

位相可控液晶空间光调制器的研究*

刘永军^{1,2} 胡立发¹ 曹召良¹ 李大禹¹ 穆全全¹ 鲁兴海¹ 宣 丽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 论述了平行排列液晶的位相调制理论,进行了理论结果的计算模拟.研制出平行取向 TFT 型液晶空间光调制器并分析了其位相调制特性.结果表明,此平行取向的液晶空间光调制器可用于位相调制,其调整量优于 0.7 μm,最小调整步长是 0.052 μm.在 ZYGO 干涉仪上进行的位相控制实验,得到了很好的实验结果.

关键词 液晶;空间光调制器;位相

中图分类号 O753;TP217

文献标识码 A

0 引言

液晶空间光调制器以其良好的稳定性,可进行编程实时控制,低电压可获得较大的位相变化等优点,在光学信息处理方面占有重要的地位^[1~3].且凭借其制作简单,低价格,易控制等优点受到广大学者的关注.但大多数的研究人员出于方便考虑多研究扭曲型液晶电视作为位相型空间光调制器,其在位相调制的时候伴有振幅调制^[4~8],不能得到纯的位相调制,这样影响了位相调制特性.同时扭曲的液晶空间光调制器不能用于光学模式识别,相位相关滤波器和可编程衍射光学元件等^[9],限制了液晶空间光调制器的广泛应用.本文提出一种新型平行排列、电寻址 TFT 型液晶空间光调制器,克服了扭曲型液晶空间光调制器的缺点.对此类型液晶的位相调制原理进行了理论和实验的研究.实验结果证明,此类型液晶空间光调制器凭借其位相调制范围和调制准确度,可进行光波波前的纯位相控制.

1 理论与计算模拟分析

1.1 液晶的位相调制原理

向列相液晶呈细长棒状,极化率和电导率等有明显的各向异性.对于平行取向的液晶来说,在电场的作用下液晶分子易发生偏转,不同的电场使液晶分子的倾斜角度不同,且沿液晶层的法线方向不同位置处的液晶倾角也不同,会引起不同的有效折射率.如使人射光的偏振方向与液晶取向方向相同的角度垂直入射,会影响光束在液晶中的有效光程,因此可以通过给液晶施加电压的方法控制入射光的位相.

根据液晶连续弹性体理论,电场作用下液晶体系的 Gibbs 自由能可表示为^[10]

$$F = \frac{1}{2} \int_V \{ K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22} [\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]^2 + K_{33} [\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^2 - \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \} dv \quad (1)$$

其中 K_{11}, K_{22}, K_{33} 分别是液晶分子的展曲弹性常数、扭曲弹性常数和弯曲弹性常数, $\mathbf{n}(x, y, z)$ 是液晶分子的指向矢, \mathbf{D}, \mathbf{E} 分别是电位移矢量和电场强度矢量.

由于研制的液晶空间光调制器对液晶是强锚定,在这种情况下平行排列液晶的 Gibbs 自由能式(1)可写为^[11]

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 dz - \frac{1}{2\epsilon_0} \int_0^d \frac{D_z^2}{\epsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \theta} dz \quad (2)$$

式中 ϵ_0 是真空中介电常数, $\epsilon_{\perp}, \epsilon_{\parallel}$ 分别是液晶垂直和平行方向的介电常数, z 轴是液晶层的法线方向, D_z 是 z 轴方向的电位移矢量, d 为液晶层厚度, θ 是液晶分子的倾角.

由式(2)可得沿 z 轴方向上某一位置与该位置处液晶倾角的关系为

$$\left[\frac{dz}{d\theta} \right]^2 = \frac{K_{11} (1 + K \sin^2 \theta)}{C - \frac{D_z^2}{\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta)}} \quad (3)$$

式中 $K = (K_{33} - K_{11}) / K_{11}, r = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) / \epsilon_{\perp}, C = D_z^2 / [\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta_{\max})], \theta_{\max}$ 是液晶分子的最大倾角,通过两边界层的边界条件解式(3)就可以得到在给定的电压下液晶盒内部分子倾角的分布.

