

激光直写光刻中线条轮廓的分析*

李凤有^{1,2} 谢永军² 孙强^{1,2} 曹召良² 卢振武² 王肇圻¹

(1 南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2 中科院长春光机所应用光学国家重点实验室,吉林长春 130022)

摘要 考虑了光刻胶对光吸收作用,在已有描述胶层内光场分布模型的基础上,较为准确地推导出光刻胶层内不同深度位置的光场分布.使用迭代方法计算得到了胶层内曝光量空间分布曲线,分析了不同曝光量下胶层内的线条轮廓,为直写光刻中曝光量的选择提供了依据.实验结果分析与理论分析的结果一致.

关键词 激光直写光刻;曝光量;线条轮廓

中图分类号 TN247;TN305.7

文献标识码 A

0 引言

激光直写光刻是制作二元掩模的主要手段,已应用于集成光学器件、微光学与衍射元件、计算全息图等制作领域^[1-4].激光直写光刻是利用计算机控制聚焦光斑在光刻胶上扫描曝光,经显影后,在胶层上产生所需图形的线条,然后通过沉积、刻蚀等技术将图形转移到基片上.线条即胶膜内沟槽轮廓的好坏,将直接影响元件的制作质量.评价线条质量包括线条在胶层内横向和纵向两方面.高质量线条的轮廓为:沟槽宽度准确,侧壁陡直.文献^[5-7]中已给出了计算直写线宽和胶层内光场分布的数学模型,这对开展激光直写光刻实验具有指导意义.但是,在他们的模型中,都忽略了胶层对光的吸收,这使其模型在分析直写线条轮廓的应用上具有局限性.事实上,随着胶层厚度的增加,光刻胶吸收对胶层内光场分布影响越大,模型分析结果的误差也就越大.本文把胶层吸收光的因素加入到描述胶层内曝光量空间分布的数学模型中,根据模型计算并给出了厚胶层内曝光量的空间分布曲线,理论分析了在不同曝光量下胶层内线条轮廓的情况.在直角坐标激光直写系统上的实验结果与理论分析相符,为光刻中曝光量的选择提供了有力的依据.

1 线条轮廓的理论分析

激光直写线条轮廓是由胶层内曝光量的空间分布决定的,写入焦斑在胶层内光场分布很大程度上决定了曝光量的空间分布.先不考虑胶层吸收对光场分布的影响,在基底材料与光刻胶匹配的情况下,

胶层内的光振幅分布为^[6]

$$U(\rho, z) = \frac{2\pi \exp [i\pi\lambda(f+\delta)(\rho/\lambda f)^2]}{i\lambda(f+\delta)} \int_0^a U_0(r) \cdot \exp \left[-i \frac{\pi\delta r^2}{\lambda f(f+\delta)} \right] J_0(2\pi\rho r/\lambda f) r dr \quad (1)$$

式中 $\delta = \delta_0 + z/n$ 为离焦量, δ_0 为焦斑所在位置到胶层上表面的距离,焦斑在胶层内 δ_0 为负数, z 为胶层上表面到胶层内观察点的深度.

在激光直写光刻中胶吸收光能发生光化学反应分解光敏混合物 PAC,入射光强越大和扫描时间越长,光化学反应越充分,光刻胶内光敏混合物含量越少.该过程的数学描述为^[7]

$$\frac{\partial I(x, z, t)}{\partial z} = -I(x, z, t) [AM(x, z, t) + B] \quad (2)$$

$$\frac{\partial M(x, z, t)}{\partial t} = -I(x, z, t) M(x, z, t) C \quad (3)$$

式中 A, B, C 为光刻胶的曝光常数.而光刻胶对光的吸收系数通常为^[8]

$$\alpha(x, z, t) = AM(x, z, t) + B \quad (4)$$

考虑到胶层吸收作用后胶层内光强分布

$$I(x, z, t) = I_0(x, z) \exp [-\alpha(x, z, t)z] \quad (5)$$

式中 $I_0(x, z) = |U(x, z)|^2 = |U(\rho, z)|^2$, $U(\rho, z)$ 可由式(1)求得.

