

文章编号: 1000-7032(2026)05-0835-11

一种非侵入式手性光学微腔结构实现高效率 圆偏振量子点发光二极管

黎德尔¹, 罗浩霖¹, 曾群英^{1,2}, 林立华^{1,2*}, 李福山^{1,2}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;

2. 中国福建省光电信息科技创新实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 在圆偏振发光二极管(CP-LED)中, 长期以来存在着难以兼顾高圆偏振发光不对称因子(g_{lum})与高外量子效率(External quantum efficiency, EQE)的问题。其根本原因在于: 传统策略往往依赖于本征手性发光材料或手性电荷传输层, 从而不可避免地牺牲器件的电荷输运与辐射复合效率。为了解决这些问题, 本文提出一种非侵入式、可解耦的功能结构设计范式, 通过构建由双层手性液晶(CLC)与金属反射镜组成的手性光学微腔(Chiral optical microcavity, COM), 将高效率但非手性的量子点发光单元嵌入一个宏观手性光子环境中, 在不改变发光材料结构与电荷注入的前提下, 实现对圆偏振发光的有效调控。该结构可结合 CLC 的选择性反射与法布里-珀罗微腔的模式共振协同作用, 使发射光在腔内经历多次手性选择性交互与模式选择性放大, 显著放大左右手性分量之间的强度差异, 而非依赖于单次手性过滤效应。基于这一机制, 所制备的红色 CP-QLED 器件实现了高达 $g_{lum} \approx 0.75$ 的圆偏振发光, 同时保持了高达 24.3% 的 EQE 和约 194 468 cd/m²@8 V 的器件亮度。该工作揭示了通过宏观光子结构实现手性功能与发光效率解耦的有效途径, 为高性能圆偏振电致发光器件的结构化设计提供了一种可推广的功能材料与光子结构协同策略, 对未来全色 CP-QLED 显示与集成光电子器件具有重要参考价值。

关键词: 量子点发光二极管; 手性液晶; 法布里-珀罗微腔; 圆偏振光

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260016

CSTR: 32170.14.CJL.20260016

A Non-invasive Chiral Optical Microcavity Enabling Efficient Circularly Polarized Quantum Dot Light-emitting Diodes

LI Deer¹, LUO Haolin¹, ZENG Qunying^{1,2}, LIN Lihua^{1,2*}, LI Fushan^{1,2}

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Author, E-mail: T20014@fzu.edu.cn

Abstract: In circularly polarized light-emitting diodes (CP-LEDs), it has been difficult to obtain both a high luminescence dissymmetry factor (g_{lum}) and a high external quantum efficiency (EQE) simultaneously. This limitation stems from conventional approaches, which typically employ intrinsically chiral emitters or chiral charge-transport layers modifications that often degrade charge transport and radiative recombination within the device. To overcome these issues, we introduce a non-invasive and decoupled structural design. Here, a chiral optical microcavity (COM) - formed by a double-layer chiral liquid crystal (CLC) and a metal reflector - creates a macroscopic chiral photonic environment around an otherwise non-chiral, high-efficiency quantum dot light-emitting unit. Without modifying the emitter or the charge-injection interfaces, this configuration enables effective control over the circular polarization of

收稿日期: 2026-01-14; 修订日期: 2026-01-21

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0615600); 国家自然科学基金面上项目(52572156)

Supported by National Science and Technology Major Project (2025ZD0615600); General Program National Natural Science Foundation of China (52572156)

the output light. The mechanism relies on the synergy between the selective reflection of the CLC and the mode resonance of the Fabry-Pérot microcavity. Inside the cavity, emitted light undergoes repeated chiral-selective interactions and mode-selective amplification, greatly enhancing the intensity difference between left- and right-handed components far beyond what a simple chiral filter could achieve. Using this design, we fabricated a red CP-QLED that reaches a $g_{lum} \approx 0.75$ while maintaining a high EQE of 24.3% and a luminance of approximately 194 468 cd/m² at 8 V. These results demonstrate a practical route to decoupling chiral function from emission efficiency through macroscopic photonic engineering. Overall, this work provides a scalable strategy that combines functional materials with tailored photonic structures for high-performance circularly polarized electroluminescence. It offers a useful reference for the development of future full-color CP-QLED displays and integrated optoelectronic systems.

Keywords: quantum dot light-emitting diodes; chiral liquid crystals; Fabry-Pérot microcavity; circularly polarized light

1 引 言

圆偏振电致发光器件在三维显示、信息加密、量子光电子学及自旋光电器件等领域展现出重要的应用潜力,近年来引起了研究者的广泛兴趣^[1-3]。其中,量子点发光二极管(QLED)凭借其在发光效率、色纯度和工艺兼容性等方面的优异表现,被认为是实现高性能圆偏振发光显示的重要候选平台,在AR/VR等近眼显示技术领域极具发展潜力^[4-8]。然而,尽管非偏振QLED发展迅速,要在电致发光的平板显示体系中直接产生高品质的圆偏振光仍然面临显著困难,在QLED体系中同时实现高圆偏振 g_{lum} 与高EQE仍然面临根本性挑战,这一矛盾已成为限制圆偏振QLED实际应用的关键瓶颈之一^[9-12]。以往获取圆偏振光常采用在普通发光器件外叠加四分之一波片与线性偏振片的被动式方法,但该方式不仅会引入超过50%的光损耗,也导致器件结构笨重,难以满足近眼显示设备轻薄集成的需求^[13]。因此,如何在一个器件中同时实现高发光效率、高圆偏振特性以及稳定的工艺性能,一直是该领域面临的核心问题^[14-19]。

近年来,为获得圆偏振电致发光,已经发展出许多实现圆偏振发光的工艺方法,已有研究主要依赖于引入本征手性发光材料或手性电荷传输层,包括手性有机分子、手性配体修饰的量子点以及手性钙钛矿等体系^[5,20-24]。例如,Song等^[5]采用同样的方法制备了手性钙钛矿作为自旋极化载流子的局域辐射复合中心,其自旋选择性和光电特性得到协调增强,显著提升了器件的手性光电性能。Liu等^[20]在钙钛矿中引入手性配体R-/S-联萘基磷酸,成功实现了由红色发光CsPbI₃量子点自组装形成的螺旋状钙钛矿纳米线,其在640 nm附近展

