

反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究*

葛爱明[†] 隋 展 徐克

(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)

(2002 年 11 月 14 日收到, 2003 年 1 月 16 日收到修改稿)

研究了反射型的 LCOS 显示器件的相位调制特性, 采用 2×2 的 Jones 矩阵计算仿真, 从理论上分析了它的相位调制特性, 建立了一套测量振幅和相位特性的测试系统. 它采用 He-Ne 激光为光源, 用干涉仪观察波前相位, 将 LCOS 显示器件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 1024×768 LCOS 显示器件的相位调制特性. 理论和实验的一致性说明了在特定的入射、出射偏振光配制下, LCOS 显示器件可以做纯相位调制器.

关键词: 空间光调制器, 液晶显示器, 反射型 LCOS

PACC: 4260F, 0670H, 6130

1. 引 言

纯相位调制器是现代光信息处理的关键器件, 例如, 在图像识别中用于频谱滤波要比振幅调制器的灵敏度高^[1]. 假如这种纯相位调制器有足够高的分辨率, 则可在一些应用中代替二元光学元件^[2], 从而可以克服二元光学元件一次设计和制造只能针对一种特殊的应用, 而相位空间光调制器的相位变化是非常灵活的, 它可以根据使用场合的要求和变化而随时随地用程序控制的办法改变它的相位分布, 进行信息的实时处理.

Lu 等人曾经研究了被动寻址的液晶电视的相位和振幅调制特性^[3]. 由于液晶较慢的响应速度和逐行扫描的方式, 所以当液晶电视扫描到最后一行时, 第一行的液晶分子取向^[4, 5]已有变化, 相位随之而变化, 从而在一帧图像中, 相位很难达到原定的要求. 利用有源矩阵寻址的方式, 由于每个像素都有存储电容将电压保持, 从而克服了这一问题. 但是 TFT (thin film transistor) 驱动的液晶显示器^[6], 由于薄膜晶体管在像素中所占的面积不能作光的调制, 存在光调制的死区, 开口率较低 (60%), 所以光能利用率低. 随着技术的进步, 另一类有源矩阵寻址的液晶器件 LCOS (liquid crystal on silicon), 它利用带 CMOS 电路的硅基板加铝层来制作的反射式器件^[7, 8], 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, 它用在彩色显示器上, 引起人们的关注, 但尚未见人们利用它的这些特点作为相位空间光调制器. 我们用理论和实验相结合的方法研究了它的相位调制特性.

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

在硅基板上的反射型液晶显示器 (RLCOS display) 是否可以作相位空间光调制器, 我们首先从理论上研究它. 因为本文的实验研究是采用 AUORA 公司的 ASI2000R 反射式 LCOS 来做的, 因此首先用相应的情况进行理论分析. 在 ASI2000R 反射式 LCOS 中, 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° , 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 θ , θ 是所加电压 V 的函数,

* 国家高技术研究发展计划 863 计划 [批准号 2002AA84TS11] 和国家自然科学基金与中物院联合基金 (批准号: 10176007) 资助的课题.

[†]E-mail: amge@fudan.edu.cn, geam2000@sina.com, geam2002@163.com

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

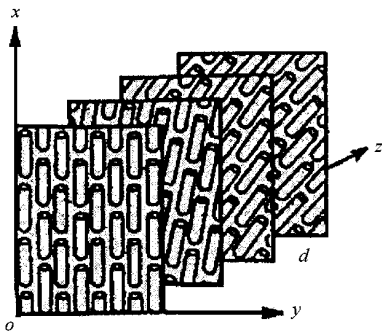


图 1 扭曲-向列型液晶分子排列结构

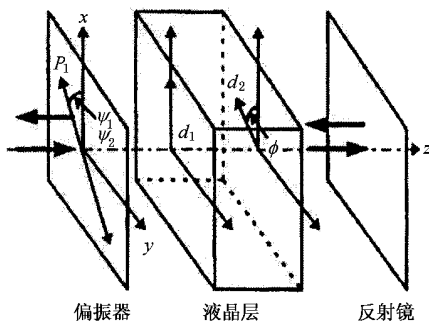


图 2 RLCOS 的结构图

式中 V_c 是个阈值电压, 小于它就不会发生偏转, V_0 是某一中间值, 当 $V > V_c$ 时, 偏转角 θ 随着 V 的增加而增加, 直到达到 θ 的饱和值 $\pi/2$. 随着分子取向的偏转, 光沿着 z 轴传播的折射率系数 n_e 发生变化, 有关系

