

可变双焦微透镜设计与模拟

唐雄贵 童伟 廖进昆 李和平 陆荣国 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 变焦微透镜是一种新型的微光学元件,在诸多领域有着广阔的应用前景。基于折射率调控原理,提出了一种新型的可变双焦微透镜的实现方法。利用有限元方法,对可变双焦微透镜的调控全过程进行了数值模拟,具体包括电场空间分布、折射率空间分布以及光场空间分布。数值模拟表明,在不同调控电压下,可变双焦微透镜的焦点位置能够实现有效调控。这种微透镜具有结构简单、工艺制作简便、易于实现阵列型结构和易于与其它光子器件进行集成等特点,能够实现快速变焦调控,且不存在偏振依赖性。

关键词 光学器件;微光学;双焦微透镜;变焦;蓝相液晶;数值模拟

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.112302

Design and Simulation for Tunable Bifocal Microlens

Tang Xiongguai Tong Wei Liao Jinkun Li Heping Lu Rongguo Liu Yongzhi

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China,

Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The microlens with variable focal length is a novel microoptical component, which has wide potential application in the optical fields. A novel approach for tunable bifocal microlens has been proposed in this work, which is based on tunable refractive index resulting from Kerr effect in blue-phase liquid crystal. The finite element method has been used to simulate the controllable performance of tunable bifocal microlens, including the distribution of electric field, refractive index and optical field along propagation direction. The numerical calculation results show that the focused position of bifocal microlens can be effectively regulated by the changing of external applied voltage, which exhibits good optical performance. The presented microlens has many advantages, such as simple structure, easy to fabricate, easy to integrate with other photonic components, fast tuning speed and independence of optical polarization, which has a good potential application prospect in micro-optical system.

Key words optical devices; micro-optics; bifocal microlens; tunable focal length; blue-phase liquid crystal; numerical simulation

OCIS codes 230.3720; 230.3990; 110.1080; 220.1080

1 引言

变焦微透镜是一种新型微光学元件,在成像、光束控制与整形、微流体传感、自适应光学和生物医学光子学等方面有着广泛应用前景,目前已引起国内外研究人员的关注与重视。变焦微透镜的调控方式主要分为两大类^[1~5],即面形调控方法和折射率调控方法。对于面形调控方法,通常采用液体作为微透镜主体结构,利用压力、电润湿和热形变等效应来改变微透镜的表面曲率,实现对其焦距的调控。液体型可调微透镜通常具有变焦范围大、数值孔径大等特点,但同时存在调控精确差、像差大、性能稳定性低、响应速度慢以及难以实现阵列结构等缺点。而对于折射率调控方法,通过采用电光、热光等效应来改变透镜的折射率,实现微透镜聚焦性能的调控。可调液晶微透镜是这种类型中的典型代表之一^[6~8],具有折射率变化范围大、响应速度

收稿日期: 2012-06-01; **收到修改稿日期**: 2012-07-01; **网络出版日期**: 2012-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(60908024, 61077017)和高校基本业务费项目(ZYGX2011J050)资助课题。

作者简介: 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

(本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 <http://opticsjournal.net>)

相对较快、无机械运动、无表面形变、稳定性好和易于集成等诸多优点,其应用前景更为广阔。

与传统变焦微透镜不同的是,可变双焦微透镜能在光轴方向上不同位置同时产生两个焦点,且其焦点位置可独立变化;它在双层光盘读出系统、光镊、微流体光学系统、半导体激光耦合输出等方面存在广泛的应用前景。但是,有关可变双焦微透镜的报道很少,且它们均采用面形调控法来实现,存在制作工艺复杂、响应速度慢和难以实现阵列结构等缺点,使其实际应用受到诸多限制。2009年,H. B. Yu等^[9]采用流体压力驱动来改变透镜不同区域的表面面形,从而实现透镜双焦距的调控。但是,这种双焦微透镜属于球面微透镜,其表面形状不能精确控制,难以实现非球面微透镜面形结构,因而在焦距调控过程中其像差较大,成像质量和焦斑质量较差。另外,这种双焦微透镜还存在制作工艺复杂、调控速度慢以及难以实现微透镜阵列结构等诸多缺点。同年,Hui Min Leung等^[10]采用模压方法预先制备双焦微透镜的下面形,利用液体压力驱动来改变微透镜的上面形,从而实现焦距调控。该方案虽在一定程度上降低了器件制作与调控难度,但不能实现两个焦点的独立调控。另外,2005年,H. W. Choi等^[11]报道了一种双焦点非球面微透镜的制作方法,但其焦距是不可改变的,即该透镜的设计与制作一旦完成,该透镜或由该透镜所构成的微光学系统的光学性能与功能就完全确定,不能进行调控。

