

文章编号: 1001-3806(2011)05-0652-04

液晶可变延迟器研制及其电控相位延迟测量

江继军, 张大勇, 李剑峰*

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了获取线性易控的可变延迟器, 研制了基于 SLC-7607A 平行向列相液晶的可变延迟器。简要阐述了液晶可变延迟器工作原理和研制工艺过程, 采用基于 Stokes 参量的可变延迟器的相位延迟测量新方法, 在入射光波长为 632.8nm 时, 测出了可变延迟器的相位延迟与控制电压关系特征曲线, 测量结果具有很好的重复性。结果表明, 电压在 1V~2.7V 区间, 可变延迟器具有线性易控的特点, 并拟合出它们的线性关系式。该实验结果对液晶可变延迟器的研制、测量和使用都具有一定的参考价值。

关键词: 光学器件; 液晶; 可变延迟器; 斯托克斯参量; 线性

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.021

Liquid crystal variable retarder development and electric-control retardation measurement

JIANG Ji-jun, ZHANG Da-yong, LI Jian-feng

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to get linearly-controlled variable retarder, a liquid crystal variable retarder (LCVR) was developed based on SLC-7607A parallel nematic liquid crystal. Its operating principle and technology was described. New method measuring retardation of the variable retarder based on Stokes parameters was put forward, and the characteristic curve describing relationship of retardation and voltage was well reproducibly drawn. Experimental result indicates that retardation is inversely proportional to the applied voltage ranging from 1V to 2.7V, and the fitted linear relation is achieved. The obtained result attributes to the development, measurement and application of LCVRs.

Key words: optical devices; liquid crystal; variable retarder; Stokes parameter; linearity

引言

液晶是具有晶体各向异性性质的液态物质, 分子的排列不像晶体结构那样牢固, 易受电场、磁场等外部条件作用而重新排列, 这导致液晶具有电控双折射特性, 尤其是向列相液晶, 这种特性表现得尤为突出。利用这种特性可以将液晶加工成各式各样的电控光学器件。其中液晶相位可变延迟器 (liquid crystal variable retarder, LCVR) 产生的相位延迟受电压控制, 无须机械转动, 而且响应时间快, 可达到毫秒数量级。同时与传统的电光晶体器件相比, 液晶可变光学相位延迟器具有工作电压低、功耗小、成本低、双折射率大、无须成型加工和器件制作容易等优点。因而在液晶显示、信

息处理、光通信等方面都具有广泛的用途, 例如制作波片式偏振控制器^[1-3]、液晶调谐滤光片^[4-5]等。

为了使 LCVR 可以对入射光状态进行精确的调制, 必须对 LCVR 在特定波长下、产生不同的相位延迟所对应的电压值进行标定, 即获取准确的电光特性曲线。相位延迟器相位延迟量的精确测量一直受到光学工作者的关注。当前国内外测量相位延迟量的方法主要有补偿法^[6]、分束差动测量法^[7]、偏光干涉法^[8]等。但上述这些方法存在着仅适合测量固定的相位延迟或者对测量装置的对准精度要求较高等缺点。

作者阐述了 LCVR 的工作原理, 研制出了基于向列相液晶的电控相位可变延迟器, 给出了基于 Stokes 参量的可变相位延迟测量方法, 建立了 LCVR 相位延迟特性测量系统, 并进行了相关的测量与分析。

1 液晶可变相位延迟器

1.1 液晶的电控双折射原理^[9]

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。当沿 z 向加电压后, 所有液晶分子都

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目 (2009A0401024)

作者简介: 江继军 (1979-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事液晶光电器件方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jianfeng816@sohu.com

收稿日期: 2010-10-21; 收到修改稿日期: 2011-01-05

倾向于与外电场方向保持一致而产生一个倾角 θ , 不同的电场使液晶分子的倾斜角度不同, 关系为:

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

式中, V_{th} 是倾斜阈值电压, $V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0(\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp})}}$, 其中, K_{11} 是液晶分子的展曲弹性常量, ϵ_0 是真空中介电常量, $\epsilon_{//}, \epsilon_{\perp}$ 分别是平行和垂直液晶分子轴方向的介电常量; V_0 为液晶分子偏转到某一特定角度时的电压。如果外电压小于该阈值, 指向矢不发生沿 z 轴方向倾斜, 当外电压大于阈值电压 V_{th} 时, 液晶分子发生偏转, 当电压增加时, 倾角增大, 直至达到饱和倾角 $\theta_{sat} = \pi/2$ 。

随着 θ 的变化, 光沿 z 轴传播的折射率也会发生变化:

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

分析上述模型可知, 液晶分子排列是均匀的, 倾角与 z 无关, 如果将界面效应考虑进来, 则(2)式倾角应为等效的倾角 $\bar{\theta}$ 。但根据 LU 等人的研究分析^[9], 在忽略上述因素影响情况下, 上述简单模型用 θ 直接代替 $\bar{\theta}$, 依然可以取得准确的结果。

