

基于胆甾相液晶倾斜螺旋的宽光谱动态域光电调制

贾淑珍, 袁丛龙, 刘炳辉, 胡宏龙, 沈冬, 郑致刚

引用本文:

贾淑珍, 袁丛龙, 刘炳辉, 等. 基于胆甾相液晶倾斜螺旋的宽光谱动态域光电调制[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1061–1068.
JIA Shu-zhen, YUAN Cong-long, LIU Bing-hui, et al. Photoelectronic modulation of broad spectral dynamic range based on heliconical cholesteric liquid crystals[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1061–1068.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光调谐的胆甾相液晶应用的发展

Development of photo-tunable cholesteric liquid crystals applications

液晶与显示. 2016, 31(11): 1023–1032 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163111.1023>

基于 Berreman 4×4 矩阵对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的模拟研究

Simulation research on Bragg reflection bandwidth of cholesteric liquid crystal based on Berreman 4×4 matrix

液晶与显示. 2015(5): 777–783 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0777>

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>

多波长与带宽可调液晶滤波器

Multi-wavelength and bandwidth tunable liquid crystal filter

液晶与显示. 2021, 36(4): 516–521 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0306>

聚合物稳定胆甾相滤色液晶光阀的显示研究

Color-filtering liquid crystal switch based on polymer-stabilized cholesteric texture

液晶与显示. 2016, 31(4): 347–352 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163104.0347>

文章编号:1007-2780(2021)08-1061-08

基于胆甾相液晶倾斜螺旋的 宽光谱动态域光电调制

贾淑珍¹, 袁丛龙², 刘炳辉², 胡宏龙³, 沈 冬¹, 郑致刚^{1,2*}

(1. 华东理工大学 物理系, 上海 200237;

2. 华东理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200237;

3. 华东理工大学 化学与分子工程学院, 上海 200237)

摘要:本文通过在倾斜螺旋胆甾相液晶中引入光敏手性分子,设计了一种光响应倾斜螺旋胆甾相液晶体系。在电场和光场的协同作用下,螺旋结构的选择性反射可以实现从可见光到近红外区域宽光谱动态域调控。倾斜螺旋结构的反射光谱调谐范围与体系初始螺旋扭曲力相关,通过调节手性材料的浓度,倾斜螺旋胆甾相液晶在电场作用下实现了从可见光到近红外区域约 580 nm 较宽光谱范围的反射带调节。同时,在固定电场下,通过调节非偏振紫外光场的功率获得了覆盖整个可见光区域以及近红外区域约 530 nm 的光谱调控,其中光调控特性主要取决于光场产生的热效应以及偶氮基团的光致异构效应。此外,由于倾斜螺旋结构的电场依赖性,通过调制电场的强度可以控制倾斜螺旋胆甾相液晶反射带光场调制区间。

关键词:胆甾相液晶;倾斜螺旋;光电调制;宽光谱域调制

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0129

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

JIA Shu-zhen¹, YUAN Cong-long², LIU Bing-hui², HU Hong-long³,
SHEN Dong¹, ZHENG Zhi-gang^{1,2*}(1. *Department of Physics, East China University of Science and Technology,*
*Shanghai 200237, China;*2. *School of Materials Science and Engineering, East China University of*
*Science and Technology, Shanghai 200237, China;*3. *School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of*
Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: By introducing photosensitive chiral molecules into the heliconical cholesteric liquid crystal, a photoresponsive heliconical cholesteric liquid crystal system is designed. Under the synergistic effect

收稿日期:2021-05-12;修订日期:2021-05-21.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61822504, No. 62035008, No. 51873060);上海市青年科技启明星计划(No. 17QA1401100);中央高校基本科研业务费项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61822504, No.62035008, No.51873060);
Shanghai Rising Star Program (No. 17QA1401100); Fundamental Research Funds for the Central Universities

* 通信联系人, E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn

of electric field and optical field, the selective reflection of the heliconical structure can be adjusted from visible light to near-infrared region. The tuning range of the reflection spectrum of the heliconical structure is related to the initial helical twisting power of the system. The heliconical cholesteric liquid crystal realizes a broad spectral range (about 580 nm) from visible light to near-infrared region under the modulation of electric field through adjusting the concentration of the chiral photosensitive molecule. Meanwhile, by modulating the power of the non-polarized ultraviolet light field, the tuning range (about 530 nm) of the heliconical cholesteric liquid crystal covering the entire visible light region and the near-infrared region is obtained under a fixed electric field. Such broad spectrum modulated by optical field mainly depends on the thermal effect of optical field and photoisomerization effect of azobenzene. In addition, due to the electric field dependence of the heliconical structure, the optical field modulation interval of the heliconical cholesteric liquid crystal reflection band can be controlled by electric field.

