

文章编号: 0253-2239(2010)02-0525-06

接近式光刻衍射光场的有效波前作用规律分析

李木军 沈连娟* 赵 玮 郑津津 周 杰

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘要 掩模图形不同区域的波前因衍射光的相干叠加作用而对光刻胶上的场点产生不同的影响。为研究这一作用规律,采用波前分割的方法对掩模图形上的波前进行区域划分,并利用光场相干叠加相互抵消的性质,最终得到了掩模图形上对场点光场影响最大的波前区域。理论分析表明,对于图形内部场点而言,这个区域范围为场点附近约一个半波带的大小;而对靠近图形边缘的场点,其范围与边缘形状有关,一般要稍大于一个半波带。利用该方法可以显著提高仿真效率,对于分析由衍射造成的光刻误差来源和大小具有一定的理论指导意义。该理论计算结果得到了实验验证。

关键词 光刻;相干叠加;波前分割;半波带

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0525

Analysis of Effective Wave-Front Affecting Diffraction Field in Proximity Lithography

Li Mujun Shen Lianguan Zhao Wei Zheng Jinjin Zhou Jie

(Department of precision machinery & precision instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Because of the coherent superposition of the diffraction light, wave-front on different region of the mask pattern has different impact on field point in the resist. In order to analyse the contribution of these regions, a theoretical model based on wave-front division was presented. The mask pattern was divided into sub-regions and the impact of their wave-fronts on the diffraction field was investigated. For interference cancellation of the diffraction light, a special region can be finally attained, in which the wave-front has the most contribution to the field point. Study results show that, for the internal point of the pattern, the size of the region is a half-wave zone around the field point; and for points near the edge, the region is generally in a size larger than a half-wave zone, and its scope depending on the shape of the pattern. It is of great significance to improve the simulation efficiency of resist shape error caused by diffraction in lithography. Experiments have verified the calculation results.

Key words lithography; coherent superposition; wave-front division; half-wave zone

1 引 言

深度光刻是微机电系统(MEMS)制造的核心技术之一。为了获得较大高宽比的微结构,通常采用接近式或接触式光刻。在实际光刻中,一方面,由于光刻胶表面不平整或倾斜等原因,使掩模表面与光刻胶表面之间总存在着难以控制的空气间隙。另

一方面,为了保护昂贵的掩模和不损伤感光胶面,通常也会预留一定的间隙。这一间隙引起的光刻中的衍射效应会使光刻图形在转移中出现形状畸变,致使光刻胶结构形成形状缺陷,对光刻胶结构质量产生严重影响。

近年来光刻图形制作精度的研究,引起了人们

收稿日期: 2009-04-09; 收到修改稿日期: 2009-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(10775128)和中国博士后科学基金(20080430773)资助课题。

作者简介: 李木军(1976—),男,博士后,主要从事微细加工技术,光学光刻仿真等方面的研究。

E-mail: lmn@mail.ustc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lgshen@ustc.edu.cn

的重视,利用光刻模拟来分析图形误差以及进行优化,已成为研究热点之一^[1~4]。人们通常以平面波菲涅耳衍射理论为基本模型,在模拟光强分布的基础上,对显影后光刻胶的轮廓进行预测^[5~8]。在抑制光刻误差研究中,Tang等^[9~10]基于退火算法采用灰度掩模进行光波前调制,以补偿厚胶光刻图形转移中的失真。课题组研究人员也在光刻仿真与误差修正方面进行了一系列探讨^[11~12]。由于衍射光的相干叠加作用,掩模图形不同区域的波前对接收平面光刻胶上场点的影响大小并不相同。然而上述理论模型均未对此加以考虑。Tian等^[13]指出对场点光场贡献最大的区域来自场点附近,但没有指出这个区域的大小。根据先验知识也已意识到这一点,并通过仿真和实验,将光刻图形的矫正区域边长确定为 $2\mu\text{m}$ ^[14]。进而,在光刻误差预修正中采取了一些优化策略,针对不同图形特征对优化方法进行调整^[15]。这些优化策略虽然取得了不错的效果,但其选取只是根据经验来判断,缺乏必要的理论指导。其原因是针对特定图形的光刻仿真,很难对上述方法作出量化的原理阐释。

