

文章编号 1004-924X(2007)04-0447-06

SU-8 胶紫外光刻的尺寸精度研究

杜立群^{1,2}, 秦江^{1,2}, 刘冲^{1,2}, 朱神渺², 李园园¹

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:研究了衍射效应对 SU-8 胶紫外光刻尺寸精度的影响。根据菲涅耳衍射理论建立了紫外曝光改进模型, 预测微结构的尺寸, 分析了光刻参数变化对尺寸的影响。为了更好地与数值模拟结果进行比较, 以硅为基底, 进行了 SU-8 胶紫外光刻的实验研究。实验分四组, 实验中掩模的特征宽度分别取 50 μm 、100 μm 、200 μm 和 400 μm , SU-8 胶表面的曝光剂量取 400 mJ/cm^2 。用扫描电镜测量了微结构的顶部线宽、底部线宽和 SU-8 胶的厚度, 用 MATLAB 软件对紫外曝光过程中 SU-8 胶层内曝光剂量的分布情况进行了数值模拟, 数值模拟结果与实验结果基本吻合。数值模拟结果为进一步的实验研究提供了光刻参数的参考值。

关键词: SU-8 胶; 菲涅耳衍射; 紫外光刻; 尺寸精度; MATLAB

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A

Study on dimensional precision of UV-lithography on SU-8 photoresist

DU Li-qun^{1,2}, QIN Jiang^{1,2}, LIU Chong^{1,2}, ZHU Shen-miao², LI Yuan-yuan¹

(1. *Key Laboratory for Precision & Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*; 2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: The impact of diffraction effect on the dimensional precision of UV-lithography based on SU-8 photoresist was investigated. An improved UV exposure model based on Fresnel diffraction theory was proposed to use in predicting the dimensions of photoresist microchannels and their variations with changes in the lithographic parameters. In four different experiments, the characteristic width of photo masks were 50 μm , 100 μm , 200 μm and 400 μm , respectively, and the exposure dose on the surface of SU-8 photoresist was 400 mJ/cm^2 . In the experiments, the silicon was chosen as substrate. The top width, bottom width and thickness of SU-8 photoresist of cross section of microchannel in four different experiments were measured with SEM. The distribution of exposure dose in the SU-8 photoresist was simulated numerically with MATLAB. Comparing the simulative results with experimental results, a good agreement between them is acquired. The simulation results can be used to instruct the further experiments.

Key words: SU-8 photoresist; Fresnel diffraction; UV lithography; dimensional precision; MATLAB

收稿日期: 2006-05-20; 修订日期: 2006-11-25.

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAF04B13) 和国家自然科学基金项目 (No. 50675025)

1 引言

基于 SU-8 胶的 UV-LIGA 技术已广泛应用于微机械电子系统(MEMS)中^[1-4]。随着信息技术的飞速发展,器件微小化已成为必然趋势^[5-6],同时对 SU-8 胶光刻尺寸精度的要求也越来越高。通常情况下,SU-8 胶光刻后可作为微器件或者作为微电铸的胶模^[7];在 SU-8 胶图形本身作为微器件的情况下,光刻尺寸的精度直接影响微器件的尺寸精度;SU-8 胶图形作为微电铸的胶模时,光刻尺寸的精度将影响电铸后模具的尺寸精度。因此,关于光刻精度的研究越来越受到人们的重视,目前国内外的许多科研单位都在这方面开展了相关的工作。