采用迭代方法来求解胶层内光强 $I(x, z, t)$ 分布的数值解^[9],焦斑强度在胶层表面沿径向分布为 $I_0(x, 0)$,扫描曝光开始时胶层内部各点的抑制剂浓度 M 均为 1.0,曝光时间分为 n 等份,同时也将胶层分成极薄的 m 等份,代入迭代方程,最后能够比较准确地得到胶层内光强分布.按照此种方法,式(3)、(4)、(5)转变为下列形式

$$i = 0 \cdots \cdots m - 1, j = 0 \cdots \cdots n = 1$$
$$\alpha(x, i\Delta z, j\Delta t) = AM(x, i\Delta z, j\Delta t) + B \quad (6)$$

$$I[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] = I_0(x, i\Delta z) \cdot \exp [-\alpha(x, i\Delta z, j\Delta t)\Delta z] \quad (7)$$

*国家自然科学基金(60078006)和中科院创新基金资助项目
Tel:0431-5261841 Email:lifengyou@mailcity.com
收稿日期:2003-04-07

$$\Delta M[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] = -I[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] M[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] C\Delta t \quad (8)$$

$$M[x, (i+1)\Delta z, (j+1)\Delta t] = M[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] + \Delta M[x, (i+1)\Delta z, j\Delta t] \quad (9)$$

n 和 m 越大越准确, 但是所需计算时间越多.

下面以 $4 \times$ 光刻物镜 ($NA = 0.15$) 和 Shipley Microposit S1800 系列正性光刻胶为模型, 计算激光直写的曝光量分布. 设入射到光刻物镜的光振幅分布为: $U_0(r) = \exp(-r^2/\omega_0^2)$, 高斯光束半径 $\omega_0 = 7.5 \text{ mm}$, 物镜焦距 $f = 50 \text{ mm}$, 通光孔径半径 $a = 7.5 \text{ mm}$, 激光波长 $\lambda = 0.442 \text{ }\mu\text{m}$. 由厂商提供的光刻胶 Dill 参数和光刻胶灵敏度, 可以得到曝光常数 A, B, C 分别为 $0.61 \text{ }\mu\text{m}^{-1}, 0.08 \text{ }\mu\text{m}^{-1}, 0.012 \text{ cm}^2/\text{mJ}$. 把 A, B, C 和初始光强 $I_0(x, \Delta z, 0)$ 以及 $M(x, \Delta z, 0) = 1$ 代入式(6)~(9)来计算 t 曝光时间后, 胶层内 z 深度的光场分布轮廓 $I(x, z, t)$ 的数值解. 图 1 是在没有离焦情况下 ($\delta_0 = 0$) 计算得到的不同膜层厚度中光场的径向分布, 图 1(a) 给出胶层内深度 $0.1 \text{ }\mu\text{m}, 0.5 \text{ }\mu\text{m}, 1.0 \text{ }\mu\text{m}$ 位置的光强分布曲线, 图 1(b) 为图 1(a) 中曲线的局部放大. 图中 $E_0 = 82 \text{ mJ/cm}^2$, 为光刻胶完全去除所需的最小曝光量, 即曝光量阈值. 由于在直角坐标激光直写光刻中匀速扫描直线, 胶层内空间各点曝光时间相同, 各点的曝光量为 $E(x, z) = I(x, z, t)t$. 所以, 胶层内不同深度的光场强度分布能够反映曝光量的空间分布.

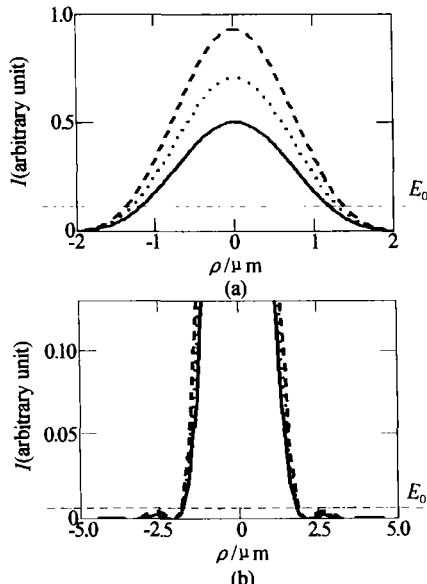


图 1 有吸收的胶层内不同深度光场强度分布轮廓, 折线是胶层内 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$; 虚线为 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$; 实线为胶层 $1.0 \text{ }\mu\text{m}$; E_0 为光刻胶曝光量阈值; (b) 为 (a) 曲线的局部放大
Fig. 1 Intensity profile for different depth in photoresist film while exiting absorbance. Where dashed line stand for the depth $0.1 \text{ }\mu\text{m}$, broken line for $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ and real line for $1.0 \text{ }\mu\text{m}$. E_0 is the threshold of exposure of photoresist. Fig(b) is the enlarged part of Fig(a)

