

平行排列液晶器件的波前调制特性*

刘永军^{1,2} 宣 丽¹ 胡立发¹ 曹召良¹ 李大禹¹ 穆全全¹ 鲁兴海¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130033)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要 设计了一种新型的平行排列液晶相位调制器(LC PM),可在纯相位的模式下进行相位调制,研究了液晶相位调制器的光学特性,理论上给予了分析.对畸变波前进行了调制,在 1 cm² 的校正面积上,调制后的准确度 PV(peak to valley)值接近 $\lambda/15$ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$),RMS(Root Means Square)可达到 $\lambda/100$,斯特列尔比 SR (Strehl Ratio)达到 0.989.改变了传统的扭曲向列液晶器件难于进行纯相位调制和得到高准确度调制的缺点,达到了理想的效果.

关键词 相位调制器;液晶;平行排列;纯相位

中图分类号 O753;O436 **文献标识码** A

0 引言

液晶已经在显示领域占有重要的地位,世界上很多研究机构和学者都在从事液晶显示器件的研究^[1~3].然而液晶在相位调制方面还有其重要的应用,液晶纯相位调制器以其成本低、高稳定性、低能耗、控制运算简单等优点,在光学信息处理^[4,5]、天文学^[6]、视网膜成像^[7]等方面有着重要的应用前景.有很多研究小组利用扭曲排列液晶电视(LCTV)^[8~11]作为仅相位调制的器件研究.对于这样的器件,内部是扭曲排列的液晶,线偏振光在振动方向平行于器件入射面的液晶取向方向入射,沿着器件出射面的液晶取向方向出射,这样在相位调制的时候伴随较大振幅调制,影响了相位调制的特性.这样扭曲排列的液晶器件是可以作为很好的振幅调制,然而有三个问题使它很难用于仅相位调制的器件.首先,因为较低的双折射特性使它很难到达 2π 的相位调整量;其次,线偏振光是不能得到仅相位调制的;第三,很难得到较高准确度的调制.在这种条件下通常解决的办法是,在使两个偏振片与液晶的取向成一定角度的情况下,使用驱动电压的一部分,使得在这一部分电压内保证振幅调制尽量的小,近似认为是纯相位调制^[8,11].这样不仅影响了相位调制的范围,而且不是严格意义上的纯相位调制.

本文提出了一种新型平行取向液晶相位调制器,从根本上解决了上述在相位调制的时候伴有较大振幅调制的问题,且简化了装置,使计算和实验的实施更加简单.分别从理论和实验上进行了相位调

制特性分析和验证,得到了真正意义上的纯相位调制,给出了高准确度调制的实验结果.

1 液晶相位调制理论

对于任意扭曲的液晶,光在其中的传输可以利用琼斯矩阵分析,液晶的使用需要结合前后两个偏振片.因此,光依次经过起偏器、液晶、检偏器后琼斯矢量可表示为^[12,13]

$$E = P_0 R(\Psi_2) M_{LC} R(\Psi_1) E_0 \quad (1)$$

式中 $M_{LC} = \exp(-i\beta)R(-\alpha)M(\alpha, \beta)$, $P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,

$$E_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, R(\cdot) = \begin{bmatrix} \cos(\cdot) & \sin(\cdot) \\ -\sin(\cdot) & \cos(\cdot) \end{bmatrix}, M(\alpha, \beta) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\gamma) - j \left[\frac{\beta}{\gamma} \right] \sin(\gamma) & \left[\frac{\alpha}{\gamma} \right] \sin(\gamma) \\ - \left[\frac{\alpha}{\gamma} \right] \sin(\gamma) & \cos(\gamma) + j \left[\frac{\beta}{\gamma} \right] \sin(\gamma) \end{bmatrix},$$

$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e(V) - n_o]$, $\phi = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e(V) + n_o]$, $\gamma = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}$, α 是液晶的扭曲角度, d 是液晶层厚, $n_e(V)$ 、 n_o 分别是液晶的非寻常折射率和寻常折射率, $n_e(V)$ 是电压 V 的函数, λ 是入射光的波长. Ψ_1 、 Ψ_2 分别是起偏器和检偏器与坐标系 X 轴的夹角,液晶盒入射面的表面分子取向方向与 X 轴的夹角为零度,利用的是直角坐标系.

