

文章编号 1004-924X(2009)04-0839-10

使用原子力显微镜测量刻线边缘粗糙度的影响因素

赵学增, 李 宁, 周法权, 李洪波

(哈尔滨工业大学 机械电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了满足微电子制造技术中不断提高的刻线边缘粗糙度测量与控制精度的要求, 对使用原子力显微镜 (AFM) 测量刻线边缘粗糙度的影响因素进行了研究。基于图像处理技术从单晶硅刻线样本的 AFM 测量图像中提取出线边缘粗糙度, 并确定出其量化表征的参数。然后, 根据线边缘粗糙度测量与表征的特点, 对各种影响因素, 包括探针针尖尺寸与形状的非理想性、AFM 扫描图像的噪声、扫描采样间隔、压电晶体驱动精度、悬臂梁振动以及线边缘检测算法中的自由参数等进行了理论和实验分析, 并分别提出了抑制及修正的方法。研究表明, 在分析各种可能导致测量误差的影响因素的基础上, 消除或减小其影响, 可以提高刻线边缘粗糙度测量的准确度, 为实现纳米尺度刻线形貌测量的精度要求提供理论与方法上的支持。

关键词: 纳米测量; 线边缘粗糙度; 原子力显微镜; 测量误差分析

中图分类号: TG84; TH161; TH742.9 **文献标识码:** A

Influence factors of line edge roughness measured by AFM

ZHAO Xue-zeng, LI Ning, ZHOU Fa-quan, Li Hong-bo

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the measuring precision and controlling precision of the Line Edge Roughness (LER) in microelectronics fabrication technologies, the influence factors of LER measurements for semiconductors using Atomic Force Microscope (AFM) is studied. Firstly, the LER features are extracted from an AFM image of single crystal silicon based on image processing techniques, and the parameters are determined to quantitatively characterize the LER features. Then, according to the characteristics of LER measurement and characterization method, the influence factors of LER measurements using AFM, including the nonideal properties of the sizes and shapes of probe tips, the signal noises of AFM images, scan sampling intervals, the driving precision of piezoelectricity, cantilever oscillation and the free parameters of edge detection algorithm and so on, are analyzed theoretically and experimentally, and the methods for restraining and amending the measuring errors are respectively proposed. The study indicates that a more precise measurement result for LERs using AFM can be obtained by eliminating or reducing the influences of various factors on measuring errors by proposed methods, which can provide a theoretical and methodologic support for improving the accuracy of nanometer-scale line structure topographic measurement.

Key words: nanometrology; Line Edge Roughness (LER); Atomic Force Microscope (AFM); measurement error analysis

收稿日期: 2008-06-20; 修订日期: 2008-07-28.

基金项目: 2003 年教育部留学回国人员科研启动基金资助项目; 哈尔滨工业大学校基金资助项目 (No. HIT. 2002.

1 引言

随着微电子技术和微制造业的迅速发展,半导体芯片的极限尺寸测量已进入纳米级。根据国际半导体技术发展路线图(ITRS2006 版)的规划,到 2013 年刻线的半节距(线宽)将达到 32 nm,线宽粗糙度的 3σ 值达到 1.0 nm^[1]。在集成电路制造过程中,线边缘粗糙度(Line Edge Roughness, LER)最初出现在用来作为掩模的光致抗蚀剂上,通过一系列光刻工艺的加工步骤转移到刻蚀后的线条,最终与半导体材料的本身特性一起形成不规则的刻线形貌,从而对器件的电气性能产生影响,并给器件匹配带来很大困难^[2-3]。而且,LER 在不断减小的线宽加工误差中所占的比重不断增加,已成为影响刻线各种测量精度指标的重要因素^[4]。因此线边缘粗糙度的测量与控制已成为光刻工艺和集成电路制造业关注的热点问题之一。

原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)能够以纳米级分辨率(横向和纵向的分辨率分别为 0.1 nm 和 0.01 nm)获得物体表面的三维图像,并具有对测量环境要求低、被测样本适应性广的特点^[5-6]。AFM 的这些特性使其成为解决刻线边缘粗糙度测量及评估问题最有效的仪器。但是,在使用 AFM 测量的过程中,存在各种可能导致测量误差的因素,这些因素对 LER 测量的影响各不相同,因此,如果能够消除或减小其中较大的影响因素,将会在一定程度上提高线边缘粗糙度测量的准确度。

本文对使用 AFM 测量刻线边缘粗糙度的各种影响因素进行了研究。基于从单晶硅刻线样本的 AFM 测量图像中提取的刻线边缘粗糙度的量化表征参数,对各种可能导致测量误差的影响因素进行了理论和实验分析,并在此基础上提出了相应的抑制及修正方法。

2 LER 测量与表征方法

测量仪器选用 NanoScope IIIa 型 AFM,成像采用轻敲模式,扫描时探针沿微悬臂方向运动,扫描速率大约是 0.66 $\mu\text{m/s}$ 。这种 AFM 在 X、Y、Z 3 个测量方向上用扫描压电管定位,依靠激光对悬臂和探针的位置变化进行检测,从而实现 Z 向

