

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0039-04

# 激光直接写入系统曝光量分布分析

谢永军, 卢振武, 李凤有, 翁志成, 赵晶丽

(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 130022)

**摘要** 基于直角坐标激光直接写入系统和极坐标激光直接写入系统, 分别给出了曝光量分布的计算公式, 讨论了曝光量分布和光强分布之间的差别。用曝光量分布预测了显影后抗蚀剂中线条的面形。实验结果与理论分析相吻合。

**关键词** 物理光学; 衍射光学; 激光直接写入; 曝光量分布分析

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

## Analysis of the Exposure Dose Distribution for LDW System

XIE Yong-jun, LU Zhen-wu, LI Feng-you, WENG Zhi-cheng, Zhao Jing-li

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics & Physics, The Chinese Academy Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** In the single point laser direct writing (LDW) process, there are some difference between the exposure dose distribution and the light intensity distribution, and the difference will bring the line profile errors. In this paper, the equations to calculate the exposure dose distribution for the polar coordinate and rectangular Cartesian coordinate laser direct writing system are presented. The difference between the exposure dose distribution and the light intensity distribution are discussed. The line profile on the photoresist after development is predicted. The experimental results agree well with the theoretical forecast.

**Key words** physical optics; diffractive optical element; laser direct writing; analysis of the exposure dose

### 1 引言

激光直接写入系统是制作衍射光学元件的重要设备之一。激光直接写入制作衍射光学元件时, 元件的线形对元件的效率起着重要的作用。线条的面形由曝光量分布来决定, 而曝光量分布又依赖于焦斑的光强分布<sup>[1,2]</sup>。在投影光刻(projection lithography)系统中, 因为曝光量分布曲线和光强分布曲线是相同的, 所以当分析线条的线形时, 常常用焦斑的光强分布代替抗蚀剂中的曝光量分布。然而在单点激光直接写入系统中, 光强分布和曝光量分布之间有差别, 而且这种差别将带来线形误差。

本文分别给出了直角坐标和极坐标激光直接写入系统的曝光量分布的计算公式。通过计算得到了它们的数值解, 讨论了光强分布和曝光量分布之间的差别, 从理论上预测了显影后抗蚀剂内线条的面形。

### 2 曝光量分布计算公式

为简化讨论作以下几点假设

- 1) 不考虑涂有光刻胶的基底的反射, 忽略基底反射光的作用。
- 2) 在光刻胶层内, 不考虑胶层对光能量的吸收作用, 沿光轴方向的光强大小是恒定的。
- 3) 显影后的线形完全由胶层内的曝光量分布来决定。

#### 2.1 直角坐标系统曝光量的计算

抗蚀剂内 Y 轴上任意一点的曝光过程示于图 1 中。由菲涅耳衍射理论可得到焦斑上  $Q(x, y)$  处的电磁场电场分量的振幅大小为:

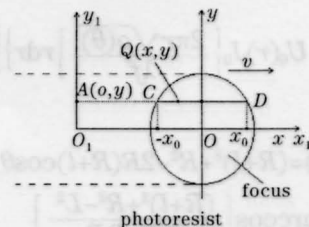


图 1 点  $A(0, y_1)$  的曝光过程

Fig.1 Exposure process of point  $A(0, y_1)$

**作者简介:** 谢永军(1974.11-), 男, 在吉林大学获学士和硕士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生。主要研究方向为微细加工技术、光刻技术、微光学技术。

$$U_Q(x,y) = \frac{2\pi \exp[(i\pi\lambda f(x^2+y^2)]}{i\lambda f} \times \int_0^a U_0(r) J_0\left(\frac{2\pi r \sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right) r dr \quad (1)$$

这里,  $\lambda$  为入射波波长,  $a$  为通光孔径半径,  $f$  为物镜的焦距,  $U_0(r)$  为高斯光束的振幅分布函数,  $J_0$  为零阶贝塞尔函数。

$Q(x,y)$  点的光强大小可以表示为

$$I_Q(x,y) = \left| \frac{2\pi \exp[(i\pi\lambda f(x^2+y^2)]}{i\lambda f} \times \int_0^a U_0(r) J_0\left(\frac{2\pi r \sqrt{x^2+y^2}}{\lambda f}\right) r dr \right|^2 \quad (2)$$

焦斑沿  $X$  轴方向以速度  $v$  扫过  $A(0,y_1)$  点, 对直线  $CD$  上所有点的曝光量进行求和, 就是点  $A(0,y_1)$  的曝光量大小, 可以表示为:

$$E_A(y_1) = \int_{-x_0}^{x_0} I(x,y_1) dx \quad (3)$$

这里,  $x_0 = (Y^2 - y_1^2)^{1/2}$ ,  $Y$  为曝光区域半径,  $y_1$  为点  $A(0,y_1)$  和点  $O_1(0,0)$  之间的距离。

