

文章编号: 0258-7025(2005)03-0346-05

# 反射式液晶器件振幅调制特性的研究

葛爱明, 隋 展, 苏俊宏

(复旦大学信息科学与工程学院光科学与工程系 先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要** 研究了反射式液晶器件(RLCOS)的振幅调制特性。采用  $2 \times 2$  的琼斯矩阵计算仿真, 从理论上分析了它的振幅调制特性。实验采用 He-Ne 激光为光源, 将反射式液晶器件显示器作为液晶空间光调制器, 用计算机和相关的电路系统驱动控制, 并用 CCD 采样数据, 测试了  $1024 \times 768$  反射式液晶器件显示器的振幅调制特性。与未改形光束剖面相比, 在特定的入射、出射偏振光配制下, 可以用反射式液晶器件显示器来做振幅调制器。

**关键词** 光学器件; 空间光调制器; 液晶显示器; 反射式液晶器件

**中图分类号** TN 241 **文献标识码** A

## Research on Characteristics of Amplitude Modulation of a Reflective Liquid Crystal on Silicon Device

GE Ai-ming, SUI Zhan, SU Jun-hong

(State Key Lab for Advanced Photonic Materials and Devices, Department of Optical Science and Engineering, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** The characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon (RLCOS) are discussed in this paper. The  $2 \times 2$  Jones matrix methods is used to analyze amplitude modulation characteristics. The system is constructed for testing of amplitude and phase, in which He-Ne laser is used as the light source, the wave front amplitude is measured by the interferometer. The RLCOS display device as a mirror is used as a spatial light modulator and its driving circuit is controlled by a computer, digital data are sampled by CCD. The amplitude modulation characteristics of  $1024 \times 768$  RLCOS display device are gotten. Comparing with the without sharpened laser beam profile, the results show that under selected polarization states of input and output, RLCOS displays can be used as amplitude modulator.

**Key words** optical devices; spatial light modulator; liquid crystal displays; reflective liquid crystal on silicon

## 1 引 言

在激光聚变驱动器中需用空间光调制器对激光束的振幅和波前相位进行控制, 改善光场的近场分布, 获得光能利用率高的近平顶的光强分布的超高斯型光束, 有效地控制改进光束质量。用液晶来完成这一任务比二元光学器件灵活, 它是可以编程控制的, 随时可以根据实际光束的变化和系统对光束的要求进行设置, 液晶可以做多像素的器件, 实现高分辨率的振幅调制。

目前, 通常的光束空间改形方法是采用对特定

的输入光束的切趾光阑或结合空间滤波进行光束空间改形<sup>[1]</sup>, 而实际输入的光束并非理想型的光束, 所以, 这些光束的空间改形存在一定的局限性。因此, 研究实时、可调的光束空间改形有一定的实际意义。对透射式的器件<sup>[2,3]</sup>, 如薄膜晶体管(TFT)液晶器件, 由于薄膜晶体管电路在像素中所占的面积不能作光的调制, 存在光调制的死区, 开口率也较低(60%), 光能利用率低。随着技术的进步, 出现了另一类有源矩阵寻址的反射式液晶器件(RLCOS), 它是利用带互补性氧化金属半导体(CMOS)电路的硅

收稿日期: 2004-05-20; 收到修改稿日期: 2004-09-23

作者简介: 葛爱明(1970—), 男, 山西人, 博士后, 复旦大学信息科学与工程学院光科学与工程系副教授, 主要从事光电工程理论与技术的研究。E-mail: amge@fudan.edu.cn

基板加铝层来制作的反射式器件<sup>[4~6]</sup>,具有开口率高,光能利用率高,像素多,分辨率高,可以编程控制的特点。目前,它用在彩色背投影显示上,能够产生具有高清晰度、高亮度的图像的特点,愈来愈引起人们的关注,但尚未发现人们利用它的这些特点作为振幅空间光调制器。本文提出了采用反射式液晶器件显示器作为液晶空间光振幅调制器对激光束空间进行实时、可调控改形的新方法,结合空间滤波,获得有较高光能利用率所需形状的近平顶的光强分布的近场光束<sup>[7~11]</sup>。我们用理论和实验相结合的方法研究了它的振幅调制特性。