Key words: cholesteric liquid crystal; heliconical structure; photoelectric modulation; broad spectral range modulation

1 引言

动态控制材料或结构在可见光和近红外波段区域的透射和反射特性是当前光学领域最重要的研究方向之一且具有广泛应用,例如智能光电器件^[1-2]、裸眼 3D 显示^[3]、微纳平面光子学等。液晶材料是一类典型的具有刺激-响应性的光电各向异性材料,能够通过分子的自组装行为形成具备多重响应能力的一维螺旋超结构,即胆甾相液晶(Cholesteric Liquid Crystal, CLC)^[4]。在 CLC 中,由于手性分子螺旋扭曲力,液晶指向矢在空间内呈螺旋状扭曲并与螺旋轴方向正交。CLC 这种自组装螺旋周期结构宏观表现为选择性布拉格反射,即当 CLC 的螺距在百纳米量级时,呈现出特定的反射色。此外,通过电场^[5-7]、磁场^[8-9]、温度^[10-11]、或者光照^[12]等外场刺激可以动态调控 CLC 螺旋结构的性能,包括螺距、螺旋手性以及螺旋轴的方向。对胆甾相螺旋超结构的研究,尤其是对螺旋结构的调节和控制,可帮助理解超分子动态螺旋结构的相关特性并挖掘相关的科学技术应用。

外场刺激中电场调控由于处理速度快、能耗低、方便快捷等优点引起人们的普遍关注。然而,由于介电扭矩、螺旋力以及液晶弹性效应的相互竞争,难以通过电场驱动获得宽动态范围反射光谱的调制。当胆甾相螺旋结构施加平行于螺旋轴方向的电场时,螺旋结构的螺距几乎不发生

变化。借助特殊的电极形状^[13]或者光聚合技术^[6],可在有限范围对螺旋结构螺距进行电调谐,但其光谱调控范围窄,且需要较高的电场。由于普通胆甾相液晶反射带电调谐的局限性,将其用于电可调大面积智能窗户、镜子、激光器等目前尚不可行。近年来,在液晶二聚体化合物中发现一种可以自发形成扭曲和弯曲变形的特殊向列相——扭曲-弯曲向列相(Twist-bend Nematic, N_{tb})^[14],将其与普通手性液晶混合可形成特殊的胆甾相液晶,在低电场驱动下其分子指向矢与螺旋轴成一定角度 θ ,称为倾斜螺旋胆甾相(Heliconical Cholesterics)液晶^[15]。2015 年,Xiang 等人设计了一种宽温域倾斜螺旋胆甾相液晶体系,通过调制电场的强度,实现了从近紫外到近红外相对较宽的光谱动态调制^[16]。电响应的倾斜螺旋胆甾相液晶在可调节智能窗、激光器、光学滤波器等具有诸多潜在应用。2016 年,Xiang 等人通过使用该倾斜螺旋胆甾相液晶实现了电场可控的宽波段激光发射^[17]。2021 年,G.Nava 等人设计了一种将倾斜螺旋胆甾相液晶作为陷波和带通配置的电可调滤光器,可以在整个可见光范围内调整透射光的光谱特性^[18]。

相较于电场、磁场、温度、湿度等多种外界刺激,光刺激由于清洁无污染、可远程定点操控等特点而独具优势,因此光响应性胆甾相液晶受到研究者的广泛关注。2019 年,Yuan 等人设计的光响应倾斜螺旋结构,不仅可以实现在电场作用

下的宽光谱范围变化,而且还能实现倾斜螺旋结构手性的光控转换^[19]。此外,G.Nava 等人用光场效应补充 Meyer 理论证实倾斜螺旋结构会受到正交于螺旋轴光场的影响,光场在分子指向矢上形成的光学转矩实现了倾斜螺旋结构螺距的调控,但这种方式往往施加的光能量较高(光谱移动 130 nm 需要约 $3 \times 10^4 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$),且光谱调控范围较窄^[20]。因此实现 CLC 螺旋超结构的稳定、高效、多参量、宽谱域操控一直是科学和工程界亟待解决的瓶颈问题。

