

doi:10.3788/gzxb20164512.1226001

用偏光干涉法动态测量扭曲向列型液晶指向矢

马靖,裴丽燕,许灿华,周雄图

(福州大学 物理与信息工程学院,福州 350108)

摘 要:提出一种基于双折射晶体劈的偏振态实时测量方法,并将该方法用于扭曲向列型液晶透射光的偏振态分析,实现了液晶分子平均指向矢的动态测量.利用基于晶体劈的偏光干涉法将待测光的偏振参量编码为两组干涉条纹,通过对干涉条纹定位实现偏振态的实时测量;再根据液晶指向矢的倾角、扭转角与透射光偏振态之间的关系,推算出液晶分子平均指向矢的动态信息.本实验测量液晶指向矢的速度为每秒 5 次,液晶平均指向矢的倾角、扭转角的测量准确度达到 0.2° . 本文研究为液晶分子平均指向矢的动态测量提供了一种有效途径.

关键词:物理光学;动态测量;偏光干涉法;液晶指向矢;双折射晶体劈

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1226001-6

Polarization Interference Method for Dynamic Measurement of Twisted Nematic Liquid Crystal Director

MA Jing, PEI Li-yan, XU Can-hua, ZHOU Xiong-tu

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A real-time method for measuring the polarization state based on birefringence crystal wedge was proposed and it was applied to analyze the polarization state of transmitted light from twist nematic liquid crystal, the dynamic measurement of liquid crystal molecule mean director was achieved by this method. Polarization interference method based on crystal wedge was used to encode the polarization parameters of detected light into two groups of interference fringes, real-time measurement of polarization state was realized through stripe position location. According to the relationship between the director angle of liquid crystal director and transmitted polarization state, dynamic information of liquid crystal mean director can be derived. The measurement speed is 5 time per second in this experiment, and the accuracy of tilt and twist angle of liquid crystal average director is 0.2 degree. An effective and valuable approach for rapid measurement of liquid crystal molecule mean director is provided in this work.

Key words: Physical optics; Dynamic measurement; Polarization interference; Liquid crystal director; Birefringent crystal wedge

OCIS Codes: 260.0260; 260.1180; 260.2130; 100.2650; 160.3710

0 引言

液晶是介于晶体和液体之间的中间态物质,其分子在液晶内部可自由移动且指向存在一定的有序性.此有序性的从优方向被定义为指向矢^[1],即描述液晶分子在空间上的宏观排列方向,表征液晶的宏观结构和状态.在外界磁场、电场等条件的影响下,指向矢易

偏离原始方向重新排列,使液晶呈现出旋光和电控双折射等特性,即液晶的磁光或者电光效应.基于这些特性,液晶广泛用于光开关^[2]、可调谐滤波器^[3]、生物传感^[4]、全息技术以及光通信^[5-6]等领域.然而,液晶器件应用还普遍存在响应速度较慢的技术难题.开发快速响应的液晶器件,需要深入研究液晶内部分子随着外场的动态变化过程.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61306071)和教育部博士点基金(No. 20133514120011)资助

