

文章编号 1004-924X(2009)10-2351-08

# 电控可变焦 128 元 × 128 元自适应液晶微透镜阵列

李 晖, 张新宇, 张天序, 沈绪榜

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 多谱信息处理技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 基于已有的单圆孔电极液晶透镜的结构与设计方法, 研制了新型的电控可变焦 128 元 × 128 元液晶微透镜阵列。该面阵液晶微透镜使用氧化铟锡(ITO)玻璃作为上下基板, 上电极通过光刻技术和盐酸腐蚀方法得到 128 元 × 128 元圆孔阵列图案; 下电极为 ITO 膜。上电极的圆孔阵列排列整齐, 每个圆孔的直径为 50  $\mu\text{m}$ , 圆孔之间的间隔为 100  $\mu\text{m}$ , 夹在上下基板之间的液晶层的厚度为 20  $\mu\text{m}$ 。验证了该面阵液晶微透镜的光学特性, 结果表明, 在 0.2~5.0 V(RMS), 该面阵液晶微透镜的焦距为 50~400  $\mu\text{m}$ , 焦点的焦斑尺寸在 10  $\mu\text{m}$  左右, 点扩展函数值近似于理论数值。该面阵液晶微透镜的工作电压与焦距成反比, 可以成清晰的多重像。

**关键词:** 自适应光学; 液晶; 大面阵微透镜

**中图分类号:** TH703; O753.2 **文献标识码:** A

## Electrically driving and controlling adaptive 128 element × 128 element liquid crystal micro-lens array with tunable focal length

LI Hui, ZHANG Xin-yu, ZHANG Tian-xu, SHEN Xu-bang

(State Key Laboratory for Multispectral Information Processing Technology,  
Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new electrically driving and controlling 128 element × 128 element Liquid Crystal (LC) micro-lens array with tunable focal length is proposed based on the structure and design methods of a single circular hole electrode LC lens. The Indium Tin Oxide (ITO) glasses are used as the top and bottom substrates of the LC micro-lens array. The top electrode patterns containing 128 element × 128 element are obtained by a lithography and a hydrochloric acid etching, in which every element is a single circular hole of 50  $\mu\text{m}$  diameter and the distance between the two circular holes is 100  $\mu\text{m}$ . The bottom electrode is just the ITO film. Furthermore, the thickness of LC layer between the top and the bottom electrodes is about 20  $\mu\text{m}$  and the focal length of the LC micro-lens array can be electrically tuned from 50  $\mu\text{m}$  to 400  $\mu\text{m}$  under the operating voltage from 0.2 V (RMS) to 5.0 V (RMS). The result of the test indicates that the point spread function of the LC micro-lens array is close to the theory value, and the relationship of operating voltage and focal length is in an inverse proportion. These results show that the imaging characteristic of the LC micro-lens array can be comparable to those of the

收稿日期: 2008-11-24; 修订日期: 2008-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 60736010); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60777003)

conventional optical micro-lens arrays.

**Key words:** adaptive optics; liquid crystal; large-area micro-lens array

## 1 引言

液晶是分子排列取向有序的液体。其电学和光学性质都呈现与排列有关的类似于晶体的各向异性;另外,液晶也具有与普通液体相类似的流动性。虽然液晶结合了液体和晶体的性质,但是又展示出不同于晶体和液体的、非常特殊的电光特性,因此,液晶不同于晶体和液体。利用液晶电控双折射以及液晶分子受电场强迫取向而改变光学及电学特性这两种光电特性,可以制作出液晶相位调制器<sup>[1-2]</sup>,液晶透镜以及微透镜。

液晶透镜是由日本科学家 Sato 在 1979 年提出的<sup>[3]</sup>,历经多年,发展出了单圆孔电极的液晶透镜<sup>[4]</sup>、模式电极的液晶透镜<sup>[5]</sup>、聚合物液晶微透镜阵列<sup>[6]</sup>以及外形浮雕结构的液晶微透镜阵列<sup>[7]</sup>等。用液晶制作的透镜及微透镜共同特点是:在固定透镜及微透镜与 CCD 位置后具有电控变焦功能,而且体积较小,厚度较薄,可以与其他光学元件进行搭配使用,是传统光学变焦系统的替代品。聚合物液晶微透镜阵列具有较好的光学特性,但是制作工艺复杂、制作成本较高,还存在电控变焦范围较小、形成的焦点光斑尺寸较大、不易制作出大阵列的问题。

