

4,4'-双(9-咔唑基)联苯掺杂的液晶聚合物网络薄膜的制备及圆偏振室温磷光性质

关佩佩, 陈 静, 徐陈清亮, 李红坤*

(苏州大学材料与化学化工学部 苏州市新型半导体光电材料与器件重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘要: 圆偏振室温磷光(CP-RTP)材料兼具圆偏振发光与室温磷光的独特优势,在光学防伪、生物成像、光电器件等领域展现出广阔的应用潜力,近年来受到了越来越多研究者的关注。然而,如何制备具有高发光不对称因子的CP-RTP材料,仍是当前该领域面临的关键挑战。本文将不同含量的4,4'-双(9-咔唑基)联苯掺杂到反应性的液晶混合物中,通过光聚合反应制备了一系列的液晶聚合物网络薄膜。该聚合物薄膜具有CP-RTP性质,其发光不对称因子最高,发光寿命可达839 ms。此外,所制备的薄膜图案在反射、荧光及磷光三种模式下呈现出不同的颜色,表明其在装饰及光学防伪等领域具有良好的应用潜力。

关键词: 圆偏振发光; 室温磷光; 液晶聚合物网络; 薄膜材料

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10. 37188/CJL. 20260192

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260192

Fabrication and Circularly Polarized Room-Temperature Phosphorescence Properties of 4,4'-bis(9-carbazolyl)biphenyl-Doped Liquid Crystalline Polymer Network Films

GUAN Peipei, CHEN Jing, XU Chenqingliang, LI Hongkun*

(Suzhou Key Laboratory of Novel Semiconductor Optoelectronics Materials and Devices, College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Soochow University, Suzhou 215123, China)

* Corresponding Author, E-mail: hkli@suda.edu.cn

Abstract: Circularly polarized room-temperature phosphorescence (CP-RTP) materials combining the advantages of circularly polarized luminescence and room-temperature phosphorescence, have garnered increasing research interest due to their promising applications in the fields such as optical anti-counterfeiting, biological imaging, and optoelectronic devices. Nevertheless, achieving CP-RTP materials with high luminescence dissymmetry factors remains a challenge. In this work, a series of liquid crystalline polymer network (LCPN) films have been fabricated via photo-polymerization of reactive liquid crystalline mixtures doped with varying amounts of 4,4'-bis(9-carbazolyl)biphenyl. The resultant polymeric films exhibit intrinsic CP-RTP properties, with the maximum luminescence dissymmetry factor reaching -1.08 and the longest luminescence lifetime up to 839 ms. Moreover, the fabricated film pattern displays different colors under three modes: reflection, fluorescence and phosphorescence, demonstrating great application potential in decoration, optical anti-counterfeiting and other fields.

Keywords: circularly polarized luminescence; room-temperature phosphorescence; liquid crystalline polymer network; thin-film materials

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(21875152, 22071166)

Supported by National Natural Science Foundation of China (21875152, 22071166)

1 引 言

圆偏振发光 (Circularly polarized luminescence, CPL) 是一种手性光学现象, 其本质是手性发光体在激发态下发射的左旋与右旋圆偏振光在强度上存在差异。近年来, CPL 活性材料因其在光电器件、信息加密、光学防伪、手性传感与成像等多个领域的广阔应用前景而受到广泛关注^[1-5]。另外, 纯有机室温磷光 (Room-temperature phosphorescence, RTP) 材料具备发射寿命长、斯托克斯位移大、结构可设计性强、应用场景广泛等诸多优势, 已成为材料化学与光电功能领域的重点研究方向之一^[6-8]。基于上述研究基础, 圆偏振室温磷光 (CP-RTP) 材料融合了圆偏振发光的手性光学特性与室温磷光的长寿命发光优势, 展现出更为突出的潜在应用价值^[9-10]。

众所周知, CPL 的偏振特性可通过发光不对称因子 (g_{lum}) 进行定量描述, 其定义为 $g_{lum} = 2(I_L - I_R)/(I_L + I_R)$, 其中 I_L 和 I_R 分别代表左旋和右旋圆偏振光的强度。在实际应用中, 磷光量子产率 (Φ_p) 和发光寿命 (τ) 等参数, 对于评估 CP-RTP 材料的性能也非常重要。经过研究人员多年的不懈努力, 目前已成功开发出多种具有 CP-RTP 特性的有机体系, 包括小分子^[11-13]、聚合物^[14-16]、超分子组装体^[17-19]以及液晶材料^[20-25]。然而, 构建兼具高 g_{lum} 值、高 Φ_p 与长 τ 且加工性能好的 CP-RTP 材料依然是一个挑战。

