

聚合物稳定蓝相液晶器件的模拟计算模型

张波, 胡春鑫, 贾孟晓, 马红梅, 孙玉宝

引用本文:

张波, 胡春鑫, 贾孟晓, 等. 聚合物稳定蓝相液晶器件的模拟计算模型[J]. 液晶与显示, 2021, 36(12): 1614–1622.

ZHANG Bo, HU Chun-xin, JIA Meng-xiao, et al. Simulation model of polymer stabilized blue-phase liquid crystal devices[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(12): 1614–1622.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0235>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

降低聚合物稳定蓝相液晶显示器驱动电压的一种方法

A method to reduce the operating voltage of polymerstabilized blue-phase liquid crystal displays

液晶与显示. 2017, 32(3): 163–168 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0163>

基于多重掺杂的高科尔常数聚合物稳定蓝相液晶

Polymer-stabilized blue phase liquid crystal of large Kerr constant based on multiple dopants

液晶与显示. 2015, 30(4): 576–580 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153004.0576>

聚合物稳定蓝相液晶用单体研究进展

Advances on monomers used in polymer stabilized blue phase liquid crystal

液晶与显示. 2016, 31(3): 249–257 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163103.0249>

窄视角蓝相液晶显示器

Blue phase liquid crystal display for narrow viewing angle

液晶与显示. 2016, 31(9): 847–852 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163109.0847>

基于浮置电极的高透过率蓝相液晶显示器件设计

High transmittance blue phase liquid crystal display with floating electrodes

液晶与显示. 2017, 32(7): 512–517 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173207.0512>

文章编号:1007-2780(2021)12-1614-09

聚合物稳定蓝相液晶器件的模拟计算模型

张 波, 胡春鑫, 贾孟晓, 马红梅*, 孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要:为更好地研究聚合物稳定蓝相液晶器件,在考虑聚合物和蓝相液晶的介电常数差异和电场作用的变化后,建立适用于聚合物稳定蓝相液晶显示器的理论模型。首先,针对两组聚合物配比的蓝相液晶显示器的实验结果,进行模拟计算拟合,获得了蓝相液晶的饱和双折射率接近于主体液晶双折射率的结果。然后,研究了聚合物单体的介电常数和含量对驱动电压的影响。最后,研究了共面电场驱动的聚合物稳定蓝相液晶显示器的电极宽度和间隙对驱动电压和透过率的影响,获得了高透过率和低驱动电压的器件结构。随着非液晶材料介电常数的增加,驱动电压下降,并且其质量分数越大,驱动电压下降幅度越大。对于一般蓝相液晶中非液晶材料质量分数约为 10% 质量分数的情况,驱动电压可以从 97 V ($\epsilon_p=3$) 下降到 55 V ($\epsilon_p=30$),最大透过率变化很小,甚至可以忽略。并且非液晶材料的介电常数不同,仅影响驱动电压的大小,对最大透过率和电光曲线的形状影响很小。研究结果对优化聚合物稳定蓝相液晶的材料构成和改进聚合物稳定蓝相液晶器件有重要的指导意义。

关键词:聚合物稳定蓝相液晶; 饱和双折射率; 驱动电压

中图分类号: TP141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2021-0235

Simulation model of polymer stabilized blue-phase liquid crystal devices

ZHANG Bo, HU Chun-xin, JIA Meng-xiao, MA Hong-mei*, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to better study the polymer stabilized blue phase liquid crystal devices, considering the difference of dielectric constant between polymer and blue phase liquid crystal and the change of electric field, we established a theoretical model suitable for polymer stabilized blue phase liquid crystal display. Firstly, we calculated the simulation result to fit the experiment results of blue phase liquid crystal displays with two group of polymer ratio, and obtained the saturation birefringence of blue phase liquid crystal close to the birefringence of liquid crystal. Then, we studied the influence of dielectric constant and content of polymer monomer on driving voltage. Finally, we calculated the influence of electrode width and gap on the operating voltage and transmittance of polymer stabilized blue phase liquid crystals devices driven by in-plane electric field, and obtained the device structure with

收稿日期: 2021-09-06; **修订日期:** 2021-09-18.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB0703701); 国家自然科学基金(No.61475042)

Supported by National Key R&D Program of China(No. 2018YFB0703701); National Natural Science Foundation of China(No. 61475042)

* 通信联系人, E-mail: mhmtj@163.com; sun_yubao@163.com

high transmittance and low operating voltage. With the increasing dielectric constant of the non-liquid crystal material, the operating voltage is decreased, and the greater the content, the greater the operating voltage decreased. For the non-liquid crystal material content of the general blue liquid crystal being about 10%, the operating voltage can reduced from 97 V($\epsilon_p=3$) to 55 V($\epsilon_p=30$), the change of the maximum transmittance is very small, even can be ignored. In addition, the different dielectric constant of non-liquid crystal materials only affect the operating voltage, and has a little effect on the maximum transmittance and the shape of electro-optic curve. The results have important guiding significance for optimizing the material composition of polymer stabilized blue phase liquid crystal and improving polymer stabilized blue phase liquid crystal devices.

