

## 驱动电压对液晶空间光调制器响应时间影响的研究

齐梦娇<sup>1,2</sup> 王启东<sup>1,2</sup> 穆全全<sup>1</sup> 刘永刚<sup>1</sup> 姚丽双<sup>1</sup> 曹召良<sup>1</sup> 张红胜<sup>3</sup>  
杨程亮<sup>1</sup> 胡立发<sup>1</sup> 宣丽<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光栅技术实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 以平行排列液晶盒作为液晶空间光调制器的模型, 求解 Erickson-Leslie 方程, 得到相位调制量为  $2\pi$  时的响应时间公式。通过理论计算, 作出不同电压下盒厚与响应时间的关系曲线, 确定了最佳盒厚的存在, 并且表明最佳盒厚与响应时间随驱动电压的增加而减小, 且变化量逐渐减小; 电压由 5 V 增至 10 V 时, 响应时间的变化量达到最大, 缩短了 10.62%。实验测得三个不同厚度液晶盒的响应时间随电压的变化曲线, 结果表明, 驱动电压增加, 响应时间缩短, 在 5 V 增至 10 V 的过程中响应时间变化量与理论值接近, 且电压增至 15 V 甚至更高电压时, 响应时间基本不会再变化。此外, 同一电压下, 相对最佳盒厚相同厚度变化量, 厚盒的响应优于薄盒。

**关键词** 光学器件; 液晶空间光调制器; 电压; 响应时间

中图分类号 TN141.9 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.092302

## Study of Response Time Depending on Driving Voltage of Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Qi Mengjiao<sup>1,2</sup> Wang Qidong<sup>1,2</sup> Mu Quanquan<sup>1</sup> Liu Yonggang<sup>1</sup> Yao Lishuang<sup>1</sup>  
Cao Zhaoliang<sup>1</sup> Zhang Hongsheng<sup>3</sup> Yang Chengliang<sup>1</sup> Hu Lifa<sup>1</sup> Xuan Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Grating Technology Laboratory, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Based on parallel-aligned liquid crystal (LC) cell, which is the prototype of LC spatial light modulator, Erickson-Leslie equation is solved, and the response formula with fixed phase retardation  $2\pi$  is obtained. By theoretical calculations, the curves of relationship between cell gap and response time under various voltages are plot, the existence of optimal cell gap is ensured and the curves demonstrate that both optimal cell gap and response time decrease while applied voltage increases, and the variation is decreasing gradually; the variation of response time reaches to the maximal value: shortened by 10.62% when applied voltage changes from 5 V to 10 V. The relation curves between voltage and response time of three LC cells are measured by experiments. The results demonstrate that response time is shortened while the applied voltage increases, the variation of response time is close to theoretical value when applied voltage increases from 5 V to 10 V, and when 15 V or higher voltage is applied, response time changes little. Besides, slight thicker LC cell has better response than thinner LC cell regarding with the same variation to optimal cell gap under the same voltage.

**Key words** optical devices; liquid crystal spatial light modulator; voltage; response time

**OCIS codes** 120.5060; 230.3720; 250.4110

收稿日期: 2013-03-15; 收到修改稿日期: 2013-05-07; 网络出版日期: 2013-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(11174274, 11174279, 61205021, 11204299)

作者简介: 齐梦娇(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事液晶物理与器件方面的研究。E-mail: katharine\_qi@163.com