根据各向异性介质的折射率椭球公式

$$n_{\text{eff}}(\theta_z) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta_z + n_e^2 \sin^2 \theta_z)^{1/2}} \quad (4)$$

就可以得到有效光程为

$$L = d \cdot n_{\text{eff}} = \int_0^d n_e(z) dz \quad (5)$$

*国家自然科学基金(50473040);吉林省科委基金(20020603)资助项目
Tel:0431-6176319 Email:liuyj@ciomp.ac.cn
收稿日期:2004-11-03

所以得到位相为

$$\phi = 2\pi L/\lambda \tag{6}$$

1.2 计算模拟分析

根据所用日本油墨公司生产的 RDP-92975 型向列相液晶参数, $K_{11} = 11.9\text{PN}$, $K_{33} = 13.6\text{PN}$, $\epsilon_{//} = 12.3$, $\epsilon_{\perp} = 4.1$, $n_o = 1.516$, $n_e = 1.714$, 计算模拟的结果如图 1、图 2。从图 1 中可以看出液晶的倾角随着所加电压的增加而增加, 垂直液晶层向中间方向倾角逐渐加大, 到中间倾角达到最大且成对称分布。从图 2 中可以看出, 在 1 V 以前由于低于液晶的阈值位相基本保持不变, 电压高于 1 V 时, 随电压的增大而减小。

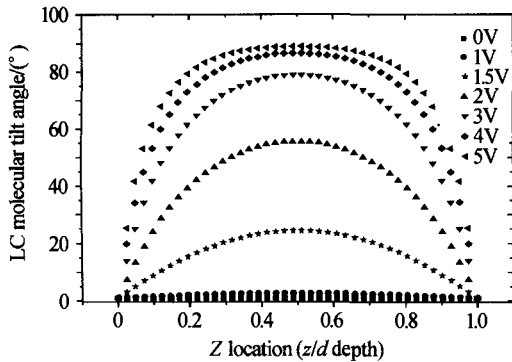


图 1 计算模拟不同电压下液晶倾角与其所在盒内位置的关系

Fig. 1 The tilt angle along the normal of LC cell as a function of z at different applied voltages simulated by computer

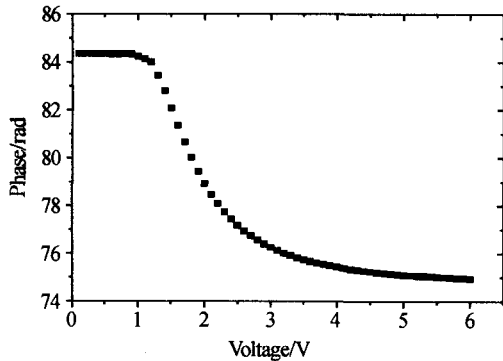


图 2 计算模拟电压与位相的关系

Fig. 2 The phase as a function of voltage by computer simulation

2 实验结果与讨论

2.1 液晶空间光调制器的结构设计

研制了 TFT 型 1920×480 像素, 像素单元 $100 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 像素间距 $10 \mu\text{m}$ 的液晶空间光调制器, 液晶的取向膜成反平行排列, 液晶层厚为 $5 \mu\text{m}$, 液晶的折射率各向异性在波长 632.8 nm 处为 0.198 。为了方便, 控制其中的 96×32 个像素, 液晶空间光调制器用 6 位控制器控制。

2.2 液晶空间光调制器的位相控制特性

利用法国 JOBIN YVON 公司的光谱型椭圆偏仪测出了灰度级与相对位相延迟的关系, 64 级灰度逐级测量, 测得五次取平均值结果, 如图 3。由图 3 可以看出, 液晶空间光调制器调整量优于 $0.7 \mu\text{m}$, 最小调整步长 $0.052 \mu\text{m}$ 。在低灰度级间光程变化比较平缓, 在高灰度级间变化比较陡峭, 这是由于液晶的非线性和电压的不均匀性造成的。