驱动的闭环反馈控制。工作时,探针沿 X 向快速扫描一个截面之后,再沿 Y 向移动一定距离扫描下一个截面,从而得到物体表面的三维图像。图 1 为 Nanoscope IIIa 型 AFM 扫描方式以及刻线形貌测量坐标轴定义示意图。

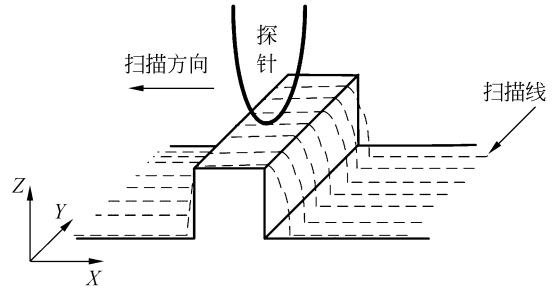


图 1 Nanoscope IIIa 型 AFM 扫描方式示意图

Fig. 1 Schematic of scan mode of Nanoscope IIIa AFM

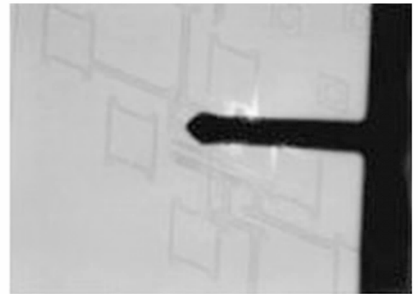


图 2 测量样本的光学图像

Fig. 2 Optical image of sample

选用由美国国家标准和技术研究院(NIST)电子电气工程实验室(EEL)制作的纳米尺度刻线试样作为测量样本,它是在绝缘氧化物上单晶硅(SIMOX)刻蚀而成的。图 2 给出了其中一个典型单元的设计图案。这个单元是 n 型的 SIMOX 晶片(密度为 $6.5 \times 10^{17} \text{ g/cm}^3$)。晶片是埋在距离上表面约 250 nm、下面厚度为 200 nm 的单晶硅。晶片的上表面是(110)平面,样本线的方向是沿着 $[\bar{1}\bar{1}2]$,根据晶体几何学,样本线的边墙则具有 $\{111\}$ 。线宽设计成从 250 nm 到 2 500 nm 的一系列,选择其中设计线宽为 1 000 nm 的进行测量。

线边缘粗糙度是一个描述由加工工艺和材料本身特性引起的刻线侧墙表面形貌微观不规则程度的物理量^[7]。根据 AFM 的成像原理可知,AFM 对样本进行扫描后,得到的是一幅描述扫

描像素点高度信息的图像,如图 3 所示。三维侧墙信息可以看成是不同高度上的线粗糙度的叠加。首先采用图像处理技术中的边缘检测方法确定出包含整体侧墙信息的线边缘,将侧墙轮廓与平行于基准面的高度截面相交得到的线粗糙度看作是侧墙粗糙度沿 Z 方向在样本测量基准面上的投影分量。然后通过采用设置高度阈值的方法确定出某个平行于测量基准面的刻线截面,分析截面边缘得出双边或单边的线边缘沿刻线宽度方向(X 方向)的变化。图 4 为从一个 AFM 测量图像中提取出的单边 LER 特征。

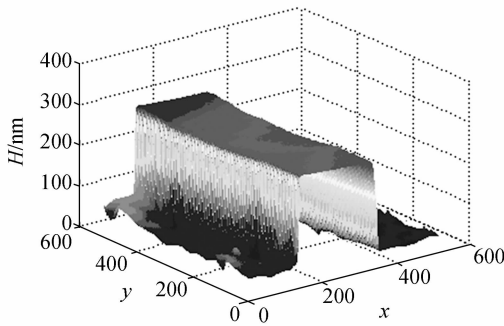


图 3 AFM 测量数据的 MATLAB 图像

Fig. 3 MATLAB image of sample data by AFM

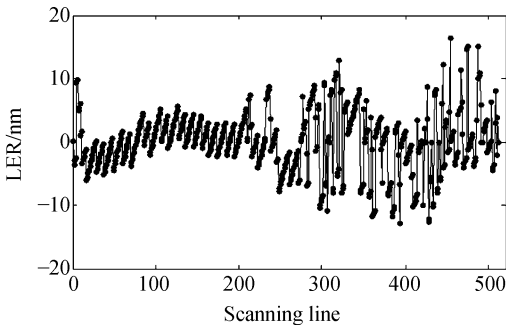


图 4 AFM 测量图像中提取出的单边 LER 特征

Fig. 4 LER feature of single edge extracted by AFM measurement

LER 测量的目的就是确定刻线边缘点及平均线边缘,并计算它们之间的偏差。测量分析的内容应该包括以下 3 方面的信息:幅值、空间频率以及边缘轮廓数据的相关性分析。本文采用以下两种数据分析方法对 LER 进行量化表征,以此为依据来分析使用 AFM 测量 LER 的影响因素。

(1)线边缘粗糙度的幅值参数均方根粗糙度(Root Mean Square, RMS)值 σ 可以通过下式给出^[8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta X_i^2}, \Delta X_i = x_i - \bar{X}, \quad (1)$$