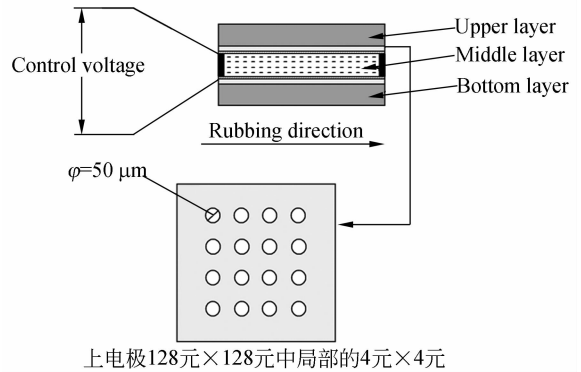
本文借鉴单圆孔液晶透镜的结构<sup>[4]</sup>,发展了一种新型的液晶微透镜阵列。该液晶微透镜阵列中的每个圆孔的直径为  $50\ \mu\text{m}$ ,液晶层的厚度为  $20\ \mu\text{m}$ ,即圆孔的直径与液晶层的厚度比值约为  $3:1$ <sup>[4-8]</sup>。该液晶微透镜阵列为  $128\ \text{元} \times 128\ \text{元}$  的大阵列微透镜,采用光刻技术和盐酸腐蚀方法制作,与聚合物液晶微透镜<sup>[6]</sup>相比,工艺更加简单、制作成本更低、具有更大的变焦范围、焦点光斑尺寸更小;采用的聚酰亚胺层既作为定向层又作为绝缘层,与外形浮雕结构的液晶微透镜<sup>[7]</sup>相比,电场可更加有效地加载在液晶层上使得液晶分子旋转速度加快,降低了工作电压。较低工作电压、较大变焦范围、较小焦点尺寸可以使得该液晶微透镜阵列在光互联、光存储以及图像处理中有极大的应用潜力。

本文通过 3 组不同的实验,验证所设计的液

晶微透镜阵列的光学特性,测试实验结果表明:该微透镜阵列是聚焦的面阵微透镜,其点扩展函数值与理论值接近,焦距与工作电压成反比例关系,且可以生成清晰多重像。

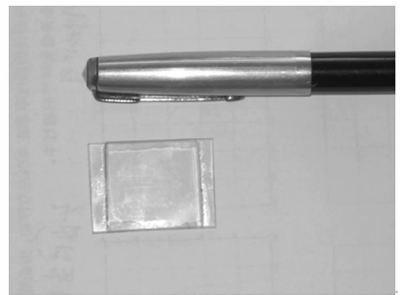
## 2 结构与制作工艺

面阵液晶微透镜结构如图 1(a)所示,分为上、中、下 3 层,其中上层依次为玻璃衬底、ITO 膜、聚酰亚胺层,中层为液晶层(采用的是德国 Merck 的 E44)以及玻璃微球间隔子,下层依次为聚酰亚胺层、ITO 膜、玻璃衬底。上电极将 ITO 膜通过光刻和盐酸腐蚀方法得到了  $128\ \text{元} \times 128\ \text{元}$  圆孔阵列图案;而下电极就是 ITO 膜。上电极的圆孔阵列排列整齐,每个圆孔的直径为  $50\ \mu\text{m}$ ,圆孔之间的间隔为  $100\ \mu\text{m}$ 。夹在上下基板之间



(a) 面阵液晶微透镜结构

(a) Structure of LC micro lens array



(b) 面阵液晶微透镜样品

(b) Sample of LC micro lens array

图 1 面阵液晶微透镜结构及形貌特征  
Fig. 1 Structure of LC micro lens array

的液晶层的厚度为 20 μm。控制电压为 1 kHz 的方波,加载在上、下电极之间。图 1(b)为制作好的样品图。

面阵液晶微透镜的制作过程如下:首先,通过光刻技术和盐酸腐蚀的方法得到上电极图案。将切好的 3.0 cm×2.5 cm 的两块 ITO 玻璃进行清洗,随后进行光刻,再完成显影。在曝光显影完成后,用盐酸腐蚀,只留下需要的图形,清洗干净便得到了上电极图案;其次,将洗净的玻璃,旋转涂抹上聚酰亚胺并进行退火处理,再用绒布沿如图 1(a)中所示方向摩擦玻璃表面。在被摩擦过的上、下基板中间,夹入玻璃微球并以紫外(UV)胶封住周边,利用毛细原理灌入液晶,放置于紫外灯下照射固化并封口,就此完成了面阵液晶样品的制作。

