

文章编号: 1004-924X(2016)03-0547-06

SU-8胶光弹性性能显微测试

褚金奎*, 李双亮, 张 然

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 考虑获知SU-8胶的光弹性性能有利于拓展其在微纳米领域中的应用范围, 本文设计了材料应力光学系数显微测量光路, 完成了SU-8胶应力光学系数的测量实验。首先, 基于光弹性原理设计了测量光路, 推导了求解应力光学系数的计算公式; 然后, 根据所设计的光路搭建了应力光学系数显微测量实验装置, 在SU-8胶试样光弹性条纹的单个半级数范围内进行了单向拉伸实验; 最后, 利用Matlab提取实验照片组中光强值信息, 得到了不同拉力下透过SU-8胶试样的单色光光强值, 计算求解出了SU-8胶的应力光学系数。实验结果以及测量公式计算显示, SU-8胶的应力光学系数为 $(3.007 \pm 0.149) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, 大于光学玻璃等材料的应力光学系数, 也远大于二氧化硅等MEMS领域常用材料的应力光学系数。实验结果可为以SU-8胶为材料, 通过光弹性原理进行微力测量的微探针、微夹钳等的设计与制作打下基础。

关键词: 光学测量; 显微测量; 光弹性分析; SU-8胶; 应力光学系数

中图分类号: TN305.7; O348.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0547

Micro-measurement of SU-8 photoelastic performance

CHU Jin-kui*, LI Shuang-liang, ZHANG Ran

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding Author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

Abstract: The photoelastic performance of SU-8 photoresist is related to extending its applications to the field of MEMS(Micro-electronic-mechanical System). Therefore, this paper designs a micro-measuring path to obtain the stress-optical coefficient of the SU-8, and implements the measurement experiment of SU-8 photoelastic performance. Firstly, based on the photoelastic mechanism, the micro-measuring optical path was designed and the formulas for the calculation of SU-8 stress-optical coefficient were deduced. Then, the experiment devices for photoelastic microscopic measurement were built according to the designed optical path, and the tensile test of SU-8 specimen was conducted in the scope of the half order of a single photoelastic fringe. Finally, through extracting the values of the light intensity from the experimental photographs by Matlab, the light intensity of monochromatic light penetrated through the SU-8 specimen under different tensile forces were measured and the value of SU-8 stress-optical coefficient was calculated. The experimental results and the calculation of measurement formulas show that the stress-optical coefficient of SU-8 is $(3.007 \pm 0.149) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, greater than that of normal optical glass and other materials commonly used in MEMS fields, such as silica. The experimental results can lay a foundation for the design and manufacturing of micro-grippers and micro-probes made from the SU-8 materials and used for the force measurement through photoelastic mechanisms.

Key words: optical measurement; micro-measurement; photoelastic analysis; SU-8 photoresist; stress-optical coefficient

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(No.51175056); 国家973重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB302101); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT14RC(3)006); 中国博士后科学基金(2014M561226)资助课题

1 引言

光弹性是指当光通过存在应力的光弹性材料时发生双折射的现象。作为一种有效分析和解决光弹性材料复杂二维和三维空间结构应力的实验方法^[1-3]，其优点是直观性强，在测量应力的过程中不与试样直接接触，能有效避免污染或破坏试样。自从首次被大卫·布儒斯特^[4]提出以来，随着20世纪60年代激光技术的发展，光弹性测量方法在工程、材料、医学等领域得到了广泛应用。目前，常用的光弹性材料为光学玻璃、聚碳酸酯、环氧树脂等。

SU-8胶是一种负性、环氧树脂型、近紫外线光刻胶，具有加工工艺成本较低、稳定性强、抗化学腐蚀性、良好的力学性能和生物兼容性等优点，被广泛应用于MEMS等领域^[5-6]。如在微机械领域，SU-8胶经光刻可以得到三维微结构，经电铸及其它材料的填充，可制作一批金属及其它材料的微结构；在微光学领域，利用SU-8胶的高深宽比及透光性等特点，研制了微透镜、微棱镜以及SNOM的探针尖等微型光学元器件；在微流体器件及生物芯片领域，利用SU-8胶可制多层微管道等。此外，SU-8胶可用于芯片的封装等领，同时，通过光刻技术还能够直接制作微夹钳、微探针等MEMS器件^[7-9]。