那么相位延迟可以表示为:

$$\delta = 2\pi(n_{eff} - n_o)d/\lambda \quad (3)$$

1.2 液晶可变相位延迟器的制作

液晶可变相位延迟器的结构如图 1 所示。为了精确控制液晶可变相位延迟器的最大光学位相延迟, 必须精确控制液晶盒的有效盒厚, 其厚度通过放置确定尺寸的玻璃微珠实现, 作者选用的玻璃微珠直径为 $10\mu\text{m}$ 。液晶可变相位延迟器需要一个沿通光方向可准确控制强度的电场, 使液晶分子的指向发生旋转, 从而改变光学相位延迟量。为实现电控, 在石英玻璃基板镀上透明的氧化锡钢(indium tin oxide, ITO)导电膜, 其面电阻为 $500\Omega/\text{cm}^2$ 。为了使液晶具有晶体的双折射光学特性, 需诱导液晶层中的液晶分子按照特定的方向排列。将 PI 涂敷在 ITO 导电膜层上, 然后经烘

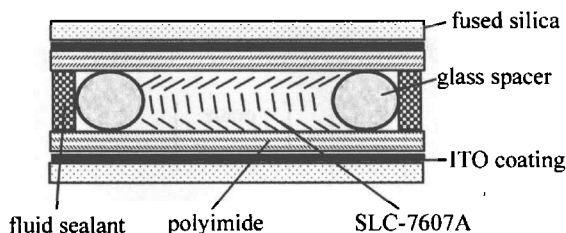


Fig. 1 Structural pattern of LCVR

烤、摩擦等工艺处理后, 就可以使液晶分子按特定的方向排列, 本文中采用反平行排列。最后在四周涂上密封边框胶和灌注液晶材料, 即可完成一个 LCVR 的制作。液晶材料采用永生华清液晶有限公司提供的 9S0910700 型号液晶, 清亮点温度为 63°C , 在 21°C 温度条件下, 通过多波长阿贝折射率仪测量在 632.8nm 波长时的最大双折射率差值 $\Delta n = 0.152$ 。

2 测试原理

测试原理如图 2 所示, 激光器采用波长为 632.8nm 、功率为 10mW 的 He-Ne 激光器。起偏器的消光比为 5×10^5 , 通光口径 20mm 。待测可变光学相位延迟器采用平行向列相液晶材料制作, 厚度为 $10\mu\text{m}$, 控制信号源由任意波函数发生器产生。Stokes 参量测量仪工作波长范围为: $400\text{nm} \sim 1700\text{nm}$, 工作频率大于 30Hz 。

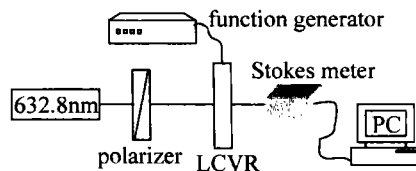


Fig. 2 Schematic of the measurement setup

如图 3 所示, 当经过起偏器后的线偏振光垂直入

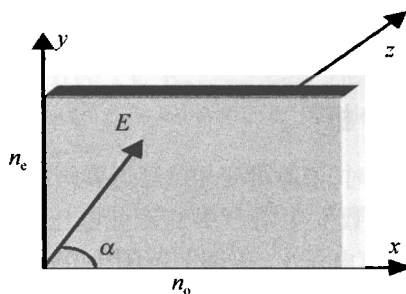


Fig. 3 Schematic plan of LCVR Jones matrix derivation

射到的液晶可变相位延迟器时, 分解成沿原方向传播、振动方向互相垂直的 o 光和 e 光, 相应的折射率为 n_o 和 n_e 。系统坐标系规定如下: x 轴表示液晶可变相位延迟器 n_o 轴方向, y 轴表示 n_e 轴方向, z 轴表示光束传播方向。由于两光在波片中的速度不同, 当通过厚度为 d 的可变相位延迟器后, 产生相应的相位延迟量为 δ 。该可变相位延迟器的琼斯矩阵可以表示为:

$$J_{retarder} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

入射激光经起偏器后为任意确定的线偏振态, 振幅经归一化处理后用琼斯矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, α 为线偏振光振动方向和 x 轴夹角, 下标 in 和 out 分别表示入射光和出射光, 那么, 经过液晶可变相位延迟器后, 出射光用琼斯矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{x,out} \\ E_{y,out} \end{bmatrix} = J_{retarder} \cdot \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ e^{i\delta}\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

