

紫外扫描线宽测量系统的研究

张明凯^{1,2}, 高思田², 卢荣胜¹, 李 伟², 李 琪², 钱晓力^{2,3}

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013; 3. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 设计了一套紫外光学线宽测量系统用于微纳线宽、栅格的测量。在原有深紫外显微镜的基础上, 设计了新的探测光路, 在成像面设置针孔接收来自样品的光信号, 用样品扫描方式来得到样品轮廓。该装置使用紫外光学检测设备减小对象的衍射尺寸, 提高检测分辨率, 使用激光干涉仪对被测线宽进行溯源。用白光 CCD 图像实现自动聚焦, 确定待测线宽样板平面位置。采用压电陶瓷纳米台在轴向采取序列图像, 用聚焦评价函数来判定聚焦清晰度。通过对多种自动聚焦算法性能的比较, 采用小波分解自动聚焦算法。确定了紫外成像系统的小波基、分解层数、小波消失矩等参数。

关键词: 紫外光学显微镜; 自动对焦; 小波

中图分类号: TP113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0625-07

Ultraviolet scanning linewidth measuring system

Zhang Mingkai^{1,2}, Gao Sitian², Lu Rongsheng¹, Li Wei², Li Qi², Qian Xiaoli^{2,3}

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China; 3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: An ultraviolet imaging system was designed for quantitative characterization of micro- and nano-structures. A beam splitter inserted in the detection path reflected the signal from sample to a pinhole on the imaging plane. The sample was scanned to obtain the sample profile. The DUV light from apparatus was utilized to reduce the diffraction limit size and enhance resolution; and laser interferometer was used to trace the line width to international SI unit. CCD image was used to auto-focus the sample. Sequence images were captured along axial direction and the focus sharpness was determined by focus evaluation function. Algorithms were compared and wavelet algorithm for critical dimension auto-focused in used the ultraviolet measurement system. For wavelet, decomposition level, wavelet vanishing moments and other parameters for UV imaging system was determined.

Key words: ultraviolet optical microscope; auto-focus; wavelet

收稿日期: 2014-06-14; 修订日期: 2014-07-17

基金项目: 国家科技部支撑计划(2011BAK15B00)

作者简介: 张明凯(1989-), 男, 硕士生, 主要从事纳米测量方面的研究。Email: zhangmk@nim.ac.cn

导师简介: 高思田(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事纳米计量、长度计量方面的研究。Email: gaost@nim.ac.cn

0 引言

目前在芯片和半导体制造产业中,芯片和 MEMS 器件的特征尺寸已普遍达到了 100 nm 以下,此时器件的几何结构误差对性能影响显著^[1]。为了控制芯片线路缺陷发生率,需要控制用作芯片曝光的掩模板的线宽准确性,并将其溯源到国际长度基准的 SI 国际单位,实现量值溯源统一。现在对于掩膜版刻线宽度的检测方法有扫描探针显微镜、扫描电子显微镜和光学显微镜等。相比较其他的计量型线宽掩膜版测量设备,紫外光学显微镜在微纳二维几何结构(线宽、线间距)测量方面具有可视化、非接触、高稳定性和全自动高速测量的优点^[2];同时,紫外光学方法在检测原理上与芯片曝光原理最为接近,因此其不仅可以准确测量微纳几何尺寸,也可以较准确地估计掩膜版在实际应用中可能出现的缺陷^[3]。

目前的商用紫外显微镜量值无法直接溯源到激光波长,不能满足测量刻线宽度标定样板的要求。国际上一些国家计量院已经研制了计量型紫外光学显微镜。德国 PTB 的计量型紫外显微镜基于 Zeiss Axiotron 显微镜进行改造^[4],物镜数值孔径 NA 为 0.9,采用 365 nm 透射紫外光源掩膜版刻线进行照明^[5],照明数值孔径 NA 为 0.2。样品承载为二维位移平台,最终由光电倍增管(PMT)接收光强进行光电转换。该设备可以检测线宽范围在 0.3~200 μm ,扩展不确定度 $U=20$ nm。美国 NIST 的计量型紫外光学显微镜由光纤光源、六自由度摩擦球型连接平台、干涉仪计量框架、共焦显微镜、CCD 和 PMT 成像系统构成。NIST 平台的优势在于提高了刚度,降低了内部应力,此外 NIST 的设备采用 365 nm 紫外光源^[6]。该设备正在改造,预计不确定度 U 为 10 nm。国内也正在开展这方面的研究,预期测量范围为 0.3~50 μm ,测量不确定度为 20 nm。