第一作者:马靖(1977-),女,副教授,博士,主要研究方向为信息光学及激光光谱学. Email: majing@fzu.edu.cn

通讯作者:许灿华(1978-),男,副研究员,博士,主要研究方向为信息光学. Email: canhua_xu@siom.ac.cn

收稿日期:2016-05-27;录用日期:2016-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

目前,液晶指向矢分布特性的实验研究大多是通过探测液晶透射光强来进行的,这类方法在测量过程中会受光源功率波动的影响且只能单参量测量^[7-10],无法获得完整指向矢分布信息.由于液晶分子指向矢的变化会引起材料折射率变化,进而改变透射光的偏振态,可用椭圆偏仪进行测量并推算指向矢分布信息.但传统的椭圆偏仪需要分多步进行偏振态测量,结果缺乏实时性^[11].采用电光调制器件可以较大提高测量速度,但相应的成本也大幅增加^[12].近年,P. Babilotte 和 M. Dubreuil 等提出的 Müller 矩阵偏振测量法实现了对液晶分子平均指向矢的快速测量^[13],该方法可测量液晶指向矢的多个参量,但设备昂贵且光路结构和反演算法都比较复杂^[14-16].本课题组的前期研究中将偏光干涉法应用于石英波片相位延迟的温度特性研究及电光晶体半波电压的测量^[17-18].在此基础上,本文采用晶体劈的偏光干涉法对液晶分子平均指向矢进行动态测量;其原理是利用双折射晶体劈的偏光干涉将通过液晶的偏振光转化为等间距的干涉条纹,然后对干涉暗纹位置进行定位和分析得到偏振信息,最后根据这两个偏振参量可计算分析液晶分子平均指向矢的分布.

本文详细介绍了偏光干涉法测量光偏振态的原理、实验装置及定标方法,并采用该装置对方波电压驱动下的扭曲向列型液晶的电光效应进行实时测量,获得了液晶分子平均指向矢随时间的演化规律.偏光干涉法的测量结果不受光源功率波动影响,测量准确度只取决于条纹定位的准确程度,并且是单发测量;可通过改善成像设备来提高测量的速度和准确度,所以该方法有助于液晶材料的深入研究和液晶器件性能的提高.

1 实验原理

1.1 液晶电光效应原理

液晶电光效应是指在外加电场作用下,液晶分子指向矢的取向发生变化,其光学特性也随之变化的效应.以光传播方向为 z 轴建立直角坐标系,在直角坐标系中用指向矢 n 的扭转角 α 和倾斜角 θ 来确定其空间取向,液晶盒表面方向与 x - y 面平行,如图 1.理论上当

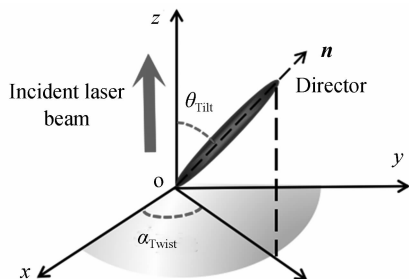


图 1 液晶分子平均指向矢的空间取向示意图

Fig. 1 Spatial orientation of liquid crystal average director

液晶加载电压小于阈值电压 V_{th} 时,在平行锚定的液晶盒中各个分子取向与表面接近平行,指向矢仍保持原始取向即 θ 接近 90° .当液晶加载电压大于阈值电压 V_{th} 时,液晶分子开始偏转.当外加电压足够大时,液晶分子指向矢分布趋于平行电场方向,即 θ 接近 0° ,同时 α 也发生相应的变化.

当通光沿着 z 方向传播时,液晶的退偏效应很小可以忽略^[13],线偏振光通过施加电压的液晶后,出射光为椭圆偏振光.此椭圆偏振光的偏振态可以由振幅比和相位差两个参量完全确定.液晶在光学上显单轴性^[1],根据单轴折射率椭球理论可得

$$\Delta n(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}} - n_o \quad (1)$$

则由液晶各向异性导致的相位延迟与倾斜角的关系为

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(\theta) d_o \quad (2)$$

式中, θ 为液晶指向矢倾斜角, n_o 和 n_e 分别为液晶的在入射光波长下的折射率, d_o 是液晶的厚度.

假设液晶出射椭圆偏光的振幅比角为 χ ,则出射光偏振态可表示为

$$A_0 = \begin{pmatrix} \cos \chi \\ \sin \chi \exp(i\Delta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据偏振光理论^[19],可得振幅比角、相位差及液晶的扭转角之间的关系为

$$\tan 2\alpha = \tan 2\chi \cdot \cos \Delta \quad (4)$$

1.2 偏光干涉法测量原理

图 2 为晶体劈偏光干涉法对椭圆偏光的偏振态测量原理图.以光传播方向为 z 轴建立直角坐标系,本方法的主要器件晶体劈如图 2 放置,其快慢轴方向分别与 x 、 y 轴平行.