导师简介: 宣丽(1957—), 女, 博士, 研究员, 主要从事液晶光学、液晶自适应光学工程和液晶器件物理等方面的研究。

E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

## 1 引言

液晶(LC)空间光调制器因其高分辨、低成本、低功耗等优点,被应用到自适应光学系统中校正大气波前畸变,然而目前急于解决的问题之一就是响应速度慢。为解决这个问题,Gauza等<sup>[1]</sup>于2005年合成了两种光热稳定性良好且具有高双折射率的快速响应向列相液晶材料, Lee等<sup>[2]</sup>于1998年提出采用过压驱动的方法可以减小响应时间,并且Hu等<sup>[3]</sup>于2012年针对液晶空间光调制器提出采用单帧过压驱动来减小响应时间, Bos等<sup>[4]</sup>于1984年提出光学弯曲补偿模式对于液晶器件有提高响应速度的潜能。为了能够应用液晶空间光调制器有效校正大气波前畸变, Cao等<sup>[5]</sup>采用了相息图法,此方法要求液晶空间光调制器至少具备 $2\pi$ (对应一个波长)的相位调制量,选择 $2\pi$ 相位来进行调制,并且利用从释放电场瞬间到满足 $2\pi$ 相位调制量之间截取出的时间差作为响应时间<sup>[3]</sup>。2011年Peng等<sup>[6]</sup>提出固定相位调制量的液晶空间光调制器存在一个对应最快响应的最佳液晶盒厚度值 $d_{op}$ ,  $d_{op}$ 的提出对提高所有固定相位调制量的向列相液晶光学元件的响应速度有很大的帮助。然而,这个厚度值对响应时间的影响只是在单一固定电压下得到的。为了能够进一步减小响应时间,本文对Erickson-Leslie方程进行推导,得到响应时间与盒厚以及电压的关系,通过提高驱动电压,研究了电压与最佳盒厚 $d_{op}$ 的关系,然后以最佳盒厚 $d_{op}$ 为前提,得到驱动电压对响应时间影响的变化曲线,并且通过实验对其关系进行验证。

## 2 理论基础

液晶空间光调制器通过相位调节特性对波前畸变进行校正,可以利用平行排列液晶盒作为模型<sup>[7]</sup>,盒厚为 $d$ 的平行排列液晶盒示意图如图1所示。

无电场作用时,液晶分子沿基板水平 $X$ 轴方向排列,当施加垂直于基板沿 $Z$ 轴方向的电场时,液晶分子指向矢与基板成 $\theta$ 角排列,正是由于不同电场引起了不同的液晶分子指向矢的变化,进而引起液晶层有效折射率的变化,这种折射率变化导致其相位调制量不同。

根据液晶弹性分子动力学,当忽略引流与惯性效应时,Erickson-Leslie方程可表示为<sup>[8-9]</sup>

$$\gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} = (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \epsilon_0 |\Delta \epsilon| E^2 \sin \theta \cos \theta, \quad (1)$$

式中 $\gamma_1$ 是旋转粘度, $K_{11}$ 、 $K_{33}$ 分别是展曲、扭曲弹性常数, $E$ 是电场强度, $z$ 是垂直基板方向液晶层距离基板的位置, $\epsilon_0$ 是真空介电常数, $\Delta \epsilon$ 是介电各向异性参数。当取近似 $K_{33} \approx K_{11}$ 时,撤去电压( $E = 0$ ),可整理得

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

假定液晶盒基板处为强锚定,预倾角为 $0^\circ$ ,那么上述方程通解为

$$\theta(z, t) = \theta_m \sin(\pi z/d) \exp(-t/\tau_0), \quad (3)$$

式中 $\tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K_{11}}$ 是液晶器件的下降响应时间<sup>[10]</sup>, $\theta_m$ 是处在 $z = d/2$ 处的最大形变角度<sup>[11]</sup>。以液晶分子垂直于基板排列时为零点,相位差定义为

$$\delta = \Delta n d \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \int_0^d \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z)}} dz - n_o d \right], \quad (4)$$

式中 $n_o$ 、 $n_e$ 分别是o光、e光的折射率。

由于液晶在光学上显示双折射性的单轴性<sup>[12]</sup>,为了简化积分因子,引入整个液晶盒在施加固定电压时对应的一个平均转动角度 $\theta_0$ ,此时对应的相位差为

$$\delta_{i_0} = \Delta n d \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[ \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_0 + n_e^2 \sin^2 \theta_0}} - n_o \right]. \quad (5)$$

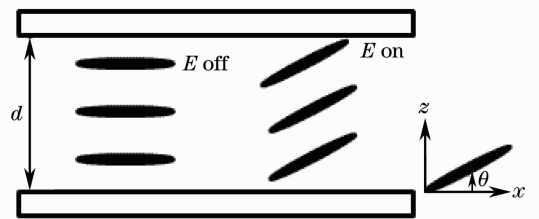


图1 平行排列液晶盒示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the parallel-aligned LC cell

由于平均转动角度  $\theta_0$  的引入,则(3)式可以简化为

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right), \quad (6)$$

以  $\delta_{t_0}$  作为释放电压后下降过程中的起始点,那么定义  $\delta_{t_{2\pi}}$  为满足  $2\pi$  相位调制量的相位差,则有  $\delta_{t_{2\pi}} = \delta_{t_0} + 2\pi$ , 将其与(5)、(6)式联立,有

$$\delta_{t_{2\pi}} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left( \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_{t_{2\pi}} + n_e^2 \sin^2 \theta_{t_{2\pi}}}} - n_o \right) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left\{ \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \sin^2 \left[ \theta_0 \exp\left(-\frac{t_{2\pi}}{\tau_0}\right) \right]}} - n_o \right\}, \quad (7)$$