现出显著的CPL信号,该材料制备的薄膜展现出优异的不对称性,吸收率和发光率分别达到 1.1×10^{-2} 和 2.3×10^{-2} 。Duan等^[21]采用胆酸作为对称性破缺剂,利用胆酸排列的手性驱动力,致使手性CdSe/CdS量子棒形成螺旋轴垂直于基底的右手手性排列,所制备的手性量子点棒状发光二极管在600 nm处表现出负CP-EL信号, $|g_{EL}|$ 为 2×10^{-4} 。这类策略在一定程度上能够在材料层面诱导自旋选择性辐射复合,从而实现圆偏振发光。然而,该类围绕开发本征手性发光特性的策略虽然使器件结构变得非常简单,却往往不可避免地引入电荷输运受限、陷阱态增加、辐射效率下降等问题^[14,16,18,25-28]。由此产生的高偏振纯度与高器件效率难以兼得的性能权衡关系,已在多种CP-QLED与CP-OLED体系中反复出现。从功能设计的角度看,上述性能权衡的根源在于:现有策略往往将“发光效率”与“手性功能”同时压在同一材料体系中实现,从而导致两种功能相互制约。若能够在器件结构层面将高效发光过程与手性调控过程进行空间和功能上的解耦,则有望突破这一长期存在的瓶颈。然而,如何在不变量子点及电荷传输层材料体系的前提下,实现对圆偏振电致发光的有效调控,仍缺乏清晰而通用的结构设计思路。

胆甾相液晶是向列相液晶通过手性掺杂剂产生手性偏转形成具有周期性螺旋排列的一种手性液晶体系,其自组装形成的手性螺旋结构通过自旋选择性布拉格反射能够反射与其螺旋结构手性相同的圆偏振光,而透射相反手性的光^[29-33]。Li等^[34]将这种CLC以简单旋涂成膜的方式与钙钛矿结合,在光致发光上可以产生高达1.6的显著 g_{lum} 值的圆偏振光。然而,这种传统结构在光致发光上

的出色表现,当应用在电致发光器件结构时,却仍然面临器件效率与偏振纯度难以兼得的问题^[35-37]。基于上述思考,本文提出了一种非侵入式、可解耦的功能结构设计范式,通过转印工艺构建由双层手性液晶与金属反射镜组成的手性光学微腔(COM),在器件外延光子结构层面引入宏观手性环境。与依赖材料本征手性的策略不同,该COM结构并不参与电荷注入与辐射复合过程,而是通过对发射光传播路径与光学模式的调控,实现对圆偏振发光的选择性增强,从而在功能上实现发光效率与手性输出的有效解耦。在该COM架构中,CLC的手性选择性反射与法布里-珀罗微腔的光学共振效应协同作用,使得电致发光在腔内经历多次手性选择性交互与模式选择性放大,显著延长了有效光程并持续放大左右手性分量之间的强度差异。这种基于多次交互累积效应的手性增强机制,从根本上区别于传统单层手性膜所实现的单次手性过滤过程,为获得高 g_{lum} 的同时保持高出光效率提供了新的物理途径。该方法为制备轻薄化、高性能、高偏振度的圆偏振电致发光二极管领域提供了一种新的思路。

基于上述结构,我们成功制备出红色CP-QLED器件,其在维持优良电学特性的同时,实现了高达 $g_{lum} \approx 0.75$ 的圆偏振发光、高达24.3%的EQE和约194 468 cd/m²@8 V的器件亮度。该结果不仅证实了利用宏观光子结构调控手性发光是可行且高效的,并表明该COM设计具有良好的可拓展性,可通过调节CLC的螺距来适配不同发射波长,为未来实现全色系、高性能的圆偏振QLED的结构化设计提供了一条新的设计路径。

2 实验

2.1 材料准备

B-72聚乙醇缩丁醛(PVB,平均重均分子量(M_w)为170 000)、二丙烯酸酯液晶单体(RM-257,平均 M_w 为588.6)、1,4:3,6-二酞-D-葡萄糖醇2,5-双[4-[[4-[[[4-[[1-氧代-2-丙烯基]氧基]丁氧基]羰基]氧基]苯甲酰基]氧基]苯甲酸酯](LC-756,平均 M_w 为966.9)和2,2-二甲氧基-苯基苯乙酮(Irgacure-651,平均 M_w 为256.3)等材料均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。载流子传输层材料如聚乙撑二氧噻吩-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS A14083)、聚[(9,9-二正辛基芴基-2,7-二基)-alt-(4,4-(N-(4-正丁基)苯基)-二苯胺)](TFB)和氧化锌镁(Zn-

MgO)等试剂均由西安浴日光能有限公司提供。溶剂方面,氯苯(99.8%)购自北京百灵威科技有限公司,乙醇(99.8%)、正丁醇(99.8%)购自Sigma Aldrich。发光层所用的红色CdSe/ZnS量子点由合肥福纳科技公司提供。所有购买的化学品未经过进一步纯化直接使用。实验前溶液配置:将PVB溶于溶剂正丁醇中制成5 mg/mL溶液,将TFB溶于溶剂氯苯中得到8 mg/mL的溶液;将购买的红色量子点原液(正辛烷溶剂)进一步稀释成20 mg/mL的溶液备用;将RM-257、LC-756按照LC-756与RM-257质量比为3.8%,溶于甲苯中形成250 mg/mL的溶液,再加入10 mg的Irgacure-651。

2.2 CP-QLED制备

首先,为了去除铟锡氧化物(Indium tin oxide, ITO)导电玻璃基板表面残留,需要将基板放置于60 °C的去离子水、乙醇和丙酮中分别超声清洗10 min,用氮气将ITO基板吹干后放入UV-ozone中照射10 min,以此增加ITO表面的亲水性。ITO基板表面预处理完毕后按照转速3 000 r/min、旋涂时间30 s的参数将PEDOT:PSS水溶液沉积在ITO玻璃上,并在150 °C的加热台上退火20 min。随后,将TFB(3 000 r/min,30 s,150 °C,20 min)、红色量子点(2 000 r/min,30 s,80 °C,10 min)、ZnMgO(15 mg/mL,2 000 r/min,30 s,80 °C,10 min)等功能层按照对应参数依次旋涂沉积在ITO基板上的PEDOT:PSS表面。在沉积完功能层之后,将ITO基板转移到真空蒸镀机,在高真空条件下,通过热蒸发沉积法在ZnMgO薄膜表面沉积厚度为20 nm的银电极,蒸镀之后将PDMS上的CLC薄膜连同PVB一并转印到20 nm银电极上(100 °C,2 min);之后,同样在高真空条件下,通过热蒸发沉积法在PVB表面沉积100 nm厚度的银反射镜。最后,在器件背面旋涂第二层CLC薄膜。

