

文章编号: 1007-2780(2013)04-0556-05

液晶可调相位延迟器的色散特性研究

王建国

(索雷博光电科技(上海)有限公司, 上海 200331, E-mail: wjg96@163.com)

摘 要: 基于偏光干涉理论用 3 种不同的波长(405 nm、635 nm、904 nm)的激光在 3 种不同温度条件(25 °C、40 °C、60 °C)下测量、分析了向列相液晶相位延迟器的双折射率色散特性,并由柯西色散公式拟合得到了在上述 3 种温度条件下的色散方程。结果表明,该方法可以有效地测量、分析向列相液晶的双折射率色散特性。根据该液晶在 25 °C 温度条件下的色散方程推算出了 589 nm 波长处的双折射率为 0.268,该结果与液晶数据表提供的数值 0.257 的偏差值为 4.28%。该研究为液晶双折射色散特性的研究提供了一个新的方法,同时也为液晶可调相位延迟器件的设计与应用提供了依据和参考。

关 键 词: 液晶可调相位延迟器;向列相液晶;色散;偏光干涉

中图分类号: O753+.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20132804.0556

Dispersion Characteristics of Liquid Crystal Tunable Retarder

WANG Jian-guo

(Thorlabs Optical Electronic Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200331, China, E-mail wjg96@163.com)

Abstract: Birefringence dispersion characteristics of nematic liquid crystal tunable phase retarder are measured and analyzed by using the theory of polarized light interference with three different wavelength (405 nm, 635 nm, 904 nm) lasers at three different temperature condition (25 °C, 40 °C, 60 °C). And the Cauchy dispersion formulae are obtained by fitting with the data at the three wavelengths and three temperature conditions. It is shown that this method is effective to analysis the nematic liquid crystal birefringence dispersion characteristics. The liquid crystal birefringence at 589 nm and 25 °C is deduced. The birefringence value is 0.268, it only has about 4.28% deviation with the published data (0.257) from the liquid crystal product datasheet. This study provides a new way to character the liquid crystal birefringence, and the results can be used as a reference for the liquid crystal tunable devices design and application.

Key words: liquid crystal tunable retarder; nematic liquid crystal; dispersion; polarized interference

1 引 言

液晶是目前显示器件的重要材料之一。液晶作为一种应用广泛的特殊功能材料,其结构介于固态晶体与各向同性液体之间,从宏观物理性质

看,它既具有液体的流动性、黏滞性,又具有晶体的各向异性,能如晶体一样发生双折射、布拉格反射、衍射及旋光等特殊效应,也能在外场作用下产生热光、电光或磁光效应^[1-6]。

向列相液晶可以看作是一种单轴双折射晶

收稿日期: 2012-11-25; 修订日期: 2013-02-17

作者简介: 王建国(1978—),男,江苏镇江人,博士,主要从事液晶光电子器件及微纳光子器件方面的研究。

体。液晶的双折射依赖于液晶盒上所加电压,入射光波长和温度等条件。液晶材料的双折射值大小及其对波长的依赖关系是人们最关心的,也是决定液晶电光特性的重要参数之一。对于设计液晶器件,对于液晶双折射色散特性的了解非常重要。测量液晶的双折射率的方法主要有楔形折射方法^[7-8]、光干涉方法^[9-15]、椭偏仪法^[16]、小波变换分析方法^[17-18]等。楔形折射方法的测量分析结果易于受到玻璃表面面型和光源自身平行度等因素的影响,精度不稳定。对液晶盒进行控温,再利用椭偏仪进行色散测量,可以直接得出不同波长下的色散关系,但椭偏仪需要对测试液晶盒样品建立准确的分析模型,否则测量结果的误差不易控制。光干涉方法和小波变换分析方法研究了特定温度或特定波长下液晶色散特性,本文在上述研究基础上提出了对液晶相位延迟器在 3 个特定波长光源以及 3 种温度条件下的双折射率进行了测量,并基于柯西色散公式对液晶相位延迟器在不同温度任意波长的双折射率的变化规律进行了计算和分析,该方法可以更加全面地研究液晶的高低温色散特性。

2 理论分析

液晶的双折射效应可以使寻常光和非寻常光产生位相延迟,利用加在液晶上的电压可以灵活地加以控制,从而使光信号受到调制,改变入射光的偏振态,使位相延迟连续变化。利用液晶的这种性质,可以设计相位延迟器件。图 1 给出了液晶可调相位延迟器的典型结构示意图,经过平行配向处理的液晶在外界电场的作用下,其折射率分布会相应地产生调制。

