

文章编号: 0253-2239(2006)07-1032-5

厚胶光刻非线性畸变的校正*

唐雄贵 姚欣 高福华 温圣林 刘波 郭永康 杜惊雷

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 利用厚胶光刻技术制作大深度微结构元件是一种有效的途径,但厚胶光刻过程中的非线性畸变对光刻面形质量的严重影响限制了该技术的应用,基于此,提出了一种对掩模透射率函数进行校正的方法。分析空间像形成及其在光刻胶内传递、曝光、显影等过程中非线性因素的影响,利用模拟退火算法对掩模透射率函数进行校正,以提高光刻面形质量,并以凹面柱透镜为例,给出了校正前后的显影轮廓模拟结果,其校正后浮雕面形的体积偏差仅为 2.63%。该方法在有效改善面形质量的同时,并没有引起掩模的设计、制作难度及费用增加,这对于设计、制作高质量的微结构元件有重要意义。

关键词: 物理光学; 厚胶光刻; 模拟退火算法; 非线性畸变; 校正; 体积偏差

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Precompensation for Nonlinear Distortion in Thick Film Photolithography

Tang Xiongguai Yao Xin Gao Fuhua Wen Shenglin Liu Bo Guo Yongkang Du Jinglei

(College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: Fabrication of large depth microstructure by using thick film photolithography-technology is a considerable option, but effect of nonlinear distortion on the photolithography surface profile quality severely limits its application. For the above reason, a method to correct mask transmissivity function is proposed. The influences of nonlinear factors such as spatial imaging, propagation, exposure and development process are analyzed. Then, by utilizing the simulated annealing algorithm, transmissivity function of mask is optimized to improve the quality of surface profile of photolithography. Taking a concave cylinder lens as example, the simulated results of developed profile before and after correction are presented, and the volume deviation of profile after correction is only 2.63%. This method obviously improves the quality of surface profile, but does not increase difficulty of design and fabrication of the mask and expense, which is very useful to fabricate microstructure with high fidelity.

Key words: physical optics; thick film photolithography; simulated annealing algorithm; nonlinear distortion; correction; volume deviation

1 引言

近年来,用于制作大深度微结构元件的紫外厚胶光刻技术引起了人们的广泛关注,该方法具有简单易行、成本低廉、且与集成电路(IC)工艺兼容等优点^[1]。然而,厚胶光刻过程是一个复杂的多参量影响过程,多种非线性畸变的存在导致光刻的面形质

量受工艺条件影响很大^[2~4],这将可能使所制作出的微结构元件的表面轮廓严重失真,从而会引起器件性能明显降低。虽然可以通过光刻实验来测定曝光与显影深度之间的非线性关系^[5],从而对其曝光显影过程中的非线性畸变进行预校正,但由于需要进行大量的实验和观察测试,这不仅使得工作量和成本费用急剧增加,而且其实验测试数据的适用范

* 国家自然科学基金(60276018)和中国科学院光电所微细加工技术国家重点实验室资助课题。

作者简介: 唐雄贵(1974~),男,湖南邵阳人,四川大学博士研究生,主要从事厚胶光刻技术方面的研究。

E-mail: txgily@sohu.com

导师简介: 郭永康(1938~),男,四川人,四川大学教授,博士生导师,主要从事信息光学、衍射光学和微细加工光学技术研究。guoyongkang@263.net

收稿日期: 2005-08-08; 收到修改稿日期: 2005-10-09

围存在较大的局限性。因而,深入分析厚胶光刻非线性畸变机理,建立优化算法对其畸变进行有效的预校正,对于设计、制作高质量的微结构元件具有重要的理论和实际意义。

本文以接近式曝光方式为例,对厚层抗蚀剂光刻中空间像形成及其在光刻胶内传递、曝光、显影等过程中非线性因素的影响进行了深入分析;采用模拟退火算法,反演计算在理想显影轮廓允许存在一定体积偏差条件下所需的优化光场分布,给出了掩模透射率函数优化前后的显影轮廓面形模拟结果。