3 结果与讨论

3.1 双层CLC的手性光学微腔结构制备工艺

为了避免CLC溶液中的甲苯溶剂对薄Ag电极、ZnMgO薄膜、和QD层等功能层造成侵蚀和界面反应等损伤,我们采用已被广泛使用于光电子器件领域且具有高成熟度的转印工艺来构建COM结构^[38-39]。由于转印工艺不依赖于某种特定衬底,所以理论上可适用于在QLED器件上集成COM结构;并且允许我们在独立的衬底上预先完成整个COM关键部分的优化,然后再整体转

移到制备好的 QLED 器件表面,以实现在物理结构上对器件发光效率与手性功能初步分离。我们采用表面能较低的聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 作为转印基底,以便于后续光学薄膜的脱落。采取 PVB 作为光学腔长调节层,其高透明度与良好机械柔顺性有助于在转印时缓冲应力,保护透明电极免受损伤。具体的制备流程如图 1(a)所示。(I)先在 PDMS 基底上旋涂 PVB 溶液;(II)随后在 PVB 表面旋涂 CLC 溶液;(III)通过紫外光照固化 CLC 薄膜的周期性螺旋结构;(IV)将固化好的 PVB-CLC 复合薄膜在加热条件下覆盖在 QLED 器件的半

透明阴极表面,经热压贴合后从一边揭去 PDMS 衬底,将 PVB-CLC 整体转移至目标基板半透明阴极上;(V)在 PVB 侧蒸镀银反射镜;(VI)最后将器件翻转,在器件背面玻璃基底旋涂第二层手性液晶材料。需要特别说明的是,转印过程中须确保 PDMS 与目标基板平整贴合,避免对透明电极造成机械损伤。当 PVB-CLC 在热压过程贴合到目标基板后,在揭去 PDMS 衬底时要从一侧缓慢揭下,如图 1(b)所示。该 COM 结构未引入新的电荷注入界面或额外功能层,这种非侵入式集成为后续同时实现高圆偏振发光与高器件效率提供了重要的结构基础。

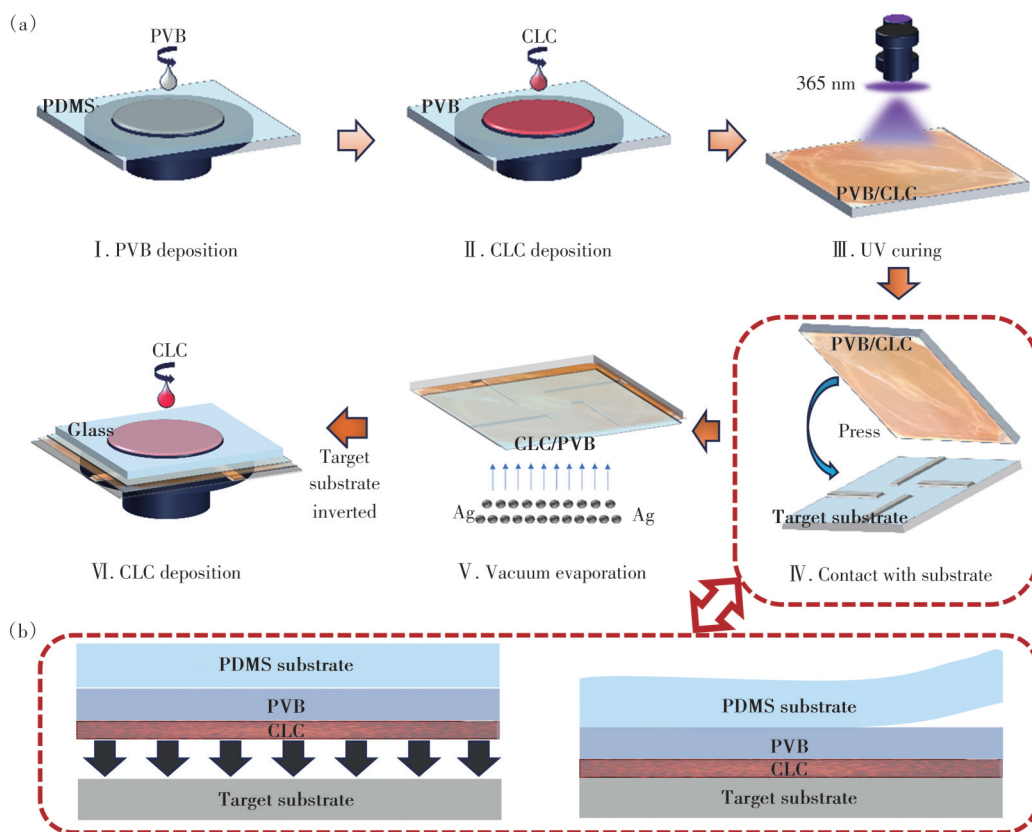


图 1 双层 CLC 薄膜光学微腔的制备流程。(a)CLC 薄膜以及手性光学微腔的制备流程;(b)CLC 和 PVB 的转移细节

Fig.1 Schematic illustration of fabricating optical microcavity with double-layer CLC film. (a)Schematic illustration of fabricating CLC film and chiral optical microcavity structure. (b)Details of CLC and PVB transfer

3.2 量子点与不同浓度 CLC 薄膜表征

CLC 薄膜在 COM 中的核心作用在于提供可设计的宏观手性光子环境,而非依赖材料本征的发光手性。本工作选用反应性向列相液晶单体 RM-257 作为基体,引入手性掺杂剂 LC-756 以诱导液晶分子在垂直方向形成周期性螺旋结构,并通过紫外固化将该结构永久锁定在弹性网络中。RM-257 是一种常见的反应性向列相液晶单体,在

紫外线(UV)和光引发剂的作用下可以发生聚合反应,形成具有液晶特性的高分子聚合物^[40]。而 LC-756 是一种手性单体,通常作为手性掺杂剂加入向列相液晶中,其自身的右旋旋转特性可以扭转液晶分子的排列,使其在垂直方向上形成手性螺旋结构,通过在 RM-257 中添加少量的 LC-756,可以诱导 RM-257 形成螺旋状的周期性排列结构。Irgacure 651 是一种光引发剂,可以吸收紫外