虽然SU-8胶在MEMS领域得到了广泛的应用，但是在微纳米领域中，对于SU-8胶光弹性性能的相关研究少有报道。基于以上原因，获取SU-8胶的应力光学系数值，是将光弹性原理在MEMS领域中得到应用的关键。因此，本文设计实验光路并对SU-8胶的应力光学系数进行了测量。首先，利用光弹性原理对显微测量光路进行了设计与公式推导；然后，依照光路搭建了应力光学系数显微测量实验装置，并对SU-8胶试样进行了拉伸实验。在单向拉伸状态下，SU-8胶试样产生的光弹性条纹呈级数循环出现，但是由于在MEMS领域中力绝大部分为微小力，因此拉伸实验在光弹性条纹的单个半级数范围内进行，即随着拉力的增加，透过SU-8胶试样的光强值也单调变化；最后，将实验结果代入光路公式并计算得出SU-8胶的应力光学系数大于光学玻璃等材料^[10]，也远大于二氧化硅等MEMS领域常用材料，为以SU-8胶为材

料，通过光弹性原理进行微力测量的微探针、微夹钳等的设计与制作打下基础。

2 显微测量光路设计与公式推导

SU-8胶应力光学系数显微测量系统光路分布图如图1所示。单色光光源发射出单色光后，经过起偏振镜变为只在一个平面内振动的平面偏振光，当控制加载装置对SU-8胶试样进行拉伸时，由于双折射现象，两束平面光之间会产生光程差，其大小与SU-8胶试样所受的拉力大小有关。光信号经检偏振镜后，依次入射到显微镜和CCD中，CCD将光信号的变化传入到计算机中，在不同的拉力下对SU-8胶试样进行图像的拍摄。其中起偏振镜极轴方向与系统坐标系夹角为 $\pi/2$ ，检偏振镜极

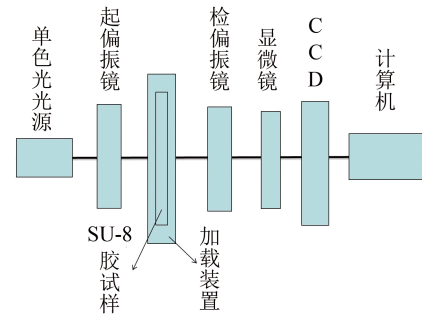


图1 SU-8胶应力光学系数显微测量系统光路图

Fig. 1 Optical path of SU-8 stress optical coefficient micro-measuring system

轴与系统坐标系夹角为0。

根据光束经过光学器件的传输理论^[11]，探测器探测得到的光强信号 $I(i_0, i_1, i_2, i_3)$ 和入射光的斯托克斯参量 $S(S_0, S_1, S_2, S_3)$ 的关系为：

$$I = A \cdot S, \quad (1)$$

式中： I 为光强矩阵， A 为系统矩阵， S 为入射光的斯托克斯矢量，其中 S_0 为总光强， S_1 和 S_2 分别代表两个方向上的线偏振光， S_3 代表圆偏振光。

对于单色光光源发射的光束，其光强信号为：

$$I_0 = [i_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (2)$$

对于起偏振镜，其极轴方向与系统坐标方向夹角 $\pi/2$ ，由斯托克斯公式可得知其系统矩阵为：

$$A_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于SU-8胶试样，当拉伸时测量区域所受的应

力为拉应力, 此时相当于一个方位为 θ , 延迟为 Δ 的直线相位器, 其中 θ 为SU-8胶试样测量区域中

$$A_{\Delta,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta & \sin \Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\theta & -\sin \Delta \cos 2\theta & \cos \Delta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于检偏振镜, 其系统矩阵为:

$$A_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由公式(1)~(5)可得, 经过光路后入射到CCD上的光强值为:

$$I = A_2 A_{\Delta,\theta} A_1 I_0 \quad (6)$$

当SU-8胶试样测量区域中主应力方向与系统坐标系之间的夹角 θ 为 $\pi/4$ 时, 计算求得的光强为:

$$i = \frac{1}{2} i_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2}, \quad (7)$$

