

文章编号:1007-2780(2016)06-0540-07

用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

赵 静^{1,*}, 刘 飞², 孙 静¹

(1. 张家口学院 理学系, 河北 张家口 075000;

2. 张家口职业技术学院 电气工程系, 河北 张家口 075000)

摘要:架设了全漏光导波测量系统并对反射式混合型扭曲向列相液晶盒进行了光学测量,氦氖激光经过处理后变为 s 偏振光或 p 偏振光,然后通过棱镜耦合使某一偏振状态的光进入液晶盒并采集不同电压下与入射角相关的不同偏振光组合的反射信号。进而结合多层光学 4×4 矩阵和弹性连续体理论对液晶盒的不同状态组合的反射信号模拟预测并与实验数据进行拟合,就得到了指向矢在液晶盒内的倾角和扭曲角以及在不同电压下的分布情况。

关键词:光导波技术;混合型扭曲向列相液晶盒;指向矢分布;偏振光

中图分类号:O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163106.0540

Measurement of director distribution in reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique

ZHAO jing^{1,*}, LIU Fei², SUN Jing¹

(1. Zhangjiakou University, Zhangjiakou 075000, China;

2. Department of Electrical Engineering, Zhangjiakou Vocational College of Technology, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: The fully leaky waveguide measurement system has been set up to measure the reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell. He-Ne laser was processed to become s polarized light or p polarized light. The polarized light enters the liquid crystal cell by prism-coupled method and then the reflective signals with the combination of different polarized light that depend on the incident angle were collected under different voltages. The reflective light in different state can be predicted by means of simulation which was based on multilayer optical 4×4 matrix and elastic continuum theory. Tilt angle, twist angle and distribution of the director in liquid crystal cell under different voltage can be obtained by fitting the experiment data.

Key words: optical waveguide technique; mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell; director distribution; polarized light

收稿日期:2015-12-11;修订日期:2015-12-31.

* 通信联系人, E-mail: yaya821010@sohu.com

1 引 言

一般的液晶盒为玻璃基板-导电层-取向层-液晶层-取向层-导电层-玻璃基板组成的七层结构。在研究液晶显示技术的过程中,知道液晶盒内的指向矢取向以及在改变外场(例如电场、磁场等)影响的情况下去预测它们的光学响应能力是非常重要的,这就需要一种可以测量液晶盒内指向矢分布情况的技术。经过几十年的发展,一系列光导波技术可以被成功地用来研究液晶盒内液晶指向矢的取向和分布情况,这些技术主要利用 s 偏振光或 p 偏振光经过棱镜耦合进入液晶层后会激发一连串离散的导波模式,然而这些导波模式是基于液晶层中指向矢的取向和空间分布的。以各向异性的液晶作为导波层的一个重要特点是当指向矢与基板表面存在夹角或偏离入射面时,将会产生偏振转换效应。而偏振转换的导波模式对于液晶层中指向矢的分布是非常敏感的,这个特点使得光导波技术成为测量研究指向矢在整个液晶层厚度中空间分布很好的光学技术^[1]。光导波测量技术从最早的衰减式全反射技术到后来的半漏光导波技术^[2-3],但是由于这两种技术需要包含金属膜和使用高折射率基板等缺点,使得它们不能被用于研究标准的商业用液晶盒,所以最后发展了全漏光导波技术,杨傅子教授进而提出了改进型全漏光导波技术^[4]。但前期采用光导波技术主要的研究对象为透射式液晶盒。由于全漏光导波技术“全漏”的特点,其全部的反射信号和投射信号都可以被有效的利用。从理论模拟分析可知^[4],反射偏振转换信号 R_{ps} 和 R_{sp} (下角标第一个字母表示入射光的偏振状态,第二个表示反射光的偏振状态)对于液晶分子指向矢的扭曲角和倾角特别敏感。然而对于透射式液晶盒,其反射偏振转换信号非常弱,这样它就很容易受到外界的干扰从而影响测量结果。如果利用全漏光导波技术测量的液晶盒为反射式液晶盒,由于反射电极或反射镜的存在,其反射偏振转换信号 R_{ps} 和 R_{sp} 就很强^[5],这样就可以更好地利用 R_{ps} 和 R_{sp} 来对液晶层中指向矢的空间分布情况进行探究。