式中  $t_{2\pi}$  即为得到  $2\pi$  相位调制量时对应的响应时间,最终整理为

$$t_{2\pi} = -\tau_0 \ln \left\{ \frac{1}{\theta_0} \arcsin \left[ \frac{1}{n_e^2 - n_o^2} \left( \frac{1}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_0 + n_e^2 \sin^2 \theta_0}} + \frac{\lambda}{dn_e n_o} \right)^{-2} - \frac{n_o^2}{n_e^2 - n_o^2} \right]^{1/2} \right\}. \quad (8)$$

分析(8)式,存在一个令响应时间达到最短的最佳盒厚值。在固定电压下,有对应的  $\theta_0$  值,代入(8)式,通过时间对盒厚求导,令  $\frac{\partial t_{2\pi}}{\partial d}$ , 便可得出  $d_{op}$ 。

相同电压下,对于不同厚度的液晶盒,每个盒的  $\theta_0$  是相同的<sup>[13]</sup>,因此可通过理论方法求得不同电压对应的  $d_{op}$  值,进而指导实验,研究液晶盒在  $d_{op}$  附近响应时间随驱动电压的变化关系。

### 3 实验及结果分析

实验操作在 25 °C 下进行,首先制作一系列厚度的平行排列液晶盒,灌注石家庄华生永清 5CB 液晶 ( $n_e = 1.698, n_o = 1.526, \gamma_1 = 0.064 \text{ Pa}\cdot\text{s}, K_{11} = 6.4 \times 10^{-12} \text{ N}$ )。使用低预倾角聚酰亚胺(PI)膜得到预倾角约为  $1.9^\circ$ ,此时预倾角对响应时间的影响可以忽略<sup>[14]</sup>,盒厚通过干涉方法测定。波长为 589 nm 的激光,垂直入射夹在两相互垂直偏振片之间的液晶盒,并且使液晶分子指向矢与偏振片成  $45^\circ$ ,对液晶盒施加 128 Hz 的交流方波电压,通过探测器可以探测到外加电场引起的光透射率的变化。实验装置如图 2 所示。对不同厚度液晶盒施加相同电压时,每个盒的  $\theta_0$  是相同的<sup>[6,13]</sup>,即每个驱动电压有一个对应的最佳盒厚  $d_{op}$ 。

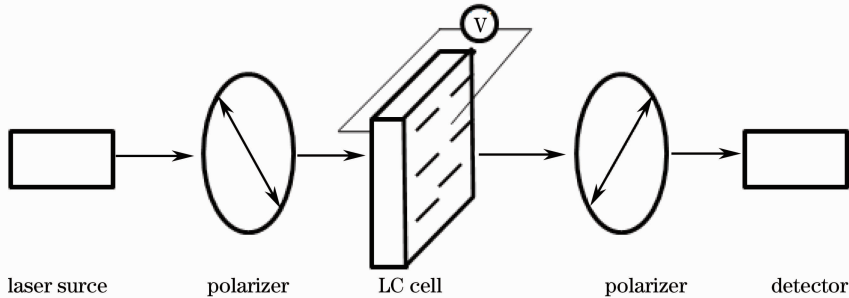


图 2 测量光透射率的实验光路图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for optical transmittance measurement

利用测得的厚度为  $(4.5 \pm 0.05) \mu\text{m}$  的液晶盒(简记为 LC1)来确定不同电压下响应时间与盒厚的关系,对其分别施加 5、10、15、20、25 V 的电压,得到对应的透射率随时间的变化曲线。由透射率公式<sup>[15]</sup>:  $I = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$ , 经过整理,能够得到相应电压下相位差随时间的变化关系,利用(5)式计算得出相应电压下对应的  $\theta_0$ , 将其代入(8)式,便可得到响应时间与盒厚的关系。当驱动电压不同时,响应时间与盒厚的变化关系如图 3 所示。