该文主要介绍紫外光学线宽测量成像系统的探测系统结构以及自动对焦算法。

1 测量系统

1.1 测量方法

由于光学显微镜的分辨率受限于光学衍射极限,可以通过提高显微镜物镜的数值孔径,缩短照明

波长来提高其分辨率。目前显微物镜的数值孔径最大为 1.4,这个数值在理论上和技术上都达到了极限,因此,从可见光向紫外线过渡就成为了提升测量分辨率的另一方法。该文研究使用 248 nm 波长的紫外光照明以及 NA 为 0.9 的紫外物镜做大范围测量,数值孔径 NA 同样为 0.9 的白光 CCD 实现样品的自动聚焦。

图 1 为紫外线宽测量系统的照明光路信号接收光路示意图。灯丝光源通过科勒照明系统出射平行光,在样品台上呈 50 μm 均匀照明光斑。照明光斑透射照明在待测样品之后进入 100 倍紫外物镜,然后通过显微镜光路,从成像透镜处出射,被紫外分光镜按 1:1 的比例分为两路,一路信号进入 UV-CCD 用于大范围扫描,找到需要测量的线宽位置。另一路经小孔到达 PMT,用于线宽测量。扫描光路如图 1 所示。对于单线宽测量,使用压电陶瓷驱动的纳米位移台进行扫描。位移台的位移值由激光干涉仪测量获得。测量信号同时由高分辨率的紫外 CCD 和紫外光电倍增管接收。光电倍增管测量得到信号的位置函数,因此这种测量方式能够将测量结果通过干涉仪溯源到长度基准。

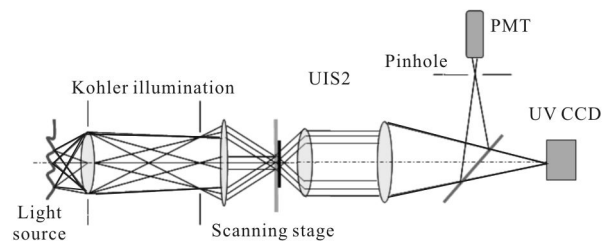


图 1 扫描测量系统示意图

Fig.1 Figure of scanning measurement system

1.2 装置结构

实际的紫外光学显微测量系统中有两套成像系统(如图 2 所示)。其中,低倍大视场的白光成像用于标准线宽样板的定位和自动聚焦。紫外探测系统由紫外 CCD 成像和 PMT 两种光电接收元件通过分光光路同时实现对光强的接收。其中,CCD 图像用于系统对样品的大范围测量和寻找待测线宽位置,PMT 的作用是通过小孔接收物平面中心点处的光强,从而获得微纳尺寸的轮廓。在载物台移动过程中,通过将 PMT 的采样信号与干涉仪的外触信号同步,可以获得溯源的线宽尺寸。

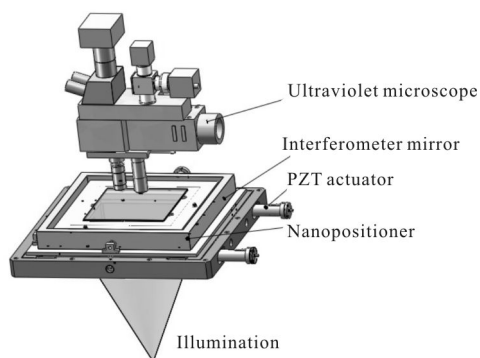


图 2 系统结构图

Fig.2 Figure of system construction

探测部分结构如图 3 所示,通过一个二维的柔性铰链调整座安装分光镜,用于调整 X,Y 方向光路,确保光轴经过小孔中心。设计了光轴方向的调节筒,通过旋转外壁,带动内部小孔在光轴方向移动,调节小孔位于像平面位置。

