

Si/SiO₂ 多层膜线宽关键参数精细化表征技术研究

褚小要^{1,2,3}, 沈瑶琼^{2,3}, 刘丽琴^{2,3}, 邹文哲^{2,3}, 管钰晴^{2,3}, 郭创为^{2,3},
张玉杰^{2,3}, 梁利杰^{1,2,3}, 孔 明¹, 雷李华^{2,3*}

1. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203;
3. 上海在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203)

摘 要: 线边缘粗糙度 (LER) 和线宽粗糙度 (LWR) 是衡量线宽标准样片质量的重要指标。文中基于自溯源光栅标准物质的自溯源、高精密度尺寸结构特性, 提出了一种直接溯源型精确校准 SEM 放大倍率的方法, 以实现 SEM 对线宽标准样片关键参数的测量与表征。利用校准后的 SEM, 对利用 Si/SiO₂ 多层膜沉积技术制备的线宽名义值为 500、200、100 nm 样片进行关键参数的测量, 采用幅值量化参数的均方根粗糙度 RMS 描述线边缘粗糙度与线宽粗糙度, 并通过图像处理技术确定线边缘位置, 对线宽边缘特性进行了精确表征。实验结果表明, 名义值为 500、200、100 nm 对的线宽样片, 其实测值分别为 459.5、191.0、99.5 nm, σ_{LER} 分别为 2.70、2.35、2.30 nm, σ_{LWR} 分别为 3.90、3.30、2.80 nm, 说明了多层膜线宽标准样片线边缘较为平整、线宽变化小、具有良好的均匀性与一致性。基于自溯源标准物质校准 SEM 的方法缩短了溯源链, 提高了 SEM 的测量精度, 实现了线宽及其边缘特性的精确表征, 为高精度纳米尺度测量和微电子制造领域提供了计量支持。

关键词: 自溯源标准物质; SEM 放大倍率; 线边缘粗糙度; 线宽粗糙度; 多层膜线宽

中图分类号: TN307; TB921 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230475

0 引 言

线宽也称为关键尺寸 (Critical Dimension, CD), 是衡量半导体制造工艺水平的关键参数。在集成电路中, 随着摩尔定律的不断地深入研究, 特征尺寸达到纳米数量级^[1], 以高产量和高成本效益保持个位数纳米范围内的小型化趋势成为一项挑战^[2]。根据国际设备和系统路线图 (IRDS), 在 2027 年 3 月之前, 特征尺寸预计将降至 5 nm 以下^[3]。随着特征尺寸的不断缩小, 线宽测量的要求越来越高, 其精确测量与表征是确保产品质量、优化工艺参数以及校准测量设备的关键步骤, 在制造业、微电子学和集成电路等领域具有重要意义。为了保证测量的准确性和可靠性, 要求纳米测量通过一条连续的、不间断的长度溯源链链接到“米”定义^[4]。纳米线宽标准样片作为量值溯源体系中

的一种重要传递介质, 是用于校准、验证和标准化线宽测量仪器的基准样本, 确保了线宽测量的正确性, 并提供了可溯源的测量结果。

线边缘粗糙度 (Line Edge Roughness, LER) 与线宽粗糙度 (Line Width Roughness, LWR) 作为线宽的关键参数, 是衡量线宽尺寸质量的重要指标, 是影响器件的性能和品质的关键因素, 在半导体研究和工业中被广泛用于评估材料和工艺。在线宽样片研制中, LER 与 LWR 的精确表征对于线宽标准物质的可靠性与均匀性检验至为重要, 通过对 LER、LWR 进行测量与表征, 可以更全面地了解线宽样片表面的不规则性和整体粗糙度, 有效评估线宽标准样片的质量与其研制技术水平。随着微观测量技术的不断发展, 原子力显微镜 (AFM)、扫描电子显微镜 (SEM)、散射计等多种

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-09-15

基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划项目 (21XD1425000)

作者简介: 褚小要, 女, 硕士生, 主要从事精密几何量/纳米计量方面的研究。

导师简介: 孔明, 男, 教授, 博士, 主要从事多相流检测、光电检测技术、计量检测设备开发方面的研究。

通讯作者: 雷李华, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事微纳米计量方面的研究。

测量仪器被应用到线宽尺度测量与线边缘形貌表征中^[5]。其中, SEM 具有测量速度快、无损测量、分辨率高等优势, 是应用最为广泛的测量仪器^[6]。SEM 测量方法由于放大倍率问题, 导致对线宽、LER 和 LWR 的测量表征存在误差, 因此, 使用 SEM 对线宽进行测量前, 需预先用标准物质来校准 SEM 的放大倍率。标准物质通常使用衍射仪或配备激光干涉仪的原子力显微镜 (计量 AFM) 可追溯地校准到国际单位制 (SI)^[7], 溯源链环节较多, 涉及到复杂的校准、验证和比较过程。2021 年, 同济大学纳米计量课题组利用原子光刻技术研制的一维 212.8 nm 自溯源光栅成功获批了国家一级标准物质, 其周期可以通过自然常数直接溯源到“米”, 其样品送至德国联邦物理技术研究院 (PTB) 进行测量定值, 结果表明该自溯源光栅具有极高地准确性、均匀性与一致性^[8], 能够代替激光干涉仪实现量值溯源与传递, 是一种潜在的量传基准。

文中基于自溯源光栅标准物质的自溯源、高精度尺寸结构特性, 提出了一种直接溯源型精确校准 SEM 放大倍率的方法。使用 SEM 对自溯源光栅标准物质进行扫描, 得到自溯源光栅的光栅周期测量值, 与实际光栅周期值进行比对, 得出 SEM 校准因子, 从而实现扫描电子显微镜的直接溯源与放大倍率校准。使用已校准的 SEM 对多层膜线宽标准样片不同量值, 在不同区域、不同放大倍率下进行测量, 结合图像处理技术确定线边缘位置, 基于最小二乘拟合方法确定平均线边缘, 使用均方根对线边缘粗糙度与线宽粗糙度进行计算, 分析多层膜线宽标准样片的线边缘特性, 评估多层膜线宽标准样片的质量与其研制水平。

1 Si/SiO₂ 多层膜线宽标准样片的制备

多层膜沉积技术是使用半导体沉积工艺在硅晶圆片沉积多层膜介质材料并将制备的两块沉积样片通过键合技术键合为一个整体, 通过一系列加工工艺将周期性沉积膜层的厚度值转变为线宽结构, 得到纳米级线宽标准样片^[9-10]。

