

改变直流电场方向调控聚合物稳定胆甾相液晶的反射带隙

张欣敏, 陆红波, 王琦, 王藏玉, 徐苗, 朱俊, 邱龙臻

引用本文:

张欣敏, 陆红波, 王琦, 等. 改变直流电场方向调控聚合物稳定胆甾相液晶的反射带隙[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1075–1083.

ZHANG Xin-min, LU Hong-bo, WANG Qi, et al. Modulation of reflection band in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals by changing DC electric field direction[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1075–1083.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0061>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于胆甾相液晶倾斜螺旋的宽光谱动态域光电调制

Photoelectronic modulation of broad spectral dynamic range based on heliconical cholesteric liquid crystals

液晶与显示. 2021, 36(8): 1061–1068 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0129>

螺旋扭曲力常数对常黑聚合物稳定胆甾液晶光电性能的影响

Influence of helical twisting power on electro-optical properties of normal-mode polymer-stabilized cholesteric texture

液晶与显示. 2016, 31(4): 358–362 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163104.0358>

室温显示胆甾相的侧链液晶聚合物的合成与表征

Synthesis and characterization of side chain liquid crystalline polymers displaying cholesteric phase at room temperature

液晶与显示. 2020, 35(6): 524–530 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0524>

一种光学状态可由电场控制的液晶复合材料的制备与表征

Preparation and characterization of liquid crystal composite material with electrically controlled optical states

液晶与显示. 2018, 33(10): 870–876 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183310.0870>

模板化蓝相液晶多波长滤波器

Multi-wavelength filters of templated blue phase liquid crystal

液晶与显示. 2019, 34(9): 835–840 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0835>

文章编号:1007-2780(2021)08-1075-09

改变直流电场方向调控聚合物稳定 胆甾相液晶的反射带隙

张欣敏^{1,2}, 陆红波^{1*}, 王琦^{1,2}, 王藏玉^{1,2}, 徐苗¹, 朱俊¹, 邱龙臻¹

(1. 合肥工业大学特种显示技术国家工程实验室 先进显示技术国家重点实验室

安徽省特种显示与成像技术创新中心 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 化学与化工学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:具有宽带反射特性的胆甾相液晶在众多领域有广泛的应用前景。为了拓展调控反射带隙的方法,实现在所需波谱范围内的带隙调控,本文通过添加紫外吸收染料,制备了一种聚合物网络梯度分布的新型聚合物稳定胆甾相液晶器件。实验结果表明,聚合物网络的梯度分布使液晶盒上下表面附近的聚合物网络弹性产生了显著的差异,因此,其电诱导的反射带隙拓宽可以改变直流电场的方向进行调谐。当液晶盒厚度为 40 μm ,染料浓度为 1.2% 的 PSCLC,在施加 12 V 的直流电场时,面向光源为正极时的反射带隙位于 570~778 nm,改变电场方向后,反射带隙红移至 598~816 nm。这项研究为宽带反射胆甾相液晶材料提供了一种新的策略,在智能窗户、激光防护、数据存储等方面具有潜在的应用。

关键词:聚合物稳定胆甾相液晶;宽带反射;直流电场方向;反射带隙调控

中图分类号:O753⁺.2;TN29 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0061

Modulation of reflection band in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals by changing DC electric field direction

ZHANG Xin-min^{1,2}, LU Hong-bo^{1,*}, WANG Qi^{1,2},
WANG Cang-yu^{1,2}, XU Miao¹, ZHU Jun¹, QIU Long-zhen¹(1. *National Engineering Laboratory of Special Display Technology,**State Key Laboratory of Advanced Display Technology,**Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province,**Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*2. *School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology,**Hefei 230009, China)*

Abstract: Cholesteric liquid crystals with broadband reflection properties have a wide range of applica-

收稿日期:2021-03-08;修订日期:2021-03-26.

基金项目:国家自然科学基金(No.61805066);安徽省自然科学基金(No.1708085MF150);安徽省杰出青年基金(No.1808085J03);中央高校基础研究基金(No. JZ2018HGPB0276)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61805066); Natural Science Foundation of Anhui Province, China (No.1708085MF150); Distinguished Youth Foundation of Anhui Province (No.1808085J03); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. JZ2018HGPB0276).

* 通信联系人, E-mail: bozhilu@hfut.edu.cn

tions in many fields. In order to expand the method of modulating the reflection band and achieve band modulation in the desired spectral range, a new polymer-stabilized cholesteric liquid crystal device with polymer network gradient distribution is prepared by adding UV-absorbing dyes. The experimental results show that the gradient distribution of polymer network makes a significant difference in the elasticity of polymer network near the upper and lower surfaces of the cell, so that its electrically induced reflection band broadening can be tuned by changing the direction of the direct current electric field. When the cell thickness is $40\mu\text{m}$ and the dye concentration is 1.2% of PSCLC, the reflective band facing the light source as the positive pole is located at $570\sim 778\text{ nm}$ when a 12 V DC electric field is applied, and the reflective band is red-shifted to $598\sim 816\text{ nm}$ after changing the electric field direction. This research provides a new strategy for broadband reflective cholesteric liquid crystal materials that have potential applications in smart windows, laser protection, data storage, etc.