近年来, 我们课题组发展了一种简便的策略, 用于制备具有长寿命 CPL 特性的液晶聚合物网络 (LCPN) 薄膜材料^[26-28]。例如, 将不同量的 N,N,N', N'-四苯基联苯胺 (TPB) 掺杂到反应性的胆甾相液晶 (cholesteric liquid crystal, CLC) 混合物中, 通过原位光聚合反应制备了一系列的 LCPN 薄膜^[26]。这些薄膜展现出增强的 RTP 和 CP-RTP 性能, 其 g_{lum} 值可达 -0.90, Φ_p 最高可达 14.8%, τ 可达 607 ms。这些结果促使我们进一步制备高效的 CP-RTP 活性聚合物薄膜材料, 并探索它们的应用。

在本工作中, 通过将商业化的 4,4'-双(9-咔唑基)联苯 (CBP) 掺入到反应性的 CLC 混合物, 利用光聚合反应制备了四种 LCPN 薄膜。所制备的薄膜显示出黄色结构色、RTP 和 CP-RTP 特性, 其 g_{lum} 值最高达 -1.08, Φ_p 达 7.9%, 发光寿命最长可达 839 ms。这些薄膜可加工成图案, 并在反射、荧光和磷光模式下呈现出不同的颜色, 有望应用于

光学防伪领域。

2 实 验

2.1 试剂和仪器

2-甲基-1,4-亚苯基双(4-((6-丙烯酰氧基)己基)-氧基)苯甲酸酯 (C6M, 分析纯)、4-甲氧基苯基-4-((6-丙烯酰氧基)己基)氧基)苯甲酸酯 (RM105, 分析纯)、(3R,3aR,6S,6aR)-六氢呋喃[3,2-b]呋喃-3,6-二基双(4-((4-((6-丙烯酰氧基)己基)-氧基)苯甲酰)氧基)苯甲酸酯 (CA-A, 分析纯) 购于苏州苏凯路化学科技有限公司; 苯偶酰二甲缩酮 (BDK, 分析纯) 购自上海凌峰化学试剂有限公司; 4,4'-双(9-咔唑基)联苯 (CBP, 优级纯) 购自上海泰坦科技股份有限公司; 二氯甲烷 (DCM) 购自江苏强盛化学试剂有限公司 (苏州)。

场发射扫描电子显微镜 (SEM) 图像使用日本日立公司 Hitachi Regulus8230 在 3.0 kV 加速电压下拍摄。偏光显微镜 (POM) 图像使用配备 Linkam LTS420 热台的徕卡显微系统 CMS GmbH 拍摄。荧光光谱、磷光光谱、发光寿命和量子产率由英国爱丁堡仪器公司的 FLS 980 光谱仪记录。CPL 光谱使用日本 JASCO 公司的 CPL-300 光谱仪测量。CPL 测量条件如下: 激发波长为 320 nm, 扫描速度为 500 nm/min, 扫描次数为 1 次, 激发和发射狭缝宽度均为 3000 μm , 光电倍增管 (PMT) 时间常数为 1 秒。为消除薄膜线偏振发光的影响, 使用样品旋转台使样品在 360° 范围内旋转, 然后在 4 个方向 (间隔 90°) 收集 CPL 光谱, 并对 4 个方向得到的光谱进行代数平均。圆二色 (CD) 光谱由日本 JASCO-1500 光谱仪记录。为消除线二色性, 样品通过样品旋转台旋转 360°, 并在四个方向 (间隔 90°) 采集 CD 光谱后进行代数平均。

2.2 LCPN 薄膜的制备

2.2.1 掺杂 CBP 的 LCPN 薄膜的制备

该反应性液晶混合物中各组分的结构式如图 1 所示, 其中各组分的重量比参见表 1。将 C6M、RM105、BDK、CA-A 和 CBP 混合均匀后, 在 2 毫升的 DCM 中经超声溶解。将适量的 DCM 溶液滴在石英基底表面。通过夹层结构将反应溶液的厚度控制在 11 μm 。在 83 °C 下蒸发溶剂几分钟, 然后冷却至室温, 样品用 365 nm 的氙灯 (以 15 W 的功率输出) 照射 10 s。随后, 用刀片将薄膜从石英基底上剥离, 从而获得自支撑的 LCPN 薄膜, 分别命名为 PN-CBP-(0.10、0.50、1.00 和 2.00 wt%)。

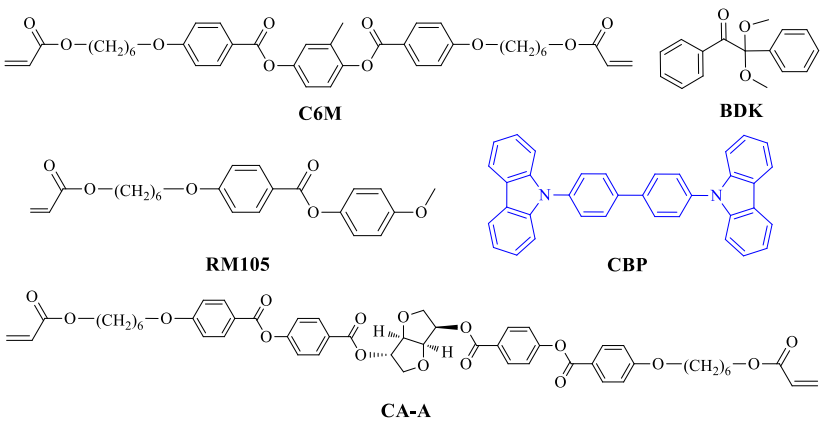


图1 反应性液晶混合物中各组分的结构式
Fig. 1 Molecular structures of the compounds in the reactive liquid crystal mixture