如果入射激光束的光强分布恒定,  $y_1$  轴上点的相对曝光量  $E(y_1)$  仅仅是变量的函数。

### 2.2 极坐标系曝光量的计算

抗蚀剂中任意一点  $A(R+l,\varphi)$  的曝光过程示于图 2。  $R$  为激光束扫描中心和焦斑中心之间的距离;  $l$  为曲线  $CD$  的曲率半径减去  $R$  后得到的差值,  $\varphi$  为由直线  $OA$  和直线  $OO'$  形成的夹角。焦斑在作圆回转扫描时对  $A(R+l,\varphi)$  点进行曝光。对曲线  $CD$  上所有点的曝光量进行求和, 就是点  $A(R+l,\varphi)$  的曝光量大小。如果扫描半径  $R$  的大小不变, 径向曝光量的相对大小仅仅是变量  $l$  的函数。点  $A(R+l,\varphi)$  的曝光量大小可以表示为

$$E(l) = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \left| \left\{ \frac{2\pi \exp[(i\pi\lambda f\rho(\theta)]}{i\lambda f} \times \int_0^a U_0(r) J_0\left[\frac{2\pi r \sqrt{\rho(\theta)}}{\lambda f}\right] r dr \right\} \right|^2 d\theta \quad (4)$$

这里

$$\rho(\theta) = (R+l)^2 + R^2 - 2R(R+l)\cos\theta$$

$$\theta_0 = \arccos\left[\frac{(R+l)^2 + R^2 - L^2}{2(R+l)R}\right]$$

$L$  为曝光区域半径, 且  $-L < l < L$ ,  $\lambda$  为入射光的波长。

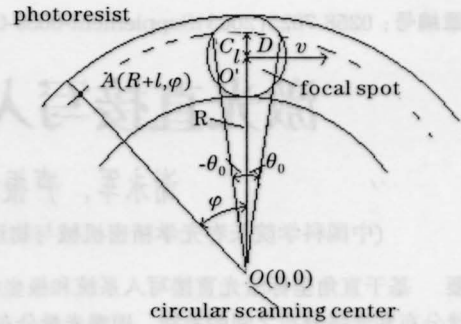


图 2 点  $A(R+l,\varphi)$  的曝光过程

Fig.2 Exposure process of the point  $A(R+l,\varphi)$

### 3 计算和实验结果

计算中采用的参数和我们实际的激光直接写入系统参数一致:  $f=50$  mm,  $a=7.5$  mm,  $n=1.69$ ,  $Y=L=4$   $\mu\text{m}$ ,  $\lambda=442$  nm。

#### 3.1 直角坐标计算和实验结果

由(2)式和(3)式计算得到了直角坐标激光直接写入系统焦斑光强分布和曝光区域曝光量分布的数值解。计算出的相对分布是沿  $y_1$  轴分布的。计算结果示于图 3。可以看到, 曝光量的相对分布曲线比光强的相对分布曲线更陡峭。所以由曝光量分布决定的线形特征要比光强分布决定的线形特征要细小。

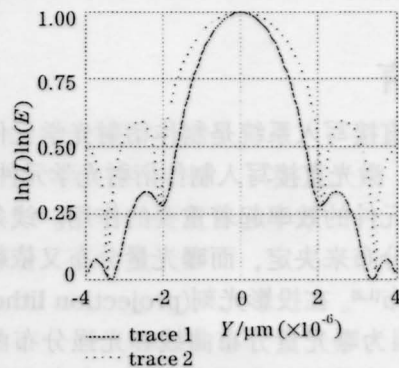


图 3 光强和曝光区域分布

Fig.3 Light intensity an exposure dose relative distribution

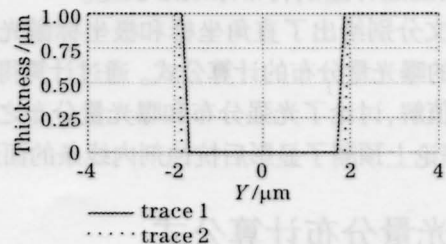


图 4 计算机模拟得到的线条面形图

Fig. 4 Line profile of cross-section in the photoresisit by computer simulation

通过计算机模拟计算<sup>[3]</sup>,得到了当入射激光束功率为 2.8 mW,焦斑扫描速度为 32 mm/s 时,抗蚀剂中的线条面形。见图 4,线宽为 3.3 μm。

