文章编号　2095-1531(2018)02-0255-10

微分干涉差共焦显微膜层微结构缺陷探测系统

戴　岑[1,2],巩　岩[1,3*],张　昊[1,2],李佃蒙[3],薛金来[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所,江苏 苏州 215163)

摘要:多层膜极紫外光刻掩模"白板"缺陷是制约下一代光刻技术发展的瓶颈之一,为提高对掩模"白板"上的膜层微结构缺陷的分辨能力,提出了一种微分干涉差共焦显微探测系统方案。基于标量衍射理论,计算了系统横向和轴向分辨率。利用 MATLAB 建模仿真,在数值孔径为 0.65、工作波长为 405 nm 时,分析比较了微分干涉差共焦显微系统、传统显微系统和共焦显微系统的分辨率。结果表明微分干涉差共焦显微系统具有 230 nm 的横向分辨率和 25 nm 轴向台阶高度差的分辨能力(对应划痕等缺陷形式)。此外,仿真和分析了实际应用中探测器尺寸、样品轴向偏移等的影响,模拟分析了膜层微结构缺陷的探测,结果表明本系统可以探测 200 nm 宽、10 nm 高的微结构缺陷,较另外两种系统有更好的探测能力。

关　键　词:共焦显微;微分干涉差;标量衍射;膜层结构;缺陷探测
中图分类号:TH742.6　　**文献标识码:**A　　doi:10.3788/CO.20181102.0255

Detection system of multilayer coating microstructure defects based on differential interference contrast confocal microscopy

DAI Cen[1,2], GONG Yan[1,3], ZHANG Hao[1,2], LI Dian-meng[3], XUE Jin-lai[1]
(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
[3] *Suzhou Institution of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou* 215163, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: ygong2000@sina.com*

Abstract: Defects in the multilayer extreme ultraviolet lithography (EUV) mask "whiteboard" have become an important issue to restrict the development of next-generation lithography. A detection system based on differential interference contrast (DIC) confocal microscopy is proposed in order to improve the ability of distinguishing the microstructure defects on the lithography mask "whiteboard". Based on the scalar diffraction theory, the lateral and axial resolution of the system are calculated. In the condition that numerical aperture of 0.65 and working wavelength of 405 nm, resolutions of DIC confocal microscopy, traditional microscopy and the

收稿日期:2017-11-13;**修订日期:**2017-12-16
基金项目:吉林省重大科技攻关专项(No. 20140203001GX)
Supported by Jilin Provincial Major S&T Special Project (No. 20140203001GX)

confocal microscopy system are compared and analyzed using MATLAB. The results show that the DIC confocal microscopy has the ability of lateral resolution of 230 nm and resolution of axial step height difference of 25 nm(corresponding to defects such as scratches). In addition, the effect of factors such as the size of detector and the axial deviation of the sample are also simulated and analyzed. The experimental results show that the proposed system can detect multilayer coating microstructure defects with a width of 200 nm and a height of 10 nm, which has better detection ability than the other two systems.

Key words: confocal microcopy; differential interference contrast(DIC); scalar diffraction; coating structure; defects detecting

1 引 言

多层膜极紫外光刻掩模“白板”缺陷是制约下一代光刻技术发展的瓶颈之一[1-4],在掩模“白板”过程中引入的微小杂质,最终会引起掩模板表面的凹凸不平,形成微结构缺陷。这些缺陷直接影响产品质量,因此膜层微结构缺陷的探测有着十分重要的研究意义和应用价值。现阶段对于微结构的三维检测技术主要有机械探针、扫描电子显微镜、扫描隧道显微镜、原子力显微镜、共焦显微镜等。但前 4 种方法在测量精度或样品损伤方面都存在一定的局限性[5]。而共焦显微镜是一种非接触测量技术,并且具有轴向层析的特性,可以达到微米级别的横向分辨率和轴向分辨率,因此,在微结构三维检测方面较其他方案更为优越[6-7]。

现阶段,在极紫外光刻掩模技术领域,对膜层微结构缺陷探测能力已提出了横向亚波长量级,轴向百纳米甚至更低量级的要求。目前使用最广泛的是 LASERTEC 和 SEMATECH 联合开发的基于共焦显微镜的膜层结构缺陷检测系统 M7360,可以检测到横向 30 nm 宽、轴向 5 nm 高的微结构缺陷。近年来,国外基于不同原理如化学线等的缺陷检测技术也取得了较大进展,而我国在此领域,尤其是膜层微结构缺陷的光学检测技术上发展还相对滞后[8-13]。基于此,本文在传统共焦显微镜的基础上,提出了一种基于微分干涉差共焦显微术的膜层微结构缺陷检测系统,将共焦显微理论和微分干涉成像理论相结合,在 405 nm 工作波长,NA = 0.65 的情况下,具有 230 nm 的横向分辨率和25 nm的轴向台阶分辨率,且能够探测到横向200 nm宽、轴向 10 nm 高的膜层微结构缺陷的存在,相比传统的共焦显微系统具有更高的分辨能力。本文针对该系统讨论了探测器尺寸和样品轴向偏移对检测结果的影响。

