

液晶空间光调制器相位调制的色散特性研究*

李大禹^{1,2}, 穆全全^{1,2}, 胡立发¹, 曹召良^{1,2}, 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, 长春 130033)

(2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 提出用椭偏仪法测试了自制液晶空间光调制器(LCSLM)的相位调制色散特性. 椭偏仪法具有光路简单, 结果准确, 测试自动化等优点, 相比单色光源干涉仪测量方法更加简单实用. 结果表明, 在短波长(450 nm)处, LCSLM 的相位调制能力为 1.54λ ($\lambda=450$ nm), 在长波长(800 nm)处, LCSLM 的相位调制能力为 0.70λ ($\lambda=800$ nm), 与理论分析的色散特性基本一致.

关键词: 液晶; 空间光调制器; 色散; 椭偏仪

中图分类号: O753; TP217

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)06-1065-3

0 引言

在不同波长和电压作用下, 液晶空间光调制器具有不同的相位值. 这种色散特性可以应用在色散补偿, 白光波前校正, 光通信等许多领域, 具有十分广泛的应用前景. 目前, 对液晶色散特性的研究主要是对液晶双折射 Δn 和光强的研究, 但没有考虑到施加电压后的相位色散特性. 大多数相位都是通过干涉仪进行测量, 所以相位都是在单波长下测得的. 干涉测量光路复杂, 测试手段麻烦, 而且对于色散相位测量需要通过引入分光仪产生单色光源, 再对不同波长下的单色光源分别测量. 本文提出用光谱型椭偏仪测量法进行测量, 该方法具有光路简单, 结果准确, 测试自动化等优点. 利用光谱型椭偏仪实现了液晶光调制器在 450 nm 到 800 nm 波长范围内的相位测量.

1 液晶空间光调制器光电特性的理论计算

根据液晶连续弹性体理论, 电场作用下液晶的 Gibbs 自由能可表示为^[7]

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

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

对于平行排列液晶的 Gibbs 自由能公式可以写

为^[8]

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

式中 ϵ_0 是真空介电常量, ϵ_{\perp} 、 ϵ_{\parallel} 分别是垂直和平行方向的介电常量, 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液晶倾角的关系为

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

式中 $K = (K_{33} - K_{11}) / K_{11}$, $r = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) / \epsilon_{\perp}$, $C = D_z^2 / [\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta_m)]$, θ_m 是液晶分子的最大倾角, 通过两边界层的边界条件解方程(3)可知给定电压下液晶和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

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

就可得到有效光程差为

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

可得相位

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (6)$$

2 实验过程

光谱型椭偏仪是一种专门测试薄膜厚度和折射率的器件, 通过特殊光路的搭建, 它可用于测量透射式液晶空间光调制器的相位, 而且可以进行多波长测量. 实验中使用的空间光调制器是经过特殊加工的. 将 640×480 的 TFT-彩色液晶屏去掉彩膜和前

* 国家自然科学基金(50473040, 59973020, 60277033, 19974046)和吉林省科委基金(20020603, 20010579)资助
Tel: 0431-6176016 Email: lidayu@ciomp.ac.cn
收稿日期: 2005-03-22

后偏振片,前后两基板摩擦方向互相平行,再注入油墨公司生产的 RDP-92975 型向列相液晶,制作成盒厚为 5 μm 的平行排列液晶空间光调制器.

实验使用的是法国 JY 公司生产的 UVISEL SPME 型椭圆仪. 它由氙灯光源、起偏器、光弹调制器、检偏器、分光光谱仪、光电探测计算机和信息获取与控制计算机组成. 进行液晶空间光调制器的相位测量时,如图 1 水平放置起偏器,光弹调制器,检偏器,将液晶空间光调制器放在起偏器与光弹调制器之间. 起偏器的偏振方向与 x 轴成 45°,液晶空间光调制器的液晶排列方向与 x 轴成 0°,检偏器的

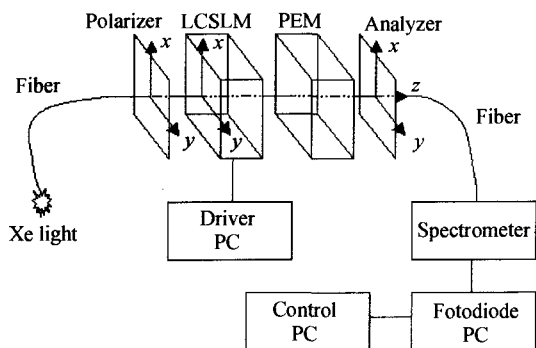


图 1 光谱型椭圆仪测量相位结构
Fig.1 Schematic diagram of measurement of phase with spectroscopic ellipsometer