表1 液晶混合物中各化合物的质量比

Table 1 Components of reactive liquid crystal mixtures

命名	C6M/wt%	RM105/wt%	BDK/wt%	CA-A/wt%	CBP/wt%
PN-CBP-0.1%	47.35	47.35	1.00	4.20	0.10
PN-CBP-0.5%	47.15	47.15	1.00	4.20	0.50
PN-CBP-1.0%	46.90	46.90	1.00	4.20	1.00
PN-CBP-2.0%	46.40	46.40	1.00	4.20	2.00

2.2.2 防伪图案的制备

将制备好的 PN-CBP-1.0% 薄膜裁剪为合适的尺寸,填充至预先设计的“8888”数字形模板中,形成“good”字样的发光单元。其余背景区域则填入未掺杂发光分子 CBP 的液晶聚合物网络薄膜。

3 结果与讨论

3.1 液晶织构

用 POM 研究了含有 C6M、RM105、CA-A、BDK

和 CBP 的混合物的液晶相行为。观察到清亮点为 83 °C,在 25~75 °C 的温度范围内可见明显的油丝织构(图 2),证实了 CLC 相的形成。另外,也对所制备的 LCPN 薄膜进行了 POM 观察。即使在高达 200 °C 的温度下,PN-CBP-1.0% 薄膜也呈现出明显的油丝织构,这表明 PN-CBP 薄膜的 CLC 结构被成功固定下来。

3.2 微观形貌

为了研究 LCPN 薄膜的微观结构,对薄膜的断面进行了 SEM 测试,如图 3 所示,可以看出薄膜

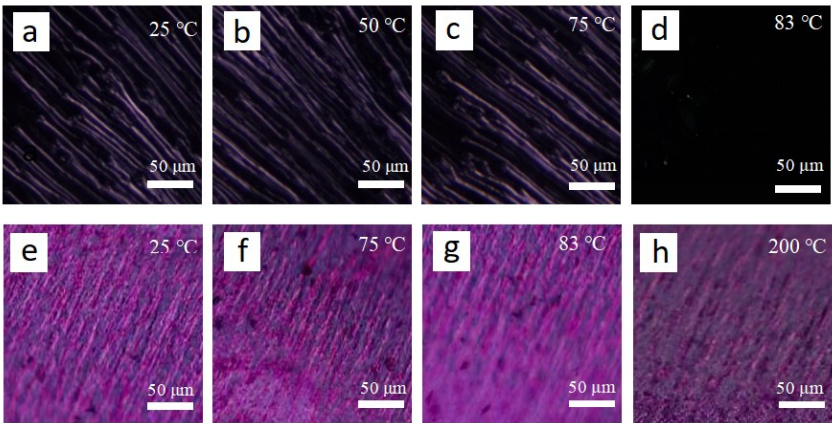


图2 (a-d)C6M/RM105/BDK/CA-A/CBP(质量比 46.90/46.90/1.00/4.20/1.00)混合物在不同温度下的 POM 图;(e-h)为其对应的 PN-CBP-1.0% 薄膜在不同温度下的 POM 图
Fig. 2 POM images of (a-d) reactive mixture of C6M/RM 105/BDK/CA-A/CBP (46.90/46.90/1.00/4.20/1.00, w/w/w/w/w) and (e-h) its corresponding film of PN-CBP-1.0%

