

优化掩模分布改善数字光刻图形轮廓

郭小伟¹ 杜惊雷² 刘永智¹

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 四川大学物理学院, 四川 成都 610064)

摘要 基于数字微反镜(DMD)的无掩模数字光刻系统可用于 IC 掩模制作或直接作为微结构的加工工具, 有着广泛的应用前景。但理论和实验均发现基于 DMD 数字光刻系统加工连续表面微结构元件时, 往往难以获得预期的图形轮廓, 加工出的图形表面具有规则的振荡起伏。在深入探讨 DMD 灰度图形传递的基础上, 分析了空间像畸变产生的物理机制, 并提出用模拟退火算法来优化掩模图形, 在 5% 的相对曝光量偏差范围内模拟表明优化有效地消除了表面起伏, 最后利用优化的掩模实验加工出表面轮廓比较好的轴锥镜阵列。该方法能有效改善面形质量, 而且不存在掩模制作等问题, 这对于制作高质量的微结构元件有重要意义。

关键词 无掩模光刻; 表面起伏校正; 模拟退火算法; 数字微反镜

中图分类号 TN305 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0794

Improving the Profiles of Imaging Patterns by Optimizing Mask in DMD-Based Maskless Photolithography

Guo Xiaowei^{1,2} Du Jinglei¹ Liu Yongzhi¹

¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China
² Physics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract In recent years, DMD-based maskless lithography, as a tool for IC mask and microstructure fabrication, has attracted wide attention. It employs a computer-controlled DMD as a switchable projection mask and binary pulse-width modulation to generate grayscale. However, the surfaces of the imaging objects will deviate from the designed and produce ruled surges when the tool is used for fabricating microstructures with continuous surface relief. The physical mechanism of the surges was firstly explored, and then simulated annealing algorithm was adopted for removing surface surges. The simulation results show that the imaging quality after optimization is clearly better than that before optimization and the surges were mostly removed in the 5% range of relative exposure deviation. Finally, the axicon lens array with good surface quality was fabricated by using the optimized mask. The method is simple and provides a new way to improve the imaging quality in DMD-based maskless lithography, which is very useful for the fabrication of high-performance microstructure device.

Key words maskless lithography; correction of surface surge; simulated annealing algorithm; digital micromirror device(DMD)

1 引言

近几年, 基于电寻址空间光调制器(SLM)的无掩模数字光刻技术引起人们的极大关注, 它能有效地克服以前大多数无掩模光刻技术效率不高等弊病^[1~3]。其基本思想是用计算机控制 SLM 产生的一系列虚拟“掩模”代替真实的掩模投影成像。由于

SLM 显示的“掩模”图形可以实时修改或显示任意的形状, 因此该技术可以用来制作许多特殊表面形状的微结构^[4~7]。这一技术可通过对“掩模”的实时修改来方便地对空间像的传递、抗蚀剂曝光、显影和刻蚀过程的非线性畸变进行校正, 而且加工费用低廉, 制作周期特别短, 具有良好的应用前景。

收稿日期: 2008-03-05; 收到修改稿日期: 2008-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(60376021、60736038)资助课题。

作者简介: 郭小伟, 男(1975—), 博士, 讲师, 研究方向为集成光学、光纤技术和光电信息处理。E-mail: gxw@uestc.edu.cn

目前采用的 SLM 多为基于微机电系统 (MEMS) 技术发展的反射式微镜系列, 其中美国德州仪器公司基于数字光处理技术的 DMD 具有高分辨率、高亮度、高对比度、高可靠性、响应时间短等优点, 有望成为下一代无掩模光刻系统的一种理想图形发生器。它是采用二进制时间脉宽调制技术来显示灰度图像^[8~10], 然而在理论分析和实验中均发现这种编码技术使得基于 DMD 光刻系统在制作具有连续表面微结构时, 会引起表面轮廓的振荡起伏, 这给制作的微光学元件性能带来很大的影响。本文首先分析了表面起伏产生的物理机制, 然后针对 DMD 虚拟掩模可实时修改的特点, 提出用模拟退火算法来优化掩模分布, 最后利用优化的掩模实验制作出面形轮廓良好的微透镜阵列。

