

可调液晶微透镜研究进展

唐雄贵 童伟 陆荣国 廖进昆 刘永智

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 可调液晶微透镜是一种基于电光效应来改变其折射率空间分布的新型变焦微透镜,在微光学系统和微光机电系统中具有广阔的应用前景。简要介绍了可调液晶微透镜的基本结构,分析了其焦距调控的工作原理。阐述了可调液晶微透镜的研究现状,并指出了可调液晶微透镜研究的发展趋势。

关键词 光学器件;微透镜;变焦;液晶;电光效应

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040002

Recent Development in Tunable Liquid Crystal Microlens

Tang Xiongui Tong Wei Lu Rongguo Liao Jinkun Liu Yongzhi

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

Abstract The tunable liquid crystal microlens is a novel optical component by tuning its refractive index based on electro-optical effect, which has wide potential application in optical community. The elemental structures have been described, and the operation principles have been presented. An overview of recent activities in the area of the tunable liquid crystal microlens has been given, and then the development tendency in near future has been predicted.

Key words optical devices; microlens; tunable focal length; liquid crystal; electro-optical effect

OCIS codes 230.3720; 230.3990; 110.1080; 220.1080

1 引言

近年来,可调微透镜已引起人们的广泛关注与重视,这种新型光学元件在成像、光束控制与整形、微流体传感、自适应光学、生物医学光子学等方面有着广泛的潜在应用。可调微透镜通过施加一种或多种外加可控物理量(如力、热、电等)来改变微透镜的形状或折射率分布,从而实现其光学性能的相应改变。其具体调控方式有多种^[1~4],按调控过程所产生的实际物理效果主要分为两大类,即表面形状调控方法和折射率调控方法。对于表面形状调控方法,通常采用液体作为微透镜主体结构,利用压力、电润湿、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,但同时存在以下缺点:1) 可调微透镜的表面形状难以实现精确调控,通常存在较大像差;2) 其表面形状易受到工作环境、自身重力以及封装过程等多种因素的影响,其性能稳定性较差;3) 调控响应速度慢,不能实现快速调控;4) 其控制单元结构复杂、体积大,难以用于设计和制作阵列型结构。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,具有折射率变化范围大、响应速度相对较快、无机械运动、无表面形变、稳定性好、易于集成等诸多优点,其应用前景更为广阔。本文综述了可调液晶微透镜的研究进展。

2 基本结构

可调液晶微透镜的具体结构形式有多种。按控制电极形状来分类,其基本结构形式主要有两种,即圆孔

收稿日期: 2011-09-14; 收到修改稿日期: 2011-10-16; 网络出版日期: 2012-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60736038、60908024)和中央高校基本科研业务费项目(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、集成光学等方面的研究。E-mail: tangxg@uestc.edu.cn

电极结构^[5]和平板电极结构^[6]。其他各种结构形式都是在这基础上发展起来的变型结构。

2.1 圆孔电极结构

圆孔电极结构如图 1(a)所示,两玻璃基底之间为液晶膜层,透明掺锡氧化铟(ITO)膜为下电极,镀在下玻璃基底上,圆孔形电极为上电极,镀在上玻璃基底上。玻璃的内表面涂敷一层聚酰亚胺作为定向层,使液晶分子取向沿水平方向。电压馈送到电极上,在液晶区域产生非均匀电场分布。由于光电效应,液晶分子取向发生非均匀变化,导致其折射率空间分布也发生非均匀变化,从而使光束聚焦在特定位置。当调控电压改变时,微透镜焦点位置发生变化,从而完成了微透镜焦点位置的调控过程。

2.2 平板电极结构

平板电极结构如图 1(b)所示,上、下电极均为透明 ITO 膜,属于平板结构,镀在上、下玻璃基片上。调控区域的液晶为凸面或凹面型结构,其液晶取向由定向层来确定。与之相邻的为聚合物材料,其浮雕面形结构常采用光刻或模压等方法制备。由于聚合物材料与液晶的折射率不同,因而形成一个微透镜结构,对入射光束具备聚焦性能。当施加电压时,液晶的折射率随之发生变化,从而实现了微透镜的焦距调控。