其中: Δ 为由于测量区域应力的变化而产生的相位延迟量, 满足光应力定理公式:

$$\Delta = \frac{2\pi t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (8)$$

其中: C 为应力光学系数, λ 为单色光波长, t 为样本厚度, σ_1 、 σ_2 分别是两个主应力, 由于SU-8胶试样测量区域仅受拉应力作用, 因此 σ_2 值为0. 由式(7)、(8)可得出CCD接收光强大小与测量区域应力值的关系为:

$$i = \frac{1}{2} i_0 \sin^2 \left(\frac{\pi t}{\lambda} C \sigma_1 \right). \quad (9)$$

在光弹性条纹的单个半级数范围内, 光强 i 和应力 σ_1 是单调递增的关系. 由式(9)可知, 应力光学系数的计算公式为:

$$C = \arcsin \sqrt{\frac{2i}{i_0}} \cdot \frac{\lambda}{\pi t \sigma_1}. \quad (10)$$

3 实验测试

3.1 SU-8胶试样制备

为了更加准确地测量SU-8胶材料在MEMS中应用时应力光学系数的大小, 通过光刻、显影等MEMS工艺制作SU-8胶试样, 其结构为I型. 其中, SU-8胶试样的宽度由光刻图形控制, 厚度由甩胶转速控制. 制作完成后, 采用OLYMPUS STM6工具显微镜测得试样宽度为 $498.5 \mu\text{m}$, 采用ET4000M台阶仪测得试样厚度为 $17.96 \mu\text{m}$, 如图

2所示. MEMS制备工艺流程如图3所示.

2所示. MEMS制备工艺流程如图3所示.

- (1)氧化: 用硅片作为基底, 对其进行清洗、单面氧化, 在其表面生成一层氧化层;
- (2)涂胶: 在氧化层上旋涂一层SU-8胶层, 控制甩胶机的转速和时间, 使胶层达到一定厚度;
- (3)曝光: 将掩模板放置在SU-8胶层上并对准, 采用紫外线曝光工艺, 实现掩模板上I型结构图形向SU-8胶层的转移;
- (4)显影: 使用SU-8胶显影液对SU-8胶层进行显影, 得到具有I型结构的SU-8胶结构层;
- (5)腐蚀: 使用HF酸缓冲液来腐蚀氧化层, 将具有I型结构的SU-8胶结构层与硅片分离.

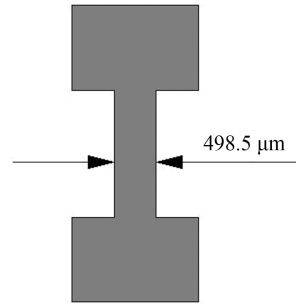


图2 SU-8胶试样结构示意图
Fig. 2 Structure of SU-8 specimen

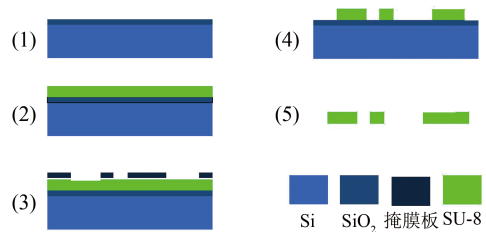


图3 SU-8胶试样制备工艺流程示意图
Fig. 3 Fabrication process of SU-8 specimen

3.2 实验装置搭建

显微实验装置如图4所示, 主要包括IT6121直流稳压电源、Agilent 34405A 5 1/2 位数字万用表、KEYENCE(基恩士)CCD激光位移传感器、Transducer Techniques Inc. GSO-50-T型微力传感

器、TSMW-XYZT 型五维精密定位工作台和 Navitar1-60191 型显微镜。其中, Transducer Techniques Inc. GSO-50-T 型微力传感器利用金属箔应变片技术进行微力的测量, 量程为 500 mN, 分辨率为 0.25 mN, 非线性度为额定输出的 0.05%。