## 2 液晶空间光调制器特性的理论计算

### 2.1 液晶空间光调制器的分子排列

在硅基板上的反射式液晶显示器是否可以作振幅空间光调制器,首先我们从理论上研究它。实验是采用 AURORA 公司的 ASI2000R 反射式液晶器件,液晶分子在两基片表面处都是沿面排列的,但它们的定向方向相差  $52^\circ$ 。把基片中间的液晶层分成许多薄层,每一层内分子的取向基本一致,且平行于层面;相邻分子的取向逐渐转过一个角度,从而形成扭曲-向列排列方式,当液晶基片两端没加电场时,液晶层可看作被分成许多与  $z$  轴正交垂直的薄片,每个薄片除了液晶分子转过一定角度外,其他都是相同的,如图 1 所示;当沿着  $z$  轴加上电场时,所有的液晶分子朝电场方向转过一个角度  $\theta$ ,它是所加电压  $V$  的函数

$$\theta = \begin{cases} 0 & V \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{V - V_c}{V_0} \right) \right] & V > V_c \end{cases} \quad (1)$$

这里  $V_0$  为某一中间值,  $V_c$  为阈值电压,当  $V < V_c$  时液晶分子就不会发生偏转,当  $V > V_c$  时,偏转角  $\theta$  随着  $V$  的增加而增加,直到达到  $\theta$  的饱和值  $\pi/2$ 。随着分子取向的偏转,光沿  $z$  轴传播的折射率系数  $n_e$  发生变化

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2} \quad (2)$$

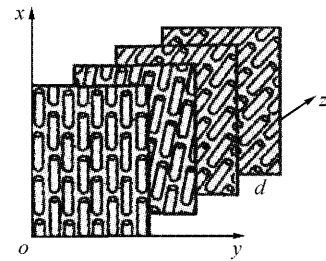


图 1 扭曲-向列型液晶分子的排列结构

Fig. 1 Structure diagram of twisted-nematic liquid crystal molecular arrangement

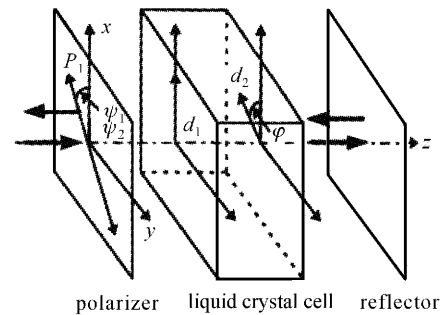


图 2 反射式液晶器件的结构图

Fig. 2 Structure diagram of RLCOS device

### 2.2 液晶空间光调制器的调制模式和调制理论曲线

一般的反射式液晶显示器在入射处加偏振分光棱镜,另一边为镀有铝的互补性氧化金属半导体高反射基板,如图 2 所示。入射、出射偏振光的状态分别由  $\psi_1, \psi_2$  表示,它们是各自的偏振方向与  $x$  轴的夹角。当一束光垂直照射到此反射式液晶器件时,由琼斯算法可以得出反射光的振幅表达式<sup>[10]</sup> 为

$$\mathbf{J}'_R = \mathbf{Pol}(\psi_2) \cdot \mathbf{Rot}(\varphi) \cdot \mathbf{LC}(\varphi, \beta) \cdot \mathbf{Rot}(-\varphi) \cdot \mathbf{Mir} \cdot \mathbf{LC}(\varphi, \beta) \cdot \mathbf{Pol}(\psi_1) \cdot \mathbf{J}_0 \quad (3)$$

式中  $\mathbf{J}_0$  为入射光的琼斯矢量;  $\mathbf{Pol}(\psi_1)$  为入射偏振器件的琼斯矩阵;  $\mathbf{LC}(\varphi, \beta)$  为光通过液晶层的琼斯矩阵;  $\mathbf{Mir}$  为镜面反射光的琼斯矩阵;  $\mathbf{Rot}(-\varphi), \mathbf{Rot}(\varphi)$  为旋转坐标系的作用矩阵;  $\mathbf{Pol}(\psi_2)$  为出射偏振器件的琼斯矩阵。