基于此,本文采用蓝相液晶材料,基于折射率调控原理,提出一种可变双焦非球面微透镜,以实现其焦距有效调控。该微透镜的非球面面形易于精确控制,具有结构简单、工艺制作简便、易于实现阵列结构、易于与其它光子器件集成和调控速度快等诸多优势,其潜在应用前景广阔。

2 结构与工作原理

所设计的可变双焦微透镜的结构如图1(a)所示,从下到上依次为:玻璃基片、下电极、液晶、有机聚合物、上电极和玻璃基片。上电极和下电极为氧化铟锡(ITO)膜,对入射光来说是透明的,但两者具体的面形结构不同,其中上电极为双环形结构,如图1(b)所示,而下电极为平板结构。通过光刻和湿法刻蚀方法,在ITO玻璃上容易制作上电极结构;在此基础上,采用灰阶掩模光刻方法,并结合非线性畸变校正技术^[12],在此ITO玻璃上制备分段凹面型非球面微结构;然后,将该ITO玻璃与另一块ITO玻璃进行封装,采用液晶灌装技术将蓝相液晶注入其腔体中,并采用紫外光对其蓝相液晶进行固化^[4],从而获得双焦微透镜结构。

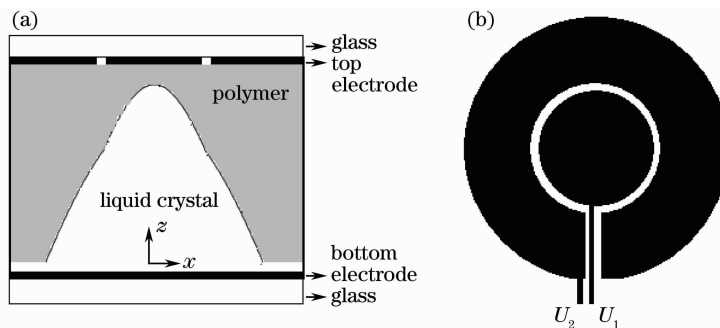


图1 (a)可变双焦微透镜结构;(b)上电极结构

Fig. 1 (a) Scheme of tunable bifocal microlens; (b) structure of the top electrode

当电极上调控电压为零时,蓝相液晶表现为各向同性介质,设其折射率为 n_1 ,而有机聚合物的折射率为 n_2 。当单色平面波光由下而上入射到该透镜上时,由于非球面曲面两侧的蓝相液晶与有机聚合物折射率不同,该透镜对光束产生双焦点的聚焦过程。当调控电压馈送到电极上时,将在液晶非球面内产生相应电场,由于克尔效应(Kerr effect)^[13],使得蓝相液晶表现为各向异性,其折射率椭球的长轴沿 z 方向,且寻常光主折射率 n_o 随电场增大而减小,非常光主折射率 n_e 随电场增大而变大。而对于入射光来说,由于沿 z 方向传播,因而其折射率与光波偏振态无关,其值均为 n_o 。通过外加电场来调控蓝相液晶的折射率,从而实现对透镜的焦距进行调控;另外,这种变焦微透镜不存在偏振依赖性,从而大大降低设计与制作难度,提高了光能效率。

设在上电极的两不同区域所施加的电压分别为 U_1 和 U_2 [如图1(b)所示],而下电极作为接地公共端,这时在液晶的不同区域将产生由电极独立控制的电场。在外电场作用下,其蓝相液晶的折射率发生变化,对

于沿 z 方向传播的入射光来说,其折射率可表示为^[13]

$$n_o(E) = n_1 - \Delta n_s \{1 - \exp[-(E/E_s)^2]\} / 3, \quad (1)$$

式中 Δn_s 表示饱和感应双折射率差, E_s 表示蓝相液晶的饱和电场。由于调控区域的折射率独立变化,因而非球面透镜的两个焦点位置也将独立变化,从而实现了在非球面微透镜的双焦距的独立调控。

