

基于液晶动态响应的挠曲电系数测量

邢红玉^{1,2,3} 叶文江^{3*} 蔡明雷⁴ 刘晓梦³ 张志东³ 宣丽¹

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 130033

²中国科学院大学,北京 100049

³河北工业大学理学院,天津 300401

⁴河北冀雅电子有限公司,河北 石家庄 050071

摘要 基于自组装的液晶动态响应实验装置,研究了液晶挠曲电效应对强锚泊混合排列向列相(HAN)液晶动态响应过程的影响。实验中HAN液晶盒施加脉宽为250 ms、幅度可调的正负单脉冲电压信号,结果发现:幅度相同的正负脉冲电压信号作用下液晶的动态响应不同,幅度不同的正脉冲或负脉冲电压信号作用下液晶的动态响应也不同。通过幅度不同的正脉冲电压信号(3、4、5、6 V)作用下液晶动态响应实验曲线与考虑挠曲电效应情形下液晶动态响应理论曲线之间的比较,得到了液晶材料E7的挠曲电系数为 $e_{11}+e_{33}=4.0\times 10^{-11}$ C/m,与文献中报道的实验测量值基本一致。

关键词 测量;混合排列向列相;动态响应;挠曲电效应;单脉冲;脉宽

中图分类号 O753+.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0323002

Measurement of Flexoelectric Coefficient Based on the Dynamic Response of Liquid Crystal

Xing Hongyu^{1,2,3} Ye Wenjiang³ Cai Minglei⁴ Liu Xiaomeng³ Zhang Zhidong³ Xuan Li¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

⁴Hebei Jiya Electronics Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050071, China

Abstract Based on the self-assembly experimental installation, the influence of flexoelectric effect on the dynamic response of strong anchoring hybrid aligned nematic (HAN) liquid crystal is studied. The positive and negative monopulse with pulse width of 250 ms and adjustable amplitude are applied to HAN cell during experiment. The results show that the dynamic response of liquid crystal is different from the pulse with the same amplitude, as well as from the positive pulse or negative pulse with different amplitudes. Through comparing the experimental curves of the dynamic response of liquid crystal for different positive pulses 3 V, 4 V, 5 V, 6 V with the corresponding theoretical curves with the flexoelectric effect considered, the sum of flexoelectric coefficient of liquid crystal material E7 is $e_{11}+e_{33}=4.0\times 10^{-11}$ C/m, which is in agreement with the experimental measurement value reported in the literature.

Key words measurement; hybrid-aligned nematic; dynamic response; flexoelectric effect; monopulse; pulse width

OCIS codes 230.3720; 310.6860; 230.2090

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(11274088, 11374087, 11304074, 11447179)、河北省自然科学基金(A2014202123)、河北省教育厅项目(QN2014130)、河北省高校重点学科项目

作者简介: 邢红玉(1978—),女,硕士,副教授,主要从事液晶物理和液晶器件物理等方面的研究。

E-mail: hongyu_xing@163.com

*通信联系人。E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn

1 引 言

液晶动态响应过程是指液晶盒施加或去掉电压瞬间液晶的动力学响应,即液晶形变随时间的变化会导致液晶盒的光学响应(透射率)随时间的改变,由此可以分析液晶的响应时间并判断液晶的响应速度问题^[1]。反过来,通过对液晶响应时间的实验测量可以分析影响液晶动态响应的各种因素。液晶的挠曲电效应对强锚泊混合排列向列相(HAN)液晶响应时间的影响在文献[2]中曾经做过详细的理论分析,将此理论结果与实验测量进行比较可以分析挠曲电效应的影响,同时还可以得到液晶材料的挠曲电系数。

液晶材料的挠曲电效应类似于固体中的压电效应,是指具有永久偶极矩的向列相液晶分子在展曲或弯曲形变下会产生极化,反过来电场也可能使液晶发生形变^[3]。1969年, Meyer^[4]提出了描述挠曲电极化强度矢量的定量表达式 $\mathbf{P} = e_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} + e_{33}(\nabla \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$, 式中 e_{11} 和 e_{33} 分别为展曲和弯曲挠曲电系数, \mathbf{n} 为液晶指向矢。基于挠曲电效应的液晶器件具有响应速度快、对比度高、视角宽等优点,得到了一些科研工作者的重视^[5-10],这些优点与液晶材料的挠曲电特性相关,即液晶的挠曲电系数。挠曲电效应对 HAN 液晶导模和手征液晶螺旋光轴及电光响应时间影响的理论分析在文献[11-12]中给出了详细描述,由此得到测量液晶挠曲电系数的方法。关于挠曲电系数的测量,不同研究组采取不同方法,使得对同一种液晶材料的测量给出的结果不尽相同^[13-26],因此重新对这一问题进行研究。