文献[5]对反射式液晶盒的导波特性的进行了研究并确定了液晶盒的各个光学层的参数范围,

但没有给出不同电压下液晶盒内指向矢的分布情况。本文通过已架设好的全漏光导波测量系统对硅基液晶显示用的 90°反射式混合型扭曲向列相液晶盒的不同偏振状态组合的反射信号(偏振保存信号 R_{pp} 、 R_{ss} 和偏振转换信号 R_{ps} 、 R_{sp})进行了测量并记录数据。然后利用多层光学 4×4 矩阵理论和弹性连续体理论对相应的反射信号进行理论模拟预测并与对应的实验数据拟合,尤其是利用反射率较高的反射偏振转换信号来得到指向矢在液晶盒上下基板的倾角和扭曲角,进而得到指向矢在不同电压下的空间分布情况。

2 理 论

2.1 液晶盒

对于一般标准的液晶盒,是由两片镀有透明电极 ITO 的玻璃基板,并在 ITO 电极上沉积对液晶分子有取向作用的取向层,然后将两片玻璃中间以特定厚度的衬垫隔开而组合起来,最后再灌注实际需要的液晶而成的。反射式混合型扭曲向列相液晶盒与普通的透射式扭曲向列相液晶盒相似,但前者的厚度更小,所以它具有更小的 $d \Delta n$,这就会导致不完整的偏振旋转,从而需要利用入射偏振光与液晶盒上基板上的液晶指向矢之间的夹角来增加相位延迟^[6]。

实验中使用的 90°反射式混合扭曲向列相液晶盒的具体结构如图 1 所示,它的下基板不是硅基板而是玻璃基板,并且在下玻璃基板上镀有一层铝膜。液晶盒中的铝膜既是高反射镜又是导电电极,两块玻璃基板中间衬垫的直径为 3.0 μm 左右。



图 1 液晶盒的结构

Fig. 1 Structure of liquid crystal cell

2.2 液晶导波理论

液晶盒在一定程度上可以被看作是一种导波层为液晶层的波导结构。由于液晶的各向异性,

除了一些特殊的、高度对称的波导结构外,液晶导波层中的本征模量将不再只是 s 偏振光或 p 偏振光^[1]。假设在液晶波导结构中,其基层和覆盖层都是折射率为 n_g 的玻璃基板,如图 2 所示。一般液晶分子可以通过分别垂直和平行于光轴 N (即指向矢)的寻常光折射率 n_o 和非寻常光折射率 n_e 来表征,液晶指向矢在导波层中的空间位置可以通过倾角 θ 和扭曲角 φ 来表示, θ 和 φ 的定义如图 2 所示。由于上下玻璃基板的折射率相同,所以将不再存在临界角,从而导致波导模量从上下基板“漏出”,因而此种情况被称为全漏模式。从图 2 中可以看出,垂直于入射光的平面与液晶折射率椭球的交界面为一个椭圆 BOF,而椭圆的两个半轴 OB 和 OF 将给出与在液晶导波层中传播的本征模量有关的折射率。对于光轴沿 z 轴的特殊情形,s 偏振本征模量只与 n_o 有关,而 p 偏振本征模量与 n_o 和 n_e 有关;若光轴沿 x 轴时,则 p 偏振本征模量与 n_o 和 n_e 有关,所有的 s 偏振本征模量还只与 n_o 有关;其中最简单的情形是当光轴沿 y 轴时,那么 s 偏振模量只与 n_e 有关,而 p 偏振模量只与 n_o 有关;对于上述这 3 种特殊的情形,在液晶导波层中传播的本征模量只有 s 偏振模量或 p 偏振模量。然而,当光轴位于图 2 中的位置时,即与 y 轴之间存在一个夹角,液晶导波层中将不再只有 s 偏振模量或 p 偏振模量。此时,假如用一束 s 偏振光或 p 偏振光入射这样一个液晶波导结构将会产生偏振转换,即在出射光中有正交的偏振分量存在。假设液晶分子的指向矢与液晶层中本征模量