本文通过在倾斜螺旋胆甾相液晶中引入手性偶氮光敏材料,通过非偏振紫外光照射,获得一种光电联合可控的光敏倾斜螺旋胆甾相液晶,其反射带通过单独的电场调节或在固定电场下调制光场的能量,均可实现可见光到近红外较宽光谱范围调控。其中光场对倾斜螺旋结构螺距的调控主要原因在于光场的热效应以及光致异构效应。这项工作不仅丰富了光场调控螺旋结构的方式,而且多外场调控的胆甾相液晶进一步拓展了其在先进光学领域新颖的应用。

2 实 验

2.1 材料体系的设计

实验中使用的倾斜螺旋胆甾相液晶包含向列相液晶 E7(购买于 Slichem)、液晶二聚体 CB7CB(实验室合成)(图 1(a))以及手性偶氮光敏材料 DRAZO(实验室合成)。CB7CB 是由两个氰基联苯单元通过烷基链连接的对称液晶二聚体,具有区别于常规液晶的弯曲、扭曲弹性效应,即弯曲常数 K_3 远小于扭曲常数 K_2 ,用于在电场作用下构筑胆甾倾斜螺旋上层结构。DRAZO 偶氮手性光敏材料可在 365 nm 紫外光作用下发生顺-反异构的光化学反应,即热力学上处于稳定状态的反式结构在紫外光的照射下转变为顺式结构,而处于非稳定状态的顺式结构,可在自然状态下逐渐回复到反式结构,通过可见光的照射或者加热可以加快回复过程(图 1(b))。图 1(c)为 DRAZO 的紫外-可见吸收光谱, $3 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的紫外光作用下,大约 150 s 达到稳定状态。DRAZO 构型的改变会引起液晶分子排列的变化,从而改变体系的手性扭曲强度。

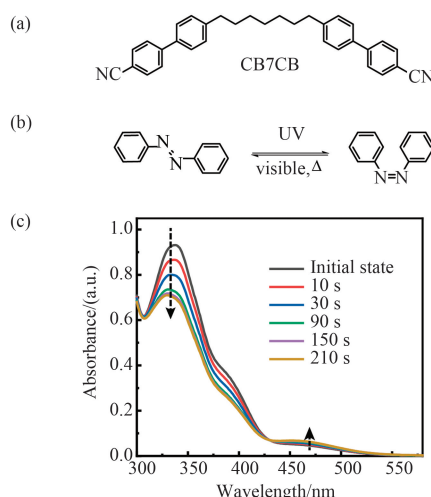


图 1 (a)CB7CB 的分子结构;(b)偶氮苯的光致异构示意图;(c) DRAZO 的紫外-可见吸收光谱。

Fig.1 (a) Chemical structure of CB7CB; (b) Photoisomerization of azobenzene material; (c) UV-vis absorption spectra of DRAZO.

图 2 分别展示了胆甾相平面螺旋结构和倾斜螺旋结构示意图,其中 P_0 和 P 分别为平面螺旋结构和倾斜螺旋结构的螺距。胆甾相平面螺旋结构液晶分子与螺旋轴正交,而倾斜螺旋结构由垂直电场诱导产生,其液晶分子与螺旋轴的夹角 θ 小于 90° ,该体系可通过调节电场强度实现对螺距、倾角以及对应反射带位置的调制^[7,21]。

根据 Meyer 理论可知,倾斜螺旋结构的反射光谱动态调谐范围和区间与材料体系的初始螺旋扭曲力相关,即与材料体系中手性材料的浓度和螺旋扭曲力相关。为了获得在可见光和

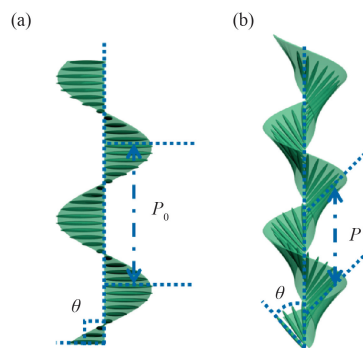


图 2 (a)平面螺旋结构和(b)倾斜螺旋结构的示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of (a) the helical structure and (b) the heliconical structure