2 DMD 数字灰度光刻原理

基于 DMD 光刻系统在制作具有连续表面结构的微光学元件时, 是将其结构量化成灰度, 然后转

化为多幅二值黑白图形进行曝光, 最后将各个二进制时间段的曝光量累加起来得到抗蚀剂上总的曝光量^[9]。

设量化后灰度图形分布 $f(x, y)$, 其灰阶数为 N , 总曝光时间为 t_{total} , 则每幅灰度图形在 DMD 显示时都可以分为 $n = \lg N$ 个黑白二值图形, 并按一定规律循环曝光。 $f(x, y)$ 可表示为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot b_i(x, y), \quad (1)$$

其中 $b_i(x, y)$ 为第 i 个黑白二值图。最短的等效曝光时间(最低有效位所用时间的整数倍)为

$$t_0 = t_{\text{total}} / \left(\sum_{i=1}^n 2^{i-1} \right). \quad (2)$$

第一幅二值图 $b_1(x, y)$ 等效曝光时间为 $\Delta t_1 = t_0$, 第二幅为 $\Delta t_2 = 2 \times t_0$, ..., 第 n 幅 $b_n(x, y)$ 等效曝光时间为 $\Delta t_n = 2^{n-1} \times t_0$ 。

根据部分相干光成像理论和霍布金斯有效光源的概念^[11], 则 Δt_i 段内像面的光强分布公式应表述为

$$\Delta I_i(x_i, y_i) = \iint_{\sigma} I_{\text{eff}}(x_s, y_s) \left| \iint U(f_x, f_y, \Delta t_i) H(x_s - f_x, y_s - f_y) \times \exp[j2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] df_x df_y \right|^2 dx_s dy_s \quad (3)$$

这里 $I_{\text{eff}}(x_s, y_s)$ 代表有效光源的光强, $H(x_s - f_x, y_s - f_y)$ 是光瞳函数, $U(f_x, f_y, \Delta t_i)$ 是 Δt_i 时间段内物频谱。则在 Δt_i 段内的曝光量为

$$\Delta E_i(x_i, y_i) = \Delta I_i(x_i, y_i) \Delta t_i. \quad (4)$$

抗蚀剂上总的曝光量为不同的时间段曝光量累加

$$E(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot \Delta I_i(x_i, y_i) \cdot t_0. \quad (5)$$

根据上式编制程序就可以计算抗蚀剂表面上的曝光量分布。

3 表面起伏产生的物理机制

考察黑白二值线条和灰度线条曝光成像的结果, 如图 1 所示。曝光模拟参数: 波长 $\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, 相干因子 $\sigma = 0.5$, 数值孔径 $NA =$

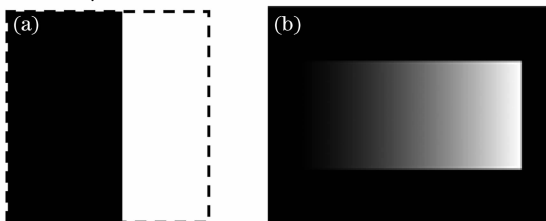


图 1 (a) 黑白二值线条; (b) 灰度线条
Fig. 1 (a) binary line; (b) gray-tone line

0.5。

曝光时各产生 8 个二值黑白图形(DMD 显示时均以 256 阶计算), 如图 2 所示。

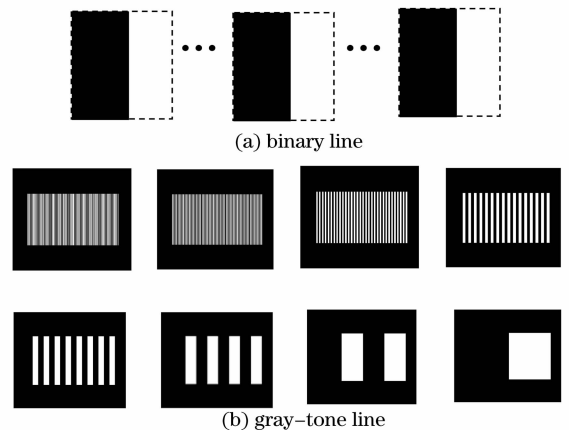


图 2 两线条曝光时产生的二值光栅图

Fig. 2 Exposed pattern is broken down into 8 sheets of two-valued image

两线条模拟曝光结果, 如图 3 所示。

对比两者曝光过程容易发现: 灰度线条产生的二值曝光图为一列的光栅, 从前到后光栅周期依次增大。在成像参量相同的情况下, 黑白二值线条表面没有振荡起伏, 灰度线条却出现了, 而且中间