为了对由衍射引起的光刻误差的来源和大小有更深刻的认识,关键之一就是要找到掩模平面上波前对场点的作用规律。这就迫切需要建立合适的理论模型,分析掩模图形上对场点贡献最大的波前区域,为更有效的误差修正方法提供理论依据。本文针对接近式光刻的特点,借助半波带分析等波前分割的方法,对近场衍射规律进行分析,从理论上得出掩模平面上波前对场点光强的作用规律,最后通过实验进行验证。

2 掩模平面波前对场点的作用规律

根据光的衍射理论,可知掩模后面光刻胶表面上某一点 P 的光场为^[16]

$$U(P) = \iint_S U(Q) \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dS, \quad (1)$$

各变量的几何关系如图 1 所示,其中 $K(\theta)$ 为倾斜因子, $K(\theta) = \cos(n, r)/i\lambda = \cos\theta/i\lambda$, θ 为入射光波阵面的法向方向 \mathbf{n} 与 r 的夹角, $U(Q)$ 表示入射波在透光孔径 S 上的场分布, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, dS 为 S 上的面元素, r 为 P, Q 两点距离。

光源发出的光束经光学系统匀光后,以光能均匀分布的近似平行光照射到掩模平面上^[17]。假设

掩模面上的振幅分布 $A(x, y)$ 为常量 A_0 ,并考虑在图 1 中选取的坐标系中 $z_0 = 0$,则对于掩模面上的单色平面波,有

$$U(Q) = A(x, y) \exp(ikz_0) = A_0, \quad (2)$$

因此,

$$U(P) = A_0 \iint_S \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dS. \quad (3)$$

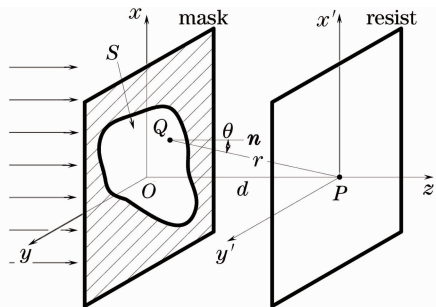


图 1 掩模和光刻胶之间的衍射

Fig. 1 Diffraction between mask and resist

2.1 掩模图形有效波前的分割

如图 2 所示,将掩模透光孔区域 S 的有效波前进行分割,分解为大量的小矩形以及图形边缘处的不规则区域,将这些区域分别记为 S_1, S_2, \dots , 则

$$U(P) = \iint_{S_1} A_0 \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dS + \dots + \iint_{S_n} A_0 \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dS, \quad (4)$$

其中 $\iint_{S_n} A_0 \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dS$ 可理解为第 n 个小区域上波前对 P 点光场的贡献,记为 U_n 。考虑其中某一个矩形面元 S_n ,如图 3(a) 所示,其中心在点 $O'(x_0, y_0)$,边长分别为 $2a, 2b$ 。对此小矩形区域建立如图 3(b) 所示的局部坐标系,并由(3)式得

$$U_n = \frac{A_0}{i\lambda} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{d}{r} dS, \quad (5)$$

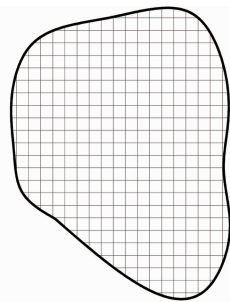


图 2 掩模图形的区域划分

Fig. 2 Region division of the mask pattern

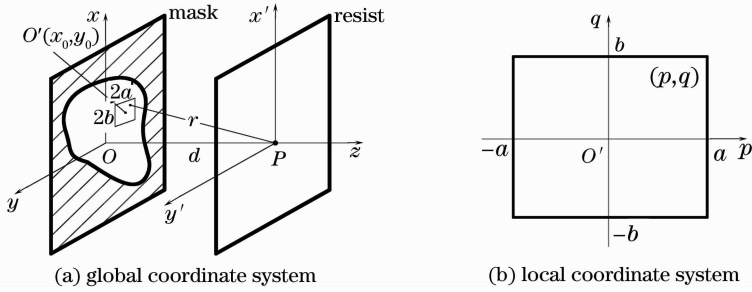


图 3 面元 S_n 的波前对 P 点光场的贡献

Fig. 3 Contributions of wave-front on surface S_n to field point P

其中 $r^2 = (x_0 + p)^2 + (y_0 + q)^2 + d^2$, 令 $r_0^2 = x_0^2 + y_0^2 + d^2$, 当划分的矩形区域足够小, 满足 $2a \ll r_0$, $2b \ll r_0$ 时, 有 $r \approx r_0$, 则

$$U_n \approx \frac{A_0}{i\lambda} \frac{d}{r_0^2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp(ikr) dpdq. \quad (6)$$