经理论推导,可以得到光线的强度反射率  $R = \mathbf{J}'_R \cdot \mathbf{J}_R^*$  ( $\mathbf{J}_R^*$  为  $\mathbf{J}'_R$  的共扼) 和产生的相位  $\delta$

$$R = \left\{ \left[ \left( \frac{\alpha}{\gamma} \right)^2 + \left( \frac{\beta}{\gamma} \right)^2 \cos(2\gamma) \right] \cos(\psi_1 - \psi_2) \right\}^2 + \left\{ \frac{\alpha\beta}{\gamma^2} [1 - \cos(2\gamma)] \sin(\psi_1 + \psi_2) - \frac{\beta}{\gamma} \sin(2\gamma) \cos(\psi_1 + \psi_2) \right\}^2 \quad (4)$$

$$\delta = 2\beta - \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{\alpha\beta}{\gamma^2} [1 - \cos(2\gamma)] \sin(\psi_1 + \psi_2) - \frac{\beta}{\gamma} \sin(2\gamma) \cos(\psi_1 + \psi_2)}{\left[ \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)^2 \cos(2\gamma) \right] \cos(\psi_1 - \psi_2)} \right\}, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为经过液晶层厚度为  $d$  时的最大扭曲角, 沿着  $z$  轴方向, 在  $z$  点液晶分子的扭曲角为  $\varphi = \alpha z/d$ ,  $\beta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e - n_o)$ ,  $\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ 。

在一般情况下, 反射式液晶器件是振幅和相位的耦合调制。选择适当的结构参数, 可使它处于振幅调制模式, 即它的振幅调制单调变化, 而对相位的调制量小。为此, 当选取  $\psi_1 = \psi, \psi_1 - \psi_2 = 90^\circ, \alpha = 52^\circ$  时, 有

$$R = \left\{ \frac{\alpha\beta}{\gamma^2} [1 - \cos(2\gamma)] \cos(2\psi) + \frac{\beta}{\gamma} \sin(2\gamma) \sin(2\psi) \right\}^2, \quad (6)$$

$$\delta = 2\beta + n\pi, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (7)$$

图 3 为振幅调制的反射强度变化曲线。从光强度反射率变化曲线中看到当  $\beta \in [0, \sqrt{3}\pi/4] \cup [\sqrt{3}\pi/4, 5\pi/6]$ ,  $R$  为  $\beta$  的单调函数, 且分别由 0 到接近 1 或者接近 1 到 0 的变化, 因此,  $\beta \in [0, \sqrt{3}\pi/4] \cup [\sqrt{3}\pi/4, 5\pi/6]$  范围内可满足强度调制的条件, 当  $\beta > 5\pi/6$  以后, 反射率  $R$  值在一个较小的范围内波动, 可看作是常量。因此, 在  $\psi_1 - \psi_2 = 90^\circ, \alpha = 52^\circ, \beta \in [0, \sqrt{3}\pi/4] \cup [\sqrt{3}\pi/4, 5\pi/6]$  时, 可满足强度调制的条件。

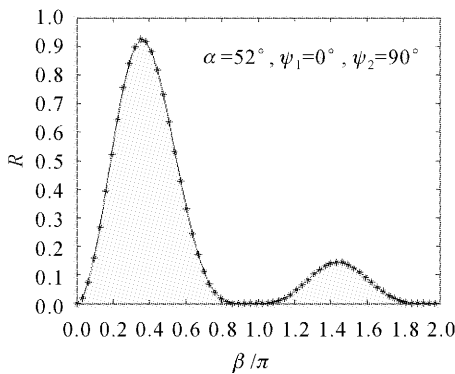


图 3 反射式液晶显示器振幅调制计算机仿真的结果  
Fig. 3 Simulated optical amplitude modulation curve of RLCOS

### 3 实验与结果

图 4 为迈克尔逊干涉仪实验装置, 用反射式液晶器件显示器作为空间光调制器, 分辨率为  $1024 \times$

768 像素, 用它代替干涉仪的一个反射镜, 图 4 中偏振器  $P_1, P_2$  的偏振方向分别平行和垂直于液晶前表面定向方向 ( $P_1$  的偏振光方向平行于纸面), 对反射式液晶器件施加不同的驱动电压 (仅可测到液晶像素驱动三极管的基极电压, 它为  $0 \sim 1$  V, 实际是改变相应输入图像的灰度值, 因为图像的灰度值与  $n_e$  或  $\beta$  值有单值对应性) 遮去迈克尔逊干涉仪的另一臂, 可以测到反射率变化曲线如图 5 所示。