这里 x_i 表示第 i 个边缘点的位置, \bar{X} 为平均线边缘, N 为采样点数;

(2)除了 RMS 粗糙度值 σ ,采用基于分形与尺度分析的高度相关函数可以确定出粗糙度指数 α 、相关长度 ξ ,这 3 个表征参数可以提供较完整的线边缘粗糙度特征的信息^[9-11]。

高度相关函数 $G(r)$ 量化了不同间距的线边缘与侧墙方向上的垂直高度值(也就是波动量)之间的相关性。假设边缘点的数目为 N ,扫描间隔为 d ,高度相关函数 $G(r = md)$ 定义为:

$$G(md) = \left[\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (\Delta X_{i+m} - \Delta X_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

这里 m 表示正整数。 $G(r)$ 的幂定律状态表示线边缘粗糙度特征具有分形性质,即边缘轮廓在不同方向上伸展(或收缩)时保持统计意义上的不变性。该幂定律性质稳定在一具体值 $\sqrt{2}\sigma$ 附近。相关长度 ξ 为 $G(r)$ 增长到 $\sqrt{1-1/e}\sqrt{2}\sigma$ 时的 r 值,它决定了不同间距的线边缘波动量具有相关性的范围。对 $r \gg \xi$,认为没有相关性;对 $r < \xi$ 时的相关程度用粗糙度指数 α 来描述: $G(r) = r^\alpha$ 。粗糙度指数 α 给出了 $r < \xi$ 时线边缘波动量的相关性增长速率,随着距离 r 的增长, α 趋近于 0。由于较小的 r 值对应的线边缘波动量相当于 LER 的高频分量,所以参数 α 给出了粗糙度中高频成分的测量,即 α 值越低,粗糙度的高频成分越重要。

3 影响因素分析

3.1 探针针尖尺寸与形状的非理想性

首先,采用理论模型来估计针尖尺寸对粗糙度测量的影响^[12]。图 5 是采用 AFM 测量具有理想正弦曲线轮廓粗糙度表面的示意图,其中以圆形表示探针针尖末端。

理想情况下,接触点应该始终位于 x_0 处,但实际上接触点总会与 x_0 位置存在偏差(实际位置

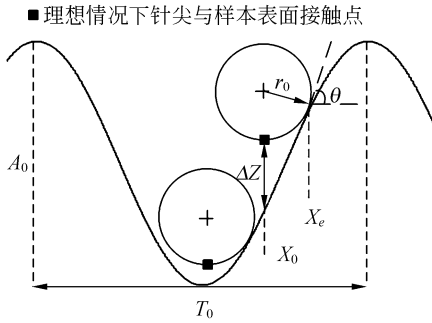


图 5 探针针尖尺寸对粗糙度测量结果影响的建模分析参数

Fig. 5 Modeling parameters of effect of tip size on roughness measurement

为 x_e)。图中定义的主要参数包括:轮廓幅值 A_0 、空间周期 T_0 、针尖半径 r_0 、针尖与轮廓实际接触点的倾斜角 θ 。通过这些参数可以得到 X 向和 Z 向的测量误差表达式:

$$\Delta X = x_e - x_0 = r_0 \sin \theta, \quad (3)$$

$$\Delta Z = A_0 \left(\sin \frac{2\pi}{T_0} x_e - \sin \frac{2\pi}{T_0} x_0 \right) - r_0 (1 - \cos \theta), \quad (4)$$

其中,

$$\theta = \arctan \left(A_0 \frac{2\pi}{T_0} \cos \frac{2\pi}{T_0} x_e \right). \quad (5)$$

选取 $A_0 = 5 \text{ nm}$, $T_0 = 100 \text{ nm}$, 针尖半径 r_0 分别为 80、16 和 8 nm, 得出 RMS 粗糙度值的测量结果分别为 4.87、3.88 和 3.60 nm, 与理论上的 3.54 nm 相比, 测量误差分别为 37.7%、9.6% 和 1.6%。从结果可知, 对给定特征的样本, 依赖于针尖半径 r_0 , 粗糙度测量误差发生明显改变。为了得到刻线底部、侧墙及顶部表面形貌较精确的测量图像, 探针针尖的半径应该越小越好。

对采用 AFM 的刻线形貌测量来说, 探针对样本表面的扫描过程实际上是探针针尖的轮廓与被测样本表面特征的卷积过程, 这种作用对 LER 的测量精度具有十分显著的影响。图 6 为 AFM 探针对刻线形貌测量影响的示意图, 其中, 探针针尖的半锥角为 φ , 刻线侧墙倾角为 β 。AFM 测量得到的刻线边缘形貌图像与侧墙倾角 β 和探针针尖夹角 φ 密切相关。当 $\beta < (90^\circ - \varphi)$ 时, 探针的扫描结果能够正确反映刻线边缘形貌。在相同采样间隔 Δx 下, 随着侧墙倾角 β 的增大, 位于刻线边缘表面的采样点将减少, 能够获得的刻线边缘形

貌信息也会随之减少。当 $\beta \geq (90^\circ - \varphi)$ 时, 扫描结果则不能真实反映刻线边缘形貌。因此, 针尖的形状和尺寸对 LER 测量的影响必须得到重视。