由于挠曲电效应对液晶动态响应的影响在直流电压下比较明显^[15,27]。因此,本文对 HAN 液晶盒施加脉宽为 250 ms、幅度可调的正单脉冲和负单脉冲电压信号。通过不同正单脉冲电压信号下 HAN 液晶盒光学透射率随时间变化曲线与理论模拟结果的比较,可以得出挠曲电效应对液晶动态响应的影响,并给出了液晶材料的挠曲电系数的实验测量值。

2 理论分析

2.1 理论模型

强锚泊 HAN 液晶盒模型化为图 1 所示的结构,灌注的液晶材料为 E7。液晶分子在下基板表面是沿面平行排列,而在上基板表面是垂面排列,液晶盒厚度为 l 。垂直于基板方向(z 方向)外加一脉冲电压 U 作用在液晶盒上。考虑液晶的动力学行为—液晶盒透射率随时间的变化,必须要知道液晶指向矢 \mathbf{n} 随时间和空间的变化。由于液晶形变被局限在 xoz 平面内变化,指向矢 \mathbf{n} 用倾角 θ 描述,为坐标 z 和时间 t 的函数,即 $\theta = \theta(z, t)$ 。

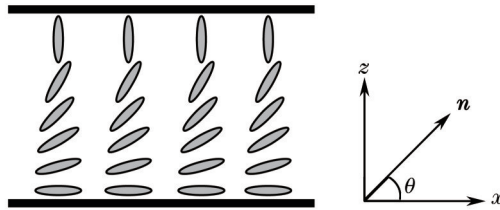


图 1 HAN 液晶盒结构及坐标系

Fig.1 Structure of HAN liquid crystal cell and the coordinate system

根据向列相液晶动力学理论^[3,28],忽略引流效应,指向矢运动方程为

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = f_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial f_{\text{eff}}(\theta)}{\partial \theta} \theta^2 + \frac{1}{2} D_z^2 \frac{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon \sin 2\theta}{[g(\theta)]^2}, \quad (1)$$

式中 $f_{\text{eff}}(\theta) = f(\theta) + \frac{(e_{11} + e_{33})^2 \sin^2(2\theta)}{4g(\theta)}$, $f(\theta) = k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta$, k_{11} 和 k_{33} 分别对应液晶材料的展曲和弯曲弹性常数, $D_z = -g(\theta) \frac{d\varphi}{dz} + P_z$ 为 z 方向的电位移矢量, φ 为液晶盒内部电势, $g(\theta) = \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp} + \Delta \varepsilon \sin^2 \theta)$, ε_0 为真空介电常数, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ 为液晶材料的介电各向异性, ε_{\parallel} 和 ε_{\perp} 分别为平行和垂直于指向矢方向的介电常数, P_z 为挠曲电极化强度矢量在 z 方向的分量, γ_1 为液晶材料的转动粘滞系数。边界条件为

$$\theta(0, t) = 0, \theta(l, t) = \pi/2. \quad (2)$$

2.2 动态响应数值模拟

采用文献[2]的数值计算方法,将整个液晶盒沿 z 轴分成 $N(N=101)$ 层,每一液晶子层的厚度为 $h=l/N$,即为空间步长,上下基板分别是第 N 层和第1层,时间步长为 τ 。指向矢运动方程迭代格式仍然为文献[2]中的(14)式,若 t 时刻指向矢分布 θ_{ij} 已知,根据迭代格式可以确定 $t+\tau$ 时刻的指向矢分布 θ_{ij+1} 。在此基础上可以进行液晶盒光学透射率的计算。

与实验相对应,当HAN盒上下偏振片正交放置,并且起偏片的透光轴与下基板的摩擦方向成 45° 夹角时,液晶盒透射光强随时间的变化为^[29]

$$I(t) = I_0 \sin^2[\Delta\phi(t)/2], \quad (3)$$

式中 I_0 是光通过起偏振片后的强度, $\Delta\phi(t)$ 是在 t 时刻穿过液晶层时产生的相位延迟量,具体表达式为

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^l \frac{n_e n_o dz}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} - n_o l \right], \quad (4)$$