2 光学系统设计及分析

2.1 光路

微分干涉差共焦显微系统光路图如图 1 所示,在反射式共焦系统的基础上,插入起偏器、Wollaston 棱镜和检偏器等微分干涉差(Differential Interference Contrast, DIC)系统的关键元件,组成 DIC 共焦检测系统。传统的激光共焦系统中点光源、点探测器为共轭关系,并通过引入针孔空间滤波器抑制离焦平面产生的杂散光,在被测物体分别处于在焦和离焦位置时,探测器接收到的信号强度对比明显,在轴向上具有微米量级的分辨率。激光共焦显微系统可以通过沿 Z 轴方向

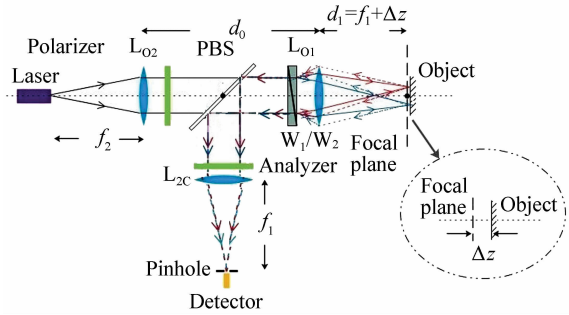

图 1 反射式 DIC 共焦系统光路图

Fig. 1 Optical path diagram of reflecting DIC confocal system

逐层扫描实现物体的三维成像[14-15]。图 1 中准直平行激光束经过起偏器后成为 45°线偏振光,通过 Wollaston 棱镜后由于双折射作用分解为两束偏振方向垂直、传播方向有微小差异的相干光。两束光分别自显微物镜出射后,在物面上产生小于物镜极限分辨率的横向剪切量。携带物体信息的两束信号光再次通过 Wollaston 棱镜和检偏器后发生微分干涉,由样品表面高度的微小变化产生的光程差在干涉背景上表现为明显的光强变化,显著提高信号的对比度,从而将系统的轴向分辨率提高到 10 nm 量级[16]。

为便于分析,按照图 1 反射式光路的等效透射式光路(如图 2 所示)进行计算。图 2 所示系统由点光源 S、照明透镜组 L_{O2} 和 L_{O1}、集光透镜组 L_{C1} 和 L_{C2}、Wollaston 棱镜 W_1 和 W_2、待测样品 T、以及探测器 D 组成,其中 L_{O1} 和 L_{C1} 在实际光路中为同一透镜,它们的参数相同,设其焦距为 f_1,口径为 a_1。另外,为形成完全对称的光路,通常 L_{O2}、L_{C2} 选用相同的显微物镜,设其焦距为 f_2,口径为 a_2。W_1、W_2 关于 L_{C1} 的后焦面对称放置[17-18]。

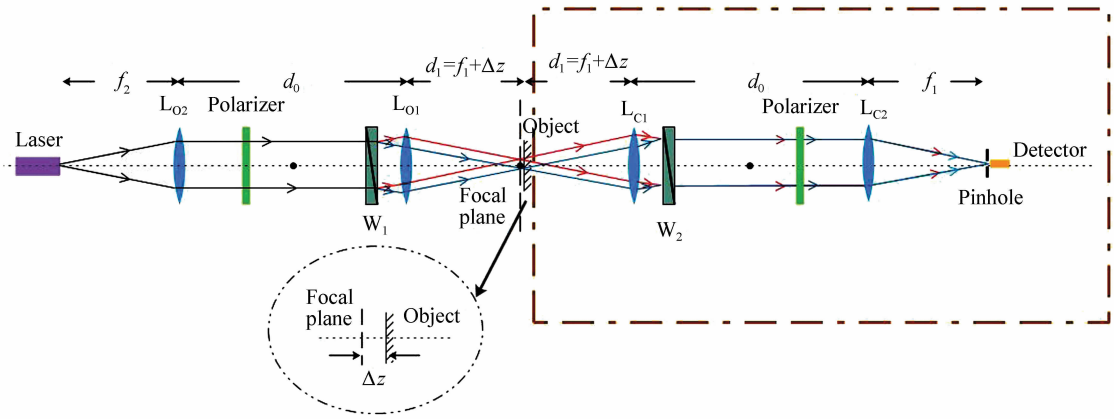

图 2　反射式 DIC 共焦系统等效光路图

Fig. 2　Equivalent optical path of reflecting DIC confocal system

2.2　理论分析

对于无限共轭距共焦系统,从点光源出发,可以求解其传播过程,当满足特定条件:(1) L_{C1} 和 L_{C2} 的间距足够小,或(2) $a_2 > a_1$,且 $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 为一小量时,共焦显微系统探测器平面的复振幅分布可以表示为[14-18]:

$$U_f(x_i, y_i) = \exp[\mathrm{i}k(2f_1 + 2\Delta z + d_0 + f_2)] \times \exp\left[\frac{\mathrm{i}k}{2f_2}\left(1 - \frac{d_0}{f_2}\right)(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} t_o(\xi - x_s, \eta - y_s) h_{1e}(\xi, \eta) \times h_{1e}(\xi - x_s/M, \eta - y_s/M)\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta, \tag{1}$$