将平行取向的液晶盒置于两块正交的偏光镜

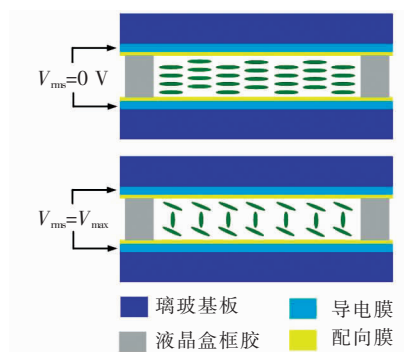


图 1 液晶可调相位延迟器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal tunable retarder

之间,且液晶指向矢与两个偏振方向夹角均为 45° 时,通过改变加在液晶盒上的电压,可以改变液晶的双折射率。于是导致入射光偏振态的变化,从而使一部分光透过检偏镜。为了得到相位与电压的依赖关系,设定偏振片相互正交(即起偏器的透过轴为竖直方向,检偏器的透过轴方向为水平方向),以及液晶相位延迟器的慢轴方向为 45° ,如图 2 所示。

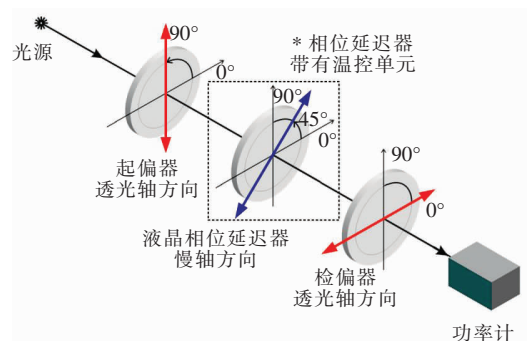


图 2 液晶可调相位延迟器的相位测量系统

Fig. 2 Configuration for liquid crystal retarder measurement system

该测量系统透射光路的琼斯矩阵表达式为:^[19]

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\Gamma/2) & -i\sin(\Gamma/2) \\ -i\sin(\Gamma/2) & \cos(\Gamma/2) \end{pmatrix} E_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot d \quad (2)$$

这里, E_0 是入射光的电场振幅, E 为出射光的电场振幅, Δn 和 d 分别为施加电压时的液晶双折射率和液晶层的厚度, λ 为入射光的波长。

则出射光的光强为:

$$I = I_0 \sin^2(\Gamma/2) \quad (3)$$

对出射光强进行透过率的归一化处理得到:

$$T = \frac{I}{I_0} \sin^2(\Gamma/2) \quad (4)$$

利用液晶相位延迟器在不同电压下的 $T-V$ 曲线,可以计算得到不同电压下的相位延迟量。

当相位延迟量小于半波长时:

$$\Gamma = 2\pi \cdot \frac{\Delta n d}{\lambda} = 2\arcsin \sqrt{T} \quad (5)$$

当相位延迟量大于等于半波长时:

$$\Gamma = 2\pi \cdot \frac{\Delta n d}{\lambda} = 2\pi - 2\arcsin \sqrt{T} \quad (6)$$

其他范围的相位延迟量可以根据式(4)进行

计算推导。在这里定义新的相位延迟量 RE :

$$RE = \Delta n \cdot d = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \lambda \quad (7)$$

这样可以很方便地用 nm 为单位来表征相位延迟量。

3 实验样品制备

液晶相位延迟器样品采用上下玻璃配向层是反向平行摩擦,盒厚为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的液晶盒,灌注向列液晶 HTG118200-200。为了测量不同温度条件下的双折射率,液晶盒灌注、封口连接好导线后放入温控单元 SM1L10H,温度传感器用导热胶固定于液晶盒玻璃的表面,该温控单元由温度控制器 TC200 控制温度。

4 测量结果与分析

向列相液晶的光轴与分子长轴一致,当在液晶上加电压时,液晶分子发生重排,导致光轴转动。将液晶相位延迟器样品放入图 2 所示的测量系统,所用光源为 4 通道光纤耦合激光光源,波长分别为 405 nm 、 635 nm 和 904 nm 。由液晶控制器 LCC25 对相位延迟加载 2 kHz 的方波控制信号,电压调制范围为 $0\sim 25\text{ V}$,并有功率计 PM100A 采集在上述电压范围内在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种温度条件下的透过光功率变化数据。当温控单元在目标温度稳定 15 min 后再进行数据采集。基于以上测量,通过公式(3)~(7)可以得到上述 3 种温度条件下液晶相位延迟器的相位延迟量随电压调制而变化的结果,如图 3、图 4 和图 5 所示。

从图 3、图 4 和图 5 可以看到以下几点:

(1)在 $0\sim 2\text{ V}$ 左右这个电压调制范围内,相

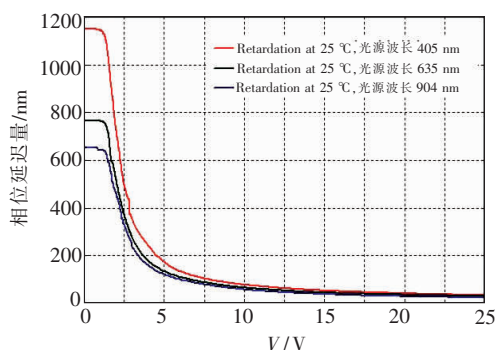


图 3 在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,3 种波长的相位延迟量随电压的变化曲线。

Fig. 3 Retardation curves with different voltages at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

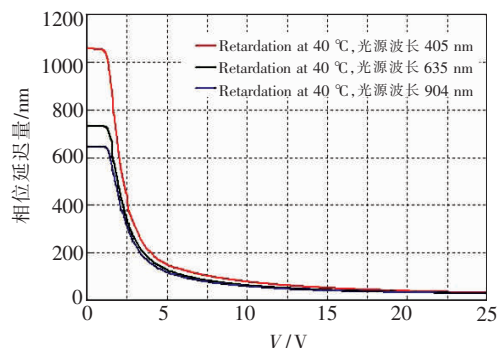


图 4 在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,3 种波长的相位延迟量随电压的变化曲线。

Fig. 4 Retardation curves with different voltages at $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

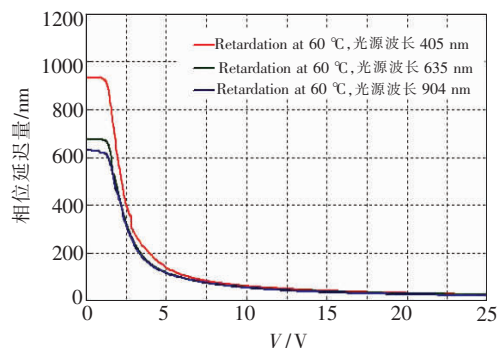


图 5 在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,3 种波长的相位延迟量随电压的变化曲线。

Fig. 5 Retardation curves with different voltages at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

位延迟量的变化很小,主要是因为应用所用的液晶阈值电压为 2.07 V ,在此阈值电压以内液晶的双折射率变化很小。

(2)在 $2\sim 5\text{ V}$ 之间,相位延迟量变化很快,随电压连续变化,这是由于这时外加电场大于液晶阈值电压。液晶相位延迟器主要就是利用这个调制范围。

(3)当电压大于 5 V 时,相位延迟量曲线逐渐趋于平坦,这是液晶分子的力矩与外加电场产生的力矩达到平衡的结果,此时液晶指向矢趋于外电场方向。

我们根据相位延迟量计算公式(7)得到液晶在不同波长情况下的双折射率值,如表 1 所示。

柯西色散方程式是常用的描述光学材料色散特性的方程^[20],这里我们对其扩展下,将其用来直接描述双折射的特性:

$$\Delta n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (8)$$

其中 λ 为入射光波长, a 、 b 、 c 分别为柯西色散系数, $\Delta n(\lambda)$ 为与波长对应的双折射率,在这里不考

表 1 液晶可调相位延迟器相对不同波长激光的双折射率

Table 1 Birefringence of liquid crystal retarder with different wavelength laser

温度条件	不同波长激光量得到的双折射率 Δn		
	405 nm	635 nm	904 nm
25 °C	0.383	0.255	0.218
40 °C	0.351	0.244	0.215
60 °C	0.310	0.224	0.209

考虑液晶对光的吸收。采用上述 3 个不同波长下的双折射率 $\Delta n(\lambda)$,代入柯西色散公式中可得到 3 个联立方程式,解这组联立方程式就可以得到 3 个柯西色散系数。有了这 3 个色散系数,就可以推算出其他波长下的折射率,而不需要再进行相关测量。基于上述公式拟合得到温度为 25 °C 时双折射率的柯西色散公式为:

$$\Delta n(\lambda) = 0.185\,66 + 2.493\,5 \times 10^4 / \lambda^2 + 0.121\,9 \times 10^{10} / \lambda^4 \tag{9}$$

温度为 40 °C 时的双折射率的柯西色散公式为:

$$\Delta n(\lambda) = 0.190\,8 + 1.814\,1 \times 10^4 / \lambda^2 + 0.133\,4 \times 10^{10} / \lambda^4 \tag{10}$$

温度为 60 °C 时的双折射率的柯西色散公式为:

$$\Delta n(\lambda) = 0.201\,8 + 2.940\,8 \times 10^4 / \lambda^2 + 0.243\,0 \times 10^{10} / \lambda^4 \tag{11}$$