Key words: polymer stabilized blue-phase liquid crystal; saturation birefringence; operating voltage

1 引 言

在当前的液晶器件中,响应速度慢是普遍存在的问题,蓝相液晶及其衍生相态因为具备亚微米级螺距的双扭曲结构从而具有亚毫秒的响应速度^[1-3],是获得快速响应的一种重要方法。蓝相液晶在无外电场时呈现宏观各向同性^[4-7],由于分子自组装特点,蓝相液晶器件具有不需要取向层,无需摩擦制备流程和无需补偿膜等特点,在光电子应用^[8-14]方面成为了新的研究热点。在蓝相液晶结构中,双扭曲螺旋柱不能完全填充整个空间,蓝相液晶中存在缺陷线,在缺陷位置,液晶的排列可以被认为是各向同性相,这种晶格结构不够稳定,所以蓝相液晶存在的温度范围很窄,在拓宽蓝相液晶的温度范围方面,已经存在引入双液晶基元法^[15]、弯曲型分子诱导法^[16]、以及聚合物稳定^[17]的方法等。在各种扩展温宽的方法中,聚合物稳定法成为最有效的方法,聚合物网络占据蓝相液晶中的缺陷位置,聚合物网络的稳定存在可以稳定蓝相液晶结构保持在一个很宽的温度范围,也能够保证蓝相液晶在电场作用下回复到初始状态,获得稳定电光特性。

液晶的响应时间反映了液晶亮暗转换速度的能力,是描述液晶器件性能的重要参数,响应时间的大小决定了显示器的刷新频率及显示器的亮度。Yan 等人^[18]研究了不同电场作用下聚合物稳定蓝相液晶的动态响应,并根据实验数据提出了无滞后的快速响应原理。Lim 等人^[19]研究了不同聚合物浓度下,聚合物稳定蓝相电光效应的 Kerr 系数和响应时间随温度的变化规律,电光响应时间和介电弛缓时间表现出不同的温度依赖

性,在低温下聚合物对液晶分子的旋转具有足够的活性,且不受聚合物的强烈影响。Xu 等人^[20]基于聚合物稳定蓝相液晶的动态响应过程分别为克尔效应诱导的局部重定向和电致伸缩诱导的晶格畸变提出了双指数上升/衰减模型来分析其内在的物理机制。

在模拟计算聚合物稳定蓝相液晶的模型建立过程中,根据实验结果而提出的扩展 Kerr 公式能够很好地计算电场诱导的双折射率^[21-22],从而实现聚合物稳定蓝相液晶显示器的模拟计算。但是,扩展 Kerr 公式描述的是聚合物稳定液晶在电场作用下的整体表现,不能将聚合物网络和液晶分开,也就缺少了针对聚合物稳定蓝相液晶的进一步分析。Gao 等人^[23]将聚合物稳定蓝相液晶中的液晶和非液晶材料分开讨论,建立了介电分压理论,获得了高介电常数聚合物材料能够提高聚合物稳定蓝相液晶的 Kerr 常数的结果,但依然是聚合物稳定蓝相液晶的整体表现,没有给出蓝相液晶的独立响应特性。Ma 等人^[24]提出了一维模型,将蓝相液晶排列视为具有较高、均匀倾斜角的胆甾相液晶,根据实验结果和建立的弹性平衡方程得到蓝相液晶的等效弹性常数,并尝试建立动力学方程来解释响应时间,该模型同样也是整体表现。目前还没有一种模型能够准确计算聚合物稳定蓝相液晶中液晶的具体响应特性,也没有相关研究能准确描述和模拟聚合物稳定蓝相液晶中液晶在电场作用下的响应和聚合物网络的作用。

本文中,模型建立在介电分压理论的基础上,根据聚合物稳定蓝相液晶显示器的实验结果,对聚合物稳定蓝相液晶中聚合物网络分压和电场对蓝相液晶的作用分别进行考虑,获得与实验曲线

相符合的模拟计算结果,从而得到蓝相液晶在电场作用下的饱和电场强度和饱和双折射率,并进一步得到非液晶材料的介电常数和含量对聚合物稳定蓝相液晶器件电光特性的影响。最后,研究了共面电场驱动聚合物稳定蓝相液晶器件中电极的宽度和间隙对驱动电压和透过率的影响。该文对改善聚合物稳定蓝相液晶器件有重要的意义。

2 实验参数

在实验中,采用的蓝相液晶包含 TEB300 液晶(Slichem Co., Ltd., Shijiazhuang, China, 清亮点温度 63 ℃)和高螺旋手性剂 R5011 (HCCH, Nanjing, China,螺旋扭曲力常数 HTP=

110/ μm),聚合物单体包含双官能团单体 1,4-双-[4-(3-丙烯酰氧基丙氧基)苯甲酰氧基]-2-甲基苯(RM257, Jiangsu Hecheng Display Technology Co., Ltd)和单官能团单体,单官能团单体为邻苯基苯氧乙基丙烯酸酯(OPPEA, Changshu Hengrong Trading Co., Ltd.)或 2-丙烯酸十二烷基酯(C12A, Bide Pharmatech Co., Ltd.),加入少量的光敏诱发剂 1-羟基环己基苯基酮(RG184, Jiangsu Hecheng Display Technology Co., Ltd.)促进光聚合反应,最终共同构成聚合物稳定蓝相液晶。具体配比如表 1 所示,使用的聚合物单体的分子式结构如图 1 所示。实验采用的 IPS 液晶盒的电极宽度为 15 μm ,电极间隙为 15 μm ,液晶盒厚度为 10 μm 。