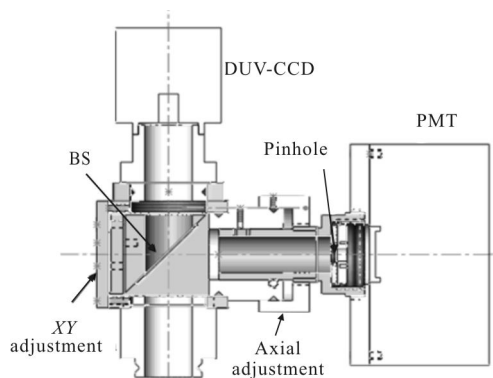


图 3 分光光路示意图

Fig.3 Beam splitter mechanical figure

在 PMT 扫描光路中,影响线宽分辨率测量的因素不仅包含 PMT 自身对光强的灵敏度,同时也包含了小孔尺寸的确定。小孔孔径过大, PMT 接收的光强是样本平面上一个较宽范围内的积分,从而降低了分辨率;小孔孔径过小,则影响接收光强的强度,使明暗对比度下降,同样降低了分辨率。因此小孔的尺寸应当与物平面上艾里斑直径(物平面上两点可分辨的最小距离)经过物镜放大后在像平面上对应的艾里斑直径具有相同的量级,同时小孔的尺寸还应当对测量移动具有最大的灵敏度,因此小孔的边界应该在像面上艾里峰值两侧的导数极值处。

M 为系统的总放大倍率, M_0 为紫外物镜放大倍率 $100\times$, M_1 为 tube 的放大倍率

$$M=M_0\times M_1=250 \quad (1)$$

因此当显微镜两点间衍射极限为 ϵ 时,在像平面上小孔的直径可以通过求解物面上衍射极限在像面上的对应值得到。其中 ϵ 为 80 nm , 因此,在像平面上有小孔直径 D :

$$D=M\epsilon=20\text{ }\mu\text{m} \quad (2)$$

2 CCD 自动对焦算法

数字图像的自动对焦原理,主要是通过 PZT 驱动样品在 Z 向移动, CCD 采取序列图像,通过评价函数计算序列图像中每一幅的函数值,从而确定最清晰的聚焦位置。

2.1 对焦评价函数

自动聚焦的关键在于图像清晰度评价函数的选择,理想的对焦评价函数应该满足:单峰性、无偏性、具有较强的抗噪声能力、对焦速度快等特点。目前的对焦评价函数主要有以下几类:频谱函数、熵函数、梯度函数等^[7-8]。

这些对焦评价函数中,有些是根据经验提出的,物理意义不明确,另外一些物理意义非常明确,如功率谱分析等,它们都与傅里叶变换直接相关或等价,但是,即使是这些基于傅里叶变换的对焦评价函数,仍难以区分完全正焦的图像与只有微小离焦量的图像,这是由傅里叶变换本身潜在的缺点所决定的^[9]。傅里叶变换使用的是正弦曲线作为它的正交基函数,对于积分变换来说,这些函数都在两个方向无限扩展,离散傅里叶变换的基向量在它们的整个空间为非零值,也就是说,它们并不是紧支集,这使得傅里叶变换以及一些其他变化,在分析包含瞬态或局部化成分的信号和图像时,得不到最佳结果。为了克服这些缺陷,应使用有限宽度基函数进行变换的方法,这就是小波变化。

小波变化是时间频率的局部化分析,它通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化,最终达到高频处时间细分,低频处频率细分,能自动适应时频信号分析的要求,从而可聚焦到信号的任意细节,图像的离焦模糊变化可以看成是点扩散函数与原始参考图像卷积的结果,离焦过程中,随着图像的模糊,能量逐渐向低频段分布,高频能量逐渐减少,而正交小波变换能量不变,所以小波分解系数也呈相应的变化趋势。因此,当图像最清晰时,小波分解后的高