2 非线性畸变机理

光刻曝光有接触式、接近式与投影式三种方式。为简单起见,本文仅具体分析接近式曝光过程,对其他曝光方式可进行类似分析。设一束波长为 λ 的平面波垂直入射到掩模板上,光刻胶面与掩模面平行,它们之间存在一定的空隙距离 d 。掩模的透射率函数为 $t(x, y)$,光波透过掩模板后发生衍射,从而在光刻胶表面形成掩模的空间像,其光场分布为^[6]

$$U(x, y) = H_1\{t(x, y)\}, \quad (1)$$

H_1 为光场透过掩模后、在光刻胶表面形成掩模的空间像过程的系统作用函数。由于所设计的掩模图形在空间像的形成过程中其高频信息会发生丢失,故其空间像的光场分布函数 $U(x, y)$ 将不同于掩模透射率函数 $t(x, y)$,其畸变程度与掩模特征尺寸、空隙距离及曝光波长有关,其值可用角谱理论快速求解。

传播到光刻胶表面处的光场将会发生反射和透射,只有透射光进入光刻胶内部,并在光刻胶内部进一步发生衍射;当传播到光刻胶与基底的分界面时将会发生反射,反射光场将与原光场进行相干叠加;另外,由于光在传播过程中将引起其折射率发生改变,这反过来会引起光刻胶内部光场分布的改变,因而其空间像在光刻胶内部的传递是一个随时间变化的复杂过程。在某一时刻,光刻胶内部的光场分布函数表示为

$$U_{in}(x, y, z, t) = H_2[U(x, y), z, t], \quad (2)$$

H_2 为光场透过光刻胶表面后在光刻胶内部发生衍射的系统作用函数,光刻胶内部的光场分布不仅与其空间像的光场分布函数 $U(x, y)$ 有关,而且与曝光过程中的相应时刻、光刻胶内部位置以及光刻胶和基底材料的光学特性有关。对光刻胶表面的空间像在非均匀折射率分布的光刻胶内传递的数值计算,可采用角谱理论准确、快速求解。

在曝光过程中,光刻胶内衍射光场分布与光敏

化合物(Photoactive compound, PAC)浓度分布是一个连续的、动态的、非线性的相互影响过程,直到曝光结束或光敏化合物反应完成。因而,可利用(1)式、(2)式得到曝光结束后光刻胶内部的曝光量分布:

$$D(x, y, z) = \int |U_{in}(x, y, z, t)|^2 dt, \quad (3)$$

光刻胶中光敏化合物浓度是影响显影速率的主要因素。光刻胶因吸收光能量而发生光化学反应,导致其光敏化合物浓度分布发生改变,其与曝光量的关系为^[7]

$$M(x, y, z) = M_0 \exp[-C \times D(x, y, z)], \quad (4)$$

M_0, C 分别表示光刻胶光敏化合物初始浓度分布和曝光参量,且 C 值与曝光光强有关^[8]。由(4)式可以看出,曝光后光敏化合物浓度与其对应的曝光量成指数衰减关系。

目前已提出多种显影模型来描述显影速率与光敏化合物浓度之间的非线性关系,如 Dill 显影模型、Mack 显影模型、Notch 显影模型、Dammel 显影模型。Mack 显影模型是目前使用最为广泛的显影模型,其显影速率表示为

$$R = R_{\max} \frac{(a+1)(1-m)^n}{a+(1-m)^n} + R_{\min}, \quad (5)$$

$$a = \frac{n+1}{n-1}(1-m_{th})^n,$$

式中 $R_{\max}, R_{\min}, m_{th}$ 和 n 分别为最大显影速率、最小显影速率、光敏化合物浓度阈值及显影选择比。另外,在厚胶光刻中,显影速率存在深度效应,即显影过程中显影速率对深度位置有依赖性。