Stokes 参量测量仪测量的 3 个参量 S_1, S_2, S_3 与出射光琼斯矩阵元素的关系表示为^[10]:

$$S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^* = \cos 2\alpha \quad (7)$$

$$S_2 = E_x E_y^* - E_y E_x^* = \sin 2\alpha \cos \delta \quad (8)$$

$$S_3 = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) = \sin 2\alpha \sin \delta \quad (9)$$

式中, * 表示复共轭运算, 根据(8)式和(9)式, 液晶可变相位延迟器产生的相位延迟为:

$$\delta = \arctan(S_3/S_2) + k\pi \quad (10)$$

在待测液晶可变相位延迟器相位延迟量的测量中, 需要进行 k 参量的确定。函数发生器从饱和电压开始, 采用递减方式加电。 k 值与 S_2 经过零点的次数相等, 因此, k 值的确定转变为 S_2 过零点的测量。在饱和电压加电状态, 电控光学相位延迟器的 n_e 与 n_o 基本接近, S_2 还未经过零点, 此时 $k=0$ 。逐渐减小电压, 测量 S_2 过零点次数即可确定 k 值, 直至电压降为 0。

3 结果与分析

实验测量时, 液晶可变相位延迟器所加的控制信号是由任意波函数发生器产生的正弦电压信号, 频率为 1000Hz, 峰峰值电压 V_{pp} 调节范围为 0V ~ 20V。入射光分别平行于液晶可变相位延迟器 n_o 和 n_e 轴的两个正交偏振分量的相位延迟将受到外加控制电压信号的调制, 从而出射光的偏振态携带了液晶可变相位延迟器的相位延迟信息。电压从饱和值逐渐降低, 出射光的偏振态由 Stokes 参量测试仪测量, 结果如图 4 所示。

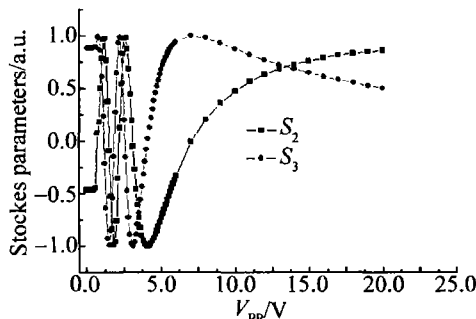


Fig. 4 Voltage-dependent Stokes parameters of LCVR

Stokes 参量测试仪的测量结果由 PC 机采集记录, 并根据(10)式, 在 MATLAB 平台上编写程序进行数据处理, 从而给出不同电压对应的相位延迟 δ 的值。

图 5 为同一液晶可变相位延迟器的相位延迟和电压关系曲线测量结果, 可以看出, 在同样条件下 3 次测量的

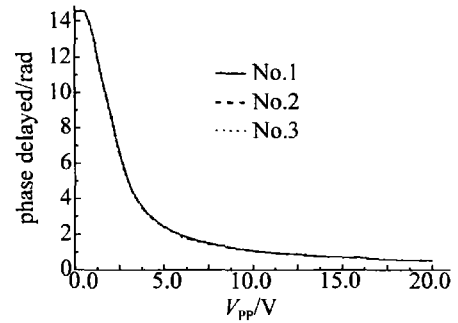


Fig. 5 Voltage-dependent retardation of LCVR

实验数据重复性很好, 并可以得出以下几点结论: (1) 液晶可变相位延迟器的阈值电压为 0.6V, 电压小于 0.6V 时, 相位延迟基本不变; (2) 在 0.6V ~ 2.9V, 相位延迟量变化较快, 尤其在 1V ~ 2.7V, 相位延迟与电压基本成线性关系, 如图 6 所示, 在该范围内, 拟合出相位延迟与电压关系式为: $\delta = -4.4494V_{pp} + 17.614$; 同时在该范围液晶可变相位延迟器具有响应速度快、控制电压低等优点且相位延迟变化量能达到一个光学周期 ($\Delta = \delta_{1V} - \delta_{2.7V} = 7.18\text{rad} > 2\pi\text{rad}$), 是最佳工作段; (3) 在电压大于 2.9V 时, 相位延迟变化趋缓, 这是由于外加电场作用与液晶分子作用力矩基本达到平衡, 液晶分子逐渐达到饱和倾角, 因此, 有效折射率 n_{eff} 也逐渐趋于与 n_o 相同, 即 Δn 基本不变。

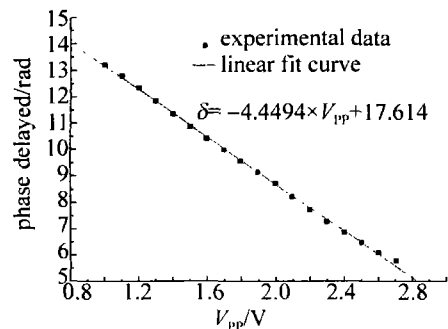


Fig. 6 Linearly voltage-dependent retardation of LCVR

4 误差因素分析

4.1 初始偏振因素影响分析

由于偏振片制作工艺的限制, 图 2 所示激光经过起偏器后不可能是完全的线偏振光, 即垂直的两个分量具有初始的相位延迟 $\Delta\delta_p$, 因此, 初始入射到可变相位延迟器的激光偏振态用琼斯矩阵可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha e^{i\Delta\delta_p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

