



基于圆偏振发光材料的应用探索

赵珊珊, 庄涛涛*

中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥微尺度物质科学国家研究中心, 合肥 230026

*通讯作者, E-mail: tzhuang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2024-04-28; 接受日期: 2024-06-24; 网络版发表日期: 2024-07-10

中国科学院百人计划(编号: KJ2060007002)和安徽省自然科学基金(编号: BJ2060190120)资助项目

摘要 圆偏振发光材料具有特殊的旋光性, 在光电器件、信息安全、3D显示等领域具有广阔的应用前景. 传统的圆偏振发光材料一般存在发光不对称因子较低、合成复杂、可加工性不足等问题, 在实际应用中严重受限. 作为一种准一维光子晶体, 胆甾相液晶具有周期性螺旋结构和手性放大功能, 为提高圆偏振发光材料的不对称因子提供了可能. 本文系统介绍了本课题组基于手性液晶材料构筑的一系列高性能圆偏振发光结构体系及其在信息交互领域的应用探索.

关键词 圆偏振发光, 发光不对称因子, 3D显示, 信息交互

1 引言

手性在自然界和生命体系中广泛存在, 对化学、生物学、医学和药理学等众多学科领域具有重要意义^[1-5]. 手性物质具有独特的光学特性, 可产生偏振方向会随着时间的变化而改变的光, 其中电矢量的末端轨迹为圆形的光称为圆偏振光. 与自然光和线偏振光相比, 圆偏振光具有特殊的偏振性质并携带自旋角动量, 在光电器件^[6]、偏振信息加密^[7]、智能传感^[8]、3D显示^[9]等领域具有重要的应用价值.

传统的圆偏振光一般是通过物理方式获得, 即自然光通过线偏振片转化为线偏振光, 再经过1/4波片, 发射出左旋或右旋圆偏振光^[10]. 该类物理构筑方式存在严重的能量损耗, 并且需要组装额外的光学元件, 不利于器件的集成化^[11]. 1948年, Samoilov在手性铜系配合物(铈酰乙酸钠)晶体中检测到圆偏振光信号,

该发现为获取圆偏振光开辟了一种新思路. 通过手性发光材料直接发射圆偏振光(即圆偏振发光, circularly polarized luminescence, CPL), 可以有效降低光的能量损耗^[12].

评价CPL性能的关键指标是发光不对称因子($g_{lum} = 2(I_L - I_R)/(I_L + I_R)$, I_L 和 I_R 分别代表左旋和右旋CPL的强度). 当不对称因子 g_{lum} 为+2或-2时, 代表纯左旋或右旋CPL^[4,12]. 在纯有机材料体系中, 一般通过共价键将手性基团连接到发色团上以制备CPL材料, 但由于有机小分子较小的磁偶极跃迁, 导致该类结构的 g_{lum} 值较低^[13-15]; 在无机材料体系中, 可以通过合成具有本征手性的无机纳米结构或通过手性配体的表面修饰来实现CPL性能, 但也存在 g_{lum} 值和荧光量子效率较低的问题, 极大地限制了CPL材料的应用和发展^[15,16].

液晶是一种既具有液体的流动性, 又具有晶体的有序性的物质状态, 所以在某个温度范围内兼有液体

引用格式: Zhao S, Zhuang T. Advancing circularly polarized luminescence materials for practice. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 1145–1152, doi: 10.1360/SSC-2024-0065

和晶体特性^[17-19]。其中,胆甾相液晶(cholesteric liquid crystals, CLCs)可由向列相液晶加入手性掺杂剂转化而成,其分子排列呈独特的超螺旋结构,表现出明显的旋光性和圆二色性^[20,21]。作为准一维光子晶体,CLCs为放大材料的手性,提高 g_{lum} 值提供了新策略^[17]。

本课题组基于CLCs的螺旋自组装和有机-无机复合策略,构筑了一系列高性能的CPL材料体系,并系统总结了该类材料的功能化加工和物理形态的调控方式,深入探究了CPL材料在信息交互领域的功能化应用。

2 高质量圆偏振发光材料体系的构筑

在多元杂化材料体系中,如果手性基质与发光单元不存在相互作用,可根据“匹配规则”调节手性基质的圆二色光谱与发光材料的发射光谱,实现光谱区域的最大程度重叠,以产生高性能CPL^[22]。本课题组基于该策略,合理设计手性液晶与发光材料的复合方式,制备了多种高质量的CPL材料。

2.1 螺旋双层耦合

无机长余辉荧光粉具有优异的物理化学稳定性、发光效率和可视化效果,展现出极大的应用价值。但是受限于较大的粒径和较差的分散性,该类发光材料与手性液晶直接物理混合会破坏体系的螺旋结构,无法形成有效的CPL特性^[23]。因此,构建可视化的圆偏振长余辉(circularly polarized long afterglow, CPLA)仍然是一项巨大的挑战。目前已报道的圆偏振长余辉或圆偏振室温磷光材料^[24-26],或是具有较长的余辉时间,但 g_{lum} 值较低,导致人眼无法区别旋光性的差异^[27];又或是具有较高的 g_{lum} 值,但余辉时间很短,无法在实际应用中展现^[28]。