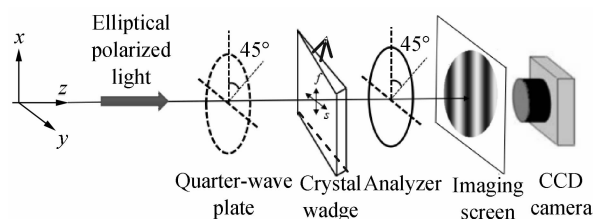


图 2 偏光干涉法测量偏振光的相位差和振幅比原理图
Fig. 2 Schematic diagram of measuring phase retardation and amplitude ratio of polarization light based on polarization interference

假设晶体劈沿 z 轴方向的厚度为 d ,沿 y 轴方向的长度为 l ,劈角为 σ ,则 $d \approx l \tan \sigma$.晶体劈沿 y 方向引入的相位差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_e - n'_o) d = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_e - n'_o) l \tan \sigma \quad (5)$$

式中, n'_o 和 n'_e 分别是晶体劈的 o 光和 e 光在入射光波长下的折射率.晶体劈可看作是沿着 y 方向引入的相

位延迟连续变化的波片,其琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}_{cy} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{pmatrix} \quad (6)$$

如图 2,将待测椭圆偏光垂直入射到由晶体劈和光轴方向在 $\pi/4$ 处的检偏器组成的检测装置中,即可实现待测椭圆偏光相位差的检测.相位差测量时,待测偏振光通过晶体劈后的琼斯矩阵为

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{M}_{cy} \cdot \mathbf{A}_0 = \begin{pmatrix} \cos \chi \\ \sin \chi \exp[i(\Delta + \delta)] \end{pmatrix} \quad (7)$$

最终经过检偏器后的光强为

$$I_1 = \left| \cos \frac{\pi}{4} \cos \chi + \sin \frac{\pi}{4} \sin \chi \exp[i(\Delta + \delta)] \right|^2 = \frac{1}{2} [1 + \sin 2\chi \cos(\Delta + \delta)] \quad (8)$$

由式(8)可知,当 $\Delta + \delta = 2k\pi$ (k 为整数)时光强最强, $\Delta + \delta = (2k+1)\pi$ 时光强最弱.由于沿 y 轴方向不同位置的相位差不同,所以出射光会在成像屏上沿着 y 方向形成亮暗相间的干涉条纹.干涉条纹的移动与相位差之间呈线性关系,经过对暗纹位置的定标,便可实现椭圆偏光相位差的测量.再结合式(1)、(2)便可得到液晶平均指向矢的倾斜角 θ .

在晶体劈前放置一光轴方向处于 $\pi/4$ 的四分之一波片,便可实现对偏振光振幅比的检测.振幅比测量时,偏振光通过晶体劈后的琼斯矩阵为

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{M}_{cy} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{A}_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} \cos \chi + i \sin \chi \exp(i\Delta) \\ i \cos \chi \exp(i\delta) + \sin \chi \exp[i(\Delta + \delta)] \end{pmatrix} \quad (9)$$

最终通过检偏器的光强为

$$I_2 = \frac{1}{2} [1 + \sin 2\chi \cos \Delta \cos \delta - \cos 2\chi \sin \delta] = \frac{1}{2} [1 + \sqrt{(\sin 2\chi \cos \Delta)^2 + \cos^2 2\chi} \cdot \cos(\gamma + \delta)] \quad (10)$$

在这里引入新的参量 γ 使式(10)与式(8)具有相同的形式, γ 与振幅比及相位差的关系为

$$\tan 2\chi = \frac{\tan(\pi/2 - \gamma)}{\cos \Delta} \quad (11)$$

与式(8)类似,式(10)中 γ 与暗纹位置线性对应,因而可以通过暗纹的定位测出 γ 值.结合式(4)和式(11)可知,可以计算出液晶平均指向矢的扭转角 α 为

$$\tan(2\alpha) = \tan(\pi/2 - \gamma) \quad (12)$$

2 实验装置及定标

液晶平均指向矢的测量装置如图 3(a),从左至右依次为 He-Ne 激光器、起偏器、液晶、扩束镜、半圆形四分之一波片、晶体劈、检偏器、成像屏和 CCD 相机.为了实现在单发成像中同时测量振幅比和相位差,在

晶体劈之前插入了半圆形的四分之一波片,使光斑分离成两个半圆.图 3(b)给出了 CCD 相机采集到的干涉条纹,上、下两部分分别对应振幅比和相位差的检测.实验过程中通过对这两组条纹的同步定位,实现对偏振态的单发测量.

