

文章编号: 0253-2239(2010)01-0218-06

# 128 × 128 元频率驱动变焦液晶透镜阵列

李 晖<sup>1,2</sup> 刘 侃<sup>1,2</sup> 张新宇<sup>1,2,3</sup> 张天序<sup>1,2</sup> 沈绪榜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074

<sup>2</sup> 华中科技大学多谱信息技术处理国防重点实验室, 湖北 武汉 430074; <sup>3</sup> 武汉国家光电实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 理论上分析并从实验上验证了通过改变外加电场的频率来驱动的 128 × 128 元变焦液晶透镜阵列。将上电极设计为圆孔阵列, 由于圆孔电极在单元区域内形成的非均匀电场分布, 从而使液晶分子在不同位置处旋转角度不同, 在液晶层内形成了折射率梯度分布, 由此单元区域具有了光学聚焦特性。分析了由于外加电场频率改变引起液晶介电常数变化给液晶透镜阵列焦距带来的影响。实验中制作的液晶透镜阵列的焦距调节范围为 20 ~ 600 μm, 焦点尺寸为 10 μm, 响应时间为微秒量级, 可以呈清晰的多重影像。通过使用外加电场的频率可以得到变焦液晶透镜阵列, 降低了液晶透镜阵列的工作电压, 提升了液晶透镜阵列工作响应速度。

**关键词** 光学器件; 液晶透镜阵列; 自适应光学; 频率驱动; 电控变焦

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0218

## 128 × 128 Elements Frequency Driven Liquid Crystal Lens Array with Tunable Focal Length

Li Hui<sup>1,2</sup> Liu Kan<sup>1,2</sup> Zhang Xinyu<sup>1,2,3</sup> Zhang Tianxu<sup>1,2</sup> Shen Xubang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>2</sup> Multi-Spectral Information Technology Key National Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

<sup>3</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** A novel 128 × 128 elements liquid crystal lens array with tunable focal length was analyzed and fabricated by using frequency drive instead of voltage drive. The top electrode was designed as circular array electrode. As the electric field was inhomogeneous in circular unit, the rotation angle was different in liquid crystal layer. Then the gradient refractive index was formed, and the optic in the circular unit was convergent. The effect about focal length of liquid crystal lens array with different frequencies was analyzed. The focal length range of liquid crystal lens array was 20 ~ 600 μm. The focal size was 10 μm. The response time was sub-microsecond. The liquid crystal lens array driven by frequency can be got in this way. So the operating voltage of liquid crystal lens array was lower, and the response time of liquid crystal lens array was quicker.

**Key words** optical devices; liquid crystal lens array; adaptive optics; frequency drive; electric tunable focal length

### 1 引 言

利用液晶的光电各向异性特点, 可以制作出电控光学器件, 如液晶透镜、液晶空间光学调制器

(SLM)<sup>[1,2]</sup>、液晶光栅<sup>[3]</sup>等。由于液晶光电器件具有电控特性, 是自适应光学中传统自适应光学器件的潜在替代品, 并可以有效解决传统自适应光学器

收稿日期: 2009-03-17; 收到修改稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(60736010)和国家自然科学基金面上项目(60777003)资助课题。

作者简介: 李 晖(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事微纳光电器件和光电图像处理等方面的研究。

E-mail: lihui00317@163.com

导师简介: 沈绪榜(1933—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事微芯片设计及半导体工艺制作等方面的研究。E-mail: shenxubang@163.net

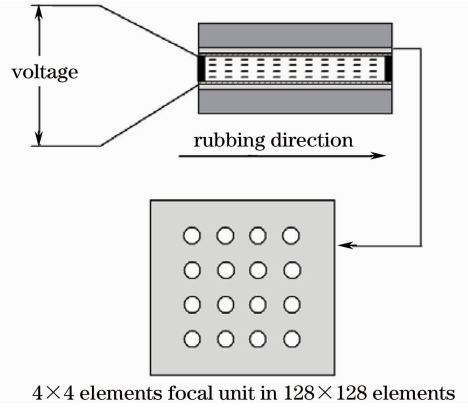
件价格昂贵、极易损耗等缺点。液晶透镜最早由 Sato 等<sup>[4]</sup>提出,他们是将凸(凹)透镜浸入液晶中制成,实现电控变焦特性。随后,液晶透镜发展总体分成两种思路:一种是对液晶透镜的结构进行改进,如圆孔电极的液晶透镜<sup>[5]</sup>、多层液晶的液晶透镜<sup>[6]</sup>、模式液晶透镜<sup>[7]</sup>、无线控制的液晶透镜<sup>[8]</sup>等;另外一种是对液晶材料进行改性,如加入不同高分子材料制作的液晶透镜<sup>[9,10]</sup>等。但是液晶透镜仍存在工作电压过高、工作响应时间过长等问题,这直接影响了液晶透镜在工业中的应用。基于此,提出了利用改变电场的频率来驱动液晶透镜阵列的全新思路,并从理论和实验上验证该液晶透镜的频率驱动特性。实验结果表明,该方法有效地降低了液晶透镜阵列的工作电压,提升了液晶透镜阵列的工作时间。

本文提出用频率来驱动液晶透镜阵列是利用了液晶的介电常数随频率改变而相应改变的特性。该特性是由 Klasen 等<sup>[11]</sup>在测试液晶分散度时得到。后来 Simonov 等<sup>[8]</sup>在液晶透镜测试当中,进行了有关频率改变液晶透镜光学特性的测试。但是只是对频率驱动特性进行了初步的测试,并没有从理论上仔细分析形成的原因,没有对频率与焦距特性进行深入的测试,也没有使用频率驱动的液晶透镜进行光学成像实验。由于频率驱动对焦距的影响从未提及,现有的研究是局部和初步的。据此进行详细的理论分析,同时在实验上也给出了更为充分的结果和测量数据。

## 2 液晶透镜阵列的结构

设计的液晶透镜阵列的结构如图 1 所示,从上到下依次为:玻璃衬底、ITO 膜、聚酰亚胺层、液晶、聚酰亚胺层、ITO 膜、玻璃衬底。上电极是在 ITO 膜上采用光刻和腐蚀方法得到 128×128 元圆孔阵列图案,中间使用的是 20μm 厚的玻璃间隔子制作

腔体并在其中灌入 Merck 的 E44 型液晶,采用 ITO 膜作为下电极,该整体组成了液晶盒。上电极图案中,圆孔直径为 50 μm,圆孔之间的间隔为 100 μm。上下电极之间加载的是频率可以改变的方波,正弦交流信号的有效电压值  $V_{RMS}$  为 2.9 V。聚酰亚胺层摩擦方向沿水平方向。



4×4 elements focal unit in 128×128 elements

图 1 128×128 元液晶透镜阵列的结构

Fig. 1 Structure of 128×128 elements liquid crystal lens array

## 3 理论分析

### 3.1 液晶透镜阵列的每个单元光学聚焦原理

建立如图 2(a)所示坐标系,图中液晶分子指向矢  $\mathbf{n}$  是液晶中大量分子指向的平均,若从统计概率上分析,朝正方向的分子与朝反方向的分子的数量是一样多,则  $\mathbf{n}$  是不分正负的。在频率驱动作用下,液晶分子出现极化现象<sup>[12]</sup>分别在液晶分子两头产生正、负电荷分布;在电场作用下,液晶分子受到电场力  $f$  作用,方向如图 2 所示。

液晶分子的双折射率特性可以用折射率椭圆球<sup>[9]</sup>来分析,如图 2(b)所示。图中  $n_x = n_y = n_o, n_z = n_e (n_e > n_o)$ ,  $z$  轴为光轴,  $\mathbf{k}$  为光前进方向,以  $\mathbf{k}$  为法线的平面通过折射率椭圆球的中心截出曲线

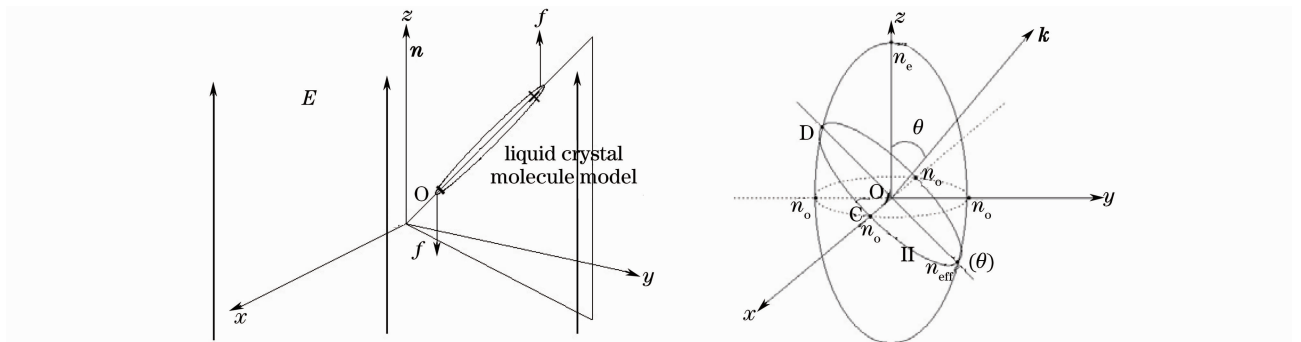


图 2 (a)液晶分子的极化现象;(b)液晶折射率椭圆球

Fig. 2 (a) Polarization phenomenon of liquid crystal molecule; (b) liquid crystal index ellipsoide

II, II 为一椭圆曲线。当入射光平行  $z$  轴, 此时 II 曲线为在  $x-y$  平面上的圆形, 半径为  $n_o$ , 通过液晶后, 偏振方向不会改变; 当入射光沿  $x$  轴方向入射, 则 II 曲线为一个位于  $y-z$  平面上的椭圆, 其短轴  $n_o$ 、长轴  $n_e$  分别是光分量在  $y, z$  方向上的折射率, 通过液晶后, 光线分量有相差  $\Delta\phi = \frac{2\pi d\Delta n}{\lambda_0}$ , 式中  $\Delta n = n_e - n_o$ ,  $d$  为液晶层的厚度,  $\lambda_0$  为真空中光的波长; 当入射光与  $z$  轴夹角为  $\theta$ ,  $\mathbf{k}$  在  $y-z$  平面上, 此时 II 曲线为一个位于倾斜面上的椭圆, 其短轴  $n_o$ 、长轴  $n_{\text{eff}}(\theta)$  分别是光分量在 OC, OD 方向上的折射率,  $n_{\text{eff}}(\theta)$  经推导为<sup>[12]</sup>

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中  $n_o \leq n_{\text{eff}}(\theta) \leq n_e$ 。在液晶层中, 当入射光束通过液晶分子时, 可依据其入射角度以及偏振方向按照上述分析求出此时的液晶等效折射率  $n_{\text{eff}}$ 。

液晶分子在外加电场作用下, 会有形变产生。由于形变的幅度远大于分子的大小, 则液晶分子可以视为连续体, 可以用连续体理论来描述。在电场力作用下, 液晶同时具有弯曲、扭曲和展曲三种形变, 单位体积内弹性势能为<sup>[12]</sup>

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

式中  $K_{11}, K_{22}$  和  $K_{33}$  分别表示展曲、扭曲和弯曲的弹性常数。

对于介电常数非均匀性的液晶而言, 沿着液晶分子指向矢平行和垂直两个方向所测量的介电常数为  $\epsilon_{\parallel}$  和  $\epsilon_{\perp}$ , 并且不相等。由于  $\epsilon_{\parallel} \neq \epsilon_{\perp}$ , 液晶在外加电场下会强迫取向。

外加电场  $E$  对于液晶分子产生的电能为<sup>[12]</sup>

$$F_e = \frac{1}{2} \epsilon_{\perp} E^2 - \frac{1}{2} \Delta \epsilon (\mathbf{n} \times E)^2, \quad (3)$$

式中第一部分与液晶指向矢方向无关, 但是第二部分与液晶分子的取向有关。在外加电场作用下, 液晶总自由能  $F$  为弹性能  $F_d$  [(2) 式] 和电能  $F_e$  [(3) 式] 的积分

$$F = \int (F_e + F_d) d\tau. \quad (4)$$

外加电场会强烈影响液晶分子排列, 进而改变液晶的光学特性。制作的液晶盒的上电极为圆孔阵列电极, 在每个单位内均形成了非均匀的电场分布, 如图 3 所示。在液晶层中, 不同位置的液晶分子受到的电场作用不同, 液晶分子旋转的角度也不同, 相应的液晶分子与入射光的角度也不同。在圆孔中心

处, 由于该处的电场较弱, 液晶分子没有受到电场太多的影响, 液晶分子仍然保持原本的状态, 按照上文的分析此处折射率为  $n_e$  (由于对聚酰亚胺层进行过水平方向的摩擦, 该层起到了对液晶分子定向的作用, 液晶分子会以  $2.3^\circ$  倾角排列而非完全的水平排列); 在圆孔边缘到圆孔中心区域, 此处的电场是非均匀的, 使得液晶分子与入射光之间存在夹角  $\theta$ , 按照上文的分析此处折射率为  $n_{\text{eff}}(\theta)$ ; 在圆孔边缘处, 电场作用最为强烈, 液晶分子受到作用最大, 旋转角度也最大, 在最边缘处液晶分子基本被电场完全拉起, 按照上文的分析此处的折射率约为  $n_o$ 。在每个单位圆孔区域内, 折射率的分布为一个梯度折射率分布, 也就是具有光学聚焦的特性。

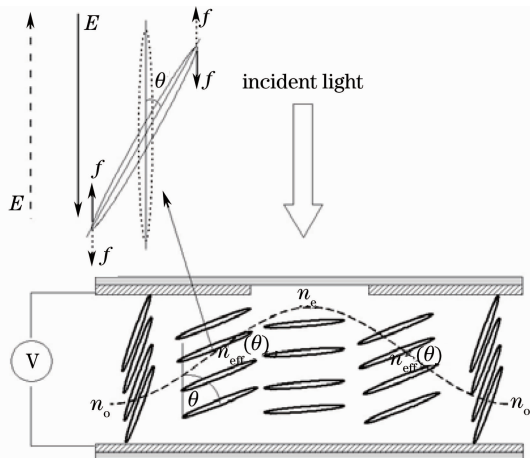


图 3 频率作用下在单位圆孔区域内液晶分子的排列  
Fig. 3 Arrangement liquid crystal molecules hole under frequency driven in unit circular

在图 3 中, 还可以看出当频率改变的时候, 液晶的折射率没有正负极性, 液晶指向矢也不分正负方向。当电场反向的时候 (由实线变为虚线的情况), 液晶层内对应不同位置的液晶分子的折射率相对于频率改变前的电场情况是不会发生改变的。在反向电场作用下, 液晶分子保持位置不变只是会向与前面相反方向进行旋转 (从实线的位置旋转到虚线位置)。等到下个频率改变到来的时候 (电场方向反向), 液晶分子将继续在这个位置上向与前面再次相反的方向旋转 (由虚线位置旋转到实线位置), 即是液晶分子稳定在一个位置上, 做谐振运动。这表明利用频率是可以驱动液晶盒, 并可以在每个圆孔区域内都形成具有光学聚焦特性的液晶透镜阵列。进一步还可以得到该液晶透镜阵列的焦距公式为<sup>[9, 14]</sup>

$$f = \frac{r^2}{2d\Delta n}, \quad (5)$$

式中  $r$  为圆孔电极的半径。

### 3.2 液晶透镜阵列的频率驱动变焦原理

液晶分子在外加电场作用下,有<sup>[12]</sup>

$$D_i = \sum_j \epsilon_0 \epsilon_{ij} E_j, \quad (6)$$

式中  $D_i$  为介电常数  $\epsilon_{ij}$  的电介质中电通量密度(电位移),  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $E$  为电场强度。

而液晶分子的静介电常数是用二阶对称张量来表示<sup>[12]</sup>:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{\perp} \delta_{ij} + \Delta\epsilon n_i n_j, \quad (7)$$

式中  $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ ,  $\epsilon_{//}$ ,  $\epsilon_{\perp}$  分别表示与指向矢平行方向和垂直方向的介电常数。

典型液晶分子结构是由  $\pi$  电子和  $\sigma$  电子组成的电子结构,而电子偏转引起的永久偶极子或外界电场引起的电子极化决定介电常数和折射率。对于向列相液晶,除了考虑电子极化外,还需要考虑到液晶分子具有围绕长轴旋转对称性。旋转对称分子的电子极化率张量是由平行和垂直分子长轴的两个分量表示。极化率张量影响分子排列,则指向矢和垂直于其极化率张量两个分量可以用有序参数来表示。当分子具有永久偶极矩时,因旋转布朗运动而平均消失的永久偶极子在电场的作用下容易统一为特定方向而产生取向极化。垂直于长轴分子的永久偶极子分量的响应主要是围绕分子长轴的旋转而进行,由于不受向列位的影响,弛豫时间与有序参数无关。分子长轴的平行分量的响应对平行于指向矢的交流电场来说,因分子长轴必须克服向列位而旋转,所以此过程的弛豫时间随有序参数的增加而明显变长。但是,对于垂直于指向矢的电场来说无此必要。正常液晶分子长轴与指向矢形成小角度  $\theta$  的概率增大,从而使弛豫时间随着有序参数增加而变短。Sawada 等<sup>[13]</sup>研究了在不同频率下向列液晶的介电常数,并进行了测试得到实例,如图 4 所示。

图 4 清晰地表明典型的液晶物质在频率改变的

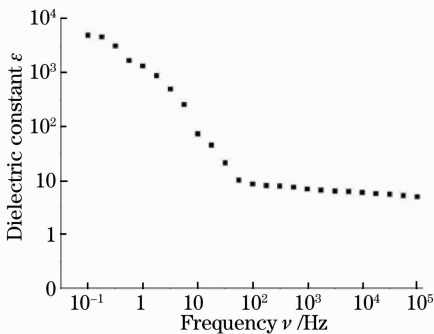


图 4 典型液晶物质的介电常数对频率测试实例  
Fig. 4 Experimental results of typical liquid crystal dielectric constant vs frequency

情况下,其介电常数发生的改变<sup>[13]</sup>,介电常数随着频率的增加而明显的减少,这将导致液晶层的折射率发生改变。由(7)式得知,液晶的折射率与介电常数有关系,即液晶折射率会随着介电常数减少相应的减少。考虑到制作的液晶透镜阵列外加的电场的频率发生改变,在不同频率下液晶透镜阵列对应的折射率发生了改变,相应的焦距也发生了改变,这说明制作出来的液晶透镜阵列是可以作为频率驱动变焦的光学透镜。

### 4 实验结果与讨论

为了验证上述理论以及测试制作的 128×128 元液晶透镜阵列的光学特性,建立如图 5 所示的实验装置,其中测试光源采用的是平行白光光源(Newport 66485 Xe Arc Source),信号源(Tektronix AFG 3252 function generator)采用的是频率可以调谐的方波。

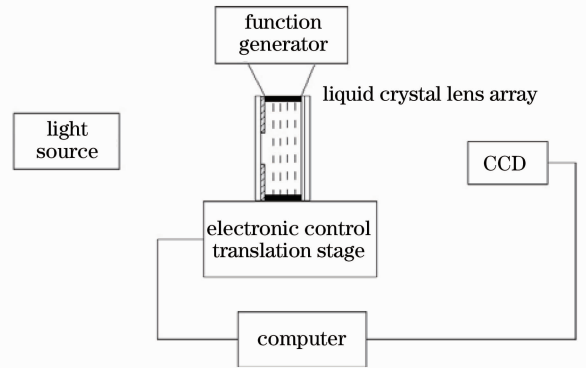


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

利用图 5 的实验装置,在改变电场频率后测得如图 6 所示的不同频率下焦距与电压关系。图中结果表明,当频率不改变,只改变电压时,液晶透镜阵列的焦距与电压成反比例关系,焦距随着电压增加而减

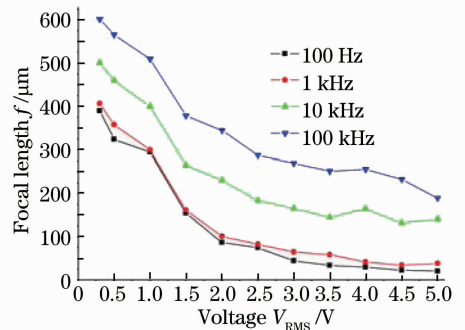


图 6 液晶透镜阵列在不同频率下焦距与电压关系  
Fig. 6 Focal length versus voltage at different driven frequency of liquid crystal lens array



少;当电压保持不变,只改变频率时,液晶透镜阵列的焦距与频率成正比例关系,焦距随频率的增加而增加。这与上文理论分析完全吻合。焦距与电压成反比例关系是由于电压增加使得液晶分子旋转角度增加,对应折射率变大相应焦距减少;而焦距与频率成正比例关系是由于频率增加相应液晶的介电常数减小,对应折射率变小则焦距增加。通常液晶透镜阵列的测试都是稳定在 1 kHz 频率下进行,采用了频率驱动后,液晶透镜阵列的焦距调节范围由 50~400  $\mu\text{m}$  (1 kHz 情况下)变为 20~600  $\mu\text{m}$  (100 Hz~100 kHz 范围内调节),焦距调节范围明显增大。

图 7~图 9 是使用 CCD 测试液晶透镜阵列的焦

点变化。图 7 是在保持频率为 1 kHz 频率和正弦交流信号电压值  $V_{\text{RMS}}$  为 2.9 V 不改变,在不同位置测得的图片。平面 1 是靠近液晶透镜阵列处,从图中可以看出,此处是光线未聚焦处,测试得到的图片上可以看出一个个圆环以及圆环旁边的衍射环。产生衍射环的原因是由于圆孔直径为 50  $\mu\text{m}$ ,圆孔外的折射率与圆孔内折射率不同,则产生了衍射现象。焦平面是处于焦点处的平面,从图中可以看出,此处光线正好聚焦,测试得到的图片与推理一致,是清晰的一个个圆形焦点,焦点尺寸为 10  $\mu\text{m}$  左右。在平面 2 处,从图中可以看出,此处光束已经发散,测试图片是发散光斑的图片。

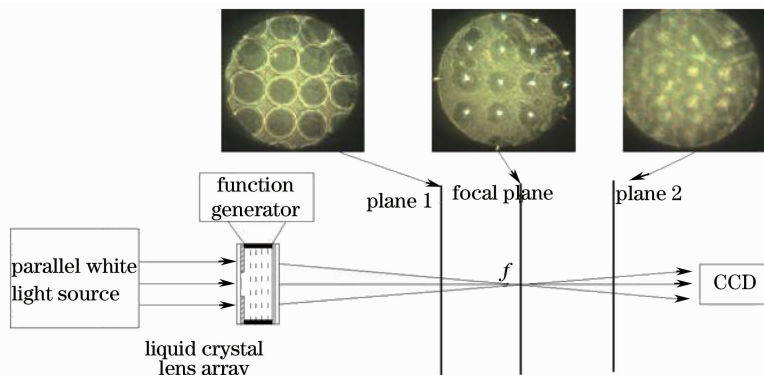


图 7 CCD 处于不同位置得到的液晶透镜阵列图像

Fig. 7 Images of liquid crystal lens array in the different locations of CCD

图 8 是保持 1 kHz 频率不变,并保持 CCD 与液晶透镜阵列位置不改变,分别在正弦交流信号电压值  $V_{\text{RMS}}$  为 2.9 V 和 1.0 V 下测试得到的图片。图中实线对应的是  $V_{\text{RMS}}$  为 2.9 V 的情况,此处光线正好在焦平面,测试图片是一个个圆形的焦点;但在  $V_{\text{RMS}}$  改变后,光线发生了改变,焦平面的位置向 CCD 位置移动,测试图片则是没有完全聚焦的一个个接近圆形的

点。图 8 中结果是常规电压驱动液晶透镜阵列<sup>[14,15]</sup>测试得到的效果。

图 9 是保持  $V_{\text{RMS}}$  为 2.9 V 不改变,也保持液晶透镜阵列与 CCD 位置不改变,测试由 1 kHz 频率改变为 10 kHz 频率的图片。实线是 1 kHz 测得的图片,此时的光线正好聚焦在焦平面上面,图片是一个个圆

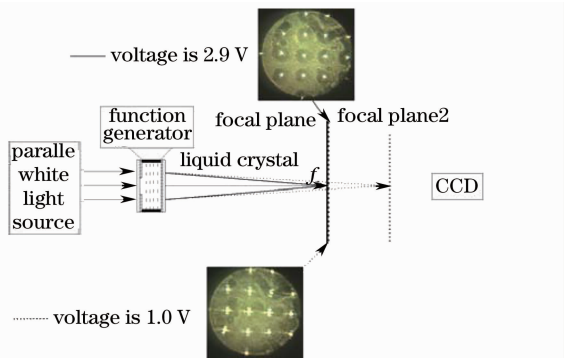


图 8 保持 CCD 位置不变,将  $V_{\text{RMS}}$  由 2.9 V 改变为 1.0 V 时,得到的液晶透镜阵列图像

Fig. 8 Images of liquid crystal lens array as voltage changes from 2.9 V to 1.0 V with the same location of CCD

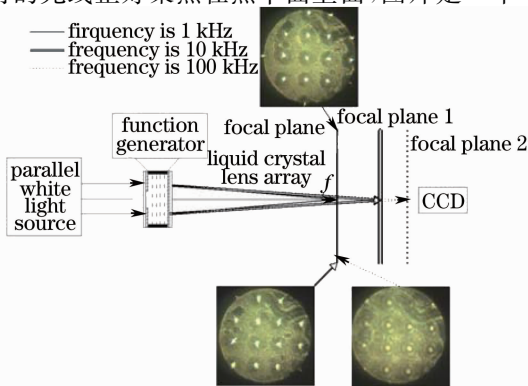


图 9 保持 CCD 位置不变,将电场频率由 1 kHz 改变为 10 kHz 再改变为 100 kHz 时,得到的测试图像

Fig. 9 Images of liquid crystal lens array as the frequency changes from 1 kHz to 10 kHz then to 100 kHz with the same location of CCD

形焦点; 双线为 10 kHz 的情况, 随着频率的增加相应液晶透镜阵列的焦距也增加, 此时在焦平面上的图片显示焦点开始散焦; 虚线为 100 kHz 的情况, 随着频率的增加液晶透镜阵列的焦距继续增加, 而测试得到的图片明显焦点已经开始发散, 形成了一个模糊的圆点。从 1 kHz 改变为 10 kHz 以及从 10 kHz 改变为 100 kHz 的时间均为微秒量级, 相对  $V_{\text{RMS}}$  由 2.9 V 改变为 1.0 V 的亚毫秒量级, 明显有所提升。

随后将实验装置中的平行白光光源换成测试用的图片后, 并在旁边加了一个辅助光源, 便可以使用 10 kHz 频率驱动的液晶透镜阵列进行成像, 从成像的图片中, 可以清晰看出成像图像字母 ‘S’, 具有良好的成像效果, 如图 10 所示。

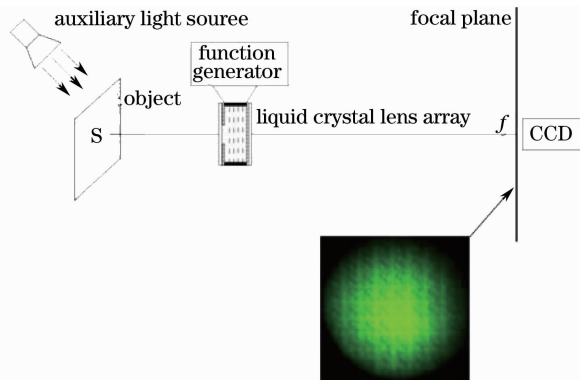


图 10  $V_{\text{RMS}}$  为 2.9 V, 频率为 10 kHz 时, 得到的液晶透镜阵列多重像图

Fig. 10 Multiple images of liquid crystal lens array under voltage 2.9 V and frequency 10 kHz

## 5 结 论

提出了一种利用改变外加电场的频率来驱动 128×128 元液晶透镜阵列的方法。将上电极设计为 128×128 元圆孔阵列, 由于电场作用, 在每个圆孔区域内形成了具有光学聚焦特性的梯度折射率分布。通过改变外加电场的频率, 引起液晶的介电常数的改变, 达到电控变焦的目的。利用频率驱动液晶透镜阵列, 可以有效降低液晶透镜阵列的工作电压和工作响应时间。这种方法不仅在理论上是可行的, 同时在实验上也得到了很好的印证。

## 参 考 文 献

- 1 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 491~495
- 2 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying *et al.*. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a twyman-green interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1360~1364
- 3 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 4 S. Sato. Liquid crystal lens-cell with variable focal length [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**(9): 1679~1684
- 5 M. Ye, B. Wang, S. Sato. Liquid crystal lens with a focal length that is variable in a wide range [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(35): 6407~6412
- 6 M. Ye, B. Wang, S. Sato. Double-layer liquid crystal lens [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3): L352~L354
- 7 A. F. Naumov, M. Y. Loktev, I. R. Guralnik *et al.*. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 992~994
- 8 A. N. Simonov, G. Vdovin, M. Loktev. Liquid-crystal intraocular adaptive lens with wireless control [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7468~7478
- 9 H. Ren, Y. H. Lin, S. T. Wu. Flat polymeric microlens array [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **261**(2): 296~299
- 10 Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Cai Mingrong *et al.*. Fabrication of electrical-controlled polymer dispersed liquid crystal switchable-focus holographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1107~1110
- 11 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
- 12 M. Klasen, M. Bremer, A. Götz *et al.*. Calculation of optical and dielectric anisotropy of nematic liquid crystals [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(8A): L945~L948
- 13 P. G. de Gennes. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. London: Oxford University Press, 1974
- 14 A. Sawada, K. Taruni, S. Naemura. Novel characterization method of ions in liquid crystal materials by complex dielectric constant measurements [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(3A): 1423~1427
- 15 Li Hui, Zhang Xinyu, Zhang Tianxu *et al.*. Electrically driving and controlling adaptive 128×128 elements liquid crystal microlens array with tunable focal length [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10): 2351~2358
- 16 李 晖, 张新宇, 张天序等. 电控可变焦 128×128 元自适应液晶微透镜阵列 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2351~2358
- 17 J. H. Kim, S. Kumar. Fabrication of electrically controllable microlens array using liquid crystals [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 628~632