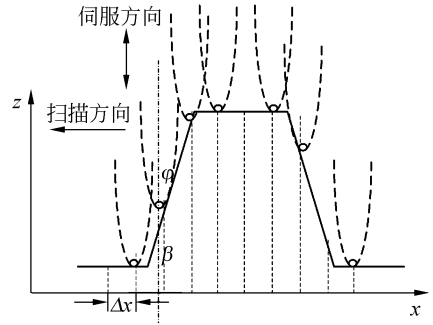


图 6 AFM 探针对刻线形貌测量的影响

Fig. 6 Influence of AFM tip on topography measurement

为了考察探针针尖对 LER 测量的影响, 使用普通探针、Micromasch 公司制造的 Ultrasharp 系列 NSC15 探针以及碳纳米管探针分别对同一样本进行测量。普通探针针尖半径约为 40 nm。Ultrasharp 探针具有 $20 \sim 25^\circ$ 的倾斜锥角, 探针高 $15 \sim 20 \mu\text{m}$, 曲率半径 $< 10 \text{ nm}$, 比传统探针倾斜锥角更尖锐, 曲率半径更小。碳纳米管探针一般具有较小的曲率半径 ($0.5 \sim 2 \text{ nm}$) 和较大的纵横比 ($10 \sim 10^3$), 同时强度也很大。图 7 为分别采用 3 种探针对同一样本进行测量得到的 LER 幅值参数 (RMS 值)。

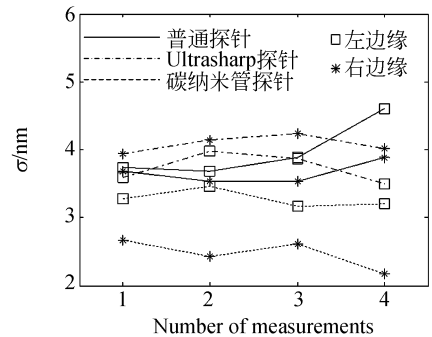


图 7 采用 3 种探针测量得到的 LER 幅值参数

Fig. 7 LER amplitude parameters obtained by three kinds of probes

结果表明, 相同探针的测量结果一致性比较好, 但不同探针的测量结果之间存在一定的差异。主要原因有: (1) 使用不同探针的测量时间间隔相对较长, 样本上附着灰尘、水汽等污染物; (2) 测量

时样本的测量位置可能发生变化;(3)探针针尖的半径越大,被测刻线的底部由于针尖接触不到而丢失的信息越多,测量图像中刻线侧墙的倾斜度越大。因此,不同探针针尖引起的测量图像的不同程度的变形最终造成了 LER 测量结果上的差异。

与普通探针和 UltraSharp 探针的结果相比,使用碳纳米管探针得到的 LER 幅值参数较小,并呈现出明显的左边缘粗糙度值大于右边缘的趋势。这是由于往普通探针上粘贴碳纳米管时难以避免的倾斜角度造成的,这样会使测量结果中仅有一侧刻线形貌较为理想。但与另外两种探针相比,使用更尖更细的碳纳米管探针可以获得更多的侧墙表面边缘点的信息,使高度阈值化处理更为容易。

目前,主要采用数学形态学的方法估计探针的形态,通过重建扫描图像来消除探针的膨胀作用。但在实际上,由于探针因素造成的测量图像失真总有一些误差是不确定和无法修正的。如(1)样本扫描过程中探针没有接触到的盲区无法由形态学方法恢复出样本的实际形貌;(2)由于扫描过程中 AFM 悬臂梁的振动和弯曲,扫描过程中的探针形貌与初始状态相比会发生变化,因此对样本的膨胀作用与初始状态也有所不同。另外,还有研究者着重开发具有特殊形状的探针(如靴子状针尖)用于得到更真实可靠的刻线形貌^[13-14]。

3.2 AFM 扫描图像的噪声

AFM 的扫描图像是通过探针对样本表面形貌的跟踪得到的,主要含有由微悬臂引入的高斯噪声、电子设备引入的干扰、脉冲噪声、上冲噪声和下冲噪声等。噪声会使图像失真,因此,有必要对扫描图像进行降噪处理。对 AFM 图像,可以通过开发离线处理程序来提高图像的性能,进而对 LER 进行分析与表征。这些处理主要包括校正图像波动化的算法(从图像中除去可用二次多项式拟合的数据)、采用滤波技术剔除某些频率成分或增强周期化特征(分别采用带通滤波器和快速傅里叶变换方法实现)、放大局部特征等等。由于线边缘粗糙度的频带和 AFM 测量中存在的各种噪声的频带相互混叠,研究适当的抑制及去除噪声的方法是 AFM 测量 LER 的重要问题。

为了研究滤波去噪对线边缘粗糙度测量的影

响,对一组使用碳纳米管探针测量的 AFM 图像分别进行了均值滤波和中值滤波。与原始图像的测量结果进行比较,分别得到图像的高度相关函数 $G(r)$,并计算出 LER 的特征参数,如图 8 所示。