表 1 实验材料组分表

Tab.1 Compositions of experimental materials

Sample	Composition (mass fraction%)					
	TEB300	R5011	RM257	C12A	OPPEA	RG184
A	90.18	3.47	4.2	\	1.8	0.35
B	90.18	3.47	4.2	1.8	\	0.35

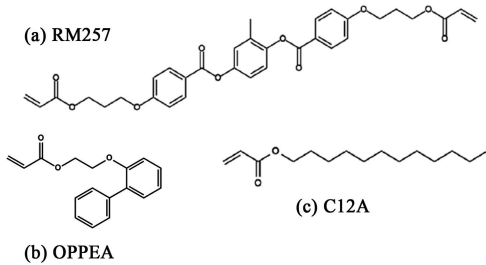


图 1 聚合物单体的分子式结构。(a) RM257;(b) OPPEA;(c) C12A。

Fig.1 Molecular formula of polymer monomer. (a) RM257; (b) OPPEA; (c) C12A.

3 模 型

对于 IPS 液晶盒这样的二维系统,首先不考虑聚合物稳定液晶中的介电常数差异,直接求解泊松方程 $\nabla(\epsilon \cdot \nabla V) = 0$,得到液晶层中各处的电势分布和电场分布。因为液晶和聚合物网络是在亚微米尺度混合的,所以此时的电场分布为聚合物稳定液晶中的整体电场表现。由于聚合物网

络、手性剂和液晶的介电常数有较大的差异,所以在亚微米尺度下的电场强度有差别,即高介电常数的液晶和低介电常数的聚合物网络与手性剂所受的电场强度不同,所以需要进一步计算液晶中的电场强度。令 C 为聚合物和手性剂(非液晶材料)的总含量,非液晶材料的介电常数为 ϵ_P ,蓝相液晶的介电常数为 ϵ_{LC} ,根据不同的介质层有相同的电位移矢量,且电位移矢量为常数,并考虑平均电场强度得到以下公式:

$$\begin{cases} D_{LC} = D_P, D_{LC} = \epsilon_{LC} E_{LC}, D_P = \epsilon_P E_P \\ E = E_{LC}(1 - C) + E_P C \end{cases}, \quad (1)$$

其中: E 为平均电场强度, E_{LC} 和 E_P 分别为液晶和非液晶中的电场强度。由于液晶和非液晶材料的密度相差不大,所以为了便于计算,将重量比等价于厚度比,分别得到 E_{LC} 和 E_P 为:

$$E_{LC} = \frac{E}{(1 - C) + C \epsilon_{LC} / \epsilon_P}, \quad (2)$$

$$E_P = \frac{E}{C + (1 - C) \epsilon_P / \epsilon_{LC}}, \quad (3)$$

蓝相液晶中电场诱导的双折射率^[21]为:

$$\Delta n_{\text{ind}} = \Delta n_s \{1 - \exp[-(E_{\text{LC}}/E_s)^2]\}, \quad (4)$$

其中: Δn_{ind} 为电场诱导的双折射率, Δn_s 为液晶的饱和双折射率, E_s 为蓝相液晶的饱和电场强度。因为液晶的介电各向异性为正, 因此诱导的介电常数也就为诱导晶体的慢轴方向的介电常数, 又因为介电各向异性和双折射率都与液晶的序参数成正比, 所以它们具有相同的变化趋势。液晶在电场作用下表现的介电常数为:

$$\epsilon_{\text{LC}} = \bar{\epsilon} + \frac{2}{3} \Delta \epsilon \cdot \frac{\Delta n_s}{\Delta n} \cdot \frac{\Delta n_{\text{ind}}}{\Delta n_s} = \bar{\epsilon} + \frac{2}{3} \Delta \epsilon \cdot \frac{\Delta n_{\text{ind}}}{\Delta n}, \quad (5)$$

其中 $\bar{\epsilon} = (\epsilon_{\parallel} + 2\epsilon_{\perp})/3$ 为液晶的平均介电常数, $\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 为液晶的介电各向异性, Δn 为液晶的光学各向异性。利用式(6)得到各位置处聚合物网络和液晶的混合介电常数:

$$\frac{1}{\epsilon_{\text{ind}}} = \frac{1}{\epsilon_{\text{P}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{LC}}}, \quad (6)$$

将以上步骤计算得到的介电常数 ϵ_{ind} 带入泊松方程, 计算得到介电常数有差异情况下的电势和电场分布, 重新计算电场诱导双折射率和介电常数。经过多次迭代计算, 获得准确的电势和电场分布, 以及电场诱导的双折射率分布和电场方向的角度分布, 在盒厚方向计算相位延迟量并计算光学特性。计算模型流程如图 2 所示。