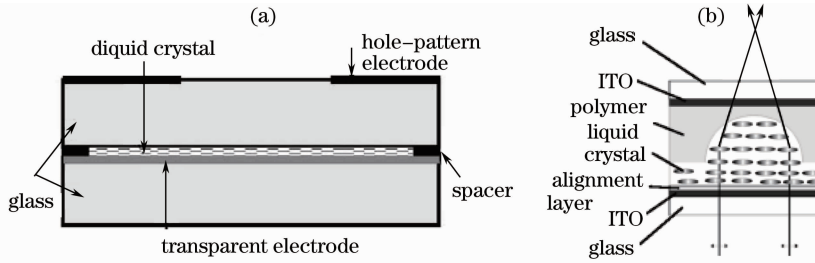


图 1 可调液晶微透镜基本结构。(a)圆孔电极型;(b)平板电极型

Fig. 1 Schematic structure of tunable liquid crystal microlens. (a) Hole-pattern electrode; (b) slab electrode

3 工作原理

液晶按分子排列状态不同,分为向列相、近晶相和胆甾相液晶,通常采用向列相液晶来实现可调液晶透镜。液晶分子的初始取向由定向层决定,其方向通常与电极平行。当控制电极施加电压时,在液晶区域产生电场,其大小与方向与控制电极形状、控制电压以及液晶的厚度等参数有关,其电力线分布示意图如图 2(a)所示(这里仅给出圆孔电极型结构)。在外电场作用下,其液晶的自由能密度表示为^[7]

$$\Delta G = \frac{1}{2} [k_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + k_{22} (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + k_{33} |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2] - \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2, \quad (1)$$

式中第一项表示弹性自由能密度,第二项表示静电自由能密度, k_{11} 、 k_{22} 和 k_{33} 分别表示展曲、扭曲和弯曲弹性常数, \mathbf{n} 和 \mathbf{E} 分别表示液晶分子取向矢量和相应电场矢量, ϵ_0 、 $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} 分别表示真空介电常数、平行于液晶分子取向的相对介电常数和垂直于液晶分子取向的相对介电常数。由于电场的作用,液晶分子取向发生改变,使其自由能密度 ΔG 取最小值,这时液晶分子取向将趋于电场方向。利用变分法原理,则可获得不同位置处液晶分子转动后的取向角度 θ ,其液晶分子取向空间分布示意图如图 2(b)所示。当入射光为非常光时,其对应的折射率为

$$n(r, z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(r, z) + n_e^2 \sin^2 \theta(r, z)}}, \quad (2)$$

式中 n_o 、 n_e 分别表示寻常光和非常光的主折射率,且 $n_o = \sqrt{\epsilon_{\perp}}$ 、 $n_e = \sqrt{\epsilon_{//}}$ 。则在位置为 r 处的液晶的等效折射率为

$$n_{\text{eff}}(r) = \frac{1}{d(r)} \int_0^{d(r)} n(r, z) dz, \quad (3)$$

式中 $d(r)$ 为液晶在位置为 r 处的厚度。设电极控制区域的总厚度为 D ,则其他介质厚度为 $D-d(r)$ (设其为各向同性介质,折射率为 n')。对于圆孔电极型结构, $d(r) = D$ 。则光波在透过液晶透镜后所产生的相位延迟为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \{n'[D - d(r)] + n_{\text{eff}}(r)d(r)\}, \quad (4)$$