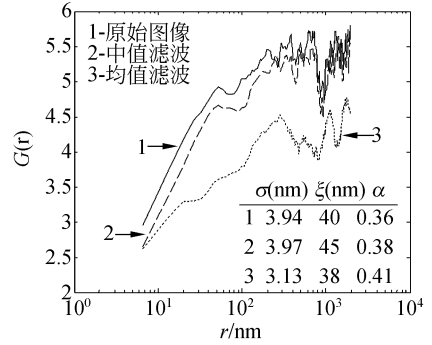


图 8 使用不同滤波方法的 LER 高度相关函数 $G(r)$ 的比较

Fig. 8 Comparison of height correlation functions $G(r)$ of LER by different types of noise smoothing filters

结果表明,采用不同滤波方法产生的图像和原始图像相比,相关长度 ξ 变化不大。均值滤波作为一种线性滤波器,平滑和抑制与信号不相关的随机噪声有较好的作用,但对与信号有关的噪声和脉冲噪声的抑制效果较差,且在平滑噪声的同时也会平滑和模糊图像边缘。同时,由于均值滤波的低通特性截断了 LER 的高频成分,从而使处理后的 RMS 粗糙度值 σ 减小,粗糙度指数 α 增大。中值滤波是一种去除噪声的非线性处理方法,在某些条件下可以在去除噪声的同时较好地保护图像边缘,并能够有效地抑制图像中孤立点和线段的干扰,从而对滤波后图像的线边缘进行阈值化处理的效果更好。由于对随机噪声的抑制能力不如均值滤波,中值滤波后的 LER 表征参数计算结果略大于均值滤波,且比较接近原始图像,保留了 LER 的高频成分。因此,尽量减少滤波造成的图像细节损失,应采用中值滤波,而对高斯噪声最有效的办法是均值滤波。

一般来说,应根据 AFM 扫描图像的特点,分析是否需要滤波去噪,如果需要,选择合适的滤波方法。理论上,任何一种噪声滤波处理都必然会对原图像造成影响,可能导致样本特征的丢失或引入人为的测量误差,从而对 LER 的测量结

果(尤其是 LER 高频成分)产生影响。

3.3 扫描采样间隔

一般在操作仪器时已经限制了采样点的数目 N_y , AFM 测量时选取的扫描长度 S_y 决定了 Y 方向上的采样间隔 Δy 为:

$$\Delta y = S_y / (N_y - 1), \quad (6)$$

如果一条扫描线上包括 N_x 个扫描点, 并且扫描范围是 S_x , 则 X 方向上的扫描间隔 Δx 为:

$$\Delta x = S_x / (N_x - 1). \quad (7)$$

扫描采样间隔决定了 LER 测量的分辨率以及 LER 频谱中的高频限制 f_{min} ($f_{min} = 1/\Delta$)。图 9 为采用边缘检测和阈值处理后得到的某一高度平面上刻线边缘数据的示意图。实际上, 真实样本刻线边缘的点未必正好在采样点位置上, 从而会产生来源于采样分辨率的测量误差, 其极限误差是扫描采样的间隔, 呈均匀分布。

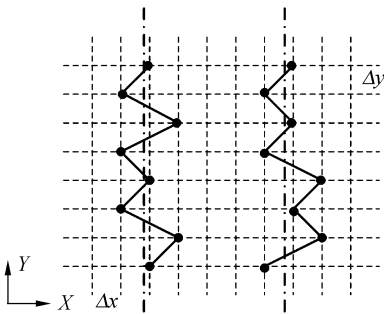


图 9 某一高度平面上线边缘数据示意图

Fig. 9 Schematic of line edge data on the plane of certain height

为了进一步研究扫描间隔对 LER 测量的影响, 在 AFM 测量分辨率为 512×512 的条件下, 选取扫描长度分别为 450 nm 和 3 360 nm 的测量数据, 用高度相关函数法计算出表征参数, 如图 10 所示。可以看出, 由于扫描长度为 450 nm 的测量数据具有更高的测量分辨率, 因此提取出的 LER 包含更多的高频信息。但是较小的扫描长度会使观测区域受到限制, 从而缺少对 LER 低频信息的描述。反映在计算出的特征参数上为 RMS 值 σ 和粗糙度指数 α 较小, 相关长度 ξ 较大。

当 AFM 采样间隔 Δx 不变时, 对于固定高度的刻线结构而言, 侧墙角越大, 能够获取的边缘表面测量数据越少, 线边缘粗糙度的空间波长就越大。如果刻线测量不能满足粗糙度高频截止频

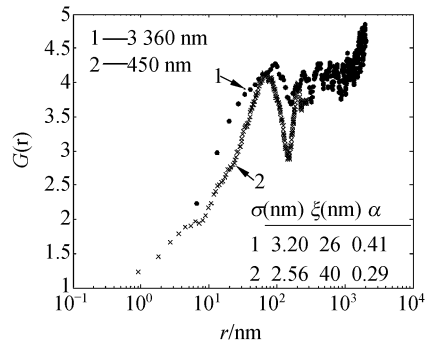


图 10 采用不同扫描长度的 LER 高度相关函数 $G(r)$ 的比较

Fig. 10 Comparison of height correlation functions $G(r)$ of LER by different ξ scan lengths