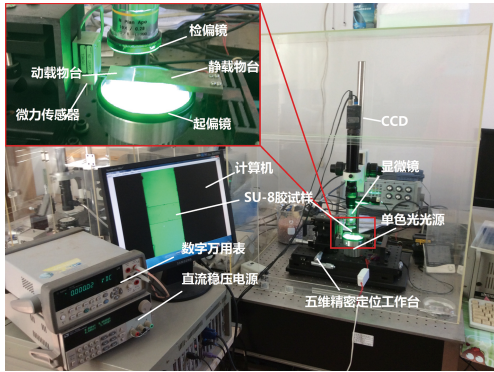


图 4 SU-8 胶应力光学系数显微测量装置示意图

Fig. 4 Schematic of SU-8 stress optical coefficient micro-measurement devices

实验时, 将 SU-8 胶试样通过松香-乙醇溶液黏结在加载装置载物台的两端。为了保证黏结效果, 在拉伸的过程中 SU-8 胶试样不产生滑动, 利

用松香黏结后静置固化 24 h 以上^[12]。连接好电路后, 打开直流稳压电源与数字万用表, 并进行调零。以波长为 516.4 nm 的单色光作为光源, 调节五维精密定位工作台上动载物台与静载物台之间的距离, 进行拉伸实验。数字万用表显示的电压变化每当为 0.1 mV 时, 利用 CCD 与计算机进行图像的拍摄。共拍摄 40 组实验数据, 如图 5 所示。更换 SU-8 胶试样, 重复完成三次测量实验。

3.3 实验数据处理

利用 Matlab 对拍摄到的不同拉力下 SU-8 胶试样图像进行处理与数据提取。其中, 微力传感器测得的拉力 F 与电压值 V 之间的关系为:

$$F = -78.68 \times V - 0.002. \quad (11)$$

对于 SU-8 胶试样, 其横截面所受的应力为:

$$\sigma = \frac{F}{ab}, \quad (12)$$

其中 a 为试样宽度, b 为试样厚度。

为了提高实验结果的准确度, 同时避免 SU-8 胶试样中过曝光的位置以及其他因素的影响, 选取拉伸试样的中间位置作为光强信息的提取位置, 如图 6 所示。对 40 组照片中的相同位置进行数据的提取, 并结合公式 (10)、(11)、(12) 计算得到应力-