将 r 多项式展开成 x_0/r_0 和 y_0/r_0 的形式, 并设 $x_0/r_0 = l, y_0/r_0 = m$, 则有

$$r \approx r_0 + \frac{x_0 p + y_0 q}{r_0} + \frac{p^2 + q^2}{2r_0} - \frac{(x_0 p + y_0 q)^2}{2r_0^3} \dots = r_0 + (lp + mq) + \frac{1}{2} \left[\frac{(p^2 + q^2)}{r_0} - \frac{(lp + mq)^2}{r_0} \right] \dots, \quad (7)$$

令

$$f(p, q) = (lp + mq) + \frac{1}{2} \left[\frac{(p^2 + q^2)}{r_0} - \frac{(lp + mq)^2}{r_0} \right] \dots, \quad (8)$$

则

$$U_n \approx \frac{A_0 d}{i\lambda r_0^2} \exp(ikr_0) \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp[ikf(p, q)] dpdq, \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} k \left| \frac{(p^2 + q^2)}{r_0} - \frac{(lp + mq)^2}{r_0} \right| \ll 2\pi, \quad (10)$$

可以认为(9)式中第 2 项及以后各项对积分的贡献忽略不计^[16], 其中 $k = 2\pi/\lambda$. 此时

$$U_n \approx \frac{A_0 d}{i\lambda r_0^2} \exp(ikr_0) \int_{-a}^a \int_{-b}^b \exp[ik(lp + mq)] dpdq = \frac{A_0 d}{i\lambda r_0^2} \exp(ikr_0) 4ab \frac{\sin(kla)}{kla} \frac{\sin(kmb)}{kmb}, \quad (11)$$

从(11)式可知, 只要适当选择边长 $2a$ 和 $2b$, 使 $kla = \pi$ 或 $kmb = \pi$, 即 $2a = r_0 \lambda/x_0$ 和 $2b = r_0 \lambda/y_0$ 时, 有 $U_n = 0$. 即此小矩形区域内的各点对 P 点光场的作用综合效果为零.

从(10)式出发, 进一步利用不等式 $(lp + mq)^2 < (l^2 + m^2)(p^2 + q^2)$, 并注意到 $l < 1, m < 1$, 则有 $r_0 \gg \frac{(p^2 + q^2)_{\max}}{\lambda}$, 而 $(p^2 + q^2)_{\max} = a^2 + b^2 =$

$$\frac{r_0^2 \lambda^2}{4} \left(\frac{1}{x_0^2} + \frac{1}{y_0^2} \right), \text{ 所以 } r_0 \gg \frac{r_0^2 \lambda^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{x_0^2} + \frac{1}{y_0^2} \right), \text{ 即}$$

$$1 \gg \frac{r_0 \lambda}{4} \left(\frac{1}{x_0^2} + \frac{1}{y_0^2} \right), \quad (12)$$

又因为 $\left(\frac{1}{x_0^2} + \frac{1}{y_0^2} \right) \geq \frac{4}{x_0^2 + y_0^2}$, 所以

$$1 \gg \frac{r_0 \lambda}{4} \frac{4}{x_0^2 + y_0^2}, \text{ 即 } x_0^2 + y_0^2 \gg r_0 \lambda, \quad (13)$$

令 $x_0^2 + y_0^2 = s_0^2$, 对上式两边平方, 并注意到 $s_0^2 + d^2 = r_0^2$, 则有 $s_0^4 - \lambda^2 s_0^2 - \lambda^2 d^2 \gg 0$, 即 $(s_0^2 - \lambda^2/2)^2 \gg \lambda^2 d^2 + \lambda^4/4$, 所以 $s_0^2 \gg \sqrt{\lambda^2 d^2 + \lambda^4/4} + \lambda^2/2$, 即

$$x_0^2 + y_0^2 \gg \sqrt{\lambda^2 d^2 + \frac{\lambda^4}{4}} + \frac{\lambda^2}{2}. \quad (14)$$

从(11)式及(14)式可知, 对于中心点位置满足(14)式的矩形面元, 只要选择适当的边长 $2a = r_0 \lambda/x_0$ 和 $2b = r_0 \lambda/y_0$ 时, 有 $U_n = 0$, 此面元内波前对 P 点光场的作用综合效果为零.

