文章编号:1007-2780(2016)01-0062-05

取向层参数对响应时间的影响

陈云昌,宣　丽*,姚丽双,彭增辉
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130022;
2. 中国科学院大学,北京 100016)

摘要:为了减小液晶波前校正器的响应时间,本文结合光控取向技术,研究了取向层预倾角及锚定强度特性对器件响应性能的影响。以液晶动力学方程为依据,分析预倾角效应对液晶器件响应时间的影响;利用预倾角及锚定强度与响应时间的定量关系,推导出锚定强度与预倾角的关系,从而简化了锚定强度的测量方法。采用光谱法监测了光控取向膜的取向度;以此为依据,利用 4 种不同曝光方式获得了不同的预倾角。理论模拟及实验结果一致表明:偶氮染料分子(SD1)获得一定的锚定强度后,通过降低其预倾角角度,其所制器件的响应性能实现了优化。

关　键　词:预倾角;锚定强度;响应时间;光致取向液晶盒
中图分类号:TN873　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/YJYXS20163101.0062

Effect of aligning layer parameters on response time

CHEN Yun-chang, XUAN Li*, YAO Li-shuang, PENG Zeng-hui

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics*, *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100016, *China*)

Abstract: In order to reduce the response time of liquid crystal wavefront corrector, the effect of pretilt angle and anchoring strength on the device response performance are studied in this paper, using photo-alignment technology. The liquid crystal molecular dynamic equation is solved to obtain the relation between pretilt angle and response time. According to the quantitative relationshios among the pretilt angle, the anchoring strength and the response time, a formula is derived to describe the relation between anchoring strength and pretilt angle. This study can be used to simplify the measuring method of anchoring strength. The order parameter of photo-alignment film were measured by spectrometry. Based on this study, several photoaligned LC cells with different pretilt angle are fabricated with four different exposure modes. Theoretical simulation and experimental results consistently showed that: after azo dye molecules (SD1) obtained a certain anchoring strength, the response performance of device will be optimized by reducing the pretilt angle.

Key words: pretilt angle; anchoring strength; response time; photoaligned LC cell

---

收稿日期:2015-08-07;**修订日期**:2015-10-10.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61205021)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61205021)
* **通信联系人**,E-mail:xuanli@ciomp.ac.cn

1 引　　言

自适应光学系统由波前校正器、控制器、波前探测器组成，其中波前校正器是自适应光学系统中的核心器件。目前广泛采用的波前校正器为变形镜，由于制作工艺的限制，变形镜的校正单元数很难做到很多，难以满足大口径望远镜的需求。20 世纪 90 年代，研究者开始利用液晶的位相调制特性进行波前校正[1]。液晶波前校正器作为一种更具潜力的新型波前校正器，充分利用了液晶显示器的制作工艺，可以实现非常高的像素密度，满足大口径望远镜的空间分辨率要求。然而为了在自适应光学技术中达到实用化水平，液晶波前校正器的响应速度需进一步提高。而液晶校正器响应速度的提升主要依赖快速液晶材料[2-3]的开发和 LCoS 器件制备工艺的优化[4]。对于通过开发新型快速液晶材料来提升响应速度的方法，其优化潜力基本达到极限。因此，对液晶波前校正器的制备工艺进行研究，进一步挖掘其提速的潜力显得尤为重要。

液晶波前校正器响应时间受取向层[5-6]的影响显著。对取向层进行适当处理后，基板表面液晶分子会产生定向排列，同时使液晶分子长轴方向与取向层之间产生一定夹角，这一夹角就称为液晶分子的预倾角。在液晶校正器工作过程中，预倾角对其响应时间具有重要影响。本文基于液晶动力学，分析了预倾角对响应时间的影响。然后采用光控取向技术，利用不同的曝光方式实现对具有不同预倾角器件的制备。通过实验及测量结果，验证了预倾角对响应时间的影响，实验测量结果与理论分析相吻合。