SiO₂ 和 Si 薄膜沉积具有较小的薄膜应力, 薄膜界面特性良好, 同时 HF 刻蚀液和 Si/SiO₂ 材料有较高的刻蚀选择比, 便于多层膜线宽结构的形成^[11]。因此, Si/SiO₂ 材料被广泛用于当前半导体加工中制作标准样片的材料。多层膜沉积技术研制的线宽结构

其线边缘粗糙度可以认为是沉积的某一介质膜层表面粗糙度的演变。因此, 同一线宽具有良好的结构和边缘一致性, 可以有效保证线宽样片的线边缘粗糙度, 提高线宽样片的质量^[9]。

Si/SiO₂ 多层膜线宽标准样片其制备流程如图 1 所示。以 Si/SiO₂ 为基础, 将沉积膜层的厚度值转换为线宽的名义值。采用离子束溅射方法, 将 Si 层和 SiO₂ 层依次交替进行沉积, 在基底上形成交替堆叠的具有良好均匀性的多层膜结构, 根据沉积速率的不同来制备不同厚度的多层膜结构, 后续将两块相同的样品进行键合、切割、研磨、抛光处理, 并选用 HF 刻蚀液进行湿法刻蚀来制备线宽标准样片。

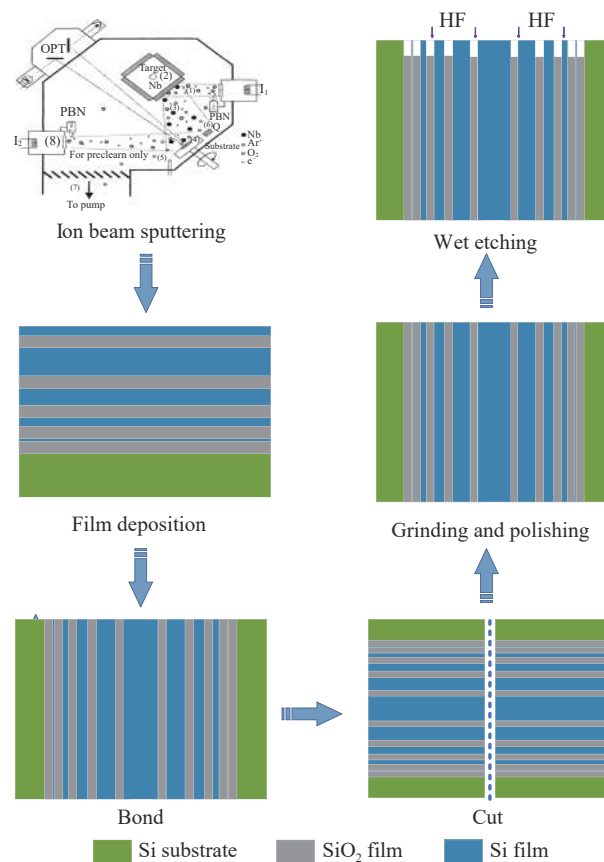


图 1 线宽标准样片制备流程图

Fig.1 Process diagram for preparing standard line width samples

2 基于自溯源光栅标准物质的 SEM 量值溯源及放大倍率校准

溯源性是纳米测量中的基础性问题^[12]。使用 SEM 对线宽进行测量与表征时, 首先要对其进行溯源, 由于电子显微镜的放大倍率的变化是非线性的,

因此需要对不同放大倍率进行校准^[13]。作为校准 SEM 放大倍率的标准物质必须满足：线边缘平直良好、量值统一、稳定性好且标称量值必须可溯源到一个正确的物理量值上^[14-15]。周期性线宽标准物质是校准光学/电子显微镜放大倍率的合适标准^[16]。

2.1 一维铬自溯源光栅标准物质

一维铬自溯源光栅标准物质完全满足以上要求，该光栅是基于原子光刻技术制备的光栅结构。原子光刻技术又称为激光会聚原子沉积^[17]。以铬原子为例，会聚激光波长为 425.6 nm，对应 Cr 原子的共振跃迁能级 ($^7S_3 \rightarrow ^7P_4$)，在会聚激光和原子的相互作用下会使得 Cr 原子沉积到样板上，由于沉积位置与激光驻波场波谷或波腹位置严格对应，可以形成周期高度准确可靠的一维光栅结构。一维铬自溯源光栅的节距值由 Cr 原子的跃迁频率决定，而原子的跃迁频率是一个自然常数，因此，形成的一维铬 (Cr) 原子光刻光栅结构是一种自溯源节距标准，且其光栅的周期为激光波长的一半，故一维铬 (Cr) 原子光刻光栅结构周期为 212.8 nm。使用该方法制备的一维 212.8 nm 自溯源光栅具有极高的准确性与一致性，均在 0.001 nm 量级^[8]。

2.2 基于自溯源光栅的量值溯源体系

量值溯源体系如图 2 所示，其中左边为经典的纳

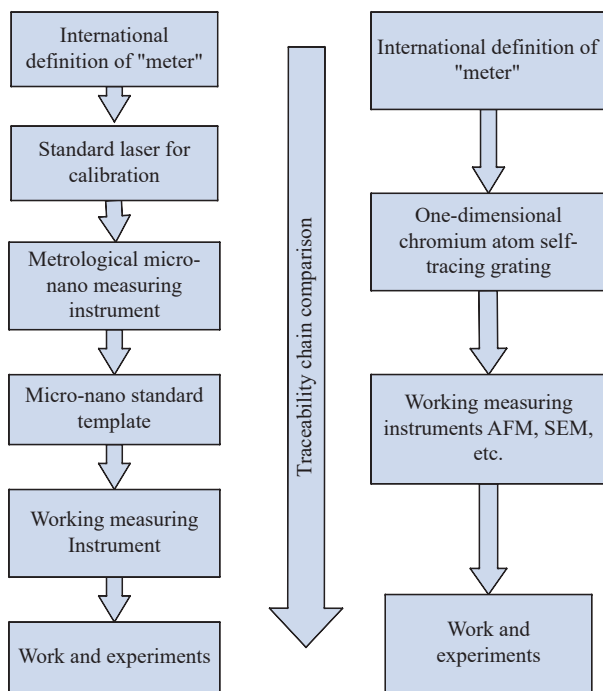


图 2 纳米量值溯源体系

Fig.2 Nanometer value traceability system

米溯源体系，右边为基于自溯源光栅的量值溯源体系。

与经典的纳米量值溯源体系相比，基于自溯源光栅建立的纳米量值溯源体系使溯源链有效缩短，实现了扫描电子显微镜的校准和溯源，确保其测量结果的准确性和可比性，降低了量值传递过程中由于纳米标准样板与计量型微纳米测量仪器引入的溯源误差，实现工业生产中微纳米测量仪器直接溯源到光波波长^[18]，并且作为物理性稳定的实物基准更易保存与运输，推动整个微纳米科技的发展。