其相位延迟大小是位置 r 的函数。而传统透镜的相位延迟函数为 $\Phi(r) = -(2\pi/\lambda)[r^2/(2f)]$, 也是位置 r 的函数。通过合理设计液晶微透镜的结构参数, 控制电极施加的电压在液晶区域产生调控电场, 使其入射光经由不同的路径传播时产生的相位延迟函数与传统透镜的相位延迟函数相一致或逼近, 从而实现液晶微透镜的聚焦功能。当调控电压变化时, 其相位延迟也相应发生改变, 从而实现对液晶微透镜焦点位置的调控。

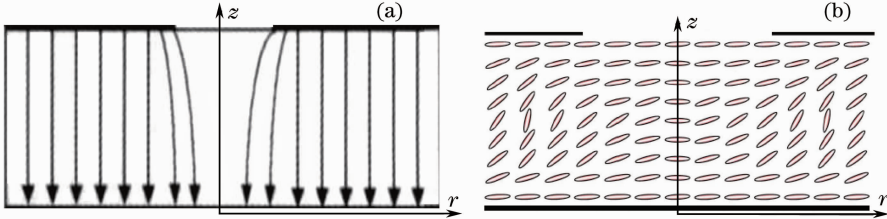


图2 液晶微透镜焦距调控原理。(a)电力线分布;(b)液晶分子取向分布

Fig. 2 Principle scheme of tunable liquid crystal microlens. (a) Electric field line distribution; (b) director distribution of liquid crystal molecule

4 研究进展

4.1 圆孔电极结构

可调液晶微透镜由日本科学家 Sato^[8] 在 1979 年首次提出。接着, 1989 年, Nose 等^[5] 提出了圆孔电极的液晶微透镜, 其结构如图 1 所示, 它具有结构简单、制作简便的优点, 但其焦点仅能在透镜的光轴方向上前后移动。在此基础上, 1997 年, Masuda 等^[9] 提出了圆孔电极多分区调控的液晶微透镜, 如图 3 所示, 图 3(a) 和图 3(b) 分别为圆孔电极二分区型和四分区型结构, 通过对不同分区施加不同的调控电压信号, 其各分区的相位延迟也不同, 使液晶微透镜的焦点在横向方向发生位移, 首次实现了光束在垂直于透镜光轴的平面内的快速扫描, 移动范围约 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。2003 年, Ye 等^[10] 对这种多分区型圆孔电极结构进行了改进, 有效提高了其调控性能(如焦点在垂直于透镜光轴的平面内移动范围更大, 约 $-160 \sim +150 \mu\text{m}$), 降低了设计与工艺制作难度, 但其焦点在透镜光轴方向也发生了较大移动, 同时调控电压也很大。在上述各种方案中, 焦点位置调控过程均要求入射光为非常光, 而对于寻常光, 其焦距将不会发生变化, 即可调液晶微透镜具有偏振依赖性, 这不仅使得光利用效率大为降低, 而且增加了费用成本。2010 年, Lin 等^[11] 采用聚合物分散型液晶, 其液晶光轴方向沿光束传播方向, 利用克尔效应, 在液晶中产生双折射, 从而使得其主折射率 n_o 、 n_e 同时发生变化, 但其液晶光轴方向不会发生转动。这对于入射光来说, 不管处于何种偏振态, 其折射率都发生同步变化, 因而这种液晶微透镜具有偏振无关性, 其原理图如图 4 所示。另外, 其调控速度相对较快, 约为 3 ms, 但调控电压较高, 约为 100 V。

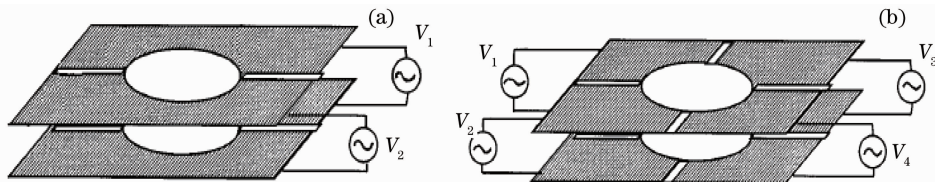


图3 液晶微透镜电极结构。(a)二分区型;(b)四分区型

Fig. 3 Electrode structure of liquid crystal microlens. (a) Two divided regions; (b) four divided regions