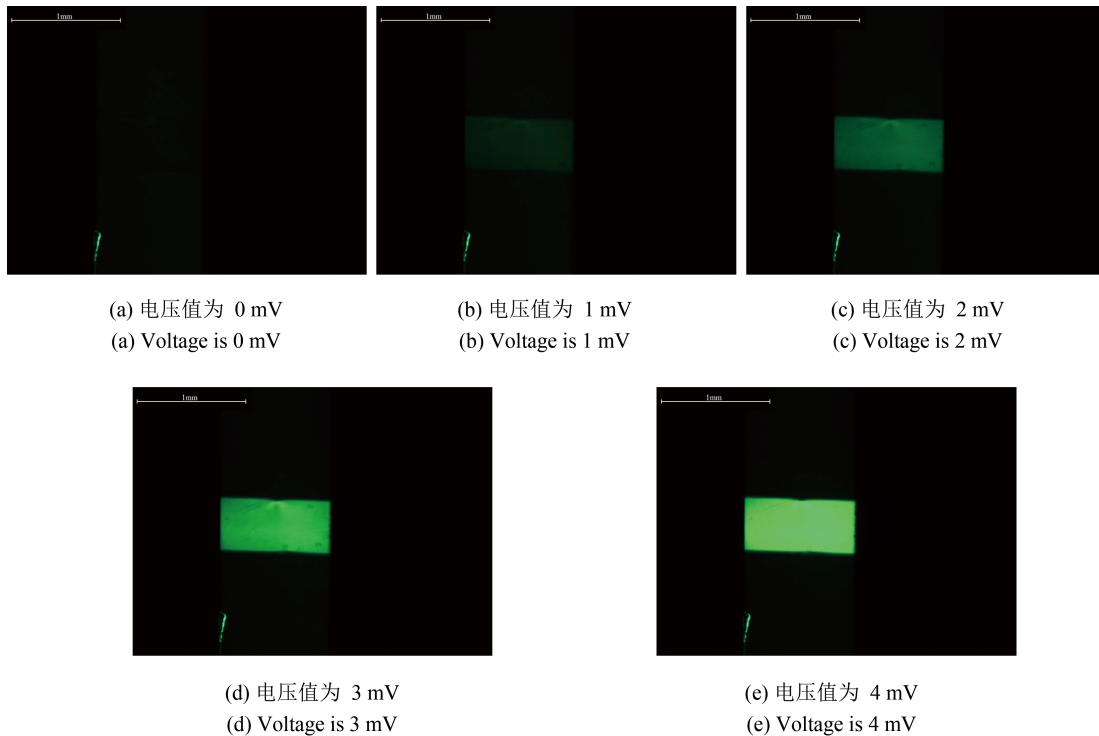


图 5 不同拉力下 SU-8 胶试样照片

Fig. 5 Pictures of SU-8 under different tension

光强比均值变化曲线和应力-应力光学系数关系曲线, 如图7、图8所示。其中, 光强比均值由Matlab程序提取照片中像素点RGB中G项值后, 求解均方根值计算得到。当RGB中G项值达到255的时值为1。

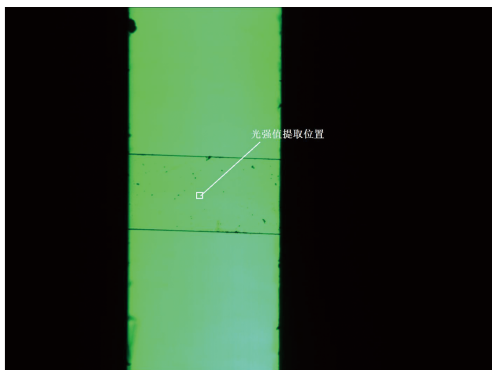


图6 SU-8胶试样光强信息的提取位置示意图
Fig. 6 Schematic of extraction position for SU-8 light intensity information

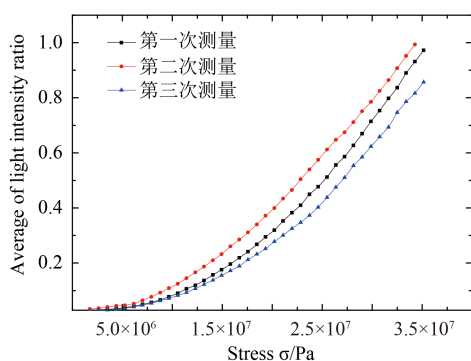


图7 应力-光强比均值变化曲线
Fig. 7 Curve of stress-average of light intensity ratio

3.4 实验结果分析

由图7可知, 随着应力的不断增大, 输出光强值不断增大。由图8可知, 随着应力的增大, 应力光学系数呈现出先下降后平稳的趋势。开始阶段测量结果明显下降, 这可能是由于SU-8胶试样存

参考文献:

- [1] CELIK G, ULUDAG B. Photoelastic stress analysis of various retention mechanisms on 3-implant-retained mandibular overdentures[J]. *The Journal of prosthetic dentistry*, 2007, 97(4): 229-235.
- [2] 李志诚, 唐志列, 陈萍, 等. 基于斯托克斯参量的光弹

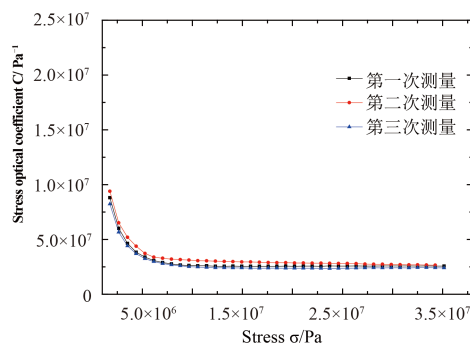


图8 应力-应力光学系数关系曲线
Fig. 8 Curve of stress-stress optical coefficient

在初始内应力所致, 因此取应力为 10^7 Pa后测量值进行计算。由计算结果可知, 三组实验测得的SU-8胶材料应力光学系数平均值分别为 2.955×10^{-11} , 3.287×10^{-11} 和 $2.779 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, 计算求得其应力光学系数的A类不确定度为 $0.149 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ 。最终, SU-8胶材料的应力光学系数为 $(3.007 \pm 0.149) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, 大于光学玻璃等材料, 也远大于二氧化硅等MEMS领域常用材料。