对于所设计的平行取向液晶来说,液晶的取向方向假设沿坐标系 X 轴方向,且起偏器与液晶的取向方向相同,不需要检偏器,因此 α 、 Ψ_1 、 Ψ_2 都等于 0.利用式(1)可以得到光经起偏器、液晶后的琼斯矢量 E 为

$$E = \begin{bmatrix} \exp(-i2\beta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以得到透过率 T 和相位延迟 2β 分别为

*国家自然科学基金(50473040, 59973020, 60277033, 19974046)和吉林省科委基金(20020603, 20010579)资助项目
Tel:0431-6176016 Email:liuyj@ciomp.ac.cn
收稿日期:2005-01-04

$$T=1.2, \beta=\frac{2\pi d}{\lambda}[n_e(V)-n_o] \quad (3)$$

可以看出光波的透过率 T 是不随电压变化的常量, 相位延迟 2β 是随电压变化的. 依据这个理论设计了平行取向的液晶相位调制器, 并通过实验证明了这种液晶相位调制器是可以进行纯相位高准确度的相位调制.

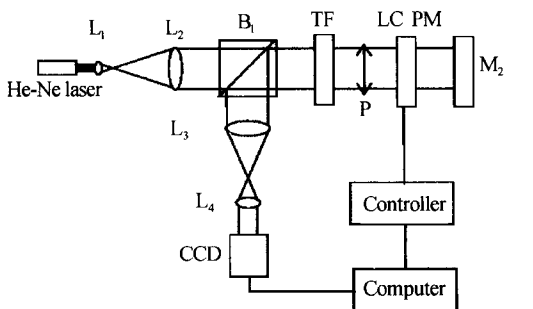
2 实验

2.1 液晶相位调制器的设计

研制的新型平行取向 TFT 液晶相位调制器是由吉林彩晶数码有限公司生产的 LCTV 改装的, LCTV 有 $640 \times 480 \times 3$ 像素, 其像素单元 $300 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 像素间距 $10 \mu\text{m}$, 去掉了 LCTV 上的彩膜和液晶屏上光学质量差的偏振片, 液晶的取向膜呈反平行排列, 注入的是日本油墨公司生产的 RDP-92975 型液晶, 在 632.8 nm 波长下 $n_o=1.516$, $n_e=1.714$, 液晶层厚为 $5 \mu\text{m}$. 驱动电路采用 8 位控制器控制.

2.2 液晶相位调制器的光学特性

利用干涉原理测量了相位延迟随灰度级变化的关系, 实验的光路如图 1, 由于采用的是共光路干涉所以稳定性较好. 632.8 nm 的 He-Ne 激光光源由透镜 L_1 、 L_2 扩束和准直, 经过分光棱镜 B_1 到达部分反射镜 TF 后: 一部分被 TF 反射, 再经过 B_1 反射后经透镜 L_3 、 L_4 到 CCD, 称为参考光; 另一部分透射光被高质量的晶体偏振片 P 起偏为线偏振光, 其偏振方向与液晶的取向方向相同, 经过 LC PM 后被反射镜 M_2 反射回 CCD, 称为物光波. 参考光波和物光波干涉, 通过干涉条纹分析可以得到物光波的相位变化, 计算机根据这些变化量驱动控制电路 (Controller), 施加相应的灰度级信号于液晶相位调制器上.



L_1, L_2, L_3, L_4 : Lens; B_1 : Beam splitter; TF: Partially reflective mirror; M_2 : Reflective mirror; P: Polarizer

图 1 测量液晶相位调制器相位调制特性的实验光路
Fig. 1 Optical setup used to investigate modulation properties of LC PM

液晶相位调制器的透过光强随灰度级的变化关

系在液晶综合测试仪 LCD-5016 上进行了测量, 实验时起偏器的起偏方向与液晶的取向方向相同.

2.3 液晶相位调制器的畸变波前调制特性

利用图 1 的光路和 2.2 中测得的相位延迟随灰度级的变化关系, 并根据共轭相位的原理进行了畸变波前调制的实验. 由于在整个液晶相位调制器的范围内, 屏的不平整度达到几个波长, 所以选取其中 1 cm^2 的面积, 包括 32×32 像素, 波前调制的实验不是在实时的情况下进行的.