Key words: PSCLC; broad reflection band; DC electric field direction; reflective band modulation

1 引言

胆甾相液晶 (Cholesteric liquid crystals, CLCs) 是一种热致液晶, 其分子取向为螺旋状, 并可周期性地变化^[1]。胆甾相液晶分子的螺旋状排列使其具有选择性反射特性, 反射带隙的中心波长 $\lambda_0 = n_{\text{avg}} \times p$, 其中, $n_{\text{avg}} = (n_e + n_o)/2$, n_o 为液晶的寻常光折射率, n_e 为液晶的非寻常光折射率, P 为螺距长度, 是折射率变化一个周期的纵向长度^[2]。反射带隙的带宽 $\Delta\lambda = \Delta n \times P$, 其中 $\Delta n = n_e - n_o$ 为液晶的双折射率^[3-4]。由于液晶双折射率的限制, 单一螺距 CLCs 的反射带宽一般不会超过 100 nm, 这对于全彩反射显示^[5]、激光防护^[6]、数据存储^[7], 以及智能窗户等应用来说是远远不够的^[8-12]。因此, 拓宽反射带隙是胆甾相液晶研究的关键问题之一。

通过形成螺距梯度或螺距非均匀分布可以拓宽胆甾相液晶的反射带隙^[4,13-20]。Dirk J. Broer 利用光诱导分子扩散的原理, 使双官能团手性液晶性可聚合单体向上表面扩散, 单官能团液晶性单体向下表面扩散, 形成了自上而下逐渐变大的螺距梯度分布结构, 可以选择性地反射 $400\sim 750\text{ nm}$ 的圆偏振光, 几乎覆盖整个可见光区域^[21-22]。杨槐等人合成了一种手性化合物, 其螺旋扭曲力常数 (HTP) 随温度的增加而增加, 将该化合物加入到胆甾相液晶/聚合物网络中, 制备出热可控的宽带反射薄膜^[2,17], 利用手性单体和手性偶氮苯掺杂物制备了聚合物稳定胆甾相 (PSCLC) 液晶器件, 通过紫外光可以拓宽其反射带隙^[2]。在各

种外部的刺激方法中, 电场调控具有响应速度快、应用范围广、操作简单、实用性强等优点, 被认为是最简单的方法^[23-25]。具有负介电各向异性的聚合物稳定胆甾相液晶的反射带宽可以通过直流电场拓宽^[26-27]。目前, 对于 PSCLC 电场诱导反射带隙拓宽的研究主要集中在扩大拓宽范围和降低阈值电压等方面^[2,8,28-33]。由于制备的 PSCLC 中聚合物网络是均匀分布的, 改变外加电场方向无法调控其反射带隙。

本文通过在液晶体系中加入紫外吸收染料, 利用光强梯度, 制备出聚合物网络非均匀分布的 PSCLC。研究表明, 通过改变外加直流电场的方向, 实现 PSCLC 反射带隙的调控。

2 实验

2.1 材料和样品制备

图 1 为实验所用材料的化学结构式, 其中包括负性向列相液晶 HNG715500-000 ($\Delta\epsilon = -14.2$, $\Delta n = 0.075$), 手性掺杂剂 R6N, 液晶单体 RM257, 上述材料均购自江苏合成显示科技有限公司, 紫外吸收染料 UV-234 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 光引发剂 BME 购自东京化成工业株式会社。所有材料均直接使用, 没有进一步纯化。将配置好的 CLC 混合物利用毛细作用灌入到液晶盒中, 液晶盒由两块 ITO 玻璃制成, 没有聚酰亚胺 (PI) 取向层。液晶盒厚度由间隔子控制 ($d = 20, 30, 40\mu\text{m}$)。依次施加低频交流电 (150 V, 1 Hz) 和高频交流电 (150 V,

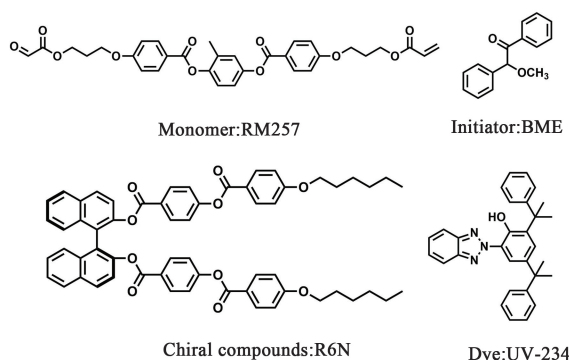


图1 用于制备 PSCLC 材料的化学结构

Fig.1 Chemical structures of the materials used to fabricate the PSCLC

1 kHz),获得排列较好的平面织构态^[29]。然后在紫外光(365 nm, 3 mW/cm²)下照射样品聚合制备聚合物稳定胆甾相液晶,在聚合过程中体系一直施加 150 V、1 kHz 的高频高压交流电,降低聚合物网络生长对液晶分子排列的扰乱,聚合时间为 30 min。