基于此,本课题组采用“胶接-耦合”策略,将无机长余辉荧光粉与具有手性液晶特性的纤维素薄膜结合,得到了具有高 g_{CPLA} 值($|g_{\text{max}}| = 0.67$)和长可视化时间($t_{\text{max}} = 40 \text{ min}$)的全彩圆偏振长余辉体系(图1)^[29]。该体系呈双层薄膜结构,有效避免了物理共混对纤维素螺旋结构的破坏。

2.2 有机-无机杂化共组装

在无机体系中,除了长余辉荧光粉之外,量子点

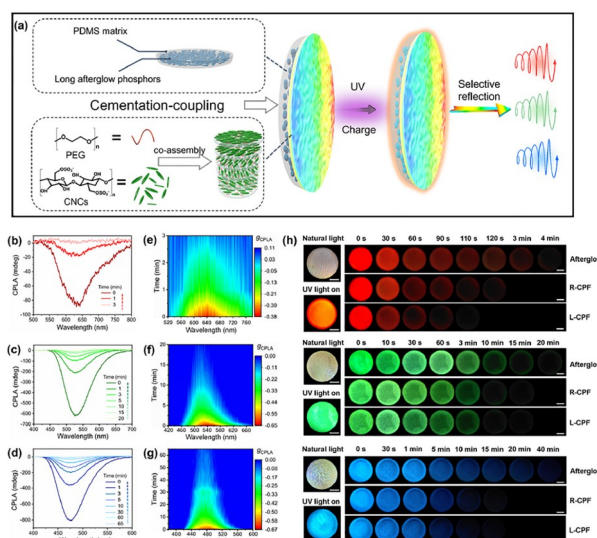


图1 CPLA复合膜的制备和性能。(a) 构建全彩CPLA复合膜的示意图。(b~d) 时间分辨CPLA光谱。(e~g) 不同余辉衰减时间下薄膜的 g_{CPLA} 值。(h) 不同颜色的CPLA薄膜在有/无偏振片时发光状态随时间和强度变化的照片。最左边图片显示的是薄膜在有/无紫外激发下的状态。其余的照片均是在365 nm紫外光下照射10 min后所观察到的现象(比例尺: 1 cm)(网络版彩图)

Figure 1 Fabrication and properties of CPLA films. (a) Schematic illustration for constructing full-color CPLA composite films. (b~d) Time-resolved CPLA spectra. (e~g) The CPLA dissymmetry factors of the films for different decay times. (h) Photographs of time- and intensity-dependent changes of light-emitting states with and without polarizing filters. Pictures in the leftmost row were shown for the films with and without UV irradiation. Other films were observed by naked eyes after exposure to 365 nm UV light for 10 min (scale bars: 1 cm) (color online).

(quantum dots, QDs)因具有宽激发、窄发射、高发光效率、高稳定性和粒径小等优点,亦常被用作CPL体系的发光单元。

基于螺旋共组装策略,本课题组将量子点InP/ZnSeS/ZnS与液晶5CB、手性掺杂剂R/S811共组装,得到一种具有CPL信号的多模态响应安全材料(multimodal responsive security materials, MRSMS),该材料可以对光、偏振、温度、电场、压力、视角等多种刺激做出响应,其最大 g_{lum} 值为0.89(图2)^[30]。

此外,我们还将白光量子点Cu-Ga-S/ZnS与手性液晶共组装,通过调控液晶的光子禁带实现全彩CPL,其最大 g_{lum} 值可达0.8(图3)。在此基础上,利用窄带滤光片可以进一步实现CPL波长的精准定制,推动了手性光电子器件的研发和下一代3D显示应用的发展(图4)^[31]。