频系数最大,随着图像的模糊,高频系数随之减小,低频系数变化与之相反^[9]。

根据高频系数和低频系数的变化特点,可将评价函数定义为:

$$W(x,y) = \frac{W_H^2(x,y)}{W_L^2(x,y)} \quad (3)$$

$W_H^2(x,y)$ 和 $W_L^2(x,y)$ 分别为:

$$W_H^2(x,y) = \left[\sum_{(x,y) \in S_{HL}} X_{HL}^2(x,y) + \sum_{(x,y) \in S_{HLI}} X_{HLI}^2(x,y) + \sum_{(x,y) \in S_{HLII}} X_{HLII}^2(x,y) \right] \quad (4)$$

$$W_L^2(x,y) = \sum_{(x,y) \in S_{LLK}} X_{LLK}^2(x,y) \quad (5)$$

S_{LHI} 、 S_{HLI} 、 S_{HLII} 分别为分解层为 I 高频段的分解窗口,相应的高频系数为 X_{LHI} 、 X_{HLI} 、 X_{HLII} 。 X_{LLK} 为 K 层的低频系数。小波分解如示意图 4 所示。

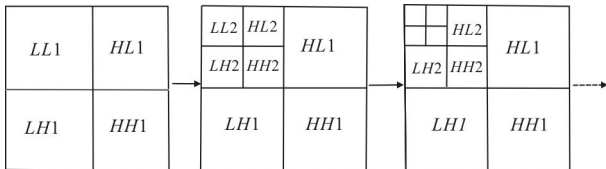


图 4 小波分解示意图

Fig.4 Wavelet decomposition figure

2.2 实验

实验装置采用 OLYMPUS MX51 显微镜(成像物镜为 100×, NA=0.9), 样品由 Npoint N-XYZ100B 三维纳米位移台驱动,行程 10 μm。由于此物镜的景深为 0.7 μm,0.7 μm 以内的图片从显微成像品质的角度来讲没有区别,经过小波评价函数计算分别以 0.7 μm 和 0.5 μm 为步长进行自动对焦,聚焦最清晰的两幅图片之间的函数值之比为 96%,而 0.5 μm 为步长,相邻两幅图片的函数值之比为 90%,所以 0.7 μm 以内也完全可以实现自动聚焦,故笔者采用 0.5 μm 的步长移动样品沿轴向运动。图 5 为小波的聚焦评价函数分析,可以看出小波聚焦评价函数的聚焦能力是完全满足聚焦准确性的。第十一幅图像通过人眼观察也是最清晰的图像。

自动聚焦系统的反馈控制关键是确定评价函数的峰值位置,通过上面的小波算法确定该函数的最大值位置,然后通过一维寻优便可确定正确的聚焦位置。在轴向采集序列图像,通过上述小波算法,求出评价函数最大值位置,驱动样品到达该位置完成聚焦。

通过各种方法比较,对整幅图像进行对焦函数

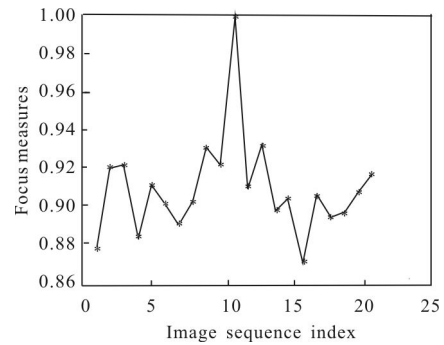


图 5 步长 0.5 μm 时小波聚焦评价函数

Fig.5 Wavelet evaluation function when step is 0.5 μm

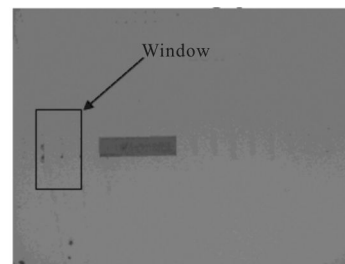


图 6 待测线宽样品

Fig.6 Linewidth samples

评价可以看出,在整幅图像中,各种聚焦评价函数都能较准确地计算出函数值最大的一幅图像(聚焦最清晰的图像)。图 7、图 8 为纳米台步长为 1 μm 时,相机采集序列图像之后做自动对焦分析。图 7 分别为 Soble 算子、Laplac 算子、能量谱聚焦评价函数值。但是,在自动聚焦过程中,笔者不仅要追求聚焦的精度,也要追求效率。文中的聚焦评价函数计算是以像素个数为基础的。对于一序列 1 280×960 的图像,计算耗时大,效率低。