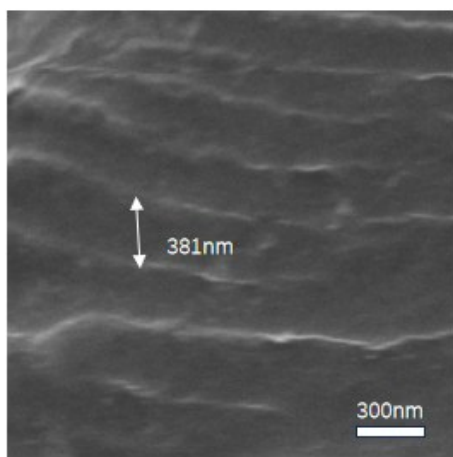


图3 PN-CBP薄膜横截面的SEM图像

Fig. 3 SEM image of the cross-section of PN-CBP film

的横截面有清晰的层状结构,表明薄膜是有取向的,并且层状结构通过光聚合反应被固定下来。

通过计算得知,该螺旋结构的螺距为 381 nm。

3.3 光学活性

所制备的 PN-CBP 薄膜均呈现黄绿色(图4),其截面的 SEM 图像表明所观察到的颜色来自于薄膜周期性微纳结构对光的布拉格选择性反射,即为结构色。在紫外灯照射下,薄膜发出蓝色荧光;移除紫外灯后,该薄膜发出黄绿色的余辉,持续约 10 s。随后测试了该薄膜的发光光谱,如图 5a 所示,荧光光谱在 425 nm 处出现最大值,而磷光光谱在 480 nm 和 513 nm 处显示双发射带,可归属为分子局域三线态(T_1 , 咔唑-联苯共轭骨架)的 $0-0$ 跃迁与振动伴峰^[29]。PN-CBP 薄膜的磷光寿命范围为 822 ms 到 839 ms (图 5b)。另外,用积分球测量的 PN-CBP 薄膜的发光量子效率(Φ_L)在 8.6%-24.9% 之间, Φ_P 为 3.0%-7.9% (图 6)。

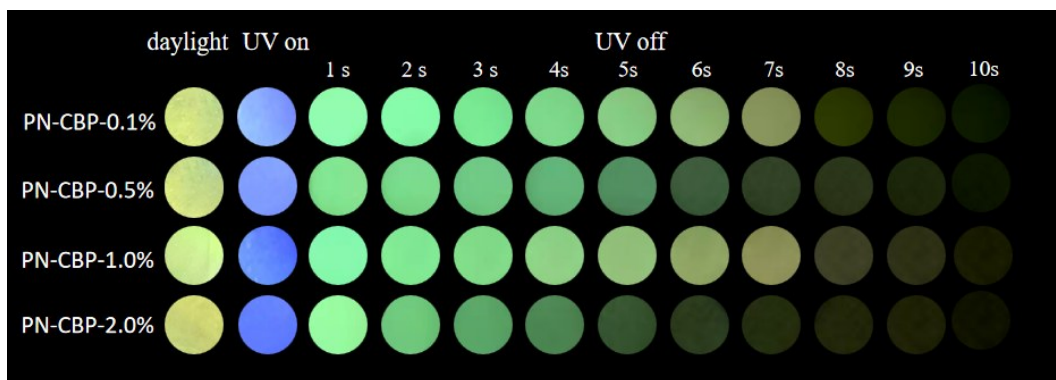


图4 PN-CBP薄膜在自然光下、365 nm 紫外灯照射下以及去除紫外灯后不同时间的照片

Fig. 4 Photographs of the PN-CBP films under daylight and UV light, and after removing UV light for different time

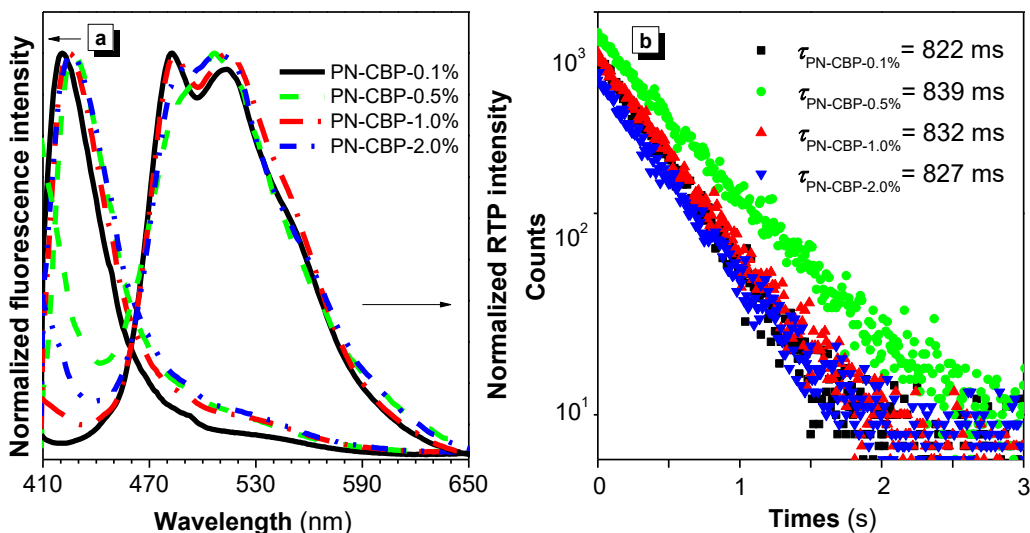


图5 (a)PN-CBP薄膜的归一化荧光光谱和磷光光谱,激发波长 320 nm;(b)513 nm 处的时间分辨磷光衰减曲线

Fig. 5 (a) Normalized fluorescence and RTP spectra of the PN-CBP films, excitation wavelength: 320 nm. (b) Time-resolved phosphorescence decay curves at 513 nm of the PN-CBP films