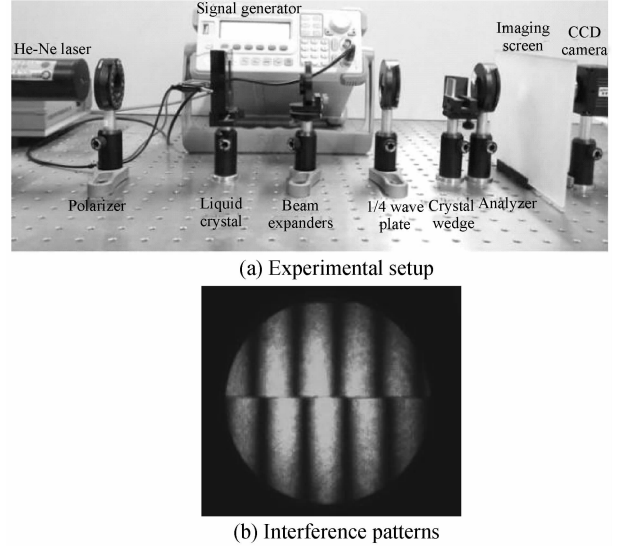


图 3 液晶平均指向矢的实验装置及干涉图

Fig. 3 Experimental setup of measuring mean director of liquid crystal and interference patterns

实验中采用的光源是波长为 632.8 nm 的基横模 He-Ne 激光器,输出功率约为 3 mW,输出光斑直径约为 1 mm.起偏器使入射光的偏振方向与液晶靠光源侧的分子锚定方向相同.实验所用液晶盒是由福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室制作,液晶盒两表面液晶分子锚定方向垂直,预倾角 $\theta_0 = 5^\circ$,厚度 $d_0 = 45 \mu\text{m}$,阈值电压 $V_{th} = 7.0 \text{ V}$,液晶材料是 Merck 公司生产的 E7 型液晶,在 632.8 nm 的折射率 $n_e = 1.747$, $n_o = 1.527$.由于 He-Ne 激光器输出的光束直径无法满足实验需求,在液晶后用扩束镜将光束直径扩大到 20 mm.实验所用的晶体劈由石英材料制成,在 632.8 nm 折射率分别为 $n'_o = 1.544$, $n'_e = 1.553$,劈角为 $\sigma = 1^\circ$,尺寸为 $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$.四分之一波片和检偏器的光轴方向均设置为 $\pi/4$ (偏振片的偏振方向和波片的快慢轴方向均用 THORLABS 公司提供的 PAX5710VIS-T - TXP 偏振态测量仪进行了校正).实验采用的面阵 CCD 相机分辨率为 $1280 \times 1024 \text{ pixel}$ (由西安维视数字图像技术有限公司提供,型号 MV-1300UM),采集速率为 0.2 s.

典型干涉条纹如图 4(a),运用 LABVIEW 程序将图中各条纹对应的光强沿垂直方向相加;同时经过中值滤波及扣除背景光(条纹消失时的光斑)处理.最终得到如图 4(b)的曲线,波谷和波峰分别对应暗纹及亮纹位置的光强,由于暗纹对应的光强更为稳定,所以实验中对波谷位置进行定位和测量,如图 4(c).