3 实验结果与讨论

图 2 左是实验测得的液晶相位调制器的相位延迟随灰度级变化的关系. 可以看出相位延迟的范围是 $0.38 \mu\text{m}$, 即相位调制量是 $0.38 \mu\text{m}$, 要比理论值小, 这是由于在器件更换液晶的同时没有相应的更换液晶的驱动电路, 反映出了驱动电路与液晶的参量不相匹配的问题, 如果改进驱动电路还可以增加相位调制范围, 可以达到理论值. 同时增加液晶层的厚度和增大液晶的各向异性差值都可以增大相位调制量的范围, 但是会影响响应速度, 要根据实际应用选择合适的参量.

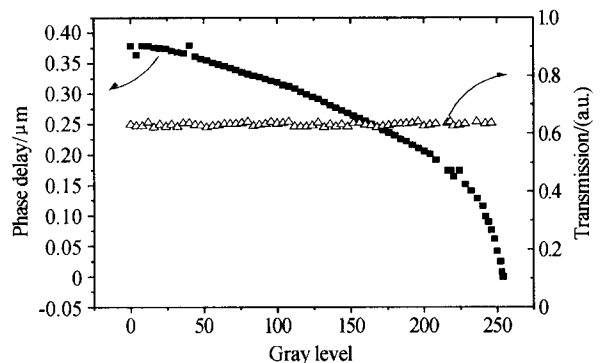


图 2 相位延迟和透过强度随灰度级变化的关系

Fig. 2 Measured phase delay and transmission as a function of applied gray levels of the parallel aligned LC PM

图 2 右是测得的透过强度随灰度级的变化关系, 可以看出在整个灰度级变化的范围内透过光的强度基本保持不变, 整个范围内透过光的强度变化小于 1.5% , 这与理论基本相符合, 从而保证了纯相位的调制特性.

调制畸变波前的实验结果如图 3, (a) 是调制前的光波波前, (b) 是调制后的光波波前. x 轴, y 轴表示 CCD 相机的二维像素坐标轴, z 轴表示光波前的相位. 从中可以看出在 1 cm^2 的面积上, 利用液晶相位调制器调制后, 波前相位的峰谷值 PV 可由调制前的 0.213λ 达到调制后的 0.070λ , 均方根值 RMS 由调制前的 0.036λ 达到调制后的 0.010λ , 可见利用所研制的纯相位液晶相位调制器调制后的准确度

PV 值接近 $\lambda/15$, RMS 可达到 $\lambda/100$. 这样高的调制准确度很难利用扭曲排列的液晶电视达到.

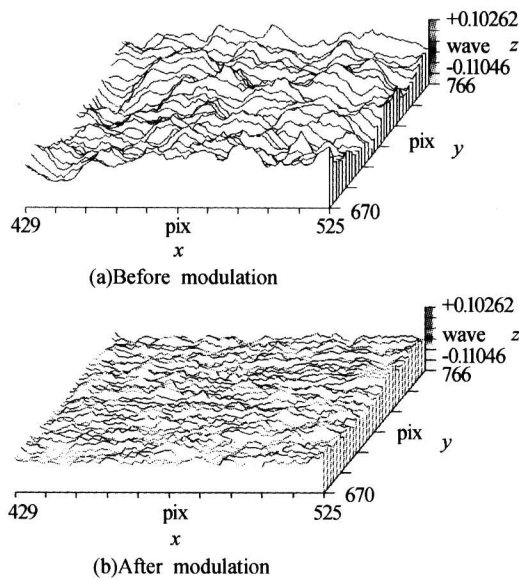


图 3 波前相位分布

Fig. 3 The 2-D plot of wavefront

图 4 是依靠傅里叶变换计算的 PSF (point-spread function), 其中(a)和(b)分别对应调制前和调制后的 PSF, 可见调制前后的光学系统的 PSF 得到了很大的改善, 斯特列尔比 SR 由调制前的 0.849 提高到调制后的 0.989. PSF 值可以很好的衡量光学系统成像质量的好坏, 可见利用这种液晶相位调制器是可以使光学系统得到理想的平面波, 达到理想的成像效果. 图 4 中 PSF 的二维图呈十字交叉分