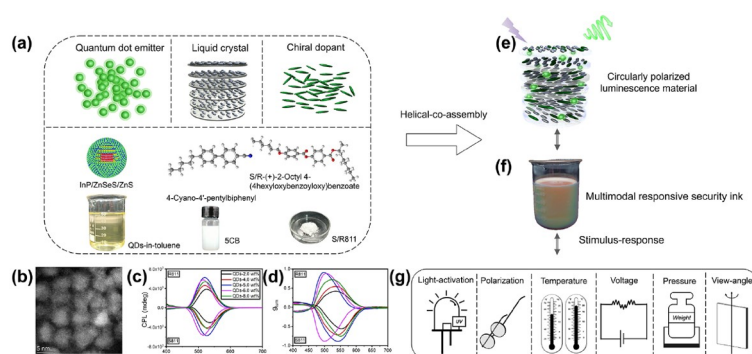


图 2 基于量子点的CPL结构和MRSMs的制备. (a) 制备CPL结构和MRSMs的组分示意图, 包括量子点(InP/ZnSeS/ZnS)、液晶(5CB)和手性掺杂剂(S811或R811). (b) InP/ZnSeS/ZnS量子点的高分辨透射电子显微镜图. (c, d) 材料含不同量子点浓度(分别为2.0 wt%, 4.0 wt%, 5.0 wt%, 6.0 wt%和8.0 wt%)下的CPL光谱和 g_{lum} . S811在混合体系中诱导产生左手性螺旋, R811诱导产生右手性螺旋. 当量子点、手性掺杂剂和液晶的重量比分别为5.0 wt%、27.4 wt%和67.6 wt%时, $|g_{lum}|$ 最大值为0.89. (e) CPL活性结构的螺旋共组装示意图. (f) MRSMs的实物照片. (g) MRSMs的多模态刺激响应性, 包括光激发、偏振、温度、电压、压力和视角(网络版彩图)

Figure 2 Fabrication of the QD-based CPL structure and MRSMs. (a) Schematic illustration of components that make up the CPL structure and MRSMs, including the QD emitter (InP/ZnSeS/ZnS), liquid crystal (5CB), and chiral dopants (S811 or R811). (b) HRTEM image of InP/ZnSeS/ZnS QDs. (c, d) CPL spectra and g_{lum} value of materials with QD contents of 2.0 wt%, 4.0 wt%, 5.0 wt%, 6.0 wt%, and 8.0 wt%, respectively. S811 induces a left-handed rotation in the hybrid system, while R811 induces a right-handed rotation. The maximum $|g_{lum}|$ value of 0.89 is obtained with the weight ratios of QDs, chiral dopant, and liquid crystal at 5.0 wt%, 27.4 wt%, and 67.6 wt%, respectively. (e) Schematic showing the designed CPL-active structure formed by a helical-coassembly process. (f) Digital photo of MRSMs. (g) External stimuli that MRSMs respond to, including light activation, polarization, temperature, voltage, pressure, and view angle (color online).

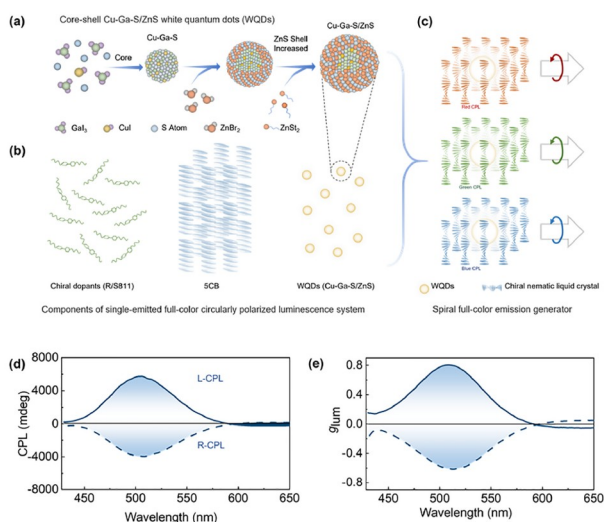


图 3 全彩CPL发射器的制备示意图及CPL性质. (a) 多步注射法合成核壳结构的Cu-Ga-S/ZnS 白光量子点. (b) CPL发射器的组成. (c) CPL发射器的组装策略示意图. (d, e) 蓝光发射器的CPL光谱和对应的 g_{lum} 值(网络版彩图)

Figure 3 Schematic illustration and CPL properties of the fabrication of the spiral full-color emission generator. (a) A multiple-step injection method for the synthesis of core shell Cu-Ga-S/ZnS white quantum dots. (b) Components of the spiral full-color emission generator. (c) Schematic drawing of the spiral full-color emission generator formed by a long-range ordered cage-like assembly strategy. (d, e) CPL spectra and the corresponding g_{lum} values of the representative spiral full-color emission generator (color online).

2.3 限域螺旋共组装

目前, 基于液晶体系的CPL发光性能已经显著提升, 但是在大多数应用场景中, 材料的液态属性导致其应用范围受到一定程度的限制. 因此, 对基于液晶的CPL材料进行有效封装是推进其走向实际应用的关键因素.

本课题组^[32]设计了一种限域螺旋共组装策略, 将发光材料与手性液晶共组装, 得到具有强CPL性能的手性前驱体, 再与明胶和阿拉伯胶水溶液乳化、凝聚并交联, 制备了具有核壳结构的CPL微胶囊, 其 g_{lum} 值高达1.6. 进一步将微胶囊分散在水中, 批量生产了发光颜色可调的CPL光子涂料, 可用于点胶打印、喷墨打印等加工技术(图5).

3 圆偏振发光材料的应用探索

综上所述, 本课题组将手性液晶与不同的发光材料相结合, 构建了一系列高性能、多响应、可视化 and 易加工的CPL材料体系. 基于该类材料, 我们进一步将其功能化加工, 探索CPL在信息交互领域的应用.