式中,Δz 为物面的轴向离焦量,(x_i, y_i) 为探测器平面坐标,t_o 是物体的透过率函数(实际系统中应为反射率函数),(ξ, η) 为物平面坐标,(x_s, y_s) 为光在物面穿过的扫描位置。M 为收集透镜组的放大倍数。h_{1e} 为 L_{O1} 的有效离焦点扩散函数,即

$$h_{1e}(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_{1e}(x_1, y_1) \cdot \exp\left[-\frac{\mathrm{i}k\Delta z}{2f_1^2}(x_1^2 + y_1^2)\right] \times \exp\left[-\frac{\mathrm{i}k}{2f_1}(\xi x_1 + \eta y_1)\right]\mathrm{d}x_1\mathrm{d}y_1, \tag{2}$$

式中,(x_1, y_1) 为透镜平面坐标,$P_{1e}(x_1, y_1) = P_1(x_1, y_1)\, P_2(x_1, y_1)$,为系统的有效光瞳函数。$P_1(x_1, y_1)$ 为 L_{O1} 的光瞳函数,$P_2(x_1, y_1)$ 为 L_{O2} 的光瞳函数。

对式(1)进行汉克尔变换,有:

$$I(u, v) = \left| 2\int_0^1 P_{1e}(\rho)\exp(-\mathrm{i}u\rho^2/2)\mathrm{J}_0(v\rho)\rho\,\mathrm{d}\rho \right|^4, \tag{3}$$

其中,u,v 分别为系统的轴向和横向无量纲坐标,

$u = k\Delta z a_{1e}^2/f_1^2$, $f = kr_s a_{1e}/f$, $r_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2}$, $\rho = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$。

共焦系统的横向分辨率公式对应 $u=0$,即样品处于 L_{c2}后焦面位置时的光强分布:

$$I(v) = [\frac{2J_1(v)}{v}]^4. \tag{4}$$

当样品为沿轴向运动的理想点物时,有 $v=0$,此时系统的轴向分辨率如下:

$$I(u) = [\frac{\sin(u/4)}{u/4}]^4. \tag{5}$$

当物为理想平面镜时,有:

$$I(u) = [\frac{\sin(u/2)}{u/2}]^2. \tag{6}$$

对于 DIC 共焦显微系统,由于光通过 Wollaston 棱镜时会发生双折射现象,因此光线通过 L_{01} 后在物面汇聚成两个点,这两个点之间存在着微小的横向剪切量,且小于物镜的极限分辨率。设物面对光场的相位调制量为 $e^{i\theta}$,根据 DIC 系统中干涉场复振幅叠加原理[19-22],共焦 DIC 系统的复振幅分布可以如下表示:

$$\begin{aligned} U'_f(x_i,y_i) = [e^{i(\theta_1-\varphi)} - e^{i(\theta_2+\varphi)}] \times U'_{f0}(x_i,y_i) = \\ \exp[ik(2f_1 + 2\Delta z + d_0 + f_2)] \times \\ \exp[\frac{ik}{2f_2}(1 - \frac{d_0}{f_2})(x_i^2 + y_i^2)] \times \\ [2i\sin(\frac{\theta_1 - \theta_2 - 2\varphi}{2})\exp(i\frac{\theta_1 - \theta_2}{2})] \times \\ \iint_{-\infty}^{\infty} t_o(\xi - x_s, \eta - y_s)/h_{1e}(\xi,\eta) \times \\ h_{1e}(\xi - x_s/M, \eta - y_s/M)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \end{aligned} . \tag{7}$$

对于式(7),由于 Wollaston 棱镜引起的在物面上的横向剪切量很小,因此计算过程中忽略了两束光位置的偏差。另外,假设两束光的幅值相等,因此式(7)中省略了这一常量。$U'_{f0}(x_i,y_i)$为式(1)中得到的共焦系统在焦平面上的光场分布,θ_1 和 θ_2 为光线在物面上实际照明的两点的物函数相对于 $t_o(x_s,y_s)$的相位差。由于 θ 与物体的微观形貌特征有关,因此可以将其表示为物平面坐标的函数 $\theta(x_s,y_s)$;φ 为 Wollaston 棱镜引入的相位差。取 $\Delta\theta(x_s,y_s) = \theta_1 - \theta_2$,考虑强度分布,在探测器平面有:

$$\begin{aligned} I_f(x_s,y_s;x_i,y_i) = |U'_f(x_i,y_i)|^2 = \\ \sin^2[\frac{\Delta\theta(x_s,y_s)}{2} - \varphi][h_{1e}(x_s,y_s) \times \\ h_{1e}(x_s - x_i/M, y_s - y_i/M)] \otimes \\ t_o(-x_s, -y_s) \end{aligned} , \tag{8}$$

实际系统中,将有限孔径的针孔滤波器紧贴探测器放置,以构成共焦点探测器。此时,针孔中心位于 L_{C2}的后焦点上,光电探测器处接收到的光强为:

$$I(x_s,y_s) = \iint_{-\infty}^{\infty} |U'_f(x_i,y_i)|^2 D(x_i,y_i)\mathrm{d}x_i\mathrm{d}y_i, \tag{9}$$

式中,$D(x_i,y_i)$为光电探测器的灵敏度函数。对理想的点物和点探测器的情况有 $t_o(\xi - x_s, \eta - y_s) = \delta(\xi - x_s, \eta - y_s)$,$D(x_i,y_i) = \delta(x_i,y_i)$。