光产生自由基,引发聚合反应,将手性螺旋结构永久地锁定在弹性网络中^[41]。将这三种材料以一定比例混入甲苯溶液中,以 600 r/min、70 °C 加热搅拌 1 h,可以得到 CLC 薄膜的前置溶液。将搅拌好的 CLC 溶液旋涂在预先做好等离子亲水性处理的 PVB 薄膜上得到均匀膜,将该均匀膜用 UV 照射 5 min 进行聚合固化反应,固化薄膜中的手性螺旋结构。薄膜中的手性螺旋结构由于布拉格反射,只反射与自身螺旋结构旋向相同的圆偏振光^[42]。图 2(a) 左边展示了通过优化手性掺杂剂的比例所实现的红/绿/蓝三色 CLC 薄膜在环境白光下的选择性反射实物图,右边是红色 COM 结构器件的电致发光实物图。说明通过调节 LC-756 的掺杂比例,可连续调控 CLC 薄膜的螺距,从而实现其光子带隙在可见光范围内的可控移动^[43]。图 2(b) 展示了不同浓度手性掺杂剂单层薄膜的可见光吸收光谱,不同手性掺杂剂浓度对应的 CLC 薄

膜分别表现出覆盖红、绿、蓝波段的选择性反射特性。从图中可以看出,手性掺杂剂的质量比越大,液晶分子受到的螺旋偏转力越大,CLC 薄膜在垂直方向上的螺距越小。CLC 薄膜反射中心波长与螺距之间的关系符合布拉格反射条件^[44]:

$$\lambda_0 = \bar{n} \times p, \quad (1)$$

其中 λ_0 是反射光的中心波长, $\bar{n}$ 对应液晶材料的平均折射率, p 是手性螺旋结构的螺距。这一结果表明, CLC 在本工作中并非偶然产生的手性响应材料,而是一种可工程化设计的手性光子结构单元。图 2(c) 是单层量子点薄膜材料的归一化光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱,其波峰位于 632 nm,处于所制备得到的红色 CLC 薄膜的光子带隙范围。图 2(d) 是 CLC 薄膜在光学显微镜下的表面形貌,可以明显观察到 CLC 薄膜的指纹结构,其致密程度随手性掺杂剂浓度增加而提高,进一步验证了螺旋结构的稳定性与可控性。

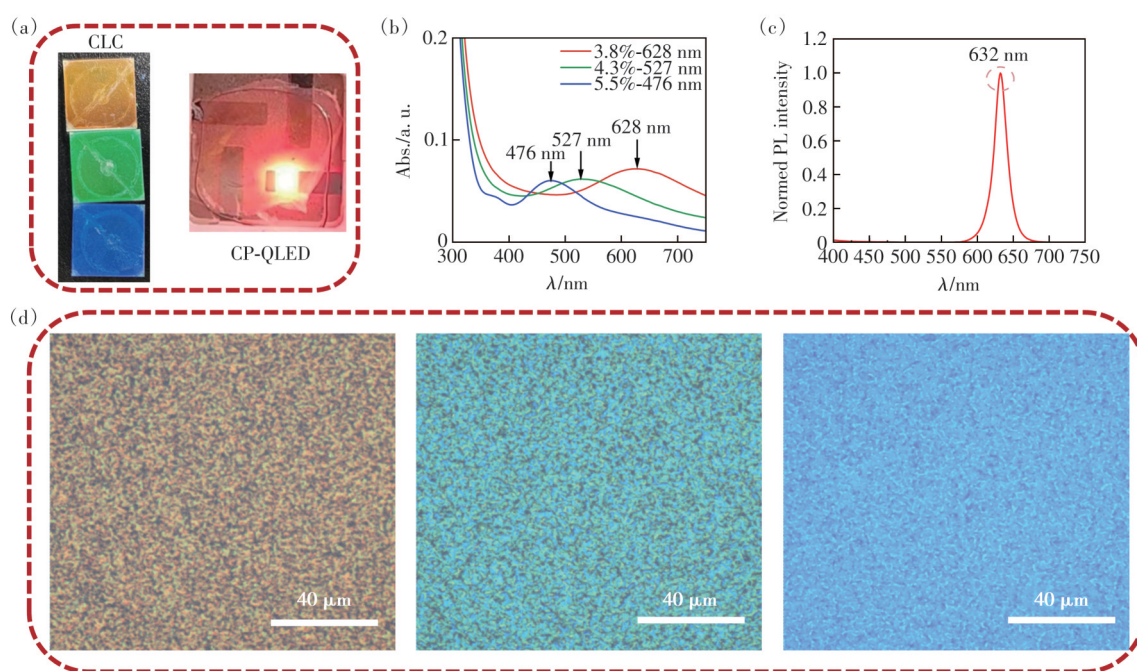


图2 CLC薄膜光子带隙优化与表征。(a)红绿蓝CLC薄膜和CP-QLED器件;(b)红绿蓝CLC薄膜的可见光吸收光谱;(c)红色量子点的PL光谱;(d)红绿蓝CLC薄膜在光学显微镜下的表征

Fig.2 Optimization and characterization of the photonic band gap of CLC films. (a) R/G/B/ CLC films and CP-QLED devices. (b) The visible light absorption spectra of R/G/B/ CLC films. (c) PL spectrum of the red quantum dots. (d) Characterization of CLC films under optical microscope

3.3 双层CLC薄膜器件结构与表征

如图 3(a) 所示,基于上述结构设计构建了结构为 CLC/ITO/PEDOT: PSS/QDs/Zn-MgO/Ag(半透明)/CLC/PVB/Ag 的器件,制备出红色 CP-QLED 器

件。器件 COM 结构的作用如图 3(b) 所示, QLED 产生非偏振电致发光,与传统单层手性膜不同, COM 中 CLC 并非仅对出射光进行一次性手性过滤,每一次传播过程均与 CLC 的手性选择性反射