2.2 实验仪器

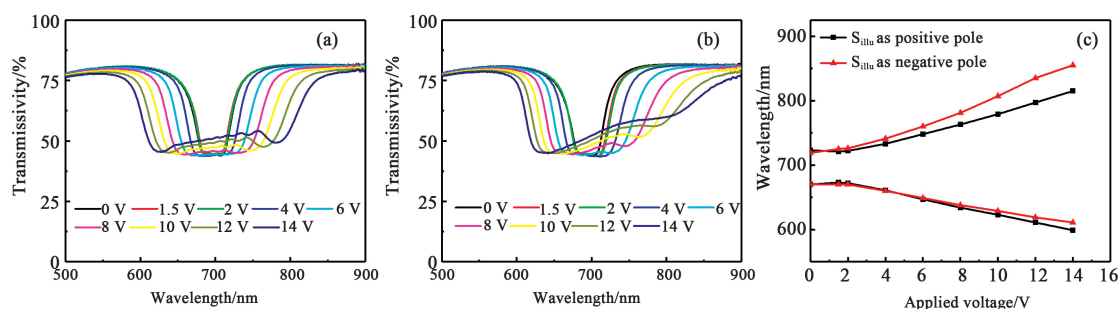
利用紫外可见分光光度计(Shimadzu-UV2550,日本)测试 PSCLC 的透射光谱。其中, λ_0 为透射光谱中反射带隙的中心波长, $\lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 分别为透射光谱中最小和最大透射光波长半峰高

处的值。利用光学显微镜和偏振显微镜(Leica DM2500M,德国)来表征 PSCLC 的光学性能。使用 SEM(SU8020,日本)来表征聚合物网络的形貌。直流电场使用 Keithley 2400(Tektronix,美国),交流电压使用 20 MHz 函数/任意波形发生器(Agilent 33220A,美国)与高速双极性功率放大器(NF BA4825,日本)。

3 结果与讨论

PSCLC 的混合物溶液按照 HNG715500-000 : R6N : RM257 : BME=100 : 4 : 8 : 1(以重量单位计)的比例配置,紫外吸收染料 UV-234 为体系总质量的 0.8%,将配置好的混合物灌入到 30 μm 的液晶盒中。UV 固化后,通过直流电场可以拓宽 PSCLC 的反射带隙,如图 2 所示。比较图 2(a)和 2(b),发现 PSCLC 的反射带隙与直流电场的方向有关。

施加电压为 14 V 时,当样品面向光源处的一面(S_{illu})为正极时,反射带隙位于 599~815 nm。而当 S_{illu} 为负极时,反射带隙红移至 611~855 nm。如图 2(c)所示,当 S_{illu} 为负极时,反射带隙主要在长波端方向拓宽,而当 S_{illu} 为正极时,反射带隙拓宽主要在短波端。

图2 不同的直流电压下 PSCLC 的透射光谱, S_{illu} 为正极(a)和 S_{illu} 为负极(b),以及 $\lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 与直流电压的关系(c)。Fig.2 Transmission spectra of PSCLC at different DC voltages, S_{illu} as the positive pole (a) and S_{illu} as the negative pole (b), $\lambda_{\min}$ and $\lambda_{\max}$ as a function of DC voltage (c).

杨登科等人研究表明^[26], PSCLC 反射带隙的拓宽是由于聚合物网络在直流电场中的运动引起的。聚合物网络会吸附正性离子在电场力的作用下向负极移动,同时由于聚合物网络对液晶分子的锚定作用,网络的平移运动使靠近阳极侧的螺距被拉伸,靠近阴极侧的螺距被压缩,从而实现

螺距梯度分布,反射带隙变宽。因此, PSCLC 的反射带隙依赖于聚合物网络的运动,而聚合物网络的运动又取决于 3 个因素:(1)电场对聚合物网络施加的静电力的作用,其大小与施加电场的方向无关;(2)液晶的弹性力,在本文是一样的;(3)聚合物网络的弹性,它取决于聚合物网络的形

貌^[27]。图 3 是在靠近光源的上表面和远离光源的下表面样品的聚合物网络的 SEM 图。比较图 3(a)、3(b)可知,靠近光源处的上表面聚合物网络密度较高,空隙也较小。根据上述结果,我们推测,改变外加直流电场方向,反射带隙的差异是由于聚合物网络的不均匀分布导致的。

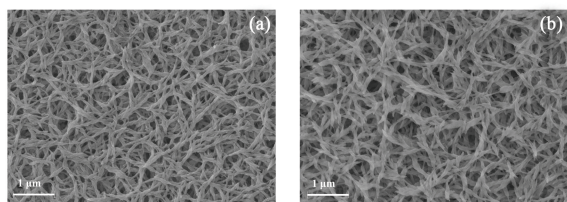


图 3 样品的上表面 S_{illu} (a) 和下表面 (b) 聚合物网络的 SEM 图

Fig.3 SEM images of polymer networks on the upper surface S_{illu} (a) and the lower surface (b)

