

# 热调控变焦聚合物微透镜的设计与分析

童伟 唐雄贵 廖进昆 李和平 李儒健

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 可调微透镜在成像、微流体传感和自适应光学等诸多领域具有新的广阔应用前景。建立了聚合物微透镜在热效应作用下的焦距调控过程的物理模型,并采用有限元法对该调控过程进行了模拟分析,获得了微透镜在不同温度条件下的温度分布、热形变以及焦距变化。研究表明,对于具有较大热光系数的聚合物微透镜,在温差变化较大的情况下,其热光效应对可调微透镜的光学性能影响十分明显,因而在设计和制作时不仅要考虑热膨胀效应的影响,而且要考虑热光效应的影响。

**关键词** 光学设计; 聚合物微透镜; 有限元法; 热膨胀效应; 热光效应

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.042202

## Design and Analysis for Thermal Actuated Tunable Polymer Microlens

Tong Wei Tang Xiongguai Liao Jinkun Li Heping Li Rujian

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** Tunable polymer microlens has been widely applied in many fields such as imaging, microfluidic sensing and adaptive optics. The physical model for controllable polymer microlens caused by thermal effect is established. Then, the finite element method (FEM) is used to analyze the spatial distribution of the microlens temperature, thermal deformation and focal length variation. The simulation results show that the thermo-optic effect has a strong influence on the optical performance of polymer microlens with large thermo-optic coefficient when the variation scope of temperature is relatively large. As a result, both thermal expansion effect and thermo-optic effect should be taken into account for the design and fabrication of such devices.

**Key words** optical design; polymer microlens; finite element method; thermal expansion effect; thermo-optic effect

**OCIS codes** 220.3630; 110.6820; 230.3990

## 1 引言

可调微透镜是一种新型的光学器件,具有焦距可调或透射率可调等特点,在成像、自适应光学、高密度光信息存储、光互联以及光束整形等诸多方面有着广阔的应用前景<sup>[1~5]</sup>。目前已报道的可调微透镜的实现方法有多种,主要包括液体体积调控、电润湿效应调控、液晶电光调控和热膨胀调控等。体积调节法所制作的可调微透镜<sup>[6,7]</sup>通常需要附加的外力驱动系统,因而具有调控单元结构复杂、受环境因素和工艺水平等因素的影响较大等缺点。电润湿可调微透镜<sup>[8,9]</sup>通常需要较大的驱动电压,受环境温度、湿度等因素的影响较大。而可调液晶微透镜<sup>[10~12]</sup>通常存在调控电压较高、屈光度调控范围小以及像差和色差较严重等诸多问题,距离实际应用还有一定的差距。对于基于热效应的可调聚合物微透镜,主要是通过热膨胀改变微透镜的曲率半径,进而达到焦距可调的效果。它不需要复杂的调控单元结构,并且具有结构简单、工艺制作简单、成本低以及易于与其他光子器件集成等特点,在光束整形、温度传感等方面具有潜在的应用。

有机聚合物(如 SU-8、PDMS)是一种高分子化合物,因其价格低廉、高透明度、易于制作与易于实现光

**收稿日期**: 2012-11-19; **收到修改稿日期**: 2013-01-11; **网络出版日期**: 2013-03-14

**基金项目**: 国家自然科学基金(60908024, 61077017)和中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2011J050)资助课题。

**作者简介**: 童伟(1985—),男,硕士研究生,主要从事微光学元器件方面的研究。E-mail: tongwei2010@163.com

**导师简介**: 唐雄贵(1974—),男,博士,副教授,主要从事微光学、光波导器件与技术等方面的研究。

E-mail: tangxg@uestc.edu.cn

电集成等特点,在微纳光子器件中具有广阔应用前景,目前已引起国内外研究人员的广泛关注和重视。近年来,人们采用有机聚合物材料,利用其热膨胀效应,用于实现可调微透镜。2006年, Lee等<sup>[13]</sup>设计制作了一种基于PDMS的可调微透镜,实验上实现的聚焦变化范围达834  $\mu\text{m}$ 。2008年和2010年, Huang等<sup>[14,15]</sup>分别采用SU-8和PDMS制作了聚合物微透镜,其调控原理与前类似。但是,上述聚合物微透镜均只考虑了热膨胀效应对微透镜调控性能的影响,而没有考虑热光效应所引起的折射率变化及由此产生的影响。当温度变化进一步增大时,对于这些具有较大热光系数的材料,其热光效应对微透镜光学性能的影响甚至有可能大于热膨胀效应的影响。本文针对上述研究存在的问题,通过建立可调聚合物微透镜在热作用下的调控过程物理模型,对其光学性能进行准确模拟分析,全面考察热效应对微透镜聚焦性能的影响,为后续设计与制作提供理论指导。