2 原　　理

2.1 预倾角对响应时间的影响

对于液晶器件，响应时间分为上升时间和下降时间。上升时间为从零电场到最高电场所需的时间，下降时间为撤去外加电压的情况下，液晶分子在弹性力作用下自由回落所需的时间。通常情况下，上升时间远远小于下降时间，因此，在研究液晶器件的响应时间中，主要考略下降时间。

液晶器件中，当液晶分子发生转动时，将与相邻层中的分子产生相对运动。受此相互作用的影响，分子的运动会受到临近分子的阻碍作用，这种液晶分子指向矢在运动过程中所受阻力称为粘滞力。液晶指向矢的运动可用 Erickson-Leslie 方程表征：

$$-\gamma_1 \frac{\partial\theta}{\partial t} + I\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} = (K_{11}\cos^2\theta + K_{33}\sin^2\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z} + (K_{33} - K_{11})\sin\theta\cos\theta(\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2})^2 + \varepsilon_0\Delta\varepsilon E^2\sin\theta\cos\theta + (\alpha_2\sin^2\theta - \alpha_3\cos^2\theta)\frac{\partial v}{\partial z}, \quad (1)$$

式中：等号左边第一项为粘滞阻力矩，第二项为惯性力矩，右边前两项为弹性力矩，第三项表示电场力矩，第四项表示由与定向流动而引起的阻力矩。其中 I 为惯性力，θ 为指向矢与基板的夹角，γ_1 是旋转粘度，K_{11} 和 K_{33} 为弹性系数，E 为外加电场强度，$\Delta\varepsilon$ 是介电各向异性，α_2 和 α_3 是 Leslie 粘度系数，v 是流动速度。上式仅存在数值解，通常情况下，惯性效应与回流效应可以忽略，因此在小角近似以及单一弹性常数近似情况下，考虑下降时间，则方程(1)可简化为：

$$K_{11}\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} = -\gamma_1\frac{\partial\theta}{\partial t}. \quad (2)$$

电压确定的条件下，假设液晶盒中央位置处的最大倾角为 θ_m。

当预倾角不为零时，以液晶盒中心为零点，此时满足以下边界条件：

$$\theta_{Z=-d/2,d/2} = \theta_p \neq 0, \quad (3)$$

此时式(2)的通解为：

$$\theta(z,t) = \theta_m\cos(\beta z)\exp(-t/\tau), \quad (4)$$

其中：$\tau = \frac{\gamma_1}{K_{11}\beta^2}$ 为液晶分子指向矢的响应时间，即倾角 θ 变为原来的 1/e 时所用的时间。d 为盒厚，z 为液晶分子在液晶盒中所处的位置。

根据边界条件式(3)可以得到：

$$\beta = 2/d \times \arccos(\theta_p/\theta_m), \quad (5)$$

其中：θ_m 为液晶盒中央部位的最大倾角。通常情况下认为外界所施加电压足够时，液晶器件中央位置的最大倾角为 90°。液晶器件的响应时间：

$$\tau^* = \frac{\gamma_1}{K_{11}\beta^2} \quad , \tag{6}$$

一般情况下，预倾角远小于液晶盒中央的最大倾角，因此项可作如下近似：

$$\arccos(\frac{\theta_p}{\theta_m}) \approx \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_p}{\theta_m} . \tag{7}$$

因此在存在预倾角效应时，新的响应时间公式为：

$$\tau^* = \frac{\gamma_1}{K_{11}\beta^2} = \frac{\gamma_1 d^2}{4K_{11}(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_p}{\theta_m})^2} \quad , \tag{8}$$

由式(8)可以看出，当预倾角为零时，响应时间变为 $\tau = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{11}\pi^2}$ 与强锚定零预倾角情况下相符合。此外，可以看出随着预倾角的增大，响应时间将会变长。因此，较小的预倾角有利于实现响应速度的加快。