那个起伏特别明显。这就说明是由这种编码方式本身引起的,即二值光栅造成的。

图 4 给出了灰度线条缩小 5 倍和 20 倍时的曝光结果。从图中可以看到缩小 20 倍的图形表面起伏更为明显,说明此时二值光栅的线间距更为密

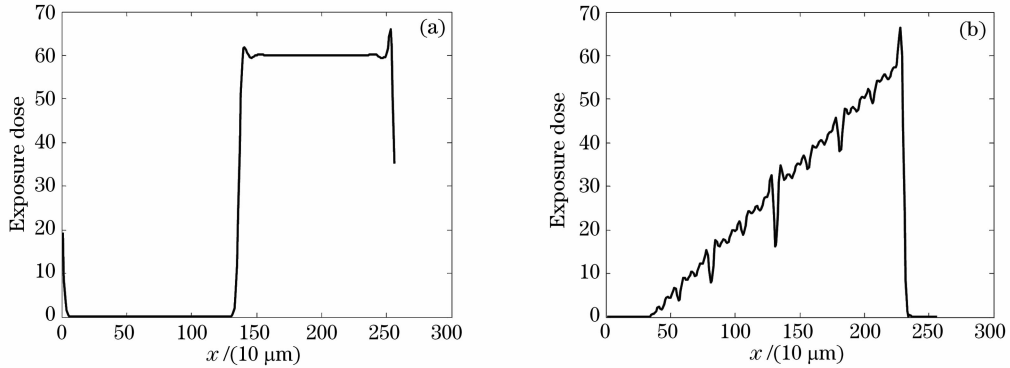


图 3 平面图(a)和灰度图(b)曝光结果

Fig. 3 The cross sections of the aerial images. (a) binary line; (b) gray-tone line

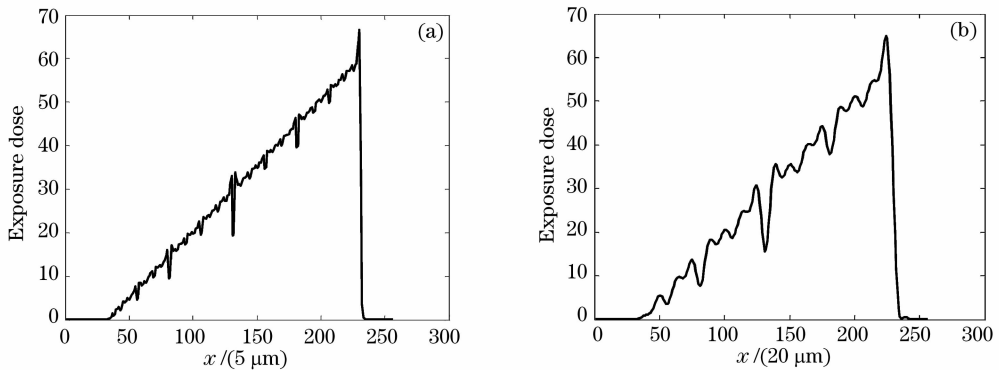


图 4 不同宽度的灰度线条的曝光结果。(a) 缩小 5×的曝光结果;(b) 缩小 20×的曝光结果

Fig. 4 The cross sections of the aerial images of gray-tone line with different widths.