则根据(6)式 ~ (9)式, 实验测量得到的相位延迟为:

$$\delta_m = \delta + \Delta\delta_p = \arctan(S_3/S_2) + k\pi \quad (12)$$

液晶可变相位延迟器产生的真实相位延迟为:

$$\delta = \delta_m - \Delta\delta_p = \arctan(S_3/S_2) + k\pi - \Delta\delta_p \quad (13)$$

4.2 温度对相位延迟量的影响分析

液晶的双折射系数是液晶以及基于液晶的相关器件的重要参量,研究液晶双折射系数与波长和温度的关系具有重要的实际意义。液晶是一个既包含了短程分子相互作用,又包含了长程分子作用的复杂的分子系统,因此,多种因素均可影响液晶的双折射系数。研究表明,除了液晶分子的组分外,液晶双折射还与波长和温度有关,其中又以温度为最主要的影响因素。随着温度的上升, n_e 和 n_o 具有不同的变化趋势,表现在 $\partial n_e/\partial T$ 总是负的,而当温度超过跨界温度后, $\partial n_o/\partial T$ 从负的变成正的。基于 Haller 近似^[11],温度引起的相位延迟量测量误差具有如下关系:

$$\Delta\delta(T) = \Delta n(T)d = (\Delta n)_0(1 - T/T_c)^\beta d \quad (14)$$

式中, $(\Delta n)_0$ 是液晶在晶体状态 ($T=0$) 时的双折射率差,指数 β 是材料常数,而 T_c 是液晶材料的清亮点温度(即为临界点温度,对于液晶材料,临界点温度也就是清亮点温度), d 是液晶盒的厚度。根据(14)式,在测得材料的上述几个参量的条件下,可以给出不同温度条件下液晶的双折射率差,从而对存在温度漂移工作条件下测量得出的液晶相位延迟器的相位调制量进行修正。

5 结论

通过完整的工艺过程,研制了基于 SLC-7607A 向列相液晶的可变相位延迟器,提出了基于 Stokes 参量的相位延迟测量方法,建立了相应的相位延迟测量系统。利用该测量系统得到了液晶可变相位延迟器的相位延迟和电压关系曲线,测量数据具有较好的重复性。分析测量结果发现,研制的液晶可变

相位延迟器外加电压在 1V ~ 2.7V 之间时,相位延迟量大于 2π rad,达到 7.18rad,且具有良好的线性可控特征。该器件可望在激光相位控制以及补偿领域具有重要的应用。

参 考 文 献

- [1] LAUDE-BOULESTEIX B, de MARTINO A, DREVILLON B, *et al.* Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2824-2832.
- [2] DROUILLARD II T F, SEARCY P A, DAVIS S R, *et al.* Polarimetry using liquid crystal variable retarders[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5363: 86-97.
- [3] DING H B, PANG W N, LIU Y B, *et al.* Photon polarization modulation with liquid crystal variable retarder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9): 1397-1399 (in Chinese).
- [4] MORRIS H R, HOYT C C, TREADO P J. Acousto-optic and liquid crystal tunable filters[J]. *Applied Spectroscopy*, 1994, 48(7): 857-866.
- [5] ZHANG D Y, HONG J, TANG W P, *et al.* Design of hyperspectral imaging system based on LCTF[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2455-2458 (in Chinese).
- [6] YAN M, GAO Zh Sh. The simple method research for measuring the phase retardation of waveplates [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 233-236 (in Chinese).
- [7] HAO D Zh, LI G H, WU F Q. Intelligentized measurement of optical phase retardation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1411-1414 (in Chinese).
- [8] WANG W, LI G H, XUE D. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(7): 970-972 (in Chinese).
- [9] LU K H, SALEH A B. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(3): 240-245.
- [10] ZHUANG Zh Zh, SUH S W, PATEL J S. Polarization controller using nematic liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 694-696.
- [11] LI J, SEBASTIAN G, WU Sh T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 19-24.

(上接第 651 页)

- [9] TONG Zh Ch, ZHU Ch, SUN X J. The minimum period identify technology of laser pseudo-random code[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(5): 415-420 (in Chinese).
- [10] LI H, LIANG J. A new method to de-interleave and decode multi-laser threats [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(3): 342-343 (in Chinese).

- [11] JU Y F, MA B Q, YAO M. Encoding and Jamming technology for laser guidance signal [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 4(1): 85-86 (in Chinese).