2.3 基于自溯源光栅的 SEM 校准方法

自溯源光栅周期十分准确且可直接溯源至“米”的定义，具有极高的样品均匀性与一致性，使用 SEM 对自溯源光栅进行图像采集和测量，将光栅实际值与 SEM 测量进行比值，得出该放大倍率下的校准因子，具体校准方法如下：

将自溯源光栅线条垂直方向与 SEM 扫描方向垂直，采集图像并记录放大倍率。如图 3 所示，以单个光栅左侧线边缘和右侧线边缘为选取参考点，依据 JJF 1916—2021《扫描电子显微镜校准规范》，选取标准样图像上 N ($N \geq 5$) 个栅格结构，测量栅格间距 L ^[19] 为：

$$L = (L_1 + L_2) / 2 \quad (1)$$

式中： L_1 、 L_2 分别为左侧线边缘间距和右侧线边缘间距。连续进行 5 次测量取平均值。自溯源光栅的光栅周期值为 D ，则上述测量间距在光栅上的实际长度

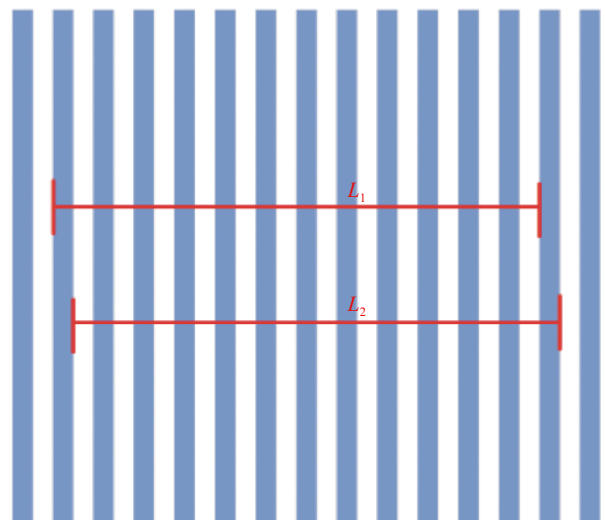


图 3 光栅节距选取

Fig.3 Selection of grating pitch

应为 ND 。则该放大倍率下的校准因子 K 为:

$$K = ND/L \quad (2)$$

完整的校准过程需要在多个不同的放大倍率下依次进行,校准流程和上述相同。

3 线宽及其关键参数表征

采用校准后的 SEM 对多层膜线宽样片进行测量,在不同放大倍率下,分别在样品的上、中、下三个位置进行测量,线宽定值以中间半高宽为纳米线宽。

LER 是指线宽边缘部分的表面不光滑程度,其主要表现为线宽边缘上的高低起伏或波动。LWR 是指在同一条线宽上多个测量点线宽的变化范围,主要反映线宽的均匀性和一致性。由于 LER、LWR 不随器件线宽的减小而减小,因此当线宽下降至纳米尺度时,LER、LWR 的测量对于线宽标准物质的可靠性与均匀性检验至为重要。均方根 (Root mean square, RMS) 粗糙度参数能够在一定意义上反映刻线边缘形貌的均匀性^[20],因此,使用 RMS 对 LER 与 LWR 进行量化表征。通过对 LER、LWR 的精确表征,可以对各种新型材料的性能、新设备研制、新方法的试验结果做出正确有效的评价^[21]。

3.1 LER 与 LWR 的计算

LER 通常使用形成线边缘轮廓的点与其拟合直线之间距离的标准差来描述,具体计算方法如图 4(a)、(b)所示。首先选择一个长度为 L 的测量窗口,在测量间隔 Δ 处测量 N 个边缘线位置 x_i 和宽度 w_i ,从边缘位置减去一条平均线边缘 \bar{X} ,从宽度中减去局部线宽平均值 \bar{W} 。因此,线边缘粗糙度的幅值参数均方根粗糙度值 σ_{LER} 可表示为^[22]:

$$\sigma_{LER} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (3)$$

同理,可得线宽度粗糙度的幅值参数均方根粗糙度值 σ_{LWR} 可表示为:

$$\bar{W} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \quad (4)$$

$$\sigma_{LWR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - \bar{W})^2}{N}} \quad (5)$$

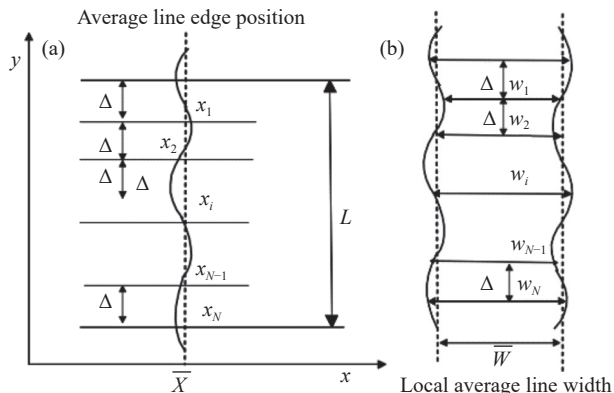


图 4 (a) 线边缘示意图; (b) 局部线宽示意图

Fig.4 (a) Schematic diagram of line edge; (b) Schematic diagram of local line width

线边缘粗糙度幅值表征的两种量化方法 LER 与 LWR 是互为补充的。一般来说, σ_{LER} 值较大的线边缘结构,其 σ_{LWR} 值不一定大;而 σ_{LWR} 值较大的线边缘,其 σ_{LER} 值可能很小。图 5 (a)、(b) 给出了这两种情况的图示说明。

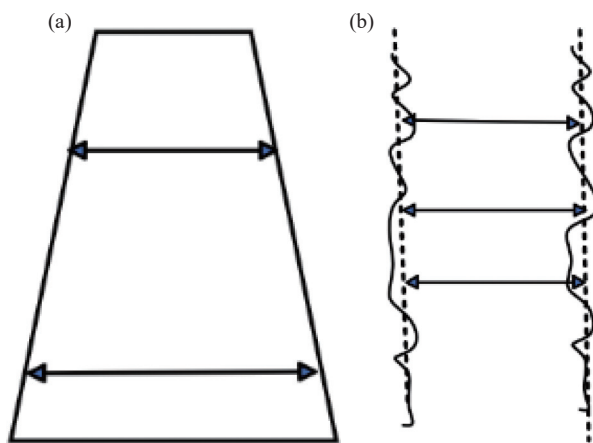


图 5 (a) $\sigma_{LER}=0$, 而 σ_{LWR} 较大的情况; (b) σ_{LWR} 很小, 而 σ_{LER} 较大的情况

Fig.5 (a) $\sigma_{LER}=0$, while σ_{LWR} is large; (b) σ_{LWR} is very small, and σ_{LER} is large