因此可以得出:

$$I(x_s,y_s) = \sin^2[\frac{\Delta\theta(x_s,y_s)}{2} - \varphi]|h_{1e}(x_s,y_s)|^4, \tag{10}$$

$$\begin{aligned} I(u,v) = \sin^2[\Delta\theta(u,v) - \varphi] \times \\ |2\int_0^1 P_{le}(\rho)\exp(-iu\rho^2/2)J_0(v\rho)\rho\mathrm{d}\rho|^4 \end{aligned} , \tag{11}$$

其中,$u = k\Delta z a_{1e}^2/f_1^2$,$v = kr_s a_{1e}/f$,$r_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2}$,$u$,$v$ 仍为系统的轴向及横向无量纲坐标 。

当 $u=0$ 时,以相同入射光计算得到的共焦系统的横向最大光强为参考值,得到 DIC 共焦横向归一化强度点扩散函数:

$$I(v) = \sin^2[\frac{\Delta\theta(0,v)}{2} - \varphi][2J_1\frac{(v)}{v}]^4. \tag{12}$$

当物为理想点时,$\Delta\theta(0,v) = 0$。共焦系统和 DIC 共焦系统的横向归一化强度点扩散函数,如图 3(a)所示。

当 $v=0$ 时,以相同入射光计算得到的共焦系统的轴向最大光强为参考值,得到 DIC 共焦轴向归一化强度点扩散函数,即

$$I(u) = \sin^2[\frac{\Delta\theta(u,0)}{2} - \varphi][\frac{\sin(u/4)}{u/4}]^4. \tag{13}$$

由于物为理想点,有 $\Delta\theta(u,0) = 0$,可以得到

共焦系统和 DIC 共焦系统的轴向归一化强度点扩散函数如图 3(b)所示。

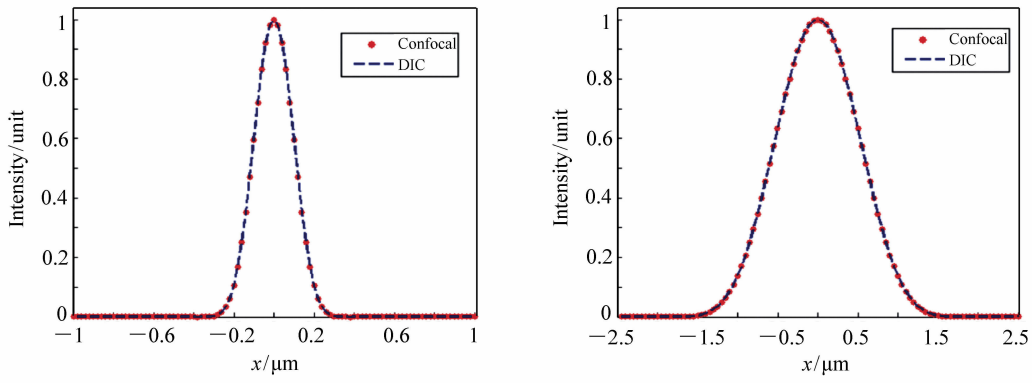

图 3　共焦和 DIC 共焦系统归一化光强分布曲线

Fig. 3　Uniformization intensity curves of confocal and DIC confocal system

可以看出,样品为一理想点时,共焦和 DIC 共焦系统的横向光强分布和轴向光强分布分别相同。

当物为理想平面镜时,可以利用理想平面镜的轴向扫描成像检验系统的轴向层析能力。对理想平面镜,有 $t_o(\xi - t_s, \eta - t_s) = l(\xi - t_s, \eta - t_s)$; $\Delta\theta(u,v) = 0$,所以

$$I(u) = \sin^2(-\varphi) \mid h_{1e}(2u,0) \mid^2 = \sin^2(-\varphi)\,\mathrm{sinc}^2\left(\frac{u}{2\pi}\right) \quad (14)$$

当样品为台阶,其一侧处于位置 z,另一侧高度为 Δz 时,$\frac{\Delta\theta(u,0)}{2} = k\Delta z$,强度分布有:

$$I(\Delta z, u) = \sin^2(k\Delta z - \varphi)\,\mathrm{sinc}^2\left(\frac{u}{2\pi}\right) \quad (15)$$

其中,$u = kza_{1e}^2/f_1^2$,为轴的无量纲坐标。

3　计算机仿真与分析

根据上文计算结果,利用 MATLAB,对传统显微镜、共焦显微系统和 DIC 共焦显微系统进行仿真,计算三者的横向和轴向分辨率,并进行分析,观察不同因素对系统检测结果的影响,并将共焦 DIC 显微系统与传统共焦显微系统进行对比。