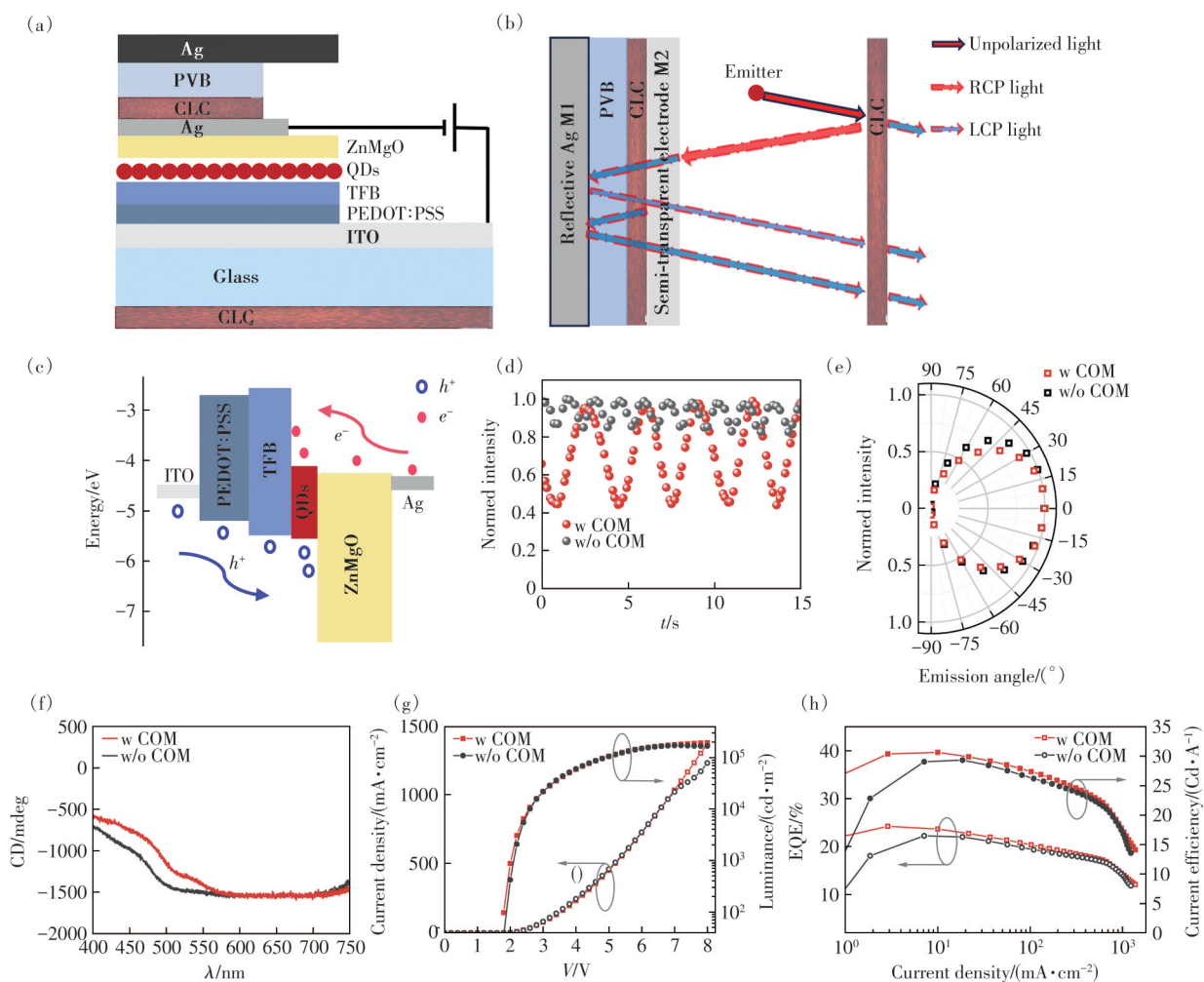


图3 CP-QLED 器件结构与表征。(a)CP-QLED 器件结构;(b)COM 结构的工作示意图;(c)QLED 器件的各层能级图;(d)器件的发光强度变化曲线;(e)器件不同角度下的发光强度特性曲线;(f)器件的 CD 光谱;(g)器件的 J - V - L 特性曲线;(h)器件的 EQE- J -CE 特性曲线

Fig.3 Structure and characteristics of CP-QLED. (a)Schematic diagram of the CP-QLEDs. (b)Schematic of the operation of the COM structure. (c)Energy level diagram of the QLED device each layers. (d)The curve of the light intensity of the devices. (e)Normalized angular dependence of EL intensity in devices. (f)Circular dichroism spectra of devices. (g) J - V - L characteristics of devices. (h)EQE- J -CE characteristics of devices

特性发生相互作用,CLC 薄膜的周期性螺旋结构会强烈反射与自身螺旋结构手性相同的圆偏振光,而透射相反手性的光^[45];在这个物理过程中,QLED 的电致发光中大部分不必要的手性分量被 CLC 薄膜“过滤”,从而在出光一侧输出高纯度的单一手性圆偏振光,有效提升了器件的 g_{lum} 。与此同时,作为器件顶部的半透明电极(电荷注入与谐振腔反射镜)和手性液晶层(手性分量过滤)、透明介质层(光学腔长调节)、银反射层(谐振器反射镜)组成了一个法布里-珀罗谐振腔(F-P 腔)^[22,46-49],QD 向器件顶部发射的光在该腔内不断振荡,而腔内的手性液晶层作为手性选择器,持续“过滤”

手性分量,这种基于多次手性选择性交互的累积效应在实验中表现为显著提升的圆偏振不对称因子。

图 3(c)所示为 QLED 器件的能级排列。图 3(d)为同一 CLC 薄膜,但分别有/无 COM 结构的两组 CP-QLED 器件的归一化电致发光强度的比较。通过 1/4 波片和线偏振片的转动得到的器件发光强度随时间变化的归一化强度曲线,二者的 g_{lum} 值可通过以下公式计算^[10]:

$$g_{lum} = 2(I_R - I_L)/(I_R + I_L), \quad (2)$$

其中 I_L 和 I_R 分别表示左旋和右旋圆偏振光发射强度。在未引入 COM 结构时,CP-QLED 器件的 g_{lum}

仅为0.15;而引入COM结构后,器件的 g_{lum} 显著提高至0.75。需要指出的是,该提升并非源于单次手性过滤,而是源于微腔中多次光与手性结构相互作用所导致的偏振态选择性累积增强。图3(e)展示的是有/无COM结构器件在不同角度下的发光强度特性曲线,COM结构器件的出光角分布受到微腔效应的影响,其强度分布较比无COM结构的出光分布更加集中;但与追求极高光提取效率的强微腔结构设计不同的是,COM结构器件的发光角分布并未发生剧烈变形,仍然近似保持了一个较宽的、类朗伯型的分布特征。图3(f)展示的是有/无COM结构器件的圆二色性检测,可以看到,二者都表现出强烈的圆二色性信号。图3(g)是两组有/无COM结构器件的电流密度-电压-亮度(Current density-voltage-luminance, J - V - L)特性曲线,由于器件的 J - V - L 特性曲线几乎一致,表明COM结构并未对电荷注入与输运过程产生不利影响。与此同时,COM结构器件由于法布里-珀罗结构带来的微腔效应,相较于无COM结构器件,器件的亮度从 $167\ 705\text{ cd/m}^2@8\text{ V}$ 提高至 $194\ 468\text{ cd/m}^2@8\text{ V}$ 。进一步地,如图3(h)所示,随着器件出光效率提高,单位时间内发射的光子数与注入的电子-空穴对数目之比相应增加,从而使器件的外量子效率(EQE)由原来的22.3%提升至24.3%。此外,器件的电流效率也得到了提升,说明COM结构使得有更多的光能够被有效地从器件内部提取出来。这一结果从实验层面验证了通过宏观光子结构引入手性调控功能,可以在不牺牲、甚至提升光提取效率的前提下实现高圆偏振发光输出,从而有效突破了传统CP-QLED中高 g_{lum} 与高EQE难以兼得的性能权衡。