的波阵面法线的夹角为 ψ ,则在图 2 中有:

$$\cos \psi = \cos \theta \cos \beta - \sin \theta \sin \beta \sin \varphi, \quad (1)$$

其中: β 为液晶层中入射光与 z 轴的夹角。非寻常本征模量的折射率 n'_e 可以通过图 2 中的椭圆 BOF 的长半轴 OF 来定义,则其可由式(2)得到:

$$n'_e = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \psi + n_e^2 \cos^2 \psi}}. \quad (2)$$

从(2)式很容易得出非寻常本征模量的折射率 n'_e 介于 n_o 和 n_e 之间,并且对于上面提到液晶分子指向矢沿 3 个坐标轴的特殊情形,它将对对应于 s 偏振本征模量或 p 偏振本征模量。在图 2 中,s 偏振光的电场沿 y 轴,而 p 偏振光的电场在 x - z 平面。无论是 s 偏振光还是 p 偏振光都会在液晶层中激发两种本征模量,一种本征模量的电场沿椭圆 BOF 的短半轴 OB,另一种本征模量的电场沿长半轴 OF 并垂直于 OB。因此在只有 s 偏振光或 p 偏振光进入液晶层的情况下,可以由 $-y$ 轴和 OB 之间的夹角 Ω 来确定偏振转换信号,从图 2 中可以得到:

$$\cos \Omega = \frac{\sin \beta \cos \theta + \sin \theta \cos \beta \sin \varphi}{\sqrt{1 - (\cos \theta \cos \beta - \sin \theta \sin \beta \sin \varphi)^2}}. \quad (3)$$

从式(3)可以得到,当 Ω 为 0 或 $\pi/2$ 时,液晶层中将不会产生偏振转换信号。这也与上述液晶分子指向矢分别沿 3 个坐标轴时的 3 种特殊情况中的一种相对应。虽然偏振转换波导模式非常复杂,但从文献[4]中的理论分析和数值模拟结果可知,它却对于液晶指向矢的倾角和扭曲角非常敏感,所以偏振转换波导模式对研究指向矢的取向和分布是非常有用的。

液晶盒本身可以被看作是一个多层(玻璃基板、导电层、取向层、液晶层)光学系统,而整个液晶层也可以被看作是由很多足够薄的薄层组成的,并且每个薄层的厚度远远小于入射光的波长,这样每个薄层中的液晶分子指向矢只有轻微的变化并且在每一层中液晶分子具有均匀的取向。而 4×4 矩阵因自动考虑基板介面间的折射与多层反射之间的影响,所以它可以被用来精确地模拟预测 s 或 p 偏振光入射液晶盒后的反射和透射特性。全漏光导波技术的特点是控制一束 s 或 p 偏振光从不同的入射角度经棱镜耦合后进入液晶层,那么入射的偏振光在液晶层中将会产生不同的光场分布和波导模式,对于透射式液晶盒来说,可以得到 8 组与入射角度有关的不同偏振状态组

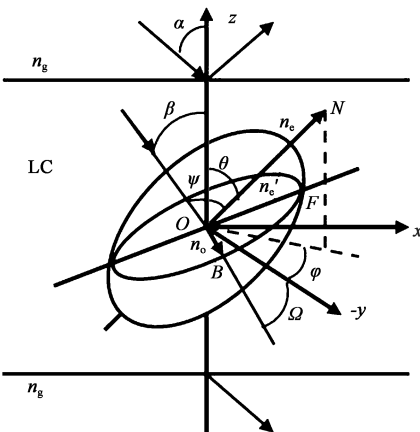


图 2 液晶体折射率椭球及光的传播
Fig. 2 Refractive index ellipsoid of liquid crystal and the propagation of light

合的透射(T_{pp} 、 T_{ps} 、 T_{sp} 、 T_{ss})和反射(R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 、 R_{ss})信号。然后利用弹性连续体理论模拟出各个电压下的指向矢分布,并在此基础上结合 4×4 矩阵模拟出与入射角有关的透射和反射信号,在各光学层光学常数基本确定的情况下,通过调节液晶指向矢的倾角和扭曲角,使理论模拟和实验数据达到最好的拟合结果,这样就可以确定液晶指向矢在液晶盒内的倾角和扭曲角以及空间分布情况。