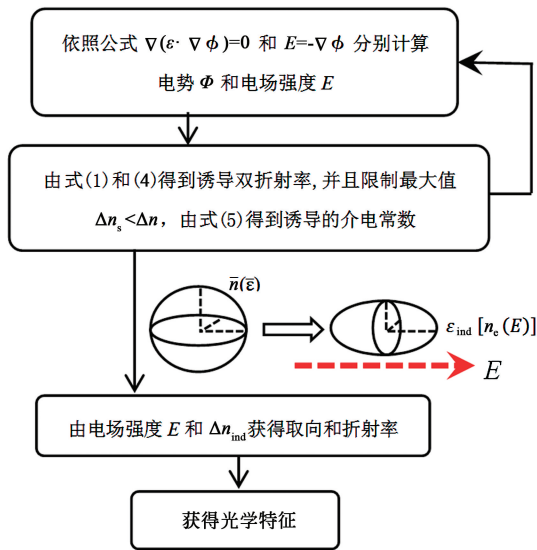


图 2 蓝相液晶显示器模型流程图

Fig.2 Flowchart of the blue phase liquid crystal display model

4 结 果

在实验测量中, 对实验样品盒施加 0~100 V 的电压, 电压间隔为 6.25 V, 然后利用计算模型计算, 不断调整蓝相液晶的饱和电场强度和饱和双折射率, 模拟得到与实验电光曲线相近的模拟电光曲线。结果如图 3 所示, 图中黑色曲线为实验曲线(实验中使用的波长为 633 nm), 红色曲线是拟合曲线, 其中样品 A 的饱和电场强度 $E_s = 3.54 \text{ V}/\mu\text{m}$, 饱和双折射率 $\Delta n_s = 0.16$, 非液晶材料的介电常数 ϵ_{P} 取为 4。模拟计算结果与实验结果符合得非常好, 这表明: 蓝相液晶在高电场强度驱动时, 其饱和双折射率很接近于液晶本身的双折射率, 即蓝相液晶的结构几乎被完全解螺旋。在胆甾相液晶中, 当电场垂直于胆甾相液晶螺旋轴, 其解螺旋的场致向列相电场强度^[25]为 $E_c = \frac{\pi^2}{P} \sqrt{\frac{E_c}{\Delta \epsilon}}$, P 为胆甾相液晶的螺距, 代入液晶的材

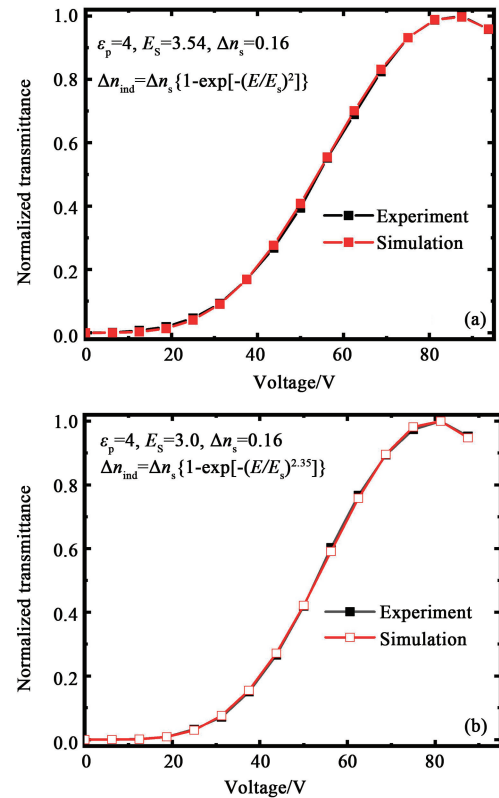


图 3 模拟计算得到的 V-T 曲线与实验数据对比图。
(a) 样品 A; (b) 样品 B。

Fig.3 V-T curves obtained by simulation and experiment. (a) Sample A; (b) Sample B.

料参数得到 $E_c = 7.76 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。在电场驱动蓝相液晶时,蓝相液晶中液晶取向与电场方向的关系与胆甾相液晶中很相似,并且胆甾相液晶的场致向列相电场强度为蓝相液晶的饱和电场强度的 2 倍多,结合蓝相液晶的饱和电场强度的定义或式(4)可知:蓝相液晶的饱和双折射率接近于液晶本身的双折射是合理的。

当对样品 B 进行拟合模拟计算时,不管非液晶材料的介电常数为多少,都不能得到与实验曲线符合很好的模拟计算结果,由于液晶体系与样品 A 相同,仅仅是单官能团单体的改变,因此令蓝相液晶的饱和双折射率和非液晶材料的介电常数与样品 A 中的相同,改变式(4)中的幂指数和饱和电场强度,可以得到与实验曲线符合非常好的模拟计算结果,此时的幂指数为 2.35,饱和电场强度为 $3.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。比较样品 A 和样品 B 中使用的单官能团单体,看到样品 B 中使用的单体 C12A 比样品 A 中的单体 OPPEA 要长且柔软,样品 B 的非聚合端为联苯结构,与液晶材料的刚性部分相同,也就是说,不同长度和结构的聚合物单体对液晶的束缚表现不同,最终表现为电场诱导的双折射率与电场的关系不是理想的 Kerr 公式关系。

应用共面电极驱动蓝相液晶器件,是工艺中最容易实现的,但在蓝相液晶显示器件的结构设计中,还没有对该结构进行优化的结果。下面,我们研究非液晶材料的含量和介电常数对驱动电压和透过率的影响,以及电极宽度和间隙对驱动电压和透过率的影响。

首先,以实验中使用的共面电极的宽度和间

隙均为 $15 \mu\text{m}$,液晶层厚度为 $10 \mu\text{m}$ 为例,并使用样品 A 的参数来模拟计算非液晶材料质量分数为 $0.03 \sim 0.2$ 和介电常数为 $3 \sim 30$ 范围的驱动电压