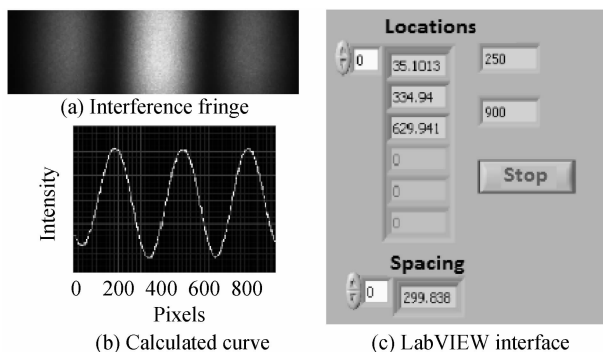


图4 数据采集及处理界面

Fig. 4 Data acquisition and processing interface

实验中首先需要定标找到 γ 和 Δ 对应的零基准点. 对 γ 定标时, 将一束偏振面与 x 轴夹角为 φ 的线偏光 $(\cos \varphi, \sin \varphi)$ 垂直入射到振幅比检测装置. 得到的光强为

$$I = 1/2[1 + \cos(\delta + \pi/2 - 2\varphi)] \quad (13)$$

而在 Δ 定标时, 需要将线偏光 $(\cos \varphi, \sin \varphi)$ 先经过快轴方向处于 $\pi/4$ 的四分之一波片, 转化为相位为 $\pi/2 - 2\varphi$ 的等振幅椭圆偏振光, 再进行相位测量. 由于振幅比测量光路比相位测量光路多了一个快轴方向处于 $\pi/4$ 的四分之一波片, 所以 γ 和 Δ 的定标实际上具有相同的光路, 可同时进行.

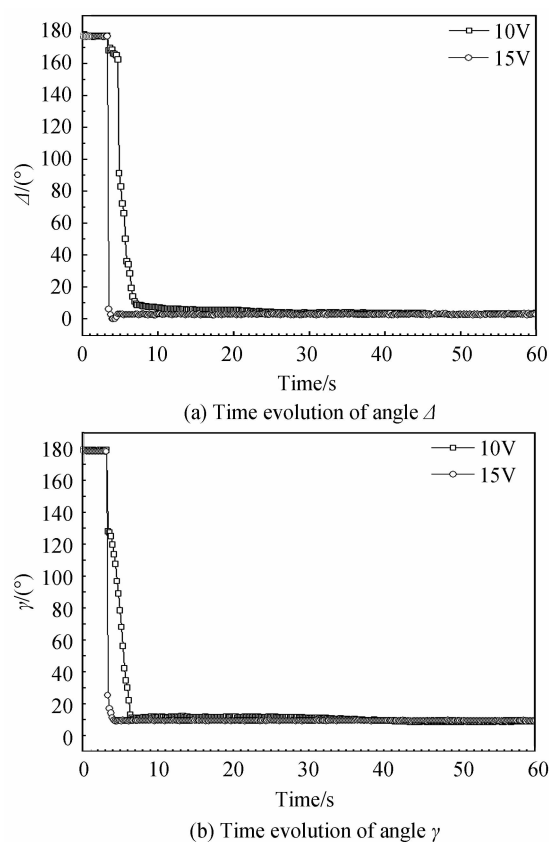
当 $\varphi = \pi/4$ 时在图 4(b) 中可读取一个暗纹位置 $x_1 = 248.0$ pixel, 此时的 Δ 或 γ 均为 0. 由于暗纹之间的距离对应了 2π 的角度变化, 在图 4(b) 对应了 300.0 pixel, 由此可推导出 Δ 或与不同波谷位置的线性关系式为

$$\Delta = \gamma = \frac{x - 248.0}{300.0} \cdot 2\pi \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 实验过程中的测量准确度主要取决于 CCD 相机的分辨率、波谷的间距及波谷位置稳定性. 实验的误差包含了测量原理误差、光学器件误差以及环境温度对液晶的影响等因素. 本实验采用暗纹定位来测量偏振角度, 因而暗纹定位的误差将直接影响测量结果. 而实验装置中所用的波片是零级石英波片, 相位延迟误差小于百分之一波长, 对实验结果的影响很小可以忽略. 由本课题组前期工作^[17]可知, 经过严格的光路安装和调整并控制实验室温度变化小于 ± 2 °C 时, 实验中光源波长波动、温度引起晶体劈折率变化以及光路振动等影响都可以忽略. 而在该温度范围内, 液晶保持在单一相区, 温度变化对液晶的影响也可以不予考虑. 综上所述, 本实验的误差主要来源于暗纹位置定位的误差, 在整个实验中测量暗纹位置的波动约为 0.3 个像素, 根据式(14)的线性关系, 可得 Δ 和的测量误差约为 0.4° , 再结合式(1)、式(2)及式(12), 根据误差传导公式, 可计算出 θ 和 α 的最大测量误差为 0.2° .