式中 λ 是入射光的波长, n_e 和 n_o 分别是光在液晶中传播时e光和o光的折射率。

3 实 验

3.1 液晶动态响应实验测量

液晶动态响应实验装置如图2所示,由He-Ne激光器(632.8 nm)、偏振片1、HAN液晶盒、偏振片2、硅光探测器、信号采集卡和单脉冲信号源构成。偏振片1和2正交放置,HAN盒水平摩擦基板与偏振片1对应,垂直摩擦基板与偏振片2对应,并且水平摩擦方向与偏振片1的透光轴成 45° 。HAN盒上下基板施加一个正负脉冲电压信号,脉冲宽度为250 ms,相邻两个脉冲极性相反,时间间隔为2 s,保证去掉脉冲电压信号后液晶达到稳定状态。该脉冲电压信号自主开发,其产生电路包括电源模块、单片机最小系统、显示模块、按键模块、波形产生模块,电压值在1.0 V至10.0 V之间以步进值为1.0 V可调。

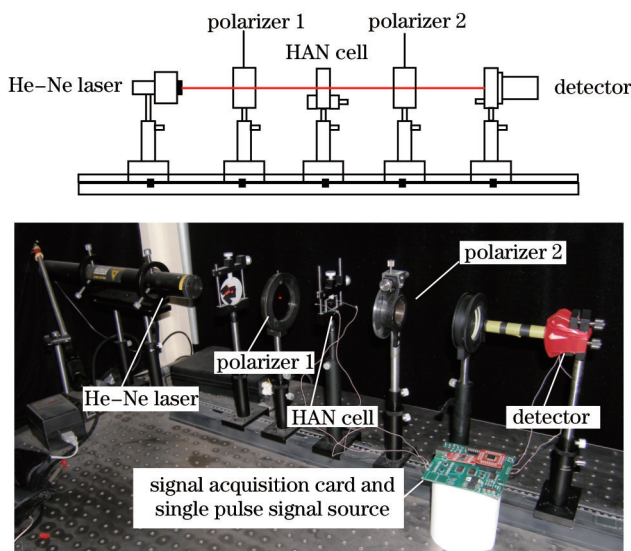


图2 液晶动态响应实验装置示意图和实物图

Fig.2 Experimental diagram and physical map for measuring the dynamic response of liquid crystal

He-Ne激光器发出的激光经偏振片1变成沿其透振方向振动的线偏振光,经过单脉冲电压信号驱动的HAN盒,由于液晶的双折射效应,光的偏振状态会发生变化,穿过偏振片2的透射光强也会发生变化,信号采集卡可以记录下光强变化的数据,再由Origin软件得到HAN盒动态响应实验曲线。改变单脉冲电压信号的幅度,可以得到不同电压下的动态响应实验曲线。实验中,对液晶盒施加不同幅度的正负单脉冲电压信号的动态响应过程均进行了测量,发现幅度相同的正负脉冲电压信号作用下液晶的动态响应不同,幅度不同的正脉冲或负脉冲电压信号作用下液晶的动态响应也不同。但是为了与理论模拟进行比较,同时也为了

分析挠曲电效应对HAN盒动态响应的影响,选择施加正单脉冲电压信号的实验数据进行了处理。

3.2 实验分析

正如文献[2]中理论分析指出:挠曲电系数取不同值时,撤掉电压液晶盒归一化透射率随时间变化率是不同的,并且挠曲电系数数值大小与透射率曲线一一对应。当施加脉冲信号频率较高(大于等于10 Hz)时,挠曲电效应对液晶盒归一化透射率随时间变化的影响可以忽略^[15,27],实验测量得到的液晶动态响应曲线对应挠曲电系数为0的理论曲线。实验中,取脉冲电压信号脉宽为250 ms,挠曲电效应的影响必然存在。因此,可以通过取不同挠曲电系数数值大小数值模拟得到的理论曲线与实验曲线进行比较,相吻合时对应的理论曲线给出的挠曲电系数大小即为液晶材料的挠曲电系数数值。理论计算时,液晶材料E7的参数为: $k_{11}=9.0$ pN、 $k_{33}=12.1$ pN、 $\varepsilon_{\perp}=4.9$ 、 $\Delta\varepsilon=11.59$ 、 $\gamma_1=0.08$ N·s/m²、 $n_e=1.7$ 、 $n_o=1.521$,液晶盒厚度为 $l=4$ μm(由紫外分光光度计测量得到),入射光的波长为 $\lambda=632.8$ nm,液晶挠曲电系数取值为 $e_{11}+e_{33}=4.0\times 10^{-11}$ C/m。不同幅度的正单脉冲电压信号施加在液晶盒上时归一化光透射率随时间变化的理论曲线如图3所示,与此相对应的实验曲线也在图上给出,黑、红、绿、蓝四种颜色对应的电压分别为3、4、5、6 V。