为进一步探究COM腔长对CP-QLED器件性能的影响,通过调节旋涂PVB的转速来优化COM结构的谐振腔长,优化后的腔长应该满足以下关系^[49]:

$$L_{\text{cav}} = \sum_i n_i d_i + L_{\text{pen1}} + L_{\text{pen2}} = m \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

$$L_{\text{pen}} = \frac{\lambda(\pi - \varphi)}{4\pi}, \quad (4)$$

$$\varphi = \pi + \arctan \frac{2n_0 k_1}{n_0^2 - n_1^2 - k_1^2}, \quad (5)$$

公式(3)为COM结构带来的法布里-珀罗微腔的谐振腔长关系表达式;公式(4)为不同波长光在金属中的光场穿透深度表达式;公式(5)为金属

反射镜中的相位偏移表达式。光每次在传播介质中的总光程(nd)加上穿透半透明电极(L_{pen1})和银反射镜(L_{pen2})的光场穿透深度必须等于 $m\lambda/2$,这对应于 $m2\pi$ 的相位变化,其中 m 为整数。作为性能对比的基准,control器件使用的器件结构为CLC/ITO/PEDOT:PSS/QDs/ZnMgO/Ag,并在表1详细列出了control器件与COM结构器件的EL、EQE_{max}、CE_{max}、 g_{lum} 详细数据。图4(a)给出了不同PVB旋涂转速下(1 500, 2 000, 2 500 r/min)的COM结构CP-QLED器件和control器件的 J - V - L 特性曲线。根据表2中COM腔内介质厚度与折射率计算得到的总光程加上反射镜的总穿透深度得到三个谐振腔长分别为676.79 nm、630.74 nm和623.15 nm,对于谐振腔长更接近于QD发射波长的器件,其亮度更高,而偏离QD发射波长的器件亮度略有下降。这是因为对于CP-QLED器件来说,器件的发光强度主要取决于量子点的峰值发射强度,对于偏离量子点主发射波长的F-P腔,腔膜共振增强效果会相应减弱。从器件的EQE- J -CE特性曲线(图4(b))可以看出,在电荷注入不受影响的前提下,器件内部出光越多,光提取结构的优化使得器件内部出光增强,EQE与CE也随之提升,两者呈现出相同的变化趋势。图4(c)给出了器件的EL光谱,可观察到发射光谱随腔长变化呈现出可预测的红移或蓝移,这进一步证明器件的出光行为受到微腔共振条件调控。此外,通过偏振片与1/4波片对器件进行圆偏振出光测试(图4(d)),发现随着偏振片旋转,出射光强呈现周期性变化,且采用COM结构的器件其强度变化幅度更大。这说明,在手性微腔中,非偏振光向圆偏振态的转化效率得到了提升。这些结果共同表明,COM结构带来的圆偏振发光增强并非偶然现象,而是由手性选择性反射与微腔模式共振二者协同作用所形成的结构性光子效应。

表1 CP-QLED器件的性能汇总

Tab. 1 Summary of performance of CP-QLED devices

Sample	EL/ FWHM/nm	EQE _{max} / %	CE _{max} / (cd·A ⁻¹)	g_{lum}
Control	632/27	22.3	29.1	0.15
With COM(1 500 r/min)	635/29	19.9	24.2	0.70
With COM(2 000 r/min)	631/23	24.3	30.4	0.73
With COM(2 500 r/min)	628/27	22.2	27.4	0.75

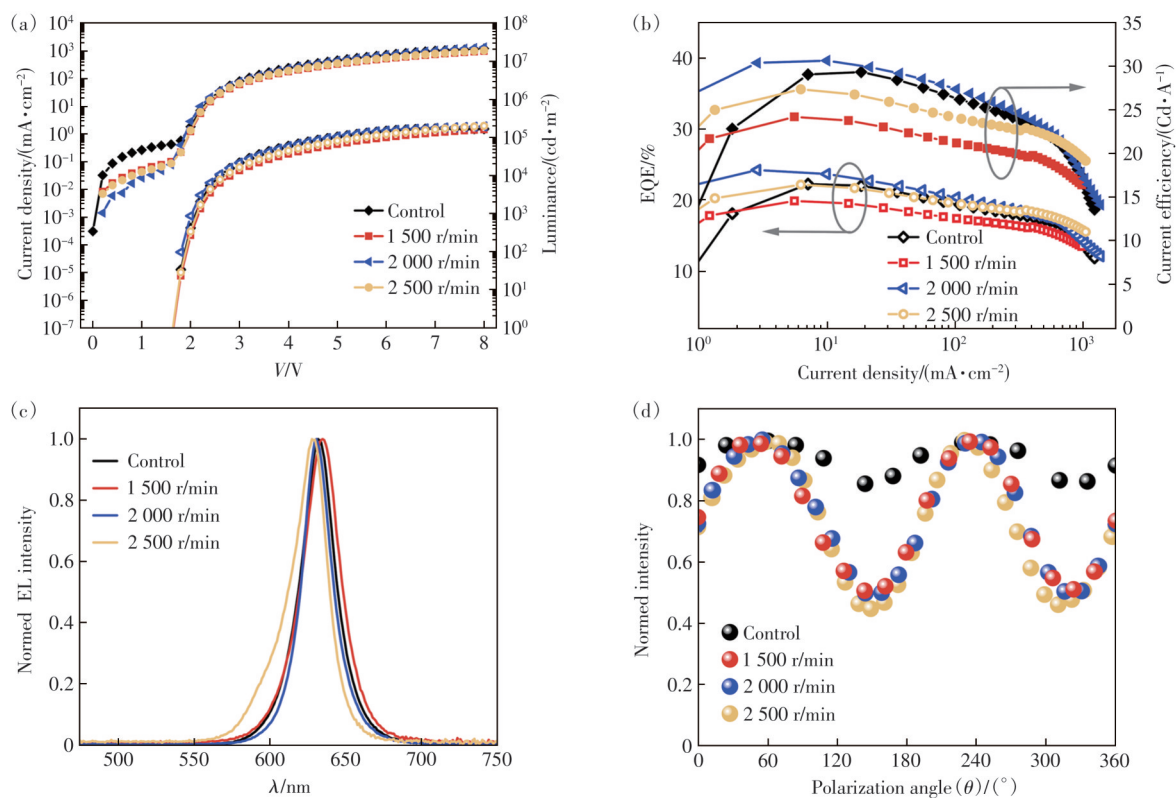


图4 CP-QLED 器件电学性能。(a)器件的 J - V - L 特性曲线;(b)器件的 EQE- J -CE 特性曲线;(c)器件的 EL 光谱;(d)器件的发光强度随偏振角变化曲线