## 2 物理模型

基于热效应的可调聚合物微透镜,其原理图如图1所示,它主要由聚合物微透镜、微型加热器、传热环、温度传感器以及玻璃基片组成。当给微型加热器加上特定电流时,传热环的温度升高,由于热传导,微透镜温度也相应升高。若加热电流不变,则一段时间后传热环与微透镜的温度分布趋于稳定。设微透镜在温度 $T$ 时,其直径、矢高和曲面高度分别为 $D, h(T)$ 和 $d(r)$ 。另外,微透镜在发生热形变的同时,由于热光效应,其折射率也将随之变化,即

$$n(r, z) = n_0 + \Delta T \left( \frac{dn}{dT} \right), \quad (1)$$

式中 $n_0, \frac{dn}{dT}$ 和 $\Delta T$ 分别表示微透镜常温下的折射率,热光系数和温度变化量。若平面波由下向上入射到微透镜,则光波通过微透镜后在 $z=h$ 处产生的相位延迟为

$$\varphi_{\text{out}}(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \int_0^{d(r)} n(r, z) dz + h - d(r) \right], \quad (2)$$

$$\varphi'_{\text{out}}(r) = \varphi_{\text{out}}(r) - \varphi_{\text{out}}(0), \quad (3)$$

式中 $\varphi_{\text{out}}(0)$ 表示光波在微透镜顶点位置处的相位延迟。由于(2)式没有解析解,故需采用数值计算方法才能获得其相位分布。根据光波衍射特性,(3)式与(2)式是等价的。为便于与传统透镜的相位延迟进行比较,故对其相位做如上变换。而对于传统透镜,其相位延迟函数为

$$\varphi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{r^2}{2f}. \quad (4)$$

根据所计算的位相分布 $\varphi'_{\text{out}}(r)$ ,这时假设该微透镜的焦距为 $f$ ,利用(4)式可计算其相位分布 $\varphi(r)$ ,然后采用评价函数

$$H(f) = \sum_i [\varphi'_{\text{out}}(r_i) - \varphi(r_i)]^2, \quad (5)$$

并利用优化算法使评价函数取最小值,这时所对应的 $f$ 可近似为微透镜的焦距。

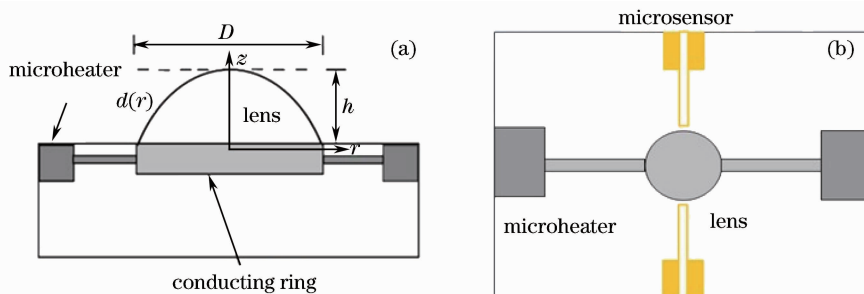


图1 聚合物微透镜的原理结构图。(a) 剖面图;(b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of the polymer microlens. (a) Cross-sectional view; (b) top view

### 3 模拟分析

针对上面所建立的可调微透镜模型,采用有限元法进行模拟。该方法是以变分原理和加权余量法为基础的数值计算方法,已在各种科学和工程问题的仿真中得到广泛的应用,这里不再对该方法做详细的介绍。对可调聚合物微透镜的调控全过程进行了模拟,具体包括聚合物微透镜的温度场分布和热形变。在模拟过程中所选用的聚合物为PDMS,其热传导系数为  $0.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,热光系数为  $dn/dT = -4.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [15],热膨胀系数为  $3.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,折射率为  $1.43$ [16],在常温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,并假设微透镜为直径  $2000 \text{ }\mu\text{m}$ 、厚度  $500 \text{ }\mu\text{m}$ 的球冠,分别对其在不同温度下的调控性能进行模拟分析。

首先对聚合物微透镜在不同温度下的温度场进行数值模拟,其模拟结果如图2所示,图2(a)、(b)分别表示微透镜在温度为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的温度场空间分布。从图中可以看出,对于微透镜来说,当温度比较低时,其内部的温度梯度比较小,随着温度的增加,透镜内的温度差虽有所增大,但温度为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其温差也不超过  $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,因此可近似认为微透镜的温度分布是均匀的,其折射率分布也可近似为相等。