依次调整每个符合条件的小矩形的中心和边长, 使得其区域内积分为零, 这样最终将掩模图形划分为 3 个区域, 如图 4 所示. 一是掩模上与 P 点相对应的 O 点附近圆形区域 S_1 , 二是符合光场相消条件的各个小矩形面元组成的 S_2 , 三是远离 O 点的图形边缘部分, 记为 S_3 .

由前面论述, 整个 S_2 区域的波前对 P 点光场的

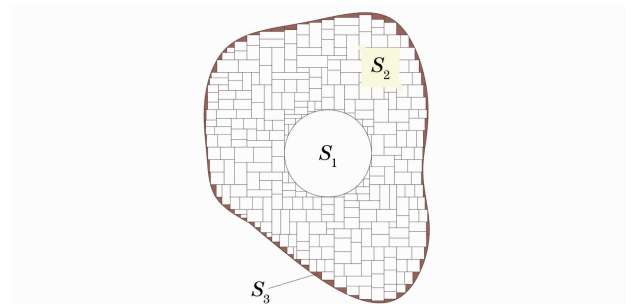


图 4 掩模图形上波前分割的结果

Fig. 4 Wave-front division result of the mask pattern

贡献为零。而 S_3 区域对 P 点光场的作用,一方面因这部分区域各面元零散杂乱且不规则,在积分运算时被积函数高频振荡,其线性叠加的结果会互相抵消;另一方面,因该区域内各面元距离 O 点较远而光刻间隙 d 相对较小,其倾斜因子很小,从而对 P 点的作用相对较小。这样,对 P 点光场的影响主要来自于 S_1 区域。 S_1 相当于一个圆形透光孔,其半径由(14)式决定,在接近式光刻条件下,一般 $d \gg \lambda$, 所以由(14)式有

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} \gg \sqrt{\lambda d}. \quad (15)$$

2.2 圆孔的半波带分析方法

将 S_1 看成一个圆形透光孔,进一步利用半波带法来分析近场衍射的量化规律。半波带法是处理次波相干叠加的一种简化方法,对有效波前进行分割近似,然后再将各个面元对衍射光场的贡献进行代数叠加。

平行光在掩模平面 S_1 上的波前 S 为等相面。如图 5 所示,顶点 O 与场点 P_0 的距离为 d ,以 P 为中心,分别以 $d + \lambda/2, d + \lambda, \dots$ 为半径作球面,将波前分割成一系列的环形带,即半波带。用 U_1, U_2, \dots 代表各半波带发出的次波在 P_0 点产生的复振幅,并假设 $U_1 = A_1 \exp(\varphi_1), U_2 = A_2 \exp(\varphi_2), \dots, U_n = A_n \exp(\varphi_n)$, 则圆透光孔在 P_0 点的合成复振幅为

$$U = U_1 + \dots + U_n = A_1 \exp(\varphi_1) + \dots + A_n \exp(\varphi_n). \quad (16)$$

由半波带波前划分的特点^[16], U_1, \dots, U_k 之间振幅和相位分别有如下的关系

$$A_k \approx \frac{1}{2}(A_{k-1} + A_{k+1}), \quad (17)$$

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \frac{\pi}{2}, \exp(i\varphi_{k+1}) = -\exp(i\varphi_k), \quad (18)$$

将(17)和(18)式代入(16)式中,有

$$U \approx \frac{1}{2}(U_1 + U_n), \quad (19)$$

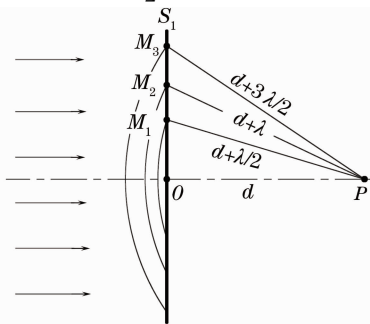


图 5 半波带法

Fig. 5 Half-wave-band analysis method

这说明了场点 P_0 的作用主要由第一个半波带和最后一个半波带共同决定。实际上考虑到接近式光刻,且透光孔足够大时, U_n 的倾斜因子中 $\cos \theta$ 往往很小,所以 U_n 对场点 P_0 的作用也相对较小,从而有

$$U \approx \frac{1}{2}U_1. \quad (20)$$

因此掩模上对场点影响最大的波前主要来自于场点附近一个半波带大小的区域,其半径

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{\left(d + \frac{\lambda}{2}\right)^2 - d^2} = \sqrt{d\lambda + \frac{\lambda^2}{4}}, \quad (21)$$

