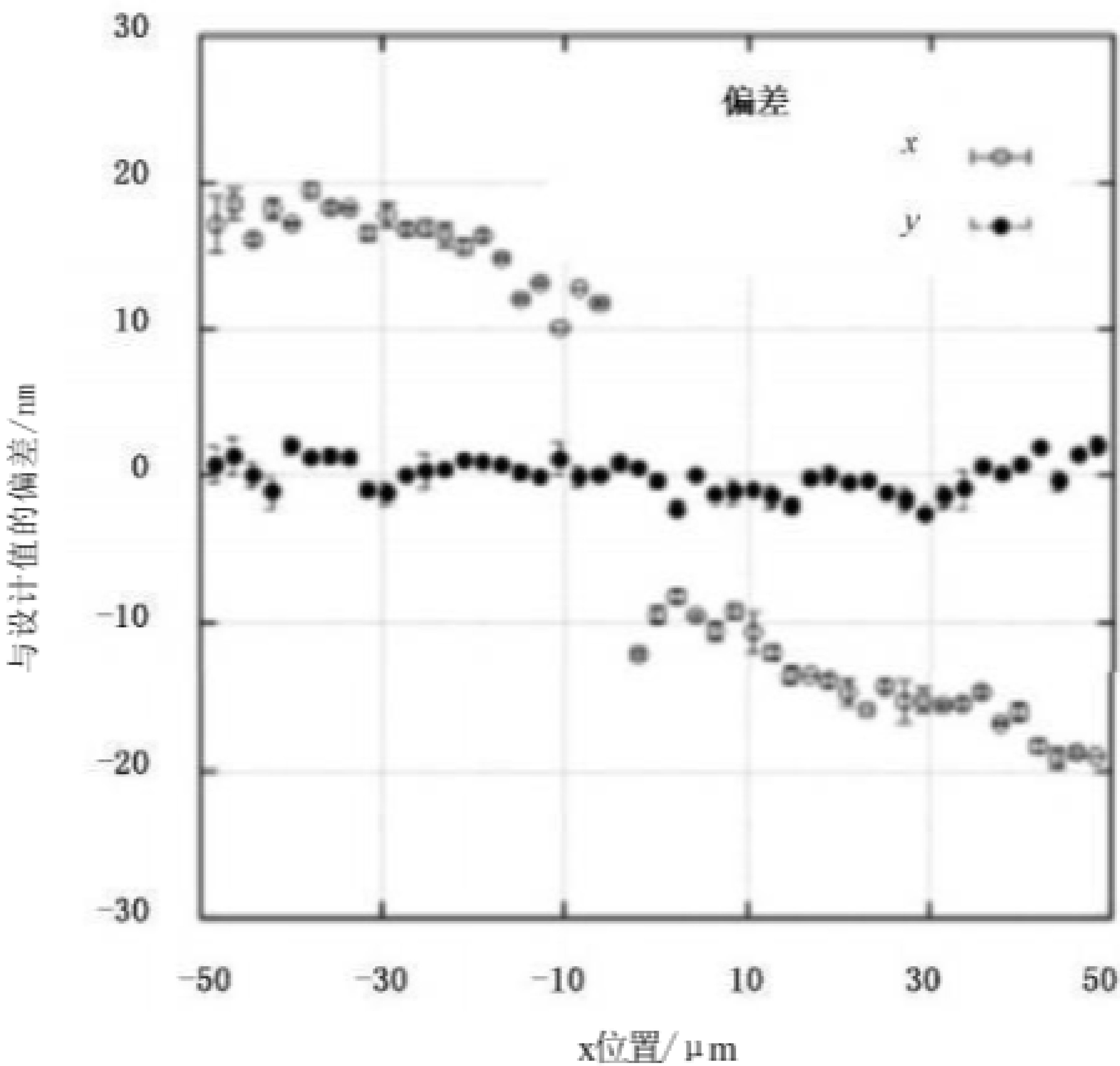
表 A.2 图 A.3 中光栅的光栅质量参数

光栅质量参数：图A. 3中的光栅 (第38行)， Lnom=1.16 mm, pnom=100 nm	测量结果 (未滤波)	测量不确定度 (k=2)
测量的平均间距pm nm	99.947	0.001
边界长度偏差 δ Lb nm	609	10
边界长度的相对偏差 δ Lh. rel	5.25×10 ⁻⁴	8.6×10 ⁻⁶
特征长度偏差 δ L。 nm	-612	10
特征长度的相对偏差 δ Lc, r1	5.27×10 ⁻⁸	8.6×10 ⁻⁶
峰谷线性偏差 δ Lal, p-v nm	8	2
线性度相对峰谷偏差 δ Lnl. P-v, rel	6.9×10 ⁻⁶	1.7×10 ⁻⁶
线性度均方根偏差 δ Lnl. mm nm	1.8	2
线性度相对均方根偏差 δ LL, mse	1.6×10 ⁻⁶	1.7×10 ⁻⁶

在参考文献[4, 32]中描述了一种类似的光栅表征方法，该方法将激光干涉仪控制的样品定位台和用于跟踪光栅结构局部相位的高分辨率 SPM 相结合。此处使用的仪器称为大范围计量型 SPM，因为它提供25 mm×25mm×5mm 的测量范围，因此也能够对较大的光栅进行表征。

示例3:覆盖小于100 μ m区域的二维光栅 (2D光栅) (pmsm=300 nm)。

图 A.4 显示了光栅标准器的一个示例，它在100 μ m 宽的高质量区中间存在所谓的“相位跳变”。这些相位跳变可能发生在顺序直写和写场拼接的制造过程中。虽然在某些应用领域这些偏差可能是可接受的，但在另一些领域这些偏差至关重要，需要避免。



注：标称间距为300 nm的二维光栅(2D光栅)上的间距(x)和直线度(y)偏差的校准结果，由计量型扫描电子显微镜将样品定位台的激光干涉仪的信息和扫描电子显微镜图像的光栅局部相位信息组合得到。详见参考文献[33]。