3.1　MATLAB 仿真算法

光从点光源出发,其传播过程可以用三次菲涅尔衍射和一次夫琅禾费衍射求解。基于此原理,编写 MATLAB 仿真程序,其简图如图 4 所示。

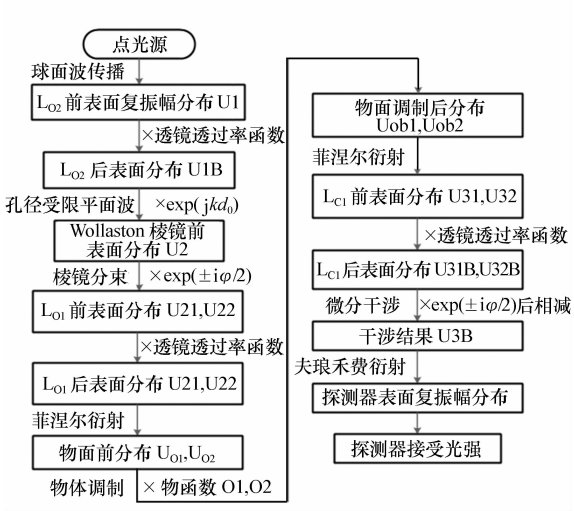

图 4　仿真算法示意简图

Fig. 4　Schematic diagram of simulation algorithm

3.2　仿真参数选择

对收集透镜和显微物镜都选择了 40 × 显微物镜进行仿真,物镜的数值孔径 NA = 0.65,焦距 f = 4.5 mm,则可以计算等效的通光孔径 D = 7.698 mm。工作波长取 405 nm,则传统显微系统的极限分辨距 $\sigma = 0.16\lambda/\mathrm{NA} = 0.38$ μm。

根据式(11)可知,探测器平面的光强分布受 Wollaston 棱镜引入的 o 光和 e 光的相位差影响[16]。在系统其他条件不变,只有 φ 变化的情况

下,光强的变化如图 5 所示。

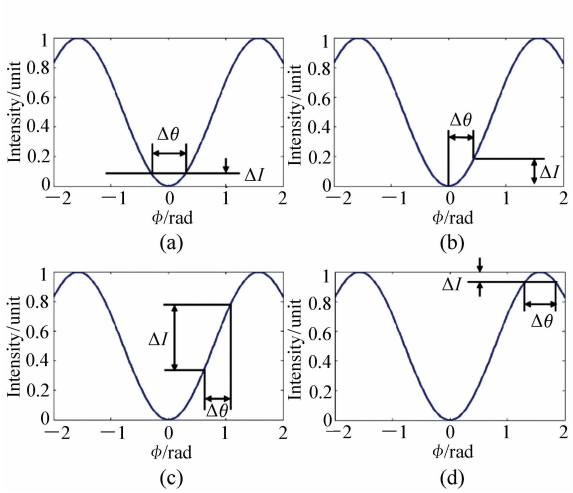

图 5 不同的 φ 值对应的 ΔI 和 $\Delta\theta$ 变化关系

Fig. 5 Relationship of ΔI and $\Delta\theta$ with different φ

可以看出,在图 5(c)中,最小的调制量 $\Delta\theta$ 能获得最大的 ΔI,故选择对应的 $\varphi=\pi/4$ 作为 Wollaston 棱镜引入的相位差,此时 o 光和 e 光之间的光程差 $\delta=(m+\frac{1}{8})\lambda$($m$ 为自然数)。

3.3 仿真结果及分析

对透镜参数相同的共焦系统和 DIC 共焦系统的横向和轴向归一化光强分布进行仿真计算,取 $\Delta\theta(u,v)=0$,并将结果分别与图 3(a)、3(b)进行比对,并将仿真结果与理论值进行拟合。仿真结果与理论值拟合的相关系数如表 1 所示。可以看出两种系统的横向分布仿真结果与理论值完全吻合,轴向分布的仿真值与理论也吻合良好,因此可以认为仿真精度较高,满足使用需求。

表 1 共焦和 DIC 共焦系统仿真值与理论值拟合结果

Tab. 1 Comparison between simulation and theoretical result of two systems

系统名称	横向分布相关系数	轴向分布相关系数
共焦系统	1	0.997 0
DIC 共焦系统	1	0.996 3

将仿真得到的两种系统横向归一化光强曲线与传统显微镜[13]的横向归一化光强曲线进行比较,如图 6 所示。

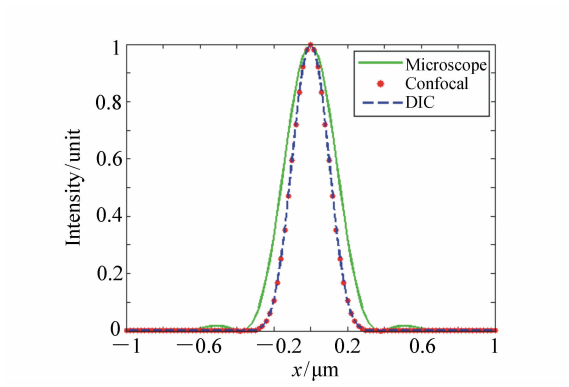

图 6 3 种系统的横向归一化光强分布曲线对比

Fig. 6 Comparison of uniformization lateral intensity distribution curves of 3 systems

取半高全宽作为系统的横向分辨率,3 种系统的横向分辨率如表 2 所示,由此可得 DIC 共焦系统与共焦系统的横向分辨率均比传统光学显微镜提高了 1.4 倍,DIC 共焦系统具有良好的横向分辨率。

表 2 3 个系统横向分辨率比较

Tab. 2 Comparison of lateral resolutions among the 3 systems (μm)

系统名称	半高全宽(FWHM)
传统显微镜	0.32
共焦系统	0.23
DIC 共焦系统	0.23

将点物替换成平面反射镜,针对共焦系统和 DIC 共焦系统计算,二者与理论计算值[见式(6),式(14)]比对如表 3 所示,仿真结果与理论推导结果吻合。将两者仿真结果比较,可以看出 DIC 共焦系统镜面反射的轴向分辨率与共焦系统镜面反射的轴向分辨率相同。