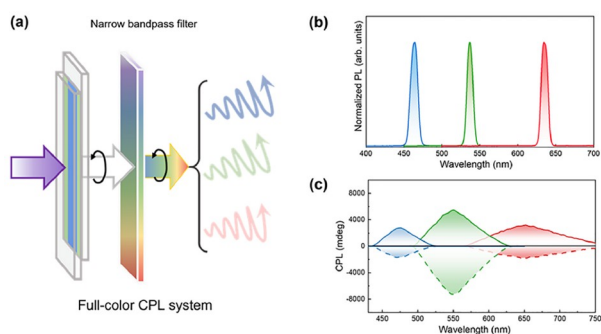


图 4 CPL的精准定制. (a) 通过在全彩CPL发射器上覆盖定制的彩色窄带滤波器实现可定制颜色的CPL体系示意图. (b, c) 可视化特定颜色的CPL体系的光致发光光谱及相应的CPL光谱(网络版彩图)

Figure 4 Customized-color CPL. (a) Schematic drawing of the customized-color CPL systems by covering customized-color narrow bandpass filters over the spiral full-color emission generator. (b, c) Photoluminescence spectra and the corresponding mirror-imaged CPL spectra of the visualized customized-color CPL system (color online).

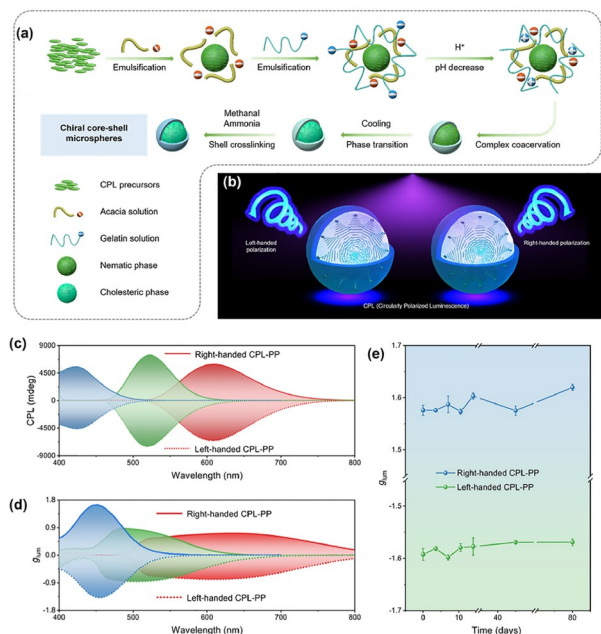


图 5 CPL光子涂料的合成. (a) 手性核壳微球的制备原理图. (b) 不同旋向的手性核壳微球在紫外光激发下分别发射出左旋和右旋CPL. (c) 红、绿、蓝光发射的光子涂料的CPL光谱. 实线(虚线)曲线对应于右旋(左旋)材料. (d) 与(c)图相对应的 g_{lum} 值. (e) 蓝光发射的CPL光子涂料在环境中保存80天的 g_{lum} 值变化. 误差对应三次测量的标准差(网络版彩图)

Figure 5 Synthesis of CPL-active photonic paints (CPL-PPs). (a) Schematic summarizing the preparation of chiral core-shell microspheres. (b) Schematic illustration of materials and the left- or right-handed CPL emitted from as-prepared microspheres upon ultraviolet irradiation. (c) CPL spectra of red-, green-, and blue-emissive CPL-PPs. The solid (dashed) curves correspond to right (left)-handed materials. (d) Calculated g_{lum} values corresponding to (c). (e) g_{lum} evolution of blue-emissive CPL-PPs under ambient atmosphere for 80 days. Error bars correspond to the SD of three measurements (color online).

3.1 CPL显示器件

1997年, Meijer等^[33]报道了第一个手性共轭聚合物的圆偏振电致发光材料. 随后, 圆偏振发光二极管(circularly polarized light-emitting diodes, CP-LED)由于可以直接产生圆偏光, 降低能量损耗, 在3D显示中具有较高的应用潜力, 成为近些年的研究热点^[34~36].

基于所构筑的单发射全彩CPL体系, 我们将白色发光的CPL材料涂覆在市售的UV-LED芯片上, 构建了具有明亮的白光发射的光致CPL器件. 在覆盖不同的窄带滤波片后, 可精准实现红光(633 nm)、绿光(540 nm)和蓝光(455 nm)发射. 通过进一步优化, 我们获得独立式液晶聚合物薄膜, 并将其附着于发白光的量子点发光二极管(quantum dot light-emitting diodes, QLED)表面, 进一步构建了电致发光的CPL器件^[31]. 此方法为研究CP-LED器件的开发和3D显示应用指引了新的方向(图6).