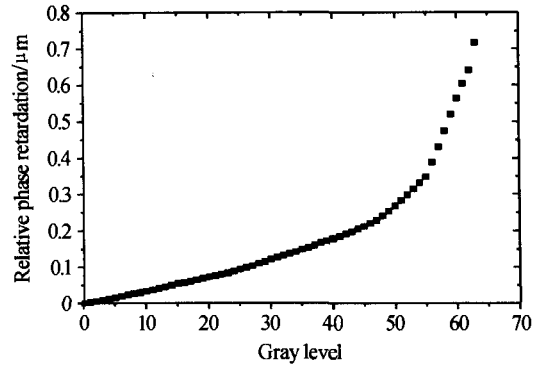


图 3 测得相对位相延迟与灰度级之间的关系

Fig. 3 The relative phase retardation as a function of grey level

利用图 3 测得的灰度级与相对位相延迟的关系, 在美国 ZYGO 公司的非索型 GPI1000 干涉仪进行了位相调制的实验, 实验装置如图 4。使用 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光光源。利用高质量的晶体偏振片, 其对光起偏的方向与液晶分子的取向方向一致, 使光垂直入射液晶空间光调制器 (LCSLM)。液晶空间光调制器是由计算机通过控制器控制。

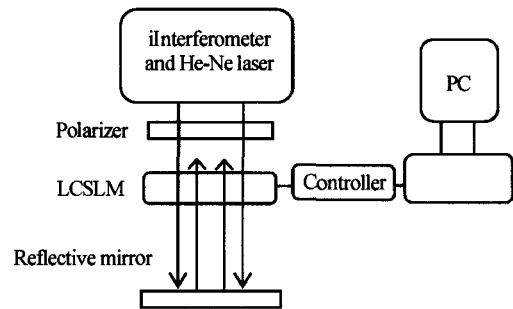


图 4 进行相位控制的实验装置

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup of phase controlling

图 5(a) 是液晶空间光调制器施加相同的电压所得到的光波波前, 反映器件本身的不平。图 5(b) 是补偿了图 5(a) 的器件本身不平后, 在驱动的行上每间隔 16 行施加灰度级使之成栅形, 且使栅之间的位相差是 π 时得到的实验结果。图 5(c) 同样是补偿了图 5(a) 的器件本身不平后, 沿驱动的行方向上逐行施加灰度级, 使波面产生均匀倾斜且最大倾斜量是 $\lambda/5$ 的实验结果。三幅图的 x 轴、 y 轴表示干涉仪 CCD 的像素, 单位是像素, z 轴表示波前相位的起伏程度单位是波长。