(a) the exposure with 5 minifications; (b) the exposure result with 20 minifications

以上结果表明,周期不同的光栅二值图,由于它们得到的曝光时间不同,通过部分相干成像系统后产生较强的衍射和它们之间的非相干叠加,从而引起表面的振荡波动,这就是起伏产生的物理机制。

图 5 给出了轴锥镜在记录介质里形成的像。(a)是计算模拟得到的空间像;(b)是实验拍摄光刻胶上形成的像;(c)是实验拍摄银盐干版上形成的像。可以看出记录介质上形成的像与模拟像一样,存在着表面振荡起伏。由于大多数微光学元件都是具有连续表面分布,而且形状对称,因此需要消除其影响。

集,从而导致衍射更为明显。从这个角度来说,时间脉宽调制编码方法不适合用来做太微小的物体。此时必须对 DMD 的显示图形即掩模进行优化才能得到良好的空间像。

4 改善面形质量的方法

模拟退火算法的思想来源于金属冷却退火自然现象^[12]。当金属在高温下熔化之后,由于分子具有很大的平均动能,因而每个分子几乎都可以随机移动。此时如果让金属非常缓慢地冷却,则金属分子将有规则的排列起来形成单晶。这个过程称为退火。从能量的角度来看,这是系统从高能态通过缓慢降温达到了低能态的一个过程。在要求解的问题中,如果把曝光一次得到的结果作为初始状态,用一个描述面形质量的评价函数来作为“系统的能量”,用待求的优化参数作为“退火过程中分子移动”,整个迭代优化次数用 T 的变化来描述,那么

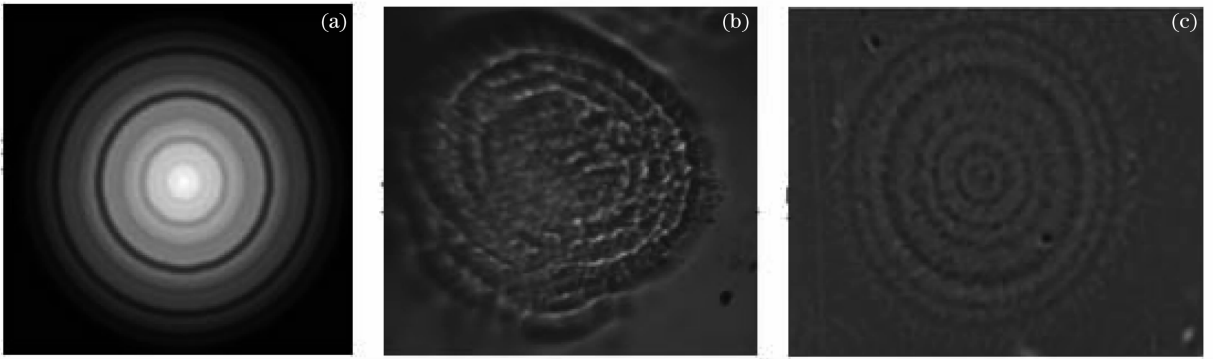


图5 轴锥镜形成的表面起伏。(a) 模拟像；(b) 在光刻胶上的像；(c) 在银盐干版上的像

Fig. 5 The surges on the surface of axcon lens. (a) the simulated aerial image; (b) the axcon image in photoresist; (c) the axcon image in silver-halide sensitized plate

就可以用模拟退火算法来解决，其最大的优点就是能够摆脱局部极小。

令设计曝光量分布为 $E_0(x, y)$ ，成像一次后得到空间像的分布 $E_1(x, y)$ ，两者之差为

$$\Delta E(x, y) = E_1(x, y) - E_0(x, y), \quad (6)$$

如果把求解的曝光量分布 $E(x, y)$ 作为 $E_0(x, y)$ 和 $\Delta E(x, y)$ 的函数，那么此时可以设定待求的优化参数。令它们之间成二阶函数关系，那么求解的曝光量分布 $E(x, y)$ 可以表达成

$$E(x, y) = E_0(x, y) + c_1 \Delta E(x, y) + c_2 \Delta E(x, y)^2 + c_0, \quad (7)$$

式中 c_0, c_1, c_2 即为待求的优化参数。

用曝光量相对偏差作为评价函数 (Evaluation Function, EF)，即

$$F_E = \frac{\sum_{i,j}^{m,n} |E(x_i, y_j) - E_0(x_i, y_j)|}{\sum_{i,j}^{m,n} E_0(x_i, y_j)}, \quad (8)$$