3.2 线边缘粗糙度测量方法

由于 SEM 对样本进行测量得到的是表示扫描线与采样点上高度值的灰度信息,因此可以使用图像处理技术对 SEM 测量图像进行分析来确定线边缘位置,进而提取出 LER 特征。具体测量分析如下:

1) 获得 SEM 测量图样与滤波。将所得图像导入 MATLAB 软件中,采用中值滤波对扫描图像进行去

噪处理^[21];

2) 确定线边缘位置。采用对图像处理较简单、影响较小的 Sobel 算子进行线边缘检测^[21], 检测后的图像进一步阈值化得到线边缘;

3) 确定评定基准。提取出左、右边缘线点的像素值 $(x_{li}, y_{li}), (x_{ri}, y_{ri})$, 采用最小二乘拟合方法确定平均线边缘^[23]。设拟合直线方程为: $\bar{X} = ay + b$, a 、 b 的计算公式如下:

$$a = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{y^2} - \bar{y}^2}, \quad b = \bar{x} - a\bar{y} \quad (6)$$

其中,

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}, \quad \overline{y^2} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}, \quad \overline{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i x_i}{n}$$

4) 提取 LER、LWR 特征; 确定评定长度 L_{cl} 、 L_{cr} , 提取 LER 特征、LWR 特征。

5) 数据处理; 采用 RMS 粗糙度计算公式对 LER、LWR 进行计算。

4 实验与分析

4.1 自溯源光栅对 SEM 溯源及放大倍率校准

文中使用国家一级标准物质一维 212.8 nm 自溯源光栅对 SEM 进行校准, 其任意两个自溯源光栅平均节距的差异为 0.001 nm, 不确定度为 0.008 nm, 其线边缘粗糙度较小且具有极高地均匀性和一致性。

校准仪器为蔡司 Sigma 300 热场扫描电镜, 放大倍数为 10 ~ 1000000×, 在 15 kV 加速电压下, 分辨率为 1.2 nm; 在 1 kV 加速电压下, 分辨率为 2.2 nm, 加速电压调整范围为 0.002~30 kV, 样品台最大行程 $X=$

125 mm, $Y=125$ mm, $Z=50$ mm, 样品台的旋转角度 T 的范围为 $-10^\circ \sim 90^\circ$, 样品台的倾斜角度 R 的范围为 360° 连续旋转。仪器放置于恒温房间中, 环境温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 温度波动: $\leq 1^\circ\text{C/h}$, 相对湿度: $\leq 75\%$ 。校准前电镜载物台保持水平, 便于电子束垂直入射光栅, 自溯源光栅样品静置于载物台 30 min, 使测试状态保持稳定。在选择校准位置时尽量避开光栅的坑洞、划痕、污染等位置。

在 40、60、80 K×放大倍率下, SEM 的比例尺转换分别为 2.74、1.85、1.37 nm/pixel, 使用自溯源光栅对 SEM 在固定加速电压 3.00 kV 下, 选取图像上 5 个栅格结构, 测量栅格间距 L , 以放大倍率为 80 K×为例, SEM 对栅格进行测量的示意图如图 6 所示, 计算过程如 2.3 节所述。将 40、60、80 K×放大倍率下的测量结果如表 1 所示。

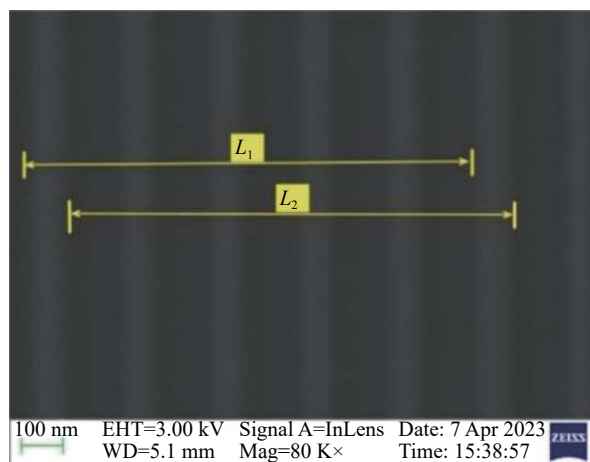


图 6 SEM 放大倍率为 80 K×下, 光栅栅格选取示意图

Fig.6 The SEM magnification is 80 K×, the schematic diagram of grating grid selection

表 1 放大倍率为 40, 60, 80 K× SEM 测量结果 (单位: nm)

Tab.1 The magnification is 40, 60, 80 K× SEM measurement results (Unit: nm)

The i th measurement	40 K×			60 K×			80 K×		
	L_1	L_2	\bar{L}_i	L_1	L_2	\bar{L}_i	L_1	L_2	\bar{L}_i
$i=1$	1065.8	1052.1	1059.0	1061.1	1057.4	1059.3	1053.4	1063.0	1058.2
$i=2$	1063.0	1052.1	1057.6	1053.7	1055.6	1054.7	1054.8	1054.8	1054.8
$i=3$	1082.2	1068.5	1075.4	1061.1	1055.6	1058.4	1052.1	1057.5	1054.8
$i=4$	1046.1	1060.3	1053.2	1064.8	1064.8	1064.8	1053.4	1054.8	1054.1
$i=5$	1060.3	1049.3	1054.8	1074.1	1064.8	1069.5	1052.1	1054.8	1053.5