图 A.4 用计量型扫描电子显微镜校准二维光栅(2D 光栅)的间距和直线度偏差

图 A.4 所示的2D 标准器可用作高分辨显微镜图像放大倍率的校准标准。根据校准方法，相位跳变区域可能被校准方法覆盖或遗漏，从而导致标准平均间距值不同的测量不确定度。同样，相位跳变区域也可能被用户的校准方法随机捕获或忽略。

对图 A.4 中的数据关于光栅质量参数在x 方向(间距)偏差分析在表 A.3 中给出。

表 A.3 图 A.4 中光栅的质量参数

光栅质量参数：图A. 4中的光栅(x偏差)， Lnom=99 μ m, pnom=300 nm	测量结果(未滤波)	测量不确定度 (k=2)
测量的平均间距p _m nm	299. 86	0. 02
局部间距p _{lo} (-25. 3 μ m, 48. 4 μ m)=p _l (12, 23) nm	299. 89	0. 04
局部间距p _w (25. 3 μ m, 48. 4 μ m)=p(35, 23) nm	299. 40	0. 04
边界长度偏差 δ L _b im	-36	7
边界长度的相对偏差 δ L _{b, e}	-3. 6×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁵
特征长度偏差 δ L。 nm	-47	7
特征长度的相对偏差 δ L _{e, e}	4. 7×10 ⁻¹	7×10 ⁻⁵

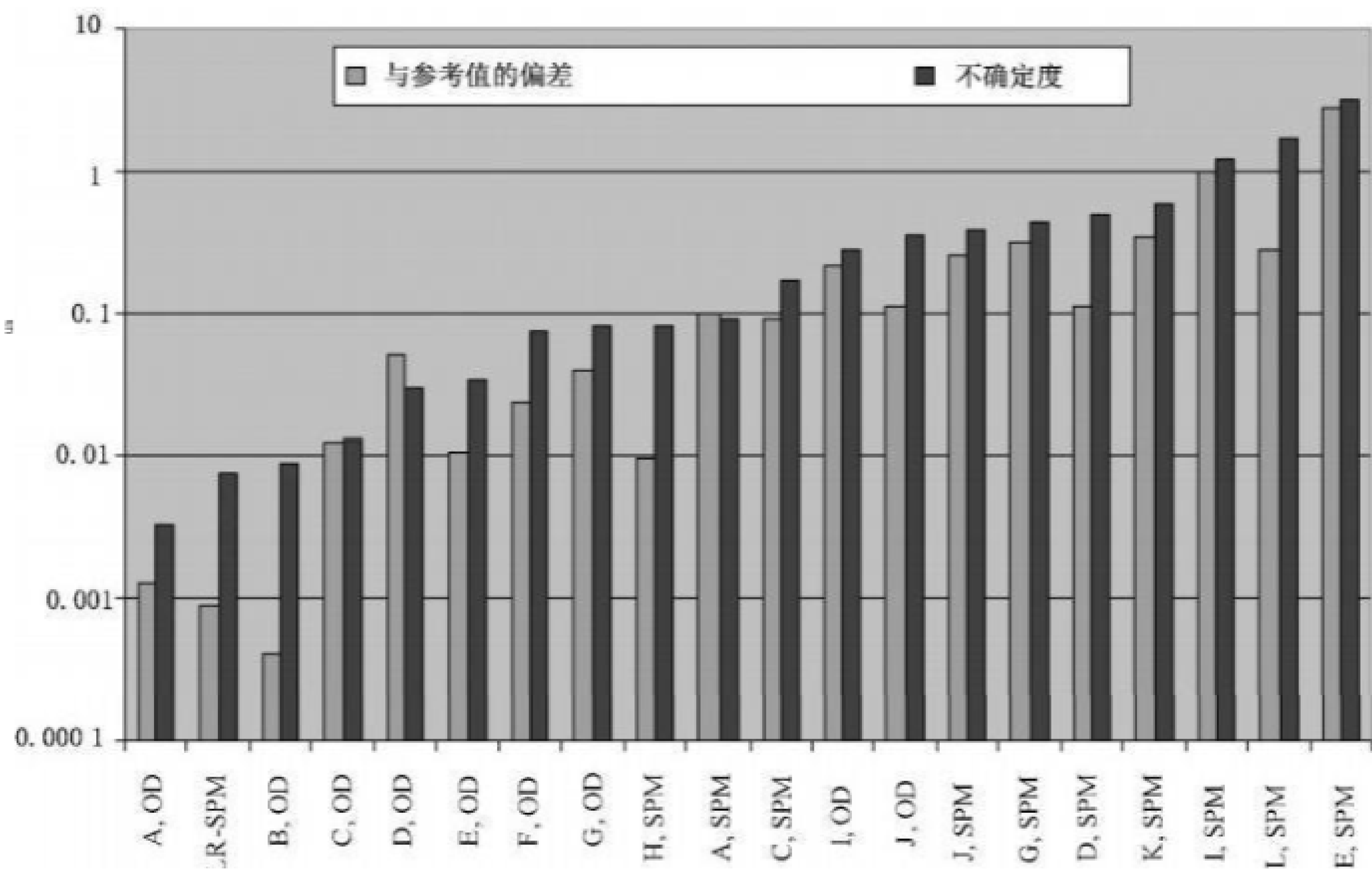
表 A.3 图 A.4 中光栅的质量参数(续)

光栅质量参数: 图A.4中的光栅(x偏差), L _{nom} =99 μm, p _{nm} =300 nm	测量结果(未滤波)	测量不确定度 (k=2)
线性度峰谷偏差 δ _{Lnl. p-v} nm	23	2
线性度相对峰谷偏差 δ _{Lnl. p-v. e}	2.3×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁵
线性度均方根偏差 δ _{Lrl. rm} nm	5.5	2
线性度相对均方根偏差 δ _{Lnl. ms.}	5.6×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁶

这里讨论的光栅表征的3个示例中，光栅的重要质量参数，如相对总长度偏差和相对线性度偏差相差3个~4个数量级。根据第5章中给出的指导，在讨论和选择光栅校准和质量表征的合适测量方法时，宜考虑这一点。需要指出，在应用3个示例中描述的校准光栅标准器进行长度单位传递时，为了充分利用表 A.1~表 A.3 中指定的小测量不确定度，用户需要在与校准时完全相同的光栅区域和相同的支撑条件下测量标准器。

示例4: 二维光栅(2D光栅)的国际比对(p_{nom}=1000 nm)。

图 A.5 给出了最近二维光栅(2D 光栅)的国际比对结果。该图给出了不同参与者和不同类型仪器测得值与参考值的偏差以及评定的测量不确定度[5]。所校准的光栅标称间距为1000 nm，标称区域为2.5 mm×2.5 mm。



注：国家计量院对标称间距为1000 nm 的二维光栅(2D光栅)开展国际比对的结果，由不同参与者和不同类型仪器得出：光学衍射(OD)、标准扫描范围(通常小于100 μm)的计量型扫描探针显微镜(SPM) 和大范围计量型SPM。此图中显示的结果是与加权平均参考值的偏差及参与者估计的合成标准不确定度u，标记为A~L。更多有关详细信息见参考文献[5]。

图 A.5 不同参与者和仪器类型测得的二维光栅(2D 光栅)的国际比对结果

OD 方法，获得的最小的不确定度在0.01 nm 以下，因为该方法能够以光学方法探测光栅的整个区域，见参考文献[7, 34]。而具有标准扫描台的计量型 SPM 在测定平均间距方面受到限制，不确定度约为0.1 nm。然而，大范围计量 SPM 也可在整个质量区域内测量光栅，与全局 OD 方法相当，此外，它还能提供与其他高分辨显微 SPM 仪器相同的关于局部间距变化的可比信息。因此，示例4表明，混合测量方法和仪器是对制造的光栅进行全面质量评价的重要工具。

校准光栅标准器存在多种的不同类型。参考文献[35]给出了现有校准标准器的概述，这些信息也将不断更新。在参考文献[36]中讨论了通过应用图像处理算法进行基于 SPM 的间距标准器校准的方法。

在一些国家，有国家指导文件和标准文件，涵盖光栅标准和光栅表征方法及其作为不同应用的长度测量实物标准的用法，主要是作为高分辨显微镜的图像放大倍率标准。参考文献[39-45]中列出了其中一些文件

附录 B
(资料性)
布拉维格子

B.1 布拉维格子

在几何学和晶体学中，布拉维格子是由一组离散的平移操作产生的无限离散点阵列，描述如下：

$$F=k\times a+l\times b+m\times c$$

其中， k 、 l 、 m 是任意整数， a 、 b 、 c 是沿不同的方向的基矢，构成点阵。对于任意位置矢量 r ，晶格看起来完全相同。晶体由一个或多个原子(基元)在每个格点周期性重复排列构成。

一维布拉维格子只有一种可能(见图 B.1)，而二维布拉维格子有5种，三维的有14种。关于布拉维晶格的更多细节可在晶体学或固体物理学的标准教科书中找到，例如参考文献[37]。

基矢的绝对值也称为一维晶格的晶格常数，见3.2.5。

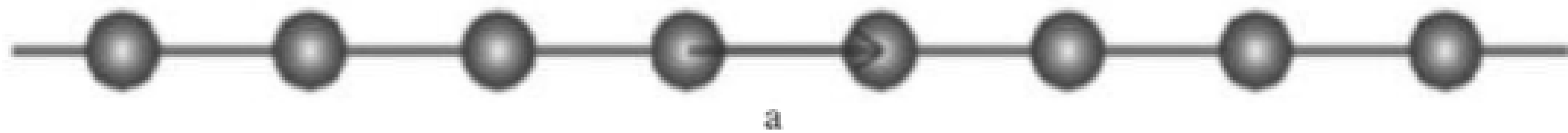
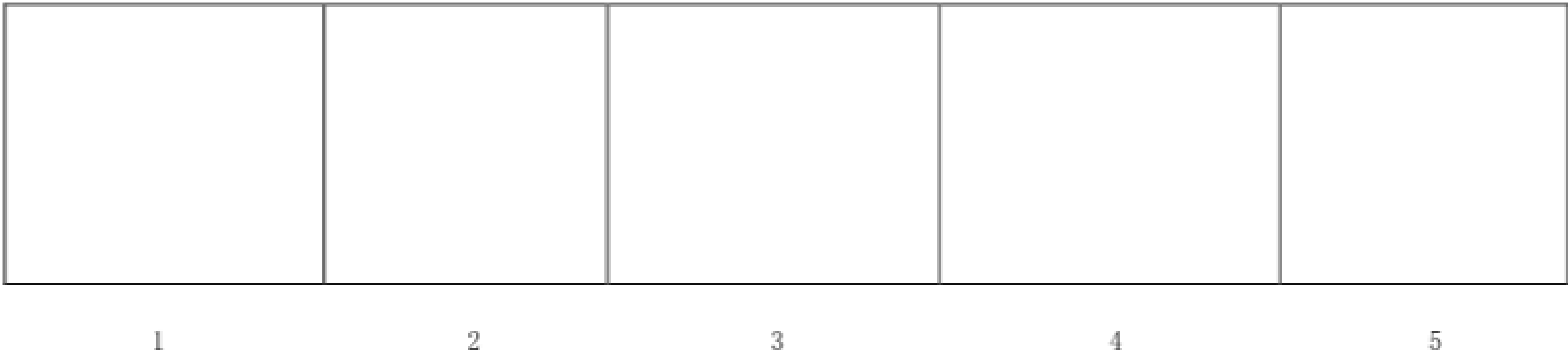