4.2 环形电极结构

环形电极结构是在圆孔电极的基础上发展起来的, 通过对不同环形电极部分施加不同的调控电压信号, 从而在液晶透镜不同区域实现对其折射率的精确调控。2010 年, Kao 等^[12] 提出了一种采用环形电极结构来实现焦距调控的液晶微透镜, 其结构如图 5 所示, 图 5(a) 和图 5(b) 分别为微透镜横截面结构和环形电极俯视结构。其环形电极的各个环形宽度为非等宽结构, 每个环形宽度的设计是通过液晶微透镜的等效折射

率曲线进行等高度均分所对应的宽度来确定。在调控过程中,通过对不同环形电极施加不同电压,各环形电极所对应调控区域的液晶折射率发生不同变化,则相应相位延迟也不同,从而实现其焦点位置的移动;这种透镜能精确调控折射率空间分布,但同时该方法也导致设计、制作和调控等难度增加。同年,Jeng 等^[13]利用环状电极结构,提出了一种液晶菲涅耳透镜,其环形电极宽度参数由菲涅耳波带片计算公式确定。通过对其电极施加相同电压,使其调控区域产生 π 相位延迟,从而实现菲涅耳透镜聚焦性能,它在光轴方向具有多个焦点。这种透镜不是严格意义的可调微透镜,通常称为开关式微透镜,且存在衍射效率低的缺点,通常小于 30%。

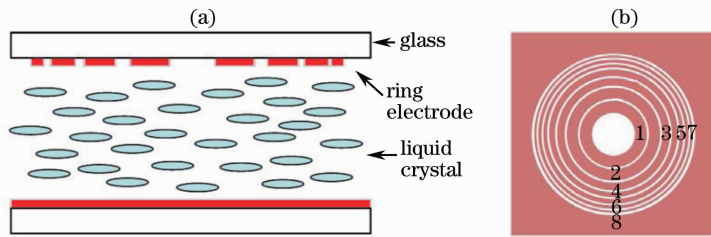


图 5 环形电极型液晶微透镜。(a)微透镜横截面图;(b)环形电极俯视图

Fig. 5 Liquid crystal microlens with ring-pattern electrode. (a) Cross-section view of microlens; (b) top view of electrode

4.3 平板电极结构

对于圆孔电极结构和环形电极结构,其液晶通常为薄膜结构,其微透镜的数值孔径很小。而对于平板电极型微透镜结构,通常能实现相对较大数值孔径。2005年,Kim 等^[6]利用 E-31 向列相液晶,制作了平板电极型液晶微透镜,其原理结构如图 1(b)所示,其驱动电压范围为 1.5~4.0 V,焦距变化范围 1.7~5.0 mm,但该微透镜具有偏振依赖性,即当入射光为非常光时微透镜才具有焦距调控特性。同年,Ren 等^[14]提出了一种凸

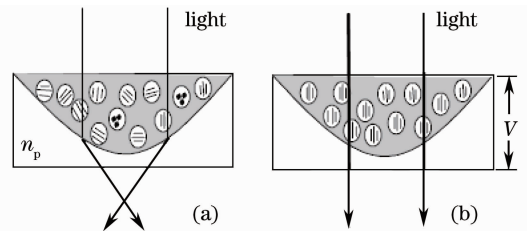


图 6 平板电极型液晶微透镜

Fig. 6 Tunable liquid crystal microlens with slab electrode

面形液晶微透镜,其结构如图 6 所示。首先将有机聚合物旋涂在 ITO 玻璃基片上,通过模压方法制备凹面微结构,然后在凹面处注入纳米分散型液晶/聚合物混合物,用紫外光固化聚合物后形成凸面形微透镜结构。这种微透镜具有响应时间快(约 200 μ s)、无偏振依赖性等优点,但调控电压高,其范围约为 100~200 V。2009年,Dai 等^[15]采用平板电极结构,提出了一种具有正、负焦距的液晶微透镜。在调控过程中,当其液晶的折射率大于与之相邻的聚合物折射率时,微透镜表现为正透镜;反之,则表现为负透镜。这首次实现了双重功能的微透镜结构,其焦距变化范围大,调控电压小,但透镜具有偏振依赖性和光效率低的缺点。