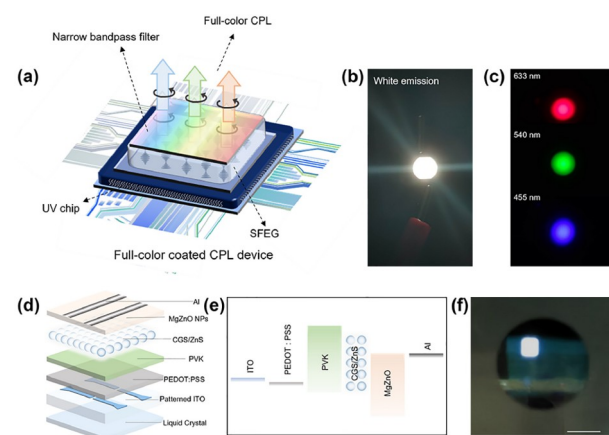


图 6 手性光电器件. (a) 定制彩色涂覆式光致CPL器件的结构概念图. (b, c) 白光发射和彩色CPL器件的照片. (d) 电致发光CPL器件原理图. (e) 多层白光QLED的能带图(铜锡氧化物(ITO)、聚(3,4-二氧乙撑噻吩):聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)、聚乙烯基咔唑(PVK)、白光量子点(CGS/ZnS)). (f) 电致发光CPL器件的发光照片. 比例尺: 5 mm (网络版彩图)

Figure 6 Schematic illustration showing the CPL device fabrication. (a) The structure diagram of the proof-of-concept customized-color coated CPL devices. Photographs of the (b) white-emission and (c) customized-color coated CPL devices. (d) Schematic of the electroluminescent CPL device. (e) Energy band diagram of a solution-processed, bottom-emitting multilayered white QLED. Indium-tin oxide (ITO), poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS), polyvinylcarbazole (PVK), white quantum dots (CGS/ZnS). (f) Bright image of the electroluminescent CPL device. Scale bar: 5 mm (color online).

3.2 CPL材料的信息交互应用

为适应多应用场景的需求, 本课题组对具有多种刺激响应的CPL材料进行了液晶盒封装, 制作了具有温度示警和信息加密功能的智能标签, 展示了一种防伪集成系统, 其多模态响应的交互式/可变信息加密实

现了高破解难度的防伪效果(图7). 此外, 我们将CPL材料封装到聚合物外壳中, 开发了一种高性能CPL纤维的制作工艺. 将纤维进一步加工成智能织物, 可实现与外部控制系统的交互, 扩展了该材料在柔性3D显示领域的应用(图8)^[30].

为进一步推进CPL材料在3D显示和可穿戴器件

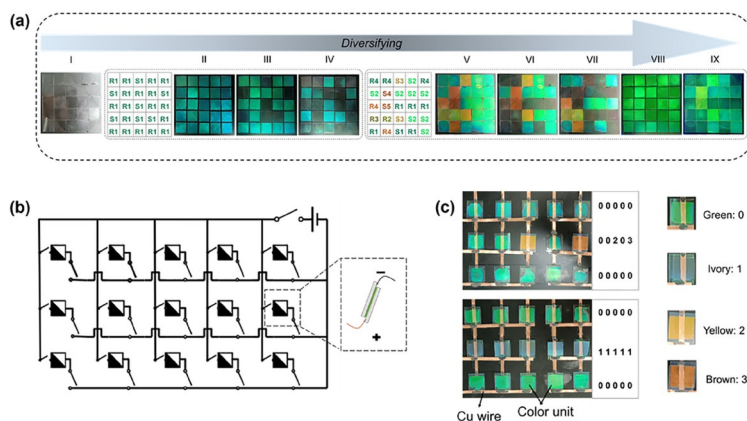


图 7 信息加密和防伪设计. (a) 由MRSMs组合的信息加密矩阵. I: 室温(25 °C)下的无色阵列; II和V: 不同手性掺杂剂和不同组分重量比的MRSMs构成的彩色阵列; III、IV、VI、VII: 左旋和右旋偏振片下观察到的互补图像; VIII: 365 nm光激发获得亮绿色; IX: 紫外激发和偏振态下的多色阵列. (b) 电控信息交互式防伪器件的电路设计图. (c) 由液晶盒的结构色所代表的数字代码在电场中的变化. 颜色的单位面积是9 cm² (网络版彩图)

Figure 7 Information encryption and anticounterfeiting design. (a) Information encryption matrix composed by MRSMs. I: colorless array obtained at room temperature (25 °C); II and V: colorful arrays using materials with different chiral dopants and different component weight ratios; III, IV, VI, and VII: complementary images observed *via* left- and right-handed circularly polarized filters; VIII: bright-green color achieved by 365 nm light excitation; IX: polychrome array, activated using UV irradiation and polarization. (b) Designed circuit of electronic interactive anti-counterfeiting device. (c) Digital code represented by the cell's structural color tuned to colorless with an applied voltage, showing the information programmability of our design. The area of color units is 9 cm² (color online).