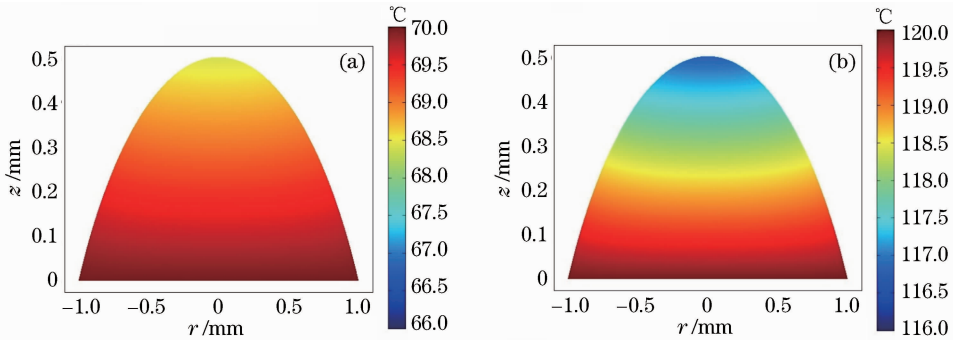


图2 微透镜在不同温度时的温度场空间分布。(a)  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $120 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2 Spatial distribution of the microlens temperature under different temperatures. (a)  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $120 \text{ }^\circ\text{C}$

在此基础上对聚合物微透镜的热形变分布进行了模拟仿真,如图3所示,其中图3(a)、(b)分别表示在温度为  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时微透镜所对应的热形变大小分布。从图中可以看出,当温度比较低时,聚合物微透镜的热形变相对较小,随着温度的进一步升高,微透镜的曲面形变发生明显增大。在图4中给出了上述微透镜的剖面曲线随着温度的变化关系。从图中可以看出,微透镜的矢高随着温度的升高而增大,当温度为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其矢高大约增加了  $60 \text{ }\mu\text{m}$ 。

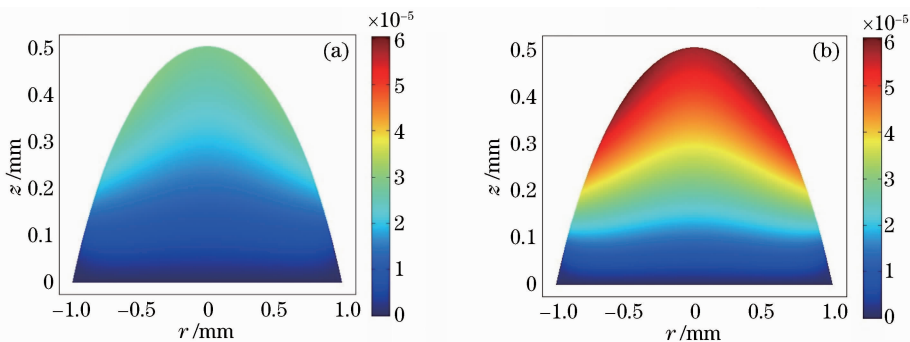


图3 微透镜在不同温度时的热形变分布。(a)  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $120 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 3 Thermal deformation of the microlens under different temperatures. (a)  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $120 \text{ }^\circ\text{C}$

根据文献[10~12],若只考虑微透镜热膨胀效应,则很容易得到其焦距随温度的变化曲线。图5中给出了仅考虑热膨胀效应和同时考虑热膨胀效应与热光效应时的微透镜焦距变化曲线。从图中可知,若只考虑热膨胀效应,当温度从  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 变化到  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其焦距大约从  $2907 \text{ }\mu\text{m}$ 降低到  $2733 \text{ }\mu\text{m}$ 。若将热光效应考虑在内,则当微透镜的温度由  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 变化到  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其焦距从  $2907 \text{ }\mu\text{m}$ 增加到  $3052 \text{ }\mu\text{m}$ ,大约增加了  $145 \text{ }\mu\text{m}$ 。因而,对于热调控变焦微透镜,若只考虑热膨胀效应的影响,则不能正确反映其焦距变化的大小与趋势;应该同时考虑热膨胀效应与热光效应对其焦距变化的影响,尤其是具有较大的热光系数材料的有机聚合物(如