4 结论

本文提出了一种基于光弹性原理测量SU-8胶材料应力光学系数大小的方法, 并得到了SU-8胶材料应力光学系数值。实验测试时, 试样的拉伸范围在光弹性条纹的单个半级数范围内, 即光强随应力值单调增大。同时, 采用MEMS工艺制作出的SU-8胶试样的尺寸为微米量级, 测量结果更能反映SU-8胶材料在微米量级以及在MEMS工艺下的光弹性性能。由实验结果可知, SU-8胶材料的应力光学系数为 $(3.007 \pm 0.149) \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, 大于光学玻璃等材料, 也远大于二氧化硅等MEMS领域常用材料。作为在MEMS领域被广泛应用的材料, 这一结论可为以SU-8胶为材料、采用光弹性法进行测量的微器件, 如微夹钳、微力传感器等的设计与制作提供参考。

性应力分布及成像方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 93-97.

LI ZH CH, TANG ZH L, CHEN P, *et al.*. Study of Photoelastic Stress Distribution and imaging method based on stokes parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 93-97. (in Chinese)

- [3] 方如华, 杨国标. 动光弹性法中若干问题的近期研究进展[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 491-502.
FANG R H, YANG G B. Recent development of some issues in dynamic photoelastic method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(5): 491-502. (in Chinese)
- [4] BREWSTER D. Experiments on the depolarisation of light as exhibited by various mineral, animal, and vegetable bodies, with a reference of the phenomena to the general principles of polarization[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1815, 105: 29-53.
- [5] 刘景全, 蔡炳初, 陈迪, 等. SU-8 胶及其在 MEMS 中的应用[J]. 微纳电子技术, 2003 (8): 132-136.
LIU J Q, CAI B CH, CHEN D, *et al.*. SU-8 photoresist and its application in MEMS[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003 (8): 132-136. (in Chinese)
- [6] KOMATI B, AGNUS J, CLEVY C, *et al.*. Prototyping of a highly performant and integrated piezoresistive force sensor formicroscale applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(3): 035018.
- [7] 褚金奎, 陈兆鹏, 张然. 集成铜金属压阻层的 SU-8 胶悬臂梁微力传感器的制作[J]. 光学精密工程, 2012, 19(12): 2935-2940.
CHU J K, CHEN Z P, ZHANG R. Microfabrication of SU-8 cantilever micro-force sensor integrated by copper piezoresistance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 19(12): 2935-2940. (in Chinese)
- [8] 张培玉, 武国英. 微夹钳研究的进展与展望[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 292-296.
ZHANG Y P, WU G Y. Development of microgripper technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 292-296. (in Chinese)
- [9] 李路明, 任延同, 王立鼎, 等. 微夹钳技术发展现状及应用研究[J]. 光学精密工程, 1997, 4.
LI L M, REN Y T, WANG L D, *et al.*. Development of Microgripper Technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 4. (in Chinese)
- [10] 兰惠. 用径向加压法测定玻璃应力光学常数[J]. 光学精密工程, 1986, 3: 007.
LAN H. Measurement of Stress-optical Coefficient of Glasses by Radial Compression Method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1986, 3: 007. (in Chinese)
- [11] AZZAM R M A. Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(7): 309-311.
- [12] CHU J K, GAO J L, GUAN L, *et al.*. Mechanical characterization of SU-8 thin films through varying effective aspect ratios for microelectromechanical systems application[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(2): 023006.

作者简介:



褚金奎 (1965-), 男, 河南平顶山人, 博士, 教授, 博士生导师, 1986年于杭州电子科技大学获得学士学位, 1989年于西安理工大学获得硕士学位, 1992年于北京航空航天大学获得博士学位, 主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。

E-mail: chujk@dlut.edu.cn



李双亮 (1990-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 2013年于大连理工大学获得学士学位, 主要从事微执行器及微操作方面的研究。

E-mail: lisldut@163.com



张然 (1984-), 男, 辽宁锦州人, 博士研究生, 2007年于大连理工大学获得学士学位, 主要从事微执行器及微操作机器人方面的研究。

E-mail: zhangran@dlut.edu.cn