偏振方向与 x 轴成 0°. 这样由氙灯发出的光经起偏器产生线偏振光,在 x 轴和 y 轴上有 E_x, E_y 两个分量,垂直入射到液晶空间光调制器产生 x 轴方向和 y 轴方向的光程分别为 $\Delta x(v), \Delta y$, v 是液晶空间光调制器的驱动电压. 由于光弹调制器可以检测出 x 轴方向和 y 轴方向的光延迟 $\Delta(v) = \Delta x(v) - \Delta y$. 所以液晶空间光调制器的相位-电压关系为

$$\delta x(v) = \Delta x(v) - \Delta x(0) = (\Delta(v) + \Delta y) - (\Delta(0) + \Delta y) = \Delta(v) - \Delta(0)$$

光谱型椭圆仪可以测量不同波长下的光延迟,这样就可以测量液晶空间光调制器在不同波长下的相位-电压关系.

3 模拟计算与实验结果的比较

实验中选取 450 nm~800 nm 波段进行测量,光源谱 $\Delta\lambda(450 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm})$ 的分辨率为 10 nm,即每个实验点之间的间隔只有 10 nm. 实验上采用日本油墨公司的 RDP-92975 型向列相液晶,其参量为 $K_{11} = 11.9 \text{ PN}, K_{33} = 13.6 \text{ PN}, \epsilon_{//} = 12.3, \epsilon_{\perp} = 4.1$, 589 nm 下的 $n_o = 1.516, \Delta n = 0.198$,由于实验条件有限,只能测出不同波长下的 $\Delta n(\lambda)$ 值. 又因为不同波长下 n_o 值相差很小,所以这里假设 $n_o(\lambda) \approx 1.516, n_e(\lambda) \approx n_o + \Delta n(\lambda) \approx 0.601 - 0.0016\lambda + 2.12548 \times$

$10^{-6} \lambda^2 - 9.67337 \times 10^{-10} \lambda^3$, 盒厚 5 μm,由 $K_{11}, K_{33}, \epsilon_{//}, \epsilon_{\perp}$, 利用式(3)先模拟计算出在 1.5 V 阈值电压,2.5 V 中值电压,3.5 V 饱和电压下指向矢倾角与空间位置关系如图 2.

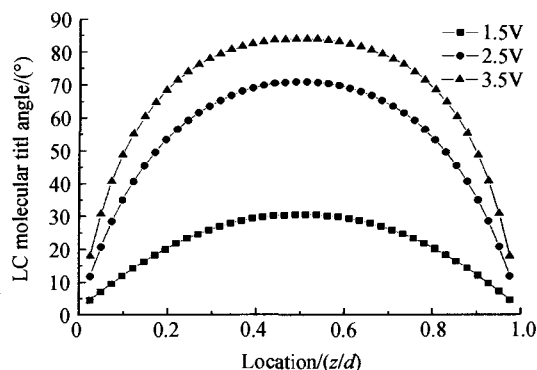


图 2 液晶指向矢在外加电压作用下倾角与空间位置的关系
Fig.2 The tilt angle along the normal of LC cell as a function of z at different applied voltages simulated by computer

图中 z 为液晶层的不同深度, d 为液晶盒的厚度, z/d 即为液晶层的空间位置关系. 再由图 2. 倾角与空间位置关系和 $n_o(\lambda), n_e(\lambda)$ 模拟计算出在不同电压下相位与波长之间的关系如图 3 中的实线所示,相应的实验值在图中以实心方块表示.

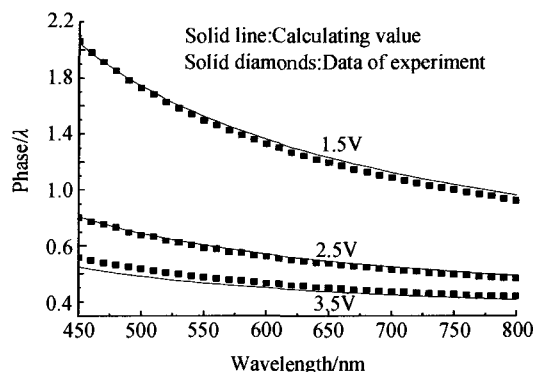


图 3 液晶空间光调制器在不同电压下,相位与波长之间的关系

Fig.3 The phase as a function of wavelength at different applied voltages

从图 3 可以看出,在不同电压下色散特性的模拟计算结果与实验值符合得较好. 至于实验值与计算值的偏离除了实验误差等因素外,与 $n_e(\lambda), n_o(\lambda)$ 的准确性也有关系. 从上述计算结果来看,本文的相位波长关系的模拟计算提供了比较可靠的液晶色散特性.