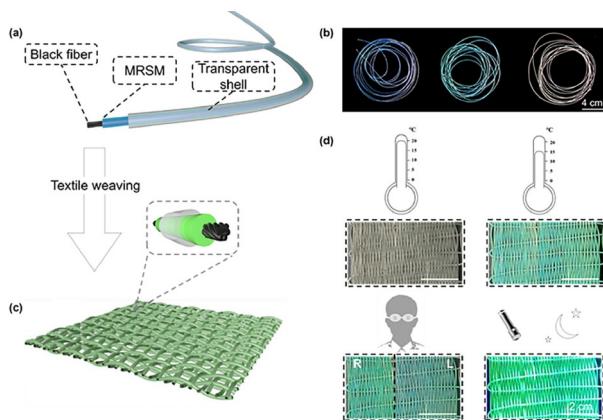


图 8 基于MRSMs的智能纤维. (a) MRSMs纤维结构示意图. (b) 不同颜色的纤维照片. (c) 纤维织物. (d) 随外界环境变化而变色的智能织物. 通过温度调节显示透明或绿色(上), 通过偏振片产生明暗对比(左下)或在紫外激发下显示亮绿色(右下) (网络版彩图)

Figure 8 MRSM-based intelligent textile. (a) Schematic illustrating the MRSM-composed fiber fabricated. (b) Digital photo of fibers with different colors. (c) Weaving the obtained fibers to form a fabric. (d) The fabric, as an intelligent label, demonstrates color-adaptable function with external environmental changes. It shows transparency or green color *via* temperature tuning (top two panels in D), chiaroscuro using circularly polarized filters (down, left panel) or bright green under light excitation (down, right panel) (color online).

领域的应用实践, 本课题组采用点胶打印技术, 以CPL光子涂料为油墨, 在多种基底上成功绘制出不同的图形和涂层, 进而制造出具有CPL特性的纺织品。此外, 我们还制作出一块大尺寸(超过 $150\text{ cm} \times 40\text{ cm}$)的CPL纺织品, 充分展现了该光子涂料在制造大面积CPL纺织品及柔性显示方面的潜力(图9)。基于此, 我们打印出由两组正交圆偏振发光的全彩像素组成的图像阵列, 利用CPL的旋光性产生双目视差, 呈现出3D立体效果。柔性3D显示面板集成到可穿戴设备(如智能手表)中的概念化设计为虚拟现实和医学成像等领域提供了全新的研究思路与方向(图10)^[32]。

4 总结与展望

CPL材料具有独特的光学活性, 在光电器件、信息安全、3D显示、成像传感等领域备受瞩目。传统的不对称有机分子和具有本征手性的无机纳米材料一般 g_{lum} 值较低, 难以满足实际应用的需求。由于胆甾相液晶在形成过程中会产生分子水平到宏观水平的手性转移过程, 为材料的手性环境调控和放大 g_{lum} 提供了可能性。

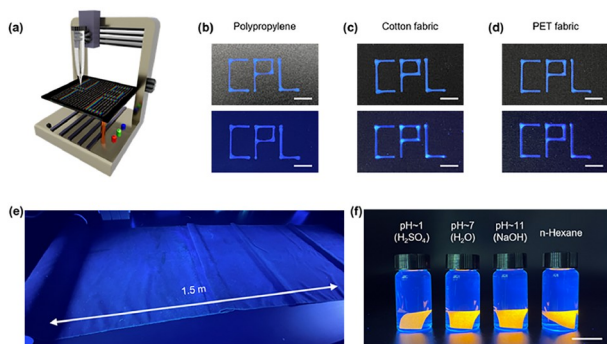


图9 CPL发光图案的打印。(a) 点胶打印示意图。(b-d) 不同基材上的“CPL”图案: 依次从硬质聚丙烯板到柔性棉织物和PET织物。比例尺: 1 cm。(e) 由CPL光子涂料打印的1.5 m长的发光纺织品照片。(f) 发光织物在酸性溶液、纯水、碱性溶液、正己烷溶液中的稳定性测试。比例尺: 5 mm (网络版彩图)

Figure 9 Printing CPL-PPs to form circularly polarized luminous patterns. (a) Dispenser for direct pattern writing with a moving nozzle. (b-d) “CPL” patterns on different substrates: from the rigid polypropylene plate to flexible cotton fabric and flexible PET fabric. Scale bars: 1 cm. (e) Photograph of a 1.5-m-long luminous textile printed by CPL-PPs. (f) Photographs of the luminous fabrics after exposure in the acid solution, pure water, basic solution, and *n*-hexane solution for 7 days, respectively. Scale bar: 5 mm (color online).

