

# 基于图像处理的线距测量方法

张晓东\*, 赵琳, 韩志国, 冯亚南, 李锁印

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051

**摘要** 关键尺寸扫描电镜(CD-SEM)是对微纳尺寸线距标准样片定标的标准器具。为提高标准样片的定标准确度,研究一种基于图像处理技术的测量算法。首先,对研制样片的特征进行分析;其次,研究线性近似算法和线距测量算法,并分别对 100 nm~10  $\mu\text{m}$  的线距标准样片进行测量;最后,利用纳米测量机进行对比实验研究。实验结果表明,线性近似算法的相对误差可以控制在 0.45% 以内,相比之下,线距测量算法的相对误差可控制在 0.35% 以内。因此,线距测量算法提高了线距的测量精度,为提高线距测量类仪器量值的可靠性、保证半导体器件制造精度提供了一种测量方案。

**关键词** 测量; 关键尺寸扫描电镜; 线距标准样片; 微纳尺寸; 线性近似算法; 图像处理

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011201

## Line Spacing Measurement Method Based on Image Processing

Zhang Xiaodong\*, Zhao Lin, Han Zhiguo, Feng Yanan, Li Suoyin

The 13th Institute of China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

**Abstract** The critical dimension scanning electron microscope (CD-SEM) is a standard instrument for standardizing micro- to nano-sized line spacing samples. To improve the calibration accuracy of samples, this paper studies a measurement algorithm based on image processing technology. First, the characteristics of the developed samples are analyzed. Second, the algorithms for micro- to nano-sized line spacing measurement and linear approximation are researched and the line spacing standard samples with a single period from 100 nm to  $\sim 10 \mu\text{m}$  are measured. Finally, a nano-measuring machine is used in comparative experiments. The experimental results show that the relative error of the linear approximation algorithm is controlled within 0.45%. In contrast, the relative error obtained by the line spacing measurement algorithm is controlled within 0.35%, thus improving the measurement accuracy of the line spacing. The algorithm provides a measurement scheme for improving the reliability of the line spacing measurement instrument and ensuring the precision of semiconductor device manufacturing.

**Key words** measurement; critical dimension scanning electron microscope; line spacing standard samples; micro-nano size; linear approximation algorithm; image processing

**OCIS codes** 120.3930; 120.3940; 120.6650

## 1 引言

随着微电子技术和半导体工艺的发展,对器件尺寸要求越来越小,相比之下对器件性能要求越来越高。在半导体器件中,台阶高度、薄膜厚度以及线距尺寸等几何量参数将直接影响器件的整体性能。例如,微波器件存在许多亚微米栅条,如果栅条线距的偏差超 15 nm 会严重影响器件的电特性,进而对器件造成隐患<sup>[1]</sup>。因此,保证线距尺寸量值的准确

性十分关键。国内外学者通常使用线距标准样片,来校准线距测量类仪器,并使用线距测量类仪器表征线距尺寸特征<sup>[2]</sup>。然而,线距标准样片对于光栅的直线度、稳定性等要求较高,大部分是由 VLSI 等国外公司研制,进而限制了国内微电子计量技术的发展。目前,针对线距标准样片的研制,同济大学等科研院所也展开了相关研究<sup>[3]</sup>,为解决半导体行业内线距测量类仪器的校准问题,该学校研制了一组微纳尺寸的线距标准样片。

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-12; 录用日期: 2019-06-24

\* E-mail: zxd\_tju\_edu@163.com

目前,一般采用关键尺寸扫描电镜(CD-SEM)自身携带的线性近似算法,对线距标准样片进行定标。但是,针对亚微米尺寸的线距标准样片,该算法的测量误差难以满足预期要求。为提高样片定标准确度,本文基于图像处理技术开展了对微纳尺寸线距测量算法的研究。该算法具有能实时测量、精度高的优点,对保证线距测量类仪器量值的可靠性,提升半导体工艺水平,提供了有效理论支撑<sup>[4]</sup>。

## 2 样片研制

经过相关工艺理论研究,采用半导体工艺制作线距标准样片,其中光刻技术是样片研制过程中的关键工艺。目前,成熟的光刻技术主要有投影光刻和电子束光刻。鉴于两种光刻技术的优劣,本文选用投影光刻工艺制作标称值为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的线距标准样片,选用具有高分辨率的电子束光刻技术加工标称值为 $100\sim 500\ \text{nm}$ 的线距标准样片。如图1所示,研制的线距标准样片呈现上窄下宽的结构。因为刻蚀工艺的局限性,难以保证光栅结构侧面的垂直性,这会对样片定标造成一定的困难。