表 3 共焦系统与 DIC 共焦系统镜面反射拟合结果

Tab. 3 Specular reflection fitting result of confocal and DIC confocal system

系统名称	相关系数 R
共焦系统	0.997 2
DIC 共焦系统	0.996 8

实际应用中,经常需要对台阶类样品进行探测。对于共焦系统,通过轴向扫描过程中台阶上下表面分别位于 L_{01} 后焦面时探测器接收到的光强对比作为探测依据。而对 DIC 共焦系统,可以利用两束光同时分别照射在台阶上下表面时探测器接收到的光强变化作为判断标准。由式(15)可以知道,对于台阶类样品,DIC 共焦系统的响应是被 $\sin^2(k\Delta z-\varphi)$ 调制的共焦系统镜面反射响应,对于轴向离焦量 Δz 十分敏感。

基于上述讨论,对一侧在 L_{01} 后焦面位置,另一侧高度在 −100 nm 到 100 nm 之间变化的台阶进行仿真,取台阶高度为 0 时的光强为参考值进行归一化,结果如图 7 所示。将仿真结果与式(15)进行拟合,相关系数 $R=0.999\ 3$,吻合情况良好。在此情况下,以台阶高度为 0,即平面镜反射情况对应的光强 I_0 为参照点,取相对于 I_0 变化 50% 的台阶高度范围作为台阶高度的分辨率。式(6)可以用来表达共焦系统在对台阶样品扫描时的响应,共焦系统的轴向分辨率为 ±0.42 μm,并不能分辨 100 nm 的高度变化,而 DIC 共焦系统可以分辨 ±25 nm 高度的台阶,其分辨率相比于共焦系统提高了约 17 倍。

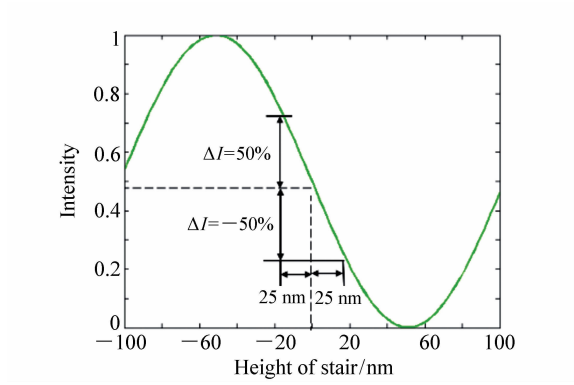

图 7　DIC 共焦系统的台阶响应

Fig. 7　Stair response curve of DIC confocal system

3.4　实际应用的仿真分析

由式(9)可以看出,实际工程应用中采用的有限尺度探测器会造成系统点扩散函数的展宽,引起分辨率下降,图 8(a)为传统共焦显微系统轴向分辨率与探测器直径之间的关系,可以看出,当探测器直径增大时,轴向分辨率曲线展宽,分辨率下降。为探究探测器尺寸对 DIC 共焦系统轴向分辨率的影响,采用直径为 2.5、1、0.5 μm 的针孔滤波器组成探测器,高度为 −100 nm 到 100 nm 的台阶进行仿真计算,结果对比如图 8(b)所示。

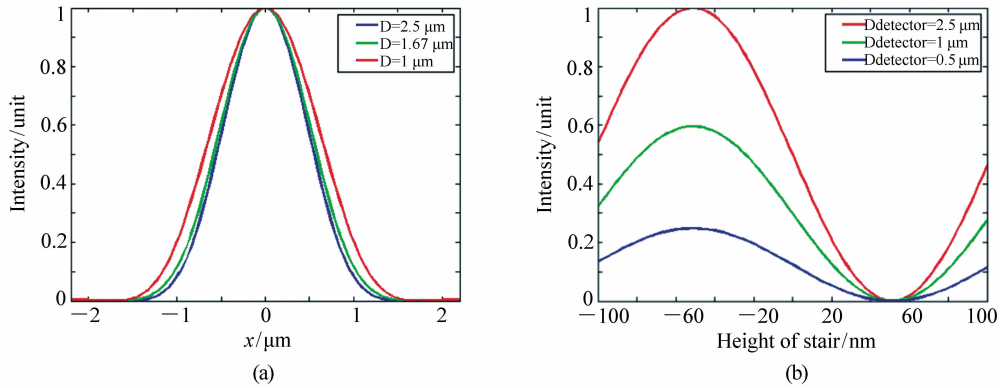

图 8　(a)探测器直径分别为 2.5 μm, 1.67 μm, 1 μm 时共焦系统的轴向光强响应曲线;(b)探测器直径为 2.5 μm, 1 μm, 0.5 μm 时的 DIC 共焦系统的台阶光强响应曲线

Fig. 8　(a) Intensity curves of confocal system with detector diameter of 2.5 μm, 1.67 μm, 1 μm; (b) Intensity curves of DIC confocal systems with detector diameter of 2.5 μm, 1 μm, 0.5 μm