为了探索聚合物网络形貌对反射带隙的影响,我们制备不同单体浓度的 3 个样品(6%, 8%, 10%),体系无紫外吸收染料,聚合后形成的聚合物网络分布是均匀的。由图 4(a)可知,当施加直流电压为 14 V 时,单体浓度从 6% 增大到 10%,PSCLC 的反射带宽从 334 nm 减小到 150

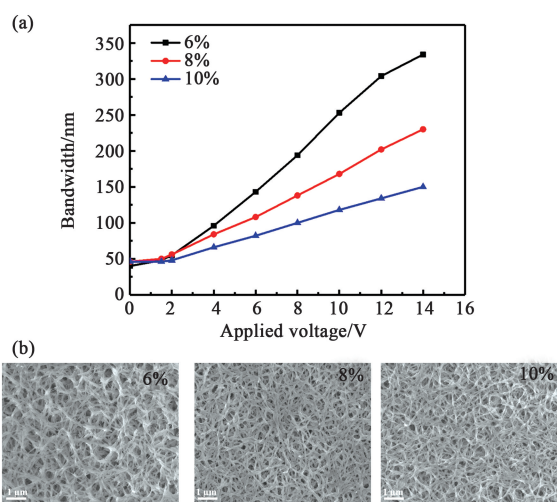


图 4 (a) 不同单体浓度的 PSCLC 体系带宽与直流电压的关系; (b) 不同单体浓度的聚合物网络的 SEM 图。

Fig.4 (a) Bandwidth as a function of DC voltage for PSCLC systems with different monomer concentrations; (b) SEM images of polymer networks with different monomer concentrations.

nm,在施加相同电压的情况下,单体浓度较低的样品具有较宽的反射带隙。此外,SEM 研究表明,随着单体浓度的增加,聚合物网络密度增大,空隙减小。聚合物网络密度越大,聚合物网络的弹性模量越大,相同应力下的应变越小。所以当外加电压相同时,其反射带隙拓宽越小。

如图 5(a)所示,当染料掺入到 CLCs 后,在液晶盒厚方向自上而下形成紫外光强梯度,从而导致不同深度的聚合速率不同^[31],即靠近光源的上表面(S_{illu})处聚合速率快,形成的聚合物网络致密,弹性模量较高,而远离光源的下表面处聚合速率慢,形成的聚合物网络稀疏,弹性模量较低。因此,当 S_{illu} 为正极时,负极基板处形成的聚合物网络稀疏,弹性模量较小,施加相同的电压时,负极附近的压缩位移更大,在短波端方向产生更多的拓宽(图 5(b))。而当 S_{illu} 为负极时,正极基板处的聚合物网络稀疏,弹性模量较小,当施加相同电压时,正极附近的拉伸位移较大。因此,在长波端方向产生更多的拓宽(图 5(c))。综上所述,改变直流电场方向,PSCLC 反射带隙的差异是由于液晶盒厚度方向的聚合物网络弹性模量不同导致的。

为了验证上述机理,我们设置了两组对照试

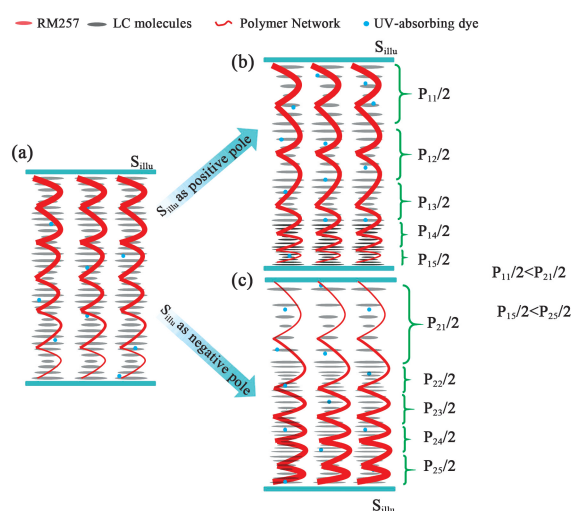


图 5 紫外线照射后形成的聚合物网络的不均匀分布(a); S_{illu} 为正极(b)与 S_{illu} 为负极(c)时施加直流电场形成的宽带反射。

Fig.5 Inhomogeneous distribution of the polymer network formed after UV irradiation (a); Broadband reflection formed by applying the DC electric field with S_{illu} as the positive pole (b), with S_{illu} as the negative pole (c).