Fig.4 Performance of CP-QLED. (a) J - V - L characteristics of devices. (b) EQE- J -CE characteristics of devices. (c) Normalized EL spectra of devices. (d) Normalized intensity dependence of angular in devices

表 2 COM腔内介质折射率与厚度		
Tab. 2 Refractive index and thickness of the medium in the COM cavity		
Sample	Refractive index	Thickness/nm
CLC	1. 61	240. 2
PVB	1. 49	125. 7/94. 8/89. 7

4 结 论

本工作设计并验证了一种非侵入式圆偏振发光调控策略,通过耦合双层手性液晶与金属反射镜,构建了具有明确光学边界条件的手性光学微腔,实现了高性能量子点发光二极管中发光效率与圆偏振功能的有效解耦。与以往依赖材料本征手性的传统策略不同,该COM结构完全作用于器件的光学调控部分,它在不改变量子点发光层及电荷传输过程的前提下,引入了一个可设计调节的宏观手性光子环境。实验结果表明,COM中手性选择性反射与微腔模式共振的协同作用可使器件电致发光在腔内经历多次手性选择性交互与模式选择性放大,从而显著提高器件的圆偏振光输出,并保持高效率发光。基于该结构制备的红色

CP-QLED 器实现了高达 $g_{\text{lum}} \approx 0.75$ 的圆偏振发光,同时保持了高达 24.3% 的 EQE 和约 $194\,468\text{ cd/m}^2@8\text{ V}$ 的器件亮度。这一结果成功突破了传统 CP-QLED 中高偏振纯度与高器件效率难以共存的性能权衡问题。此外,由于 CLC 的光子带隙可通过螺距进行连续调控,所以该COM结构理论上可适用于不同发射波长或材料体系,展现出良好的可拓展性与普适性。这种以“结构设计”主导而非“材料替换”为核心的思想,为发展全色系、高性能的圆偏振电致发光器件提供了一种可移植的功能结构范式。

总之,本工作阐明了一条通过宏观光子结构调控手性发光的有效路径,为圆偏振发光器件的设计从“材料工程”向“光子结构工程”的转变提供了新视角,对面向三维显示、AR/VR 以及集成光电子系统的圆偏振光源开发具有重要参考价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260016>

参 考 文 献:

- [1] CRASSOUS J, FUCHTER M J, FREEDMAN D E, *et al.* Materials for chiral light control [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2023, 8(6): 365-371.
- [2] ZHAN X Q, XU F F, ZHOU Z H, *et al.* 3D laser displays based on circularly polarized lasing from cholesteric liquid crystal arrays [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(37): 2104418.
- [3] MISHRA S, BOWES E G, MAJUMDER S, *et al.* Inducing circularly polarized single-photon emission *via* chiral-induced spin selectivity [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(12): 8663-8672.
- [4] JANG E, JANG H. Review: quantum dot light-emitting diodes [J]. *Chem. Rev.*, 2023, 123(8): 4663-4692.
- [5] HE S, LIN W X, YU D, *et al.* Perovskite spin light-emitting diodes with simultaneously high electroluminescence dissymmetry and high external quantum efficiency [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 2201.
- [6] YANG K Y, ZHENG H X, ZHONG C, *et al.* High-resolution and high-performance full-color electroluminescent quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2025, 138: 110817.
- [7] WANG Q Q, ZHU H M, TAN Y Z, *et al.* Spin quantum dot light-emitting diodes enabled by 2D chiral perovskite with spin-dependent carrier transport [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(5): 2305604.
- [8] GUO Q, LI Z Y, ZHOU Y J, *et al.* Self-positioning microdevices enable adaptable spatial displaying [J]. *Sci. Adv.*, 2025, 11(20): eadv2721.
- [9] MUSTAQEEM M, CHOU P T, KAMAL S, *et al.* Solution-processed and room-temperature spin light-emitting diode based on quantum dots/chiral metal-organic framework heterostructure [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(19): 2213587.
- [10] FURLAN F, MORENO-NARANJO J M, GASPARINI N, *et al.* Chiral materials and mechanisms for circularly polarized light-emitting diodes [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(7): 658-668.
- [11] WAN L, WADE J, SALERNO F, *et al.* Inverting the handedness of circularly polarized luminescence from light-emitting polymers using film thickness [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(7): 8099-8105.
- [12] YUAN M, WEN X B, JIANG X F, *et al.* Circularly polarized luminescent halide perovskites: research progress and perspective [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2025, 19(19): e02178.
- [13] ZHANG D W, LI M, CHEN C F. Recent advances in circularly polarized electroluminescence based on organic light-emitting diodes [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49(5): 1331-1343.
- [14] WU J L, FANG G Q, ZHANG Y L, *et al.* Semiconductor nanomaterial-based polarized light emission: from materials to light emitting diodes [J]. *Sci. China Mater.*, 2023, 66(4): 1257-1282.
- [15] ZHANG R, GAO J, LI N M, *et al.* Circularly polarized organic light-emitting diode based on device functional layer materials [J]. *Small*, 2025, 21(8): 2409541.
- [16] WU Y, LI M Q, ZHENG Z G, *et al.* Liquid crystal assembly for ultra-dissymmetric circularly polarized luminescence and beyond [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, 145(24): 12951-12966.
- [17] 潘俞同, 陈江山. 手性钙钛矿及其在自旋发光二极管中的应用 [J]. *发光学报*, 2025, 46(12): 2226-2240.
PAN Y T, CHEN J S. Chiral perovskites and their application in spin light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(12): 2226-2240. (in Chinese)
- [18] ZHANG C, LI S, DONG X Y, *et al.* Circularly polarized luminescence of agglomerate emitters [J]. *Aggregate*, 2021, 2(5): e48.
- [19] 张铭江, 苏蕊琪, 庄涛涛. 圆偏振发光液晶体系的构建与应用 [J]. *液晶与显示*, 2025, 40(1): 111-127.
ZHANG M J, SU R Q, ZHUANG T T. Endowing circularly polarized luminescence in liquid crystal composites for desired applications [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2025, 40(1): 111-127. (in Chinese)
- [20] LIU H C, PORTNIAGIN A S, TANG B, *et al.* Helical perovskite nanowires with strong circularly polarized luminescence self-assembled from red-emitting CsPbI₃ quantum dots following chiral ligand exchange [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(18): 17774-17784.
- [21] DUAN T W, AI J, CHEN S J, *et al.* Chiral CdSe/CdS quantum dot (in rod)-light-emitting diodes with circularly polarized electroluminescence [J]. *Nano Res.*, 2022, 15(10): 9573-9577.
- [22] JIA J C, CAO X, MA X K, *et al.* Circularly polarized electroluminescence from a single-crystal organic microcavity