3 模拟与分析

针对所提出的可变双焦微透镜,这里采用有限元方法进行模拟。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应用,这里不再赘述,请参考相关文献^[14]。对可变双焦微透镜调控全过程进行了模拟,具体包括:电场空间分布、折射率空间分布和光束传播过程中的光场空间分布。模拟过程中所选用的有关参数如下:工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$,传播方向由下向上;有机聚合物的折射率 $n_2 = 1.45$,蓝相液晶在没有施加电压条件下的折射率 $n_1 = 1.83$,其饱和感应双折射率差 $\Delta n_s = 0.4$,蓝相液晶的饱和电场 $E_s = 5.6 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。考虑到有限元方法通常数值计算量大,为保证计算精度,这里计算区域设为 $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,微透镜的直径为 $50 \mu\text{m}$,矢高为 $13.5 \mu\text{m}$ 。设蓝相液晶和有机聚合物所对应的介电常数分别为 5.2 和 3.0 ,分别对 U_1, U_2 为 $1, 100, 250 \text{ V}$ 三种情况进行数值模拟。

对可变双焦微透镜在不同施加电压下的空间电场分布进行了模拟,其模拟结果如图 2 所示,图中(a)、(b)、(c)分别表示电极施加电压为 $1, 100, 250 \text{ V}$ 时的空间电场分布。由图可以看出,不同的施加电压在蓝相液晶中产生的电场不同,其施加电压越大,则其电场也越大。利用(1)式,可计算蓝相液晶内折射率变化情况,其模拟结果如图 3 所示(为便于观察,图中仅用彩色表示蓝相液晶区域内折射率空间分布,而其它区域为有机聚合物,其折射率为 1.45)。由图可以看出,当施加电压为 1 V 时,由于蓝相液晶内部电场小,因而其折射率变化量很小,约为 0.0001 ;而当施加电压增大到 250 V 时,其内部电场急剧增加,折射率变化量明显增加,约为 0.132 。随着施加电压的进一步增大,其内部折射率变化量将趋于饱和,即其变化量随电压的增加将趋于恒定。因而,所施加电压的调控范围宜在 $0 \sim 250 \text{ V}$ 之间,若继续增加电压,不但对于折射率调控意义不大,而且会导致电场击穿而损坏微透镜。

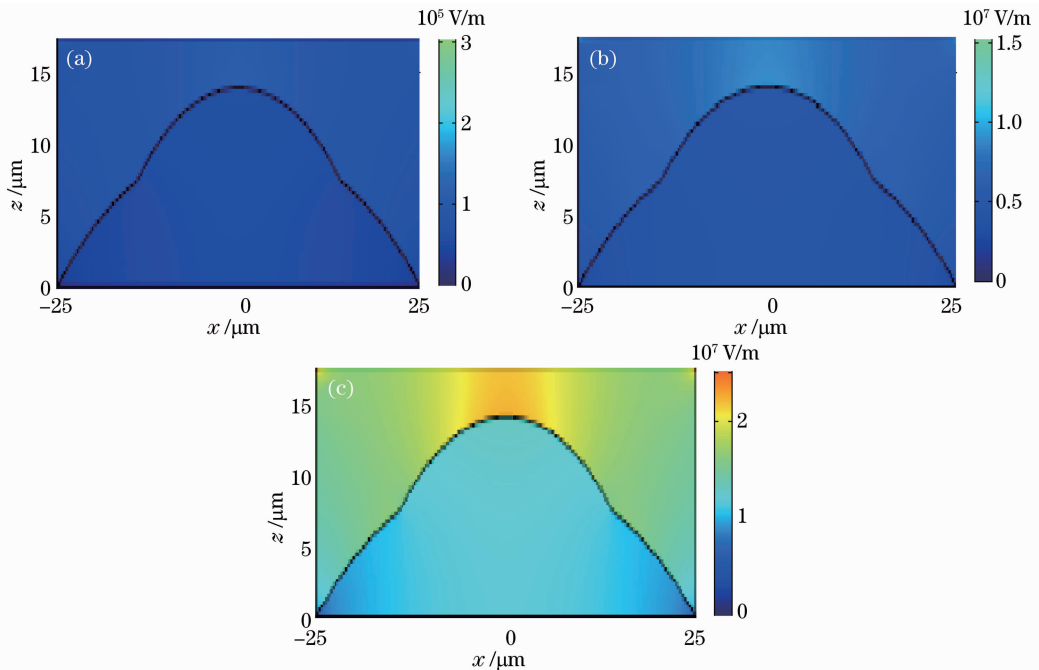


图 2 不同电压时电场空间分布。(a) 1 V ; (b) 100 V ; (c) 250 V

Fig. 2 Spatial electric field distribution with different applied voltages. (a) 1 V ; (b) 100 V ; (c) 250 V