从图 3 中还可以看出,在短波长 450 nm 处, LCSLM 的相位调制能力强,有 $1.54\lambda(\lambda = 450 \text{ nm})$. 随着波长的逐渐变大, LCSLM 的相位调制能力逐渐变小,在长波长 800 nm 下, LCSLM 的相位调制能力只有 $0.70\lambda(\lambda = 800 \text{ nm})$,相应地 LCSLM 的调制准确度也随之变小. 由此可以得知,在大范围相

位调制的要求下,可以选取短波长光源进行相位调制.而在高精度相位调制的要求下,就应选取长波长光源来进行相位调制.

4 结论

本文研究了自制平行排列透射式液晶空间光调制器的相位色散特性,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.介绍了利用光谱型椭圆偏振仪测量色散特性的方法,能够大幅度降低色散相位测量的难度,为空间光调制器的相位补偿提供了有效的测试手段.

参考文献

- [1] WANG Qian, HE San-ling. Simulation and comparison study of liquid crystal director distri[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5):0926-0932.
王谦,何赛灵.液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J]. *物理学报*, 2001, **50**(5):0926-0932.
- [2] CHEN Huai-xin, WEI Hong-gang, CHEN Zhen-pei, et al. A controllable array fresnel zone plates using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):562-566.
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[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5):562-566.
- [3] WEI Heng-zheng, ZHANG Zhi-gang, CHEN Sheng-hua, et al. Chirp compensation of femtosecond pulse by liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5):1391-1395.
位恒政,张志刚,陈盛华,等.液晶空间光调制器在飞秒脉冲色散补偿中的应用[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5):1391-1395.
- [4] WU S T. Birefringence dispersions of liquid crystal [J]. *Physical Review A*, 1986, **33**(2):1270-1274.
- [5] LIU Yong-jun, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, et al. The investigation of controllable phase liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1799-1802.
刘永军,胡立发,曹召良,等.相位可控液晶空间光调制器的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12):1799-1802.
- [6] HU L F, XUAN L, LIU Y J, et al. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Optics Express*, 2004, **26**(12):6403-6409.
- [7] DAVIS J A, TSAI P, COTTRELL D M, et al. Transmission variations in liquid crystal spatial light modulator caused by interference and diffraction effects[J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(6):1051-1057.
- [8] THURSTON R N, BERREMAN D W. Equilibrium and stability of liquid-crystal configuration in an electric field[J]. *J Appl Phys*, 1981, **52**(1):508-509.
- [9] WANG Chang-shun, YANG Yan-qiang, QIU Yong, et al. Photoinduced birefringence and reversible optical storage in liquid crystalline azobenzene side chain polymers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(10):906-910.
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[J]. *光子学报*, 1998, **27**(10):906-910.
- [10] WANG Bin, YU hong-fei, GUO Mao-tian, et al. The real time edge extraction of optical road images using liquid crystal light valve[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(3):276-279.
王滨,余鸿飞,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[J]. *光子学报*, 1999, **28**(3):276-279.
- [11] LIU Yong-jun, XUAN Li, HU Li-fa, et al. The wavefront modulation characteristics of the parallel aligned liquid crystal device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):65-68.
刘永军,宣丽,胡立发,等.平行排列液晶器件的波前调制特性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):65-68.

The Investigation of Phase Dispersive Characteristics About Phase-only Liquid Crystal Spatial Light Modulator

LI Da-yu^{1,2}, MU Quan-quan^{1,2}, HU Li-fa¹, CAO Zhao-liang^{1,2}, LU Xing-hai¹, XUAN Li¹

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

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received date: 2006-03-22

Abstract: The measurements of phase dispersions characteristics of liquid crystal spatial light modulator by ellipsometer are described. It was found that dispersions phase of liquid crystal is 1.09λ at 1.5 V threshold voltage and 0.24λ at 3.5 V saturation voltage in 450 nm ~ 800 nm wave band. Theory on dispersions characteristics was analysed and found to have agreement with experimental result.

Key words: Liquid crystal; Spatial light modulator; Dispersive; Ellipsometer



LI Da-yu received his B. S. degree in Electronics from Jilin University in 2002. 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.