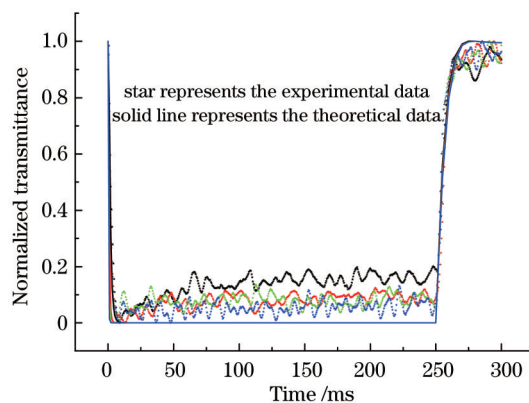


图3 施加不同幅度正单脉冲电压信号时归一化透射率随时间的变化

Fig.3 Variation of the normalized transmittance with the time for positive monopulse with different amplitudes

对应不同幅度的正单脉冲电压信号,液晶动态响应实验曲线与理论模拟曲线变化趋势基本相同。脉冲电压信号施加在液晶盒上时,液晶盒透射率随时间的延迟逐渐变小,直至液晶形变达到稳定状态,即平衡态,此时透射率最小;撤掉脉冲电压信号时,液晶形变又恢复到初始状态(未施加脉冲电压时的状态),透射率随时间的延迟逐渐变大,最终透射率值达到最大。液晶盒施加脉冲电压时,存在挠曲电效应对液晶动态响应的影响,与之共存的还有电场的影响,并且电场效应在大电压时容易掩盖挠曲电效应的影响。因此,施加脉冲电压信号时理论和实验曲线能稍微差别正是由于电场效应引起的。但是液晶盒撤掉脉冲电压信号时,只有挠曲电效应对液晶动态响应的影响能够体现出来,而在这个区间理论和实验曲线吻合很好。液晶盒施加脉冲电压信号区间内,实验曲线相对于理论曲线偏高一些,说明实验中存在漏光现象,但是这并不影响液晶的响应。由此可知液晶材料E7的挠曲电系数为 $e_{11}+e_{33}=4.0\times 10^{-11}$ C/m。Kischka等^[20]曾通过测量光学补偿电压的方法对HAN盒中液晶材料E7的挠曲电系数进行测量,给出了其数值为 $e_{11}+e_{33}=4.5\times 10^{-11}$ C/m。测量结果虽然与Kischka等得到的结果存在一定的偏差,但是两种方法测量数值基本保持一致。

4 结 论

通过自组装的液晶动态响应装置对不同脉冲电压下强锚泊混合排列向列相液晶动态响应的测量,研究了液晶材料E7的挠曲电特性。通过实验与理论对比得到了液晶材料E7的挠曲电系数大小为 $e_{11}+e_{33}=4.0\times 10^{-11}$ C/m,与文献报道的实验测量数值基本一致。此种方法可以进行推广,用于测量共面转换模式中液晶材料挠曲电系数的差值,即 $e_{11}-e_{33}$ 的数值大小,这方面的工作将在后续的报道中介绍。

参 考 文 献

- 1 S T Wu, D K Yang D K. Fundamentals of Liquid Crystal Devices [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. 224.
- 2 Xing Hongyu, Ye Wenjiang, Zhou Xuan, *et al.*. Flexoelectric effect in response time of nematic liquid crystal cell [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(5): 727-732.