对图 3 中计算的数据进行整理,将不同电压下最短响应时间以及此时对应的  $d_{op}$  值列表,如表 1 所示。为了直观地理解电压对  $d_{op}$  以及响应时间的影响,将表 1 中的数据点分别描绘成图 4 和图 5,图中的星点标记数据点,连线表示电压发生变化时,对应物理量的变化率。对图 3、图 4、图 5 以及表 1 进行综合分析,从图中可以看出随驱动电压增大, $d_{op}$  和响应时间都减小。更为精确的变化量可以从表 1 以及图 4、图 5 中读出,当电压由 5 V 均匀增大到 25 V 时, $d_{op}$  由  $4.89 \mu\text{m}$  变化为  $4.13 \mu\text{m}$ ;且盒厚的变化量在 5 V 增加到 10 V

的过程中最大,盒厚减小了 9.61%;再增加驱动电压,这个变化量越来越小。同样,当电压均匀增大时,响应时间减小。当电压由 5 V 增加到 25 V 时,响应时间从 24.67 ms 变成 21.15 ms;响应时间的变化量在 5 V 变为 10 V 的过程中是最大的,从 24.67 ms 变为 22.05 ms,缩短了 10.62%;随着电压继续增加,响应时间趋于平缓,当电压增加到 15 V 以上时,响应时间基本不会再缩短。

表 1 不同电压对应的最佳盒厚与响应时间

Table 1 Optimal cell gap and response time under different voltages

Voltage $V/V$	Optimal cell gap $d/\mu\text{m}$	Response time $t/\text{ms}$
5	4.89	24.67
10	4.42	22.05
15	4.28	21.42
20	4.18	21.24
25	4.13	21.15