从图 1(a) 中可以知道: 胶膜越厚, 胶层内光场中心强度下降越大, 强度分布曲线的斜率变缓, 致使实线、虚线和折线在 E_0 线上的间距越大, 即胶层深度方向曝光量梯度越大, 表明胶层内线条上下表面的宽度差值越大, 侧壁倾斜越大; 三条曲线交叉点位置线条的侧壁最陡. 从图 1(b) 中可以看到: 中心主瓣的两侧出现衍射一级. 由于 $4 \times$ 光刻物镜的焦深 (约 $15 \text{ }\mu\text{m}$) 远大于胶层厚度, 如果不考虑胶层吸收效应, 胶层内光场中心强度下降很小, 图 1 中的三条曲线几乎是重合的. 显然, 高度的胶层吸收将使曝光量在深度方向变化加大, 曝光在深度方向的一致性变差, 线条侧壁倾斜加剧是必然的. 此外, 胶层深度引起的离焦对光场分布的影响同其吸收相比很小, 只有离焦才导致光场径向尺寸展宽, 所以胶层对光吸收不会引起径向尺寸展宽.

为了在胶层内获得好的线条轮廓, 即线条既不出现在展宽, 侧壁又较陡, 要以恰当的曝光量进行曝光, 这在激光直写光刻中是十分关键的. 胶层表面处曝光量与激光功率、扫描速度的关系为^[5]

$$E(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P}{v\omega_g} \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega_g^2}\right) \quad (10)$$

式中 P 为激光输出功率, v 为扫描速度, ω_g 是焦斑半径, 约为 $2.5 \text{ }\mu\text{m}$. 由胶层内线条边缘位置的曝光量 E_0 计算可得对应径向位置的表面曝光量, 再由式 (10) 来确定扫描速度和激光输出功率. 当衍射一级的曝光量刚好小于曝光量阈值 E_0 时, 如图 1(b) 所示, 假设显影后胶层内线条不展宽, 由理论模型计算得到的厚 $1.0 \text{ }\mu\text{m}$ 胶层内的线条轮廓如图 2(a) 所示, 线宽为 $4.8 \text{ }\mu\text{m}$, 此时胶层内线条轮廓是最理想

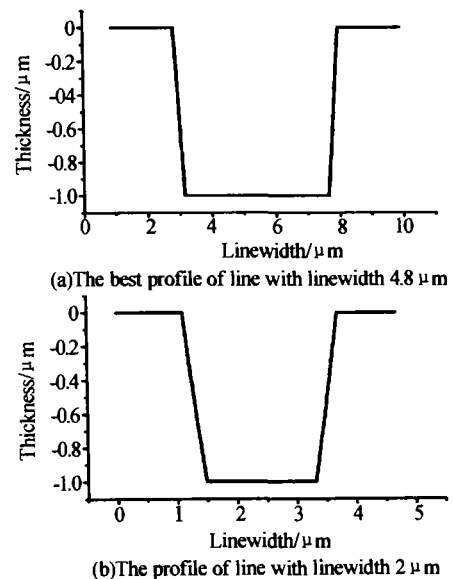


图 2 由模型计算得到的 $1.0 \text{ }\mu\text{m}$ 厚胶层内的线条轮廓
Fig. 2 Theoretic profile of line in the photoresist with thickness $1.0 \text{ }\mu\text{m}$

的. 由线条边缘点曝光量 $E(2.4, 1.0) = 82 \text{ mJ/cm}^2$ 计算得到: 胶层表面的曝光量 $E(2.4, 0) = 165 \text{ mJ/cm}^2$, 激光功率与扫描速度的比值为 $P/v = 0.033 \text{ mJ/mm}$. 当在 $1.0 \mu\text{m}$ 厚的胶层内写入线宽 $2 \mu\text{m}$ 线条时, 则 $P/v = 0.0186 \text{ mJ/mm}$, 线条轮廓如图 2(b) 所示. 当曝光量增大, 使衍射一级的曝光量值大于 E_0 时, 不仅线宽增大, 且在线条两侧还出现“伴线”. 反之, 当曝光量减小时, 径向尺寸减小, 线条变窄, 侧壁倾斜度变大.