率的要求, 则必须通过减小扫描长度 S_y 来减小 AFM 的扫描间隔 Δy , 以获取满足粗糙度空间频率要求的测量数据。但这也会减小被测表面区域, 从而减小表面形貌测量的低频截止频率, 同样不能较好地获得刻线边缘形貌的测量结果。因此, 在 AFM 仪器分辨率一定的情况下, 扫描采样间隔对 LER 测量结果有很大影响。

在规定 LER 测量标准时, 应当综合考虑各种情况, 选择出合适的扫描长度, 使之既可对足够的区域进行测量, 又能精细地观测到表面的局部微观形貌。针对具体的测量样本, 建议在保证能够对低频 LER 进行有效测量和评估的基础上, 尽量选择较小的扫描长度, 从而提高 LER 测量的分辨率。

3.4 压电晶体驱动精度

AFM 在 X、Y、Z 3 个方向的位移采用压电元件来驱动, 其原理是利用压电陶瓷材料的逆压电效应或磁致伸缩效应, 通过改变输入电压获得在一定方向的微位移改变量。压电陶瓷驱动器的非线性、迟滞效应、蠕变、沿不同坐标轴运动的交叉耦合等非理想特性会使其在驱动电压下的真实步距与理论值之间存在一定的差异, 从而导致位移误差^[15-16]。对使用 AFM 的刻线表面形貌测量来说, 压电晶体的驱动精度是限制测量精度的重要因素。

非线性是指压电驱动器变形量与输入电压变化量不为线性关系的现象, 这会导致线性表面的曲线化和样本特征间隔的变形。迟滞效应是指在同一电压下由于正反行程产生的压电陶瓷伸长量

和减小量不同的现象。迟滞性引入了 X、Y、Z 方向上位移的误判,会导致水平或垂直方向上的测量受到扫描方向的影响。蠕变是指加在压电驱动器上的电压不再变化时,位移值随着时间缓慢变化,在一定时间之后才会达到稳定值的特性。这会使压电驱动器在 X、Y 平面上出现定位丢失,引起 AFM 扫描样本的边缘特性在 Z 方向上出现尖峰,同样会给测量引入误差。扫描器的几何特征会导致水平和垂直方向扫描位置变化的交叉耦合,即当扫描管在 X-Y 平面上移动时,扫描驱动器的弧度会引起 Z 方向产生变化量,因此,交叉耦合会引起 AFM 图像的曲线化。

由于 AFM 压电驱动器存在上述非理想特性,测量图像会产生变形。基于单晶硅的物理特征以及测量样本严格的加工条件,可以认为各参考点高度在统计意义下相等^[17]。为了减小压电晶体驱动精度的影响,对 AFM 测量图像进行预处理:计算每条扫描线最低的 10 个高度值,以它们的平均值作为参考高度,计算该扫描线上其他扫描点对该参考高度值的相对高度,形成校正后的图像。

选取 10 组样本刻线的 AFM 测量数据,分别计算预处理前后测量数据的 LER 幅值参数,如图 11 所示。结果表明,测量数据经预处理后,有效地减小了图像中较大的刻线形貌突变数据对结果的影响。因此,得到的 LER 幅值参数较小,并基本保持了原始数据测量结果的变化趋势,预处理前后测量数据 LER 幅值参数的计算结果平均误差为 20%。

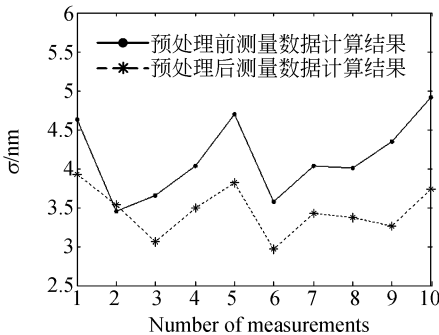


图 11 预处理前后 LER 幅值参数比较

Fig. 11 Comparison of LER amplitude parameters before and after preprocessing

3.5 悬臂梁振动

AFM 以轻敲模式进行测量时,微悬臂在谐振频率处以较大振幅(>100 nm)振动,针尖随微悬臂的自由端在上、下止点之间振动。由于测量过程中微悬臂产生变形使针尖在扫描方向上产生位移,从而会影响 LER 测量精度。为了减小测量误差,需要减小微悬臂自由端的振动偏转角。根据 AFM 微悬臂的振动模型^[18],微悬臂的自由端振动偏转角与激励频率成正比,而与微悬臂长度成反比。因此,在轻敲模式下应该尽量采用较低的激励频率和较长的微悬臂进行测量。

3.6 线边缘检测方法的自由参数

AFM 获得的刻线形貌图像需要采用边缘检测法来确定线边缘数据,然后通过选取高度阈值确定出某一高度截面上的线边缘点,根据这些边缘数据点获得评价线边缘粗糙度的评定基准——平均线边缘,以边缘点与平均线边缘之间的偏差来量化表征线边缘粗糙度。因此,边缘检测算法中的自由参数(边缘检测算子、高度阈值、数据拟合方法等)的选择对 LER 的计算结果有显著的影响。