图 B.1 一维布拉维格子

B.2 二维布拉维格子

在二维空间中，有5种布拉维格子，见图B.2。它们分别是斜方、长方、有心长方、六方和正方。



标引序号说明：
1——斜方($q\neq 90^\circ$)；
2——长方($\phi=90^\circ$)；
3——有心长方($q=90^\circ$)；
4——六角($\phi=60^\circ$)；
5——正方($\phi=90^\circ$)。

图 B.2 5 种基本的二维布拉维格子(显示了基矢 a 和 b 以及它们的夹角 ϕ)

B.3 三维布拉维格子

在三维空间中，有14种布拉维格子，可分组如下(见图 B.3):

- 简单(P): 晶格点仅在晶胞的角上；
- 体心(I): 在晶胞中心增加一个格点；
- 面心(F): 在晶胞每个面的中心增加一个格点；
- 底心(C): 在晶胞一个面的中心增加一个格点。

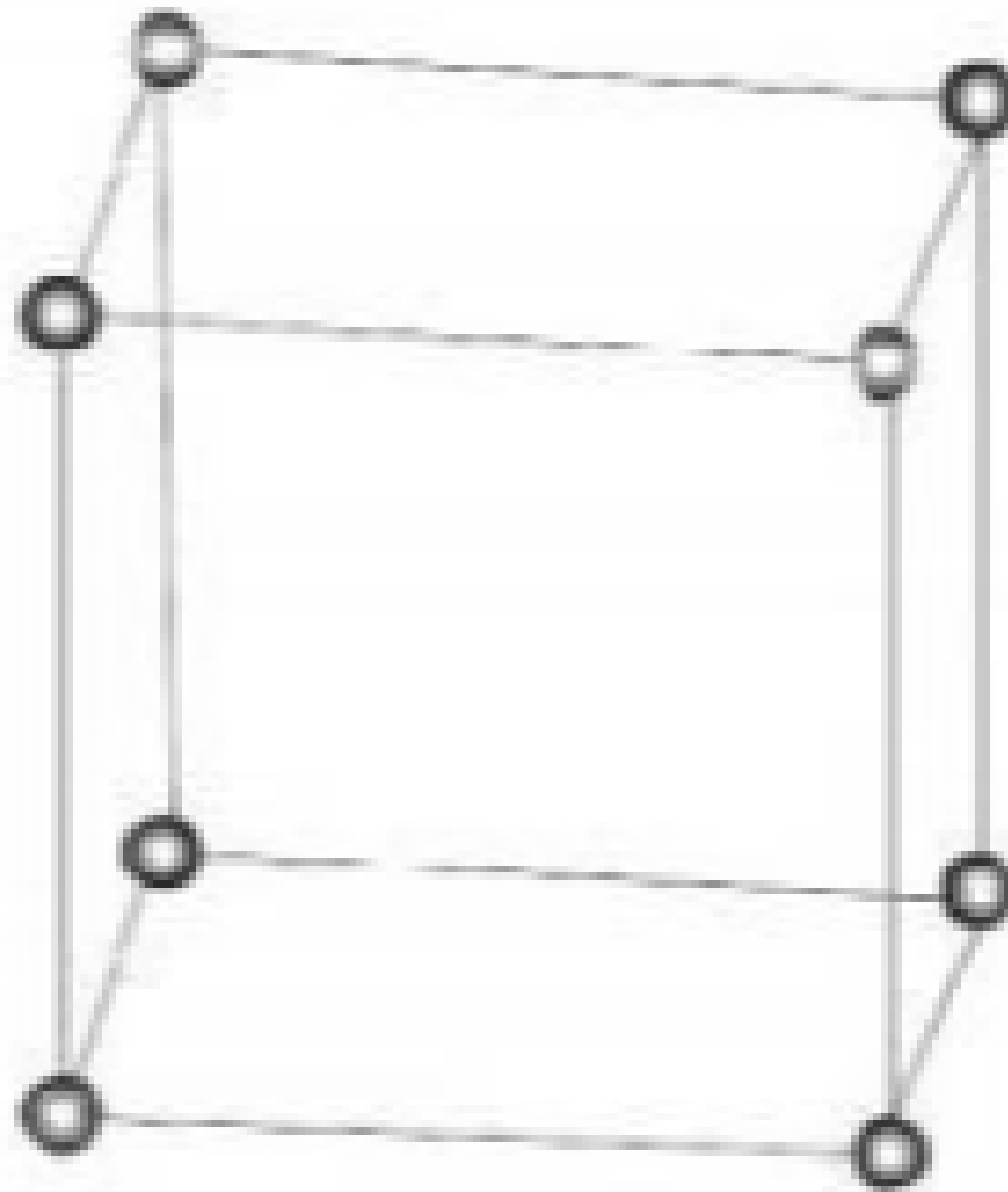
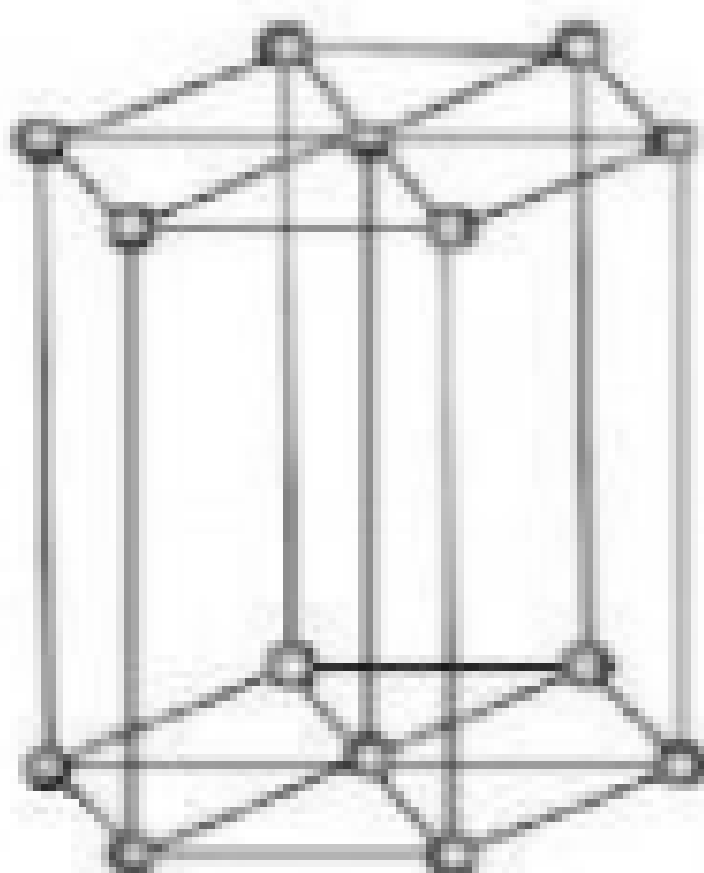