近红外区域的宽光谱动态域调控的倾斜螺旋胆甾相液晶,我们首先确认手性材料浓度对光谱动态调谐范围的影响,探究光敏手性材料的最佳浓度。如表 1 所示,我们分别制备了手性材料质量分数为 2.0%、1.5% 和 1.0% 的样品进行测试。

表 1 倾斜螺旋胆甾相液晶体系组分表(%)

Tab.1 Material ratio of heliconical cholesteric liquid crystals(%)

	E7	CB7CB	DRAZO
S1	53.7	44.3	2.0
S2	54.0	44.5	1.5
S3	54.2	44.8	1.0

2.2 数据采集

实验中样品织构通过偏振光学显微镜(LVPOL 100, Nikon)在正交偏光的反射模式下观察。偏光显微织构通过安置在显微镜上的 CCD 相机(DS-U3, Nikon)采集,反射光谱通过集成于显微镜的精密光谱仪(UIS2048, Avantes)探测收集。为了考察样品在电场和光场下的性能,在实验中给样品施加一个交流方波电场(1 kHz)和功率可调的 365 nm 紫外 LED 光源探测其相关特性。将 DRAZO 溶于二氯甲烷中,浓度约为 2×10^{-5} mol/L,放置于比色皿中在 25 °C 下进行紫外-可见吸收光谱测试(Agilent Cary 60)。

3 结果与讨论

图 3(a)为含有 2.0%(质量分数)手性材料的倾斜螺旋胆甾相液晶的电调谐光谱。倾斜螺旋结构在电场驱动下形成。未施加电场时,样品呈现焦锥织构。随着电场强度增加,超过阈值电场 E_1 ($0.50 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)后,液晶分子在介电转矩和扭曲转矩的耦合和竞争效应下,从普通螺旋结构转变成倾斜螺旋结构,呈现出特定的反射光谱。在倾斜螺旋结构下,随着电场强度的增强,液晶分子逐渐沿螺旋轴方向倾斜,伴随着螺旋结构螺距的减小,对应反射波长蓝移。当然,倾斜螺旋结构的螺距不会被无限压缩,当强度超过阈值电场 E_2 时,螺旋结构发生解旋形成垂直排列。样品 S2、S3 在电场调制下观察到类似的光谱动态变化(图 3(b~c))。

实验结果表明,随着手性材料浓度的降低,样品 S1、S2、S3 的电调谐光谱范围依次为 222.8, 348.1, 585.0 nm, 光谱调节范围内的最大反射波长呈现红移的趋势,且体系对应的阈值电场 E_1 从 $0.50 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 降低至 $0.23 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。根据 Meyer 理论,阈值电场 E_1 与体系的初始螺距 P_0 有关^[19]。手性材料浓度越低,其初始螺距 P_0 越大,使得阈值电场 E_1 降低。在电场作用下螺旋结构的螺距与电场满足:

$$P = \frac{2\pi}{E} \sqrt{\frac{K_3}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}}, \quad (1)$$