聚焦窗口越小,聚焦速度越快。但是普通方法中,聚焦窗口越小,图像包含的信息越少,聚焦的准

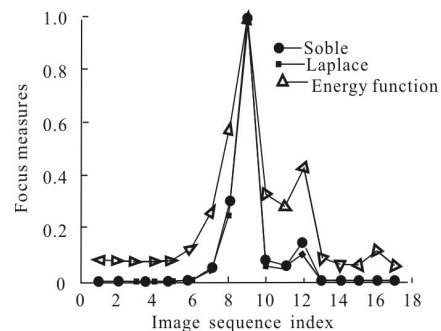


图 7 各种聚焦评价函数比较

Fig.7 Comparison of different algorithms for auto-focus evaluation function

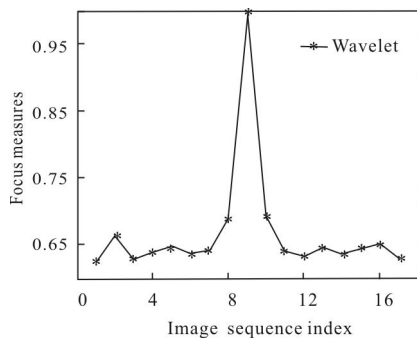


图 8 小波聚焦评价函数

Fig.8 Wavelet auto-focus evaluation function

确性和稳定性随之下降,但是小波的聚焦精度基本不会发生变化。因为被测样品全部为纳米级线宽,所以在拍摄的整幅图像上选取横向窗口,这样包含所有线宽的信息,又能降低计算量,提高聚焦效率。

图 9 显示了窗口宽度为 $960 \times 20, 960 \times 50, 960 \times 100$ 时各种聚焦评价函数的聚焦效果。图(a)为小波,图(b)为 Laplace 算子,图(c)为 Soble 算子,图(d)为能量谱。由图可以明显看出,小波聚焦评价函数明显比其他聚焦评价函数稳定,并且准确判断出最清晰的聚焦图像,通过这个实验再次验证了小波^[10]聚焦评价函数的鲁棒性。在后期紫外 CCD 大范围扫描待测线宽的自动聚焦的过程中可以采用这种算法,而其他各种聚焦评价在小窗口中都有可能可能出现峰值误判的情况,或者基本上无法判断评价函数的最大值。

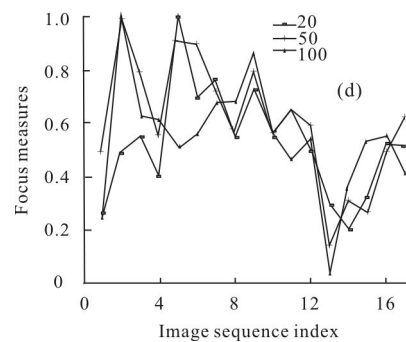
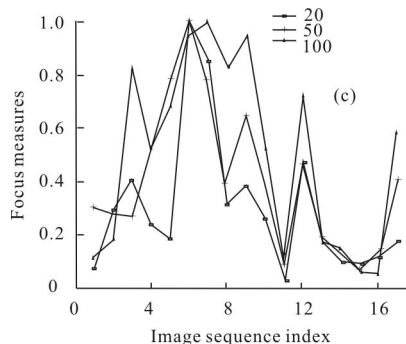


图 9 不同评价函数下的聚焦效果

Fig.9 Focus results in different evaluation function

这样就无法确定最清晰的聚焦图像。分析其原因就是这几种方法本身对图像信息的提取量比较少,相对于整幅图像,有多个线宽特征的时候,聚焦评价函数较为容易地计算出最大值。而在选取特定窗口的情况下,窗口越小,包含的线宽特性信息越少,峰值误判的情况更严重,所以会出现无法聚焦的情况。

2.2.1 小波基的选择

选用 Daubechies (DB)、Symlets (SYM) 和 Coiflets (COIF) 三个常用小波基做对比实验^[11](如图 10 所示),优选合适显微视觉聚焦的小波基,为了方便比较,三个不同小波采用相同的消失矩 3,分解层数为 4,采用