2.2 预倾角与极向锚定强度的关系

通常情况下，极向锚定强度测量方法[7-10]较为复杂。我们将锚定强度与预倾角联系起来，得到两者之间的定量关系，可以直接得到极向锚定强度的数值。

如 2.1 中所述，强锚定情况下响应时间为 $\tau = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{11}\pi^2}$，当锚定强度为有限大小时，上式将不再适用。因此用外推长度的概念来推导响应时间。定义 $b = K/W$ 为外推长度。采用等效盒厚的方法，可以得到如下的响应时间公式：

$$\tau_0 = \frac{\gamma_1 d'^2}{K\pi^2} = \frac{\gamma_1}{K\pi^2}(d+2b) = \frac{\gamma_1}{K\pi^2}(d^2 + \frac{4dK}{W} + \frac{4K^2}{W^2}) \quad , \tag{9}$$

其中：$d' = d + 2b$ 为等效盒厚，K 为液晶弹性常数，W 为锚定强度。式(9)括号中第三个项对响应时间产生的影响所占比重仅为 3% 左右，因此可以忽略。上式简化为：

$$\tau_0 = \frac{\gamma_1}{K\pi^2}(d^2 + \frac{4dK}{W}) = \frac{\gamma_1 d}{K\pi^2}(d + \frac{4K}{W}) \quad . \tag{10}$$

在液晶器件其他参数相同的情况下，由式(8)和式(10)可以得到：

$$w = \frac{16K_{11}(\pi/2 - \theta_p/\theta_m)^2}{\pi^2 d - 4d(\pi/2 - \theta_p/\theta_m)^2} \quad , \tag{11}$$

根据式(11)，可以确定对应预倾角数值下的表面极向锚定强度的大小，简化了锚定强度的测试方法。

3 实验及结果

光控取向技术由于其非接触式取向机理，完全避免了摩擦引起的静电、灰尘和划痕等问题，非常适用于高精细化的液晶波前校正器。因此我们采用非接触式的光控取向技术[11-14]对液晶器件取向层进行处理。

3.1 样品的准备

选取偶氮染料分子 SD-1 作为光控取向材料进行实验。将偶氮染料(SD-1)溶于 N-甲基吡咯烷酮中，配成溶质浓度为 1% 的溶液。将该溶液旋涂到带有 ITO 电极的玻璃基板上，在 100 ℃下预固化 10 min。选取超高压球形短弧汞灯为光源，并加入 365 nm 干涉滤波片和格兰棱镜(用于对紫外光进行起偏)。所制备液晶盒厚为 40 μm，并注入向列相液晶 SLC-9023。在进行取向处理时，采用线性紫外偏振光 UV-365 光强为 1.5 mW/cm^2。光斑直径为 15 mm。光照时间为 0～360 s，每次间隔为 30 s。

3.2 取向膜偏振吸收光谱

为了确定使偶氮染料分子(SD1)取向良好的曝光时间，即取向膜表面分子链段的有序分布，我们首先测量了经线偏振紫外光照射基板的吸收偏振光谱。实验中，分别测量了与辐照用线偏振紫外光偏振方向平行和垂直的光谱。二向色性比可以表示为：

$$\text{二向色性比} = A_{\perp}/A_{//} \quad , \tag{12}$$

其中：$A_{//}$ 和 $A_{\perp}$ 分别表示与激活 UV 光偏振方向平行和垂直的偏振光的吸光度。

分别测量与紫外曝光情况平行与垂直情况下的偏振吸收度。

测量过程及装置装置如图 1 所示。

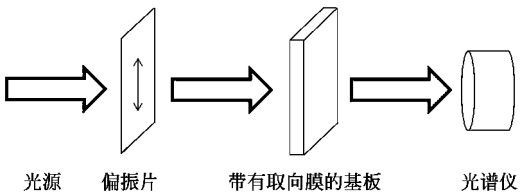

图 1 有序参数测量装置

Fig. 1 Order parameter measuring device

测试时，放置偏振片对入射光进行起偏，偏振片固定在可绕中心轴旋转的支架上，通过调节旋转角度可获得不同方向上的吸收光谱。将偏振片的通光轴分别放置在与辐照用线偏振紫外光偏振方向平行或垂直的方向进行测量。