根据上述模拟结果,接着对光束在微透镜中的传播过程进行了模拟仿真。模拟结果如图 4(a)、(b)、(c)分别表示在调控电压为 $1, 100, 250 \text{ V}$ 条件下的光场空间分布。由图可以看出,微透镜的双焦点位置随调控

电压的变化而发生了明显改变,其长焦距焦点、短焦距焦点的变化范围分别约为 $46\sim 62\ \mu\text{m}$ 、 $59\sim 87\ \mu\text{m}$,而其对应焦斑在调控过程中变化较小。需要指出的是,其长焦距焦点位移量范围大于短焦距焦点位移量,这是由于液晶边缘区域与中心区域的折射率在调控中变化较为接近,而前者所对应曲率半径大于后者所对应曲率半径的缘故。另外,当微透镜的上电极的施加电压 U_1 、 U_2 不同时,就会实现两个焦点位置的独立调控,这不会导致设计与制作难度的增加。

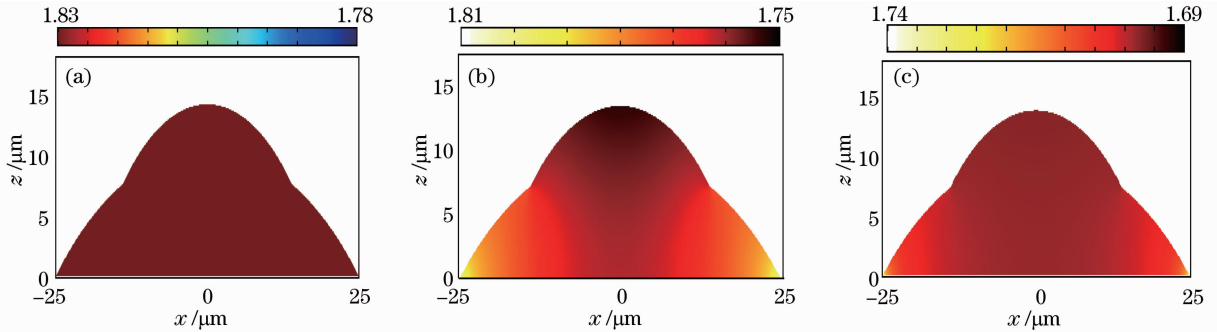


图3 不同电压时折射率空间分布。(a) 1 V;(b) 100 V;(c) 250 V

Fig. 3 Refractive-index spatial distribution with different applied voltages. (a) 1 V; (b) 100 V; (c) 250 V

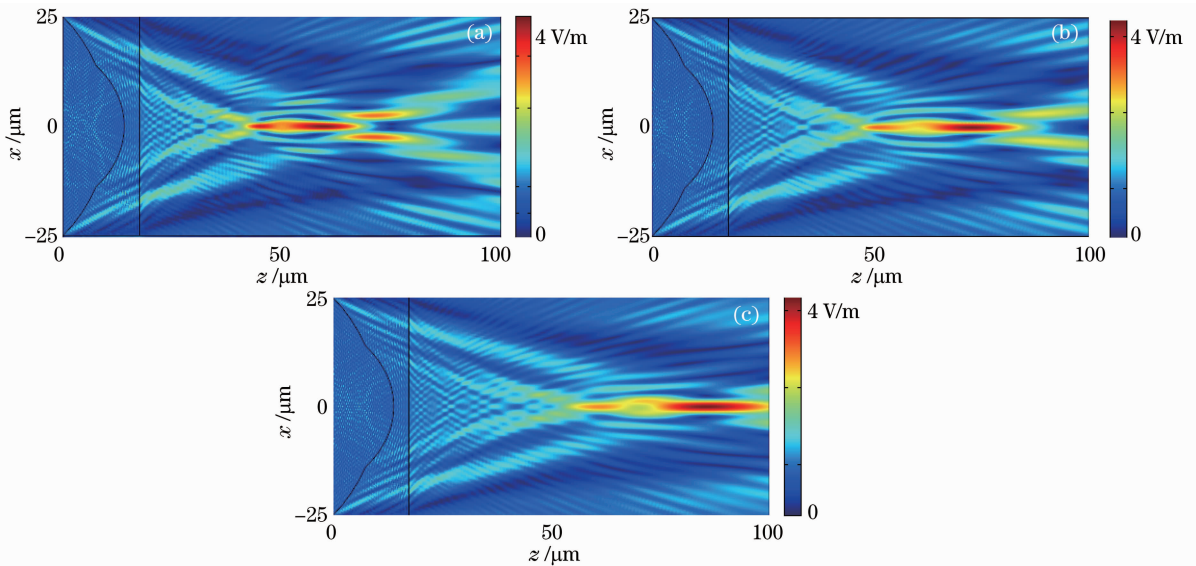


图4 不同电压时光场空间分布。(a) 1 V;(b) 100 V;(c) 250 V

Fig. 4 Optical-field spatial distribution with different applied voltage. (a) 1 V; (b) 100 V; (c) 250 V