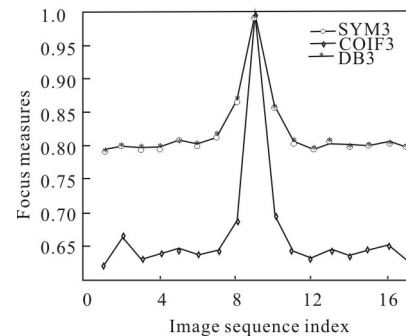
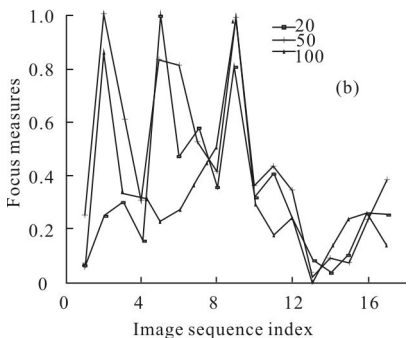
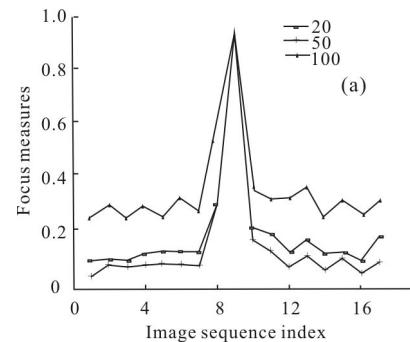


图 10 小波基的选取

Fig.10 Wavelet selected

提出的清晰度评价函数对图像序列进行分析。从图中可以明显看出,COIF3 小波聚焦的分辨率最好。因此笔者选择 COIF 小波基。

2.2.2 消失矩阶数的选择

小波函数具有 N 阶消失矩意味着小于 N 次的多项式与小波做内积的结果为 $\int_R x^N \phi(x) dx$ 一般光滑函数 $f(t)$ 都能用多项式来表示^[11],小波的消失矩阶数越高,光滑函数在小波展开式中的零元就越多,消失矩决定了该小波逼近光滑函数的能力。并不是消失矩阶数越高就越好,随着消失矩增加其支撑长度变宽,运算量增加。如图 11 所示,消失矩为 3,分析结果便有较高的分辨率,再增加消失矩的阶数,分辨率提高不明显。

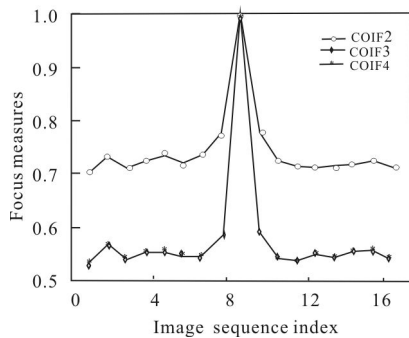


图 11 小波消失矩的选取

Fig.11 Wavelet vanishing moments

2.2.3 分解层数的选择

取分解层数 3,4,5 进行分析。随着分解层数增加,评价函数的聚焦精度呈下降趋势,而分辨率逐层提高^[9]。相比之下,第四层到第五层聚焦精度下降最大。综合考虑聚焦精度和分辨率,选择分解层数为 5。