在光刻精度的影响因素中,菲涅耳衍射影响是很显著的。这是因为相对于微结构的尺寸,紫外光的波长比较长,其衍射效应非常明显,因此,它对于光刻精度的影响很大^[8]。目前,关于 SU-8 胶光刻精度的研究大多是定性分析,很少有定量研究。Ronald A Lawes^[9]对光刻尺寸的制造误差进行了研究,并分析了菲涅耳衍射对光刻尺寸的影响,其数值模拟结果中关于间隙量与线宽偏离量之间的关系并未用实验加以证明。田学红等人^[8]研究了菲涅耳衍射效应对深紫外光刻精度的影响,并将实验结果和理论模拟结果进行比较分析,但是其进行数值模拟时未考虑 SU-8 的折射率和 SU-8 胶对紫外光吸收的影响。本文根据菲涅耳衍射理论建立了紫外曝光改进模型,用来预测微结构的尺寸,并分析了光刻参数的变化对尺寸的影响。用 MATLAB 软件对曝光剂量在 SU-8 胶层中的分布情况进行数值模拟,数值模拟结果与实验结果基本吻合。数值模拟结果为进一步实验提供了光刻参数的参考值。

2 紫外曝光改进模型的建立

如图 1 所示,线宽偏离量是显影后图形的轮廓边缘到掩模边缘的距离, X 方向表示线宽偏离量的正方向。当图形的线宽大于掩模的特征宽度时,线宽偏离量为正值,反之,当图形的线宽小于掩模的特征宽度时,线宽偏离量为负值。 Z 方向表示沿厚度方向的正方向。

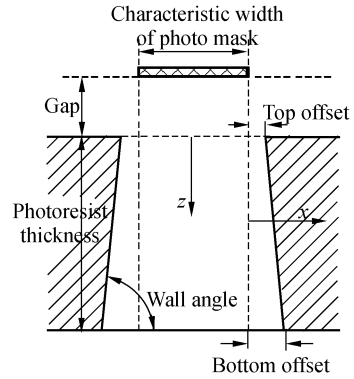


图 1 紫外曝光改进模型示意图

Fig. 1 Sketch map of UV exposure improved model

本研究主要研究三个物理量:顶部线宽偏离量 O_T 、底部线宽偏离量 O_B 和侧壁倾角 Φ 。在紫外曝光改进模型中假定微通道是对称图形,如图 1 所示,微通道的横截面为一等腰梯形,所以侧壁倾角 $\Phi = \arctan(H/(O_B - O_T))$ 。影响上述三个物理量的因素有:曝光光源的光强、波长和带宽;掩模和 SU-8 胶表面的间隙量;SU-8 胶的吸收系数、折射率、临界曝光剂量和厚度^[9]。

一般来说,SU-8 胶对紫外光的吸收系数随着波长变短而很快变大,而其穿透深度也相应地迅速变小^[8]。SU-8 胶对波长为 350~400 nm 范围内的紫外光敏感^[10],能量主要集中在 365 nm^[11],因此,本文以 365 nm 的紫外光进行数值模拟。

紫外光在光刻胶中传播时,其曝光强度逐渐被削弱,这与 SU-8 胶对紫外光的吸收系数有关。根据 Lambert 经验定律,并假定 SU-8 胶为均匀介质,可得到光强在 SU-8 胶中的传播公式^[12]:

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (1)$$

式中 α 表示 SU-8 胶对紫外光的吸收系数, z 表示 SU-8 胶的厚度(正方向如图 1 所示), I_0 表示 SU-8 胶表面的光强大小, $I(z)$ 表示 SU-8 胶厚度为 z 时的光强大小。

曝光剂量为:

$$J(z) = I(z) \cdot t, \quad (2)$$

式中 $J(z)$ 表示曝光剂量的大小, $I(z)$ 表示光强大小, t 表示曝光时间。

菲涅耳积分^[13]:

$$\begin{cases} C(\omega) = \int_0^\omega \cos(\frac{\pi}{2} u^2) du \\ S(\omega) = \int_0^\omega \sin(\frac{\pi}{2} u^2) du \end{cases}, \quad (3)$$

其中, u 为积分自变量; 积分上限 ω 为非涅耳衍射系数^[7], 由式(4)得出。

$$\omega = x / \sqrt{0.5 \cdot \lambda \cdot (g + z/\eta)}, \quad (4)$$

其中, x 表示线宽偏离量; g 表示掩模和 SU-8 胶表面之间的接近间隙的大小; λ 表示紫外光源的波长; η 表示 SU-8 胶的折射率。

直边的菲涅耳衍射公式^[11]:

$$J(\omega) = 0.5 \cdot \{ [C(\omega) + 0.5]^2 + [S(\omega) + 0.5]^2 \} \cdot J(z), \quad (5)$$