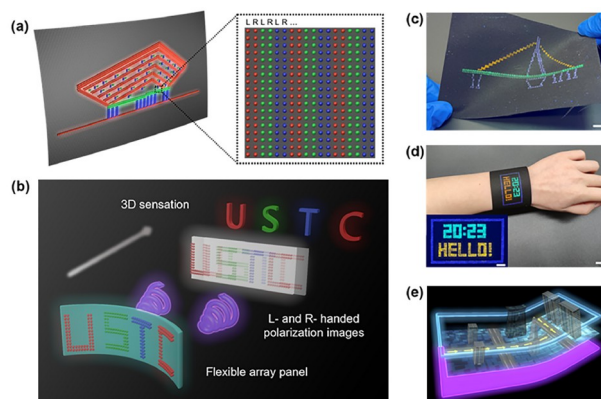


图10 基于正交CPL矩阵的柔性3D显示。(a) 柔性CPL阵列面板的示意图。其由通过在柔性衬底上打印CP-PPs获得的像素化CPL阵列组成。(b) 柔性3D显示器的制作策略。打印两组正交圆偏振发光矩阵, 左旋和右旋图像通过偏振片分别进入左右眼, 利用双目视差原理产生3D效果。(c) 基于正交CPL矩阵的柔性3D显示面板的照片。比例尺: 1 cm。(d) 可穿戴手表式柔性3D显示器的照片。比例尺: 1 cm。插图是显示面板的照片。比例尺: 5 mm。(e) 可穿戴3D显示设备的概念设计, 展示智能穿戴上显示的立体导航信息(网络版彩图)

Figure 10 Flexible 3D display based on printed orthogonal CPL matrix. (a) Schematic diagram of a flexible array panel, containing pixelated CPL arrays obtained by printing CPL-PPs on the flexible substrates. (b) Fabrication strategy of the flexible 3D display. Left- and right-handed polarization images can be achieved from flexible array panels with printed CPL-active orthogonal matrix. Through a polarization glass, the two images enter the left and right eyes, respectively, and the brain can fuse the two images into 3D sensation. (c) Photograph of the bent flexible 3D display panel based on the orthogonal CPL matrix while a pattern was displayed on it. Scale bar: 1 cm. (d) Photograph of a wearable watch-like flexible 3D display wearing on the wrist. Scale bar: 1 cm. Inset photograph showing the display panel. Scale bar: 5 mm. (e) Conceptual image of a wearable 3D display device, demonstrating the stereoscopic navigation information that is displayed on the smart wear (color online).

本文系统介绍了本课题组在CPL领域的系列工作: 利用各种荧光材料和手性液晶的共组装特性, 构筑了一系列高性能的CPL材料体系, 并进一步利用各种封装技术对CPL材料进行功能化加工和器件集成, 探索其在信息交互领域的应用。

但是, 这些应用尚处在初级阶段, 仍需不断推进。CPL性能在信息安全领域虽然有一定的优越性, 但如何更进一步地将其智能化并应用于实际生活需要进一步探索; 目前虽在一定程度上实现了3D显示效果, 并设计将3D显示面板集成到柔性器件上, 但是该应用仍停留在光致发光的基础上, 呈现静态的显示效果, 所以如何实现电致圆偏光的动态3D效果仍然是一项巨大的挑战。