在 SEM 不同放大倍率下,连续进行 5 次测量,计算每次测量所到的校准因子,求出校准因子的平均值,计算其标准误差,绘制校准因子误差线,如图 7 所示。

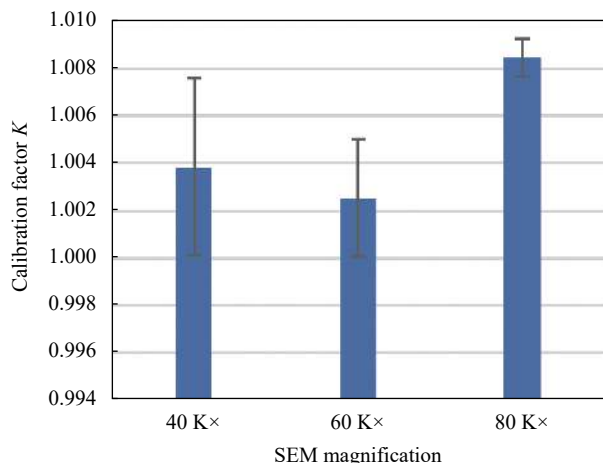


图 7 SEM 不同放大倍率下校准因子误差线

Fig.7 SEM calibration factor junction error bars under different magnifications

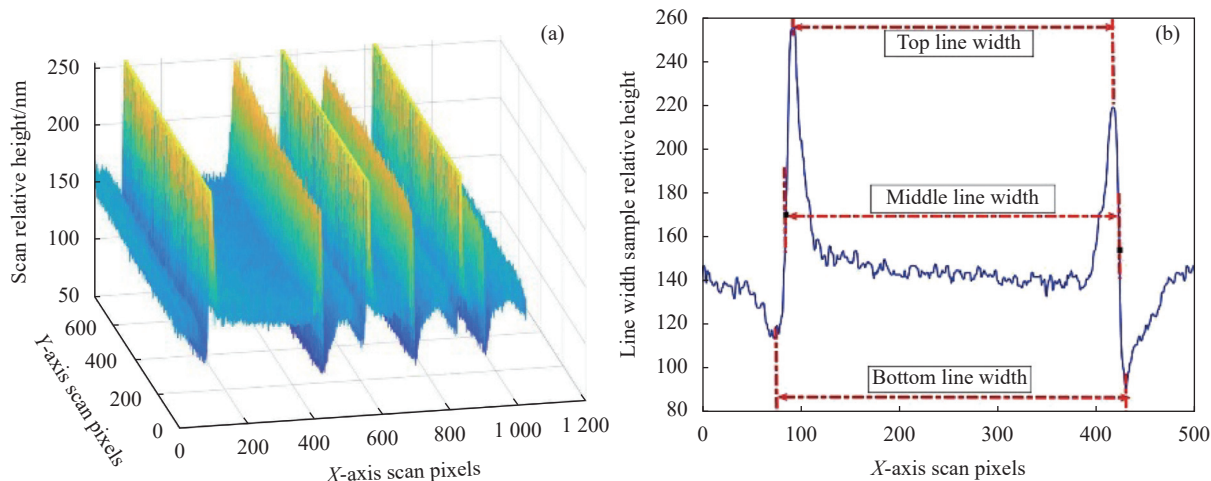
由图 7 可知,同一放大倍率下,多次测量的所得的校准因子十分接近,这说明测量过程是可靠的,所得的校准因子具有高度的可靠性和准确性。通过计算得出,在 40、60、80 K \times 放大倍率下校准因子 K 分别为 1.0038、1.0025、1.0085。在不同放大倍率下,5 个栅格间距的测量均值为 1058.8 nm 与自溯源光栅 5 个栅格间距 1064 nm 相差约为 5.2 nm,这种差异会对样本特征的准确性产生影响,无法得到精确的尺寸或形

貌信息。通过对 SEM 的校准,可以提高测量的准确性,减小测量误差,确保结果的可靠性和一致性,以及测量结果的可追溯性,同时有效缩短了溯源链,降低了量值溯源过程中通过纳米标准样板与计量型微纳米测量仪器引入的溯源误差,为量值传递日渐趋于扁平化提供了一种可能。

4.2 SEM 对多层膜线宽的测量

在相同环境条件下,采用校准后的 SEM 在不同放大倍率下,分别对名义值为 500、200、100 nm 的线宽样片的上、中、下 3 个位置进行测量。首先将线宽扫描图像导入软件中进行上升边沿和下降边沿的空间确定,得到模拟图像,以样品扫描图像的下边缘为底,上边缘为顶,以中部线宽为线宽测量值,线宽测量如图 8 所示。测量结果与和校准因子 K 进行乘积得到 SEM 测量值,测量 5 次并取其平均值,将不同位置、不同放大倍率下测量 5 次所得均值填入表 2 中。将不同区域、不同的位置线宽测量结果进行绘图,绘制结果如图 9 所示。

由线宽测量结果可知,线宽名义值为 500、200、100 nm 的样片其实际测量值分别为 459.5、191.0、99.5 nm。由图 9(a)~(c) 可知,名义值为 500 nm 线宽,在不同测量放大倍率下,不同测量位置其线宽测量均值的最大偏差为 7.2 nm,其均值相对误差为 8.1%,由于制备过程中受沉积时间、沉积环境等因素的影响,导致实际测量值与名义值之间存在较大的差异。名义值为 200 nm 线宽,在不同测量放大倍率下,不同测量位置其线宽测量均值的最大偏差为 6.2 nm,其均值



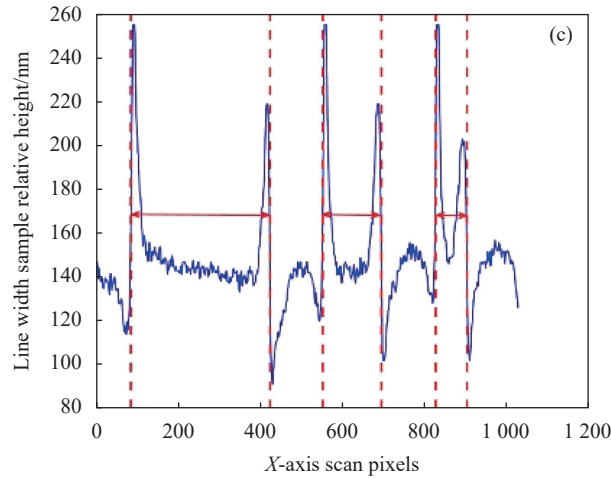


图 8 (a) 线宽标准器模拟图样; (b) 中部线宽提取示意图; (c) 线宽测量示意图

Fig.8 (a) Simulation pattern of linewidth standard; (b) Central line width extraction map; (c) Schematic diagram of central linewidth extraction

相对误差为 4.5%，测量值与名义值之间的偏差相对减小，名义值 100 nm 线宽，其相对误差仅为 0.5%，具有较高的精确性。不同尺寸的线宽在不同测量放大倍率下，不同测量位置其线宽测量均值的最大偏差为 1.9 nm。由图 9 (d) 可知，相同尺寸的线宽在不同测量