由以上分析可知,在光学光刻过程中,掩模到光刻胶表面的空间像形成及其在光刻胶内部的传递、曝光、显影等诸多环节存在着复杂的非线性畸变因素,这些因素的存在导致其最终的显影轮廓面形与所希望的理想面形存在偏差。当光刻胶的厚度较小($1 \sim 2 \mu\text{m}$)和特征尺寸较大(大于 $5 \mu\text{m}$)时,非线性畸变对光刻面形的影响较小,在实验过程中可以通过工艺参量的优化来减小这些非线性因素的影响^[9,10]。然而,随着光刻胶厚度的增加,使得其曝光时间和显影时间也相应增加,这进一步加剧了光刻浮雕面形的非线性畸变,以致其与理想面形的偏差较大。

3 校正方法

由上一节分析可知,光刻过程中的每一个环节都是复杂的非线性变化过程。为使光刻的浮雕面形

尽可能地接近理想轮廓面形,在确定掩模透射率函数时须考虑各个环节的非线性畸变因素的影响。而目前在设计掩模时确定其透射率函数的方法主要有:1)假定其光刻胶上曝光量与对应蚀刻深度成线性关系,从而由所希望的理想面形轮廓可容易得到掩模透射率函数,然后通过工艺参量的优化来减小非线性畸变^[11];2),在工艺参量确定条件下,实验测定其显影深度随曝光量的变化曲线,然后根据该曲线来反演掩模透射率函数^[12]。这些方法虽然设计简单,但都存在实验费用高、面形偏差程度大,且适用范围存在较大的局限性。

为使光刻胶显影后面形偏差在预先设定的范围内,因而在设计掩模透射率函数时应进行预补偿。首先,假定所希望的理想面形轮廓函数 $f(x, y)$ 与掩模的透射率函数成线性关系。对于正性光刻胶,其透射率函数为

$$t_0(x, y) = 1 - \frac{f(x, y)}{f_{\max}(x, y)}, \quad (6)$$

式中 $f_{\max}(x, y)$ 为理想面形轮廓函数的最大值。然后对光刻过程进行模拟,从而得到显影后轮廓面形函数 $f_0(x, y)$, 其与理想面形的偏差为

$$\Delta(x, y) = f_0(x, y) - f(x, y). \quad (7)$$

在位置坐标 (x_0, y_0) 处,若 $\Delta(x_0, y_0) > 0$, 说明该处曝光不足,其掩模透射率偏小;反之,说明该处曝光过度,其掩模透射率偏大。为简单起见,假定光刻过程中轮廓面形函数与掩模透射率函数成二阶函数关系,设掩模透射率函数为

$$t(x, y) = \frac{t_0(x, y) + c_0 + c_1 \Delta(x, y) + c_2 \Delta^2(x, y)}{[t_0(x, y) + c_0 + c_1 \Delta(x, y) + c_2 \Delta^2(x, y)]_{\max}}, \quad (8)$$

式中 $[t_0(x, y) + c_0 + c_1 \Delta(x, y) + c_2 \Delta^2(x, y)]_{\max}$ 为峰值。对于(8)式中参量 c_0, c_1 和 c_2 , 由于只需找到一个其面形偏差满足预先要求的一个优化解即可,不需找到全局的最优解,这有利于降低数值计算时间。本文采用模拟退火算法来求解^[13], 该方法是通过一定的步长来改变待求参量以搜索评价函数的全局优化最小值,因其在全局范围内极强的搜寻能力而被广泛应用于许多领域。由(8)式掩模透射率函数可得到显影后面形函数为 $f'(x, y)$, 该面形与理想面形 $f(x, y)$ 的体积偏差定义为

$$V = \frac{\iint |f(x, y) - f'(x, y)| dx dy}{\iint f(x, y) dx dy}, \quad (9)$$

(9)式函数描述了显影后光刻胶面形轮廓相对于理

想面形的偏离程度,这里选用该函数作为评价函数。对于给定的初始值 $r_0 = (c_0, c_1, c_2)$, 其对应的评价函数的初值为 $V(r_0)$; 接着给初始值加一个扰动 $\delta r_0 = (\delta c_0, \delta c_1, \delta c_2)$, 得到新的一组参量为 $r_0 + \delta r$, 则其新状态下的评价函数值为 $V(r_0 + \delta r)$, 该扰动所引起的评价函数值的改变量为