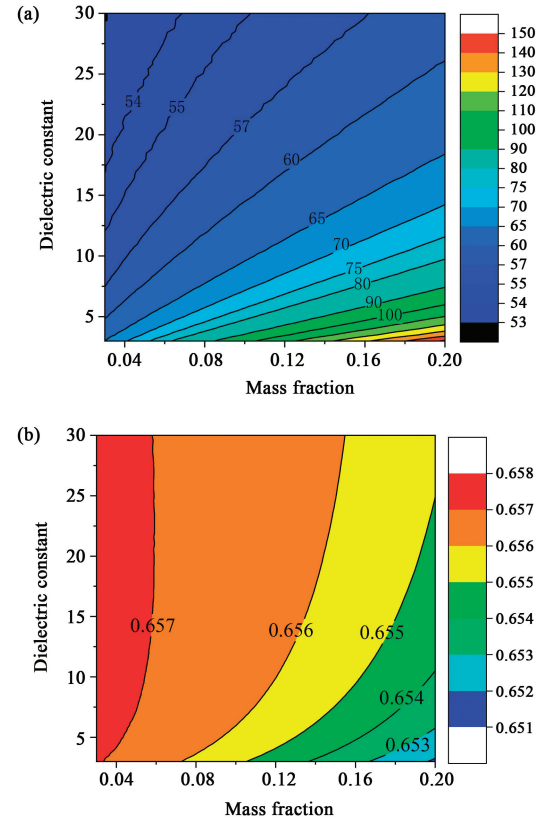


图 4 非液晶材料的不同质量分数和介电常数情况的影响。(a)驱动电压;(b)透过率(电极宽度和间隙均为 $15 \mu\text{m}$)。

Fig.4 Influence of different mass fraction and dielectric constants of non-liquid crystal materials, (a) Operating voltage; (b) Transmittance (electrode width and gap are $15 \mu\text{m}$).

表 2 实验材料组分表

Tab.2 Ingredient table of experimental materials

Sample	Composition (mass fraction%)					
	TEB300	R5011	RM257	C12A	OPPEA	RG184
A1	90	3.46	4.32	\	1.87	0.35
A2	88	3.38	5.76	\	2.51	0.35
A3	86	3.31	7.21	\	3.13	0.35
B1	90	3.46	4.32	1.87	\	0.35
B2	88	3.38	5.76	2.51	\	0.35
B3	86	3.31	7.21	3.13	\	0.35

和透过率。从图 4 中可以看到:随着非液晶材料介电常数的增加,驱动电压下降,并且非液晶材料质量分数越大,驱动电压下降幅度越大,对于一般蓝相液晶中非液晶材料质量分数约为 10% 的情况,驱动电压可以从 97 V ($\epsilon_p = 3$) 下降到 55 V ($\epsilon_p = 30$);最大透过率变化很小,可以忽略。

为研究非液晶材料不同质量分数对驱动电压的影响,我们对样品 A 进行了非液晶材料不同质量分数的配比,(非液晶材料含量为 10%, 12%, 14%, 此数值可固化稳定蓝相状态且效果较好),配比如表 2 所示。使用同样拟合方法进行拟合,实验测量电光曲线和模拟计算结果如图 5(a) 所示。固定饱和双折射率 $\Delta n_s = 0.16$ 和非液晶材料的介电常数 $\epsilon_p = 4$, 得到质量分数为 10% 样品 A1 在饱和电场强度 $E_s = 3.56$ V/ μm , 幂指数为 2 时的拟合效果最好;质量分数为 12% 的样品 A2, 饱和电场强度 $E_s = 3.86$ V/ μm , 幂指数为 2.29 时的拟合效果最好;质量分数为 14% 的样品 A3, 饱和电场强度 $E_s = 4.12$ V/ μm , 幂指数为 2.26 时的拟合效果最

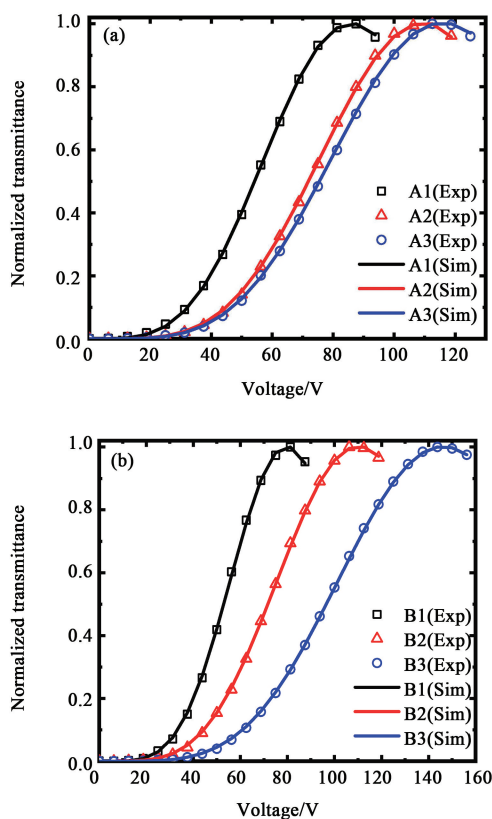


图 5 不同含量模拟计算 V-T 曲线与实验数据对比图。(a) 样品 A; (b) 样品 B。

Fig.5 V-T curves obtained by simulation and experiment. (a) sample A; (b) sample B.