2009年,Lee 等^[16]提出一种新型可调微透镜结构,如图 7 所示,它由两部分构成,即偏振调控单元和聚焦单元。其偏振调控单元通过施加电压来改变入射光波的偏振方向,而在聚焦区,液晶聚合物的折射率与光束的偏振态相关,因而,其偏振态变化时,其焦距随之相应变化,同时其焦点光强度也受到调控。这种微透镜结构具有较大的调焦范围、较快的响应时间以及焦点强度可调的特点,但同时也存在结构相对复杂、工艺制作难度大、光效率低和偏振依赖性等缺点。2011年,Li 等^[17]采用聚合物分散型液晶,设计出一种新型的液晶微透镜结构,如图 8 所示。其特点是上电极为凸型曲面,下电极为平面,以实现圆孔型电极在液晶中产生非均匀的电场分布,从而获得液晶区域的折射率非均匀分布。同时,分析了其他不同曲面形状的上电极对液晶微透镜的像差影响。该方案具有调焦范围大、与入射光偏振态无关、像差小等优点,但其设计、制作工艺要

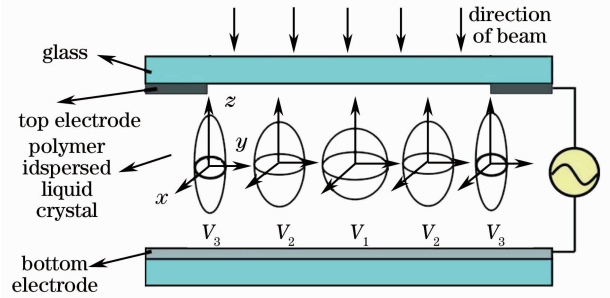


图 4 聚合物分散型可调液晶微透镜原理图

Fig. 4 Principle scheme of tunable polymer-dispersed liquid crystal microlens

求较高,且调控电压范围也较大,约为 20~100 V。

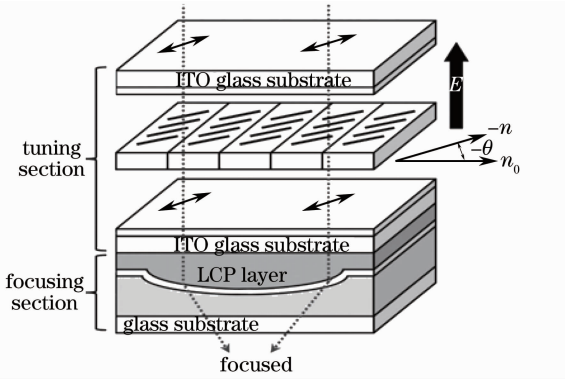


图 7 基于偏振调控的液晶微透镜

Fig. 7 Liquid crystal microlens by controlling the polarization

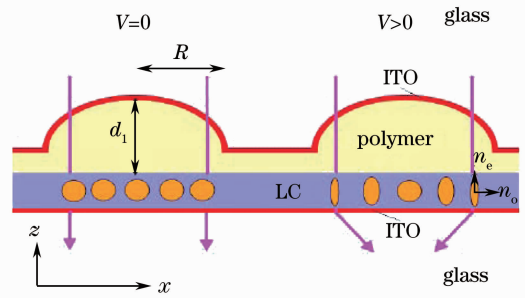


图 8 偏振无关型液晶微透镜

Fig. 8 Polarizer-free liquid crystal microlens

近年来,可调液晶微透镜已引起了国内研究人员的关注和重视,开始在这方面开展了一些有意义的研究工作。2010年,华中科技大学李晖等^[18]采用圆孔电极结构,利用液晶介电常数随驱动电压信号的频率变化而相应改变的性质,设计、制作了 128×128 可调液晶微透镜阵列,有效增加了微透镜的焦距调节范围;另外,作者们创造性地采用矩孔电极结构来替代圆孔电极结构,设计并制作了 128×128 可调液晶微柱透镜阵列^[19];2010年,上海理工大学郑继红等^[20,21]采用聚合物分散液晶,利用平板电极结构,设计、制作了液晶全息透镜,实现了开关式变焦调控,具有制作工艺简便、易于实现大孔径、易于集成、易于调控等优点,但仍需进一步提高衍射效率,降低驱动电压。

5 结束语

可调液晶微透镜是一种具有广阔应用前景的新型微光学元件。人们在这方面已开展了较多的研究,且发展十分迅速,但这些仍是基础性的初步研究,离实际应用还存在一定距离。今后研究主要在以下几个方面:1) 探索新的调控原理、方法与技术,进一步降低其调控电压、提高其调控速度、解决像差问题,获得高性能可调液晶微透镜;2) 研究具有新型光学功能的可调液晶微透镜的实现方法,如光束大角度扫描、多焦点调控等;3) 探索可调液晶微透镜与其他光学元件进行集成的方法与途径,实现新型功能光学系统,拓展新的应用领域;4) 利用可调液晶微透镜,研究有效改善衍射光学元件或系统性能的方法与技术,如解决微透镜因色差、热光效应、应力或形变等原因而造成光学性能的恶化问题等。

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 Zhan Zhenxian, He Jianhui, Yao Haitao *et al.*. Aspherical liquid micro-lens manipulated by electrostatic forces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 361~364
詹珍贤, 何建慧, 姚海涛等. 电场作用下的变焦非球面液滴微透镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 361~364
- 5 T. Nose, S. Sato. A liquid crystal microlens obtained with a nonuniform electric field[J]. *Liq. Cryst.*, 1989, **5**(5): 1425~1433
- 6 Jae Hoon Kim, Satyendra Kumar. Fabrication of electrically controllable microlens array using liquid crystals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 628~632