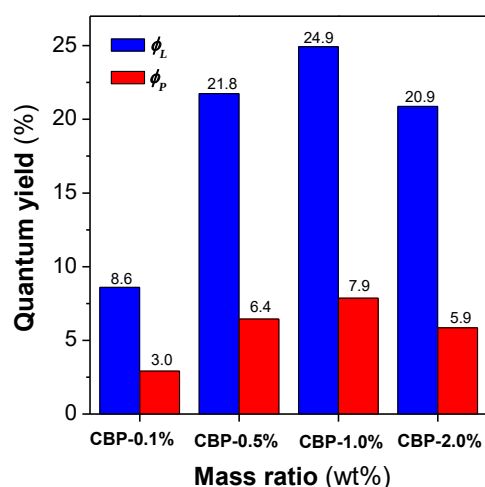


图6 不同CBP质量分数的PN-CBP薄膜的发光量子效率和磷光量子效率值

Fig. 6 Luminescence and RTP quantum yields of the PN-CBP films

PN-CBP薄膜的RTP活性主要来源于CBP单元。值得注意的是,CBP的THF溶液不具有RTP性质,但其固体粉末显示了明显的RTP行为(图7),且其 Φ_p 值为1.9%、发光寿命为60 ms,证实了其固有的RTP活性。这一结果表明CBP的RTP性质归因于其咔唑和联苯结构单元,两类基团可有效促进体系发生系间窜越过程。CBP分子结构中的咔唑基团表现出好的空穴传输能力,而联苯部分提供了一个刚性的分子骨架,有助于稳定三重态激子,从而表现出RTP的性能。光聚合反应过程中会消耗氧,也有助于稳定三重态激子。此外,这些LCPN薄膜的交联聚合物结构提供了一个刚性和受限的环境,这不仅限制了咔唑-联苯单

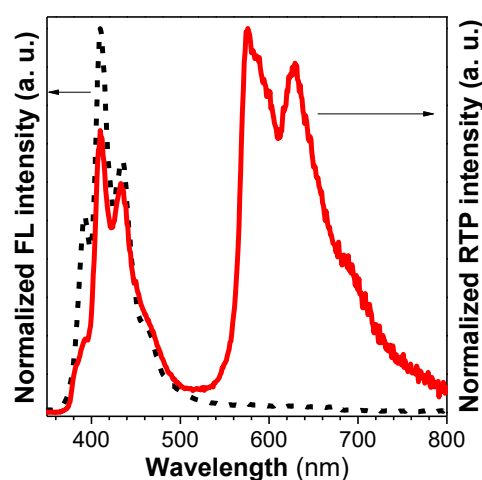


图7 CBP粉末归一化的荧光和室温磷光光谱,激发波长320 nm

Fig. 7 Normalized fluorescence and RTP spectra of CBP powder, excitation wavelength: 320 nm

元的运动,减少了非辐射跃迁,而且防止了三重态激子通过与氧的相互作用而猝灭^[26-28]。这些协同效应提高了CBP掺杂的LCPN薄膜的 Φ_p 和 τ 值。

接下来,通过CD光谱研究了不同CBP含量的PN-CBP薄膜的光学活性。如图8a所示,在575 - 625 nm处观察到负的CD信号。这些CD信号来源于结构诱导的光学活性,表明在薄膜中手性掺杂剂CA-A诱导形成了右手螺旋超分子结构。接下来在室温下研究了PN-CBP薄膜CPL光谱。这些薄膜在320 nm激发下的CPL光谱显示,负信号集中在410 - 513 nm(图8b),分别对应于荧光和磷光发射。这些结果证实了右旋CPL蓝光和绿光的发射。测量的 g_{lum} 绝对值范围在400 nm处为

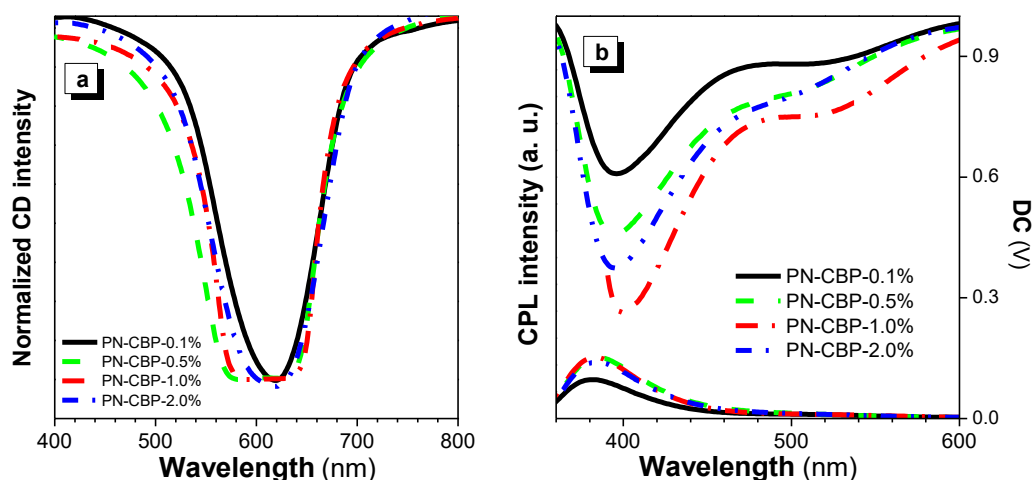


图8 PN-CBP薄膜的(a)归一化CD光谱(b)CPL光谱,激发波长320 nm

Fig. 8 Normalized CD (a) and CPL (b) spectra of PN-CBP films, excitation wavelength: 320 nm