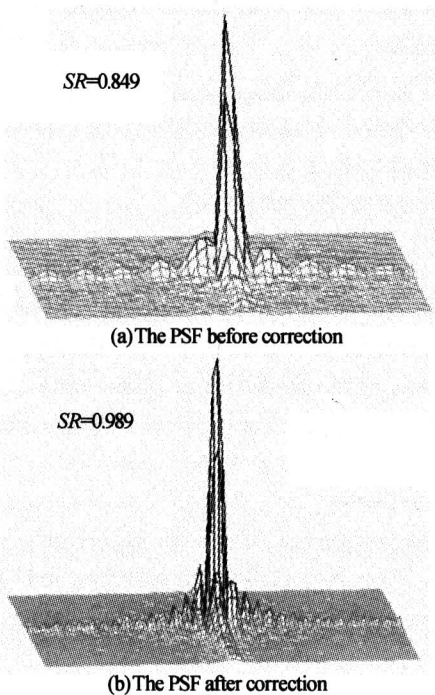


图 4 PSF 分布

Fig. 4 The comparisons of PSF between corrected wavefront and non-corrected one on the area of 1 cm^2

布, 这主要是由液晶的二维电极衍射造成的, 使得入射光波产生了多级衍射波前, 因此降低了液晶相位调制器的 0 级衍射效率, 但是中间 0 级的强度比其它级次大得多, 所以它不会影响高准确度畸变波前的调制.

对很多光学系统来说, 要求实时进行相位调制, 此时闭环带宽尤为重要, 由于条件所限, 对所研制的液晶相位调制器的响应速度的测试较困难, 所以另外制作了与所用液晶相位调制器的条件相近的平行排列小液晶盒, 液晶层的厚度为 $5.8 \mu\text{m}$, 进行了液晶的响应速度测试.

图 5 是测得的在 5 V 的电压下液晶的响应速度, 液晶的上升时间 8.5 ms, 下降时间 50 ms. 可以看出液晶的响应速度较慢, 这样的速度可以利用在静态或者低频下的相位调制. 如果要在高频下使用, 液晶的响应速度还要提高, 这方面有很多人在研究, 主要有两个方面的进展, 一是利用铁电液晶的微秒级响应速度, 但由于铁电液晶的双稳态性质使得它不能得到连续的相位调制^[14,15], 还有待于进一步改进. 另一个是利用液晶的双频特性^[6,16], 几乎所有的向列相液晶都具有双频特性, 依据这种性质改变驱动电路可以使液晶达到百微秒量级的响应速度.

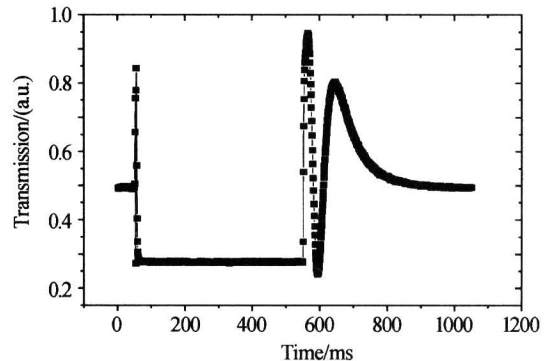


图 5 在 5 V 的电压下液晶的响应

Fig. 5 The transmittance as a function of response times

4 结论

研制了平行排列的 $640 \times 480 \times 3$ 像素的液晶相位调制器, 对其光学特性进行了研究. 对畸变波前进行了调制, 在 1 cm^2 的调制面积上, 调制后的 PV 值达到 0.07049λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 和 RMS 值达到 0.01λ , 即调制后的准确度 PV 值可接近 $\lambda/15$, RMS 可达到 $\lambda/100$, PSF 值达到 0.989, 这样高的准确度是很难利用扭曲排列型液晶电视达到. 证明了所研制的液晶相位调制器是可以利用在光学系统的波前相位调制上, 得到需要的波前. 另外, 这种纯相位液晶器件同样在相位滤波器、光束偏转器、相息图上有很好的应用前景.