好。由图可知在非液晶材料的质量分数增加后,驱动电压增大,并且含量增加,电场诱导的双折射率与电场的关系也不满足理想的 Kerr 公式关系。

同样对样品 B 进行了非液晶材料不同质量分数的配比,同样非液晶材料质量分数为 10%, 12%, 14%, 配比如表 2 所示。实验测量电光曲线和模拟计算结果如图 5(b) 所示。固定饱和双折射率 $\Delta n_s = 0.16$ 和非液晶材料的介电常数 $\epsilon_p = 4$, 得到质量分数为 10% 样品 B1 在饱和电场强度 $E_s = 3$ V/ μm , 幂指数为 2.35 的拟合效果最好;质量分数为 12% 的样品 B2, 饱和电场强度 $E_s = 3.91$ V/ μm , 幂指数为 2.25 的拟合效果最好;质量分数为 14% 的样品 B3, 饱和电场强度 $E_s = 4.63$ V/ μm , 幂指数为 2.4 的拟合效果最好。由图可知在非液晶材料的质量分数增加后,驱动电压增大,并且质量分数增加,此时电场诱导的双折射率与电场的关系也不满足理想的 Kerr 公式关系。

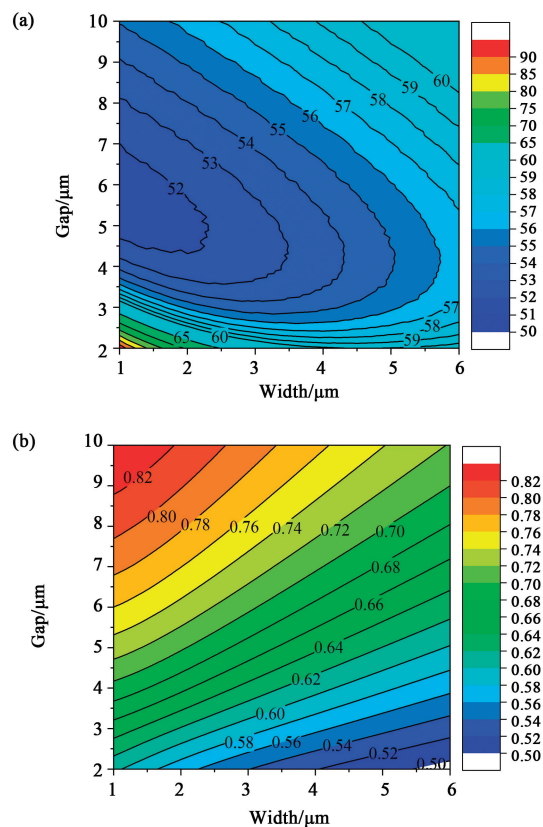


图 6 非液晶材料介电常数为 4 时,不同电极宽度和间隙的影响。(a) 驱动电压; (b) 透过率。

Fig.6 Influence of different electrode widths and gaps when the dielectric constant of non-liquid crystal material is 4. (a) Operating voltage; (b) Transmittance.

从图 5 中可以看到:样品 A1 具有完美的 Kerr 效应表现,其他样品都不具有完美的 Kerr 效应表现(幂指数不等于 2)。考虑 OPPEA 和 C12A 的分子构型,可以认为 OPPEA 的联苯结构为刚性结构,其作为单官能团修饰聚合物网络时,聚合物网络表面较为光滑,对液晶的束缚较弱,从而在聚合物含量合适时,蓝相液晶表现为完美的 Kerr 效应,相对而言,C12A 的长烷基链使聚合物网络表面更粗糙,对液晶的束缚较强,从而导致蓝相液晶表现不出完美的 Kerr 效应。聚合物质量分数的增加,导致饱和电场强度增大,驱动电压增大,结果符合图 4 的预测,但由于图 4 中未考虑饱和电场强度的增大,因此实验测得的驱动电压增大表现与图 4 的结果有差别。

在生产线上,共面电极很容易做到 $5\ \mu\text{m}$ 以下,因此以上实验中的电极宽度和间隙不是最佳的器件参数。对于一般的聚合物单体和手性剂,

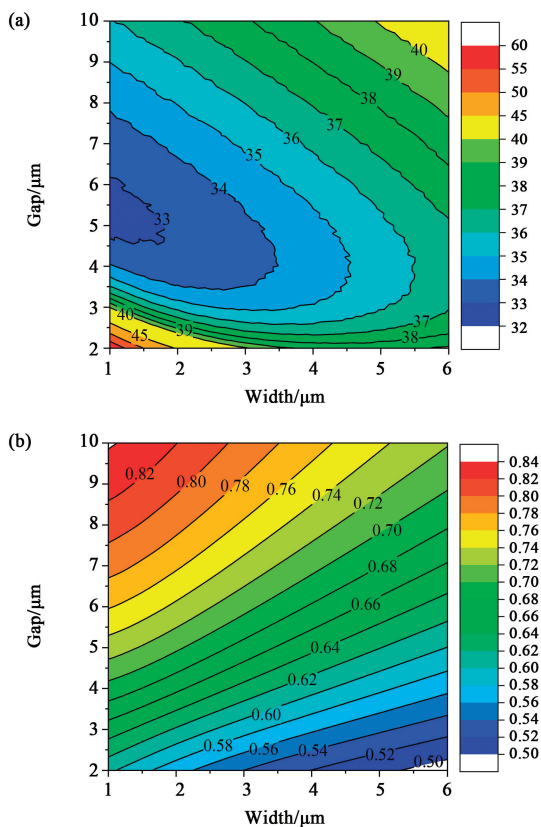


图 7 非液晶材料介电常数为 20 时,不同电极宽度和间隙的影响。(a)驱动电压;(b)透过率。

Fig.7 Influence of different electrode widths and gaps when the dielectric constant of non-liquid crystal material is 20. (a) Operating voltage ; (b) Transmittance.