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

2.2. 液晶空间光调制器的调制模式和调制理论曲线

一般的反射型液晶显示器是入射处加偏振分光棱镜, 另一边为镀有铝的 CMOS 高反射基板, 如图 2 所示, 入射、出射偏振光的状态分别由 ψ_1, ψ_2 表示, 它们是各自的偏振轴与 x 轴的夹角. 当一束光垂直照射到 RLCOS 器件时, 由 Jones 算法可以得出反射光的振幅表达式为

$$J'_R = P_o(\psi_2) \cdot R_o(\varphi) \cdot L_c(\varphi, \beta) \cdot R_o(-\varphi) \cdot M_{ir} \cdot L_c(\varphi, \beta) \cdot P_o(\psi_1) \cdot J_0, \quad (3)$$

式中 J_0 为入射光的 Jones 矢量; $P_o(\psi_1)$ 为入射偏振器件的 Jones 矩阵; $L_c(\varphi, \beta)$ 为光通过液晶层的 Jones 矩阵; M_{ir} 为镜面反射光的 Jones 矩阵; $R_o(-\varphi), R_o(\varphi)$ 为旋转坐标系的作用矩阵; $P_o(\psi_2)$ 为出射偏振器件的 Jones 矩阵.

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

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

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

式中 α 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 $\varphi = \alpha_z/d$.

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e - n_o],$$

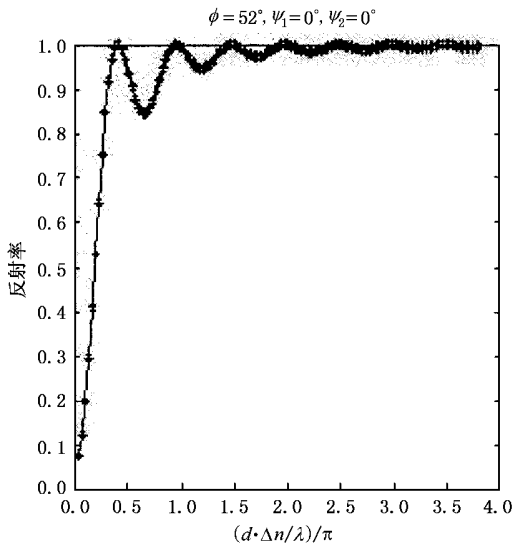
$$\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}.$$

在一般的情况下, RLCOS 是振幅和相位的耦合调制. 在选择适当的结构参数, 可使它处于相位调制模式, 即它的相位调制单调变化, 而对振幅的调制量小. 为此, 当选取 $\psi_1 = 0, \psi_2 = 0, \alpha = 52^\circ$ 时, 有

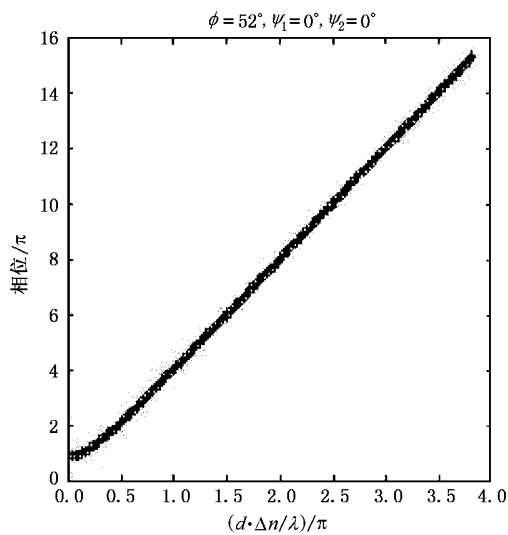
$$R = \left[\left(\frac{\alpha}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\gamma} \right)^2 \cos(2\gamma) \right]^2 + \left[\left(\frac{\beta}{\gamma} \right) \sin(2\gamma) \right]^2, \quad (6)$$