在实验中采用的参数和计算中的参数值是一致的。图 5 是抗蚀剂曝光和显影后的原子力显微镜扫

描照片。线宽为 2.6 μm,实验结果的线宽与理论计算结果的线宽相比,实验结果的线宽变小。这是因为在计算机模拟计算中,没有考虑光刻胶层的光能量吸收。但是,可以看出,用曝光分布分析的结果的误差比用光强分布分析的结果小。

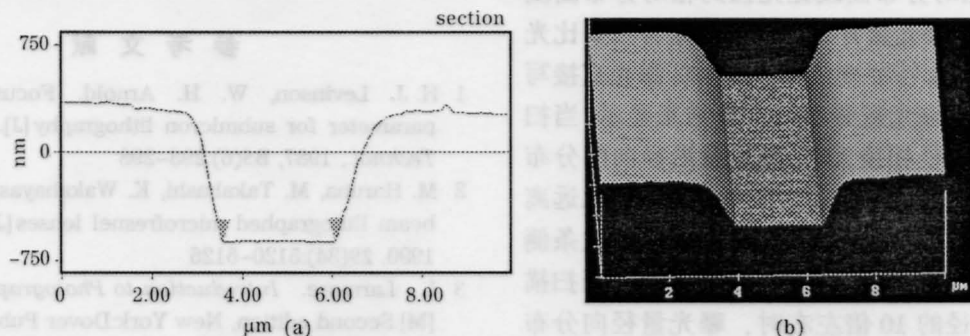


图 5 抗蚀剂曝光和显影后的原子力显微镜扫描图。(a) 剖面图; (b) 三维图

Fig.5 The AFM of the lithographic line on the photoresist after exposure and development.

(a) Cross-section profile; (b) Three-dimensional profile

### 3.2 极坐标系统计算结果

通过计算(4)式,得到了极坐标激光直接写入系统焦斑光强分布和抗蚀剂中曝光区域曝光量的分布。它们是沿径向分布的。计算结果示于图 6。曲线的几个特点为:1) 曝光量的相对分布曲线要比光强

的相对分布曲线更陡峭,因此由曝光量分布决定的线条特征要比光强分布决定的线条特征更细小; 2)当扫描半径和焦斑半径相接近时, 曝光量沿径向的分布将出现不对称的现象(图 6(a),(b)),靠近扫描中心的一侧比远离中心的一侧变高,因此靠近扫描

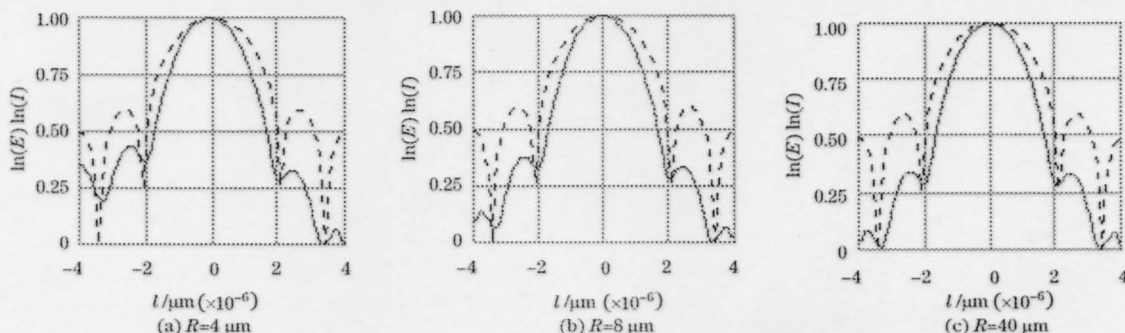


图 6 极坐标激光直接写入系统焦斑光强分布和抗蚀剂中曝光区域曝光量分布图

— trace1      - - - - trace 2

Fig.6 The light intensity relative distribution and exposure energy dose relative distribution

中心一侧的线条侧壁斜率和远离扫描中心的线条相比将变小;3)当扫描半径是焦斑半径的 10 倍左右时, 曝光量径向分布的不对称现象将不明显 (图 6 (c),图 3)。因此,这时就线条的某一局部区域来说,直角坐标写入系统和极坐标直接写入系统的线条特征将没有区别。