虽然液晶折射率变化量不是很大,但同样可实现较大范围的焦点位移调控。由透镜焦距公式 $f = r/(n - n_2)$ 可知,在设计与制作过程中,微透镜曲面采用小曲率半径,通过合理选择有机聚合物,使其折射率 n_2 与液晶在饱和电场下的折射率 n 匹配(即 $n_2 \approx n = n_1 - \Delta n_s/3$),这时其焦距 f 趋于无穷远,但在调控电压为零时其焦距 $f = r/(n_1 - n_2)$,从而实现了大焦距变化范围,即 f 的变化范围为 $r/(n_1 - n_2) \sim \infty$ 。若有机聚合物折射率满足 $n_1 - \frac{1}{3}\Delta n_s < n_2 < n_1$,同样由透镜焦距公式 $f = r/(n - n_2)$ 可知,在调控过程中则可实现具有正、负焦距的可调双焦微透镜。

4 结 论

本文基于折射率调控原理,采用蓝相液晶材料,提出了一种新的可变双焦非球面微透镜的实现方法。采用有限元数值计算方法,对其调控过程中的电场、折射率和光场空间分布进行了模拟仿真。模拟结果表明,通过对控制电极施加不同电压,可实现微透镜的焦点位置的有效调控。该微透镜具有结构简单、工艺制作简

便、易于实现阵列型结构、易于与其它光子器件进行集成、调控速度快和无偏振依赖性等诸多优势,在各种微光学系统中应用前景广阔。

参 考 文 献

- 1 T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(3): 316~318
- 2 Liang Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe *et al.*. Variable-focus liquid microlenses and microlens arrays actuated by thermoresponsive hydrogels[J]. *Adv. Mater.*, 2007, **19**(3): 401~405
- 3 Y. C. Seow, A. Q. Liu, L. K. Chin. Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(8): 084101
- 4 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
- 5 Tang Xiongui, Tong Wei, Lu Rongguo *et al.*. Recent development in tunable liquid crystal microlens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 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**(2): 04002
- 6 Li Hui, Liu Kan, Zhang Xinyu *et al.*. 128×128 elements frequency driven liquid crystal lens array with tunable focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 218~223
李晖, 刘侃, 张新宇等. 128×128 元频率驱动变焦液晶透镜阵列[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 218~223
- 7 Hui Li, Kan Liu, Xinyu Zhang *et al.*. Optical focusing feature of single element in 128×128 elements electrically controllable cylindrical liquid crystal lens array[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 329~331
- 8 Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Cai Mingrong *et al.*. Fabrication of electrical-controlled polymer dispersed liquid crystal switchable-focus holographic len[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1107~1110
郑继红, 钟阳万, 蔡明荣等. 电控聚合物分散液晶变焦全息透镜制作[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 1107~1110
- 9 H. B. Yu, G. Y. Zhou, F. K. Chau *et al.*. A liquid-filled tunable double-focus microlens[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4782~4790
- 10 Hui Min Leung, Guangya Zhou, Hongbin Yu *et al.*. Liquid tunable double-focus lens fabricated with diamond cutting and soft lithography[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(30): 733~5740
- 11 H. W. Choi, E. Gu, C. Liu *et al.*. Fabrication and evaluation of GaN negative and bifocal microlenses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(6): 063101
- 12 Xiongui Tang, Jinkun Liao, Heping Li *et al.*. Analysis and simulation for the compensation of distortion in thick film analog lithography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 98~107
- 13 Chao-Te Lee, Yan Li, Hoang-Yan Lin *et al.*. Design of polarization-insensitive multi-electrode GRIN lens with a blue-phase liquid crystal[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17402~17407
- 14 Jianming Jin. The Finite Element Method in Electromagnetics[M]. 2nd edition, New York: John Wiley & Sons Inc., 2002. 89~162