如何在 AFM 测量的基础上,提取出具有高精度和高准确性的刻线边缘,是进行 LER 表征与计算的关键。边缘提取方法对 LER 测量结果产生影响,其误差为刻线底部和顶部在测量图像中的投影区域。采用数字图像处理技术中合适的边缘检测算子可以确定出 AFM 图像中刻线边缘点的位置。边缘检测算子检查每个像素的邻域并对灰度变化率进行量化,通常也包括方向的确定。其中 Sobel 算子的微分作用和平滑作用能够加强边缘并突出边缘的急剧变化,从而使线边缘很好的锐化。由于粗糙度在测量意义上是采样数据的高频分量,所以采用 Sobel 算子的边缘检测方法能比较真实地反映线边缘粗糙度信息。由于刻线形貌测量的复杂性和扫描图像的非规则性,还需要进一步研究更适用于刻线形貌测量的边缘检测方法。

显然,AFM 扫描图像中不同高度截面的边缘是不同的,进而根据位于不同高度截面上的边缘计算出的 LER 也不一样。在 AFM 常规扫描方式下,由于受到探针针尖几何尺寸的影响,当低

于一定高度值时,不能检测到足够的刻线边缘点。但是在刻线顶部的测量过程中,总是针尖顶端与样本相接触,从而顶部刻线截面包含更多的边缘信息并能反映出较真实的刻线形貌。为了分析高度阈值对 LER 幅值参数的影响,选取 10 个接近顶部的高度阈值对 5 组测量数据进行分析和比较,如图 12 所示,其中刻线的顶部高度值约为 350 nm。结果表明,LER 的幅值参数对低于线高 90% 的高度阈值变化敏感,当高度阈值大于线高的 90% 时,LER 幅值稳定在某一个恒值附近。这个结果符合 AFM 测量特点和刻线样本特征。

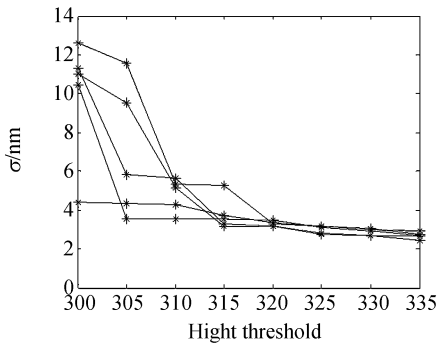


图 12 高度阈值对 LER 幅值参数的影响

Fig. 12 Effect of height thresholds on LER amplitude parameters

平均线边缘是评定线边缘粗糙度参数的基准线,对以后各参数的计算起着决定性作用。基于不同的基准线计算出的边缘粗糙度表征参数也是不同的。因此,建立标准的 LER 测量方法必须对如何得到平均线边缘做出合理有效的规定,才能使不同测量过程之间的比对具有实际意义。目前,一般采用最小二乘拟合方法确定平均线边缘,

它是指在取样长度内,使线边缘轮廓上各点到此线的轮廓偏距 x_i (沿测量方向轮廓上的点至基准线的距离)平方和为最小的线。

除此之外,测量过程中样本温度的波动会导致样本热胀冷缩,引起刻线形貌的变化,从而产生测量误差。一般认为温度的波动呈矩形分布。而且,图像漂移现象也会引起测量误差,可以通过采用自相关方法分析连续扫描的图像来确定漂移方向和速率,通过反馈控制来减小漂移的影响。

4 结 论

本文对使用 AFM 测量刻线边缘粗糙度的各种影响因素进行了研究,研究结果表明:基于图像处理技术可以从单晶硅刻线样本的 AFM 测量图像中提取出刻线边缘粗糙度,进而确定出线边缘粗糙度的量化表征参数;在使用 NanoScope IIIa 型 AFM 对设计线宽为 1 000 nm 的单晶硅刻线样本在不同测量条件下进行多次测量的基础上,根据线边缘粗糙度测量与表征的特点,对各种影响因素进行了理论和实验分析。这些影响因素包括探针针尖尺寸与形状的非理想性、AFM 扫描图像的噪声、扫描采样间隔、压电晶体驱动精度、悬臂梁振动以及线边缘检测算法中的自由参数等;针对各种影响因素,提出了相应的抑制及修正方法,从而在一定程度上提高了使用 AFM 测量 LER 的准确度,为满足微电子制造技术中不断提高的刻线形貌测量的精度要求提供了理论与方法支持。

参考文献:

[1] The International Technology Roadmap for Semiconductor [S/OL]. The Semiconductor Industry Association, San Jose, CA, 2006. <http://public.itrs.net>.

[2] GUNTHER N, HAMADEH E, NIEMANN D, *et al.*. Gate line edge roughness amplitude and frequency variation effects on intra die MOS device characteristics [J]. *Solid-State Electronics*, 2006,

50(6):1156-1163.

[3] XIONG S Y, BOKOR J. A simulation study of gate line edge roughness effects on doping profiles of short-channel MOSFET devices [J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2004, 51(2):228-232.

[4] YAAKOBVITZ B, COHEN Y, TSUR Y. Line edge roughness detection using deep UV light scattering [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(4):619-625.