将式(1)和式(2)代入式(5), 得到紫外曝光改进模型的基本原理公式:

$$J(\omega) = 0.5 \cdot \{ [C(\omega) + 0.5]^2 + [S(\omega) + 0.5]^2 \} \cdot I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot t, \quad (6)$$

紫外曝光改进模型建立的一个假设条件: 存在一个临界曝光剂量 J_c , 认为 SU-8 胶中获得的曝光剂量小于临界曝光剂量的区域在显影过程中将被除去^[9]。即:

$$J(x, z) < J_c. \quad (7)$$

线宽偏离量和微通道的侧壁轮廓通过计算那些未达到临界曝光剂量的点来表示出来。对于 SU-8 胶, 曝光剂量大于 150 mJ/cm^2 的地方能够通过显影留下^[8], 而小于 150 mJ/cm^2 的地方将被显影除去, 因此认为 150 mJ/cm^2 的曝光剂量等值线将成为显影得到的微结构的边缘轮廓。

3 实验部分

为更好地与数值模拟结果进行比较, 以硅为基底, 进行了 SU-8 胶紫外光刻的实验研究。实验分四组, 实验中掩模的特征宽度分别取 $50 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$, SU-8 胶表面的曝光剂量取 400 mJ/cm^2 。光刻后垂直微通道方向用划片机将 SU-8 胶模切开, 用扫描电镜观测微通道的横截面并测量其顶部线宽、底部线宽和 SU-8 胶的厚度。

3.1 实验材料与设备

SU-8 2075(美国 MicroChem 公司), SU-8 显影液(美国 MicroChem 公司), KW-4A 型台式匀胶机, BGJ-3 型曝光机, ZSH-3 自动砂轮划片机

(沈阳仪器仪表工艺研究所)。

3.2 实验步骤

- (1) 对硅基底进行清洗, $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时在烘箱中烘 3 h 以去除表面水分子;
- (2) 在硅基底上旋涂 SU-8 胶: 800 r/min , 保持 12 s; 1200 r/min , 保持 60 s;
- (3) 前烘: $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在热板上烘 15 min, $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在热板上烘 30 min;
- (4) 曝光: 8 min;
- (5) 中烘: $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在热板上烘 5 min;
- (6) 显影: 用 SU-8 胶专用显影液显影 15 min;
- (7) 切片: 用自动砂轮划片机沿垂直微通道的方向切开;
- (8) 扫描电镜观测: 用扫描电镜观测微通道的横截面, 测量微通道的顶部线宽、底部线宽和厚度。

3.3 实验结果分析

对图 2 所示的横截面中的顶部线宽、底部线宽和 SU-8 胶的厚度进行测量, 然后计算出对应的顶部线宽偏离量、底部线宽偏离量和侧壁倾角。

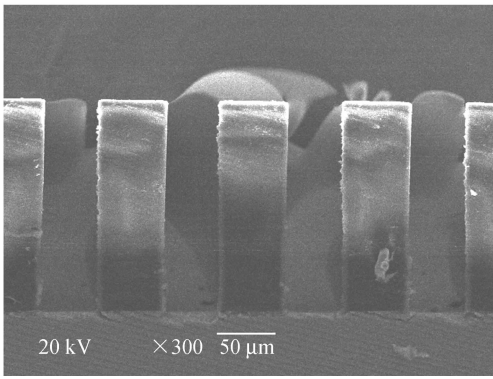
表 1 是对实验中的测量结果进行统计计算得到的数值结果, 表中的顶部线宽偏离量、底部线宽偏离量和 SU-8 胶的厚度是实验中 10 个测量点测量结果的平均值。表 1 的实验结果表明: 同一掩模线宽下, 底部线宽偏离量大于顶部线宽偏离量, 即沿 SU-8 胶厚度方向(如图 1 所示的 Z 轴正方向), 线宽逐渐增大。掩模的特征宽度对线宽偏离量的变化有影响, 线宽偏离量随着掩模特征宽度的增大而增大。