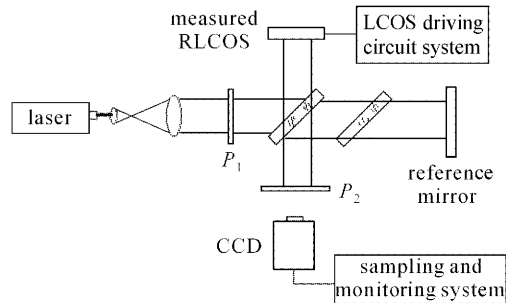


图 4 实验测试装置  
Fig. 4 Experimental setup

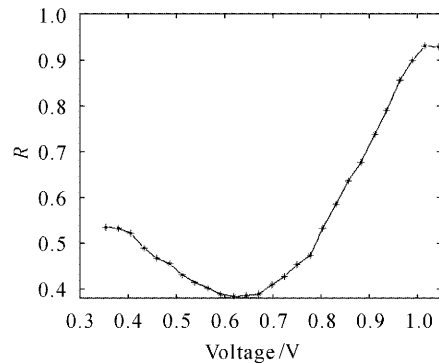


图 5 实验测试反射式液晶器件的光学调制曲线  
Fig. 5 Optical amplitude modulation curve of RLCOS in the experiment

从物理概念分析, 当不施加驱动电压时, 入射偏振方向平行于器件前表面液晶分子的长轴, 光线将以  $n_e$  传播, 随着液晶分子的扭曲和液晶对传播光波的波导作用, 其传播光线的偏振将随液晶分子的扭曲而旋转, 它将始终以  $n_e$  传播, 当施加电压时, 液晶分子逐渐趋向与器件表面垂直, 入射偏振光将变为以  $n_o$  传播。在实验中, 当  $P_1, P_2$  的透射面在图 4 中的水平和垂直方向时 (即  $\psi_1 - \psi_2 = 90^\circ$ ), 其振幅调制

量比其他的偏振配置都要大,根据我们的分析,如果入射偏振光的偏振方向沿着器件前表面的液晶分子的长轴方向,由于光在液晶中的传播的波导作用,在未施加电压时,偏振光始终以  $n_o$  传播,当施加电压时,液晶分子渐渐转到与液晶盒表面垂直而与电场方向一致,这时入射偏振光将以折射率为  $n_o$  传播。此时,反射式液晶器件显示器可作为振幅调制器。

用图 4 所示的光学系统进行了激光光束的空间改形的实验研究,包括对入射光进行扩束、准直,再采用反射式液晶器件显示器作为空间光调制器将光

束进行平滑。实验采用的波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ ,功率为  $10 \text{ mW}$  的激光器产生输入光束光束改形前的输出光束的光强分布,如图 6(a)所示,图 6(b)为图 6(a)的三维显示图。根据图 5 所示的反射式液晶器件显示器的调制特性曲线,选择适当孔径大小的滤波小孔,滤掉高频调制的空间频率分量,在输出面上采集到近“平顶”的衍射输出光束的光强分布,如图 7(a)所示,图 7(b)为图 7(a)的三维显示图。由此可见,对激光束的空间改形效果明显,获得了边缘陡度高,强度起伏小的近“平顶”衍射光束。