验。如图 6(a)所示,紫外光源(365 nm, 3 mW/cm²)位于样品的正上方,同时放置两面镜子,使液晶盒两侧照射相同的紫外光强度^[34],此时样品中仍然含有染料,将其称之为镜面聚合。同时,另一组对照实验为样品中没有紫外吸收染料,但其余组分和光照条件与上述实验相同。由图 6(b), 6(c)可知,对照实验的 PSCLC 反射带隙与施加

直流电场的方向无关。当样品镜面聚合时,液晶盒左右两面的光强相同,聚合物网络密度不会产生明显差别。同理,当体系中没有染料时,液晶盒由上到下无法形成明显的光强梯度,此时 PSCLC 的聚合物网络是均匀分布的。由此可知,聚合物网络的不均匀分布是图 2 出现光电响应差异的关键。

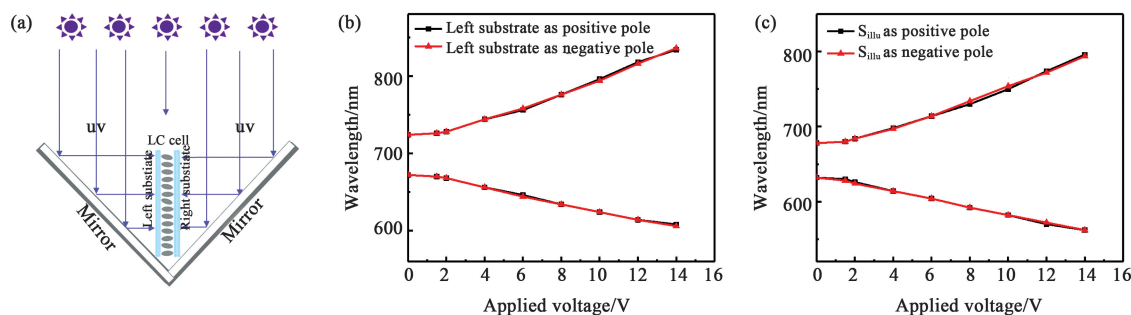


图 6 镜面聚合示意图(a), 镜面聚合制备的 PSCLC(b) 和无染料聚合制备的 PSCLC(c) 的 $\lambda_{\min}$ 和 $\lambda_{\max}$ 与直流电压的关系。

Fig.6 Schematic diagram of mirror polymerization(a), plots of $\lambda_{\min}$ and $\lambda_{\max}$ as a function of the applied DC voltage for the mirror polymerization sample (b) and the dye-free polymerization sample (c).

为了探究聚合物网络不均匀分布的程度对反射带隙的影响,制备了 3 种不同盒厚($d=20, 30, 40 \mu\text{m}$)的 PSCLC。图 7 为不同盒厚的 PSCLC 反射带的拓宽差值与直流电压的关系图。由图可知,当施加电压为 12 V 时,液晶盒厚度为 $20 \mu\text{m}$ 的 PSCLC 的 $\Delta\lambda_{\max}$ (改变直流电场方向后, $\lambda_{\max}$ 的差异) 为 7 nm, $\Delta\lambda_{\min}$ (改变直流电场方向后, $\lambda_{\min}$ 的差异) 为 2 nm。当盒厚增大到 $30 \mu\text{m}$ 时, $\Delta\lambda_{\max}$ 增大到 28 nm, $\Delta\lambda_{\min}$ 增大到 8 nm。继续增大盒厚

到 $40 \mu\text{m}$ 时,反射带隙的差异对施加直流电场的方向更为敏感, $\Delta\lambda_{\max}$ 增大到 35 nm, $\Delta\lambda_{\min}$ 增大到 26 nm。聚合物网络的分布梯度与液晶盒厚度相关^[35]。体系中存在紫外吸收染料,当紫外光由上到下照射样品时,由于染料的吸收作用,由上到下产生光强梯度。而液晶盒厚度越大,靠近光源处的光照强度与远离光源处的光照强度差距越大,导致形成的聚合物网络分布梯度越明显,所以在改变直流电场方向后反射带隙差异越大。

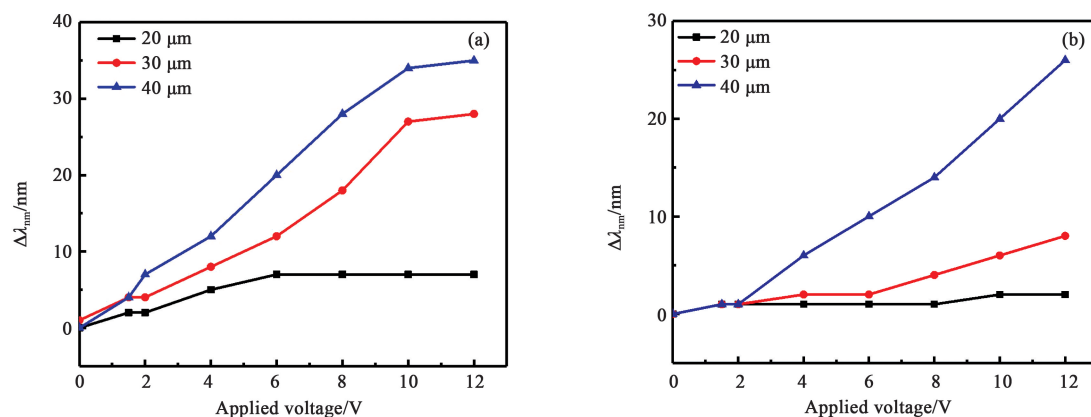


图 7 改变直流电场的方向,不同液晶盒厚度的 PSCLC $\Delta\lambda_{\max}$ (a) 和 $\Delta\lambda_{\min}$ (b) 与直流电压的关系。

Fig.7 PSCLC $\Delta\lambda_{\max}$ (a) and $\Delta\lambda_{\min}$ (b) as a function of DC voltage for different cell thicknesses by changing the direction of the DC electric field.