2 实验结果分析

在激光直写光刻实验中采用 Shipley 公司

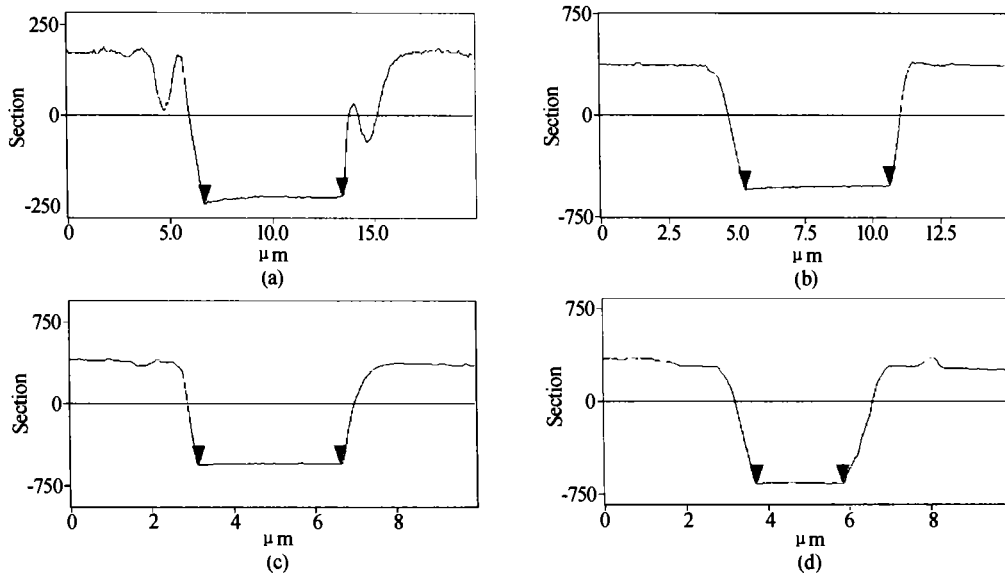


图 3 给出了激光直写光刻实验中测得线条的轮廓

Fig. 3 Experimental profile of line measured for laser direct writing in the photoresist

图 3(b) 为激光功率 0.132 mW 时写入的线条轮廓, 侧壁比较陡直、光滑, 底部线宽为 $5.335 \mu\text{m}$, 同图 2(a) 中线条轮廓比较, 侧壁陡度稍小, 线宽增大 11% ; 图 3(d) 是激光输出功率 0.074 mW 时的线条轮廓, 侧壁倾斜明显变大, 同图 2(b) 理论线条轮廓相比, 线宽为 $2.111 \mu\text{m}$, 比理论值大 5.5% . 图 3(a) 线条轮廓, 线条宽度为 $6.798 \mu\text{m}$, 胶层厚度明显变薄, 线条两侧“伴线”非常明显, 表明曝光量过大, 使衍射一级曝光量值超过光刻胶曝光量阈值 E_0 , 严重影响了线条质量; 图 3(c) 是小于理想曝光量情况下的线条, 侧壁倾斜变大一些, 宽度减小到 $3.481 \mu\text{m}$, 但是线条质量还是可以接受的; 实验中当激光输出功率小于 0.074 mW 时, 线宽更窄, 侧壁倾斜也更严重; 当曝光量低于曝光量阈值 E_0 时, 胶层内线条很窄且底面没有刻透, 线条质量很差.

在胶层内光分布式(1)中没有考虑基底散射光的影响, 这是以光刻胶与基底材料匹配为前提的. 因为当激光波长为 442 nm 时, S1805 正性光刻胶的

Microposit S1805 正性光刻胶, 以 2000 rpm 旋转速度在 K9 基片上涂胶, 胶膜厚约为 $1.0 \mu\text{m}$. 利用直角坐标激光直写系统^[11], 在涂有胶膜的基片上扫描曝光, 最佳曝光量是通过控制扫描速度和激光输出功率来实现的. 激光输出功率为 0.132 mW 、 0.074 mW , 以恒定速度 4 mm/s 在胶层内依次写入孤立的直线. 随后, 保持扫描速度不变, 改变激光功率依次写入孤立线条. 使用配套的 MICROPOSIT MF-321 显影液进行显影, 显影条件保持不变, 显影时间 15 s , 显影温度 20°C . 显影后用 AFM 测量线条轮廓, 如图 3 所示.