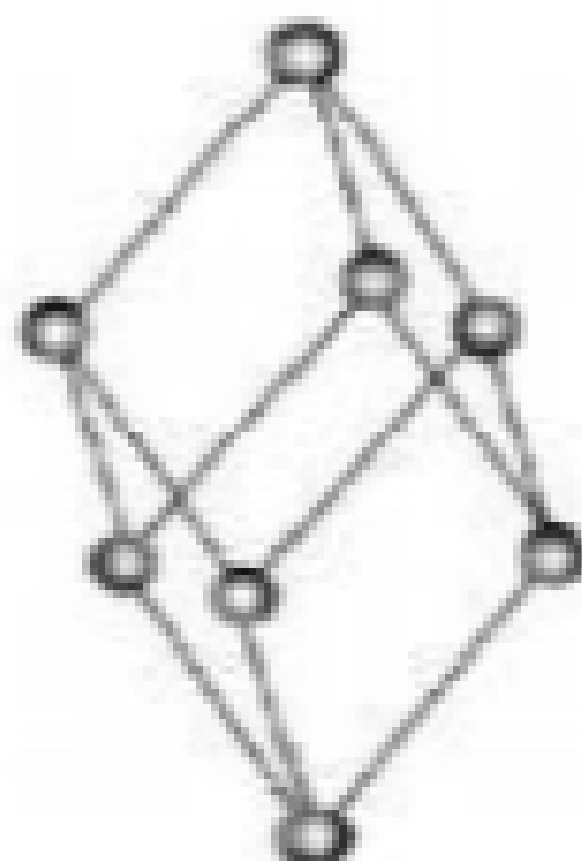
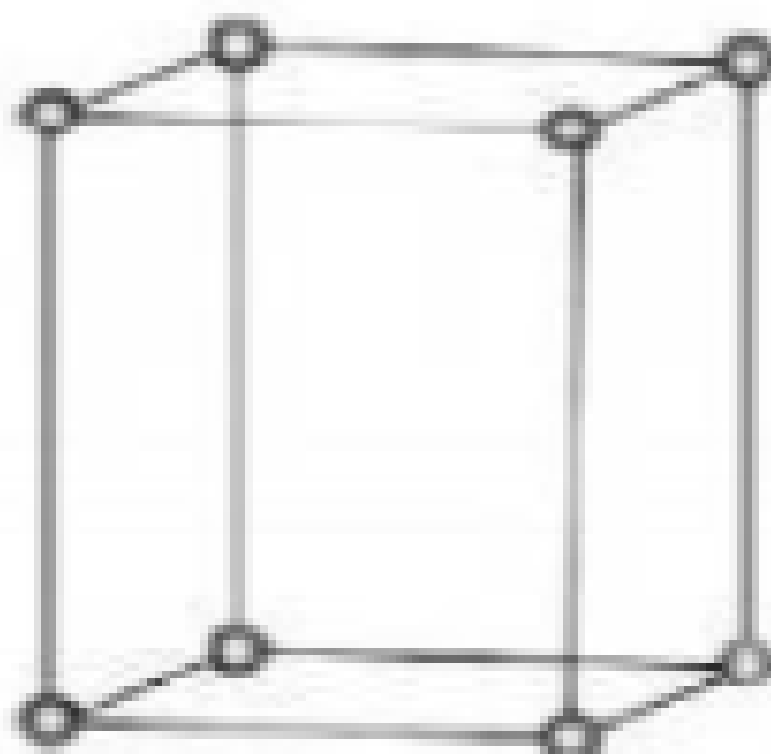
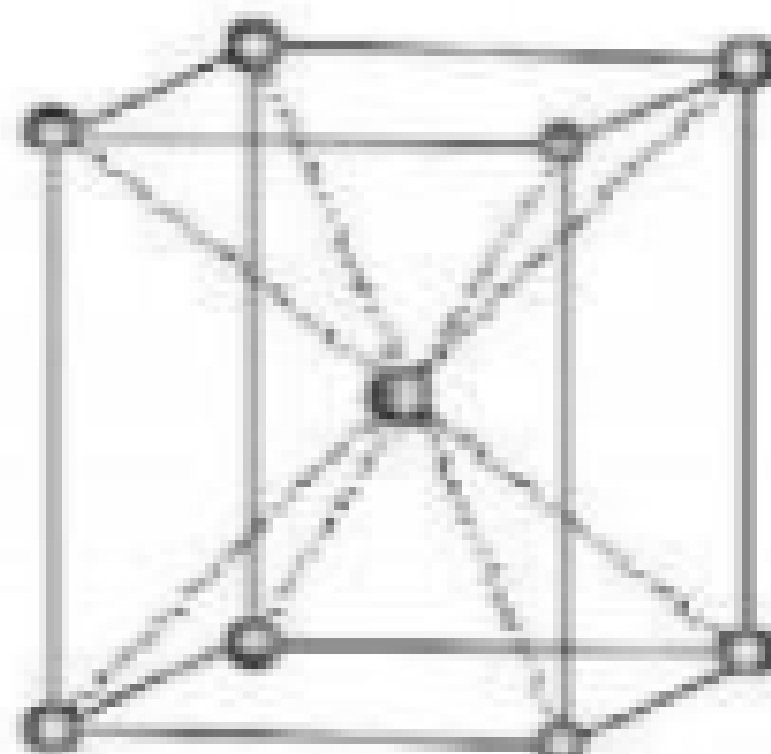
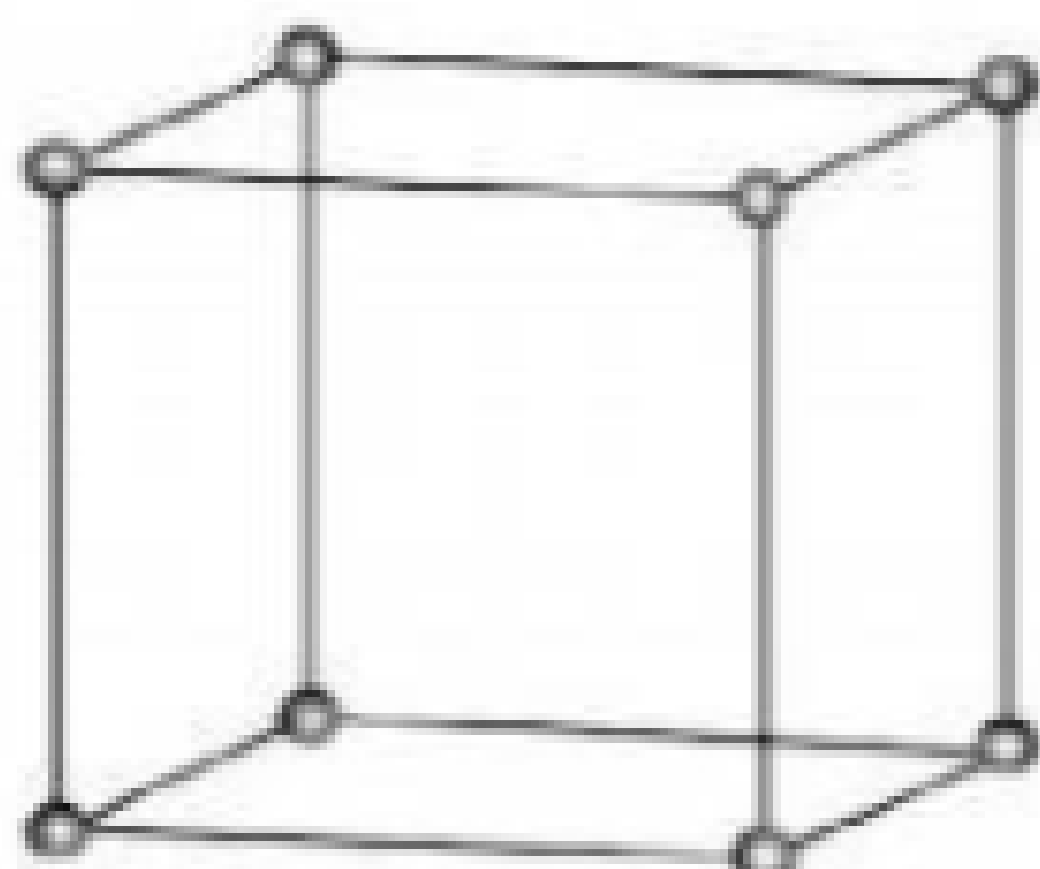
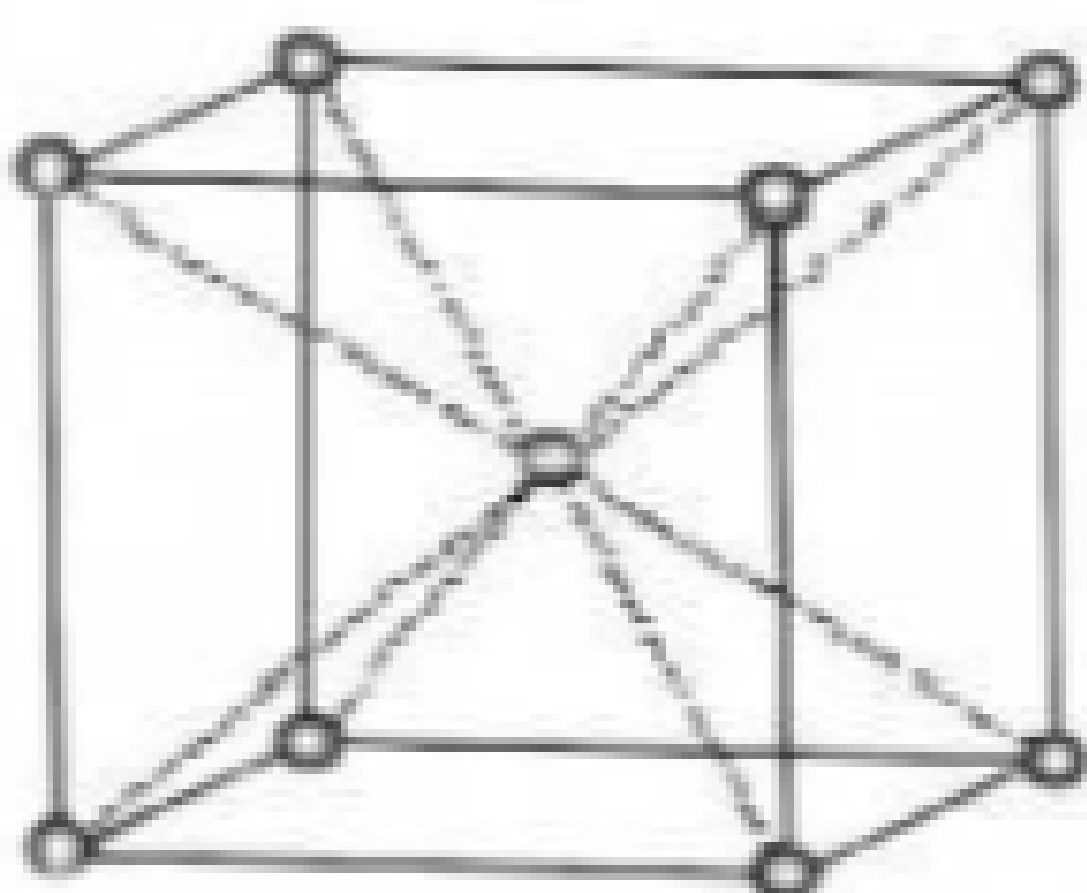
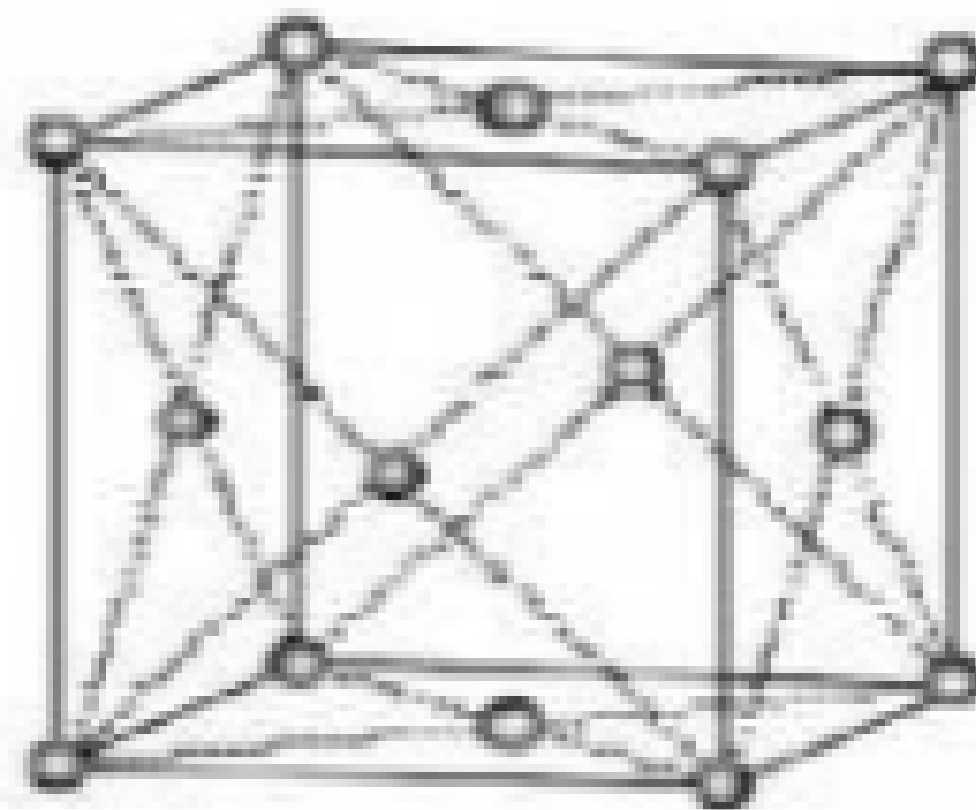
<div><div>0</div><div>0</div><div>c</div><div>0</div><div>0</div></div>		<div></div>		<div><div>O</div><div>0</div><div>Q</div><div>0</div></div>	
三斜		单斜			
		简单单斜		底心单斜	
<div><div>0</div><div>0</div><div>o</div><div>0</div></div>	<div><div>)</div><div>0</div><div>c</div><div>0</div><div>0</div></div>	<div><div>Q</div><div>Q</div><div>0</div><div>Q</div><div>0</div><div>0</div></div>		<div><div>Q</div><div>0</div><div>0</div><div>0</div><div>0</div><div>0</div></div>	
正交					
简单正交	底心正交	体心正交	面心正交		
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>		
六方	菱方	四方			
一	一	简单四方	体心四方		
<div></div>	<div></div>		<div></div>		
立方					
简单立方	体心立方		面心立方		