此外,聚合物网络的分布梯度与染料的浓度也是密切相关的。我们制备了一系列样品,其中紫外吸收染料 UV-234 的浓度分别为 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2%。将其分别灌入到 30 μm 的液晶盒中,表征其透射光谱。由图 8 可知,当样品中的染料浓度从 0% 增加到 1.2% 时,改变施加的直流电场(14 V)的方向后, $\Delta\lambda_{\text{max}}$ 从 0 nm 增大到 50 nm ($\Delta\lambda_{\text{min}}$ 从 0 nm 增大到 18 nm)。当体系中加入更多的染料时,聚合过程中存在更大的光强梯度。这导致聚合物网络形成更明显的分布梯度,反射带隙拓宽差异更加明显。但是,过高浓度的染料可能会增加体系的粘度,限制单体的扩散,因此当染料浓度增加到 1.6% 时, $\Delta\lambda_{\text{max}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{min}}$ 反而减小。

根据上述结果,当染料浓度为 1.2%, 液晶盒厚度为 40 μm 时,形成的聚合物网络分布梯度最为明显。结果如图 9(a) 所示,体系施加 12 V 的直流电压,当 S_{illu} 为正极时,反射带隙位于 570 ~

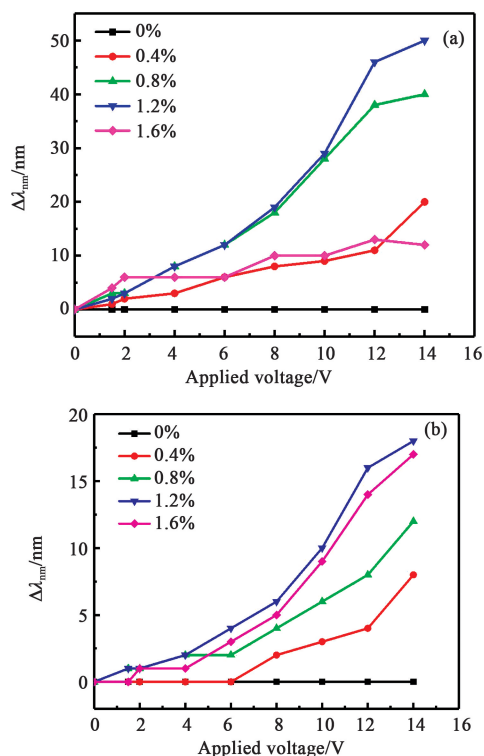


图 8 改变直流电场的方向,不同染料浓度的 PSCLC $\Delta\lambda_{\text{min}}$ (a) 和 $\Delta\lambda_{\text{max}}$ (b) 与直流电压的关系。

Fig.8 PSCLC $\Delta\lambda_{\text{min}}$ (a) and $\Delta\lambda_{\text{max}}$ (b) as a function of DC voltage for different dye concentrations by changing the direction of the DC electric field.

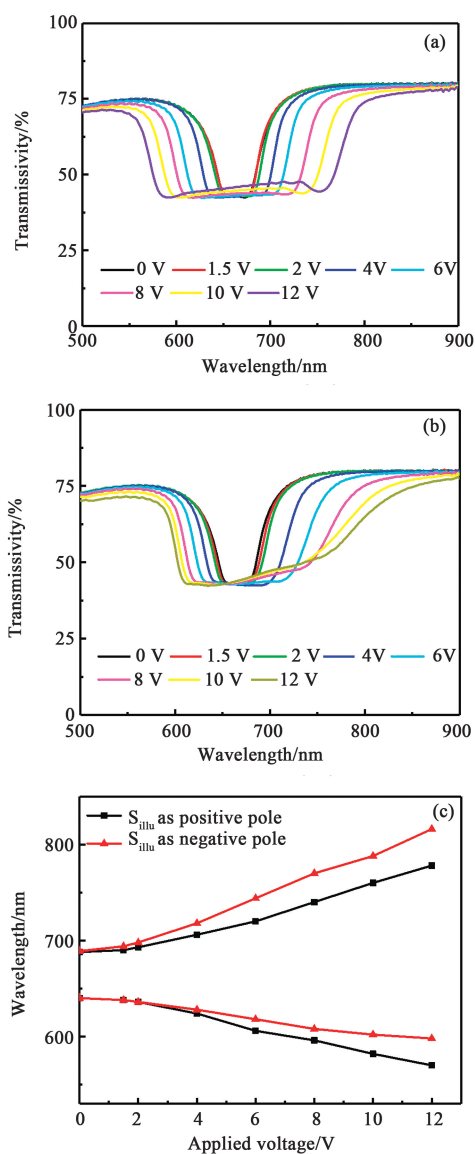


图 9 不同直流电压下 PSCLC 的透射光谱, S_{illu} 为正极(a)和 S_{illu} 为负极(b), λ_{min} 和 λ_{max} 与直流电压的关系(c)。光学显微镜的反射模式观察 PSCLC 在不同直流电压下的显微照片(d)。

Fig.9 Transmission spectra of PSCLC at different DC voltages, S_{illu} as the positive pole (a) and S_{illu} as the negative pole (b), λ_{min} and λ_{max} as a function of DC voltage (c). Micrographs of PSCLC at different DC voltages observed in reflection mode of optical microscope (d).