在接近式光刻条件下,一般 $d \gg \lambda$, 所以

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} \approx \sqrt{d\lambda}. \quad (22)$$

2.3 有效影响区域的讨论

综上所述,对图形内部的场点而言,在接近式光刻中当掩模与光刻胶表面之间的间隙相对于波长,且掩模图形相对于 $\sqrt{d\lambda}$ 都较大时,对其光强最有影响的区域是掩模上场点附近约为第一个半波带的范围大小的区域,其半径由(22)式确定。而此范围以外的区域因光场叠加时互相抵消或因有效面积太小而仅产生较小的影响。如果场点位置靠近图形边缘,由于波前分割的情况比较复杂,其最有效影响区域并非总是一个半波带大小的区域,而与图形边缘形状有关。对于较为常见的直角图形边角处,可以用与上文类似的方法证明其靠近边角部分最主要影响区域半径仍然由式(22)来确定。这对于研究由衍射效应产生的光刻图形直角圆化的误差矫正,具有一定的理论指导意义。

3 理论分析结果与实验验证

3.1 最有效的影响范围

从(22)式可知,最有效影响波前区域的半径 ρ 随着 d 的增大而变大。接近式光刻的间隙 d 一般在 $0 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间,当 d 分别为 $5, 10$ 和 $15 \mu\text{m}$, 在 g 线紫外光(波长 $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$) 光源下,相应的最有效影响范围分别为 $1.48, 2.09$ 和 $2.56 \mu\text{m}$ 。

为了对最有效影响范围进行实验验证,考虑如下的掩模图形,如图 6 所示,在一个边长为 $30 \mu\text{m}$ 的方孔的直角顶点的上侧和右侧各放置一个边长为 $2 \mu\text{m}$ 的方孔,图中 L 为小孔到方孔的距离。分别设置 L 为 $1, 1.5, 2, 2.5$ 和 $3 \mu\text{m}$, 采用 AZ9260 正胶进行光刻实验。前烘 10 min , g 线紫外光(波长 $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$) 曝光 80 s , 掩模与光刻胶间间隙为 $10 \mu\text{m}$, 用 0.6% 的 NaOH 显影液显影 180 s , 所得的

光刻图形如图 6(b)~(f) 所示。根据(22)式,理论上大小孔之间最有效影响范围为 $2.09 \mu\text{m}$ 。而从图 6 中可见,在间距为 $1 \mu\text{m}$ 时,小孔对方孔的影响

非常强烈,随着距离的增加,影响逐步变小,距离为 $2.5 \mu\text{m}$ 时,作用明显减弱,当到 $3 \mu\text{m}$ 距离时,影响已经比较微弱。这与理论计算的结果基本吻合。