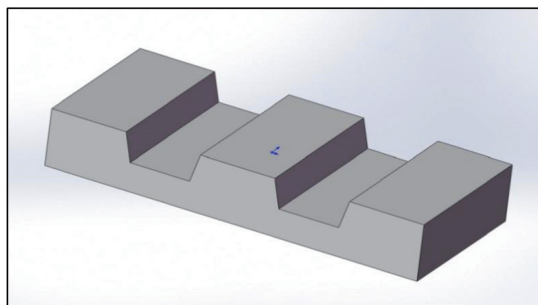


图1 微纳尺寸的线距标准样片

Fig. 1 Standard line spacing sample with micro-nano size

## 3 测量算法研究

### 3.1 测量过程

目前,主要采用CD-SEM测量系统对线距标准样片进行定标。该系统主要由计算机系统、SEM和机械传动装置等组成,如图2所示<sup>[5]</sup>。样片测量过程如下:首先,将研制的线距标准样片进行划片,并通过导电胶固定到制作的夹具上;其次,通过机械传动装置将样片送入CD-SEM腔体内;最后,通过相应程序采集样片在CD-SEM测量系统下的图像。

通过采集的图像可知,在CD-SEM测量系统下,上窄下宽结构的样片会形成一个灰度值渐变的

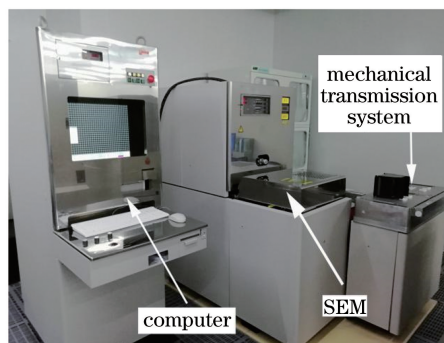


图2 CD-SEM测量系统

Fig. 2 CD-SEM measurement system

边缘区域。造成该现象的主要原因有:刻蚀工艺难以保证侧面的垂直性,扫描电镜下的光栅边缘存在衍射效应等。因此,如何准确获取光栅边缘的准确位置,对提高样片的定标准确度十分重要。如图3所示,基于国际上关于光栅周期的定义, $W$ 表示线距标准样片的单周期宽度。此外,将CD-SEM下的图像分成五个区域,即A、B、C、D、E。其中,区域C代表光栅的凸出结构,区域A和E代表光栅的凹陷结构,区域B和D为CD-SEM测量系统下的光栅边缘区域。

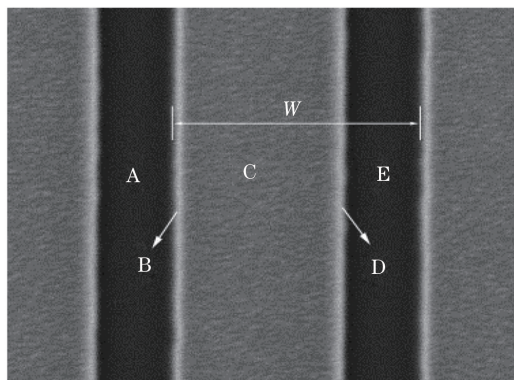


图3 CD-SEM下的样片

Fig. 3 Sample obtained by CD-SEM

针对区域A和B、E和D,边缘灰度值变化大,容易检测出边界位置。相比之下,针对区域B和C、C和D,边缘灰度值变化小,常规边缘检测算法难以有效检测出边界位置<sup>[6]</sup>。因此,为准确检测线距样片的边界位置,亟需开展边缘检测算法研究,来提高样片的定标准确度。

### 3.2 线性近似算法

CD-SEM测量系统是基于线性近似算法,对微纳尺寸的线距标准样片进行测量的。线性近似算法的基本原理<sup>[7]</sup>是:当二次电子信号探测到试样模型时,信号强度会发生明显变化,进而获取二次电子信号探测波形。若图像信噪比(SNR)相对差时,信号

波形会造成明显的振动,进而引起测量误差。因此,线性近似算法通过叠加二次电子信号噪声波线,平滑信号波形,来降低图像的信噪比。

$$s(n) = \frac{\sum_{i=-L}^L p(n+i)}{N}, \quad (1)$$

式中: $p(n)$ 表示平滑前的信号波形; $s(n)$ 表示平滑后的信号波形; $n$ 代表信号激励; $N$ 代表一段波长的长度 $L=(N-1)/2$ 。通过平滑二次信号波形,可获取信噪比较好的波形信号。针对该信号波形,选择最大倾斜角的切线为斜坡线,如图4所示。因此,可以通过导数关系计算斜坡线斜率,表达式为

$$g(m) = f(x+m) - f(x-m), \quad (2)$$

式中: $m$ 表示差分值大小。基于二次电子信号峰值波形,确定基线和基线起始点,如图5所示。通过斜坡线和基线检测出其检查点,然后基于待测样点位置数据、放大倍数和校正参数,完成微纳尺寸的光栅线距的测量<sup>[8]</sup>。