- 邢红玉, 叶文江, 周 璇, 等. 挠曲电效应对向列相液晶盒响应时间的影响[J]. 计算物理, 2013, 30(5): 727-732.
- 3 Xie Yuzhang. The Physics of Liquid Crystals [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- 谢毓章. 凝聚态物理学丛书: 液晶物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 4 R B Meyer. Piezoelectric effects in liquid crystal [J]. Phys Rev Lett, 1969, 22(18): 918-921.
- 5 J S Patel, R B Meyer. Flexoelectric electro-optics of cholesteric liquid crystal [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(15): 1538-1540.
- 6 G P Bryan-Brown, C V Brown, I C Sage, *et al.*. Voltage-dependent of a nematic liquid crystals on a grating surface [J]. Nature, 1998, 392(6674): 365-367.
- 7 J C Jones. Novel geometries of the zenithal bistable device [J]. SID 06 Digest, 2006, 31(4): 1626-1629.
- 8 L A Parry-Jones, R B Meyer, S J Elston. Mechanisms of flexoelectric switching in a zenithally bistable nematic device [J]. J Appl Phys, 2009, 106(1): 014510.
- 9 J Chen, S M Morris, T D Wilkinson, *et al.*. High speed liquid crystal over silicon display based on the flexoelectro-optic effect [J]. Opt Express, 2009, 17(9): 7130-7137.
- 10 Harry Coles, Stephen Morris, Flynn Castles, *et al.*. Ultrafast high optical contrast flexoelectric displays for video frame rates [J]. SID 2012 Digest, 2012, 43(1): 544-547.
- 11 Xing Hongyu, Ye Wenjiang, Si Libin, *et al.*. Influence of flexoelectric effect on guided mode hybrid-aligned nematic liquid crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0223002.
- 邢红玉, 叶文江, 司立彬, 等. 混合排列向列相液晶导模中挠曲电效应的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0223002.
- 12 Guan Ronghua, Yang Liwei. Influence of elastic deformation of chiral nematic liquid crystal on helical optic axis rotation angle and electro-optics response time [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0216001.
- 关荣华, 杨立伟. 弹性形变对手征液晶螺旋光轴及电光响应时间的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0216001.
- 13 D Schmidt, M Schadt, W Z Helfrich. Liquid-crystalline curvature electricity: the bending mode of MBBA [J]. Naturforsch, 1972, 27: 277-280.
- 14 L A Beresnev, L M Blinov, S A Davidyan, *et al.*. Direct measurement of the flexoelectric polarization of nematic liquid crystals [J]. JETP Lett, 1987, 45(12): 755-758.
- 15 T Takahashi, S Hashidate, H Nishijou, *et al.*. Novel measurement method for flexoelectric coefficients of nematic liquid crystals [J]. Jpn J Appl Phys, 1998, 37(4A): 1865-1869.
- 16 A Mazzulla, F Ciuchi. Optical determination of flexoelectric coefficients and surface polarization in a hybrid aligned nematic cell [J]. Phys Rev E, 2001, 64(2): 021708.
- 17 S A Jewell, J R Sambles. Fully-leaky guided mode measurement of the flexoelectric constant ($e_{11}+e_{33}$) of a nematic liquid crystal [J]. Mol Cryst Liq Cryst, 2003, 401(1): 67-73.
- 18 J Harden, B Mbang, N Éber, *et al.*. Giant flexoelectricity of bent-core nematic liquid crystals [J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(15): 157802.
- 19 E K Tidey, L A Parry-Jones, S J Elston. Determination of the difference of flexoelectric coefficients in a nematic liquid crystal using a conoscopic technique [J]. Liq Cryst, 2007, 34(2): 251-255.
- 20 C Kischka, S J Elston, E P Raynes. Measurement of the sum (e_1+e_3) of the flexoelectric coefficients e_1 and e_3 of nematic liquid crystals using a hybrid nematic (HAN) cell [J]. Mol Cryst Liq Cryst, 2008, 494(1): 93-100.
- 21 C L Trabi, C V Brown, A A T Smith, *et al.*. Interferometric method for determining the sum of the flexoelectric coefficients (e_1+e_3) in an ionic nematic material [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(22): 223509.
- 22 H M Sykulska, L A Parry-Jones, S J Elston. Measurement of flexoelectric coefficients in nematic liquid crystals using shallow grating devices [J]. Mol Cryst Liq Cryst, 2009, 436(1): 267-279.
- 23 P S Salter, C Tschierske, S J Elston, *et al.*. lexoelectric measurements of a bent-core nematic liquid crystal [J]. Phys Rev E, 2011, 84(3): 031708.
- 24 F Castles, S C Green, D J Gardiner, *et al.*. Flexoelectric coefficient measurements in the nematic liquid crystal phase of 5CB [J]. AIP Advances, 2012, 2(2): 022137.
- 25 B I Outrama, S J Elstona. Determination of flexoelectric coefficients in nematic liquid crystals using the crystal rotation method [J]. Liq Cryst, 2012, 39(2): 149-156.
- 26 P Palfy-Muhoray. Comment on "The limits of flexoelectricity in liquid crystals" [J]. AIP Advances, 2013, 3(1): 019101.
- 27 S A Jewell, J R Sambles. Fully leaky guided mode study of the flexoelectric effect and surface polarization in hybrid aligned nematic cells [J]. J Appl Phys, 2002, 92(1): 19-24.
- 28 C Z Van Doorn. Dynamic behavior of twisted nematic liquidcrystal layers in switched fields [J]. J Appl Phys, 1975, 46(9): 3738-3745.
- 29 L M Blinov, V G Chigrinov. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials [M]. New York: Springer-Verlag, 1994. 148-154.