3 实验结果及讨论

在液晶器件中, 入射线偏光的偏振方向通常与液晶盒前表面的分子锚定方向相同. 而且由于液晶材料的双折射很大, 入射光的偏振面会跟随液晶分子的螺旋方向转动, 最终出射光的偏振方向与液晶盒后表面的分子锚定方向相同. 通过测量 Δ 和 γ 值, 可以计算出液晶分子平均倾斜 $\theta = (83.7 \pm 0.2)^\circ$, 扭转角 $\alpha = -(44.4 \pm 0.2)^\circ$, 即图 5 和图 6 中在时间零点附近的初态. 设计液晶盒时为控制反倾角的出现及抑制对比度的降低, 通常使液晶盒表面处液晶分子的锚定方向存在一定倾角, 对应了图 1 中的 $90^\circ - \theta$. 本实验测出该角度为 6.3° , 与液晶盒产品参量的 5° 比较符合.

图5 加电压前后液晶中透射偏振光的 Δ 与 γ 随时间的变化曲线Fig. 5 The curves of Δ and γ transmission polarized light in liquid crystal with time before and after the applied voltage

实验中分别选择给液晶加载 10 V 及 15 V 两组大于阈值的电压进行对比测试. 将实验中测得的不同电压对应的波谷位置代入式(14), 可得加载两组电压前后液晶盒出射光的相位差 Δ 和 γ , 如图 5(a) 和 5(b). 液晶未加载电压时 $\Delta = (177.4 \pm 0.4)^\circ$, 而加压后其稳定值均为 $\Delta = (3.2 \pm 0.4)^\circ$, 即加压稳定后和未加电压时通过液晶的偏振光都接近线偏振光.

加电压前后液晶平均指向矢的倾斜角 θ 及扭转角

α 的动态变化过程如图 6(a) 和 6(b). 从图中可以看出, 液晶分子的平均指向矢在施加电压后的变化过程与所加电压大小有关. 电压越大变化越快, 在 15 V 电压下, 在小于 0.4 s 的时间内指向矢从大于初值 90% 下降到 10% 以下, 并在 1 s 内到达稳定状态: $\theta = (8.8 \pm 0.2)^\circ$, $\alpha = (40.9 \pm 0.2)^\circ$. 而在 10 V 电压下, 4 s 内指向矢剧烈变化, 5~40 s 变化缓慢, 加电压 40 s 后, 液晶的平均指向矢与 15V 电压下测得的结果基本一致. 这说明通过适当的提高加载电压, 可以有效提高液晶器件的响应速度. 而液晶加压前后液晶分子扭转角的变化可以通过 α 角的差值来计算为 $(85.3 \pm 0.2)^\circ$. 可在液晶盒后添加偏振片, 并旋转偏振片获得最小光强的方式对该角度进行验证, 测量结果是 $(87 \pm 2)^\circ$, 两种实验结果相吻合.