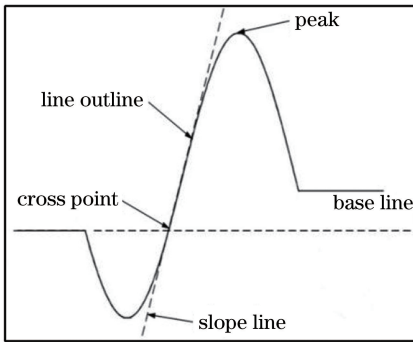


图4 斜线检测方法

Fig. 4 Oblique detection method

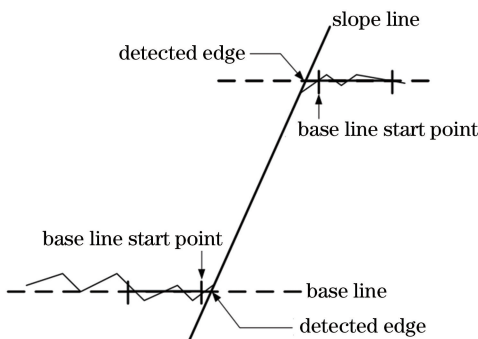


图5 基线检测方法

Fig. 5 Baseline detection method

### 3.3 线距测量算法

此外,本文研究了一种新的线距测量算法,并将该算法应用于线距标准样片的定标,进而提高测量准确度<sup>[9]</sup>。该算法基于统计学原理,通过检验图像两个区域数值差异性来获取图像边缘位置,进而计

算光栅线距。其中,将图像分为A和B两个区域,基于 $t$ 检验原理,研究一种边缘检测函数,即

$$T(A, B) = \frac{|\bar{A} - \bar{B}|}{\sqrt{\frac{S_A}{n_A} + \frac{S_B}{n_B} + \epsilon}}, \quad (3)$$

式中: $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 表示区域A和B的灰度均值; $n_A$ 和 $n_B$ 表示区域A和B的像素个数; $S_A$ 和 $S_B$ 表示区域A和B的灰度值方差; $\epsilon$ 表示函数值灵敏度。算法实现流程主要包括4步:1)通过Hough变换,检测待测光栅的方向与数据模板移动的区域<sup>[10]</sup>;2)通过边缘检测函数,计算图像波峰;3)将数据模板步长调校到亚像素,寻找边界的亚像素位置;4)基于亚像素位置,计算样片周期性光栅的线距。

## 4 实验与分析

### 4.1 算法实验

CD-SEM自身携带基于线性近似算法的程序,因此,针对100 nm~10  $\mu$ m的线距标准样片,可直接使用CD-SEM获取相应的测量数据,作为线性近似算法的测量结果。其次,CD-SEM测量系统可获取线距标准样片的图像信息,基于线距测量算法,对图像进行图像处理,进而获取样片的线距信息。针对线距标准样片,选取样片光栅特征的10个周期,并通过取平均值的方案,减少单周期光栅对实验结果的影响,测量结果如表1所示。

表1 两种算法的测量值

Table 1 Measurement values of two algorithms

Nominal value / $\mu$ m	Linear approximation algorithm / $\mu$ m	Line spacing measurement algorithm / $\mu$ m
0.1	0.0989	0.0990
0.2	0.1989	0.1991
0.5	0.4977	0.4987
1	0.9999	1.0005
2	2.0022	2.0009
5	5.0041	5.0038
10	9.9536	9.9736

### 4.2 纳米测量机实验

为了对比两种算法的优劣,采用纳米测量机(NMM)对研制的线距标准样片进行测量,并将其作为参照值。其中,NMM的测量与定位主要通过三个轴的激光干涉仪来实现,集成正交化的定位布局保证了激光干涉仪的测量轴正交点与被测样片的测量点重合,进而能最大程度地减小阿贝误差<sup>[11]</sup>。此外,NMM的白光测头是基于宽光谱光源的干涉

原理的,可溯源到激光波长,测量精度高,如图6所示。虽然NMM测量速度慢,但是精度较高,选择NMM系统测量值作为参照值,具有一定的可信性和说服力。

系统工作时,将100 nm~10  $\mu\text{m}$  线距标准样片依次放在NMM测量平台上,测量平台通过压电陶瓷驱动,进行纳米级精准移动,保证了样片光栅特征的快速循迹与定位。经过扫描,可重建样片光栅特征的三维形貌,进而计算光栅的线距值。同理,选取样片光栅特征的10个周期,并取平均值作为单周期测量值。此外,将NMM测量值作为参照值,通过