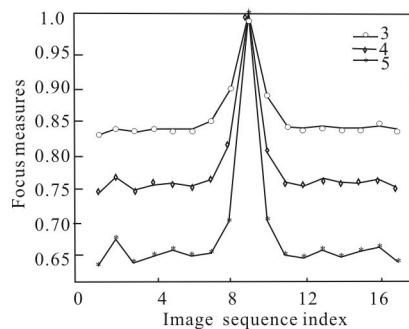


图 12 小波分解层数的选取

Fig.12 Wavelet decomposition level

2.2.4 抗噪性能

此 CCD 自身背景色较暗,并且,待测样品为线宽。该样品由于其本身的特殊性,对照明光有散射,这就导致了在 CCD 上所成的像背景噪声很大。传统的灰度差分法、梯度算子等很难辨识在线宽处的灰度变化,即通过对图像的像素灰度的评价无法确认是否达到聚焦清晰。有可能出现多峰以及误判的情况,而出现误判的原因主要是待测特征:纳米线宽本身的高频分量低,而背景噪声的高频信息盖过了样品本身的高频信息,所以,会出现峰值误判。针对这一现象,笔者采取了对图像进行一些预处理的手段,通过 Canny 算子对线宽进行边缘提取,选择适当的阈值,可以对背景噪声进行滤波,通过多次试验,当阈值为 0.5 时,滤波效果最好,故选取 Canny 算子阈值为 0.5,对 Canny 算子处理前后的图像聚焦进行了对比,如图 13 所示。可以看出来,加 Canny 算子之前,小波聚焦评价函数对序列图像出现了误判,判定结果是第一幅图像的聚焦评价函数值最大(聚焦最清晰)。加了 Canny 算子之后,背景噪声被滤除,正确地判定出评价函数值最大(聚焦最清晰),这也符合实际聚焦结果。

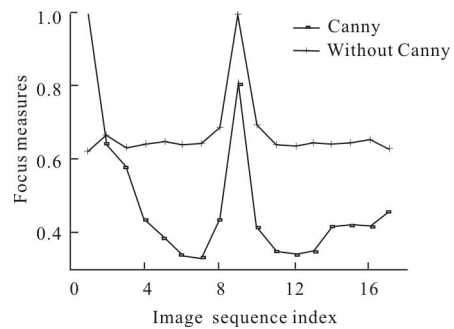


图 13 抗噪性能比较

Fig.13 Compared with anti-noise performance

3 结论

该文提出了一种紫外光学微纳测量系统,通过对测量原理的分析,设计了相应的探测系统结构。对系统的对焦方法进行研究,图像的方法实现 CCD 自动对焦,小波方法在精度和效率方面都有提升。在自动对焦过程中发现,在接近聚焦时会出现部分衍射现象,这些衍射图像有可能会影响聚焦评价函数的判定结果,但是小波分解方法的稳定性也再次有了充分的体现。

参考文献:

- [1] Gao Sitian. Research for metrological atomic force microscope [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
高思田. 计量型原子力显微镜的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [2] Hignette O, Woch J, Gotti L. Large-bandwidth deep-UV microscope for CD metrology[C]//*Microlithography'90, International national Society for Optics and Photonics*, 1990: 79-90.
- [3] Bodermann B, Buhr E, Ehret G, et al. Optical metrology of micro-and nanostructures at PTB: status and future developments [C]//*Ninth International Symposium on Laser Metrology, International Society for Optics and Photonics*, 2008: 71550V-71550V-12.
- [4] Ehret G, Pilarski F, Bergmann D, et al. A new high-aperture 193 nm microscope for the traceable dimensional characterization of micro-and nanostructures [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(8): 084010.
- [5] Attota R, Silver R. Nanometrology using a through-focus scanning optical microscopy method [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(2): 024002.
- [6] Ehret G, Bodermann B, Mirandé W. Quantitative linewidth measurement down to 100 nm by means of optical dark-field microscopy and rigorous model-based evaluation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(2): 430.
- [7] Groen F C A, Young I T, Ligthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. *Cytometry*, 1985, 6(2): 81-91.
- [8] Zheng Yuanyuan, Jiang Wei. Research on a new auto-focusing algorithm [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 471-474. (in Chinese)
郑媛媛, 姜威. 一种新的自动聚焦算法的研究 [J]. 光学技术, 2011, 37(4): 471-474.
- [9] Liqi. Research for digital auto-focus technology and implementation method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
李奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [10] Pu Li, Jin Weiqi, Liu Yushu. Super-resolution algorithm based on post wavelet treatment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 173-176. (in Chinese)
浦利, 金伟其, 刘玉树. 基于后小波处理的超分辨图像复原算法 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 173-176.
- [11] Wang Yiwen, Liu Xianli, Xie Hui. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14 (6): 1063-1069. (in Chinese)
王义文, 刘献礼, 谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术 [J]. 光学精密工程, 2006, 14 (6): 1063-1069.