[5] RODGERS M R, YASHAR F D. Recent develop-

- ments in atomic-force microscopy applicable to integrated circuit metrology [C]. *Proceedings of SPIE on Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control VI*, 1992, 1673: 544-551.
- [6] UKRAINTSEV V A, BAUM C, BAUM C, *et al.*. The role of AFM in semiconductor technology development: the 65 nm technology node and beyond [C]. *Proceedings of SPIE on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*, Bellingham, WA, 2005, 5752: 127-139.
- [7] 赵学增,李洪波,褚巍,等. 基于计量学的线边缘粗糙度定义[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(1): 214-218. ZHAO X Z, LI H B, CHU W, *et al.*. Definition of line edge roughness based on metrology [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 214-218. (in Chinese)
- [8] LEUNISSEN L H A, LAWRENCE W G, ERCKEN M. Line edge roughness: experimental results related to a two-parameter model [J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73-74: 265-270.
- [9] LAWRENCE W G. Spatial frequency analysis of line edge roughness in nine chemically related photoresist [J]. *Proceedings of SPIE on Advances in Resist Technology and Processing XX*, 2001, 5039: 713-724.
- [10] GOGOLIDES E, CONSTANTOUDIS V, PATSIS G P, *et al.*. A review of line edge roughness and surface nanotexture resulting from patterning processes [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4-9): 1067-1072.
- [11] CONSTANTOUDIS V, PATSIS G P, GOGOLIDES E. Photo-resist line-edge roughness analysis using scaling concepts [C]. *Proceedings of SPIE on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII*, 2003, 5038: 901-909.
- [12] FOUCHER J. From CD to 3D sidewall roughness analysis with 3D CD-AFM [C]. *Proceedings of SPIE on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*, Bellingham, WA, 2005, 5752: 966-976.
- [13] DAHLEN G, OSBORN M, LIU H C, *et al.*. Critical dimension AFM tip characterization and image reconstruction applied to the 45 nm node [C]. *Proceedings of SPIE on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX*, 2006, 6152: 61522R1-11.
- [14] MININNI L, FOUCHER J, FAURIE P. Advances in CD-AFM scan algorithm technology enabled improved CD metrology [C]. *Proceedings of SPIE on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXI*, 2007, 6518: 65183O1-10.
- [15] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究 [J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 26-32. ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [16] 曲东升,荣伟彬,孙立宁,等. 压电陶瓷微位移器件控制模型的研究 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 602-607. QU D SH, RONG W B, SUN L N, *et al.*. Research on the control model of piezoelectric micro-positioning actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 602-607. (in Chinese)
- [17] 李洪波,赵学增. 基于 AFM 单晶硅台阶线边缘粗糙度、顶表面和底表面粗糙度的测量 [J]. *南京理工大学学报*, 2007, 31(4): 478-481. LI H B, ZHAO X Z. Line edge roughness and top-bottom-surface roughness measurement of single-crystal-silicon step using AFM [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, 31(4): 478-481. (in Chinese)
- [18] 肖增文,赵学增,李洪波. AFM 轻敲模式中微悬臂振动的研究 [J]. *振动与冲击*, 2006, 25(5): 183-185. XIAO Z W, ZHAO X Z, LI H B. Research on vibration of piezoelectric micro cantilever in atomic force microscopy [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(5): 183-185. (in Chinese)

作者简介:



赵学增(1961—),男,黑龙江宾县人,教授,博士研究生导师,1982年、1986年和1994年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士和博士学位,主要从事机械电子工程领域的检测、控制和自动化技术的研究。E-mail:; zhaoxz@hope. hit. edu. cn.



周法权(1982—),男,江苏省盐城人,博士研究生,2004年、2006年分别于哈尔滨工业大学获学士及硕士学位,主要研究方向为原子力显微镜的控制系统设计。E-mail: akoo_ren@163. com



李 宁(1981—),女,河南郑州人,2003年、2005年分别于哈尔滨工业大学获学士和硕士学位。现为在读博士研究生,主要研究方向为纳米尺度几何量测量。E-mail: ningligood@gmail. com



李洪波(1970—),男,黑龙江省鸡西人,讲师,1992年、2001年、2006年分别于哈尔滨工业大学获学士、硕士和博士学位,主要研究方向为微纳尺度几何量溯源性计量和高精度温度检测及控制技术。E-mail: 13614516992@126. com

●下期预告

传输型立体测绘相机调焦机构设计与精度分析

王 智,张立平

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

传输型立体测绘相机受发射过程的振动、冲击以及复杂多变的空间温度、压力等环境的影响,相机的 CCD 靶面将不同程度的偏离相机的焦面,导致图像分辨率下降,相机的主点位置精度以及主距变化量直接影响地面目标定位精度。为了满足立体测绘相机地面像元分辨率和地面目标的定位精度,相机需设计有调焦环节用以补偿 CCD 靶面的离焦量。因此本文根据该相机光学结构的特点、相机的焦深,设计了一种基于凸轮导向的调焦机构,通过传动误差的分析及精度验证试验结果表明,该调焦机构的传动误差为 $\pm 1.71 \mu\text{m}$; CCD 靶面的直线性精度 X 方向 $11.2''$ 、Y 方向 $11.8''$; CCD 靶面绕光轴的旋转 $4.7''$,满足用户提出的精度要求。