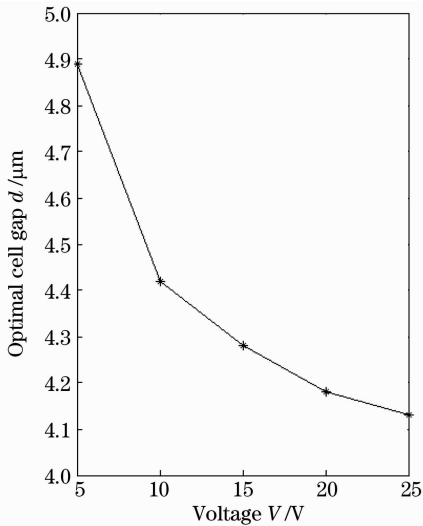


图 4 最佳盒厚与施加电压的变化关系

Fig. 4 Relationship between applied voltage and optimal cell gap

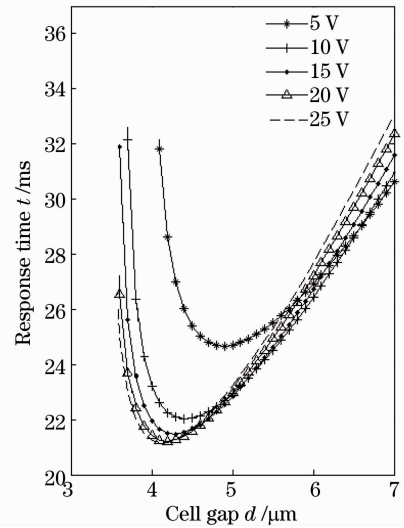


图 3 不同电压下响应时间随盒厚的变化曲线

Fig. 3 Cell gap versus response time under different voltages

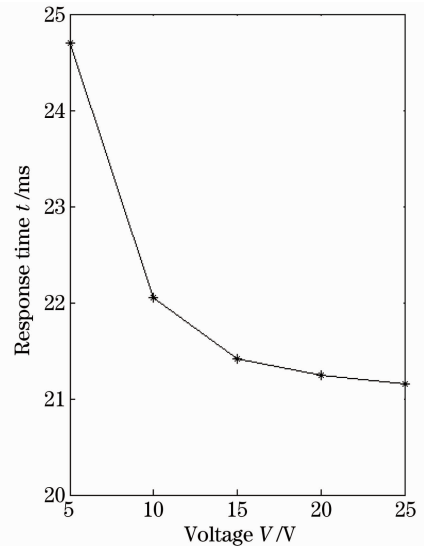


图 5 响应时间与电压的变化关系

Fig. 5 Relationship between applied voltage and response time

在同一电压下,取施加 5 V 电压时对应的响应时间与盒厚关系曲线为例,如图 6 所示,图中可以看出,当盒厚大于  $d_{op}$  时,与盒厚有关的响应曲线变化比较平缓,因此,当对比  $d_{op}$  值相同的液晶盒时,厚度大于  $d_{op}$  值的响应时间更短。例如图 6 中,5 V 电压对应的  $d_{op}$  值为  $4.89 \mu\text{m}$ ,对应的响应时间为 24.67 ms,如果取一个厚度变化量  $0.51 \mu\text{m}$ ,那么对应盒厚  $5.40 \mu\text{m}$  和  $4.38 \mu\text{m}$  的响应时间分别为 25.30 ms 和 26.02 ms。也就是说,当无法精确制作  $d_{op}$  厚度的液晶盒时,可以制作稍厚于  $d_{op}$  的液晶盒,不仅能够确保满足相位调制量,更为重要的一点就是它的响应时间比厚度薄于  $d_{op}$  的液晶盒要短。

为了验证驱动电压与响应时间的关系,又选择了两个厚度的液晶盒进行测试,液晶盒厚度分别为  $(5.2 \pm 0.05) \mu\text{m}$  (简记为 LC2) 和  $(5.8 \pm 0.05) \mu\text{m}$  (简记为 LC3)。对 LC1、LC2、LC3 分别施加电压,以 1 V 为增量,从 5 V 增大到 25 V,得到其透射率随时间的响应曲线,利用透射率公式整理成相位差随时间的变化曲线,通过截取  $2\pi$  相位调制量得到所需要的响应时间,处理过程以 LC1 施加 5 V 电压为例,经过对响应曲线整理后得到相位差随时间变化的曲线如图 7 所示。

对三个液晶盒在各电压下的响应曲线均进行相同的处理,最终得到不同电压下响应时间的变化曲线如

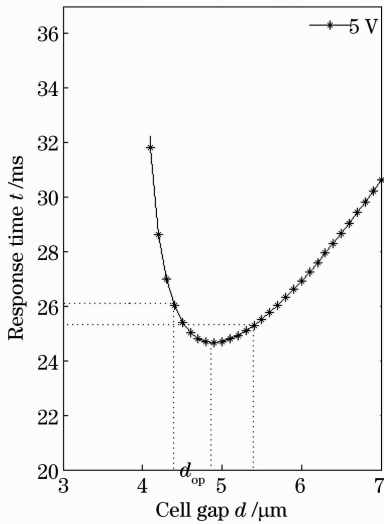


图 6 5 V 电压对应的响应时间随盒厚的变化关系

Fig. 6 Cell gap versus response time at 5 V

图 8 所示。

实验结果表明,驱动电压从 5 V 增加到 25 V 过程中,响应时间缩短,并且电压在 5~10 V 之间变化时,LC1、LC2、LC3 响应时间分别缩短了 18.12%、12.53%、9.01%,与理论计算值 10.62% 接近,此外,由于 LC2 盒厚更加接近 5 V 电压对应的  $d_{op}$ ,因此 LC2 的响应时间比 LC1 和 LC3 都短。随着电压的增加, $d_{op}$  减小,当电压达到 10 V 甚至更高时,LC1 盒厚更接近相应的  $d_{op}$ ,所以电压在 10~25 V 时,LC1 的响应占优势地位。而对于盒厚较大的 LC3,其响应不及 LC1 与 LC2 快。图 8 中还可以看出电压施加到 15 V 甚至更高时,响应时间基本不再发生变化。

## 4 结 论

液晶空间光调制器必须具有  $2\pi$  相位调制量,采用 Erickson-Leslie 公式分析了这种器件的相位响应特性,获得了  $2\pi$  相位调制量下响应时间与器件厚度的关系表达式。采用特定驱动电压下相位调制量实验值,计算了该驱动电压下的最佳盒厚与此盒厚对应的响应时间,并得到不同电压下,盒厚与响应时间的关系曲线,具体变化规律如下:随着驱动电压的增大, $d_{op}$  和响应时间都减小,并且变化量在 5 V 增长到 10 V 的过程中达到最大,响应时间在此过程中缩短了 10.62%,响应时间在驱动电压为 15 V 甚至更高电压时,不会再缩短,实验结果也很好地验证了这一点。除此之外,当电压不变时,如果取具有相同  $d_{op}$  值的液晶盒,那么偏厚的液晶盒响应时间比偏薄的响应时间短。

通过采用平行排列液晶盒作为液晶空间光调制器的模型进行研究,提出基于优化盒厚的电压与响应时间的规律,该规律对于其他具有固定相位调制量的呈平行排列的液晶光学器件普遍适用。

## 参 考 文 献

- 1 S Gauza, J Li, S T Wu, *et al.*. High birefringence and high resistivity isothiocyanate-based nematic liquid crystal mixtures [J]. *Liq Cryst*, 2005, 32(8): 1077–1085.
- 2 S H Lee, S L Lee, H Y Kim. Electrode-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(20): 2881–2883.