图 B.3 14 种基本的三维布拉维格子

晶胞的体积可通过计算 $a(b \times c)$ 得到，其中 a 、 b 、 c 是点阵矢量。布拉维格子的体积见表 B.1。

表 B.1 布拉维格子体积

晶系	体积
三斜 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	$abc \sqrt{1 - \cos^2(\alpha) - \cos^2(\beta) - \cos^2(\gamma) + 2\cos(\alpha)\cos(\beta)\cos(\gamma)}$
单斜 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$	$abc \sin(\beta)$
正交 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	abc
四方 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a^2 c$
菱方 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$a^3 \sqrt{1 - 3\cos^2(\alpha) + 2\cos^2(\alpha)}$
六方 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	$\frac{3\sqrt{3}a^2c}{2}$
立方 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a^3

B.4 准晶体

需要注意的是，还存在非周期性但有序的天然晶体结构，它们不像上面描述的布拉维格子那样具有完全的平移对称性。这些非周期晶体结构被称为准周期晶体或准晶体[38]。已知的天然准晶体有2种类型：

- a) 多边形准晶，具有8重、10重或12重的局部对称性(沿着该对称轴是周期性的，并且在垂直于该轴的平面内是准周期性的)；
- b) 20 面体准晶，在所有方向上都是非周期性的。