778 nm, S_{illu} 为负极时,反射带隙红移至 598~816 nm。如图 9(b)所示,直流电场方向对 PSCLC 反射颜色也有影响,当 S_{illu} 为正极时,随着电压的增大,反射颜色从浅红色变化到红色、橙色和黄色。而当 S_{illu} 为负极时,反射颜色则从浅红色变化到橙红色。

4 结 论

本文通过添加紫外吸收染料,制备了具有聚合物网络梯度分布的 PSCLC,其反射带隙不仅与

施加直流电场的大小相关还与直流电场的方向有关。通过实验证实,反射带隙的差异是由于聚合物网络的不均匀分布导致的。聚合物网络的分布梯度与染料浓度和液晶盒厚度有关,当染料浓度为 1.2%、液晶盒厚度为 40 μm 时制备的 PSCLC 中的聚合物网络梯度分布最为明显,当改变直流电场方向时,反射带隙的差异达到最佳,面向光源处为正极的反射带隙位于 570~778 nm,改变电场方向后,反射带隙红移至 598~816 nm,且表现出明显的电致变色区别,为反射带隙的调控提供了新的可能性。

参 考 文 献:

- [1] 李昌立,孙晶,蔡红星,等.胆甾相液晶的光学特性[J].液晶与显示,2002,17(3):193-198.
LI C L, SUN J, CAI H X, *et al.* Optical properties of cholesteric liquid crystals [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2002, 17(3): 193-198. (in Chinese)
- [2] CHEN X W, WANG L, CHEN Y J, *et al.* Broadband reflection of polymer-stabilized chiral nematic liquid crystals induced by a chiral azobenzene compound [J]. *Chem. Commun.*, 2014, 50(6): 691-694.
- [3] SHARMA V, CRNE M, PARK J O, *et al.* Structural origin of circularly polarized iridescence in jeweled beetles [J]. *Science*, 2009, 325(5939): 449-451.
- [4] BIAN Z Y, LI K X, HUANG W, *et al.* Characteristics of selective reflection of chiral nematic liquid crystalline gels with a nonuniform pitch distribution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(20): 201908.
- [5] LI Z L, DESAI P, AKINS R B, *et al.* Electrically tunable color for full-color reflective displays [C]//*Proceedings SPIE 4658, Liquid Crystal Materials, Devices, and Applications VIII*. San Jose, California, United States: SPIE, 2002: 7-13.
- [6] FINKELMANN H, KIM S T, MUÑOZ A, *et al.* Tunable mirrorless lasing in cholesteric liquid crystalline elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2001, 13(14): 1069-1072.
- [7] FORGET S, CHÉNAI S. Towards applications of organic solid-state lasers [M]//FORGET S, CHÉNAI S. *Organic Solid-State Lasers*. Berlin: Springer, 2013: 151-166.
- [8] KHANDELWAL H, DEBIJE M G, WHITE T J, *et al.* Electrically tunable infrared reflector with adjustable bandwidth broadening up to 1100 nm [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4(16): 6064-6069.
- [9] OCHOA C E, ARIES M B C, VAN LOENEN E J, *et al.* Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort [J]. *Appl. Energy*, 2012, 95: 238-245.
- [10] KHANDELWAL H, LOONEN R C G M, HENSEN J L M, *et al.* Electrically switchable polymer stabilised broadband infrared reflectors and their potential as smart windows for energy saving in buildings [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5(1): 11773.
- [11] 朱智康,黄凯,张鸿州,等.多波长与带宽可调液晶滤波器[J].液晶与显示,2020,36(4):516-521.
ZHU Z K, HUANG K, ZHANG H Z, *et al.* Multi-wavelength and bandwidth tunable liquid crystal filter [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2020, 36(4): 516-521. (in Chinese)
- [12] ZHANG W X, KRAGT S, SCHENNING A P H J, *et al.* Easily processable temperature-responsive infrared-reflective polymer coatings [J]. *ACS Omega*, 2017, 2(7): 3475-3482.
- [13] MITOV M. Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(47): 6260-6276.
- [14] GUO J B, YANG H, LI R, *et al.* Effect of network concentration on the performance of polymer-stabilized cholesteric liquid crystals with a double-handed circularly polarized light reflection band [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009,