0.22 - 0.28 (图 9a), 513 nm 处为 0.89 - 1.08 (图 9b), 高于我们之前报道的 TPB 掺杂的 LCPN 薄膜的 CP RTP 的 g_{lum} 绝对值 (0.81 - 0.90)^[26]。值得注

意的是, PN-CBP-0.1% 薄膜中的最大 g_{lum} 值为 -1.08。这些高的 g_{lum} 值主要归因于薄膜螺旋超分子结构所形成的长程取向有序排布^[30-32]。

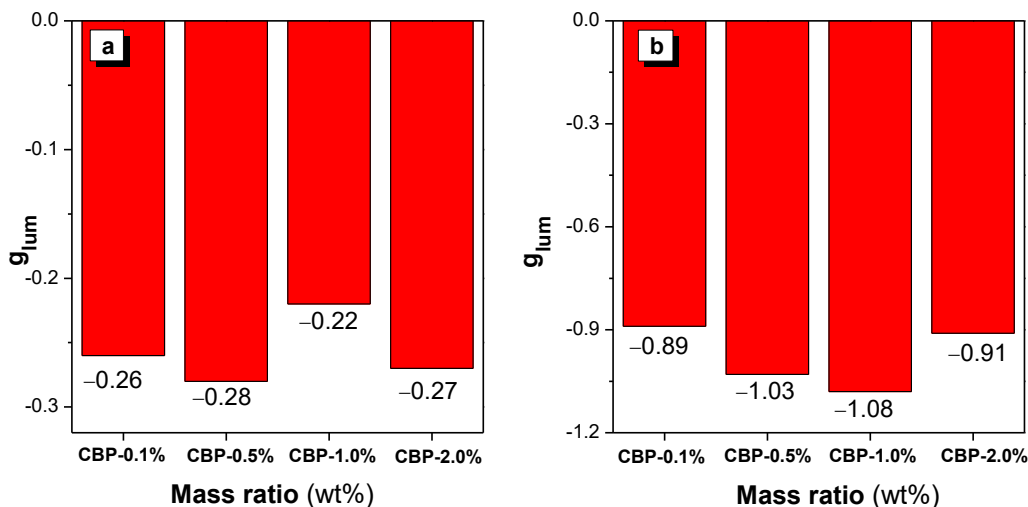


图 9 PN-CBP 薄膜在 (a)400 nm 处 (b)513 nm 处的 g_{lum} 值

Fig. 9 g_{lum} values at 400 nm (a) and 513 nm (b) of the PN-CBP TPEB films

3.4 应用探索

将所得到的 LCPN 薄膜裁成合适的尺寸制备成图案。如图 10 所示,在日光和通过左旋圆偏振片 (LH-CP) 下观察,黄绿色数字“8888”肉眼清晰可见,而通过右旋圆偏振片 (RH-CP) 观察则数字模糊。在 365 nm 紫外光照射下,蓝色字母“good”在直接观察和通过 LH-CP 时都保持可见,但在通过 RH-CP 观看时几乎消失。移除紫外灯后,直接观察或通过 LH-CP 观察到的绿色余辉“good”持续

约 6 s,但通过 RH-CP 观察则图案模糊。众所周知,当通过圆偏振片观察物体时,与偏振片具有相同旋向的光被阻挡,而具有相反旋向的光则透过。在“8888”图案中的字母“good”是用右旋螺旋结构的薄膜制作的。这些薄膜选择性地反射右旋圆偏振光,并发射右旋 CPL。因此,在无偏振片和通过 LH-CP 观察到清晰的图案,而通过 RH-CP 观察时则图案模糊。这些结果表明,PN-CBP 薄膜有望应用于制备装饰图案及光学防伪领域。