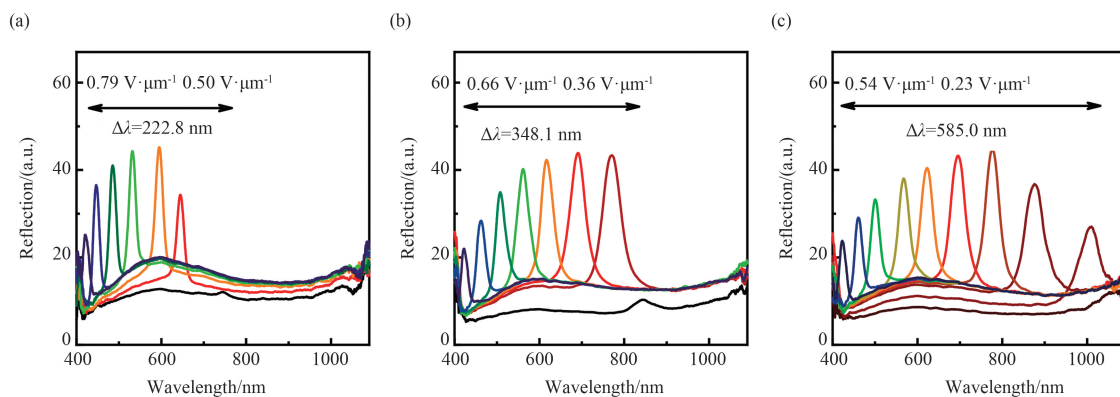


图 3 掺杂质量分数为(a)2.0%,(b)1.5%,(c)1.0%手性光敏材料的倾斜螺旋胆甾相液晶的电调光谱。

Fig.3 Spectra of heliconical cholesteric liquid crystals modulated by electric filed with different mass fraction of chiral photosensitive materials. (a) 2.0%; (b) 1.5%; (c) 1.0%.

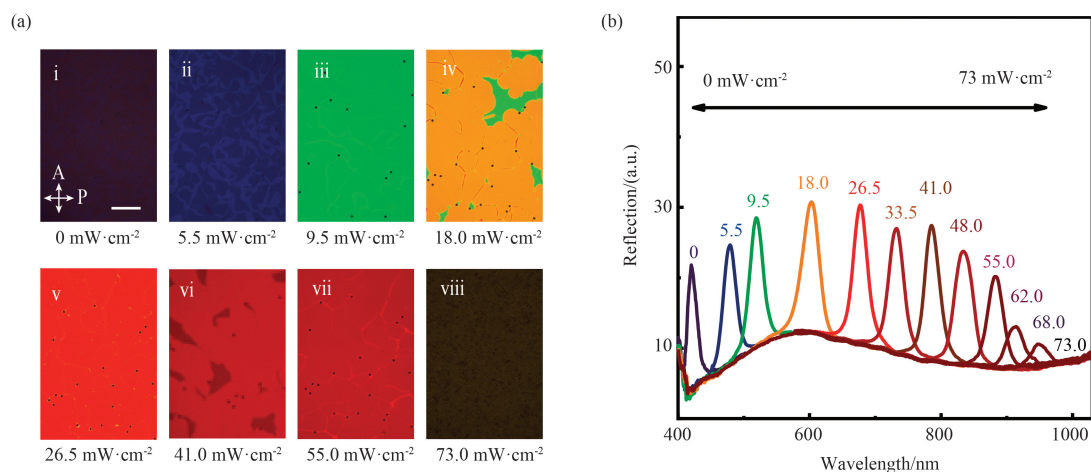


图 4 倾斜螺旋胆甾相液晶在电场和光场作用下的(a)织构和(b)光谱,标尺为 $50\ \mu\text{m}$ 。

Fig.4 (a) Texture and (b) spectra of heliconal cholesteric liquid crystals under electric field and optical field, scale bar: $50\ \mu\text{m}$.

其中, E 为施加的电场, P 为倾斜螺旋结构的螺距, K_3 为体系的弯曲弹性常数, $\Delta\epsilon$ 为平行于液晶分子长轴的介电常数与垂直于液晶分子长轴的介电常数之差, ϵ_0 为真空介电常数。显然,螺旋结构的螺距与电场强度一一对应,据式(1)可知,阈值电场 E_1 越小,对应倾斜螺旋结构的最大螺距越大,反射波长越大,即呈现红移趋势。因此,通过调节手性材料的浓度可以调节体系的阈值电场及其对应的最大螺距,从而获得宽光谱范围调谐的倾斜螺旋胆甾相液晶体系。当然,若手性材料浓度过低,将无法形成可见光范围内的倾斜螺旋结构。因此选择电调控光谱范围较宽的样品 S3 继续研究其光调控特性。

该体系由于光敏分子的存在具有光响应特性。在未施加电场的情况下,光照射样品没有产生任何的选择性反射,这表明单独的光场无法诱导倾斜螺旋结构。对样品施加 $0.54\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的电场,在偏光显微镜下样品呈现暗紫色(图 4(a-i)),对应反射波段在 $420\ \text{nm}$ 。进一步的实验表明,非偏振紫外光场功率的调制引起倾斜螺旋胆甾相液晶反射带发生红移,覆盖整个可见光以及近红外区域。同时当光功率稳定时,倾斜螺旋结构的螺距也处于稳定状态。保持电场不变,用 $5.5\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 UV 光照射样品,其反射色逐渐变为蓝色,且照射一段时间后样品颜色保持蓝色不变(图 4(a-ii))。继续增大光功率至 $9.5\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,观察到样品颜色由蓝色逐渐红移,最后稳