参 考 文 献

- [1] SEMI P35 Terminology for microlithography metrology
- [2] ISO 17450-1:2011 Geometrical product specifications(GPS)—General concepts—Part 1: Model for geometrical specification and verification
- [3] ISO 15902:2019 Optics and photonics—Diffractive optics—Vocabulary
- [4] G.Dai et al.Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings;Meas.Sci.Technol., 16, 1241–1249 (2004)
- [5] J.Garnaes.Nano5 comparison on 2D gratings,Final report,2008,CCL-S4 supplementary comparison,Metrologia,2008,45,Tech.Suppl.,04003
- [6] Just,A.;Krause,M.;Probst,R.;Bosse,H.;Haunerding,H.;Spaeth,C.;Metz,G.;Israel,W.Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder;Precision Engineering:33 (2009), 4, 530–533
- [7] E.Buhr,W.Michaelis,A.Diener and W.Mirande.Multi-wavelength VIS/UV optical diffractometer for high-accuracy calibration of nano-scale pitch standards;Meas.Sci.Technol.18(2007) 667 –674
- [8] C.J.Raymond.Scatterometry for Semiconductor Metrology,in Handbook of Silicon Semiconductor Metrology,A.C.Diebold,Ed.(Dekker,2001)
- [9] M.Wurm,F.Pilarski,B.Bodermann:A new flexible scatterometer for critical dimension metrology,Rev.Sci.Instrum.81(2010)023701
- [10] H.Gross,A.Rathsfeld,F.Scholze,and M.Bar.Profile reconstruction in extreme ultraviolet(EUV)scatterometry:modeling and uncertainty estimates,Meas.Sci.Technol.20(2009) 105102(11pp)
- [11] W.Gao,A.Kimura.A fast evaluation method for pitch deviation and out-of-flatness of a planar scale grating;CIRP Annals-Manufacturing Technology 59(2010)505-508
- [12] W.Haßler-Grohne et al.Characterization of a 100 nm 1D pitch standard by metrological SEM and SFM,Proc.SPIE Microlithography,5375,p.426-436,2004
- [13] M.Arnz et al.Calibration of test masks used for lithography lens systems;Proc EMLC 2006, p. 103–116
- [14] Ichiko Misumi et al.Bilateral comparison of 25 nm pitch nanometric lateral scales for metrological scanning probe microscopes;2010 Meas.Sci.Technol.21035105
- [15] R Köning et al.A revised treatment of the influence of the sample support on the measurement of line scales and the consequences for its use to disseminate the unit of length,Metrologia 46 187, 2009
- [16] Villarrubia,J.S.Issues in Line Edge and Linewidth Roughness Metrology,Proceedings of American Institute of Physics International Conference on Characterization and Metrology for UL-SI Technology 2005,Vol.788,pp.386-393
- [17] GB/Z 26958.1—2011 产品几何技术规范(GPS) 滤波 第 1 部分：概述和基本概念 (ISO/TS16610-1:2006, IDT)
- [18] Michael P.Krystek.ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement; submitted to MST
- [19] HEIDENHAIN Technical Information:Resulting Linear Error after Multipoint Linear Er-

ror Compensation with the LIDA 400. Available at <www.heidenhain.de>

[20] List of recommended radiations of the Working Group on the Mise en Pratique (MeP) of the CCL. Available at <<http://www.bipm.org/en/publications/mep.html>>

[21] ISO 29301:2017 Microbeam analysis—Analytical electron microscopy—Methods for calibrating image magnification by using reference materials with periodic structures

[22] ISO 16700:2016 Microbeam analysis—Scanning electron microscopy—Guidelines for calibrating image magnification

[23] ISO 11952:2019 Surface chemical analysis—Scanning-probe microscopy—Determination of geometric quantities using SPM: Calibration of measuring systems

[24] ISO 25178-70 Geometrical product specification (GPS)—Surface texture: Areal—Part 70: Material measures

[25] Peter J. Mohr, Barry N. Taylor, and David B. Newell. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006, Rev. Mod. Phys. 80, 633 (2008). Published June 6, 2008 (see page 676)

[26] P. Becker et al. Absolute measurements of the (220) lattice plane spacing in a silicon crystal, Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 1540-1543

[27] DIN 2268 (Oct. 1975, now outdated): Längenmaße mit Teilungen, Kenngrößen, Tolerierung—Measures of length with graduation, parameters, tolerancing

[28] OIML R 98, edition 1991 (E), High-precision line measures of length; available from: Bureau International de Metrologie Legale, 11, rue Turgot-75009 Paris-France

[29] F. Meli. Nano4 comparison on 1D gratings, Final report, 2000, CCL-S1 supplementary comparison, available at <http://kedb.bipm.org/AppendixB/appbresults/ccl-sl/cclsl_final_report.pdf>

[30] H. Bosse et al. Nano3 comparison on line scales, Final report, 2003, CCL-S3 supplementary comparison: Metrologia, 2003, 40, Tech. Suppl., 04002

[31] I. Tiemann et al. An international length comparison using vacuum comparators and a photoelectric incremental encoder as transfer standard, Prec. Eng., 32, (2008) 1-6

[32] G. Dai et al. Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings; Meas. Sci. Technol. 18, 2007, S. 415-421

[33] Th. Dziomba et al. Influence of nanostandard properties on calibration procedures of SPMs, Proc. Euspen Intl. Topical Conf., Aachen, 2, 491-494, 2003

[34] Jennifer E. Decker et al. Report on an international comparison of one-dimensional (1D) grating pitch; 2009 Metrologia 46 04001

[35] <http://www.nanoscale.de/standards.htm>

[36] J. F. Jorgensen, C. P. Jensen, J. Garnaes. Lateral metrology using scanning probe microscopes-2D pitch standards and image processing; Applied Physics A 66 1998, S. 847-852

[37] H. Ibach, H. Lüth. Solid State Physics, 4th ed., Springer, Berlin, Heidelberg, 2009

[38] Ron Lifshitz, Dan Shechtman, Shelomo I. Ben-Abraham (editors). Quasicrystals: The Silver Jubilee, Philosophical Magazine Special Issue 88/13-15 (2008)

[39] GOST R 8.628—2007 Single crystal silicon nanometer range relief measure. Geometrical shapes, linear size and manufacturing material requirements

[40] GOST R 8.629—2007 Nanometer range relief measure with trapezoidal profile of elements. Method for verification

- [41] GOST R8.630—2007 Atomic force scanning probe measuring microscopes.Method for verification
 - [42] GOST R8.631—2007 Scanning electron measuring microscopes.Method for verification
 - [43] GOST R 8.635—2007 Atomic force scanning probe microscopes.Method for calibration
 - [44] GOST R8.636—2007 Scanning electron microscopes.Method for calibration
 - [45] GOST R8.644—2008 Nanometer range relief measures with trapezoidal profile of elements.Method for calibration
-

www.bzxz.net

免费标准下载网