图 6 给出了液晶相位延迟器在上述 3 种温度条件下的色散曲线。从图上可以看出向列相液晶的双折射率随波长的增加而减小的趋势放缓,同

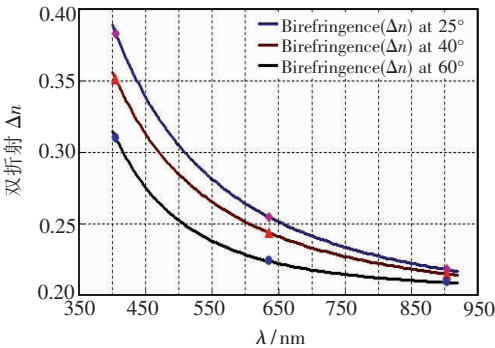


图 6 液晶相位延迟器在不同温度下的色散曲线

Fig. 6 Liquid crystal retarder dispersion curves at different temperature

时相对于不同波长的光源,其双折射率的差别也逐渐变小。

根据 25 °C 的双折射率色散公式(9),可以推算得到波长为 589 nm 时的双折射率为 0.268,该结果与液晶数据表提供的数值(0.257)相差为 4.28%。

5 结 论

液晶的双折射率由于色散会随波长变化而发生变化。在大多数液晶器件的设计中,需要知道折射率相对波长的对应关系,因而准确地掌握双折射率信息显得尤为重要。本文基于偏光干涉理论提出的方法可以测量在不同波长、不同温度条件下的液晶材料的双折射率,并由此推导出液晶材料的柯西色散公式经验值。实际测量分析的结果与液晶材料供应商提供的结果误差较小,该研究结果和研究方法可以为液晶器件的设计和实际应用提供参考。

参 考 文 献:

[1] 牛红林,华懿魁,史高飞,等. 聚合电场频率对聚合物稳定胆甾相液晶光电性能的影响 [J]. 液晶与显示, 2012,27 (1):21-25.

[2] 蔡林君,王文超,颜竹君. 胶囊化胆甾液晶薄膜在不同基板下的光电性能 [J]. 液晶与显示,2012,27(2):139-143.

[3] 倪水彬,朱吉亮,钟恩伟,等. 等蓝相液晶光电特性研究 [J]. 液晶与显示, 2012,27(6):719-723.

[4] 夏亮,徐琼,陆红波,等. 聚合物分散胆甾相液晶相形态调控与光电性能 [J]. 液晶与显示,2011,26(3):306-310.

[5] 兰民,任常愚. 向列相液晶中高阶衍射图像的特性 [J]. 液晶与显示,2011,26(4):443-447.

[6] 刘芳,曹晖,计鹏飞,等. 聚氨酯基聚合物分散液晶的制备及电光性能研究 [J]. 液晶与显示,2013, 28 (1):1-6.

[7] Singh A K, Manohar R, Shukla J P, et al. Refractive indices, order parameter and optical transmittance studies of a nematic liquid crystal mixture [J]. Acta Physica Polonica A, 2006,110(4): 485-494.

[8] Zaki A A. Optical measurements of mixture thermotropic liquid crystals [J]. Optics and Lasers in Engineering , 2010, 48(5): 538-542.

- [9] Wu S T, Efron U, Hess L D. Birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(21): 3911-3915.
- [10] Motoic C, Iacobescu G. Birefringence of azo-dye doped nematic liquid crystals [J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 2006, 8(1):295-298.
- [11] Duca M, Plosceanu C. Effect of temperature on the refractive indices and optical birefringence dispersion of nematic liquid crystal 4-cyanophenyl-4-pentyl benzoate [J]. *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie*, 2010, 19(1): 55-60.
- [12] Gandhi J, Anderson J E. Experimental measurement of Cauchy values for Δn of nematic liquid crystals [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, 33(1): 582-585.
- [13] 任广军, 李国华, 彭捍东. 液晶双折射效应的再研究 [J]. *液晶与显示*, 2004, 19(4): 270-273.
- [14] 任广军, 赵杰林, 姚建铨. 光通信波段液晶双折射效应的研究 [J]. *激光技术*, 2011, 35(2): 242-244.
- [15] Palarie I, Florea C. Refractive indices determination of a new nematic liquid crystal [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2005, 7(2): 997-1007.
- [16] 李大禹, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶空间光调制器相位调制的色散特性研究 [J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 1065-1067.
- [17] Köysal O, San S E, Özder S, *et al.* A novel approach for the determination of birefringence dispersion in nematic liquid crystals by using the continuous wavelet transforms [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(6): 790-795.
- [18] Ozder S, Coskun E, Köysal O, *et al.* Determination of birefringence dispersion in nematic liquid crystals by using an S-transform [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(14): 2001-2003.
- [19] 梁铨廷. 偏振器件的琼斯矩阵 [J]. *光学仪器*, 1988, 10(4):1-9.
- [20] Smith W J. *Modern Optical Engineering 4th Ed.* [M]. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2008: 207-210.