表 1 实验数据的计算结果

Tab. 1 Results of experimental data

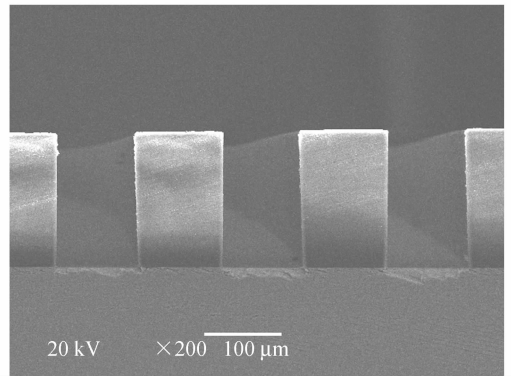
掩模的特征宽度(μm)	顶部线宽偏离量(μm)	底部线宽偏离量(μm)	SU-8 胶的厚度(μm)	侧壁倾角($^\circ$)
50	-2.94	0.14	173.62	88.98
100	-0.88	2.75	168.87	88.77
200	0.62	3.63	174.99	89.02
400	3.17	6.43	167.11	88.88

(注: 上表中负数是根据曝光模型中标注的 X 轴正方向定义的)



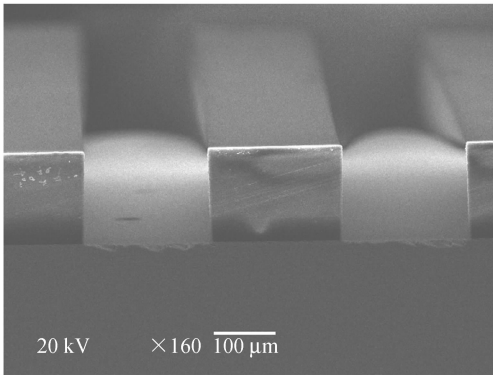
(a) 掩模的特征宽度为 50 μm

(a) Characteristic width of photo mask is 50 μm



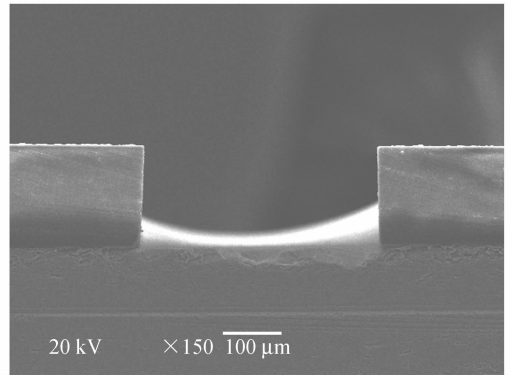
(b) 掩模的特征宽度为 100 μm

(b) Characteristic width of photo mask is 100 μm



(c) 掩模的特征宽度为 200 μm

(c) Characteristic width of photo mask is 200 μm



(d) 掩模的特征宽度为 400 μm

(d) Characteristic width of photo mask is 400 μm

图 2 SU-8 胶微结构横截面的电镜照片

Fig. 2 SEM photograph of cross section of SU-8 photoresist microstructure

4 分析与讨论

4.1 数值模拟结果分析

用 MATLAB 软件对 SU-8 胶中曝光剂量的分布进行数值模拟, 得到 SU-8 胶中曝光剂量等值线的分布情况。SU-8 胶表面的曝光剂量设为 400 mJ/cm^2 , 间隙量分别取 $0, 50, 100, 150, 200, 250 \mu\text{m}$, SU-8 胶厚度从 $0 \mu\text{m}$ 到 $200 \mu\text{m}$ 之间取值, 数值模拟结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 线宽偏离量随着间隙量的增大而增大; 沿 SU-8 胶厚度方向, 线宽偏离量逐渐增大。