其中 $E(x, y)$ 为每次迭代过程中产生的曝光量分布， m, n 为抽样点数。对于给定的初始优化参数值 $v_0 = (c_0, c_1, c_2)$ ，对应的评价函数为 $F_E(v_0)$ 。

按照模拟退火算法的思想，在某次迭代过程 T 中，如果系统产生了一个微小扰动 $\delta v = (\delta c_0, \delta c_1, \delta c_2)$ ，此时新状态下的评价函数值为 $F_E(v_0 + \delta v)$ ，该扰动所引起的评价函数值的改变量为

$$\Delta F_E = F_E(v_0 + \delta v) - F_E(v_0). \quad (9)$$

很明显，在每次迭代成像过程中扰动量 $\delta v = (\delta c_0, \delta c_1, \delta c_2)$ 是一个以 v_0 为中心的正态随机分布的数组。如果 $\delta v < 0$ ，则扰动接收；如 $\delta v \geq 0$ ，则以

概率 $P = \exp(-\Delta F_E/qT)$ (q 为概率调节因子，设为 1) 来接收，即产生一个在 $(0, 1)$ 之间的随机数 σ ，如果 $P > \sigma$ ，则扰动接收，反之则不接收。若扰动接收，就用新参数 $v_0 + \delta v$ 代替 v_0 ，否则重新产生一个新的扰动，重复此过程就可以获得此迭代过程中的平衡值。

如果迭代次数 T 从一个足够大的值缓慢的降低，在每个过程中用上面的方法来获得平衡值，一直降到 $T \approx 0$ 为止。此时评价函数值改变的的概率几乎为零，从而找到最佳的参数 $v(c_0, c_1, c_2)$ 。利用(7)式就可得到优化后的曝光量分布 $E(x, y)$ 。

5 优化结果

以轴锥镜为例给出优化结果，模拟结果均作曝光量归一化处理。

1) 轴锥镜参数：矢高 $h = 2 \mu\text{m}$ ，底面半径 $R = 50 \mu\text{m}$ ；

2) 模拟成像使用的参数：波长 442 nm，抽样点数 128×128 ，数值孔径 0.3，部分相干因子 0.5；

3) 模拟退火优化时曝光量相对偏差 $F_E = 0.05$ ；

图 6(a) 中有表面起伏的线代表未优化时曝光结果，按照(8)式计算可得相对曝光量偏差达到约 18%，这将造成微光学元件性能的降低；(b) 和 (c) 为优化后掩模的分布；(d) 为优化后像面光场分布；(e) 为利用优化的掩模实验制作出的轴锥镜列阵，可看出表面起伏被有效地消除了，达到优化目的。