定于绿色。进一步增大光功率,样品反射色从绿色($9.5\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)、橙色($18.0\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)、红色($26.5\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)到深红色($55.0\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)范围内连续变化(图 4(a-iii-vii)),对应光谱发生红移(图 4(b))。当光功率超过某一阈值($68\ \text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)时,样品织构变为焦锥织构(图 4(a-viii))。通过在更低的电场强度下调制光场的能量,观察到了类似的光谱动态变化,如图 5 所示,分别显示了在 $0.52\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $0.47\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $0.43\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的电场强度下,样品中心波长随光

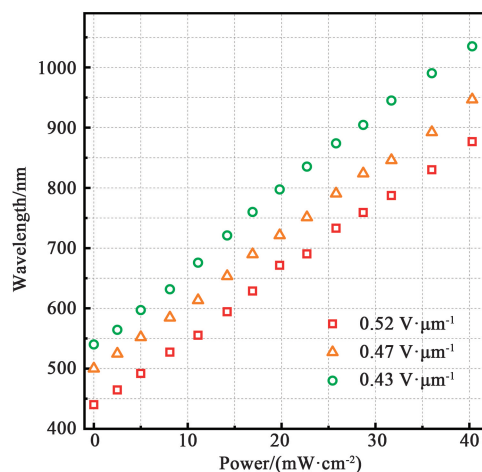


图 5 不同电场下的反射带中心波长随光功率的变化

Fig. 5 Evolution of optical intensity-dependent central wavelength of the reflection band under various electric field intensities

功率的变化。实验结果表明,可以通过调制电场的强度控制倾斜螺旋胆甾相液晶反射带光场调制区间。这不同于普通胆甾相液晶的光场调制,其初始螺距需通过调节手性材料的比例实现,倾斜螺旋结构的电场依赖性使得该体系在光电联合调控下实现任意波段的反射。

光场对于倾斜螺旋胆甾相液晶反射带的调控主要改变螺旋结构的螺距,对于倾斜螺旋结构螺距的光功率依赖性,由于实验中使用的是非偏振紫外光,因此不考虑光场产生的非线性效应影响,主要考虑两个可能的因素,即光的热效应和光致异构效应。在样品上施加 $0.54 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的电场,且将光功率固定为 $68 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,持续照射一段时间后样品温度升高约 2.9°C (图 6(a)),并伴随着反射带移动了 530 nm (图 6(b)),一般来说,温度的升高会使倾斜螺旋结构的螺距增大,因此仅通过热台控制,将样品温度升高 2.9°C ,可以发现样品反射光谱发生红移(185 nm) (图 6(c)),说明光场产生的热效应使得螺旋结构的螺距增大,对应反射带发生红移。

通过上述现象分析,对比光场与温度引起的反射带移动,可以发现纯温度变化导致的光谱变化范围约为光场变化的 $1/3$,表明光场产生的热

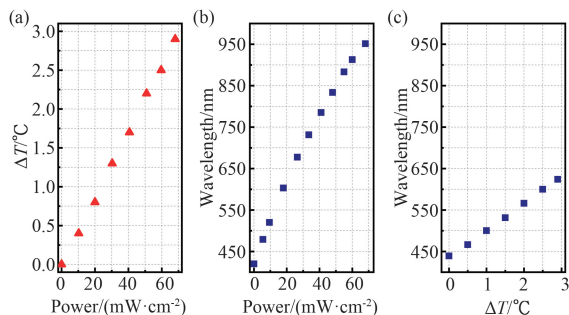


图 6 (a) 光功率从 0 增加到 $68 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时样品的温度变化; (b) 在 $0.54 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的电场强度下反射带中心波长随光功率的变化; (c) 固定电场强度下温度变化 2.9°C 中心波长的变化。

Fig. 6 (a) Sample temperature ΔT under the increasing optical power from 0 to $68 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) Evolution of the central wavelength with optical power at the fixed electric field strength; (c) Evolution of the central wavelength with temperature variation (2.9°C) controlled by a hot stage at fixed electric field strength.