参考文献

- 1 Bailey J, Chrysostomou A, Hough JH, Gledhill TM, McCall A, Clark S, Menard F, Tamura M. *Science*, 1998, 281: 672–674
- 2 Zhang X, Xu Y, Valenzuela C, Zhang X, Wang L, Feng W, Li Q. *Light Sci Appl*, 2022, 11: 223
- 3 Brooks WH, C. Guida W, G. Daniel K. *Curr Topics Med Chem*, 2011, 11: 760–770
- 4 Han D, Li C, Jiang C, Jin X, Wang X, Chen R, Cheng J, Duan P. *Aggregate*, 2021, 3: e148
- 5 Du C, Li Z, Zhu X, Ouyang G, Liu M. *Nat Nanotechnol*, 2022, 17: 1294–1302
- 6 Song F, Xu Z, Zhang Q, Zhao Z, Zhang H, Zhao W, Qiu Z, Qi C, Zhang H, Sung HHY, Williams ID, Lam JWY, Zhao Z, Qin A, Ma D, Tang BZ. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1800051
- 7 MacKenzie LE, Pal R. *Nat Rev Chem*, 2020, 5: 109–124
- 8 Tempelaar R, Stradomska A, Knoester J, Spano FC. *J Phys Chem B*, 2011, 115: 10592–10603
- 9 Zhan X, Xu FF, Zhou Z, Yan Y, Yao J, Zhao YS. *Adv Mater*, 2021, 33: 2104418
- 10 Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats MA, Gaburro Z, Capasso F. *Nano Lett*, 2012, 12: 6328–6333
- 11 Sang Y, Han J, Zhao T, Duan P, Liu M. *Adv Mater*, 2019, 32: 1900110
- 12 Zhang Y, Yu S, Han B, Zhou Y, Zhang X, Gao X, Tang Z. *Matter*, 2022, 5: 837–875
- 13 Sánchez-Carnerero EM, Moreno F, Maroto BL, Agarrabeitia AR, Ortiz MJ, Vo BG, Muller G, Moya S. *J Am Chem Soc*, 2014, 136: 3346–3349
- 14 Otani T, Tsuyuki A, Iwachi T, Someya S, Tateno K, Kawai H, Saito T, Kanyiva KS, Shibata T. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 3906–3910
- 15 Jiang C, Pan P, Jin X, Duan P. *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 4302–4317 (in Chinese) [蒋承逾, 潘佩琳, 金雪, 段鹏飞. 科学通报, 2023, 68: 4302–4317]
- 16 Gao JX, Zhang WY, Wu ZG, Zheng YX, Fu DW. *J Am Chem Soc*, 2020, 142: 4756–4761
- 17 Zhang M, Wang Y, Zhou Y, Yuan H, Guo Q, Zhuang T. *Nanoscale*, 2022, 14: 592–601
- 18 Kato T, Uchida J, Ichikawa T, Soberats B. *Polym J*, 2017, 50: 149–166
- 19 Nayani K, Kim YK, Abbott NL. *Nat Mater*, 2017, 17: 14–15
- 20 Bisoyi HK, Li Q. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55: 2994–3010
- 21 San Jose BA, Matsushita S, Akagi K. *J Am Chem Soc*, 2012, 134: 19795–19807
- 22 Zhao B, Yu H, Pan K, Tan Z', Deng J. *ACS Nano*, 2020, 14: 3208–3218
- 23 Liu S, Liu X, Wu Y, Zhang D, Wu Y, Tian H, Zheng Z, Zhu WH. *Matter*, 2022, 5: 2319–2333
- 24 Li H, Li H, Wang W, Tao Y, Wang S, Yang Q, Jiang Y, Zheng C, Huang W, Chen R. *Angew Chem Int Ed*, 2020, 59: 4756–4762
- 25 Li H, Gu J, Wang Z, Wang J, He F, Li P, Tao Y, Li H, Xie G, Huang W, Zheng C, Chen R. *Nat Commun*, 2022, 13: 429
- 26 An S, Gao L, Hao A, Xing P. *ACS Nano*, 2021, 15: 20192–20202
- 27 Hao W, Li Y, Liu M. *Adv Opt Mater*, 2021, 9: 2100452
- 28 Xu M, Wu X, Yang Y, Ma C, Li W, Yu H, Chen Z, Li J, Zhang K, Liu S. *ACS Nano*, 2020, 14: 11130–11139
- 29 Zhao S, Li G, Guo Q, Wang Y, Zhang M, Zhou Y, Jin S, Zhu M, Zhuang T. *Adv Opt Mater*, 2023, 11: 2202933
- 30 Guo Q, Zhang M, Tong Z, Zhao S, Zhou Y, Wang Y, Jin S, Zhang J, Yao HB, Zhu M, Zhuang T. *J Am Chem Soc*, 2023, 145: 4246–4253
- 31 Zhou Y, Wang Y, Song Y, Zhao S, Zhang M, Li G, Guo Q, Tong Z, Li Z, Jin S, Yao HB, Zhu M, Zhuang T. *Nat Commun*, 2024, 15: 251
- 32 Zhang M, Guo Q, Li Z, Zhou Y, Zhao S, Tong Z, Wang Y, Li G, Jin S, Zhu M, Zhuang T, Yu SH. *Sci Adv*, 2023, 9: eadi9944
- 33 Peeters E, Christiaans MPT, Janssen RAJ, Schoo HFM, Dekkers HPJM, Meijer EW. *J Am Chem Soc*, 1997, 119: 9909–9910
- 34 Frédéric L, Desmarchelier A, Favereau L, Pieters G. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2010281
- 35 Zhong XS, Yuan L, Liao XJ, Hu JJ, Xing S, Song SQ, Xi JQ, Zheng YX. *Adv Mater*, 2024, 36: 2311857
- 36 Yang Y, da Costa RC, Smilgies DM, Campbell AJ, Fuchter MJ. *Adv Mater*, 2013, 25: 2624–2628

Advancing circularly polarized luminescence materials for practice

Shanshan Zhao, Taotao Zhuang^{*}

Hefei National Research Center for Physical Sciences at the Microscale, School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Corresponding author (email: tzhuang@ustc.edu.cn)*

Abstract: Circularly polarized luminescence (CPL) materials—offering unique optical rotation—have the potential for photoelectronic devices, information security, 3D displays, and more. Traditional CPL materials are limited to practice owing to their low luminescence asymmetry factors, complex synthesis, and lack of processability. As a typical quasi-one-dimensional photonic crystal, cholesteric liquid crystal possesses a periodic helical structure and chiral amplification function, providing an effective route to enhance the luminescence asymmetry factor of CPL materials. In this paper, we systematically introduce the synthesis and information interaction applications of high-performing chiral liquid crystal-based CPL materials.

Keywords: circularly polarized luminescence, luminescence asymmetry factor, 3D display, information interaction

doi: [10.1360/SSC-2024-0065](https://doi.org/10.1360/SSC-2024-0065)