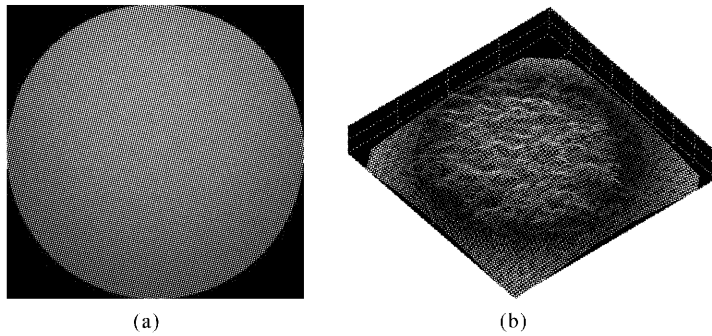


图 6 激光光束改形前的光强分布

(a) 二维光强分布;(b) 三维光强分布

Fig. 6 Intensity distribution of laser beam

(a) 2-dimension; (b) 3-dimension

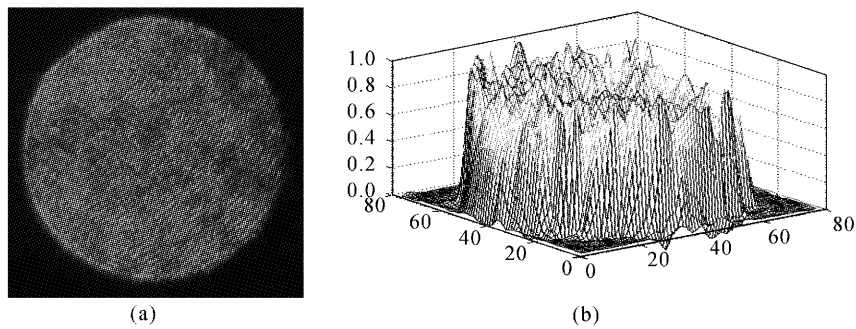


图 7 实验对激光光束改形的光强分布

(a) 二维光强分布;(b) 三维光强分布

Fig. 7 Intensity distribution of shaped laser beam

(a) 2-dimension; (b) 3-dimension

## 4 结 论

研究了一个反射式液晶器件的振幅调制特性,理论仿真计算了它的振幅调制特性,并用实验进行了验证,两者基本吻合。这说明了反射式液晶器件显示器在入射偏振光和出射偏振光分别与液晶显示器前表面液晶分子定向方向平行和垂直时,可以实现振幅调制。当然,利用现有的器件相位调制的动态范围还是有限的,将在自行设计和制作的反射

式液晶器件调制器中进一步改进。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9):1107~1111  
陈怀新,隋展,陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1107~1111
- 2 Thomas H. Bames, Tomoaki Eiju, Kiyofumi Matusda *et al.*. Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(22):4845~4852

- 3 Kanghua Lu, Bahaa E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3):240~246
- 4 S. T. Tang, F. H. Yu, J. Chen *et al.*. Reflective twisted nematic liquid crystal displays. I. Retardation compensation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(9):5924~5929
- 5 F. H. Yu, J. Chen, S. T. Tang *et al.*. Reflective twisted nematic liquid crystal displays. II. Elimination of retardation film and rear polarizer [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(11):5287~5294
- 6 Kanghua Lu Bahaa E. A. Saleh. Complex amplitude reflectance of the liquid crystal light valve [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(17):2354~2362
- 7 Ge Aiming, Chen Jinbang, Chen Lei *et al.*. Automatic laser interference measurement of center length of gauge block [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):537~540  
葛爱明,陈进榜,陈磊等.量块中心长度的自动激光干涉测量[J].*中国激光*, 2001, **A28**(6):537~540
- 8 Ge Aiming, Chen Lei, Chen Jinbang *et al.*. Digitalisation processing technique for interference pattern with obstruct [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):775~780  
葛爱明,陈磊,陈进榜等.有遮拦干涉图像的数字化处理技术研究[J].*光学学报*, 2000, **20**(6):775~780
- 9 Ge Aiming, Chen Jinbang, Chen Lei *et al.*. Research on the method of measurement of gauge length and dynamic argument using shift-phase interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2):249~252  
葛爱明,陈进榜,陈磊等.应用移相干涉术测量量块长度和长度变动量[J].*光学学报*, 2002, **22**(2):249~252
- 10 Ge Aiming, Si Zhan, Xu Keshu. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10):2481~2485  
葛爱明,隋展,徐克瑞.反射型LCOS器件纯相位调制特性的研究[J].*物理学报*, 2003, **52**(10):2481~2485
- 11 Ge Aiming, Chen Lei, Chen Jinbang *et al.*. Research on processing technique for interference pattern with step using phase-shift interferometry [C]. *SPIE*, 2000, **4231**:371~374