其介电常数通常为 4 左右,如果使用高介电常数的聚合物单体和手性剂,其介电常数也能达到 20 左右^[23, 26]。下面使用这两个介电常数研究共面电极的宽度和间隙对驱动电压和透过率的影响。为了获得饱和电压和最大透过率,模拟计算中设置电极宽度的最小值为 $1\ \mu\text{m}$,电极间隙的最小值为 $2\ \mu\text{m}$ 。图 6 为介电常数为 4 时的驱动电压和透过率,图 7 为介电常数为 20 时的驱动电压和透过率,此时的非液晶材料的总质量分数固定为 10%(聚合物单体和手性剂的总量)。从两个图中可以得到:电极宽度为 $1\ \mu\text{m}$,间隙为 $5.5\ \mu\text{m}$ 时,驱动电压为最低;考虑到透过率随着电极间隙增大而增大,以及制作电极工艺技术,选择电极宽度小于 $3\ \mu\text{m}$,电极间隙为 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 时,器件的综合性能最好,如图 8 计算的电压透过率曲线所示。由图 8 可以看到,非液晶材料的介电常数不同,仅

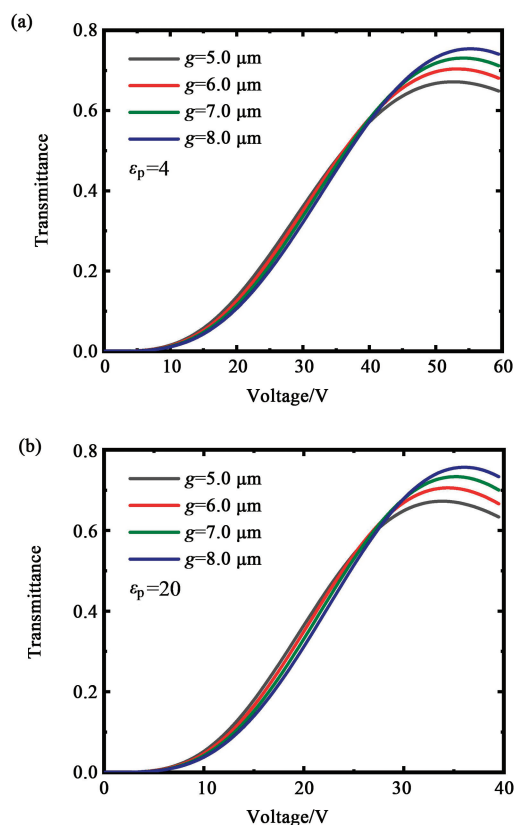


图 8 电极宽度为 $3\ \mu\text{m}$ 时,不同电极间隙的电压-透过率特性。非液晶材料介电常数为 4(a)和 20(b)。

Fig.8 Voltage dependent transmittance curves of different electrode gaps with the fixed electrode width $3\ \mu\text{m}$. The dielectric constant of non-liquid crystal materials is 4(a) and 20(b).

影响驱动电压的大小,对最大透过率和电光曲线的形状影响很小。

5 结 论

本文分别以同比例配比下的双官能团单体 RM257、单官能团单体 OPPEA 和双官能团单体 RM257、单官能团单体 C12A 制作的聚合物稳定蓝相液晶的实验数据为基础,研究了共面电场驱动的聚合物稳定蓝相液晶的电光特性。首先考虑了聚合物稳定蓝相液晶中非液晶材料的分压影响,得到了蓝相液晶和聚合物中的电场强度的计算模型,通过模拟计算结果与实验电光曲线拟合得到蓝相液晶的饱和电场强度和饱和双折射率,进一步研究聚合物材料含量和介电常数对蓝相液晶器件的作用,以及共面电极的宽度和间隙对驱动电压和透过率的影响。随着非液晶材料介电常数的增加,驱动电压下降,并且其质量分数越大,驱动电压下降幅度越大,对于一般蓝相液晶中非液晶材料质量分数约为 10% 质量分数的情况,驱动电压可以从 97 V($\epsilon_p = 3$)下降到 55 V($\epsilon_p = 30$),最大透过率变化很小,甚

至可以忽略。并且非液晶材料的介电常数不同,仅影响驱动电压的大小,对最大透过率和电光曲线的形状影响很小。

本文提出的理论模型与传统的聚合物稳定蓝相液晶整体表现的理论模型相比较,具有如下的差别和进步性:(1)通过实验和模拟计算结果拟合,得到蓝相液晶的饱和双折射率接近于主体液晶的双折射率,这与整体表现的理论模型是完全不同的,我们应用胆甾相液晶中场致向列相的电场强度对蓝相液晶在电场作用下的表现进行了理论分析,确定本文的理论模型是正确的;(2)模型中区别开了聚合物和蓝相液晶中的电场强度,可以分析聚合物的介电常数对蓝相液晶器件的影响,从而可以对蓝相液晶的配方进行优化,整体表现的理论模型不能进行这个方面的分析。(3)可以得到较为准确的蓝相液晶中的电场强度,为今后的动力学响应的理论建模提供合理的电场强度分布基础。