图 7 是极坐标激光直接写入系统中,当扫描半径和焦斑半径大小接近时,所刻出的线条的原子力显微镜照片。可以看出,靠近扫描中心的右侧的侧壁斜率小于左侧。

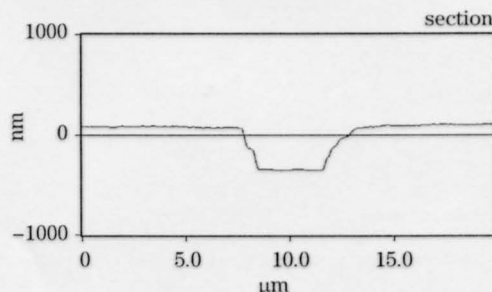


图 7 极坐标激光直接写入系统中,扫描半径和焦斑半径大小接近时刻出的线条的原子力显微镜扫描图

Fig. 7 The AFM of the lithographic line on the photoresist after exposure and development for the polar coordinate direct writing system

### 4 结 论

给出了直角坐标和极坐标激光直接写入系统曝光区域的曝光量分布的计算公式。直角坐标激光直接写入系统曝光区域曝光量分布的计算结果显示,曝光量的相对分布曲线比光强的相对分布曲线更陡峭。所以由曝光量分布决定的线形特征要比光强分布决定的线形特征要细小。极坐标激光直接写入系统曝光区域曝光量分布的计算结果显示,当扫描半径和焦斑半径相接近时,曝光量沿径向的分布将出现不对称的现象。靠近扫描中心的一侧比远离中心的一侧变高。因此靠近扫描中心一侧的线条侧壁斜率和远离扫描中心的线条相比将变小。当扫描半径是焦斑半径的 10 倍左右时,曝光量径向分布

的不对称现象将不明显。因此,就线条的某一局部区域来说,直角坐标写入系统和极坐标直接写入系统的线条特征将没有区别。总之,对于激光直接写入系统来说,采用曝光量分布来分析和预测显影后抗蚀剂内的线条特征,要比用光强分布更精确。

### 参 考 文 献

- 1 H. J. Levinson, W. H. Arnold. Focus: The critical parameter for submicron lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987, **B5**(6):293-298
- 2 M. Haruna, M. Takahashi, K. Wakahayashi *et al.*. Laser beam lithographed microfresnel lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34):5120-5126
- 3 L. Larmore. *Introduction to Photographic Principles* [M]. Second edition, New York:Dover Publications, 1965

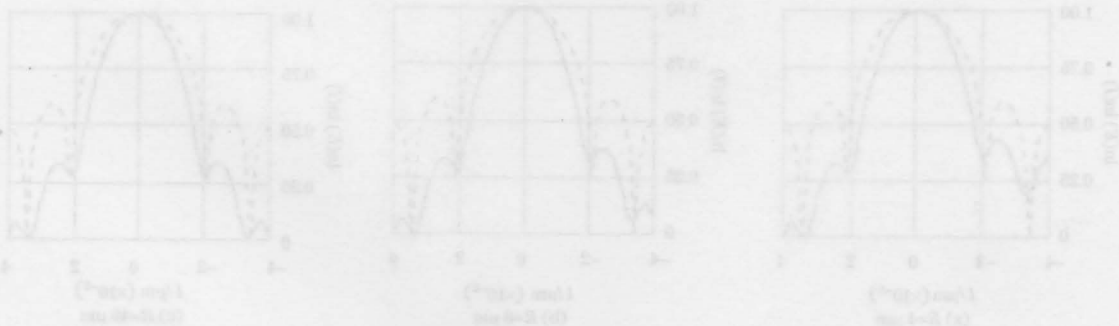


图 6 不同扫描半径下极坐标激光直接写入系统曝光区域曝光量分布及光强分布的相对分布

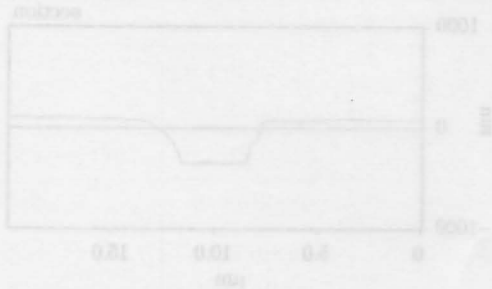


图 7 极坐标激光直接写入系统中曝光及显影后抗蚀剂内线条的 AFM

中心一侧的线条侧壁斜率比远离扫描中心一侧的线条侧壁斜率要小,这是因为扫描半径和焦斑半径相接近时,曝光量沿径向的分布将出现不对称的现象,靠近扫描中心的一侧比远离中心的一侧变高,因此靠近扫描中心一侧的线条侧壁斜率和远离扫描中心的线条相比将变小。当扫描半径是焦斑半径的 10 倍左右时,曝光量径向分布的不对称现象将不明显。因此,就线条的某一局部区域来说,直角坐标写入系统和极坐标直接写入系统的线条特征将没有区别。总之,对于激光直接写入系统来说,采用曝光量分布来分析和预测显影后抗蚀剂内的线条特征,要比用光强分布更精确。