放大倍率下，不同测量位置其线宽测量结果基本一致。说明 Si/ SiO₂ 多层膜线宽具有良好地样间一致性，这表明多层膜技术是相对稳定和可靠的。

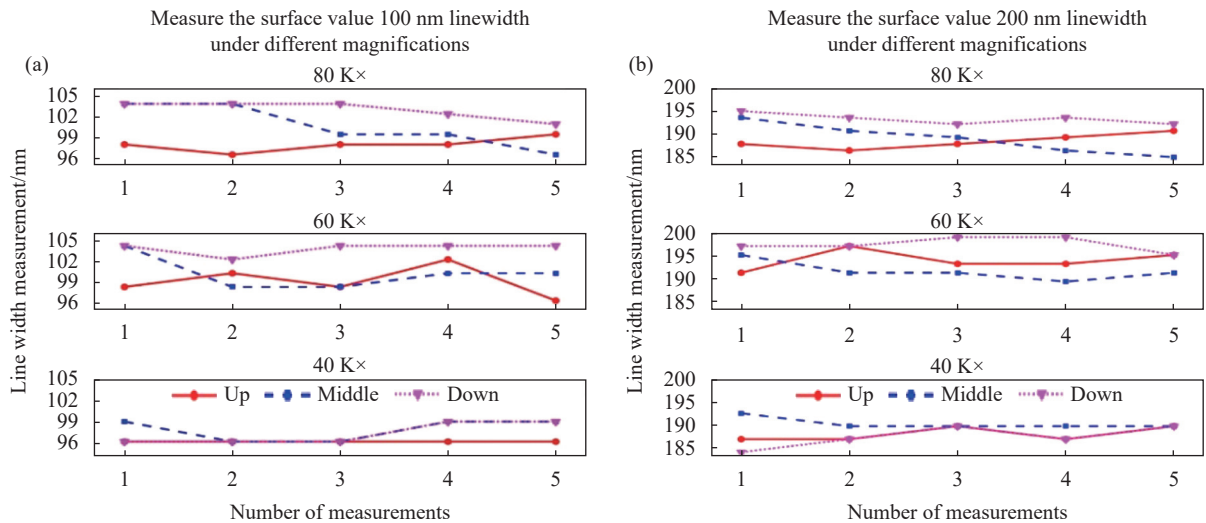
4.3 线边缘粗糙度的计算结果与分析

对名义线宽值为 500、200、100 nm 的样品在 40、

表 2 线宽均值测量结果 (单位: nm)

Tab.2 Line width mean measurement results (Unit: nm)

Nominal line width	40 K×			60 K×			80 K×			Average value	Absolute error	Standard deviation
	Up	Middle	Down	Up	Middle	Down	Up	Middle	Down			
500	457.1	458.7	454.9	465.2	464.1	466.7	453.7	452.6	462.3	459.5	40.5	5
200	188.1	190.3	187.6	193.8	191.6	197.2	188.4	189.0	193.1	191.0	9	3
100	96.3	97.9	97.4	99.1	100.3	103.6	98.1	100.6	102.8	99.5	0.5	2.3



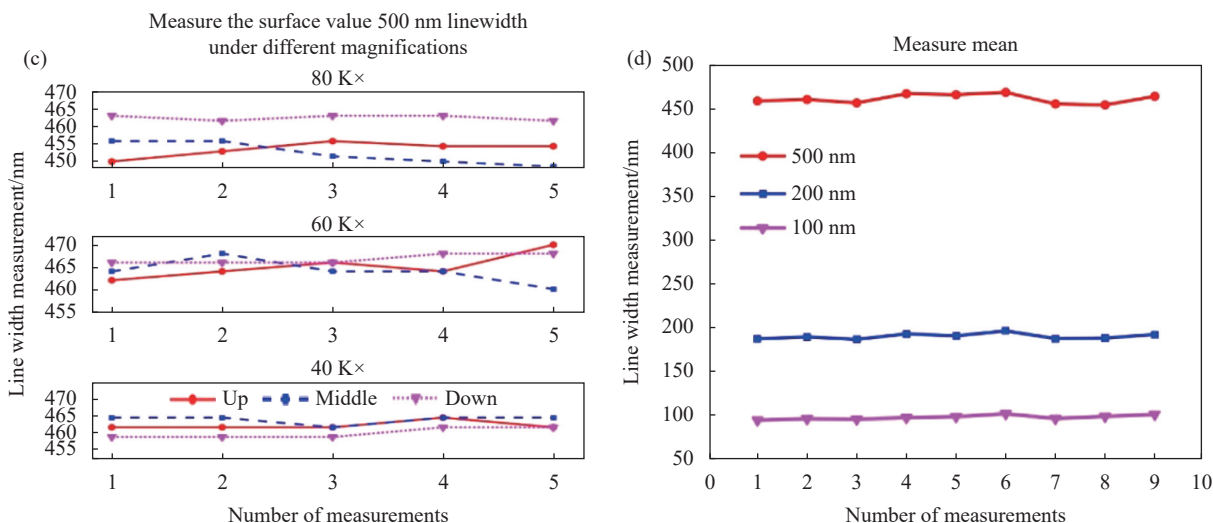


图 9 (a)-(c) 分别为不同倍率下 100、200、500 nm 线宽测量结果; (d) 线宽测量平均值

Fig.9 (a)-(c) are the measurement results of 100 nm, 200 nm, and 500 nm linewidth at different magnifications, respectively; (d) Average line width

60、80 K×放大倍率下,上、中、下三部分进行测量,500、200、100 nm 线宽值其左右评定长度保持一致, $L_{cl}=L_{cr}$, 其评定长度分别为 1045、550、275 nm。按照上述流程与 3.2 节计算方法分别计算出 σ_L 、 σ_R 与

σ_{LWR} , 将结果列于表 3 中。将同一线宽值在不同位置、不同放大倍率下的左、右线边缘粗糙度及线宽粗糙度进行数据可视化处理,如图 10 所示。

表 3 线边缘 LER、LWR 测量结果 (单位: nm)

Tab.3 Measurement results of line edge LER and LWR (Unit: nm)