$$\Delta V = V(r_0 + \delta r) - V(r_0). \quad (10)$$

若 $\Delta V < 0$ 时,则接收扰动;若 $\Delta V > 0$, 且此扰动被接收概率 $P = \exp[-\Delta V/(qT)]$ 大于在 $(0, 1)$ 内均匀分布的随机数 σ_0 , 则接收扰动,反之不接收扰动(式中 q 为概率调节因子, T 为迭代过程控制参量)。若扰动被接收,则用参量 $r_0 + \delta r$ 代替 r_0 , 否则产生一个新的扰动,重复此过程可获得当前 T 下的评价函数的平衡值;然后让 T 从一个足够大的值以一定的规则降低,在每一个 T 下通过扰动来达到平衡值,一直降到 $T \approx 0$ 为止。此时,评价函数值变大的概率几乎为零,从而稳定收敛全局最小。另外,在搜索参量 c_0, c_1 和 c_2 的过程中,数值计算时间与搜索次数成正比,因而为降低其计算时间,当评价函数 V 小于所允许的体积偏差时,就可结束搜索过程,最后所得的参量 c_0, c_1 和 c_2 为所求的优化解,利用(8)式就可得到优化后的掩模透射率函数 $t(x, y)$ 。

4 数值模拟实例

下面我们以接近式曝光制作凹面柱透镜为例,通过数值模拟来验证该校正方法的可行性和有效性,并对非线性畸变校正前后的模拟结果进行了比较。柱面直径为 $16 \mu\text{m}$, 矢高为 $8 \mu\text{m}$, 其长度远大于矢高,要求其体积偏差的允许值在 3% 以内。光刻胶为 Clariant 公司生产的 AZ P4620, 其曝光、显影参量及相关参量如表 1 所示^[8]。

表 1 光刻胶 AZP4620 参量及其模拟参量

Table 1 Exposure-development parameters and related parameters of AZ P4620

$A / \mu\text{m}^{-1}$	0.2117	Intensity / (mW/cm ²)	3.5
$B / \mu\text{m}^{-1}$	0.0427	Exposure time / s	100
$C / (\text{cm}^2/\text{mJ})$	0.027	Development time / s	80
$R_{\max} / (\text{nm}/\text{s})$	120	Thickness / μm	8.2
$R_{\min} / (\text{nm}/\text{s})$	1	Wavelength / nm	365
n	2.5	$n_{\text{substrate}}$	1.45
M_{th}	-10		
$n_{\text{unbleached}}$	1.7150		
n_{bleached}	1.7173		

若不考虑光刻过程的非线性因素,根据光刻胶上曝光量与其对应蚀刻深度成线性的关系可容易求

得其掩模透射率函数,然后由表 1 光刻工艺参量对光刻后所获得凹面柱透镜进行数值模拟,利用(9)式计算,其体积偏差高达 33.9%。若理想面形轮廓与其对应的透射率函数成线性关系,直接利用(6)式可得到其透射率函数,由于柱透镜在轴方向分布相同,图 1 中仅画出垂直其轴方向的掩模透射率分布。然后利用该透射率函数及表 1 光刻工艺参量进行数值模拟,其模拟结果如图 2 所示,虚线表示所希望的理想面形轮廓,实线表示显影后模拟轮廓面形。由图可以看出,二者相差较大。经计算,其体积偏差为 18.5%,表明其面形质量仍较差。现利用模拟退火算法对其掩模透射率函数进行优化,其优化后的透射率函数如图 3 所示,与图 1 相比有较大不同;同样利用表 1 所给出的参量和图 3 所示的掩模透射率函数,模拟所得的显影轮廓面形与理想轮廓面形分别如图 4 中的实线、虚线所示。由图可知,两者几乎重合,面形质量得到了明显提高,其体积偏差仅为 2.63%,其显影后三维浮雕轮廓如图 5 所示。