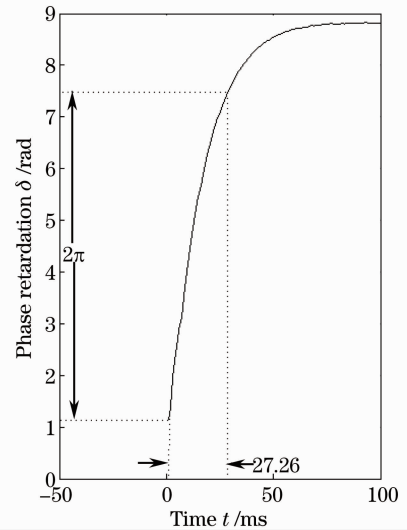


图 7 相位差随时间变化曲线

Fig. 7 Time versus phase retardation

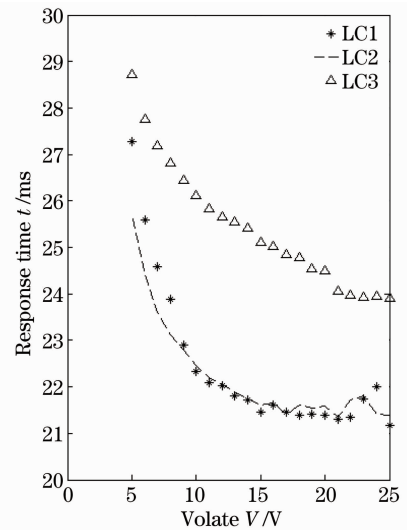


图 8 不同盒厚下响应时间随电压变化曲线

Fig. 8 Voltage versus time under different cell gaps

- 3 H Hu, L Hu, Z Peng, *et al.*. Advanced single-frame overdriving for liquid-crystal spatial light modulators [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(16): 3324–3326.
- 4 P Bos, K Koehler-Beran. The pi-cell: a fast liquid crystal optical-switching device [J]. *Mol Cryst Liq Cryst*, 1984, 113(1): 329–339.
- 5 Z Cao, L Xuan, L Hu, *et al.*. Effects of the space-bandwidth product on the liquid-crystal kinform [J]. *Opt Express*, 2005, 13(14): 5186–5191.
- 6 Z Peng, Y Liu, L Yao, *et al.*. Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(18): 3608–3610.
- 7 J Gourlay, G D Love, P M Birch, *et al.*. A real-time closed-loop liquid crystal adaptive optics system: the first result [J]. *Opt Commun*, 1997, 137(1-3): 17–21.
- 8 J L Ericksen. Conservation laws for liquid crystals [J]. *Trans Soc Rheol*, 1961, 5(23): 23–24.
- 9 F M Leslie. Some constitutive equations for liquid crystals [J]. *Arch Ration Mech Anal*, 1968, 28(4): 265–283.
- 10 E Jakeman, E P Raynes. Electro-optic response times in liquid crystals [J]. *Phys Lett*, 1972, 39A(1): 69–70.
- 11 H Wang, T X Wu, X Zhu, *et al.*. Correlations between liquid crystal director reorientation and optical response time of a homeotropic cell [J]. *J Appl Phys*, 2004, 95(10): 5502–5508.
- 12 Fan Zhixin. *Based on Liquid Crystal Device Technology* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001. 6–8.  
范志新. *液晶器件工艺基础*[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001. 6–8.
- 13 Wang Qian, He Sailing. Simulation and comparison study of liquid crystal director distributions [J]. *Acta Physics Sinica*, 2001, 50(5): 926–932.  
王 谦, 何赛灵. 液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J]. *物理学报*, 2001, 50(5): 926–932.
- 14 X Nie, H Xianyu, R Lu, *et al.*. Pretilt angle effects on liquid crystal response time [J]. *J Disp Technol*, 2007, 3(3): 280–283.
- 15 S T Wu, U Efron, L D Hess. Birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3911–3915.