图 4 表示间隙量为 $50 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 时 SU-8 胶中曝光剂量等值线的分布情况。临界曝光剂量为 150 mJ/cm^2 , 图中所示的 150 mJ/cm^2 等值线

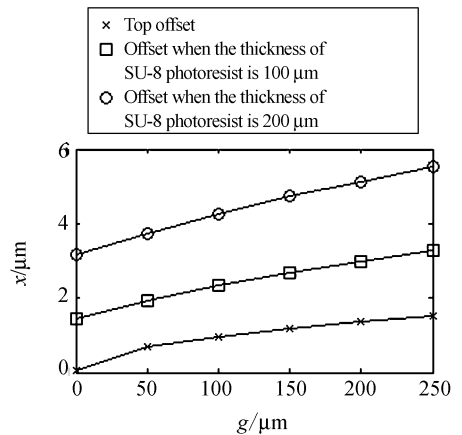


图 3 线宽偏离量与间隙量的关系

Fig. 3 Relation between offset and size of proximity gap

可认为是 SU-8 胶图形的侧壁轮廓。沿 SU-8 胶厚度方向, 线宽偏离量逐渐增大, 可知微通道的横

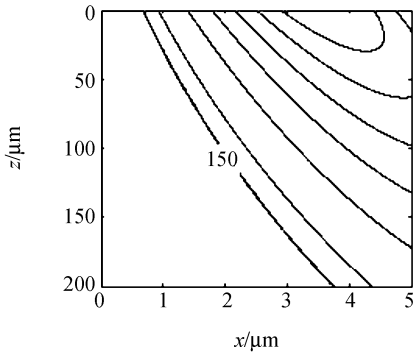
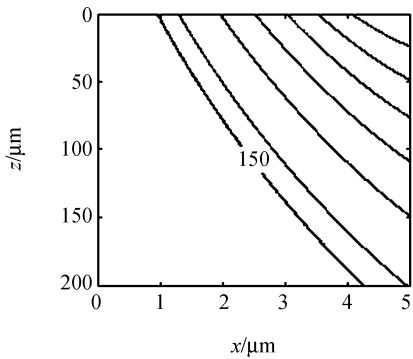
(a) 间隙量为 $50\ \mu\text{m}$ (a) Size of proximity gap is $50\ \mu\text{m}$ (b) 间隙量为 $100\ \mu\text{m}$ (b) Size of proximity gap is $100\ \mu\text{m}$

图4 曝光剂量等值线分布图

Fig. 4 Distribution of exposure dose isolines

截面为近似梯形,侧壁横截面为一条向内侧略微凸起的 irregular 曲线。

4.2 数值模拟结果与实验结果比较

数值模拟结果与实验结果进行比较,变化趋势基本一致,因此可以根据本文的紫外曝光改进模型对 SU-8 胶紫外光刻的尺寸精度进行数值模

拟,得到光刻工艺参数的优化值,这些优化值可以更好地指导下一步的工艺实验。但数值模拟结果与实验结果并不完全一致,原因是本文的紫外曝光改进模型与实际实验过程并不完全相同,本文的紫外曝光改进模型只考虑光学参数的影响,而未考虑后烘过程中的交联反应和 SU-8 胶显影时膨胀的影响。而且本文的紫外曝光改进模型是根据直边衍射建立的,未考虑掩模特征宽度的影响,认为线宽偏离量不随掩模特征宽度的改变而改变。从实验结果看,掩模的特征宽度对线宽偏离量的变化有影响,如表 1 所示,线宽偏离量随着掩模特征宽度的增大而增大,这可能是仿真结果与实验结果不完全一致的原因之一。