不难发现,随着探测器尺寸的变化,探测器所接收到的光强变化范围浮动较大,但若探测器有足够的灵敏度,探测器直径的增大并不会对 DIC 共焦系统的轴向分辨率产生明显影响。对于实验室现有的光电探测器和针孔滤波器组合,完全可以实现对上述样品的检测。

在 2.2 节中讨论了平面镜作为样品进行轴向扫描的理论模型,可以看出样品的轴向偏移影响

探测器接受到的光强。考虑到探测器的灵敏度会影响检测的分辨率,若探测信号幅值过小,探测器可能无法分辨信号是否出现变化,因此有必要研究样品轴向偏移对检测结果的影响。以位于 L_{02} 后焦面的平面镜作为样品,点探测器接收到的光强作为参考值,轴向偏移分别为 -0.3、-0.15、0、0.15 和 0.3 μm 时,对于不同高度的台阶样品,对探测器接收到的光强进行仿真计算,结果如图 9 所示。

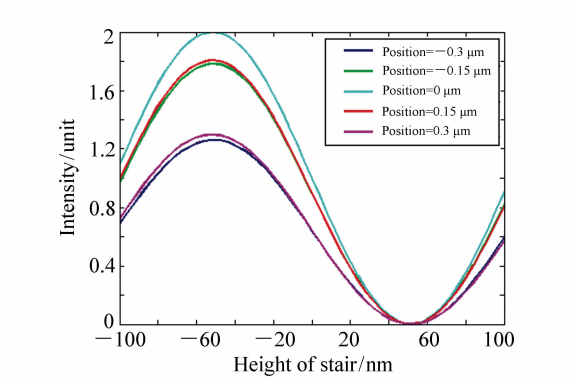

图 9 不同轴向偏移时 DIC 共焦系统的台阶响应

Fig. 9 Stair response curves of DIC confocal system under different z-axial offsets

对图 9 中 5 条曲线,按照式(14)进行拟合,结果如表 4 所示。

表 4 图 9 中各曲线与理论值拟合后的相关系数 R

Tab. 4 Correlation coefficients(R) of fitting curves in Fig. 9

样品轴向偏移/μm	相关系数 R
-0.3	0.998 5
-0.15	0.999 1
0	0.999 3
0.15	0.999 1
0.3	0.998 7

在实验过程中,样品的轴向偏移对应其实际安装位置相对于理想位置的偏差。为保证实验精度,应尽量减小轴向偏移对信号光强带来的影响,如图 9,若要控制轴向偏移对光强的影响不大于 10%,实验中样品的安装位置误差不应超过 ±0.15 μm。

除类似于台阶的结构缺陷外,在工程领域如极紫外光刻掩膜白板缺陷检测中,存在对微小尺度(横向直径百纳米量级,高度纳米量级)的缺陷进行检测的实际需求。这些微结构缺陷的尺寸小于光学系统的极限分辨率,对于这种缺陷,可以使用 DIC 共焦系统检测其有无以便对后续实验或加工进行指导。对于此种膜层结构样品,考虑探测器灵敏度,若缺陷处所探测到的光强相对于无缺陷处探测到的光强变化 5% 及以上,则可认为探测到缺陷存在。在此基础上,假设单一的微结构缺陷为圆形且高度一致的凹陷或凸起,选择了几组不同的参数,对其进行仿真。结果如表 5 所示,其中 z 为缺陷高度,d 为缺陷直径。

表 5 不同尺寸缺陷对应的归一化探测光强

Tab. 5 Uniformization intensity of micro-defects with different sizes

z/nm	d/nm		
	200	240	280
-20	1.141 0	1.254 2	1.280 5
-10	1.066 8	1.125 0	1.138 1
0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
10	0.942 2	0.880 0	0.867 6
20	0.895 0	0.766 5	0.742 5

可以看出,对于横向尺度为 200 nm,高度 10 nm的微小缺陷,本文提出的 DIC 共焦系统方案具有良好的检测能力。

4 结 论

为了实现对极紫外光刻掩模“白板”缺陷的检测,本文提出了一种 DIC 共焦检测膜层微结构缺陷的系统方案。根据标量衍射理论推导其横向和轴向分布规律,通过 MATLAB 对系统分辨率进行仿真计算和分析,并进一步针对系统探测器的尺寸、样品的轴向偏移等影响因素进行了仿真研究,探究这些因素对检测结果的影响。对微小尺寸膜层微结构缺陷探测进行了仿真,预测系统对此种缺陷的分辨能力。仿真结果表明,DIC 共焦系统有 230 nm 的横向分辨率和优于传统共焦系统约 17 倍的轴向分辨率,能分辨出约 25 nm 的台

阶高度差;对横向 200 nm,轴向 10 nm 的微小缺陷具有良好的分辨能力,具有应用价值。

参考文献:

[1] 刘晓雷,李思坤,王向朝. 极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型[J]. 光学学报,2014,34(9):40-46.
LIU X L,LI S K,WANG X ZH. Simplified model for defective multilayer diffraction spectrum simulation in extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*,2014,34(9):40-46. (in Chinese)

[2] 张立超,才玺坤,时光. 深紫外光刻光学薄膜[J]. 中国光学,2015,8(2):169-181.
ZHANG L CH,CAI X K,SHI G. Optical coatings for DUV lithography[J]. *Chinese Optics*,2015,8(2):169-181. (in Chinese)