### 3 液晶微透镜的设计方法

在制作完成的面阵液晶样品的上、下电极之间加上电场后,液晶层中每个单元内便形成了非均匀电场,液晶分子指向的方向随电场而改变,使得液晶样品每个单元内呈现出折射率渐变梯度分布,造成光线的偏折,达到聚焦效果,形成聚焦光学透镜。

#### 3.1 液晶折射率与入射光角度的关系

液晶的折射率及介电常数等物理特性的各向异性直接与液晶分子的排列整齐程度有关。对于向列液晶,有序参数平均值在 0.6~0.8 之间,而液晶的模数约为 10<sup>-11</sup>~10<sup>-12</sup> N,与一般弹性体相比,数值均较小。液晶分子的排列很容易受到电场等外界影响而产生形变。受到形变的液晶其单位体积内的弹性自由能公式为<sup>[9]</sup>:

$$F_d = \frac{1}{2} [k_{11}(\nabla \cdot \hat{n})^2 + k_{22}(\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n})^2 + k_{33}(\hat{n} \times \nabla \times \hat{n})^2], \quad (1)$$

其中  $k_{11}$ 、 $k_{22}$  和  $k_{33}$  分别表示扩张(splay)、扭转(twist)以及弯曲(bend)的弹性常数。

向列型液晶是正单光轴晶体,可以设  $z$  轴为光轴方向,  $n_x = n_y = n_o$ ,  $n_z = n_e$  ( $n_e > n_o$ ),如图 2 中所示,液晶分子自由能最小值出现在液晶分子指向方向与电场方向一致时。本文以 Fresnel 提出的折射率球<sup>[9]</sup>,分 3 个不同方向的入射线偏振光

分别来说明正单光轴液晶材料的光学特性:

若光平行于  $z$  轴入射,可以将光电场分解为两个偏振方向正交  $E_x$  和  $E_y$ ,由于  $E_x$  和  $E_y$  垂直于光轴,此方向的折射率都是  $n_o$ ,没有相位差,则原来入射的光的偏振状态通过液晶后不会有任何的改变。

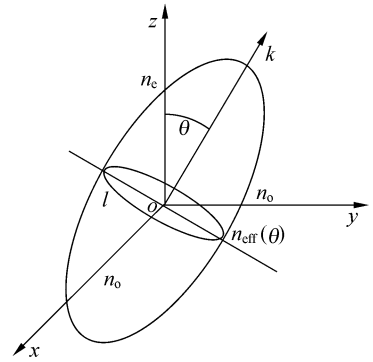


图 2 折射率椭圆球

Fig. 2 Refractive index ellipsoid

若光平行于  $y$  轴入射,则可以将光电场分解为  $E_x$  和  $E_z$  两个正交分量,  $E_x$  垂直于光轴,此方向的折射率是  $n_o$ ,  $E_z$  平行于光轴,此方向的折射率是  $n_e$ 。由于  $n_e \neq n_o$ ,当光经过液晶后,  $E_x$  和  $E_z$  两个分量的相位差为  $\Delta\varphi = 2\pi d(n_e - n_o)/\lambda$ ,其中  $\lambda$  为真空中的波长。

若光的入射方向与  $z$  轴夹角为  $\theta$ ,因光轴为对称轴,在不失一般性的情况下,可以令入射光方向在  $y-z$  平面上,此时取垂直于入射方向通过原点  $o$  的椭圆,将光电场分解在此椭圆上的长轴  $OA$  和短轴  $OB$  上,则  $OA$  方向上的折射率是  $n_{\text{eff}}(\theta)$ ,而  $OB$  方向上的折射率是为  $n_o$ ,  $n_{\text{eff}}(\theta)$  公式为<sup>[9]</sup>:

$$n_{\text{eff}}^2(\theta) = \frac{n_o^2 n_e^2}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}. \quad (2)$$

#### 3.2 在外加电场作用下液晶层的折射率与电压的关系

根据电磁理论,由拉普拉斯方程  $\nabla^2 V = 0$  可以得到液晶层中的电位分布情况。只考虑二维的情况下,可将拉普拉斯公式表示为:

$$\frac{\partial^2 V(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V(x, y)}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

利用泰勒公式展开  $x$  方向的点  $(x \pm \Delta x, y)$  的电位函数:

$$V(x+\Delta x, y) = V(x, y) + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} (\Delta x)^2 + \dots, \quad (4)$$

$$V(x-\Delta x, y) = V(x, y) - \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} (\Delta x)^2 - \dots, \quad (5)$$