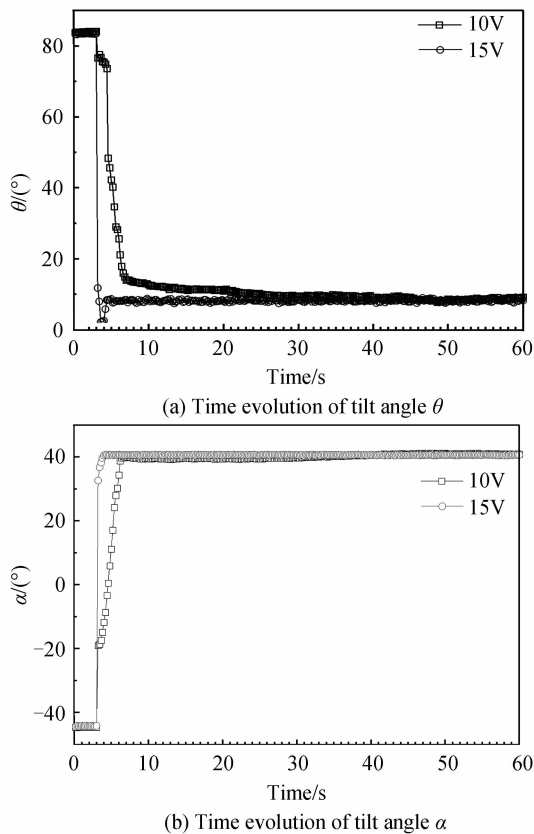


图 6 加电压前后液晶平均指向矢的倾斜角 θ 及扭转角 α 随时间变化的曲线

Fig. 6 Curves of tilt angle θ and twist angle α of liquid crystal mean director with time before and after applied voltage

倾斜角与扭转角的变化表现为液晶分子在外场作用下沿着不同坐标轴的转动, 在物理上对应了不同的形变和有效弹性系数. 传统采用测量透光功率的方法无法将这两种转动区分开, 而采用偏光干涉法有利于区分这两种变化过程. 在 10V 及 15V 电压下, 液晶指向矢倾斜角 θ 达到稳定状态所需时间都要比扭转角 α 长. 根据液晶动力学方程^[20], 倾斜角 θ 响应时间正比于

展曲粘滞系数 K_{11} , 扭转角 α 响应时间正比于扭曲粘滞系数 K_{22} . 本实验所使用的 E7 型液晶粘滞参量分别是 $K_{11} = 11.7 \times 10^{-12}$ N 和 $K_{22} = 8.8 \times 10^{-12}$ N^[21], 可见实验结果与液晶动力学理论一致.

4 结论

本文利用晶体劈的偏光干涉法测量液晶中指向矢动态变化过程, 测量速度为每秒 5 次, 角度测量准确度为 0.2° . 液晶指向矢的变化快慢与所加电压相关, 15 V 电压下, 指向矢在 0.4 s 达到新的平衡位置. 而在 10 V 电压下, 变化时间延长到约 40 s. 相比于透射光强测量方法, 本实验不受光源波动影响而且可以单发快速测量; 而相比于 Müller 矩阵偏振测量法, 本方法的光路和算法都更为简洁, 具有更好的通用性. 实验的测量准确度取决于条纹间距和相机空间分辨率, 可以通过增加条纹间隔或采用高空间分辨相机进行改善; 测量速度主要取决于相机的时间分辨率, 本文采用的 CCD 面阵相机采集速度相对较慢, 如果采用高时间分辨的线阵相机, 则可以实现液晶分子平均指向矢的高速动态分析. 这无论对液晶基础物理的研究还是器件性能的优化都将具有重要意义.

参考文献

- [1] 王新久. 液晶光学和液晶显示[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 54-57.
- [2] LI Bing-xiang, BORSHCH V, SHIYANOVSKII S V, *et al.* Electro-optics switching of dielectrically negative nematic through nanosecond electric modification of order parameter (NEMOP) [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(20): 201105.
- [3] ISAACS S, PLACIDO F, ABDULHALIM I. Investigation of liquid crystal Fabry-Perot tunable filters: design, fabrication, and polarization independence[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(29): H91-H101.
- [4] BRAKE M J, DASCHNER M K, LUK Y Y, *et al.* Biomolecular interactions at phospholipid-decorated surfaces of liquid crystals[J]. *Science*, 2003, **302**(5653): 2094-2097.
- [5] PEI Chuang, JIANG Xiao-yu, WANG Jia, *et al.* An iterative algorithm for kinoform computation of 3D object [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 348-353. 裴闯, 蒋晓瑜, 王加, 等. 一种三维物体全息图的迭代计算方法[J]. *光子学报*, 2013, 2013, **42**(3): 348-353.
- [6] HUSSEIN R A, HAMEED M F O, OBAYYA S S A. Ultrahigh soliton pulse compression through liquid crystal photonic crystal fiber[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(2): 1-9.
- [7] HAN Yu-qi, CHEN Zhe, YU Jian-hui, *et al.* Side-polished fiber Sensing for measurement of nematic liquid crystal orientation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 0206006. 韩玉琪, 陈哲, 于建辉, 等. 用于向列相液晶取向测量的侧边抛磨光纤传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 0206006.
- [8] RAMIREZ C, KARAKUS B, LIZANA A, *et al.* Polarimetric method for liquid crystal displays characterization in presence of phase fluctuations[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 3182-3192.