5 结论

根据菲涅耳衍射理论建立了 SU-8 胶的紫外曝光改进模型,用 MATLAB 软件进行了数值模拟。针对仿真结果,进行了相应的实验研究。实验分为四组,实验中掩模的特征宽度分别取 $50\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$,SU-8 胶表面的曝光剂量取 $400\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。数值模拟结果与实验结果进行比较分析,两者的变化趋势基本一致。数值模拟结果和实验结果都表明菲涅耳衍射对光刻尺寸精度的影响比较大。从数值模拟结果可以看出,掩模和 SU-8 胶表面的间隙量、SU-8 胶的吸收系数和临界曝光剂量对光刻尺寸的影响较大。

本文的紫外曝光改进模型只考虑光学参数的影响,没有考虑交联反应和 SU-8 胶显影膨胀的影响。因此,数值模拟结果与实验结果并不完全一致。这种方法可以进一步扩展,考虑光刻过程中其他重要参数如前烘、后烘和显影参数对光刻尺寸的影响。

参考文献:

- [1] ZHANG J, TAN K L, GONG H Q. Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in micro-electro-mechanical systems material characterization[J]. *Polymer Testing*, 2001, 20(6): 693-701.
- [2] 陈立国, 陈迪, 杨帆, 等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 266-270.
CHEN L G, CHEN D, YANG F, et al.. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 266-270. (in Chinese)
- [3] 郑晓虎, 朱荻. 模糊神经网络在 UV-LIGA 工艺优化中的应用[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 139-144.

- ZHENG X H, ZHU D. Application of fuzzy neural net work to optimizing UV-LIGA process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 139-144. (in Chinese)
- [4] 肖素艳, 车录锋, 李昕欣, 等. 基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 674-680.
- XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 674-680. (in Chinese)
- [5] 朱军, 赵小林, 倪智萍. SU-8 5 光刻胶的应用工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2001, (2): 57-60.
- ZHU J, ZHAO X L, NI ZH P. Study on application technology of SU-8 5 photoresist[J]. *Microfabr. Technol.*, 2001, (2): 57-60. (in Chinese)
- [6] 尤政, 张高飞, 林杨, 等. MEMS 固体化学推进器设计与建模研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 117-126.
- YOU ZH, ZHANG G F, LIN Y, *et al.*. Design and modeling of MEMS-based solid propellant propulsion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 117-126. (in Chinese)
- [7] CHAN-PARK M B, ZHANG J, YAN Y H, *et al.*. Fabrication of large SU-8 mold with high aspect ratio micro-channels by UV exposure dose reduction[J]. *Sensor Actuator B: Chemical*, 2004, 101(1-2): 175-182.
- [8] 田学红, 刘刚, 田扬超, 等. SU-8 的紫外深度光刻模拟[J]. *真空科学与技术*, 2002, 22(6): 417-420.
- TIAN X H, LIU G, TIAN Y CH, *et al.*. Simulation of pattern transfer accuracy on SU-8 photoresist [J]. *Vacuum Sci. Technol.*, 2002, 22(6): 417-420. (in Chinese)
- [9] LAWES R A. Manufacturing tolerances for UV-LIGA using SU-8 resist [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, 15(11): 2198-2203.
- [10] 李雄. UV-LIGA 技术光刻工艺的研究[D]. 华中科技大学, 2004.
- LI X. *Lithography Study of UV-LIGA Technology*[D]. Graduate School of Huazhong University of Science & Technology, 2004. (in Chinese)
- [11] 田扬超. 深度紫外光刻图形精度模拟研究[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(3): 253-257.
- TIAN Y CH. Simulation of pattern transfer accuracy on the deep UV-lithography[J]. *J. Anhui Norm. Univ. (Natural Science)*, 2005, 28(3): 253-257. (in Chinese)
- [12] 刘世杰. 厚胶光刻技术研究 [D]. 四川大学, 2004.
- LIU SH J. *Study on lithography technique of thick photoresist*[D]. Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [13] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- WANG ZH J. *Optical Technical Manual*[M]. First edition, Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)

作者简介: 杜立群(1966—), 女, 黑龙江人, 副教授, 博士, 主要研究方向为微机电系统。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn