

文章编号: 0253-2239(2005)07-959-6

# 控制液晶器件产生的程控透镜和微透镜阵列\*

窦任生<sup>1,3</sup> 林 海<sup>1</sup> 胡继承<sup>1,2</sup>

{ 1 武汉大学微电子与信息技术研究院, 武汉 430072 }  
{ 2 武汉大学软件工程国家重点实验室, 武汉 430072 }  
{ 3 安徽大学物理与材料科学学院, 合肥 230031 }

**摘要:** 研究了计算机程控光学器件的性能。通过对液晶空间光调制器进行电寻址控制,得到了振幅模式、二进制相位模式和连续相位模式的计算机程控透镜和程控微透镜阵列。实验结果和计算分析都表明,连续相位模式的程控透镜具有较好的聚焦性能和光效率。程控微透镜阵列的优点是阵列中的每一个微透镜都可以单独控制,可以得到所需要的阵列形式。实验给出了一个由这样的微透镜阵列产生的去掉了中心  $4 \times 4$  阵列的  $8 \times 8$  光斑阵列样式。还给出了利用程控透镜来方便有效地演示和研究透镜的像差方法。由计算机控制空间光调制器得到的光学器件虽然具有极大的灵活性,但是由于空间光调制器的像素的尺寸影响了它的精细程度,限制了它的应用。

**关键词:** 应用光学; 程控透镜; 微透镜阵列; 液晶空间光调制器

中图分类号: TN201 文献标识码: A

## Programmable Lens and Lenslet Array by Operating a Liquid Crystal Device

Dou Rensheng<sup>1,3</sup> Lin Hai<sup>1</sup> Hu Jicheng<sup>1,2</sup>

{ 1 Institute of Microelectronics and Information Technology, Wuhan University, Wuhan 430072 }  
{ 2 The State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072 }  
{ 3 School of Physics and Material Science, Anhui University, Hefei 230031 }

**Abstract:** The property of the computer programmable optical devices is investigated. The programmable lenses have been performed by operating an electrically addressable liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) in amplitude mode, binary phase mode, and continuous phase mode. The programmable lenslet arrays have also been carried out experimentally. Both the experimental and calculating results show that the continuous phase mode provides the best results in terms of both light efficiency and focus quality. The advantage of the programmable lenslet array over the conventional one is that each lenslet in the array can be controlled individually. An  $8 \times 8$  array mode without the central  $4 \times 4$  light spot array generator has been demonstrated experimentally. The programmable lens was also implemented as a convenient way of investigating the aberration of the lenses experimentally. Although the computer programmable LC-SLM device has its great flexibility, its finite pixel size limits its fineness and, therefore, limits its applications.

**Key words:** applied optics; programmable lens; lenslet array; liquid crystal spatial light modulator

### 1 引 言

光斑阵列在图像处理、相干光通信、光学计算、光互连等方面有很多重要的应用<sup>[1~6]</sup>。产生光斑阵列的技术也很多,例如二进制相位光栅方法<sup>[7]</sup>和塔尔博特(Talbot)效应方法<sup>[8]</sup>等等。微透镜阵列技术

也是产生光斑阵列的好方法。Marrakchi 等<sup>[9]</sup>给出了用空间光调制器制成的微透镜产生的相干光斑阵列的方法。他们在实验中采用了三种液晶器件:液晶电视(LCTV);以及液晶光阀器件在振幅模式下被驱动成菲涅耳波带片,另一种特殊的液晶器件,其

\* 国家自然科学基金(60474102)和国家十五攻关项目(2001BQ210A02)资助课题

作者简介: 窦任生(1952~),男,武汉大学教授,主要从事光学工程、自适应光学和光通讯器件方面的研究工作。

E-mail: rensheg\_dou@yahoo.com

收稿日期: 2004-05-31;收到修改稿日期: 2004-12-27

电极形状被设计成菲涅耳波带片的形状运行在二进制相位模式。国内也有利用液晶材料双折射的特点制作菲涅耳相位波带片的报道<sup>[1]</sup>。本文给出了用普通的液晶电视器件作为空间光调制器,对其中的每一像素进行相位控制,由此得到连续相位分布(或者是多级相位分布)的计算机程控透镜和微透镜阵列。实验结果和计算分析都表明,连续相位模式的透镜比菲涅耳波带片和二进制相位模式透镜具有更好的聚焦性能和光效率。并且程控微透镜阵列能够根据需要产生各种光斑阵列样式和所需的焦距,具有极大的灵活性。作为例子,从实验上给出了一个由这样的微透镜阵列产生的去掉了中心  $4 \times 4$  阵列的  $8 \times 8$  光斑阵列样式。实验上显示程控透镜还可以作为简单方便的工具来演示和研究透镜的像差。

## 2 计算机程控相位透镜

### 2.1 驱动液晶电视形成连续相位透镜的原理

液晶电视是在两块平行平板玻璃基质中充以向列相液晶材料构成。两块平行平板玻璃基质的表面镀有矩形的,分布成阵列形式的透明电极。每一矩形电极元素形成一个像素,并且可以单独控制。对像素施加不同的电压即可改变液晶材料的折射率,达到改变光波相位的目的。因此,当平面光波通过液晶电视时,通过对液晶电视上每一像素进行适当的电控制,就可以将平面波转换为球面波,即把液晶电视驱动成一个等效的透镜。一个平面波入射到液晶电视上,要得到焦距为  $f$  的透镜,可以设平面上任意给定点到透镜焦点的距离为  $l$ ,从透镜中心点到透镜焦点的距离  $f$  之间产生的相位差可以用下式表示:

$$\phi = \frac{l-f}{\lambda} 2\pi, \quad (1)$$

其中  $l = \sqrt{f^2 + r^2}$ ,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  是液晶电视平面上给定点到透镜中心的径向距离。光程差为:  $l - f = m\lambda$

+  $\delta$ . 其中  $m$  为正整数,  $\lambda$  为光波长,并且  $0 \leq \delta \leq \lambda$ . 得到相位差为

$$\phi(x, y) = 2m\pi + \frac{\delta(x, y)}{\lambda} 2\pi. \quad (2)$$

由于相位函数是周期函数,忽略上式右边的第一项,得到

$$\phi(x, y) = \left[ \frac{\sqrt{f^2 + r^2(x, y)} - f}{\lambda} - m \right] 2\pi. \quad (3)$$

在液晶电视上的每个像素  $(x, y)$  加上与上式共轭的相位,则光从液晶电视上所有的点到达透镜焦点时同相位,即得到了由驱动液晶电视而形成的程控透镜。

### 2.2 驱动液晶电视成为相位透镜的实验

实验所用的液晶器件是 Epson 公司的产品,其像素的尺寸为  $90 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ , 共有  $320 \times 220$  个像素。在电寻址驱动下,器件具有很好的相位性质<sup>[11]</sup>。由氦氖激光器产生的准直平面波垂直入射到液晶电视上,激光的偏振面平行于入射面的光轴,形成的聚焦光点或光斑阵列由 CCD 相机检测。

通过对上述的液晶电视使用(3)式进行电寻址控制,实验上得到了具有不同焦距的计算机程控透镜。图 1 给出了驱动液晶电视得到焦距为 100 cm 的相位透镜的实验结果,其中图 1(a)是施加在液晶电视上的电压分布,用不同的灰度表示;图 1(b)是对应的焦点。由于所用的液晶器件的像素较大,电压分布在液晶电视上的图形不是所期望的同心圆,影响了聚焦的质量。焦点旁边的对称亮点可能是由于像素在  $x$  和  $y$  方向上的不对称引起的。因为液晶电视的像素是矩形,  $x$  方向是  $60 \mu\text{m}$ ,  $y$  方向  $90 \mu\text{m}$ 。在液晶电视的电压分布上加一圆形光阑,如图 1(c)所示,则得到如图 1(d)所示的焦点,消除了焦点旁边的亮点。光阑大小的选取准则是只保留同心圆。对于小焦距的透镜,光阑小,所以通光量也小。光阑的大小和透镜的焦距都受所用液晶器件的像素的大小限制。

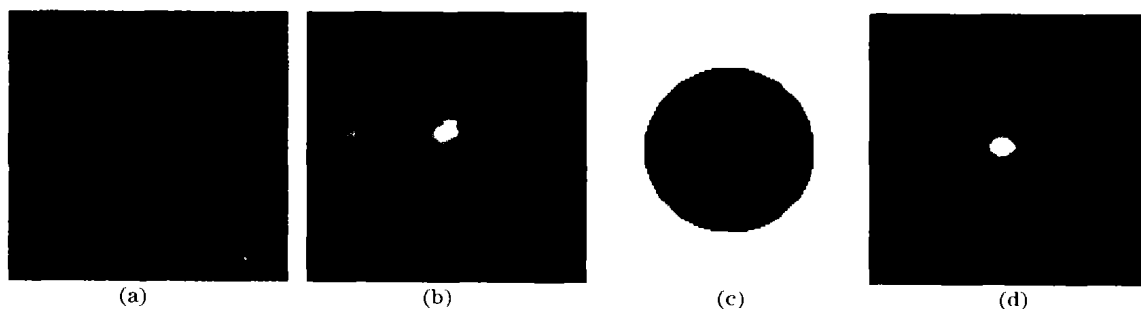


图 1 驱动液晶电视成为相位透镜。(a)和(c)为驱动函数,(b)和(d)为各自相应的点扩展函数

Fig. 1 Driven LCTV as the phase lenses; (a) and (c) are the driven functions, and (b) and (d) the corresponding point spread functions, respectively

光阑的大小,透镜的焦距,液晶器件的像素的大小,以及空间带宽积之间的关系可由光波的非涅耳波带理论分析。在液晶器件平面的波面可分成同心的环形非涅耳半周期带。非涅耳带的宽度随非涅耳带数的增加而变窄,因此最窄的非涅耳带的宽度应当大于液晶器件的像素的尺寸。光阑的大小是由形成透镜的非涅耳带数确定的。根据定义,从第  $n$  个非涅耳带的沿半径的内外两点  $r_{n-1}$  和  $r_n$  到焦点的距离分别为  $l_{n-1}$  和  $l_n$  (见图 2), 并且有

$$l_{n-1} = f + \frac{(n-1)\lambda}{2}, \quad l_n = f + \frac{n\lambda}{2}, \quad (4)$$

$$\text{和} \quad r_{n-1} = \sqrt{l_{n-1}^2 - f^2}, \quad r_n = \sqrt{l_n^2 - f^2}. \quad (5)$$

非涅耳带的宽度  $dr = r_n - r_{n-1}$ 。因为最窄的非涅耳带的宽度应当大于或等于像素的尺寸,所以  $dr = S_y$ 。其中  $S_y$  是液晶器件像素的  $y$  轴向尺寸。由以上关系

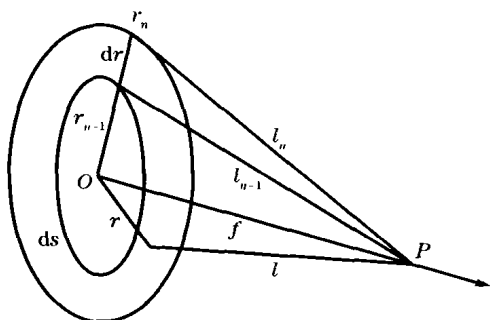


图 2 波前非涅耳带的焦点

Fig. 2 Schematic drawing to show a focal point by a Fresnel zone in a wavefront

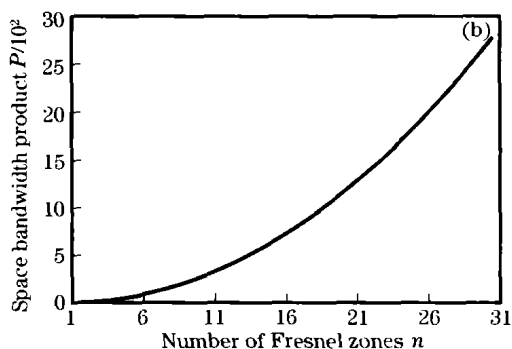
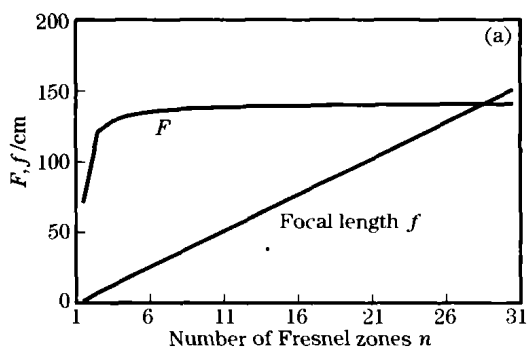


图 3 非涅耳带数与(a)焦距  $f$  和  $F$  数(b)空间带宽积的关系

Fig. 3 Plots of the number of Fresnel zones vs., (a) Focal length and  $F$ , and (b) space bandwidth product

由于实验中使用的液晶器件的像素尺寸较大,  $S_x = 60 \mu\text{m}$ ,  $S_y = 90 \mu\text{m}$  产生的透镜的质量不高。随着液晶器件的制造技术的提高,像素的尺寸也越来越小。HoloEye Photonics 公司的 LC-R 3000 型液晶器件的像素尺寸为  $9.5 \mu\text{m}$ , 而 Boulder Nonlinear 公司的液晶器件的像素则达到  $7 \mu\text{m}$ 。如果使用这些器件则可以大大提高程控透镜的质量。

式得到光阑的大小(由非涅耳带数  $n$  和像素的尺寸  $S$  确定)、透镜的焦距  $f$ 、和像素的大小  $S_y$  的关系为

$$f^2 \lambda^2 + f \left[ \lambda^3 \left( n - \frac{1}{2} \right) - 2\lambda(2n-1)S_y^2 \right] + \left[ \frac{(2n^2 - 2n + 1)\lambda^2 - S_y^2}{4} \right]^2 - \frac{\lambda^4}{4} n^2 (n-1)^2 = 0. \quad (6)$$

透镜的  $F$  数由非涅耳带数  $n$  确定:

$$F_n = \frac{f_n}{2r_n} = \frac{f_n}{2 \sqrt{f_n n \lambda + n^2 \lambda^2 / 4}}. \quad (7)$$

空间带宽积为

$$P = r_n^2 \pi / (4S_x S_y) = N/4, \quad (8)$$

其中  $N$  是透镜光阑内的像素总数。实验中,氦氖激光的波长为  $633 \text{ nm}$ , 像素的尺寸  $S_y$  为  $90 \mu\text{m}$ 。把这些参量代入以上三个方程即可得到焦距  $f$ , 透镜的  $F$  数, 以及空间带宽积与非涅耳带数  $n$  之间的数值关系。图 3(a) 的  $y$  轴表示透镜的焦距和  $F$  数。表明对于给定的焦距, 构成透镜所能包含的最多的非涅耳带数。例如, 焦距为  $100 \text{ cm}$  的透镜包含 20 个非涅耳带, 而焦距为  $50 \text{ cm}$  的透镜包含 10 个非涅耳带。这个非涅耳带数也限定了透镜的光阑。实验中的光阑即是由此选取。在图 3 中, 由于大的焦距对应大的光阑, 所以  $F$  数基本是个常数。图 3(b) 给出了空间带宽积与非涅耳带数之间关系。非涅耳带数越大则透镜包含的像素越多, 因此空间带宽积也越大。

例如, 用像素为  $10 \mu\text{m}$  的液晶器件, 如果透镜含有 30 个非涅耳带, 则可以做到焦距为  $2 \text{ cm}$  和  $F$  数为 16。而用像素为  $90 \mu\text{m}$  的液晶器件, 对于含有 30 个非涅耳带的透镜, 只可以做到焦距为  $150 \text{ cm}$ 、 $F$  数为 140 [见图 3(a)]。可见, 液晶器件的像素做的越精细  $S_x, S_y$  越小, 所产生的程控透镜的质量越好。

### 3 程控微透镜阵列

由上节的程控透镜实验得知,如果在液晶器件上同时驱动多个透镜则可形成透镜阵列,从而得到光斑阵列。图 4 给出了驱动液晶电视形成  $8 \times 8$  透镜阵列的实验结果。图 4(a) 是透镜阵列,焦距为 50 cm,图 4(b) 是检测到的光斑阵列。由程控产生透镜阵列的优点在于阵列中的每一透镜可以单独控制,因此可以根据需要得到各种不同的阵列形式。例如,图 5 的实验显示了一个去掉中心  $4 \times 4$  阵列的  $8 \times 8$  光斑阵列,这种灵活性是常规的光学器件无法做到的。

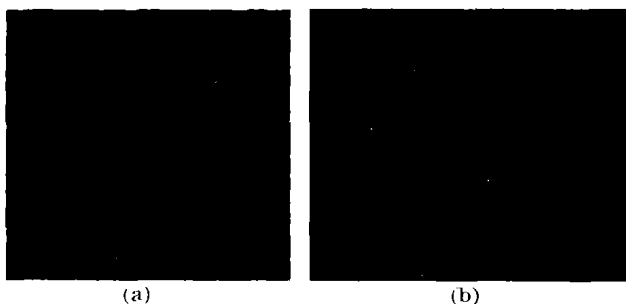


图 4 (a)  $8 \times 8$  透镜阵列 (b) 光斑阵列  
Fig. 4 (a) Driving pattern of the  $8 \times 8$  lenslet array on the LCTV, (b) detected  $8 \times 8$  spot array

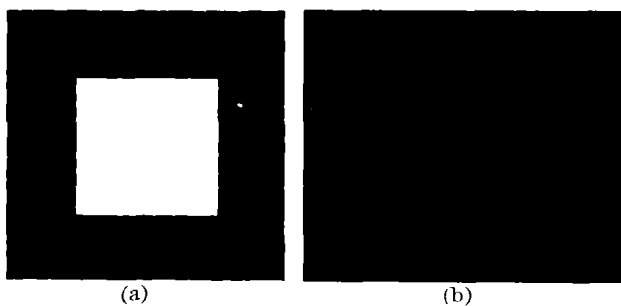


图 5 (a) 去掉中心  $4 \times 4$  阵列的  $8 \times 8$  阵列透镜和 (b) 光斑阵列

Fig. 5 (a) Selected pattern of the  $8 \times 8$  lenslet array without the center  $4 \times 4$  array on the LCTV, (b) detected spot array

图 6 是实验示意图,由氦氖激光器产生的准直平面波通过一个偏振片垂直入射到液晶电视上,激

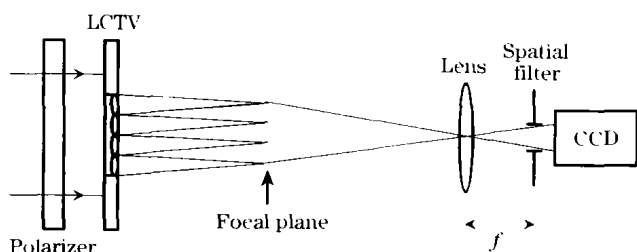


图 6 透镜阵列实验示意图  
Fig. 6 The experimental setup for the lenslet array

光的偏振面平行于液晶电视的入射面的光轴。生成的光斑阵列再通过一个常规透镜成像在 CCD 相机上。空间滤波器 (Spatial filter) 滤掉由像素阵列产生的高阶衍射波。

### 4 讨 论

上面的实验中,程控透镜是通过驱动液晶电视在连续相位模式得到的。程控透镜也可以通过驱动液晶电视在振幅模式和二进制相位模式得到。本节给出这方面的实验结果并和连续相位模式的结果进行比较。最后还从实验说明程控透镜可以很方便的用来研究像差。

#### 4.1 驱动液晶电视成为菲涅耳波带片

菲涅耳波带片由一系列的同心圆环组成并且有多重聚焦面,主焦距由下式确定:

$$f = r_n^2 / (n\lambda), \quad (9)$$

其中  $n$  是一整数,  $r_n$  是第  $n$  个菲涅耳带的半径,  $\lambda$  为波长。

驱动液晶电视成为菲涅耳波带片的实验在振幅模式下完成。液晶电视被安放在两块偏振片之间,调节输出端的偏振片使得输出的黑白对比度最大。图 7 是焦距为 100 cm 的菲涅耳透镜的实验结果。图 7(a) 是在液晶电视上的驱动函数,图 7(b) 的右边是由 CCD 相机测得的焦点,左边是焦点的光强分布。

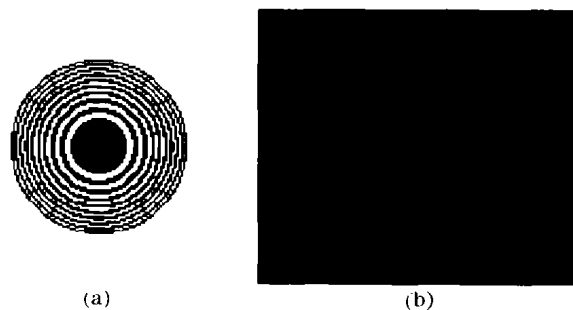


图 7 菲涅耳波带:(a) 驱动函数,(b) 测得的点扩展函数

Fig. 7 Fresnel zone plate: (a) driving function, (b) detected point spread function

#### 4.2 驱动液晶电视成为二进制相位透镜

菲涅耳波带片的光学原理是两个相邻的波带相位相差  $\pi$ 。当在波带片中挡住每相邻两个波带中的一个波带,则剩下的波带之间的相位都是  $2\pi$  的整数倍,构成相加波。由于在菲涅耳波带片中,有一半的面积被遮挡,通光量则减少了一半。为了提高光效率,可以把在菲涅耳波带片中被遮挡的部分改成和其他区域相位差为  $\pi$  的透明区域。这样就得到了通

光量为 100% 的二进制相位透镜。图 8 给出了焦距为 100 cm 的二进制相位透镜的实验结果。和图 7 一样,图 8(a)是在液晶电视上的驱动函数,图 8(b)的右边是由 CCD 相机测得的焦点,左边是焦点的光强分布。在图 7 和图 8 的实验中,二者的入射光强相等,相比图 7(b)和图 8(b),可见二进制相位菲涅耳透镜的焦点的光强比振幅模式得到明显的增加。

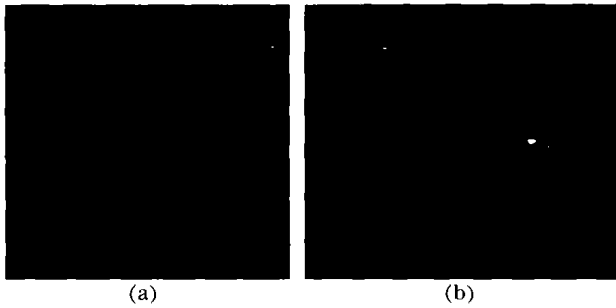


图 8 二进制相位透镜:(a)驱动函数,(b)测得的点扩展函数

Fig. 8 Binary phase lens for a 100 cm focal length lens: (a) driving function, (b) detected point spread function

虽然二进制相位菲涅耳透镜的通光量是 100% 但是其光效率并不是 100%。因为波带片中的每一个波带可以分成许多无限窄的同心圆环,这些圆环上的光波到达焦点处的相位不同,从而降低了光效率。

在对液晶电视进行连续相位程控的透镜中,假定像素之间没有间隙,并且透射率是 1。如果使得所有通过像素的光到达焦点时都同相位,那么这个程控透镜就和常规透镜一样,具有理想的 100% 光效率。为了比较连续相位透镜和二进制相位透镜二者间的差别,用 Hecht<sup>[12]</sup> 给出的理论对二者进行分析。

对于二进制相位透镜,从图 4 中可以看到,入射到液晶电视上的平面波通过第  $n$  个菲涅耳波带在焦点  $P$  产生的电磁场可以表示为

$$E_n = K(\theta)E_0 \int_{r_{n-1}}^{r_n} \frac{\cos(\omega t - kl)}{l} ds, \quad (10)$$

其  $ds = 2\pi r dr$  是微分面积元,  $E_0$  为从液晶电视出射光的振幅,  $K(\theta)$  为倾斜因子,  $r_n$  和  $r_{n-1}$  由方程(5)定义。因为  $l^2 = r^2 + f^2$ ,  $r dr = l dl$ , 方程(10)可以写成

$$E_n = 2\pi K_n(\theta)E_0 \int_{l_{n-1}}^{l_n} \frac{\cos(\omega t - kl)}{l} l dl = (-1)^{n-1} 2K_n(\theta)E_0 \lambda \sin(\omega t - kl). \quad (11)$$

对于连续相位透镜,从第  $n$  个菲涅耳波带到达焦点  $P$  的光波具有相同的相位,产生的电磁场可以表示为

$$E'_n = 2\pi K_n(\theta)E_0 \int_{l_{n-1}}^{l_n} \frac{\cos(\omega t - kl)}{l} l dl = \pi K_n(\theta)E_0 \lambda \cos(\omega t - kl). \quad (12)$$

光强等于  $|E|^2$ 。连续相位透镜与二进制相位透镜的光效率比为

$$\frac{|E'_n|^2}{|E_n|^2} = \frac{\pi^2}{4} \approx 2.5, \quad (13)$$

表明连续相位透镜能把更多的光能量聚集在焦点上。图 9 是实验结果。入射光强与图 8 的实验相同。在图 9(b)中,聚焦的光强已经使得 CCD 相机处于饱和状态。比较图 7,8,9 的实验,能明显看到,二进制相位透镜的聚焦质量比菲涅耳波带好,而连续相位透镜的聚焦质量比二进制相位透镜的聚焦质量好。由于实验中使用的像素较大,所以图 9(a)显示的程控透镜的相位同心圆很粗糙,仅有中心的几个波带区呈现连续相位分布。如果有像素很精细的液晶器件,连续相位透镜的聚焦性质将会得到显著改善。

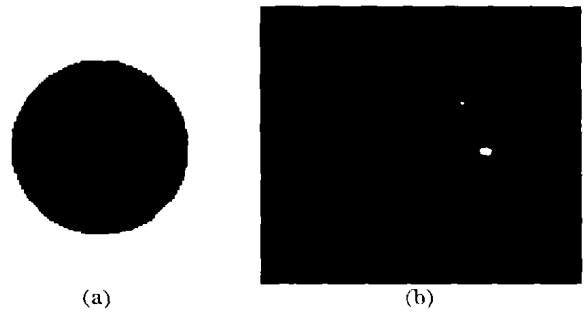


图 9 100 cm 焦距的连续相位透镜:(a)驱动函数,(b)测得的点扩展函数

Fig. 9 Continuous phase lens for a 100 cm focal length lens: (a) driving function, (b) detected point spread function

### 4.3 驱动液晶电视成为像差透镜

驱动液晶电视产生的程控透镜也可以用来研究透镜的像差。通过在液晶电视上施加各种像差函数,可以得到具有不同像差的透镜。作为一个例子,把液晶电视驱动成带有像散函数的相位透镜,使得它在  $x$  方向和  $y$  方向具有不同的聚焦长度。施加在液晶电视上的相位函数由图 10(a)表示,图 10(b)~图 10(d)则分别表示聚焦光在切向焦平面,最小光斑焦平面,和径向焦平面上的光强分布。这些图形表现了一个透镜的典型的像散特征。

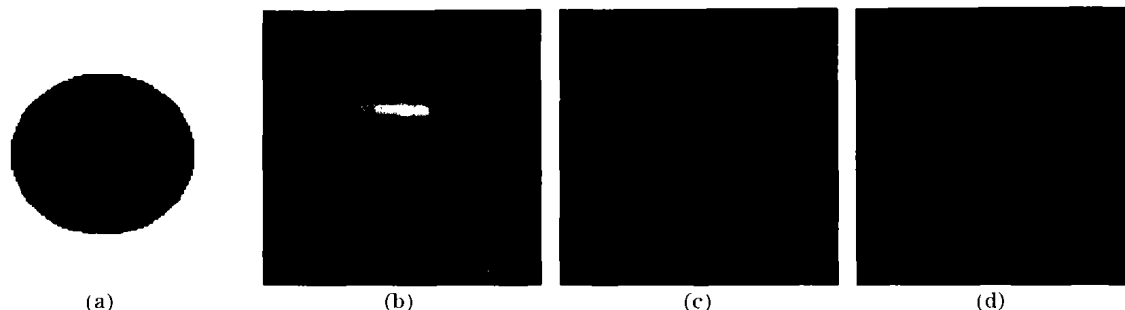


图 10 相位透镜

Fig. 10 Phase lens with astigmatism

## 5 结 论

通过对液晶电视中的每一像素进行电控制,可以得到计算机程控的透镜和微透镜阵列。液晶电视可以在振幅模式,二进制相位模式,和连续相位模式下运行。理论分析和实验结果都表明,在连续相位模式下运行的程控透镜具有较好的聚焦性能和光效率。程控透镜的质量取决于液晶电视中像素的尺寸,像素越小则程控透镜的焦距可以做得越小, $F$ 数也越小。程控透镜可以作为演示和研究透镜的像差的有效工具,可以很方便地用各种不同的像差函数驱动液晶电视,观察研究其聚焦性质。用程控的微透镜阵列可以产生光斑阵列,并且可以随意改变光斑阵列的形式,这是常规的方法所做不到的。由计算机程控液晶电视得到的光学器件虽然具有极大的灵活性,可以做到单一器件多种用途,但是由于空间光调制器的像素的尺寸影响了它的精细程度,因而限制了它的应用。另一方面,像素对光的衍射作用相当于一个二维光栅,零级以上的高级衍射光能量都损失掉了。衍射损失与液晶器件的有效像素总面积与液晶器件工作面积的比值有关。通过提高这个比值,不仅能减少衍射损失,也能减少通光量的损失。随着液晶空间光调制器的制造技术的不断提高,程控透镜及微透镜阵列技术将会在科学研究和工业生产中得到更多的应用。

### 参 考 文 献

- Jing Hongmei, Liu Liren. Optical parallel implementation of fuzzy logical image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (11): 1348~1352 (in Chinese)
- Liao Jun, Wang Haidong, Ding Jianping *et al.*. Multiple image produced by micro-lenses array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28** (1): 52~54 (in Chinese)
- 廖 军,王海东,丁剑平等. 利用微透镜阵列产生多重像 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1): 52~54
- Adolf W. Lohmann. Array illuminators and complexity theory [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **89**(2~1): 167~172
- Liu Yi, He Shumei, Wang Shifan. PS optical interconnection realized by virtual focus imaging under the parallel light input [J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(1): 88~90 (in Chinese)
- 刘 艺,何淑梅,王仕帆. 虚焦点成像实现平行光输入的 PS 光互连 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(1): 88~90
- Zhou Chongxi, Liu Yinhuai, Xie Weimin *et al.*. Analysis and design of fiber coupled high power laser diode array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **31**(11): 1297~1300 (in Chinese)
- 周崇喜,刘银辉,谢伟民等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1297~1300
- Jing Hongmei, Liu Liren. Optical parallel implementation of fuzzy logical image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (11): 1348~1352 (in Chinese)
- 景红梅,刘立人. 光学并行实现模糊逻辑图像处理 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(11): 1318~1352
- F. B. McCormick. Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings [J]. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(1): 299~301
- Adolf W. Lohmann, J. A. Thomas. Making an array illuminator based on the Talbot effect [J]. *App. Opt.*, 1990, **29**(29): 1337~1340
- A. Marrakchi, S. F. Habiby, R. Wullert II. Generation of programmable coherent source arrays using spatial light modulators [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 931~933
- Ren Hongwen, Ling Zhihua, Wu Sheng *et al.*. A new type fresnel phase waveband plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19** (1): 124~126 (in Chinese)
- 任洪文,凌志华,吴 声等. 一种新的菲涅耳相位波带片 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 124~126
- Rensheng Dou, Michael K. Giles. Simple technique for measuring the phase property of a twisted nematic liquid crystal television [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(3): 808~813
- Eugene Hecht. *Optics* [M]. Assison-Wesley Inc., 1987, 445