$$\delta = 2\beta - \tan^{-1} \left[\frac{-\frac{\beta}{\gamma} \sin(2\gamma)}{\left(\frac{\alpha}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\beta}{\gamma} \right)^2 \cos(2\gamma)} \right]. \quad (7)$$

图 3(a)(b) 得到了它们分别表示反射强度变化曲线和相位变化曲线. 从光强度反射率变化曲线中看到, 当 β 在 $0 \sim \sqrt{3}\pi/4$ 范围内, R 是 β 的单调函数, 且



(a) 反射率变化曲线



(b) 相位变化曲线

图3 RLCOS 振幅调制和相位调制计算机仿真的结果

由 0 到 1 变化,因此 β 在 $[0, \sqrt{3}\pi/4]$ 范围内可满足强度调制的条件,当 β 大于 $\sqrt{3}\pi/4$ 时,反射率 R 值在一个较小的范围内波动,可看作是常量且接近于 1,而这时的相位调制曲线(图 3(b))近似为一条斜率为 2 的直线.因此,在 $\psi_1 = 0, \psi_2 = 0, \alpha = 52^\circ, \beta > \sqrt{3}\pi/4$ 时,可满足相位调制的条件.

3. 实验与结果

实验装置是图 4 所示的迈克尔逊干涉仪,用

RLCOS 显示器件作为空间光调制器,它有 1024×768 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 的偏振光方向分别以其附近的箭头表示(平行于液晶前表面定向方向),对 RLCOS 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—1V)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(a),反射率均大于 93%.打开干涉仪遮去的一臂,可以看到干涉条纹,图 6 是器件的上半部分和下半部分形成的干涉条纹,其中,下面一半未加电压,上面一半施加了电压,从条纹的错开可以测到相位调制特性,如图 5(b),相位调制量约为 1.6π .

前面从理论和实验两方面分析了 RLCOS 的相位调制特性,从物理概念来分析,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.因此,它将有最大的相位调制.在实验中也证实了这一点,当 P_1, P_2 的透射面在图 4 中的水平方向时(即 $\psi_1 = \psi_2 = 0$),其相位调制量比其他的偏振配置都要大,表现在图 6 中上半部分加了部分电压,其干涉条纹相对于下半部分有明显的条纹错开.我们认为,在入射和出射偏振器 P_1 和 P_2 的透射面均平行于器件前表面液晶分子定向方向时,将有最大相位调制,此时,RLCOS 显示器可作为相位调制器.

实验中,入射的偏振器 P_1 的偏振方向平行于纸面,当出射的偏振器 P_2 的偏振方向垂直于纸面时,反射率变化特性曲线如图 7(a)所示,反射率很小;当不加出射的偏振器 P_2 时,反射率变化特性曲线如图 7(b)所示,反射率很大,均大于 94%,与加入偏振为水平方向的偏振器 P_2 的情况基本一致,这证实了出射光基本上是水平方向的线偏振光.如果对出射光的线偏振度要求不高时,该显示器件作为纯相位的调制器,不加出射的偏振器 P_2 ,光能利用率明显提高.