参考文献

- 1 王谦,余飞鸿,岑兆丰,等. 用于液晶电光特性计算的无奇异点 2×2 矩阵研究. 光子学报, 2000, **29**(12): 1113~1117
Wang Q, Yu F H, Cen Z F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1113~1117
- 2 屠美,牟善松,黄海,等. 向列液晶预倾角与其弹性常量的相关性研究. 光子学报, 2003, **32**(7): 872~875
Tu M, Mou S S, Huang H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 872~875
- 3 王谦,何赛灵. 反射式液晶显示光学的理论计算. 光子学报, 2001, **30**(4): 410~416
Wang Q, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 410~416
- 4 Wang Xu, Daniel Wilson, Richard Muller, et al. Liquid-crystal blazed-grating beam deflector. *Appl Opt*, 2000, **39**(35): 6545~6555
- 5 Neto L, Roberge D, Sheng Y. Programmable optical phase-mostly holograms with coupled-mode modulation liquid-crystal television. *Appl Opt*, 1995, **34**(11): 1944~1950
- 6 Restainoa S R, David Daytonb, Steve Brownec, et al. On the use of dual frequency nematic material for adaptive optics systems; first results of a closed - loop experiment. *Opt Exp*, 2000, **6**(1): 2~6
- 7 Fernando Vargas-Martin, Prieto P M, Pablo Astal. Correction of the aberrations in the human eye with a liquid-crystal spatial light modulator: limits to performance. *J Opt Soc Am A*, 1998, **15**(9): 2552~2562
- 8 Konforti N, Marom E, Wu S T. Phase-only modulation with twisted nematic liquid crystal spatial light modulators. *Opt Lett*, 1988, **13**(3): 251~253
- 9 Pezzaniti J L, Chipman R A. phase-only modulation of a twisted nematic liquid crystal TV by use of the eigen polarization states. *Opt Lett*, 1993, **18**(18): 1567~1572
- 10 Davis J A, Moreno I, Tsai P, et al. Polarization eigenstates for twisted nematic liquid crystal displays. *Appl Opt*, 1998, **37**(5): 937~945
- 11 Judit Remenyi, Peter Varhegyi, Laszlo Domjan, et al. Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid crystal display at ~400 nm. *Appl Opt*, 2003, **42**(17): 3428~3434
- 12 Colin Soutar, Kanghua Lu. Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell. *Opt Eng*, 1994, **33**(8): 2704~2712
- 13 Ignacio Moreno, Davis J A, Dnelly K D, et al. Transmission and phase measurement for polarization eigenvectors in twisted-nematic liquid crystal spatial light modulators. *Opt Eng*, 1998, **37**(11): 3048~3052
- 14 Birch P M, James Gourlay, Love G D, et al. Real-time optical aberration with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator. *Appl Opt*, 1998, **37**(11): 2164~2169
- 15 Broomfield S E, Neil M A A, Paige E G S, et al. Binary optical of wavefront aberration using spatial light modulators. *SPIE*, 1995, **2534**: 167~175
- 16 David Dayton, Stephen Browne, John Gonglewski, et al. Characterization and control of a multielement dual-frequency liquid-crystal device for high-speed adaptive optical wave-front correction. *Appl Opt*, 2001, **40**(15): 2345~2355

The Wavefront Modulation Characteristics of the Parallel Aligned Liquid Crystal Device

Liu Yongjun^{1,2}, Xuan Li¹, Hu Lifa¹, Cao Zhaoliang¹, Li Dayu¹, Mu Quanquan¹, Lu Xinghai¹

1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-01-04

Abstract The novel parallel-aligned liquid crystal spatial light modulator (LC SLM) is introduced, which is designed to operate at phase-only mode for wavefront correction. The optical characteristics characteristics of the LC SLM were measured and analyzed theoretically. The PV (Peak Valley) value of 0.07049λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) after correction on the area of $1\ \text{cm}^2$ was obtained with our phase-only LC SLM. And Strehl ratio of 0.989 in our experiment indicates the approximate upper limit of the ability of LC SLM to correct a aberrated wavefront when it is used in adaptive optical system.

Keywords Phase modulator; Liquid crystal; Parallel-aligned; Pure-phase



Liu Yongjun received his B. S. degree in Physics from Inner Mongolia University in 2001. Currently, he is working for the Ph. D. degree in State Key Laboratory of Applied Optics in CIOMP, Chinese Academy of Sciences. His research interests include LC device and its optical application.