3 实 验

将图 1 所示的液晶盒与低折射率(1.517)等腰梯形棱镜组合成光棱镜耦合结构,如图 3 所示。在研究透射式液晶盒时需要使用两块棱镜,一块耦合入射光,一块耦合出射光。虽然本文实验中使用的液晶盒为反射式液晶盒,但在制作棱镜耦合结构时也使用了两块棱镜,这样做主要有两方面的考虑:一是为了方便将棱镜耦合结构和其支架固定在一起;二是由于液晶盒两边都有折射率匹配液,这样在实验过程就可以根据实际需要来转动液晶盒以使其在对入射光最敏感的位置。在棱镜和液晶盒之间填充有低折射率匹配液,这样除了便于转动液晶盒外,还可以避免两者之间存在气泡。在组装棱镜耦合导波结构时应注意:(1)一定要确保棱镜和液晶盒玻璃基板干净无杂物;(2)由于两块棱镜之间除了液晶盒外没有其它的支撑物,所以在组装时要特别注意两块棱镜的间距和棱镜对液晶盒的挤压力度,否则可能会挤坏液晶盒;(3)对于小于梯形棱镜底面的液晶盒,为了便于加电压,常常将其放在两块棱镜间隙的一边,这就需要在制作过程中要保证两块棱镜始终平行,否则将会导致匹配液中产生气泡。

实验布局如图 4 所示,光源是配有稳压电源的波长为 632.8 nm 的氦氖激光;光圈 1 和 2 可以

限制激光束的尺寸以防止其发散,以保证打到棱镜上的光斑较小;为了便于相位敏感探测器 1 和 2 检测,激光被斩波器调制为具有一定频率的光;可调式光衰减器可根据实际测量需求来调节入射偏振光的强弱;为了补偿光源的漂移浮动,5% 的入射光被光束取样玻璃板反射以作为参考光;入射光通过偏振片 1 和 2 后将被调制为 s 或 p 偏振光,通过偏振片 3 可以调节探测器接收到的反射光的偏振状态; $\theta-2\theta$ 转台保证了探测器在液晶盒转动时可以准确地接收到反射信号。

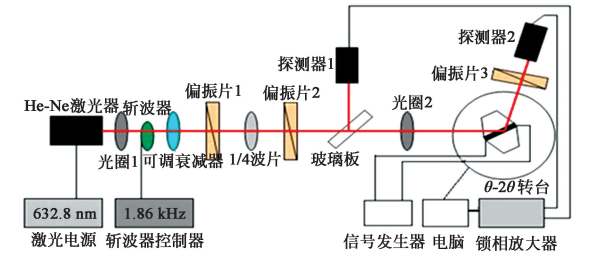


图 4 实验布局图

Fig. 4 Layout of the experiment equipment

控制棱镜耦合结构使液晶盒在 $\theta-2\theta$ 转台上转动 20° ,通过调节入射偏振光和反射偏振光的状态来得到所有的反射偏振光组合模式: R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 、 R_{ss} ,并通过电脑同步记录不同的电压(1 kHz、 $0\sim 7\text{ V}_{\text{rms}}$)下液晶盒的反射信号。整个测量过程是在暗室和室温下进行的。

4 结果及分析

由于在理论模拟计算液晶盒的反射偏振转换和偏振保存信号的特性时,只考虑液晶盒本身而没有考虑棱镜,并且从图 4 可知,实验记录的都是与外角 θ_{out} (见图 3)相关的反射信号,所以首先将这些信号转换成与内角 θ_{in} (见图 3)相关的信号,在图 3 中由折射定律可得:

$$\theta_{\text{in}} = 90^\circ - \frac{\gamma}{2} - \arcsin\left[\frac{n_0}{n_p}\sin\theta_{\text{out}}\right], \quad (4)$$