- 7 L. G. Commander, S. E. Day, D. R. Selviah. Variable focal length microlenses[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1): 157~170
- 8 S. Sato. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**(9): 1679~1684

- 9 S. Masuda, S. Takahashi, T. Nose *et al.*. Liquid-crystal microlens with a beam-steering function[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20): 4772~4778
- 10 M. Ye, S. Sato. Liquid crystal lens with focus movable along and off axis[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **225**(4-6): 277~280
- 11 Yihsin Lin, Hungshan Chen, Hungchun 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
- 12 Y. Kao, P. Chao, C. Hsueh. A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18506~18518
- 13 S. Jeng, S. Hwang, J. Horng *et al.*. Electrically switchable liquid crystal Fresnel lens using UV-modified alignment film [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26325~26331
- 14 H. Ren, Y. Fan, Y. Lin *et al.*. Tunable-focus microlens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**(1-3): 101~106
- 15 H. T. Dai, Y. J. Liu, X. W. Sun *et al.*. A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4317~4323
- 16 Y. Lee, J. S. Gwag, Y. Choi *et al.*. Fast switching characteristics of a microlens array using the electroclinic effect of SmA liquid crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3737~3741
- 17 Yan Li, Shintson Wu. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(9): 8045~8050
- 18 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
- 19 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]. *Chinese Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 329~331
- 20 Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Wen Ken *et al.*. Diffraction and properties of holographic polymer dispersed liquid crystal switchable lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 1831~1838
郑继红, 钟阳万, 温 垦 等. 电控聚合物分散液晶全息透镜及特性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(3): 1831~1838
- 21 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