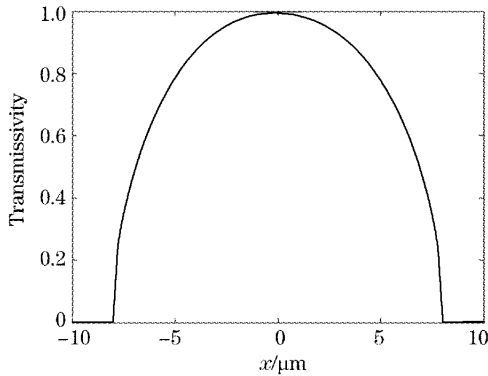


图 1 校正前掩模透射率归一化分布
Fig.1 Normal transmissivity function of mask before correction

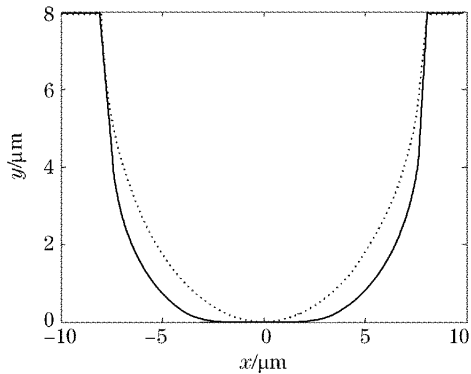


图 2 校正前理想(虚线)与显影后(实线)的面形轮廓比较
Fig.2 Comparison between the ideal profile (dash line) and simulated profile (solid line) before correction

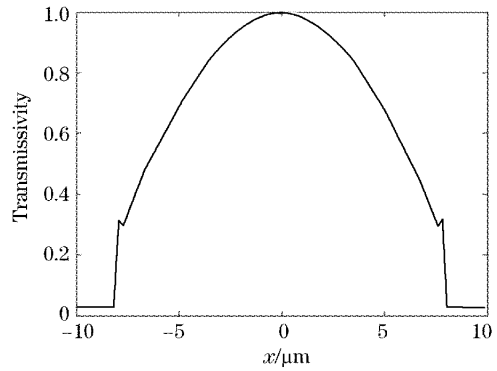


图 3 校正后掩模透射率归一化分布
Fig.3 Normal transmissivity function of mask after correction

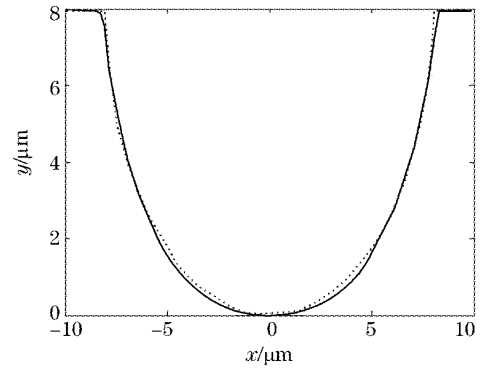


图 4 校正后理想(虚线)与显影后(实线)的面形轮廓比较
Fig.4 Comparison between the ideal profile (dash line) and simulated profile (solid line) after correction

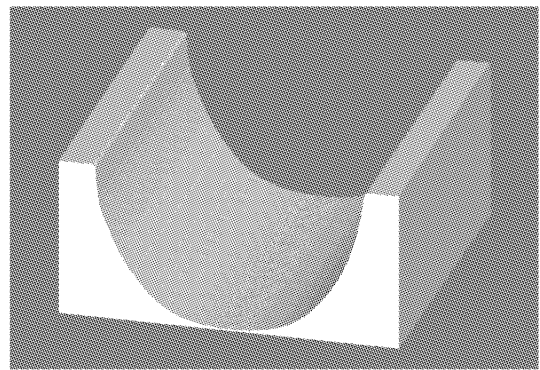


图 5 校正后的显影三维浮雕轮廓图
Fig.5 Simulation result of 3-D embossed surface profile after correction

另外,利用本文方法对其他面形的微结构元件的掩模进行了优化设计,其校正后的显影面形质量同样得到了明显的改善,考虑到本文的篇幅,其模拟结果不再一一给出。因而,在厚胶光刻过程中对非线性畸变进行校正,不仅可有效地减小光刻后显影面形偏差,而且没有增加掩模的设计、制作难度及费用,这对