综上所述,本文研究结果为聚合物稳定蓝相液晶器件的研究提供了可靠的计算模型和优化结果,对聚合物稳定蓝相液晶器件的发展有重要的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] XIANG J, LAVRENTOVICH O D. Blue-phase-polymer-templated nematic with sub-millisecond broad-temperature range electro-optic switching [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(5): 051112.
- [2] RAO L H, YAN J, WU S T, *et al.* A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(8): 081109.
- [3] KIZHAKIDATHAZHATH R, HIGUCHI H, OKUMURA Y, *et al.* Weak anchoring interface inducing acrylate copolymer designs for high-performance polymer-stabilized blue phase liquid crystal displays [J]. *Chem. Select*, 2017, 2(23): 6728-6731.
- [4] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(1): 96-98.
- [5] YAN J, LUO Z Y, WU S T, *et al.* Low voltage and high contrast blue phase liquid crystal with red-shifted Bragg reflection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(1): 011113.
- [6] XU D M, CHEN Y, LIU Y F, *et al.* Refraction effect in an in-plane-switching blue phase liquid crystal cell [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(21): 24721-24735.
- [7] NORDENDORF G, SCHMIDTKE J, WILKES D, *et al.* Temperature-insensitive electro-optic response of polymer-stabilized blue phases [J]. *Mater. Chem. C*, 2017, 5(3): 518-521.
- [8] YAN J, XU D M, CHENG H C, *et al.* Turning film for widening the viewing angle of a blue phase liquid crystal display [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(36): 8840-8844.
- [9] LIN Y H, CHEN H S, CHIANG T H, *et al.* A reflective polarizer-free electro-optical switch using dye-doped polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(3): 2556-2561.
- [10] LIU Y F, LAN Y F, HONG Q, *et al.* Compensation film designs for high contrast wide-view blue phase liquid crystal displays [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(1): 3-6.
- [11] LI P, SUN Y B, ZHAO Y L, *et al.* High transmittance blue-phase liquid crystal displays with slit-shaped elec-

- trode [J]. *Liq. Cryst.*, 2013, 40(10): 1417-1421.
- [12] SU Z F, CHEN Y Q, LU J G, *et al.* High-transmittance polymer-stabilised blue-phase liquid crystal display with double-sided protrusion electrodes [J]. *Liq. Cryst.*, 2013, 40(7): 976-979.
- [13] CUI J P, LI Y, YAN J, *et al.* Time-multiplexed dual-view display using a blue phase liquid crystal [J]. *J. Disp. Technol.*, 2013, 9(2): 87-90.
- [14] 刘桢, 沈冬, 王骁乾, 等. 蓝相液晶材料与光子学器件研究进展[J]. 液晶与显示, 2017, 32(5): 325-338.
LIU Z, SHEN D, WANG X Q, *et al.* Progresses on the researches of blue phase liquid crystal materials and photonic devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(5): 325-338. (in Chinese)
- [15] COLES H J, PIVMENKO M N. Liquid crystal 'blue phases' with a wide temperature range [J]. *Nature*, 2005, 436(7053): 997-1000.
- [16] ZHENG Z G, SHEN D, HUANG P. Wide blue phase range of chiral nematic liquid crystal doped with bent-shaped molecules [J]. *New J. Phys.*, 2010, 12(11): 113018.
- [17] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nat. Mater.*, 2002, 1(1): 64-68.
- [18] YAN J, CHEN Y, WU S T, *et al.* Dynamic response of a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 111(6): 063103.
- [19] LIM G, OKUMURA Y, HIGUCHI H, *et al.* Low-temperature properties of polymer-stabilised liquid-crystal blue phases [J]. *ChemPhysChem*, 2014, 15(7): 1447-1451.
- [20] XU D M, YAN J, YUAN J M, *et al.* Electro-optic response of polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105(1): 011119.
- [21] YAN J, CHENG H C, GAUZA S, *et al.* Extended Kerr effect of polymer-stabilized blue-phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(7): 071105.
- [22] YAN J, JIAO M Z, RAO L H, *et al.* Direct measurement of electric-field-induced birefringence in a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal composite [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(11): 11450-11455.
- [23] GAO L, LI X, DU X W, *et al.* High dielectric polymer and its application on electro-optical Kerr effect of blue phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(22): 221907.
- [24] MA H M, YANG R X, SUN Y B, *et al.* One-dimensional model for simulating blue-phase liquid crystal display [J]. *Liq. Cryst.*, 2017, 44(5): 904-910.
- [25] DE GENNES P G, PROST J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1993.
- [26] GAO L, MA H M, SUN Y B. Doping effects of fluorinated chiral dopant in blue phase liquid crystals and its electro-optical behavior [J]. *Liq. Cryst.*, 2020, 47(2): 284-290.

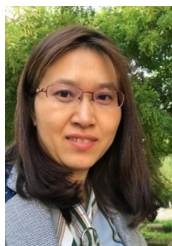
作者简介:



张 波(1995—),女,河北张家口人,硕士研究生,2019 年于河北科技师范学院获得学士学位,主要从事液晶与液晶器件等方面的研究。E-mail: 214317064@qq.com



孙玉宝(1975—),男,河北沧州人,博士,教授,2010 年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶器件物理和液晶的新型应用等方面的研究, E-mail: sun_yubao@163.com



马红梅(1975—),女,河北邢台人,博士,教授,2018 年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶物理与液晶器件物理等方面的研究。E-mail: mhmtj@163.com