其中: n_0 为棱镜外部周围物质(空气)的折射率, n_p 为棱镜的折射率, $\gamma(60^\circ)$ 为等腰梯形棱镜的底角。由于模拟计算的光学反射特性是反射率的形式,所以还需要将测量的反射信号 R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 和 R_{ss} 结合参考光和入射光将其转换成反射率。在实验过程中发现偏振片 3 对入射到相位探测器上的光存在一定的吸收,通过实验测得其吸收率并

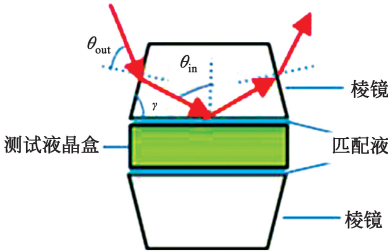


图 3 棱镜耦合导波结构

Fig. 3 Structure of pyramid-coupled guided wave

用其对反射率的计算进行了修正,从而降低反射光强的误差,因为很小的光强误差可能会引起较大的拟合误差。从实验结果发现,在透射式液晶盒中较弱的反射偏振转换信号 R_{ps} 和 R_{sp} (例如在文献[4]中,实验测得的反射率低于 0.01)在反射式混合型扭曲向列相液晶盒中却有很强的反射,如图 5 中 R_{ps} 和 R_{sp} 的实验曲线所示。

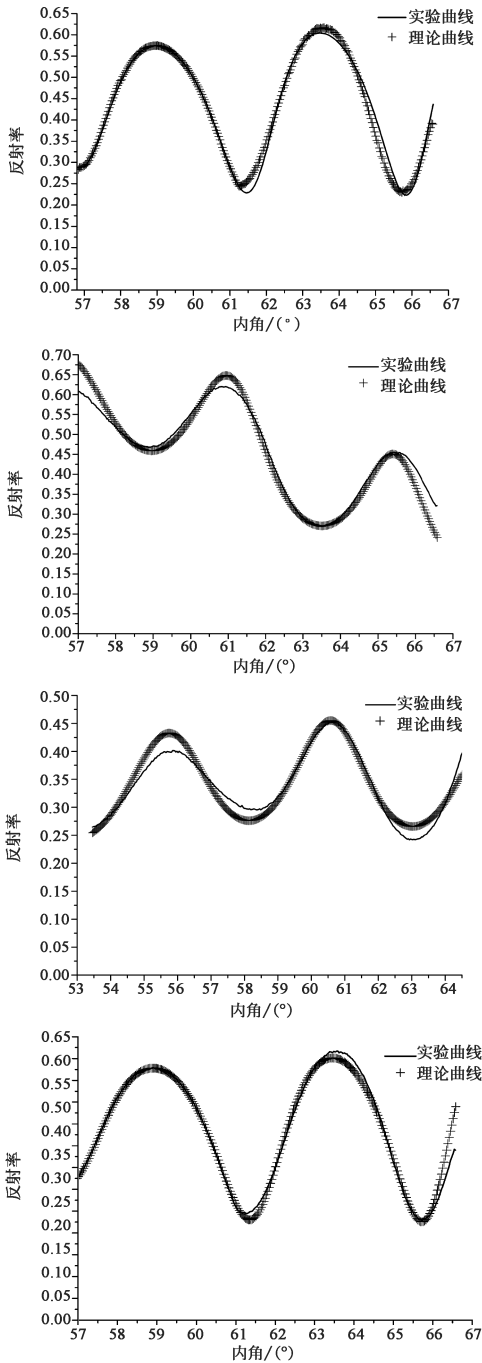


图 5 实验和理论拟合曲线

Fig. 5 Fitted curves between experimental data and theory

表 1 拟合参数
Tab.1 Parameters of fitting

光学层	ϵ_r	ϵ_i	厚度/nm
ITO	3.27	0.0090	30
取向层	2.05	0.0050	44
液晶($\epsilon_{//}$)	2.50	0.0001	2.78×10^3
液晶($\epsilon_{\perp}$)	2.20	0.0001	2.78×10^3
铝电极	-56.17	21.8130	28