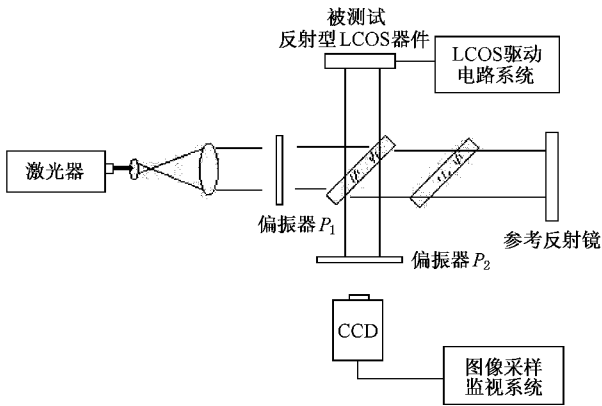


图 4 实验测试装置

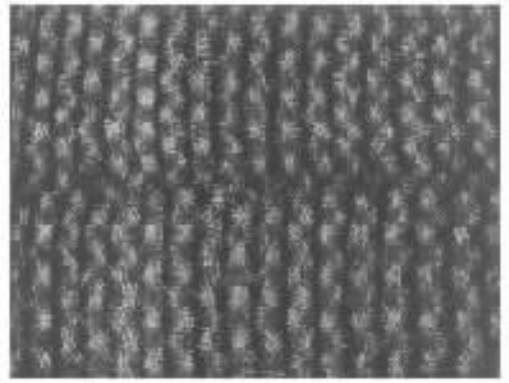
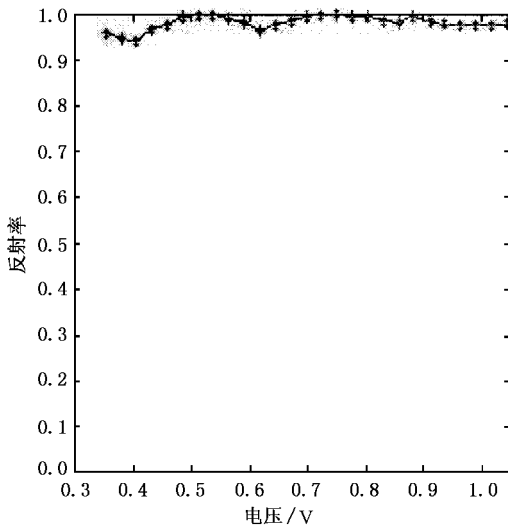
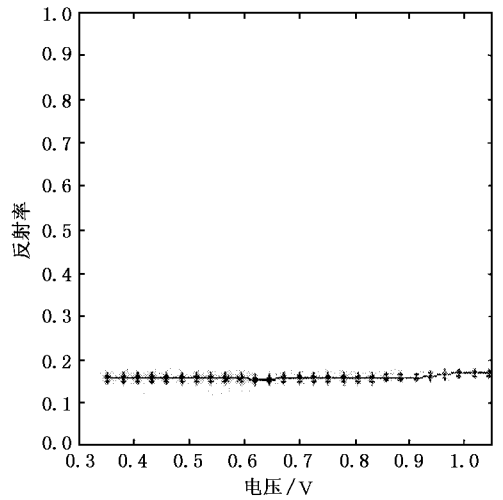