将式(4)和(5)相加得到:

$$\frac{\partial^2 V(x, y)}{\partial x^2} \approx \frac{V(x+\Delta x, y) + V(x-\Delta x, y) - 2V(x, y)}{(\Delta x)^2}. \quad (6)$$

同理可以得到展开  $y$  方向的点  $(x, y \pm \Delta y)$  的电位函数:

$$\frac{\partial^2 V(x, y)}{\partial y^2} \approx \frac{V(x, y+\Delta y) + V(x, y-\Delta y) - 2V(x, y)}{(\Delta y)^2}. \quad (7)$$

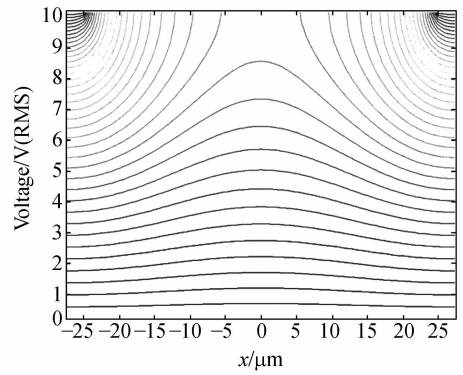
将式(6)和式(7)代入式(3), 假设  $\Delta x = \Delta y = \Delta$  可以得到:

$$V(x, y) \approx \frac{1}{4} [V(x+\Delta, y) + V(x-\Delta, y) + V(x, y+\Delta) + V(x, y-\Delta)]. \quad (8)$$

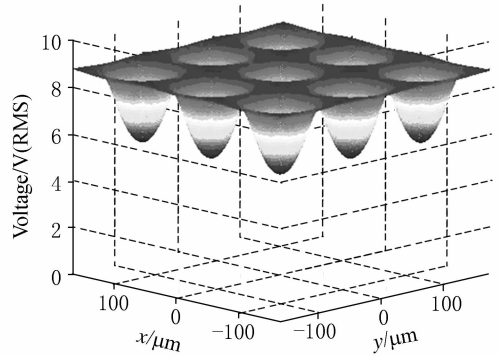
式(8)为液晶层中电位分布函数的简化形式。在电压为 10.0 V(RMS) 并考虑边界条件, 根据公式(8)可以得到液晶层的电位分布情况, 如图 3 所示。其中, 图 3(a) 为用式(8)直接计算得到的二维液晶微透镜阵列一个单元的电场分布; 图 3(b) 为将公式(8)扩展到三维得到的液晶微透镜阵列 3 元  $\times$  3 元的电场分布; 而得到电位分布后再考虑  $E = -\nabla V$  和  $\nabla(\epsilon \cdot E) = 0, \epsilon$  为液晶层的介电常数, 就可以得到图 3(c) 中的液晶微透镜阵列一个单元的电场场线分布。

在未加电压之前, 液晶样品内每个单元内部的液晶分子排列是以整齐的预倾角  $2.3^\circ$  进行排列的, 而在加电压之后, 电场线分布会呈现为非均匀电场, 如图 3 所示。在加电压后, 液晶样品内单个单元折射率分布为: 在圆孔边缘处, 液晶分子因为被电场场线拉起来, 折射率为  $n_o$ ; 在圆孔边缘到圆孔中心区域, 由于此处呈非均匀场线分布, 液晶分子的折射率为  $n_{\text{eff}}(\theta)$ ; 在圆孔中心处, 因为没有受到电场的影响, 所以液晶分子还是呈现原本的状态, 此处的折射率为  $n_e$ 。

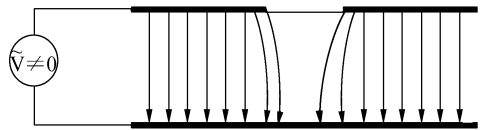
液晶样品圆孔区域折射率的分布呈现如 Grin lens<sup>[10]</sup> 一样的梯度折射率分布。液晶样品在外加电压作用下, 折射率分布与 Grin lens 折射



(a) 电压为 10.0 V(RMS) 时, 面阵液晶微透镜内单个单元的电场分布  
(a) Electric field distribution of an element in LC micro lens array under 10.0 V(RMS)



(b) 电压为 10.0 V(RMS) 时, 面阵液晶微透镜内的电场三维分布  
(b) Three dimensional electric field distribution of LC micro lens array under 10.0 V(RMS)



(c) 液晶微透镜阵列一个单元的电场场线分布  
(c) Electric field line distribution of an element in LC micro lens array

图 3 面阵液晶微透镜的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution of LC micro lens array

率分布趋势一致, 每个单元都是具有聚焦效果的光学透镜。由于 128 元  $\times$  128 元的每个单元受到的电场分布一样, 而产生的折射率分布也一致, 所以整个面阵液晶微透镜阵列的折射率分布, 只需

要将一个单元的折射率分布推广到 128 元×128 元就可以得到。

### 3.3 液晶微透镜的焦距公式

为了研究面阵液晶微透镜的焦距公式,本文采用平面波入射方式来得到面阵液晶微透镜的焦距公式。由于通过面阵液晶微透镜中每个单元透镜的中心区域的光线因折射率大使光速降低,而

每个单元透镜的外围区域的光线因折射率小使光速加快,因此形成了球面波输出,产生了聚焦现象,如图 4 所示。图 4 的上部是面阵液晶微透镜阵列在电场作用下,按照上节分析得到的梯度渐变折射率分布,图 4 的下部为按照上节中分析得到的面阵液晶微透镜阵列的单个单元产生的 Grin lens 原理图。由光线的等光程性可知:

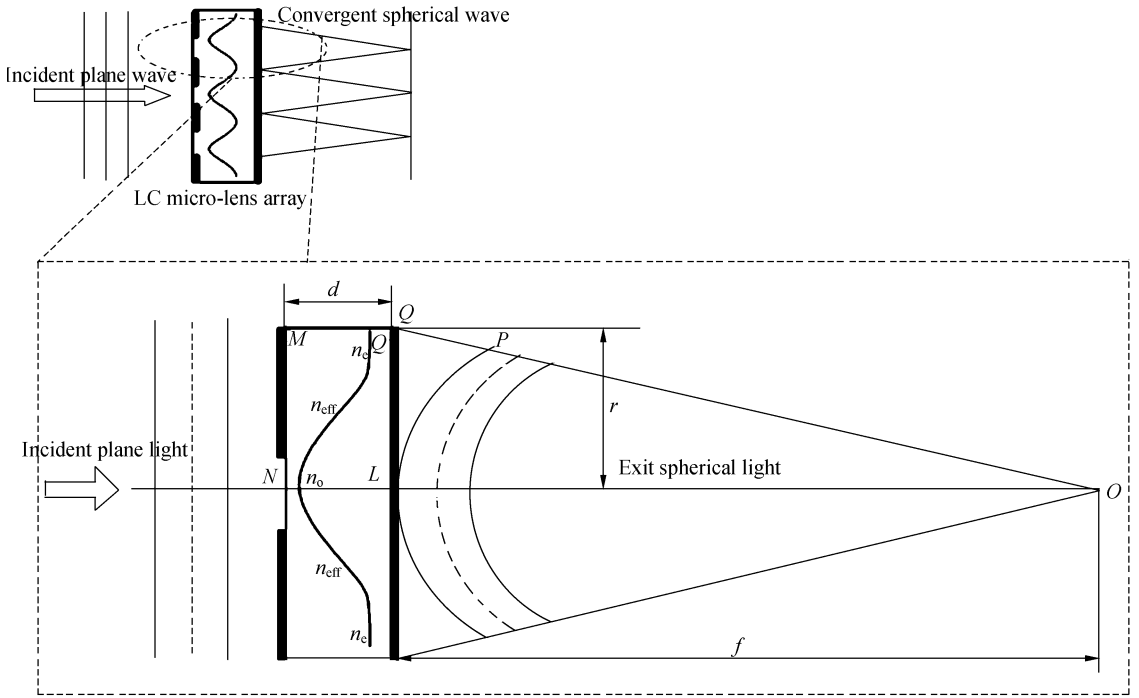


图 4 面阵液晶微透镜的 Grin Lens 原理图

Fig. 4 Grin lens principle of LC micro lens array

其中:

$$MQ' + QP = NL, \tag{9}$$

因  $NL = n_{\max} \cdot d, MQ' = d \cdot n(r)$ , 其中,  $QP = OQ - OP, OQ = \sqrt{QL^2 + LO^2} = \sqrt{r^2 + f^2}, QP = \sqrt{r^2 + f^2} - f$ 。将上述公式代入式(9)后有:

$$n(r) \cdot d + \sqrt{r^2 + f^2} - f = n_{\max} \cdot d. \tag{10}$$

因  $\sqrt{r^2 + f^2} = f \sqrt{\left[\frac{r}{f}\right]^2 + 1} \approx f \left(1 + \frac{1}{2} \frac{r^2}{f^2}\right)$ , 将其代入式(10)后有:

$$f = \frac{r^2}{2(n_{\max} - n(r)) \cdot d}. \tag{11}$$

因相位变换函数  $\phi(x, y)$  为  $\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} [MQ']$ , 而

$[MQ'] = n(r) \cdot d$ , 故  $\phi(x, y) = \left(n_{\max} - \frac{r^2}{2df}\right) d$ ,

因此:

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_{\max} - \frac{r^2}{2df}\right) d = \frac{2\pi(2d \cdot f \cdot n_{\max} - r^2)}{\lambda \cdot 2f}. \tag{12}$$

在近光轴近似下,理想光学薄透镜的相位变换函数<sup>[10]</sup>为  $\phi(x, y) = -\frac{2\pi(x^2 + y^2)}{\lambda \cdot 2f}$ , 面阵液晶微透镜单元透镜的相位变换函数结构与其一致,说明得到的是具有聚焦能力的光学透镜阵列。

## 4 实验与讨论

为了验证面阵液晶微透镜的光学特性,建立如图 5 所示的实验装置,进行如下的 3 个实验。

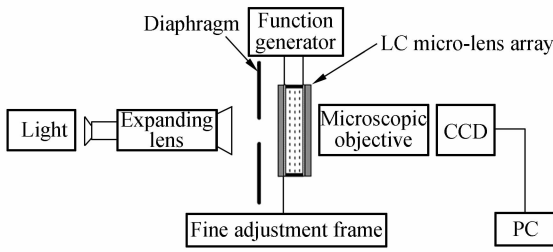
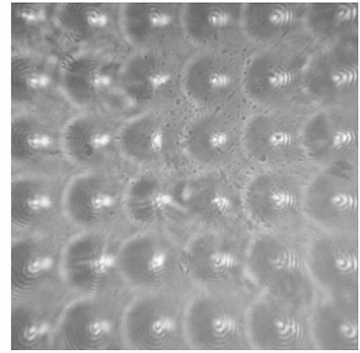
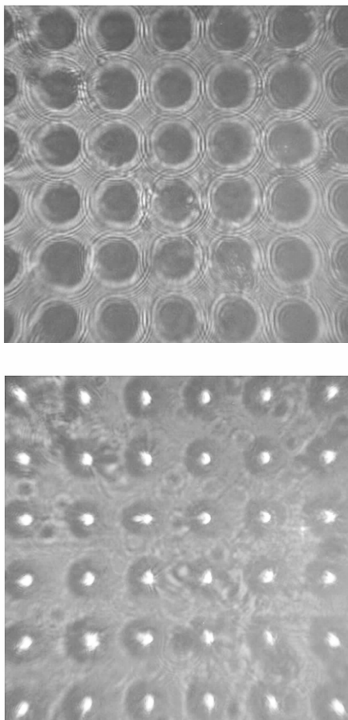


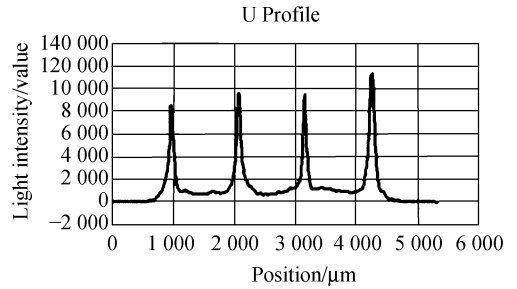
图 5 实验装置图  
Fig. 5 Setup of experiment

实验一, 将一束平行白光入射到面阵液晶微透镜表面, 记录在不同电压下, 在成像面上得到的光强分布曲线, 并分析得到液晶微透镜的点扩展函数。实验测试装置如图 5 所示, 将液晶微透镜与 CCD 之间的距离固定为  $150\ \mu\text{m}$ , 并且在测试中保持这个距离不变, 将经过准直、扩束后的一束平行白光入射到液晶微透镜, 记录下改变工作电压后在 CCD 上面得到的测试图像。图 6(a) 的上图为电压为  $0.2\ \text{V(RMS)}$ , 尚未聚焦时候的成像图, 虽然液晶微透镜阵列可以透过光, 但是在电场作用下圆孔内部与外部的折射率发生了改变, 再考虑圆孔的尺寸 ( $50\ \mu\text{m}$  直径) 此时圆孔本身就等效于一个障碍物, 当平行白光通过圆孔后便发生了衍射, 在圆孔周围形成了明暗相交的衍射条纹; 图 6(a) 的中间图为电压为  $1.8\ \text{V(RMS)}$  时测试得



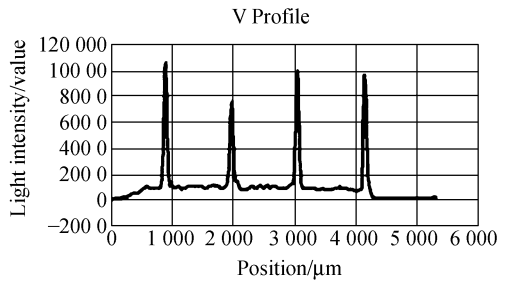
(a) 焦点聚焦过程

(a) Proceeding of focus point focusing



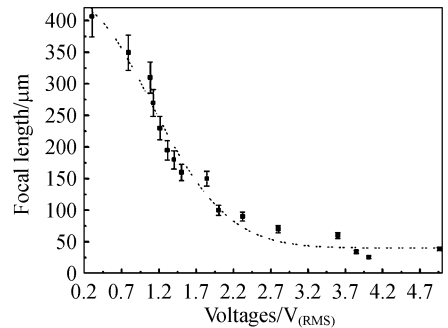
(b) U 方向的点扩展函数图

(b) U direction of PSF



(c) V 方向的点扩展函数图

(c) V direction of PSF



(d) 焦距与电压关系图

(d) Focal length vs voltage

图 6 实验测试结果

Fig. 6 Test results

到的图像,此时的图像是完全聚焦时的成像图,可以清晰看到一个个排列整齐圆形的焦点;图 6(a)的下图为继续升高电压且当电压达到 3.5 V (RMS)时得到的焦点发散的图像。对图 6(a)的中图进行软件处理,将此焦点图像进行量化,分水平(U)和垂直(V)两个方向分别得到强度分布曲线,即得到了该液晶微透镜的 U 和 V 方向的点扩展函数曲线,如图 6(b)、(c)所示。由于 CCD 前面的显微物镜所限,造成成像图四周有像差,所以在计算强度分布曲线的时候只取了图 6(a)中图中间的 4 元×4 元。图 6(b)和(c)表明,点扩展函数接近于理论值且每个单元之间的差异较小,该面阵液晶微透镜的成像能力较好,聚焦能力也较优异。

实验二,使用平行白光光源做进一步的测试,可以得到该面阵液晶微透镜在不同电压下的焦距数值。在不同电压下,通过对测量得到该液晶微透镜的焦距数值进行函数拟合得到焦距与电压的关系曲线,如图 6(d)所示。由于 0~5 V(RMS)正好是 CMOS 电路的工作电压,为了便于日后的工程应用,本测试的工作电压只取为 0~5 V (RMS),对大于 5 V(RMS)电压的焦距没有进行测试。测试结果表明:焦距与电压的关系成反比。当电压值较小时,电场场线密度较疏,圆孔内部的液晶分子受电场影响的程度较小,被电场场线拉起来的角度也较小,因此整体的折射率梯度分布较小,对应的液晶微透镜的焦距较长。当电压逐渐升高,电场场线密度变得密集,在圆孔内部的液晶分子受电场影响的程度增加,被电场场线拉起来的角度随之增大,折射率也随之变大,对应的液晶微透镜的焦距变小。该透镜的最低的工作电压可以达到 0.2 V(RMS),这与设计的液晶微透镜的结构有关,由于采用了聚酰亚胺取代玻璃作为绝缘层,则加载在 ITO 膜上的电场的损耗降低,使得更多的电场加载于液晶层,工作电压与现有外形浮雕结构的液晶微透镜相比有明显的下降。图 6(a)显示了只改变电压而液晶微透镜位置固定情况下,液晶微透镜焦点由未聚焦变为聚焦再变为散焦的过程。图 6(b)和(c)中测量得到焦点的焦斑尺寸在 10  $\mu\text{m}$  左右,这说明该液晶微透镜的聚焦效果非常好。将  $E_{14}$  的  $\Delta n = 0.255$  ( $n_e = 1.778, n_o = 1.523$ ),  $r = 25 \mu\text{m}$ ,  $d = 20 \mu\text{m}$  代入到推导出的焦距公式(11),可以得到的理论上焦距

数值为 61.3  $\mu\text{m}$ ,与实际测量得到的数值非常接近,焦距公式(11)真实反应了面阵液晶微透镜的焦距特性。

实验三,将图 5 实验装置中的光源换成带有打印字母‘A’的 A4 大小白纸,作为测试目标,为了增强成像图像的亮度,在打印纸的旁边加了一个辅助光源,调节面阵液晶微透镜与 CCD 之间的距离在 200  $\mu\text{m}$  左右,并在实验当中保持这个距离。实验开始后,调节加载在面阵液晶透镜上的控制电压,在控制电压从 0 V(RMS)慢慢增加的过程中,只有当电压达到 1.2 V(RMS)时,才可以得到清晰的面阵液晶微透镜对字母‘A’成的多重像,如图 7 所示。考虑到 CCD 前面的显微物镜的作用,图 7 中的结果也是正中间的 4 元×4 元的多重像效果最好,周围的成像效果差些,但是仍然可以清晰辨别出字母‘A’,这表明该面阵液晶微透镜可以成清晰多重像。在图 7 中实验中,面阵液晶微透镜的焦距为 200  $\mu\text{m}$ ,正好对应于控制电压为 1.2 V(RMS)时的焦距,这与实验二中得到的面阵微透镜的焦距于电压关系图 6(d)相一致。

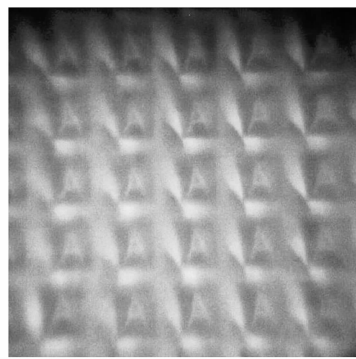


图 7 在 1.2 V(RMS)电压下的面阵液晶透镜成的多重像  
Fig. 7 Multiple image of LC micro lens array under 1.2 V(RMS)

## 5 结 论

本文利用光刻和盐酸腐蚀方法完成了 128 元×128 元面阵圆孔电极图案设计并制作了新型的面阵电极液晶微透镜。在测试中,该面阵液晶微透镜的焦距为 50~400  $\mu\text{m}$ ,其中最低工作电压达到了 0.2 V(RMS),焦点的焦斑尺寸在 10  $\mu\text{m}$  左右,得到了良好的点扩展函数,也具有良好的光学成像效果。

## 参考文献:

- [1] 刘伯晗,张健,吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. 光学精密工程, 2006,14(2): 213-217.  
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):213-217. (in Chinese)
- [2] 王梦遥,潘炜,罗斌,等. 铁电液晶基空间光调制器的灰度响应特性[J]. 光学精密工程, 2007,15(4): 460-466.  
WANG M Y, PAN W, LUO B, *et al.*. Gray-scale response of spatial light modulator incorporating ferroelectric liquid crystals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):460-466. (in Chinese)
- [3] SATO S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979,18: 1679-1684.
- [4] YE M, SATO S. Optical properties of liquid crystal lens of any size [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002,

41:L571-L573.

- [5] NAUMOV A F, LOVE G D, LOKTEV M YU, *et al.*. Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses [J]. *Opt. Express*, 1999(4):344-352.
- [6] PRESNYAKOV V V, ASATRYAN K E, GALS-TIAN T V. Polymer-stabilized liquid crystal for tunable microlens applications [J]. *Opt. Express*, 2002(10):865-870.
- [7] REN H, FAN Y H, GAUZA S, *et al.*. Tunable flat liquid crystal spherical lens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004,84:4789-4791.
- [8] YE M, WANG B, SATO S. Liquid crystal lens with a focal length that is variable in a wide range [J]. *Appl. Opt.*, 2004,43:6407-6412.
- [9] GENNES P G. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. London: Oxford University Press, 1974.
- [10] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.

## 作者简介:



李 晖(1982—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究方向为微纳光电器件制作及研究、光电图像处理等。E-mail: lihui00317@163.com

## 导师简介:



张新宇(1966—),男,陕西西安人,副教授,博士,1986年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1995年,1999年于华中理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微纳光电器件的制作及研究。E-mail: x\_yzhang@yahoo.com



张天序(1947—),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,1970年,1981年于中国科技大学分别获得学士、硕士学位,1989年于浙江大学获得博士学位,主要从事光学精密制导以及气动光学校正的研究。E-mail: txzhang@hust.edu.cn



沈绪榜(1933—),男,湖南临澧人,中国科学院院士,教授,博士生导师,1957年于北京大学获得学士学位,主要从事芯片设计以及半导体工艺制作的研究。E-mail: Shenxubang@163.net