Lineweight value	Roughness	40K×			60K×			80K×			Average value	Standard deviation
		Up	Middle	Down	Up	Middle	Down	Up	Middle	Down		
500	σ_L	1.3	1.3	1.6	3.2	3.4	3.5	3.7	3.0	2.7	2.6	0.9
	σ_R	2.2	2.4	2.9	2.8	3.5	2.3	4.1	2.6	2.0	2.8	0.6
	σ_{LWR}	2.2	1.9	3.2	4.1	3.9	3.5	5.3	6.5	4.2	3.9	1.3
200	σ_L	1.3	1.5	1.3	3.3	2.6	2.7	3.4	3.0	3.1	2.5	0.8
	σ_R	2.6	1.1	2.9	2.1	3.5	1.6	1.7	1.7	2.7	2.2	0.7
	σ_{LWR}	2.4	1.5	3.2	4.1	4.2	2.4	3.9	4.0	3.7	3.3	0.9
100	σ_L	1.0	0.9	0.8	3.7	3.4	2.7	3.1	2.9	2.2	2.3	1.1
	σ_R	2.4	1.0	0.9	3.6	3.5	1.3	3.1	2.5	2.3	2.3	1.0
	σ_{LWR}	1.7	0.8	1.0	4.8	3.9	2.3	4.0	4.1	2.8	2.8	1.4

由测量结果可知,测量结果具有较好的一致性,说明基于图像处理的方法得到的 LER 测量结果是可靠的。使用多层膜沉积技术制备的名义值为 500、200、100 nm 的线宽样片,线边缘的均方根粗糙度值 σ_{LER} 分别为 2.7、2.35、2.3 nm, σ_{LWR} 分别为 3.9、3.3、2.8 nm。由图 9 可知,不同尺寸线宽,在不同位置、不同放大倍率下测量的线边缘粗糙度波动范围相对较

小,测量值相对一致,线宽变化小, σ_{LER} 标准差平均值为 0.85, σ_{LWR} 标准差平均值为 1.2,这说明该方法制备的线宽样片边缘较为平整,线宽分布相对均匀,具有良好的均匀性与一致性。反映了多层膜沉积技术能够较好地控制线宽的制备,使得样片中的线宽值相对稳定且具有良好地边缘特性。

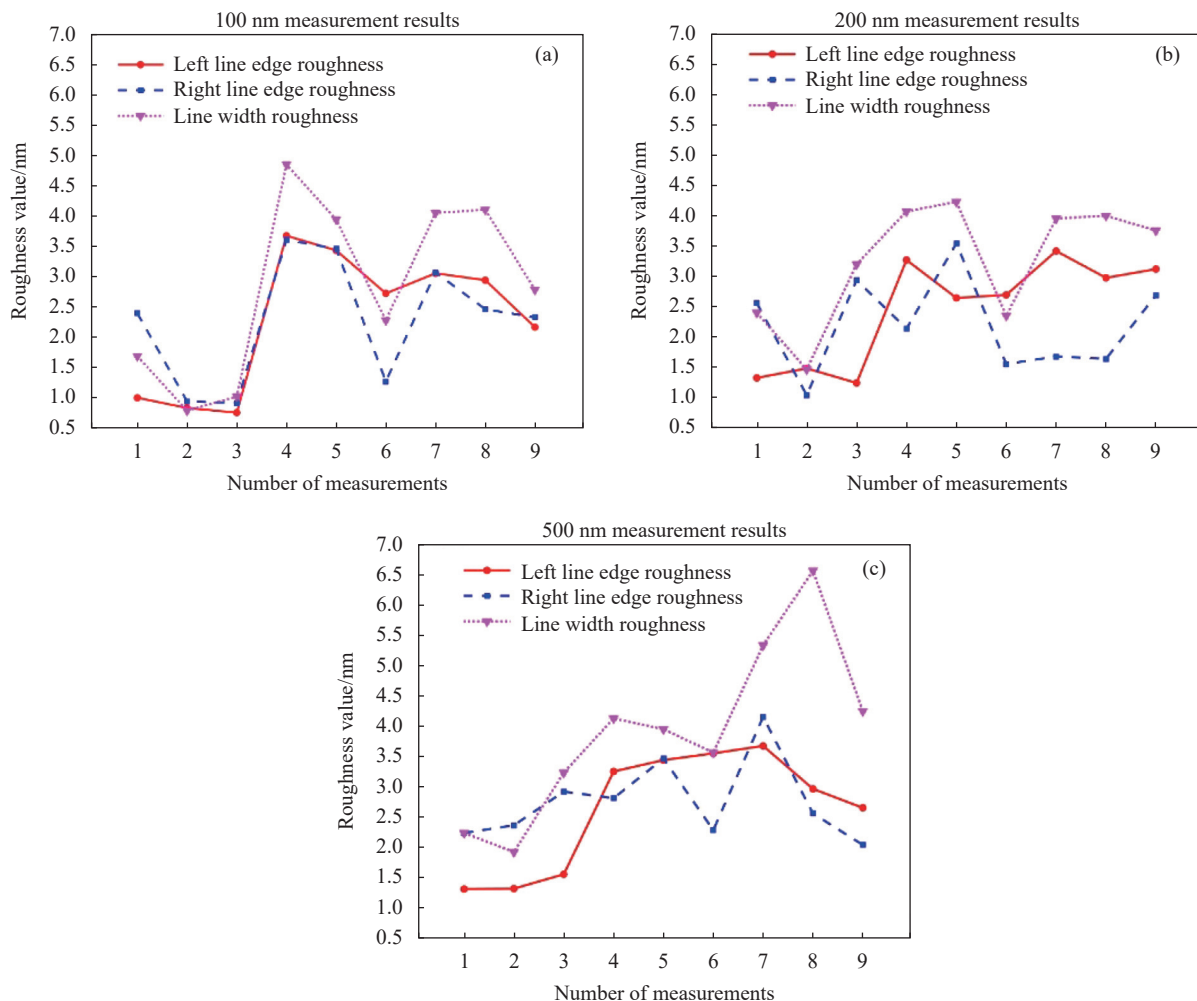


图 10 (a)~(c) 分别为 100、200、500 nm 左、右线边缘粗糙度以及线宽粗糙度

Fig.10 (a)-(c) are 100 nm, 200 nm, 500 nm left and right line edge roughness and line width roughness respectively

5 结 论

文中提出的基于自溯源光栅标准物质的 SEM 量值溯源与放大倍率校准方法, 缩短了溯源链, 降低了量值溯源过程中引入的溯源误差, 提高了 SEM 测量的精确性和可靠性, 为量值传递扁平化提供了一种可能。通过对线边缘粗糙度、线宽粗糙度的测量与分析, 使得对线宽标准样片的表征更加全面、准确, 有效评估了线宽标准样片的质量与其研制技术水平, 为优化加工工艺和改进线宽样片制备提供有益参考。后续进一步讨论线宽尺寸为百纳米以下的线宽标准样片其粗糙度水平, 有助于更好地应对更小尺度下的挑战和需求, 推动纳米科技和微纳加工领域的应用和发展。