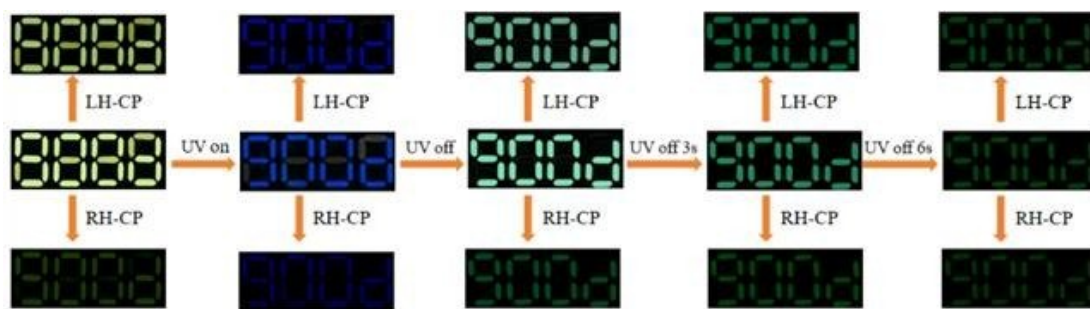


图 10 在日光下、紫外灯照射下以及移除紫外灯后的通过 LH-CP 和 RH-CP 观察的图案

Fig. 10 Photographs of ‘8888’ patterns viewed directly, through LH-CP and RH-CP under daylight and UV light, and after removal of the UV light

4 结 论

本工作通过在反应性的胆甾相液晶混合物中掺杂不同量的 CBP,经光聚合反应制备了四种 LCPN 薄膜。所获得的薄膜呈现黄绿色的结构色,并且具有增强的 RTP 性能。此外,该薄膜还

表现出绿色的 CP-RTP 性能,其 g_{lum} 值最高达 -1.08,寿命可达 839 ms、余辉可达 10 s, Φ_p 最高可达 7.9%。该薄膜增强的 RTP 活性归因于聚合物网络结构的刚性和氧气阻隔能力,以及紫外光引发聚合过程中的氧气消耗;其高的 g_{lum} 值主要

来源于螺旋超分子构筑带来的长程取向有序特征。所制备的薄膜在发射、荧光和磷光模式下具有不同的颜色,有望应用于装饰图案及光学防伪领域中。

参 考 文 献:

- [1] LI Z Q, ZHANG D C, WANG H X, *et al.* Circularly polarized luminescence: materials, photophysics, devices, and applications [J]. *Sci. China Chem.*, 2026, 69(5): 2127-2192.
- [2] HU Y, HUANG Z Z, WILLNER I, *et al.* Multicolor circularly polarized luminescence of a single-component system revealing multiple information encryption [J]. *CCS Chem.*, 2024, 6(2): 518-527.
- [3] STACHELEK P, MACKENZIE L, PARKER D, *et al.* Circularly polarised luminescence laser scanning confocal microscopy to study live cell chiral molecular interactions [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 553.
- [4] 连宁晓, 黄国斌, 田凯丽等. 手性茚酰亚胺衍生物的超分子结构与圆偏振发光性质[J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 1075-1081.
LIAN N, HUANG G, TIAN K, *et al.* Supramolecular structure and circularly polarized luminescence property of chiral perylene diimide derivatives [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 1075-1081. (in Chinese)
- [5] 张友明, 邓益佳, 王练习等. 基于四齿铂配位构型的圆偏振发光材料构筑及其深红光/近红外电致发光研究[J]. *发光学报*, 2025, 46(11): 2036-2045.
ZHANG Y, DENG Y, WANG L, *et al.* Tetradentate Pt(II)-based circularly polarized luminescent materials for deep red/near-infrared electroluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(11): 2036-2045. (in Chinese)
- [6] ZHENG H, ZHANG Z Y, CAI S Z, *et al.* Enhancing purely organic room temperature phosphorescence via supramolecular self-assembly [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(18): 2311922.
- [7] 郑贤, 杨朝龙. 纯有机室温磷光材料研究现状与策略[J]. *发光学报*, 2022, 43(7): 1027-1039.
ZHENG X, YANG C L. Research status and strategy of pure organic room temperature phosphorescent materials [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1027-1039. (in Chinese)
- [8] ZHAO W J, HE Z K, TANG B Z. Room-temperature phosphorescence from organic aggregates [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2020, 5(12): 869-885.
- [9] ZOU X, GAN N, GAO Y, *et al.* Organic circularly polarized room-temperature phosphorescence: strategies, applications and challenges [J]. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2025, 64(3): e202417906.
- [10] 曹恒昱, 高之胜, 闫馨等. 圆偏振有机室温磷光材料[J]. *化学进展*, 2025, 37(7): 949-966.
CAO H, GAO Z, YAN X, *et al.* Circularly polarized organic room temperature phosphorescent materials [J]. *Prog. Chem.*, 2025, 37(7): 949-966. (in Chinese)
- [11] LAN Y, GAO Z S, CHENG H, *et al.* Time-dependent colorful circularly polarized organic ultralong room temperature phosphorescence from a single-component chiral molecule [J]. *Small*, 2023, 19(46): 2303579.
- [12] HUANG W B, FU C Y, LIANG Z W, *et al.* Strong circularly-polarized room-temperature phosphorescence from a feasibly separable scaffold of bidibenzo(b,d)furan with locked axial chirality [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(30): e202202977.
- [13] LI H, LI H H, WANG W, *et al.* Stimuli-responsive circularly polarized organic ultralong room temperature phosphorescence [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, 59(12): 4756-4762.
- [14] LIU R H, DING B B, LIU D Z, *et al.* Switchable circularly polarized room-temperature phosphorescence based on pure organic amorphous binaphthyl polymer [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 421: 129732.
- [15] GU L, YE W P, LIANG X, *et al.* Circularly polarized organic room temperature phosphorescence from amorphous copolymers [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2021, 143(44): 18527-18535.
- [16] ZHONG H, ZHAO B, DENG J P. Polymer-based circularly polarized luminescent materials [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(6): 202202787.
- [17] LIU J, ZHOU X Y, TANG X Z, *et al.* Circularly polarized organic ultralong room-temperature phosphorescence: generation, enhancement, and application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(14): 202414086.
- [18] 潘禹州, 殷炜杰, 张雨霞. 手性超分子组装圆偏振室温磷光材料的研究进展[J]. *化学学报*, 2025, 83(6): 639-654.
PAN Y, YIN W, ZHANG Y. Research progress of circularly polarized room-temperature phosphorescent materials based