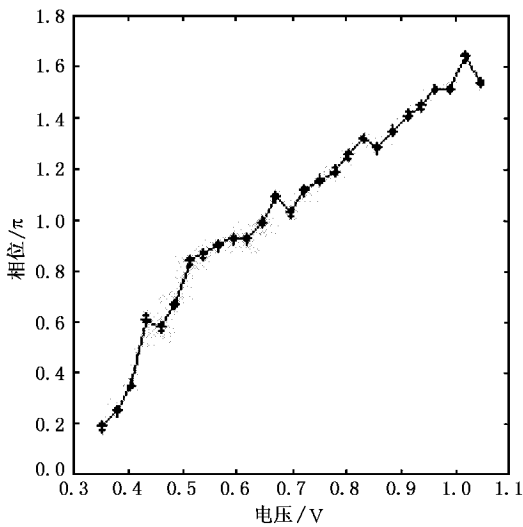
图 6 测量相位调制干涉图



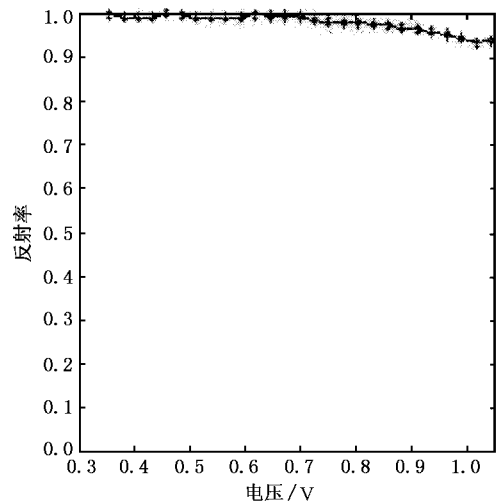
(a) 反射率变化曲线



(a) P_2 偏振方向垂直于纸面时反射率变化曲线



(b) 相位变化曲线



(b) 去掉 P_2 反射率变化曲线

图 5 实验测试液晶纯相位空间光调制器的光学调制曲线

图 7 改变出射偏振器 P_2 实验测试液晶纯相位空间光调制器的光学调制曲线

4. 结 论

本文研究了一个反射型 RLCOS 液晶显示器的相位调制特性,理论仿真计算了它的相位调制,并用实验进行了验证,两者基本吻合.这说明了 LCOS 反

射式液晶显示器在入射偏振光与液晶器件前表面液晶分子定向方向相同时,可以实现纯相位调制.而且出射光基本上是线偏振光,从而避免了加出射偏振器对光的吸收,因而提高了光能利用率.当然,利用现有的器件相位调制的动态范围还是有限的,我们将在自行设计和制作的 RLCOS 调制器中进一步改进.

- [1] Bames T H , Eiju T , Matusda K and Ooyama N 1989 *Applied Optics* **28** 4845
- [2] Mu R W , Zhou J and Gao W Q 1999 *Laser & Infrared* **29** 181(in Chinese) 沐仁旺、周进、高文琦 1999 激光与红外 **29** 181]
- [3] Lu K H and Bahaa E A Saleh 1990 *Optical Engineering* **29** 240
- [4] Lü R B , Xu K S , Zhang S Y , Gu J H and Lu Z H 1999 *Acta Phys . Sin .* **48** 2289(in Chinese) 吕瑞波、徐克、张舒雁、顾建华、陆祖宏 1999 物理学报 **48** 2289]
- [5] Liang Z Y , Yan S , Xuan L , Ma K and Huang X M 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1114(in Chinese) 梁兆雁、闫石、宣丽、马凯、黄锡珉 2000 物理学报 **49** 1114]
- [6] Guo J X , Kwok H S 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1995 (in Chinese) [郭建新、郭海成 2000 物理学报 **49** 1995]
- [7] Tang S T , Yu F H , Chen J , Wong M , Huang H C and Kwok H S 1997 *J . Appl . Phys .* **81** 5924
- [8] Yu F H , Chen J , Tang S T , Wong M and Kwok H S 1997 *J . Appl . Phys .* **82** 5287

Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device^{*}

Ge Ai-Ming Sui Zhan Xu Ke-Shu

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

(Received 14 November 2002 ; revised manuscript received 16 January 2003)

Abstract

This paper discusses the characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon(LCOS). The 2×2 Jones matrix method is used as a computational tool to theoretically analyze phase modulation characteristics. The system has been constructed for testing of amplitude and phase , in which a He-Ne laser as the light source , testing the wave front phase using an interferometer. The LCOS displays as a liquid crystal spatial light modulator and its driving circuit is controlled by a computer , digital data are sampled by CCD. We have tested the phase modulation of 1024×768 LCOS displays. Given the state of input and output polarizations , the result of testing our theories by experiment show consistency , so LCOS displays can be used as phase-only modulator.

Keywords : spatial light modulator , liquid crystal displays , reflective LCOS

PACC : 4260F , 0670H , 6130

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No.2002AA84TS11) and by the National Natural Science Foundation of China and the China Academic of Engineering Physics(Grant No.10176007).