- 113(37): 16538-16543.
- [15] 赵静, 李庆丽, 许利军. 基于 Berreman 4×4 矩阵对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的模拟研究[J]. 液晶与显示, 2015, 30(5): 777-783.
- ZHAO J, LI Q L, XU L J. Simulation research on Bragg reflection bandwidth of cholesteric liquid crystal based on Berreman 4×4 matrix [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Dis.*, 2015, 30(5): 777-783. (in Chinese)
- [16] HUANG Y H, ZHOU Y, WU S T. Broadband circular polarizer using stacked chiral polymer films [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(10): 6414-6419.
- [17] YANG H, MISHIMA K, MATSUYAMA K, *et al.* Thermally bandwidth-controllable reflective polarizers from (polymer network/liquid crystal/chiral dopant) composites [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(15): 2407-2409.
- [18] CUI X P, HUANG Q, LIU T, *et al.* Pitch gradient induced by disklike chiral molecular diffusion in chiral-nematic liquid crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107(6): 063711.
- [19] KIM J, KIM H, KIM S, *et al.* Broadening the reflection bandwidth of polymer-stabilized cholesteric liquid crystal via a reactive surface coating layer [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(20): 5731-5735.
- [20] 李发胜, 王磊, 齐琳, 等. 紫外吸收染料诱导的具有宽波反射特性的胆甾相液晶聚合物薄膜[J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 573-576.
- LI F S, WANG L, QI L, *et al.* Ultraviolet dye induced broadband reflection in cholesteric liquid crystals polymer film [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2011, 26(5): 573-576. (in Chinese)
- [21] BROER D J, LUB J, MOL G N. Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient [J]. *Nature*, 1995, 378(6556): 467-469.
- [22] BROER D J, MOL G N, VAN HAAREN J A M M, *et al.* Photo-induced diffusion in polymerizing chiral-nematic media [J]. *Adv. Mater.*, 1999, 11(7): 573-578.
- [23] HU W, ZHAO H Y, SONG L, *et al.* Electrically controllable selective reflection of chiral nematic liquid crystal/chiral ionic liquid composites [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(4): 468-472.
- [24] TONDIGLIA V P, NATARAJAN L V, BAILEY C A, *et al.* Bandwidth broadening induced by ionic interactions in polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 4(7): 1465-1472.
- [25] LEE K M, TONDIGLIA V P, MCCONNEY M E, *et al.* Color-tunable mirrors based on electrically regulated bandwidth broadening in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(10): 1033-1041.
- [26] NEMATI H, LIU S Y, ZOLA R S, *et al.* Mechanism of electrically induced photonic band gap broadening in polymer stabilized cholesteric liquid crystals with negative dielectric anisotropies [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(6): 1208-1213.
- [27] YU M N, WANG L, NEMATI H, *et al.* Effects of polymer network on electrically induced reflection band broadening of cholesteric liquid crystals [J]. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2017, 55(11): 835-846.
- [28] LU H B, HU J L, CHU Y T, *et al.* Cholesteric liquid crystals with an electrically controllable reflection bandwidth based on ionic polymer networks and chiral ions [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015, 3(21): 5406-5411.
- [29] ZHANG Q, ZHANG X M, YANG L, *et al.* Polymer-stabilised cholesteric liquid-crystals as tunable light-reflector with low operating-voltage and energy consumption [J]. *Liq. Cryst.*, 2020, 47(11): 1655-1662.
- [30] LEE K M, TONDIGLIA V P, GODMAN N P, *et al.* Blue-shifting tuning of the selective reflection of polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Soft Matter*, 2017, 13(35): 5842-5848.
- [31] LI F S, WANG L, SUN W P, *et al.* Dye induced great enhancement of broadband reflection from polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Polym. Adv. Technol.*, 2012, 23(2): 143-148.
- [32] ZHANG L P, WANG M, WANG L, *et al.* Polymeric infrared reflective thin films with ultra-broad bandwidth [J]. *Liq. Cryst.*, 2016, 43(6): 750-757.
- [33] KHANDELWAL H, TIMMERMAN G H, DEBIJE M G, *et al.* Dual electrically and thermally responsive broadband reflectors based on polymer network stabilized chiral nematic liquid crystals: the role of crosslink density [J]. *Chem. Commun.*, 2016, 52(66): 10109-10112.
- [34] LU L, SERGAN V, BOS P J. Mechanism of electric-field-induced segregation of additives in a liquid-crystal host

[J]. *Phys. Rev. E*, 2012, 86(5): 051706.

- [35] HU X W, DE HAAN L T, KHANDELWAL H, *et al.* Cell thickness dependence of electrically tunable infrared reflectors based on polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Sci. China Mater.*, 2018, 61(5): 745-751.

作者简介:



张欣敏(1993—),女,山西吕梁人,硕士研究生,2017年于安徽农业大学获得学士学位,主要从事光电高分子材料方面的研究。E-mail: 1215064540@qq.com



陆红波(1979—),男,安徽合肥人,研究员,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事新型液晶材料及器件方面的研究。E-mail: bozhilu@hfut.edu.cn