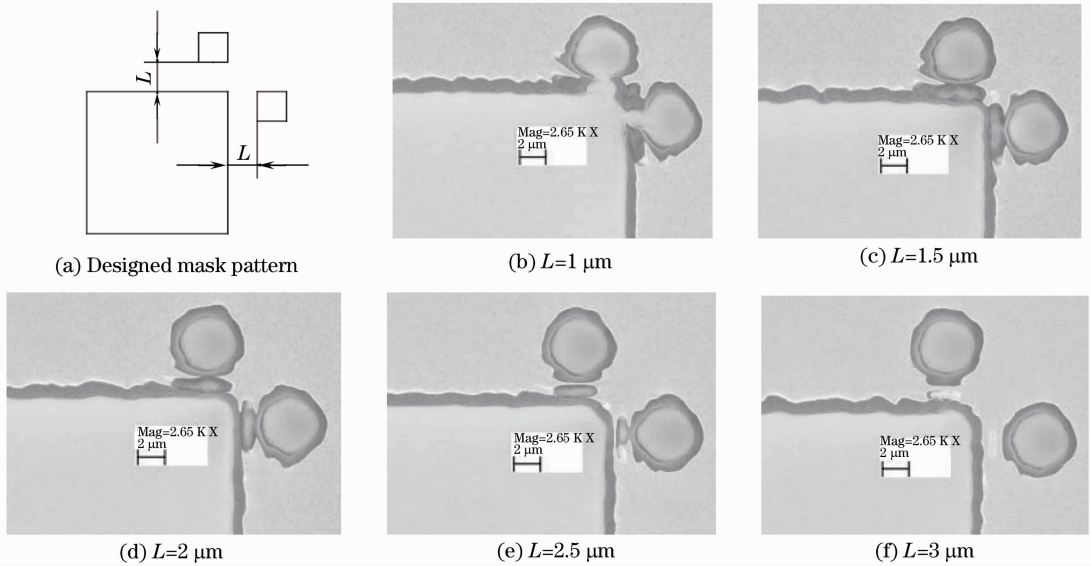


图 6 设计的掩模图形(a)以及不同间距 L 下所获得的光刻图形电镜照片(b)~(f)

Fig. 6 Designed mask pattern (a) and the SEM micrographs of photo-resist pattern in different distance L (b)~(f)

3.2 直角特征的光刻畸变分析

在光刻实验中经常会发现,同样是直角特征,但凸直角和凹直角的图形衍射影响程度并不一样,凹直角图形的圆化误差要更严重,如图 7 所示。应用上述理论可分析如下:光刻胶上某点光强的最有效影响区域来自于场点附近一个半波带大小的范围,这一半波带内各点对场点产生的扰动正负号相同。因此相干叠加的结果是面积越大,作用的光强越大。如图 8 所示,凹直角处第一个半波带的有效面积(阴影部分)是凸直角的 3 倍,因此其在光刻胶对应角点处产生的光强要大得多。由此造成凹直角角点附近曝光剂量比较大,其圆化程度也相应的比凸直角大得多,而这正好印证了上述结论。

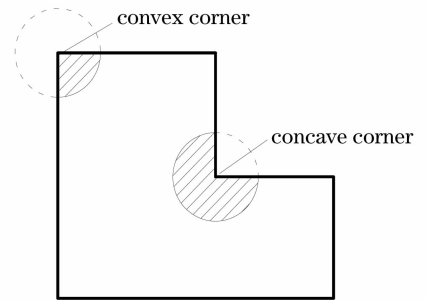


图 8 凹、凸直角角点处有效面积比较

Fig. 8 Comparison of the concave and convex right-angled corner of effective area

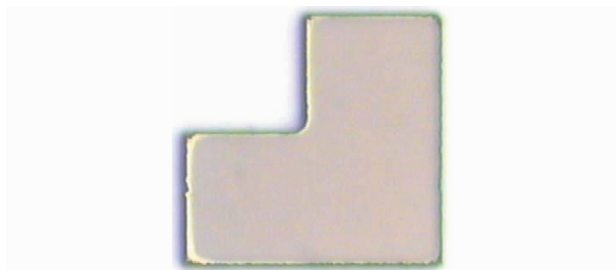


图 7 L 形光刻图形的显微镜照片

Fig. 7 Microscope graph of L-shaped lithography pattern

4 结 论

利用波前分割的方法,研究掩模图形上的波前

对光刻胶上某点光场的作用规律。理论研究表明,在掩模与光刻胶之间的间隙 d 相对于曝光光源波长,掩模图形尺寸相对于 $\sqrt{d\lambda}$ 都较大的情况下,光刻胶上某点的光强主要由掩模图形上此场点附近区域所确定,这个区域的范围约为第一个半波带大小。其它区域对此场点光场的贡献由于区域内各部分相干叠加相消,而使得实际作用相对较小。作为此理论的应用,利用不同图形特征点处第一个半波带的有效面积的大小,解释了图形特征不同所带来的图形畸变差异的原因。该理论得到了实验验证。此方法不仅可以有效、快速判断光刻图形畸变的大小,而且可以作为掩模优化方法设计过程中的理论指导。