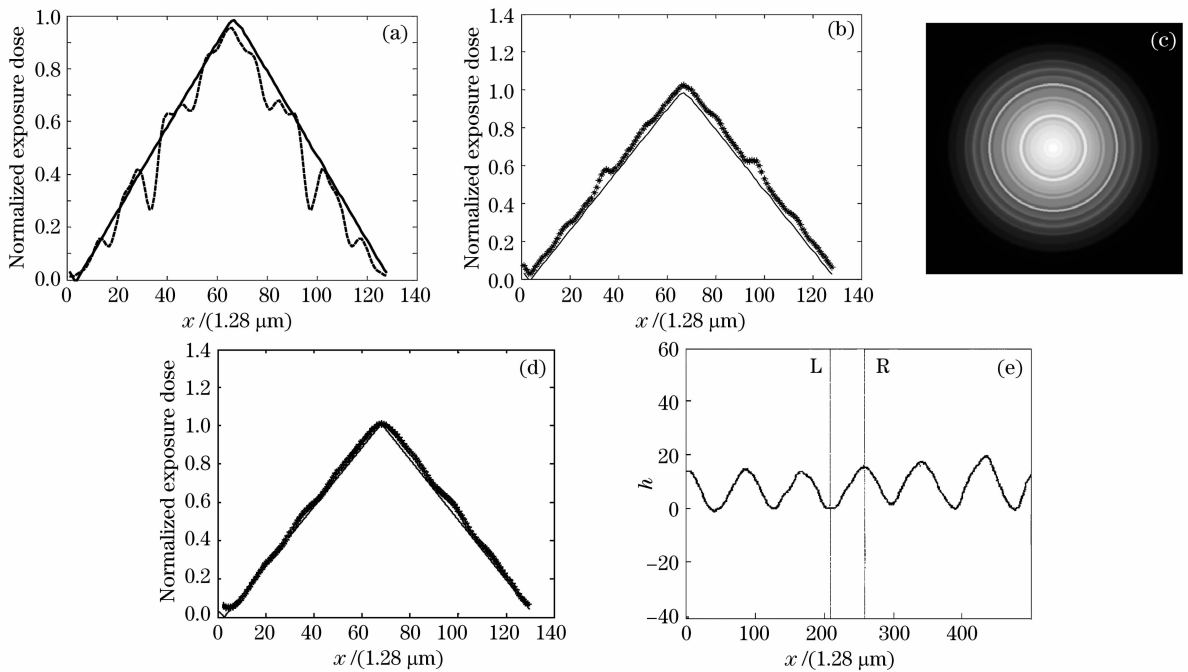


图 6 优化结果

Fig. 6 The optimized results of the axicon lens

6 结 论

数字光刻技术在微结构制造等方面已有了初步应用报道,并显示了其方便、快捷的优点。目前这一技术在国际上仍处于探索研究阶段,研制高分辨率数字光刻设备尚需对数字光刻成像理论、快速精确的数字图形优化算法、数据传输以及波前工程等方面的问题做深入探讨和研究。本文对数字光刻制作连续面形微结构时所产生的空间像畸变做了深入的探讨,提出了简便的校正方法,有助于推动其实用化。

参 考 文 献

- 1 Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng, Ren Yang *et al.*. High-resolution maskless lithography[J]. *J. Microlith., Microfab. Microsyst.*, 2003, **2**(4): 331~338
- 2 Kevin J. Kearney, Zoran Ninkov. Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy [C]. *SPIE*, 1996, **3292**: 81~92
- 3 Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Hai. The gray-tone mask fabrication system based on the SLM[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(1): 45~47
颜树华, 戴一帆, 吕海. 基于空间光调制器的灰度掩膜制作系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 45~47
- 4 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Chen Mingyong *et al.*. Improving the profiles of imaging patterns using gray-tone technique in digital photolithography[J]. *Opto-Elec. Eng.*, 2006, **33**(11): 31~35
郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇等. 用灰度曝光技术改善数字光刻图形轮廓[J]. *光电工程*, 2006, **33**(11): 31~35
- 5 Lars Erdmann, Arnaud Deparnay, Falk Wirth *et al.*. MOEMS based lithography for the fabrication of microoptical components

[C]. *SPIE*, 2004, **5347**: 79~84

- 6 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
彭钦军, 郭永康, 陈波等. 液晶实时掩模技术制作连续微光学元件[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 220~224
- 7 Peng Qinjun, Guo Yongkang, Zeng Yangsu *et al.*. Real-time grey-tone mask technique for fabrication of microlens array[J]. *Chin. J. Laser*, 2003, **30**(10): 893~896
彭钦军, 郭永康, 曾阳素等. 实时灰阶掩模技术制作微透镜阵列[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 893~896
- 8 Xiaowei Guo, Jinglei Du, Yongkang Guo *et al.*. Simulation of DOE fabrication using DMD-based gray-tone lithography [J]. *Microelect. Eng.*, 2006, **83**: 1012~1016
- 9 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Luo Boliang *et al.*. Imaging model for DMD-based gray-tone lithography system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **9**(9): 123~7
郭小伟, 杜惊雷, 罗铂靓等. 基于数字微反射镜灰度光刻的成像模型[J]. *光子学报*, 2006, **9**(9): 123~127
- 10 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Chen Mingyong *et al.*. Removal of pixel structures by optimizing the parameters of imaging system in digital photolithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 462~466
郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇等. 消除数字光刻像素栅格衍射影响的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 462~466
- 11 Du Jinglei, Huang Qizhong, Yao Jun *et al.*. OPC with grey level mask and its computer simulation study [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(5): 698~702
杜惊雷, 黄奇忠, 姚军等. 灰阶掩模实现光学邻近校正及计算模拟研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(5): 698~702
- 12 Tang Xionggu, 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