测量及计算结果如图 2 所示。

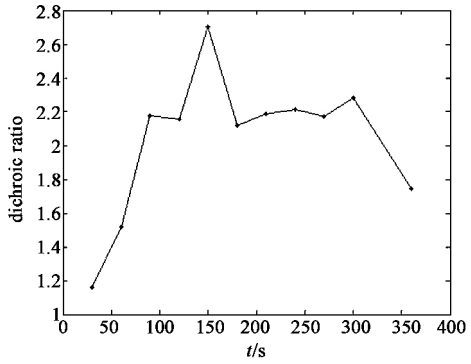

图 2　有序参数随光照时间的变化关系

Fig. 2　Relationship between the order parameter and the illumination time

由图 2 可以看出光照时间为 150 s 时，取向度最高。此光照条件下，取向效果最佳。在以下实验中，取曝光时间 150 s 为基准。

3.3　预倾角

实验中采用下图所示四种方法获得预倾角。

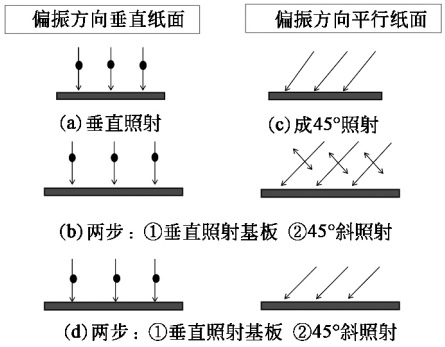

图 3　SD-1 膜上获得预倾角的 UV 光照方法

Fig. 3　Methods to prepare pretilt angle on SD-1 film

上述取向过程在 25 ℃室温下进行，基板表面线偏振光 UV-365 光强均为 1.5mW/cm^2，每次曝光时间为 150 s。经测定，锚定强度均处于 10^4 J/m^2 量级。利用晶体旋转法[15]分别测量液晶盒的预倾角，并测量相应的响应时间，测量结果如下表所示：

表 1 不同预倾角情况下，液晶器件的响应时间

Tab. 1　Response time of liquid crystal devices with different pretilt angle

序号	预倾角/(°)	响应时间计算值/ms	响应时间测量值/ms
a	0.43	187.66	187.79
b	1.13	189.54	191.27
c	2	191.91	197.98
d	3.27	195.47	207.57

由表 1 可以看出，随着预倾角的逐渐减小，响应时间不断缩短，证实了响应时间随预倾角的减小而逐渐减小。

利用式(8)进行理论模拟，与实验测量结果进行对比，如图 4 所示。

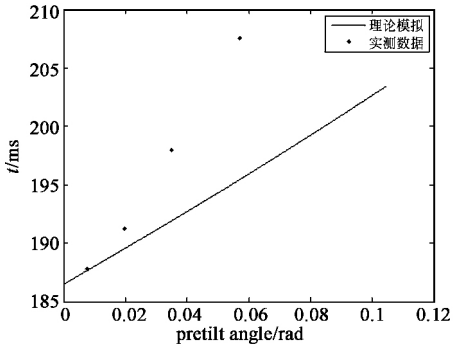

图 4　理论模拟与实验数据对比

Fig. 4　Comparison between theoretical and experimental data

由表 1 及图 4 可以看出，实验结果与理论模拟二者相差较小，上述 4 组实验中理论计算值与实际测量值相差分别为 0.07%、0.91%、3.06%、5.83%。因此，在预倾角较小情况下，上述式(8)可以较好的描述预倾角对响应时间影响。

4　结　　论

通过实验发现，光控取向材料 SD-1 在紫外线偏光照射 150 s 时，可获得良好的取向效果；利用响应时间与锚定强度及预倾角的定量关系，推导出锚定强度与预倾角的关系，从而简化锚定强度的测量；经实验验证，预倾角效应对响应时间有一定影响，液晶器件的响应时间随着预倾角的减

小而缩短，当预倾角较小时，实验中理论计算与测量值误差最大约为5.83%。因此，上述理论公式在一定程度上可以较好的描述预倾角效应对响应时间的影响。

参 考 文 献：

[1] GOURLAY J, LOVE G D, BIRCH P, *et al*. A real-time closed-loop liquid crystal adaptive optics system: First results[J]. *Opt. Commun.*, 1997, 137(1/3): 17-21.