折射率 1.65 , K9 玻璃的折射率为 1.52 , 基底反射率小于 0.2% , 基底散射光的影响可完全忽略. 当基底材料与光刻胶不匹配情况下如基底为高折射材料时, 必须考虑基底散射光的影响, 式(1)应由文献[6]中式(9)代替, 其它计算过程不变, 但是计算要复杂一些. 由于理论模型没有考虑直写光刻工艺中预处理、显影等过程的影响, 而在直写光刻工艺中线宽误差一般控制在 10% 范围内, 所以在去除了工艺误差的影响后来看, 实验得到的线条轮廓结果与图 2 的理论分析结果基本是一致的, 从而证明了数学模型基本是正确的.

3 结论

把胶层对光的吸收因素考虑到描述胶层内光场分布的模型中, 使曝光量的空间分布与线条轮廓的分析更准确. 模型是以 $4 \times$ 光刻物镜为例对胶层内线条轮廓进行分析的, 但它同样适合于用其它数值孔径物镜进行直写光刻时来分析胶层内的线条轮廓.

当使用大数值孔径物镜写入线条时,应该尽可能采用较薄的光刻胶层,以减小胶层的吸收影响. 对于需要较厚胶层作掩模时,应采用低数值孔径的写人物镜进行直写光刻,比较容易获得轮廓好的线条.

参考文献

- 1 salgueiro J R , Román J F , Moreno V. System for laser writing to lithograph masks for integrated optics. *Opt Eng*, 1998, **37** (4): 1115 ~ 1123
- 2 Harurna M, Takahashi M, Wakahayashi K, et al. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses. *Appl Opt*, 1990, **29** (34): 5120 ~ 5126
- 3 Baber S C. Application of high resolution laser writers to computer generated holograms and binary diffractive optics. *Proc SPIE*, 1989, **1052**: 66 ~ 76
- 4 杜惊雷, 黄奇忠, 姚军, 等. 激光直写邻近效应的校正. *光学学报*, 1999, **19**(7): 953 ~ 957
Du J L, Huang Q Z, Yao J, et al. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 953 ~ 957
- 5 salgueiro J R, Moreno V, Linares J. Model of linewidth for laser writing on a photoresist. *Appl Opt*, 2002, **41** (5): 895 ~ 901
- 6 Yang Guoguang and Sheng Yibing. Research on laser direct writing system and its lithography properties. *Proc SPIE*, 1998, **3550**: 409 ~ 418
- 7 沈亦兵, 杨国光, 侯西云. 激光光刻中的超分辨现象研究. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1512 ~ 1517
Shen Y B, Yang G G, Hou X Y. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19** (11): 1512 ~ 1517
- 8 Dill F H, Hornberger W P, Hauge P S, et al. Characterization of positive photoresist. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1975, **22**(7): 445 ~ 452
- 9 Mack C A. Enhanced lumped parameter model photolithography. *Proc SPIE*, 1997, **2197**: 501 ~ 510
- 10 周光亚, 陈益新, 王宗光, 等. 激光直接写入过程的计算机仿真研究. *光学学报*, 1999, **19**(2): 277 ~ 282
Zhou G Y, Chen Y X, Wang Z G, et al. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 277 ~ 282
- 11 Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, et al. Laser direct writing system with cartesian and polar coordinate. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31** (5): 616 ~ 619

Analyzing of Line Profile for Laser Direct Writing Lithography

Li Fengyou^{1,2}, Xie Yongjun², Sun Qiang^{1,2}, Cao Zhaoliang², Lu Zhenwu², Wang Zhaoqi¹

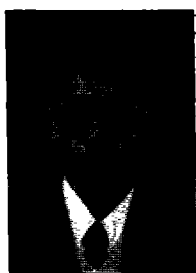
¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

² State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022

Received date: 2003-04-07

Abstract Considering effect of the photoresist film absorbing light energy, a model for describing the intensity distribution under various depths in the photoresist is more accurately presented on the base of previous model. The numerical values of the exposure distribution are calculated by using iterative method, and its plots related to the depth in photoresist are given subsequently. Line profile in photoresist is analyzed in term of the plots of the exposure distribution under different exposure dose so as to give a scheme for choosing optimum exposure dose in laser direct writing lithography. The experimental results in laser direct writing lithography show good agreements with theoretical calculation by using this model.

Keywords Laser direct writing lithography; Exposure dose; Line profile



Li Fengyou received his B. S. degree in physics from Jilin Normal College, China, in 1992, his M. S. degree and Ph. D. in optics from The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of OFMP, Chinese Academy of Sciences in 1999 and in 2002, respectively. Currently, he is engaging in his postdoctoral research works in Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin, China. His research interests include the design and fabrication of DOE's, micro-lithography, laser direct writing techniques, aspherical surface testing and ion beam etching techniques.