参考文献:

- [1] Bu W H, Xia Z L, Zhao Z G, et al. Development of Integrated circuit Industrial technologies in the post-moore era [J]. *Science and Technology Fore-sight*, 2022, 1(3): 20-41.
- [2] Yazgi S G, Ivanov T, Holz M, et al. Line edge roughness metrology software [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2020, 38(1): 012602.
- [3] Neisser M. International roadmap for devices and systems lithography roadmap [J]. *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 2021, 20(4): 044601.
- [4] Gao S T. Study on measurement atomic force microscope (AFM)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [5] Anold H W, 沈建波. 亚微米光刻的线宽测量技术[J]. 微电子技术, 1995, 23(6): 90-97.
- [6] Papavieros G, Constantoudis V. Line edge roughness measurement through SEM images: effects of image digitization

- and their mitigation[C]//SPIE, 2017, 10446: 104-114.
- [7] Misumi I, Kumagai K, Kizu R. Pitch calibration of standard nanoscale for uncertainty reduction of certified reference materials for SEM image sharpness evaluation and magnification calibration [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2022, 10(4): 044010.
- [8] Deng X, Li T B, Cheng X B. Self-traceable grating reference material and application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2608-2625. (in Chinese)
- [9] Zhao L, Han G Z, Zhang X D, et al. Tracking type line width standard sample based on multilayer film deposition [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(12): 1549-1553. (in Chinese)
- [10] Wu Ziruo, Cai Yanni, Wang Xingrui, et al. Investigation of AFM tip characterization based on multilayer gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0213001. (in Chinese)
- [11] Jiang Z D, Wang C Y, Yang S M. Preparation and typical measurement and characterization of nanostructures [J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, 15(1): 15-20.
- [12] Dai G L, Koenders L, Fluegge J, et al. Two approaches for realizing traceability in nanoscale dimensional metrology [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 091407.
- [13] 葛广路, 吴晓春, 赵蕊. 纳米标准样品国内外研究进展[J]. *中国标准化*, 2007(9): 10-13.
- [14] Tortonese M, Prochazka J, Konicek P, et al. 100-nm-pitch standard characterization for metrology applications[C]//Metrology, Inspection, and Process Control for Microtopography XVI, SPIE, 2002, 4689: 558-564.
- [15] Zhou J X, Chen Z Y. Study on three micron-level grids pattern verified reference material used for magnification calibration of SEM [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2005(3): 185-191. (in Chinese)
- [16] 周剑雄, 陈振宇. 微米-亚微米级扫描电镜图像放大倍率校准标样的研制报告[J]. *电子显微学报*, 2006(S1): 149-150.
- [17] McClelland J J, Scholten R E, Palm E C, et al. Laser-focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, 262(5135): 877-880.
- [18] Deng X, Li T B, Lei L H, et al. Fabrication and measurement of traceable pitch standard with a big area at trans-scale [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 147-151.
- [19] JJF 1916—2021 扫描电子显微镜校准规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [20] Zhang Qiang. Research on the effect of line width measurement on nano-scale[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] Li Ning. Research on measurement and characterization method of nano-scale semiconductor line roughness[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [22] Leunissen L H A, Lawrence W G, Ercken M. Line edge roughness: Experimental results related to a two-parameter model [J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73: 265-270.
- [23] Zhao X Z, Li N, Zhou F Q, et al. Influence factors of line edge roughness measured by AFM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(4): 839-848. (in Chinese)

Research on fine characterization technology of key parameters of line width of Si/SiO₂ multilayer film

Chu Xiaoyao^{1,2,3}, Shen Yaoqiong^{2,3}, Liu Liqin^{2,3}, Zou Wenzhe^{2,3}, Guan Yuqing^{2,3}, Guo Chuangwei^{2,3},
Zhang Yujie^{2,3}, Liang Lijie^{1,2,3}, Kong Ming¹, Lei Lihua^{2,3*}

(1. College of Metrology and Testing Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Online Testing and Control Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract:

Objective As the key parameters of line width, line edge roughness (LER) and line width roughness (LWR) are important indicators of the quality of line width standard samples. The accuracy of LER and LWR is important for characterizing the reliability and uniformity of line width standard materials. Inspection is very important. Through the measurement and characterization of LER and LWR, the quality label technology level of line width standard samples can be effectively evaluated. Due to the problem of magnification in the measurement method of

SEM, the measurement and characterization of LER and LWR have trays. Therefore, before using SEM to measure the line width, it is necessary to adjust the magnification of SEM with standard substances in advance.

Methods With the self-traceable grating reference material as the standard of mass transmission (Fig.2), SEM is used to scan the self-traceable grating reference material, and the grating period measurement value of the self-traceable grating is obtained (Fig.3). It is compared with the actual grating period value, and the SEM calibration factor is obtained to realize the direct traceability and magnification calibration of the scanning electron microscope. The calibrated SEM is used to measure the different values of the multilayer film line width standard samples in different areas and different magnifications. The image processing technology is used to determine the position of the line edge and the average line edge based on the least squares fitting method. The root mean square roughness of the amplitude quantization parameter is calculated for LER and LWR (Fig.4).

Results and Discussions The calibration of different magnifications of SEM is realized, and the calibration factors under different magnifications are obtained, which ensures the accuracy and traceability of the measurement results and shortens the traceability chain. The measurement results of line widths of different sizes are basically the same at different positions and different magnifications (Tab.2, Fig.8), the fluctuation range of line edge roughness is relatively small, the measured values are relatively consistent, and the change of line width is small (Tab.3, Fig.9); It shows that the edge of the line width sample is relatively smooth, the line width distribution is relatively uniform, and has good uniformity and consistency, which shows that the Si/SiO₂ multilayer film deposition technology has the advantages in controlling the line width size and edge characteristics.

Conclusions The SEM value traceability and magnification calibration method based on the self-traceable grating standard material shortens the traceability chain, reduces the traceability error introduced in the process of value traceability, improves the accuracy and reliability of SEM measurement, and provides a possibility for the flattening of the value transfer gradually. Through the measurement and analysis of line edge roughness and line width roughness, accurate characterization of line width and edge characteristics is achieved, and metrological support is provided for high-precision nanoscale measurement and microelectronics manufacturing fields.

Key words: self-traceable reference material; SEM magnification; line edge roughness; line width roughness; multilayer film line width

Funding projects: Excellent Academic/Technical Leader Program of Shanghai (21XD1425000)