[2] SPADLO A, DABROWSKI R, DZIADUSZEK J, *et al*. Liquid crystalline materials with high birefringence[J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, 72(9): 659-661.

[3] DABROWSKI R, DZIADUSZEK J, ZIÓŁEX A, *et al*. Low viscosity, high birefringence liquid crystalline compounds and mixtures[J]. *Opto-Electron. Rev.*, 2007, 15(1): 47-51.

[4] 齐梦娇. 器件参数对液晶波前校正器响应时间影响的研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2013.
QI M J. Study of response time depending on device parameters of liquid crystals wavefront corrector [D]. *Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*, 2013. (in Chinese)

[5] 贾正根. 液晶显示取向层的现状及未来[J]. 真空电子技术，1998(3)：47-51.
JIA Z G. Status and development of alignment layers for liquid crystals[J]. *Vacuum Electronics*, 1998(3): 47-51. (in Chinese)

[6] 王永，孙士样，陈羽，等. 液晶显示器取向膜性能的影响因素分析[J]. 现代显示，2010，21(2)：19-21.
WANG Y, SUN S X, CHEN Y, *et al*. Factors analysis of alignment layer properties for LCD[J]. *Advanced Display*, 2010, 21(2): 19-21. (in Chinese)

[7] 孙睿鹏，黄锡珉，马凯，等. 聚酰亚胺膜上液晶表面锚定强度的研究[J]. 物理学报，1995，44(6)：897-902.
SUN R P, HUANG X M, MA K, *et al*. Investigation of surface anchoring strength of liquid crystals on polyimide film[J]. *Acta Physica Sinica*, 1995, 44(6): 897-902. (in Chinese)

[8] 刘绍锦，宋玉龙，张俊瑞，等. 改进的极向锚定强度测量方法[J]. 液晶与显示，2006，21(1)：15-18.
LIU S J, SONG Y L, ZHANG J R, *et al*. Improved measuring method for polar anchoring energy[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(1): 15-18. (in Chinese)

[9] MURAUSKI A, CHIGRINOV V, MURAVSKY A, *et al*. Determination of liquid-crystal polar anchoring energy by electrical measurements.[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(6): 061707.

[10] MURAUSKI A, CHIGRINOV V, KWOK H S. New method for measuring polar anchoring energy of nematic liquid crystals[J]. *Liquid Crystals*, 2009, 36(8): 779-786.

[11] 郭海成，CHIGRINOV V，PRUDNIKOVA E，等. 用于液晶盒偶氮染料光致取向层的合成和性质[J]. 现代显示，2003(4)：26-32.
GUO H C, CHIGRINOV V, PRUDNIKOVA E, *et al*. Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cell[J]. *Advanced Display*, 2003(4): 26-32. (in Chinese)

[12] 彭增辉. 基于自组装膜的液晶光控取向研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2005.
PENG Z H. Study on photoaligment film of liquid crystals based on self-assembled film [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

[13] 阮剑利. 偶氮染料的光敏性研究[J]. 染料与染色，2003，40(2)：75-77.
RUAN J L. A study on the photosensitivity of azo dyes[J]. *Dyestuffs and Coloration*, 2003, 40(2): 75-77. (in Chinese)

[14] 闫石. 液晶光控取向膜材料的研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2001.
YAN S. Study on the materials of liquid crystal photo-alignment layers[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)

[15] 张晴. 液晶预倾角的晶体旋转法测量装置[J]. 分析仪器，1997(4)：35-37.
ZHANG Q. Liquid crystal pretilt angle measurement apparatus based on crystal rotation method[J]. *Analytical Instrumentation*, 1997(4): 35-37. (in Chinese)

作者简介：陈云昌(1990－)，**男，山东淄博人，硕士，主要从事液晶器件制备方面的研究**。E-mail：cyc900123@163.com