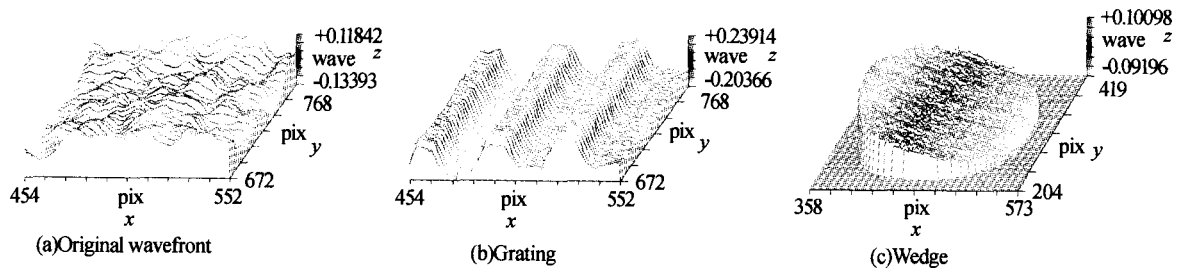


图 5 ZYGO 干涉仪得到位相分布图

Fig. 5 The obtained the phase distribution with ZYGO interferometer

由图 5(a)可以看出,由于液晶基板的不平和器件的加工造成波面起伏是 0.25λ ,这些波面起伏可以通过器件本身的位相补偿,调制成完好平面波.可以看出图 5(b)凸的顶部和凹的底部都较平,且位相差非常接近 π ,可看出整体有一个小的倾斜量,这是由系统本身造成的,不会影响顶部和底部的 π 位相差.图 5(c)可以看出液晶空间光调制器的位相是可逐渐控制的.后面两幅图可以说明,研制的液晶空间光调制器可以用来产生较为精确的位相控制,可在相移器、波前校正器、光束偏转器等需要波面调制的方面使用.

3 结论

研制了平行取向的位相型液晶空间光调制器,对其位相调制特性进行了研究.利用所得到的灰度级与相对位相延迟的关系,在干涉仪上进行精确的位相控制.结果表明,液晶空间光调制器是可进行编程控制位相的,这种位相空间光调制器由于容易控制、稳定性好、价格低、调制的准确度高,在光学相关、光学识别、相位比较技术以及自适应光学系统等光信息处理方面有着重要的应用前景.

参考文献

- 1 王长顺,杨延强,邱勇,等.偶氮苯侧链聚合物液晶薄膜的光致双折射和永久光学性存储研究.光子学报,1998,27(10):906~910
Wang C S, Yang Y Q, Qiu Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(10):906~910
- 2 陈怀新,魏宏刚,陈祯培,等.采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片.光子学报,2001,30(5):562~566
Chen H X, Wei H G, Chen Z P, et al. *Acta Photonica*

Sinica, 2001, 30(5):562~566

- 3 王滨,余飞鸿,郭茂田,等.利用液晶光阀实现道路光学图像的实时边界提取.光子学报,1999,28(3):276~279
Wang B, Yu F H, Guo M T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(3):276~279
- 4 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
- 5 李大海,潭泽富,陈怀新,等.采用环路径向剪切干涉法测量液晶电视的相位调制特性.光子学报,2002,31(8):970~974
Li D H, Tan Z F, Chen H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(8):970~974
- 6 Lu K, Saleh B E A. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator. *Opt Eng*, 1990, 29(3):240~246
- 7 Konforti N, Marom E, Wu S T. Phase-only modulation with twisted nematic liquid crystal spatial light modulation. *Opt Lett*, 1988, 13(3):251~253
- 8 Judit Remenyi, Peter Varhegyi, Laszlo Domjanet, et al. Amplitude, phase and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at ~ 400 nm. *App Opt*, 2003, 42(17):3428~3434
- 9 Davis J A, Tsai P, Cottrell D M, et al. Transmission variations in liquid crystal spatial light modulator caused by interference and diffraction effects. *Opt Eng*, 1999, 38(6):1051~1057
- 10 Thurston R N, Berreman D W. Equilibrium and stability of liquid-crystal configuration in an electric field. *J Appl Phys*, 1981, 52(1):508~509
- 11 Wang X, Wilson D, Muller R, et al. Liquid crystal blazed-grating beam deflector. *App Opt*, 2000, 39(35):6545~6555

The Investigation of Controllable Phase Liquid Crystal Spatial Light Modulator

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

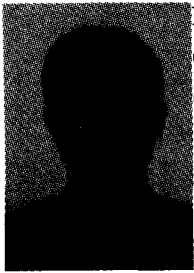
*1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033*

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

Received date: 2004-11-03

Abstract In the paper, the phase modulation of parallel aligned LC was discussed theoretically. The theoretical results were simulated with computer. Liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) with parallel alignment TFT was prepared. And its properties of phase modulation were investigated. The results indicated that phase was controllable in the range of applied grey levels. The depth of modulation was up to $0.7 \mu\text{m}$. And the precision was $0.052 \mu\text{m}$. The experiment was conducted on the ZYGO interferometer, and good results were obtained.

Keywords Liquid crystal; Spatial light modulator; 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.