SU-8, PDMS), 如果忽略了热光效应对微透镜光学性能的影响, 往往会带来错误的结果。

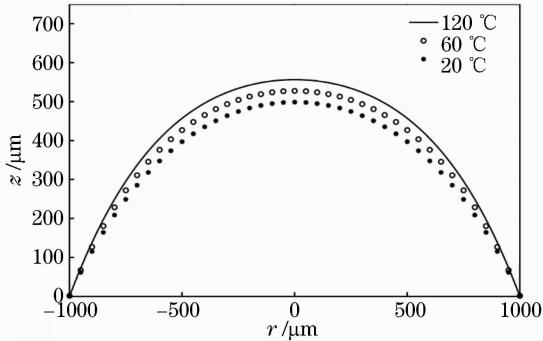


图4 微透镜面形随温度变化图

Fig. 4 Surface shape of microlens changing with temperature

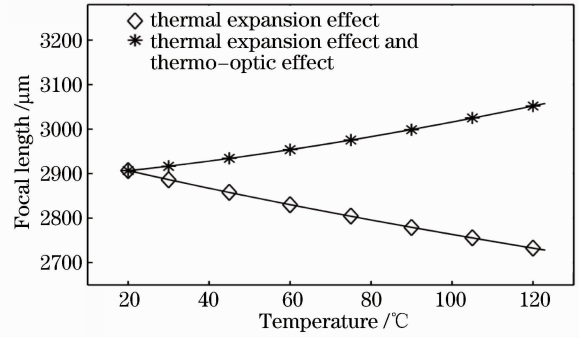


图5 变焦微透镜焦距随温度变化关系

Fig. 5 Relation between focal length of tunable microlens and temperature

另外, 通过选取具有恰当热光系数的聚合物材料, 在一定的温度变化范围内, 使微透镜的热膨胀效应与热光效应相抵消, 便可设计和制作消热差的聚合物微透镜, 使其焦距不随温度变化, 这对于温差变化较大的环境中的应用具有重要价值。此外, 若采用具有正热光系数的聚合物材料, 还可进一步增大微透镜的调焦范围。这些微透镜的调控原理与上述模拟分析类似, 不再赘述。

## 4 结 论

可调聚合物微透镜具有成本低、制作工艺简单以及易于与其他光子器件集成等诸多优点, 在光学成像、生物传感等领域具有广阔的应用前景。本文针对聚合物微透镜在热效应作用下发生的焦移现象, 建立了聚合物微透镜的焦距调控过程的物理模型, 并采用有限元法对其进行了模拟分析, 得到了微透镜焦距随温度的变化关系。研究表明, 对于具有较大热光系数的聚合物可调微透镜, 在温度变化范围较大的情况下, 其热光效应对可调微透镜的光学性能影响不可忽略, 这对基于热效应的可调聚合物微透镜的准确设计与制作具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Tang Xiongui, Tong Wei, Lu Rongguo *et al.*. Recent development in tunable liquid crystal microlens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040002  
唐雄贵, 童伟, 陆荣国等. 可调液晶微透镜研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040002
- 2 Tang Xiongui, Tong Wei, Liao Jinkun *et al.*. Design and simulation for tunable bifocal microlens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 112302  
唐雄贵, 童伟, 廖进昆等. 可变双焦微透镜设计与模拟[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 112302
- 3 Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1022005  
戴志华, 徐于萍, 步敬等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1022005
- 4 Li Feng, Chen Sihai, Lai Jianjun *et al.*. Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0310003  
李风, 陈四海, 赖建军等. 自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0310003
- 5 Shen Su, Pu Donglin, Hu Jin *et al.*. Fabrication of microlens arrays based on spatial light modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0316003  
申溯, 浦东林, 胡进等. 一种基于空间光调制器的微透镜阵列制备技术[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0316003
- 6 De-Ying Zhang, Nicole Justis, Victor Lien *et al.*. High-performance fluidic adaptive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 783~787
- 7 Nikolas Chthonis, Gang Liu, Ki-Hun Jeong *et al.*. Tunable liquid-filled microlens array integrated with microfluidic network[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(19): 2370~2378
- 8 T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 316~318
- 9 S. Kuiper, B. H. W. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(7): 1128~1130

- 10 Hongwen Ren, Yun-Hsing Fan, Yi-Hsin Lin *et al.*. Tunable-focus microlens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**(1-3): 101~106
- 11 Chih-Cheng Cheng, C. Alex Chang, Chang-Hua Liu *et al.*. A tunable liquid-crystal microlens with hybrid alignment[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(7): 365~369
- 12 Yi-Hsin Lin, Hung-Shan Chen, Hung-Chun Lin *et al.*. Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(11): 113501
- 13 Sz-Yuan Lee, Hsi-Wen Tung, Wen-Chih Chen *et al.*. Thermal Actuated Solid Tunable Lens[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2191~2193
- 14 Xian Huang, Chao-Min Cheng, Li Wang *et al.*. Thermally tunable polymer microlenses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(25): 251094
- 15 Christos Markos, K. Vlachos, George Kakarantzas. Bending loss and thermo-optic effect of a hybrid PDMS/silica photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 24344~24351
- 16 Xian Huang, Junhui Ni, Shengmei Yan *et al.*. Thermally tunable polymer microlenses for biological imaging[J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2010, **19**(6): 1444~1449