- light-emitting diode based on photonic spin-orbit interactions [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 31.
- [23] LI H, LI D, FU C Y, *et al.* Strong circularly polarized electroluminescence promoted by using chiral co-assembled liquid crystal polymers [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(5): 2402426.
- [24] YU Z X, CHEN X W, CHEN C F, *et al.* Chiral nematic liquid crystal films for high-performance circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2025, 64(47): e202517906.
- [25] WANG Q Q, ZHU H M, CHEN W, *et al.* Strong circularly polarized luminescence from quantum dots/2D chiral perovskites composites [J]. *Nano Res.*, 2023, 16(5): 7593-7599.
- [26] LI J S, QIN W D, LI C H, *et al.* Efficient and high color-purity red and deep-red circularly polarized luminescence from carbon quantum dots enabled by helical co-assembly strategy [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(47): 2510409.
- [27] ZHAO J J, ZENG K, DOU W T, *et al.* Boosted circularly polarized luminescence of a chiral metallacage through co-assembly in confined microfluidic environments [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(3): 2413920.
- [28] LIN W X, YANG C, MIAO Y, *et al.* Toward chiral lasing from all-solution-processed flexible perovskite-nanocrystal-liquid-crystal membranes [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(44): 2301573.
- [29] BISOYI H K, LI Q. Light-driven liquid crystalline materials: from photo-induced phase transitions and property modulations to applications [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(24): 15089-15166.
- [30] HE J L, HARA M, OHNUKI R, *et al.* Circularly polarized luminescence chirality inversion and dual anticounterfeiting labels based on fluorescent cholesteric liquid crystal particles [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(33): 43991-44003.
- [31] 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.
- [32] LI Y, CHEN Y H, LUO J X, *et al.* Light-driven sign inversion of circularly polarized luminescence enabled by dichroism modulation in cholesteric liquid crystals [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(16): 2312331.
- [33] BAO S W, LI S, TANG Z R, *et al.* Circularly polarized luminescence signals of photoresponsive liquid crystals and their applications [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13(19): 9453-9464.
- [34] WANG C T, CHEN K Q, XU P, *et al.* Fully chiral light emission from CsPbX₃ perovskite nanocrystals enabled by cholesteric superstructure stacks [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(35): 1903155.
- [35] LI B H, LI Y, YUAN W, *et al.* Chiral quasi-2D perovskites based single junction spin-light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(7): 2415433.
- [36] ZHONG X S, YUAN L, LIAO X J, *et al.* Circularly polarized organic light-emitting diodes based on chiral hole transport enantiomers [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(18): 2311857.
- [37] ZHOU Y J, WANG Y X, SONG Y H, *et al.* Helical-caging enables single-emitted large asymmetric full-color circularly polarized luminescence [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 251.
- [38] YU C, ZHANG M, LIANG L, *et al.* Advancements in transfer printing techniques and their applications in photonic integrated circuits [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 396.
- [39] 黄兴云, 谢潇婷, 杨开宇, 等. 基于纳米压印的高分辨率和高效率量子点发光二极管 [J]. *发光学报*, 2025, 46(6): 1120-1128.
- HUANG X Y, XIE X T, YANG K Y, *et al.* High-resolution and high-performance quantum dots light-emitting diode based on nanoimprint [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(6): 1120-1128. (in Chinese)
- [40] HUANG Z Q, LI L, WU T Q, *et al.* Wearable perovskite solar cells by aligned liquid crystal elastomers [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 1204.
- [41] LIU Y T, HAN R, ZHAO X H, *et al.* Multilayer, broadband infrared reflectors based on the photoinduced preparation of cholesteric liquid crystal polymers [J]. *Molecules*, 2023, 28(20): 7063.
- [42] DREHER R, MEIER G, SAUPE A. Selective reflection by cholesteric liquid crystals [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1971, 13(1): 17-26.
- [43] WU P C, WU G W, TIMOFEEV I V, *et al.* Electro-thermally tunable reflective colors in a self-organized cholesteric helical superstructure [J]. *Photonics Res.*, 2018, 6(12): 1094-1100.
- [44] KOBASHI J, YOSHIDA H, OZAKI M. Broadband optical vortex generation from patterned cholesteric liquid crystals

- [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2017, 646(1): 116-124.
- [45] YAN J L, OTA F, JOSE B ASAN, *et al.* Chiroptical resolution and thermal switching of chirality in conjugated polymer luminescence *via* selective reflection using a double-layered cell of chiral nematic liquid crystal [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(2): 1604529.
- [46] HOFMANN S, THOMSCHKE M, LÜSSEM B, *et al.* Top-emitting organic light-emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(S6): A1250-A1264.
- [47] YUAN C X, TIAN F S, CHEN S M. ZnSeTe blue top-emitting QLEDs with color saturation near Rec. 2020 standards and efficiency over 18.16% [J]. *Nano Res.*, 2023, 16(4): 5517-5524.
- [48] DENG Y B, LONG T, WANG P Y, *et al.* Spin-valley-locked electroluminescence for high-performance circularly polarized organic light-emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146(45): 30990-30997.
- [49] LI M Q, LI R, WU L J, *et al.* Ultrabright and stable top-emitting quantum-dot light-emitting diodes with negligible angular color shift [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 5161.



黎德尔(2001-),男,广西桂平人,硕士研究生,2023年于福州大学获得学士学位,主要从事量子点发光器件制备及性能提升的研究。

E-mail: 2429155219@qq.com



林立华(1987-),男,福建龙岩人,博士,讲师,硕士生导师,2019年于南京大学获得博士学位,主要从事半导体发光器件与材料的研究。

E-mail: T20014@fzu.edu.cn