- [9] QI Jian-xia. Deflect characteristics of liquid crystal module under electric field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0426002.
祁建霞. 电控液晶光阀中的指向矢分布特性[J]. 光子学报, 2014, **43**(4): 0426002.
- [10] BRAKE J M, MEZERA A D, ABBOTT N L. Active control of the anchoring of 4'-penty-4-cyanobiphenyl (5CB) at an aqueous liquid crystal interface by using a redox-active ferrocenyl surfactant[J]. *Langmuir*, 2003, **19**(21): 8629-8637.
- [11] YANG Kun, WANG Xiang-zhao, BU Yang, *et al.* Research progress of ellipsometer [J] *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3): 43-49.
杨坤, 王向朝, 步扬, 等. 椭偏仪的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(3): 43-49.
- [12] BIGUE L, FOULONNEAU A, JAULIN A, *et al.* High-speed imaging polarimetry using liquid crystal modulators [C]. *Epj Web of Conferences*, 2010, **5**(1): 379-405.
- [13] DUBREUIL M, RIVET S, JEUNE B L, *et al.* Time-resolved switching analysis of a ferroelectric liquid crystal by snapshot Mueller matrix polarimetry [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(7): 1019-1021.
- [14] BABILOTTE P, SILVA V N H, DUBREUIL M, *et al.* Impact of the concentration in polymer on the dynamic behavior of polymer stabilized ferroelectric liquid crystal using snap-shot mueller matrix polarimetry[J]. *European Physical Journal E*, 2013, **36**(55): 1-11.
- [15] BABILOTTE P, SILVA V N H, DUBREUIL M, *et al.* Experimental study of the dynamic behaviour of twisted ferroelectric liquid crystal samples using snap-shot Mueller matrix polarimetry [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, **46**(12): 125101-125110.
- [16] BABILOTTE P, SILVA V N H, SATHAYE K, *et al.* Twisted ferroelectric liquid crystals dynamic behaviour modification under electric field; a Mueller matrix polarimetry approach using birefringence [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **15**(3): 034906.
- [17] XU Can-hua, XU Qi-feng, XIE Nan. Using crystal wedge to measure temperature dependence of quartz wave plates' phase retardation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 02120041.
许灿华, 徐启峰, 谢楠. 用晶体斜劈方法测量石英波片相位延迟的温度特性[J]. 光学学报, 2014, **34**(2): 02120041.
- [18] PEI Li-yan, MA Jing, XU Can-hua, *et al.* Measurement of half-wave voltage of electro-optic crystal based on crystal wedge[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0912005.
裴丽燕, 马靖, 许灿华, 等. 基于晶体劈的电光晶体半波电压测量[J]. 光子学报, 2015, **44**(9): 0912005.
- [19] 新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光[M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 18-25.
- [20] LI Zhi-yong, SHAN Ai-xian, SUN Yu-bao. Natural pitch effects on twist nematic liquid crystal display[J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2010, **25**(3): 299-332.
李志勇, 单艾娴, 孙玉宝. 自然螺距对扭曲向列相液晶显示器的影响[J]. 液晶与显示, 2010, **25**(3): 299-332.
- [21] 曹谦. 液晶光栅之衍射性质研究[D]: 吉林: 吉林大学, 2009: 35.