[3] 刘晓雷,李思坤,王向朝. 基于等效膜层法的极紫外光刻含缺陷掩模多层膜仿真模型[J]. 光学学报,2015,35(6):06220051-1-9.
LIU X L,LI S K,WANG X ZH. Simulation model based on equivalent layer method for defective mask multilayer in extremeultra violet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*,2015,35(6):06220051-1-9. (in Chinese)

[4] 王珣,金春水,匡尚奇,等. 极紫外光学器件辐照污染检测技术[J]. 中国光学,2014,7(1):79-88.
WANG X,JIN C SH,KUANG SH Q,*et al*.. Techniques of radiation contamination monitoring for extreme ultraviolet devices[J]. *Chinese Optics*,2014,7(1):79-88. (in Chinese)

[5] KWON J,HONG J,KIM Y S,*et al*.. Atomic force microscope with improved scan accuracy, scan speed, and optical vision[J]. *Review of Scientific Instruments*,2003,74(10):4378-4383.

[6] BINNG G,ROHRER H,GERBER CH,*et al*.. Surface studies by scanning tunneling microscopy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982,49(1):57-60

[7] 张运海,杨皓旻,孔晨晖. 激光扫描共焦光谱成像系统[J]. 光学 精密工程,2014,22(6):1446-1453.
ZHANG Y H,YANG H M,KONG CH H. Spectral imaging system on laser scanning confocal microscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(6):1446-1453. (in Chinese)

[8] CHO W,KEARNEY P A,JEON C U,*et al*.. Inspection with the lasertec M7360 at the SEMATECH mask blank development center[J]. *Proceedings of SPIE*,2007,6517:65170D.

[9] GODWIN M,BALACHANDRAN D,TAMURA T. Comparative defect classifications and analysis of Lasertec's M1350 and M7360[J]. *Proceedings of SPIE*,2014,9050:556-565

[10] TCHIKOULAEVA A,MIYAI H,TAKEHISA K,*et al*.. EUV actinic blank inspection: from prototype to production[J]. *Proceedings of SPIE*,2013,8679.

[11] RASTEGAR A,JINDAL V. EUV mask defects and their removal[J]. *Proceedings of SPIE*,2012,8352:83520W.

[12] SUZUKI T,MIYAI H,TAKEHISA K,*et al*.. EUV actinic blank inspection tool with a high magnification review mode [J]. *Proceedings of SPIE*,2012,8441:844115.

[13] 孙梦至,王彤彤,王延超,等. 大口径反射镜高反射膜研究进展[J]. 中国光学,2016,9(2):203-212.
SUN M ZH,WANG T T,WANG Y CH,*et al*.. Research development of high reflecting coating for large-diameter mirror [J]. *Chinese Optics*,2016,9(2):203-212. (in Chinese)

[14] 肖昀,张运海,王真,等. 入射激光对激光扫描共焦显微镜分辨率的影响[J]. 光学 精密工程,2014,22(1):31-38.
XIAO Y,ZHANG Y H,WANG ZH,*et al*.. Effect of incident laser on resolution of LSCM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(3):31-38. (in Chinese)

[15] WILSON T. Principles of three-dimensional imaging in confocal microscopes[J]. *Journal of Microscopy*,1996,193(1): 91-92.

[16] PADDOCK S W. Confocal laser scanning microscopy[J]. *Biotechniques*,1999,27(5):992-1004.

[17] MEHTA S B,SHEPPARD C J. Partially coherent image formation in differential interference contrast(DIC) microscope [J]. *Optics Express*,2008,16(24):19462-19479.

[18] SHEPPARD C J,WILSON T. Depth of field in the scanning microscope[J]. *Optics Letters*,1978,3(3):115-117.

[19] COGSWELL C J,SHEPPARD C J R. Confocal differential interference contrast(DIC) microscopy: including a theoretical analysis of conventional and confocal DIC imaging[J]. *Journal of Microscopy*,1992,165(1):81-101.

[20] 陈峻堂.微分干涉相衬显微术[J].光学仪器,1984,6(1):1-15
CHEN J T. Differential interference phase contrast microscopy[J]. *Optical Instruments*,1984,6(1):1-15.(in Chinese)

[21] PADAWER J. The nomarski interference-contrast microscope. an experimental basis for image interpretation[J]. *Journal Royal Microscopical Society*,1968,88(88):305-49.

[22] CODY S H,XIANG S D,LAYTON M J,*et al*.. A simple method allowing DIC imaging in conjunction with confocal microscopy[J]. *Journal of Microscopy*,2005,217(3):265-74.

作者简介:

戴 岑(1991—),女,吉林省吉林市人,硕士研究生,主要从事激光共聚焦显微技术方面的研究。E-mail:daicen0916@126.com

巩 岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,主要从事短波光学、光学系统设计和成像光谱方面的研究。E-mail:ygong2000@sina.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

* 美国工程索引 EI 核心期刊
* 中国出版政府奖期刊提名奖
* 中国精品科技期刊
* 中文核心期刊
* 百种中国杰出学术期刊
* 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国仪器仪表学会
地址:长春市东南湖大路 3888 号 邮编:130033
电话:0431-86176855 传真:0431-84613409
电邮:gxjmgc@sina.com 网址:http://www.eope.net
定价:100.00 元/册