- on chiral supramolecular assembly [J]. *Acta Chim. Sinica*, 2025, 83(6): 639-654. (in Chinese)
- [19] LIU J, SONG Z P, WEI J, *et al.* Circularly polarized organic ultralong room-temperature phosphorescence with a high dissymmetry factor in chiral helical superstructures [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(7): 2306834.
- [20] GONG W, ZHOU M D, XIAO L Y, *et al.* Multicolor-tunable and time-dependent circularly polarized room-temperature phosphorescence from liquid crystal copolymers [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(9): 2301922.
- [21] LIU C, LI H, CHEN Y, *et al.* Circularly polarized room-temperature phosphorescence based on chiral co-assembled helical nanofiber from chiral co-assembled liquid crystal co-polymer [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 486: 150442.
- [22] XU D, LIU C, LI H, *et al.* Circularly polarized room temperature phosphorescence of chiral bromoxanthone using a chiral self-assembled liquid crystal polymer frameworks [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(15): 2303019.
- [23] GONG W, HUANG G Y, YUAN Y J, *et al.* Strong and multicolor-tunable pure organic circularly polarized room-temperature phosphorescence from cholesteric liquid crystal [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(21): 2300745.
- [24] Wang X J, ZHAO B, DENG J P. Liquid crystals doped with chiral fluorescent polymer: multi-color circularly polarized fluorescence and room-temperature phosphorescence with high dissymmetry factor and anti-counterfeiting application [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(49): 2304405.
- [25] HUANG A, HUANG J, LUO H Y, *et al.* Circularly polarized organic room temperature phosphorescence activated by liquid crystalline polymer network [J]. *J. Mater. Chem. C.*, 2023, 11(12): 4104-4111.
- [26] ZHANG W, GUAN P, ZHAO J, *et al.* Circularly polarized room-temperature phosphorescence from dye-doped cholesteric liquid crystalline polymer networks [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025, 16(3): 725-730.
- [27] GUAN P, YU S, YANG Y, *et al.* Efficient long-lived circularly polarized luminescence from cholesteric liquid crystalline polymer networks [J]. *Chem. Commun.*, 2025, 61(88): 17133-17136.
- [28] GUAN P, SHI F, XU C, *et al.* Tunable circularly polarized afterglow from cholesteric liquid crystalline polymer networks [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2025, 16(39): 10142-10148.
- [29] JANKUS V, WINSKOM C, MONKMAN A. The photophysics of singlet, triplet, and degradation trap states in 4,4-N, N8-dicarbazolyl-1,18-biphenyl [J]. *J. Chem. Phys.*, 2009, 130(7), 074501.
- [30] NI B, LI Y, LIU W, *et al.* Circularly polarized luminescence from structurally coloured polymer films [J]. *Chem. Commun.*, 2021, 57(22): 2796-2799.
- [31] ZHANG W, NI B, LI H, *et al.* Circularly polarized luminescence from oriented polymer films doped with a tetraphenylene-based conjugated oligomer. *Mater. Chem. Front.*, 2021, 5(14), 5471-5477.
- [32] SHI F, XU L, ZHAO J, *et al.* Efficient multicolour and white circularly polarized luminescence from liquid crystalline polymer networks [J]. *Chem. Commun.*, 2024, 60(79): 11096-11099.



关佩佩(2001–),女,山西大同人,硕士研究生,2023年于晋中学院获得学士学位,主要从事长寿命圆偏振发光活性的液晶聚合物网络材料的研究。
E-mail:2584458024@qq.com



李红坤(1983–),男,河北邯郸人,博士,教授,2012年于浙江大学获得博士学位,主要从事高分子合成及圆偏振发光材料的研究。
E-mail: hkli@suda.edu.cn