效应并不是光调控螺旋结构螺距的唯一因素。为了进一步研究光场调控螺旋结构螺距的原因,通过光照下体系的螺旋扭曲力常数 (Helical Twisting Power, HTP)^[22] 变化来说明光致异构化对倾斜螺旋结构的作用。体系中光敏分子的偶氮基团在紫外光照下发生顺反异构,即偶氮基团在紫外光照下从反式结构转变成顺式结构,构型的改变引起螺旋结构螺距的变化,但光场产生的热效应以及偶氮基团本身的热回复效应使得不稳定的顺式结构转化成反式结构,上述相反过程共同决定光致异构化对螺旋结构的影响。图 7 分别测试了在不同光功率下体系的 HTP 变化。研究表明,随着光功率的增加,体系的 HTP 从 $37.8 \mu\text{m}^{-1}$ 逐渐减小至 $16.3 \mu\text{m}^{-1}$,对应螺旋结构的螺距增大,实验结果表明光致异构化使得螺旋结构的螺距增大。

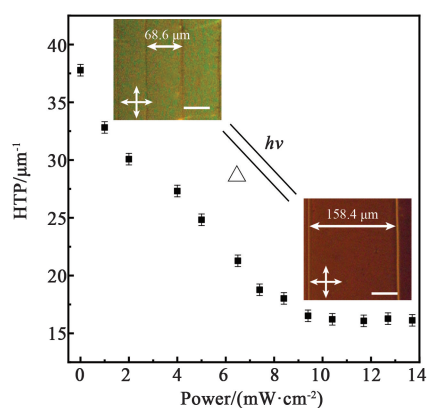


图 7 不同功率 UV 光照下倾斜螺旋胆甾相液晶的 HTP, 标尺为 $50 \mu\text{m}$ 。

Fig. 7 HTP of the heliconical cholesteric liquid crystal upon irradiation with UV light by different power. Scale bar: $50 \mu\text{m}$.

因此在特定光功率下,随着照射时间的增加,所产生的光能量一部分用于产生热量,使体系的温度升高,倾斜螺旋结构的螺距增大,对应反射带红移;一部分使得偶氮分子从反式结构转化为顺式结构,进一步增大螺距。此外,由于样品与环境的温度差异导致热量耗散的存在,以及光致异构的热回复效应,光场照射一段时间后其光能量一方面补偿其中的热耗散,另一方面用以维持反式结构与顺式结构之间的动态平衡,从而使得样品形成稳定的螺距。当光功率增大时,光能量增大,体系中的动态平衡状态

被破坏,样品温度升高,反式结构进一步转化成顺式结构,使得螺旋结构的螺距增大,一段时间后体系将达到新的动态平衡。因此光敏倾斜螺旋胆甾相液晶在电场和光场的协同作用下实现了可见光到近红外波段较宽光谱范围的动态调控。

4 结 论

本文研究了基于倾斜螺旋胆甾相液晶宽光谱动态域的光电联合调控。首先结合 Meyer 理论对体系的光敏手性材料浓度进行了优化,获得了在电场作用下反射带从可见光到近红外波段约 580 nm 范围内调控的光敏倾斜螺旋胆甾相液晶。基于上述液晶体系,在小于 $1 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 低电场下

调节光功率实现了覆盖整个可见光以及近红外区域约 530 nm 的反射带调控。当光功率稳定时,倾斜螺旋结构的螺距也处于稳定。实验证明,光场对于倾斜螺旋结构螺距的调制主要在于其产生的热效应以及光致异构效应。倾斜螺旋结构螺距具有温度依赖性,光场产生的热效应使得螺旋结构的螺距增大,反射带红移,而体系中的光敏分子在紫外光照下发生顺反异构使得倾斜螺旋结构的螺距进一步增大,从而获得光电调控的宽光谱动态域。此外,结合倾斜螺旋的电场依赖性,光响应的倾斜螺旋胆甾相液晶体系可实现任意波段的反射。这项工作进一步丰富和拓展了胆甾相液晶应用的范围,为在先进光子学等领域的应用奠定了基础,同时为倾斜螺旋结构调制方式的多元化提供了新思路。

参 考 文 献:

- [1] TALUKDER J R, LEE Y H, WU S T. Photo-responsive dye-doped liquid crystals for smart windows [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4480-4487.
- [2] ZOLA R S, NEMATİ H, YANG Y C, *et al.* Characteristics of dual mode reflective cholesteric display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2013, 21(1): 22-28.
- [3] LU S Y, CHIEN L C. A polymer-stabilized single-layer color cholesteric liquid crystal display with anisotropic reflection [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(13): 131119.
- [4] 张伶俐.光调谐的胆甾相液晶应用的发展[J].液晶与显示,2016,31(11):1023-1032.
ZHANG L L. Development of photo-tunable cholesteric liquid crystals applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(11): 1023-1032. (in Chinese)
- [5] BISOYI H K, BUNNING T J, LI Q. Stimuli-driven control of the helical axis of self-organized soft helical superstructures [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(25): 1706512.
- [6] MCCONNEY M E, TONDI GLIA V P, NATARAJAN L V, *et al.* Electrically induced color changes in polymer-stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(6): 417-421.
- [7] MEYER R B. Effects of electric and magnetic fields on the structure of cholesteric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1968, 12(9): 281-282.
- [8] DE MATTEIS G, MARTINA L, NAYA C, *et al.* Helicoids in chiral liquid crystals under external fields [J]. *Physical Review E*, 2019, 100(5): 052703.
- [9] MAKAROV D V, NOVIKOV A A, ZAKHLEVNYKH A N, *et al.* Cholesteric-nematic transition induced by a rotating magnetic field [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 263: 375-381.
- [10] KHANDELWAL H, VAN HEESWIJK E P A, SCHENNING A P H J, *et al.* Paintable temperature-responsive cholesteric liquid crystal reflectors encapsulated on a single flexible polymer substrate [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(24): 7395-7398.
- [11] ZHANG P, KRAGT A J J, SCHENNING A P H J, *et al.* An easily coatable temperature responsive cholesteric liquid crystal oligomer for making structural colour patterns [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(27): 7184-7187.
- [12] BISOYI H K, URBAS A M, LI Q. Soft materials driven by photothermal effect and their applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(15): 180058.

- [13] XIANYU H Q, FARIS S, CRAWFORD G P. In-plane switching of cholesteric liquid crystals for visible and near-infrared applications [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 5006-5015.
- [14] MEYER C, LUCKHURST G R, DOZOV I. The temperature dependence of the heliconical tilt angle in the twist-bend nematic phase of the odd dimer CB7CB [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(2): 318-328.
- [15] FENG C, FENG J, SAHA R, *et al.* Manipulation of the nanoscale heliconical structure of a twist-bend nematic material with polarized light [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3): 032004.
- [16] XIANG J, LI Y N, LI Q, *et al.* Electrically tunable selective reflection of light from ultraviolet to visible and infrared by heliconical cholesterics [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(19): 3014-3018.
- [17] XIANG J, VARANYTSIA A, MINKOWSKI F, *et al.* Electrically tunable laser based on oblique heliconical cholesteric liquid crystal [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(46): 12925-12928.
- [18] NAVA G, CICIULLA F, SIMONI F, *et al.* Heliconical cholesteric liquid crystals as electrically tunable optical filters in notch and bandpass configurations [J]. *Liquid Crystals*, 2021, doi: 10.1080/02678292.2021.1884911.
- [19] YUAN C L, HUANG W B, ZHENG Z G, *et al.* Stimulated transformation of soft helix among helicoidal, heliconical, and their inverse helices [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax9501.
- [20] NAVA G, CICIULLA F, IADLOVSKA O S, *et al.* Pitch tuning induced by optical torque in heliconical cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review Research*, 2019, 1(3): 033215.
- [21] XIANG J, SHIYANOVSKII S V, IMRIE C, *et al.* Electrooptic response of chiral nematic liquid crystals with oblique helicoidal director [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(21): 217801.
- [22] WANG Y, LI Q. Light-driven chiral molecular switches or motors in liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(15): 1926-1945.

作者简介:



贾淑珍(1993—),女,山西朔州人,硕士研究生,2018年于华东理工大学获得学士学位,主要从事基于光敏材料的胆甾相液晶方面的研究。E-mail: 15216783695@163.com



郑致刚(1982—),男,浙江宁波人,博士,教授,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶态功能材料与微纳光学器件研究。E-mail: zgzheng@ecust.edu.cn