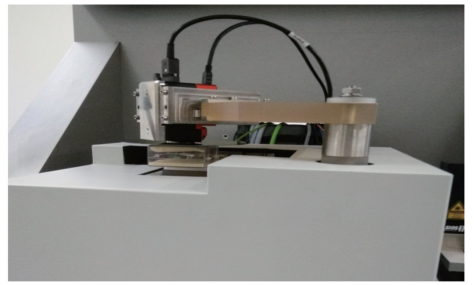


图6 NMM系统

Fig. 6 NMM system

计算两种算法的相对误差,来比较两种算法的优劣性,如表2所示。

表2 两种算法测量结果的对比

Table 2 Comparison of measurement results of two algorithms

Nominal value / $\mu\text{m}$	Measurement of NMM / $\mu\text{m}$	Relative error of linear approximation algorithm /%	Relative error of line spacing measurement algorithm /%
0.1	0.0993	0.403	0.302
0.2	0.1996	0.351	0.251
0.5	0.4998	0.420	0.220
1	1	0.010	0.050
2	2	0.110	0.045
5	5.003	0.022	0.016
10	9.999	0.454	0.254

实验结果表明,以NMM测量值为参照值,线性近似算法的相对误差维持在0.45%以内,相比之下,线距测量算法的相对误差维持在0.35%以内,测量精度得到一定程度的提高,故而验证了线距测量算法的有效性和合理性。此外,NMM测量精度虽然高,但是测量速度很慢,测量一组数据可能需要几个小时。相比之下,线距测量算法测量速度较快,可以在几分钟内完成一组样片的测量,而且具有自动检测边缘的功能,避免了手动操作引入的误差,为提高线距标准样片的定标准确度、样片光栅量值的准确与统一提供了一种理论方案。

## 5 结 论

为提高线距标准样片的定标准确度,基于图像处理技术,开展了相关测量算法的研究,包括CD-SEM的线性近似算法和线距测量算法。为比较两种算法的测量准确度,使用NMM对线距标准样片进行测量并作为参照。NMM可溯源到激光波长,对于样片光栅特征而言,NMM测量值作为参照值,具有一定可信度。实验结果表明,相较于线性近似算法,线距测量算法的测量准确度可以控制在0.35%以内,对于提高线距标准样片的定标准确度具有实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao L, Liu Q G, Liang F G, et al. Development of the micron grating sample and the evaluation of the key quality parameters [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(8): 537-541.  
赵琳, 刘庆纲, 梁法国, 等. 微米级光栅样片的研制及关键质量参数的评价[J]. *微纳电子技术*, 2015, 52(8): 537-541.
- [2] Shi C Y, Qian J, Tan H P, et al. Results from national institute of metrology in NANO5 2D grating comparison[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 110501.  
石春英, 钱进, 谭慧萍, 等. 二维纳米光栅国际比对结果[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 110501.
- [3] Wu Z R, Cai Y N, Wang X R, et al. Amorphous Si critical dimension structures with direct Si lattice calibration [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(3): 030601.
- [4] Li Y, Lei L H, Gao Q, et al. Research of the optical characterization method on the nano dimension standard sample[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2012, 49(6): 406-412.  
李源, 雷李华, 高婧, 等. 纳米尺度标准样片光学表

- 征方法的研究[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(6): 406-412.
- [5] Gan M H, Wu W Q, Long Q W. A high-precision automatically method of line width measurement based on image processing [J]. Printed Circuit Information, 2011, 19(5): 66-70.  
甘明辉, 吴伟钦, 龙庆文. 一种基于图像处理的高精度自动线宽测量方法[J]. 印制电路信息, 2011, 19(5): 66-70.
- [6] Bouchara F, Bertrand M, Ramdani S, et al. Sub-pixel edge fitting using B-spline[M] //Gagalowicz A, Philips W. Computer vision/computer graphics collaboration techniques. Lecture notes in computer science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, 4418: 353-364.
- [7] Hinz S. Fast and subpixel precise blob detection and attribution [C] // IEEE International Conference on Image Processing 2005, September 14, 2005, Genova, Italy. New York: IEEE, 2005: 8856906.
- [8] Dai G L, Hahm K, Bosse H, et al. Comparison of line width calibration using critical dimension atomic force microscopes between PTB and NIST [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6): 065010.
- [9] Dai G L, Zhu F, Heidelmann M, et al. Development and characterisation of a new line width reference material[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(11): 115006.
- [10] Hussain D, Ahmad K, Song J M, et al. Advances in the atomic force microscopy for critical dimension metrology [ J ]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(1): 012001.
- [11] Kramar J A, Dixson R, Orji N G. Scanning probe microscope dimensional metrology at NIST [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(2): 024001.