通过 2.2 部分可知,在液晶层中的导波模量是基于液晶层中详细的折射率分布的,并且不同的导波模量具有它自己的横过液晶层的光场分布并敏感于液晶层的不同部分,因此每种波导模量都有与之对应且确定的指向矢分布。现在可以利用弹性连续体理论对液晶指向矢方程进行数值分析求解,在给定液晶参数的情况下,就可以精确地模拟出指向矢的分布情况。知道液晶指向矢的分布后,就可以结合 4×4 矩阵模拟预测液晶盒在 s 或 p 偏振光入射情况下的不同反射偏振状态组合的光学特性,将通过理论模拟四种反射信号(R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 、 R_{ss})的结果并与实验测得的结果进行对比拟合,如果理论和实验结果完美拟合,则通过理论模拟的液晶指向矢的分布情况就可以反映实验液晶盒中的指向矢分布情况。所有的反射信号经过上面的处理后都变为与内角相关的反射率。理论模拟的参数设定如表 1 所示,表中的光学介电常数以复数 $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$ 来表示, ϵ_r 和 ϵ_i 分别为实部和虚部,由于铝的光学常数随波长的变化比较大,通过对比相关资料选取表 1 中的值作为其在波长为 632.8 nm 时的光学常数;玻璃基板的光学介电常数为 2.3013,液晶的其它参数为 $K_{11}=10.1$ pN, $K_{22}=5.6$ pN, $K_{33}=19.7$ pN。首先大致确定液晶指向矢在上下玻璃基板的取向情况,液晶盒的扭曲角约为 90° ,具有 ITO 电极的基板上的取向层的摩擦方向与基板的一边约为 20° 夹角,初步设定倾角为 4° ,在前面设定的光学参数基础上,通过设定上下基板不同的扭曲角,比较不同偏振状态组合的反射光的理论模拟曲线和实验曲线变化趋势的一致程度,最后确定在图 2 的坐标系中液晶指向矢在有 ITO 电极的基板上的投影与 x 轴夹角约为 -20° ,则在另一个

基板上的投影与 x 轴的夹角约为 70° 。然后通过调节液晶指向矢在两个基板上的扭曲角和倾角来模拟理论指向矢分布和反射偏振转换信号 R_{ps} 和 R_{sp} , 并与实验得到的 R_{ps} 和 R_{sp} 进行对比拟合。最好的拟合结果如图 5 所示, 此时在图 2 中, 指向矢在上基板与 z 轴的夹角为 86.9° , 下基板为 87.7° , 总扭曲角为 91.2° (上基板为 -21.5° , 下基板为 69.7°)。

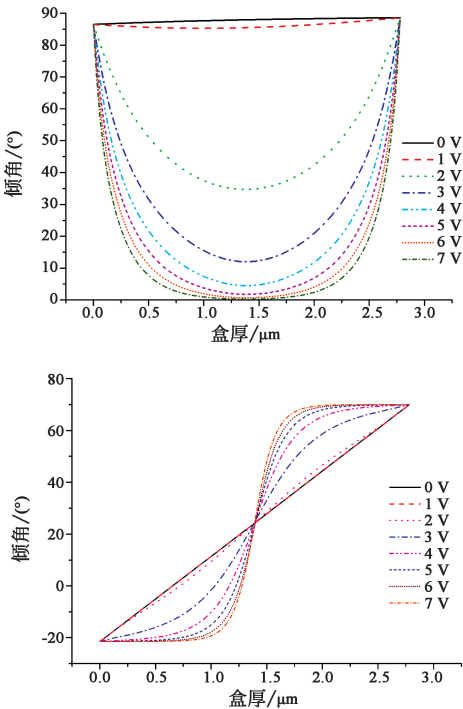


图 6 不同电压下的指向矢分布

Fig. 6 Director distribution under different voltages

在液晶指向矢的倾角和扭曲角确定的情况下, 液晶盒在不同电压下的指向矢分布情况如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 液晶指向矢在液晶盒上下两个基板上的倾角不同, 这可能是由于 ITO 电极和铝反射电极会对覆盖在它们上面的取向层产生不同的影响而造成的, 或者是由于铝反射电极表面的平整度对取向层产生了一定的影响。液晶指向矢在上基板上的投影与基板的一边存在约 20° 夹角, 这可能与反射式混合型扭曲向列相液晶盒自身的特点有关^[6], 对于 90° 扭曲盒, 入射光偏振方向和液晶上基板指向矢之间的夹角约为 20° 时为最佳, 20° 左右的摩擦取向可能便于液晶盒的实际使用, 而液晶指向矢在上基板扭曲角的确定也为实际使用中偏振光的取向提供了方