参考文献

- 1 Balint Meliorisz, Andreas Erdmann. Simulation of mask proximity printing[J]. *J. Micro-Nanolithography Moems and Moems*, 2007, **6**(2): 023006
- 2 Lawes Ronald A. Manufacturing tolerances for UV LIGA using SU-8 resist [J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15**(11): 2198~2203
- 3 Haiyan Qin, Xuan Li, Su Shen. Novel optical lithography using silver superlens[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 149~151
- 4 Shen Tingzheng, Lü Haibao, Gao Yiqing *et al.*. Research of mask division for improving the edge sharpness of photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 533~537
 湛廷政, 吕海宝, 高益庆等. 掩模分形提高光刻边缘锐度的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 533~537
- 5 Tang Xiongui, Guo Yongkang, Du Jinglei *et al.*. Analysis of diffractive image field in thick film photo-resist by using fourier modal method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 246~250
 唐雄贵, 郭永康, 杜惊雷等. 利用傅里叶模方法分析厚层光刻胶内衍射光场[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 246~250
- 6 Y. J. Chuang, F. G. Tseng, W. K. Lin. Reduction of diffraction effect of UV exposure on SU-8 negative thick photoresist by air gap elimination[J]. *Microsystem Technologies*, 2002, **8**(4~5): 308~313
- 7 R. Yang, W. J. Wang. A numerical and experimental study on gap compensation and wavelength selection in UV-lithography of ultra-high aspect ratio SU-8 microstructures [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, **110**(2): 279~288
- 8 Feng Ming, Huang Qingan, Li Weihua *et al.*. Simulation of SU-8 photoresist profile in deep UV lithography [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(9): 1465~1470
 冯明, 黄庆安, 李伟华等. SU-8胶深紫外光刻模拟[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(9): 1465~1470
- 9 Xiongui Tang, Jinkun Liao, Heping Li *et al.*. Analysis and simulation for the compensation of distortion in thick film analog lithography [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(1): 98~107
- 10 Tang Xiongui, Yao Xin, Gao Fuhua *et al.*. Precompensation for nonlinear distortion in thick film photolithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1032~1036
 唐雄贵, 姚欣, 高福华等. 厚胶光刻非线性畸变的校正[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1032~1036
- 11 Li Mujun, Shen Lianguan, Li Xiaoguang *et al.*. Theoretical analysis and pre-compensation simulation of pattern distortion in proximity UV-lithography [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2008, **44**(11): 69~74
 李木军, 沈连娟, 李晓光等. 接近式紫外光刻中图形失真的分析与预修正仿真[J]. *机械工程学报*, 2008, **44**(11): 69~74
- 12 Li Mujun, Shen Lianguan, Zhao Wei *et al.*. Propagation and diffraction of partial coherent light in UV-lithography [J]. *J. University of Science and Technology of China*, 2007, **37**(1): 24~29
 李木军, 沈连娟, 赵玮等. 紫外光刻中部分相干光的传播及衍射效应[J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, **37**(1): 24~29
- 13 Tian Xuehong, Liu Gang, Tian Yangchao *et al.*. Study on computer simulation of proximity lithography [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, **40**(7): 181~185
 田学红, 刘刚, 田扬超等. 接近式光刻的计算机模拟研究[J]. *微纳电子技术*, 2003, **40**(7): 181~185
- 14 Li Xiaoguang, Shen Lianguan, Li Mujun *et al.*. Research on design optimization of photo mask in UV-lithography based on genetic algorithm [J]. *J. System Simulation*, 2008, **20**(17): 4601~4604
 李晓光, 沈连娟, 李木军等. 基于遗传算法的接近式紫外光刻中掩模补偿优化研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, **20**(17): 4601~4604
- 15 Zheng Jinjin, Chen Youmei, Zhou Hongjun *et al.*. Correction of pattern transfer errors for SU-8 UV deep lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(12): 1926~1931
 郑津津, 陈有梅, 周洪军等. SU-8紫外深度光刻的误差及修正[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(12): 1926~1931
- 16 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. 7th (expanded) edition. United States of America: Cambridge University Press, 1999. 514~515, 426~427, 413~416
- 17 Zhou Chongxi, Lin Dajian. Calculation & simulation of intensity distribution of i-line uniform illumination optical system for photolithography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, **23**(2): 1~6
 周崇喜, 林大键. i-line光刻高均匀照明系统光能分布的计算模拟[J]. *光电工程*, 1996, **23**(2): 1~6