于面形质量有严格要求的微光学元件(如柱面、球面、非球面微透镜)的设计、制作有十分重要的意义。

5 结 论

厚胶光刻过程是一个复杂的多参量影响过程,多种非线性畸变的存在导致光刻的面形质量受工艺条件影响很大,这将可能使得所制作出的微结构元件的表面轮廓严重失真,从而导致器件的性能明显降低。基于此,本文对厚胶光刻过程的非线性畸变的成因进行了分析;为减小或消除厚胶光刻过程中的非线性畸变对显影后浮雕面形质量的影响,提出了利用模拟退火算法对所设计的掩模透射率函数进行预校正,其校正的精度可根据实际需要确定。模拟结果表明,通过该方法所设计的掩模透射率函数能明显降低非线性畸变所带来的影响,其校正后浮雕面形的体积偏差仅为 2.63%。

参 考 文 献

- 1 P. M. Dentinger, K. L. Krafcik, K. L. Simison *et al.*. High aspect ratio patterning with a proximity ultraviolet source[J]. *Microelectron. Engng.*, 2002, **61~62**: 1001~1007
- 2 Tang Xionggui, Guo Yongkang, Du Jinglei *et al.*. Study of diffractive field based angular spectrum theory in thick film photoresist[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1691~1696 (in Chinese)
唐雄贵,郭永康,杜惊雷等. 基于角谱理论的厚层光刻胶衍射光场研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1691~1696
- 3 Tang Xionggui, Guo Yongkang, Du Jinglei *et al.*. Analysis of diffractive image field in thick film photoresist by using Fourier modal method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 246~250 (in Chinese)
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
- 4 He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai *et al.*. Research on fabrication and optical performance testing of silicon microlenses array with large F number[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1097~1102 (in Chinese)
何苗,易新建,程祖海等. 大 F 数硅微透镜阵列的制作及光学性能测试研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1097~1102
- 5 Graham Arthur, Brian Martin. Enhancing the development rate model in optical lithography simulation of ultra-thick resist films for applications such as MEMS and LIGA[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4404**: 209~220
- 6 Tang Xionggui, Gao Fuhua, Guo Yongkang *et al.*. Analysis and simulation of diffractive imaging field in thick film photoresist by using angular spectrum theory[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**: 123~130
- 7 Tang Xionggui, Gao Fuhua, Gao Feng *et al.*. Study on distribution of PAC concentration in thick film resist [J]. *Microfabrication Technology*, 2005, (1): 48~53 (in Chinese)
唐雄贵,高福华,高峰等. 厚胶光刻中光敏化合物浓度空间分布研究[J]. *微细加工技术*, 2005, (1): 48~53
- 8 Guo Yongkang, Tang Xionggui, Zhu Jianhua *et al.*. Effect of exposure intensity on the photochemical reaction speed of the lithography for thick film resists[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5878**: 395~403
- 9 Peng Qinjun, Guo Yongkang, Chen Bo *et al.*. LCD real-time mask technique for fabrication of continuous microoptical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 220~224 (in Chinese)
彭钦军,郭永康,陈波等. 液晶实时掩膜技术制作连续微光学元件[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 220~224
- 10 Peng Qinjun, Guo Yongkang, Zeng Yangsu *et al.*. Real-time gray-tone mask technique for fabrication of microlens array[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(10): 893~896 (in Chinese)
彭钦军,郭永康,曾阳素等. 实时灰阶掩膜技术制作微透镜阵列[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 893~896
- 11 Jun Yao, Jingqin Su, Jinglei Du *et al.*. Coding gray-tone mask for refractive microlens fabrication[J]. *Microelectron. Engng.*, 2000, **53**: 531~534
- 12 V. Kudryashov, X. C. Yuan, W. C. Cheong *et al.*. Grey scale structures formation in SU-8 with e-beam and UV [J]. *Microelectron. Engng.*, 2003, **67~68**: 306~311
- 13 Yu Zhaoxian, Mo Dang. Generalized simulated annealing algorithm applied in the ellipsometric inversion problem[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **425**(1~2): 108~112