便。总扭曲角大于 90° 可能是由于测量的光强还存在一定的误差, 虽然对偏振片 3 对光的吸收进行了补偿, 但棱镜等光学元件也都对入射光具有一定的吸收。

实验过程中, 引起接收光强偏差的因素可能还有: (1) 转台在转动的过程中接收反射信号的相位敏感探测器的可能会有微小的震动; (2) 若液晶盒在棱镜耦合结构中没有被固定牢, 其在转动的过程中也会移动; (3) 光束较粗射到相位探测器上的光斑较大从而可能超出探测器的有效光信号接收区域。这就需要在实验过程中要经常检查相位探测器的固定架是否牢固; 制作棱镜耦合结构时, 使两块棱镜底面保持平行的同时要牢牢夹住液晶盒; 通过光圈 1 和 2 使入射光束变细或者在接收反射信号的相位探测器和棱镜耦合结构之间加一个透镜对光线进行聚焦。

5 结 论

光导波技术是能够直接探究液晶分子指向矢在整个液晶盒厚度中空间分布的很好用的光学技术, 通过架设全漏光导波测量系统并对反射式混合扭曲向列相液晶盒进行了导波光学测量, 通过实验测量并采集了不同偏振状态的入射光在经过棱镜耦合进入液晶盒后的反射偏振保存和偏振转换信号。较强的反射偏振转换信号可以被很好地用来确定液晶指向矢的倾角和扭曲角。利用弹性连续体理论和多层光学 4×4 矩阵对不同偏振状态组合的反射信号进行理论模拟并与处理好的实验数据进行拟合, 就得到了液晶指向矢在液晶盒内的倾角和扭曲角, 进而得到了液晶指向矢在不同电压下的空间分布情况。

从拟合结果得知液晶分子指向矢在两个基板上具有不同的倾角, 这可能是由于铝反射电极表面的平整度或铝电极和 ITO 电极对取向层有不同的影响而造成的。实验过程中入射到反射相位敏感探测器上的光强的稳定性特别重要, 因为它与液晶分子指向矢的扭曲角和倾角有关, 微小的光强误差或波动极有可能引起较大的拟合误差; 同时相关光学元件 (如棱镜、偏振片等) 对入射光的吸收也应该考虑并进行相应的光强补偿。

参 考 文 献:

[1] YANG F Z, SAMBLE J R. *Guided mode studies of liquid crystal layers*, Chapter 16 of *nanotechnology and NICE device* [M]. London, UK; Taloy and Francis Ltd, 2003: 1-67.

[2] WELFORD K R, SAMBLES J R, CLARK M G. Guided modes and surface plasmon-polaritons observed with a nematic liquid crystal using attenuated total reflection [J]. *Liquid Crystals*, 1987, 2(1): 91-105.

[3] YANG F Z, SAMBLES J R. Optical characterization of liquid crystals by means of half-leaky guided modes [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(5): 858-866.

[4] YANG F Z, SAMBLES J R. Optical fully leaky mode characterization of a standard liquid-crystal cell [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(3): 488-497.

[5] 张志东,司立彬,叶文江,等. 反射式液晶显示器的导波研究[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(10): 30-33, 43.
ZHANG Z D, SI L B, YE W J, *et al.* Guided wave study of reflective liquid crystal device [J]. *Experimental Technology and Management*, 2013, 30(10): 30-33. (in Chinese)

[6] WU S T, WU C S. Mixed-mode twisted nematic liquid crystal cells for reflective displays [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(11): 1455-1457.

作者简介:赵静(1982—),女,河北崇礼人,硕士研究生,讲师,研究方向为液晶物理。E-mail:yaya821010@sohu.com