



不同溶剂中CsPbBr₃钙钛矿纳米晶的制备及性能

方骏, 陈泽廷, 沈江荣, 林鹏程

引用本文:

方骏, 陈泽廷, 沈江荣, 等. 不同溶剂中CsPbBr₃钙钛矿纳米晶的制备及性能[J]. *发光学报*, 2020, 41(11): 1376–1382.

FANG Jun, CHEN Ze-ting, SHEN Jiang-rong, et al. Property of CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystals Prepared in Different Solvents[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(11): 1376–1382.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJL.20200187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CsPbBr₃钙钛矿量子点微晶的制备及发光性能

Preparation and Luminescence Properties of CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dot Microcrystals

发光学报. 2019, 40(9): 1073–1078 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1073>

微通道反应器合成高质量的无机钙钛矿量子点及其LED应用

Synthesis of High Quality Inorganic Perovskite Quantum Dots via Microchannel Reactor and Their Application in LED

发光学报. 2018, 39(4): 440–448 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183904.0440>

纳米ZnO墨水的溶剂及浓度优化及其在钙钛矿太阳能电池中的应用

Solvent and Concentration Optimization of Nano-ZnO Inks and Their Application in Perovskite Solar Cells

发光学报. 2016, 37(3): 265–273 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163703.0265>

基于钙钛矿量子点荧光太阳集光器的蒙特卡罗光子追踪模拟

Monte-Carlo Ray-tracing Simulations of Perovskite Quantum Dots-based Luminescent Solar Concentrators

发光学报. 2019, 40(4): 484–490 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194004.0484>

利用PNA添加剂来调控钙钛矿薄膜结晶和覆盖率实现高效太阳能电池

Tuning The Crystal-growth and Coverage of Perovskite Thin-films for Highly Efficient Solar Cells by Using Polyacrylonitrile Additive

发光学报. 2017, 38(7): 897–904 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173807.0897>

文章编号: 1000-7032(2020)11-1376-07

不同溶剂中 CsPbBr₃钙钛矿纳米晶的制备及性能

方 骏, 陈泽廷, 沈江荣, 林鹏程*

(广东工业大学材料与能源学院 广东省功能软凝聚态物质重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 全无机钙钛矿纳米晶由于具有高量子产率、窄线宽和可见光全波段发光特性,在功能光学材料和光学器件等领域具有广阔的应用前景。本文在室温下通过液相沉淀法制备 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶,研究了溶剂密度、极性和粘度对钙钛矿纳米晶的反应过程、晶体结构、微观形貌和光学性能的影响。结果表明,通过改变反应溶剂的密度可以实现 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶在反应器上部、下部以及整个液相中的生长。溶剂的极性越大,制备的 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的结晶度越低、发光强度和稳定性越低。过高的溶剂粘度不利于高质量 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的制备。本文提出的多种溶剂下快速制备 CsPbBr₃ 纳米晶的方法有望进一步促进其在太阳能电池、激光器、光探测器以及发光二极管等领域的应用。

关键词: CsPbBr₃; 液相沉淀法; 溶剂; 钙钛矿

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20200187

Property of CsPbBr₃ Perovskite Nanocrystals Prepared in Different Solvents

FANG Jun, CHEN Ze-ting, SHEN Jiang-rong, LIN Peng-cheng*

(Guangdong Provincial Key Laboratory on Functional Soft Condensed Matter, Materials and Energy School,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding Author, E-mail: pclin@gdut.edu.cn

Abstract: All inorganic perovskite nanocrystals have broad application prospects in functional optical materials and optical devices due to their high quantum yield, narrow line width and full band visible light emission characteristics. The effect of solvent density, polarity and viscosity on the reaction process, crystal structure, microstructure and optical properties of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals was studied in this work. The results show that the growth of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals in the upper, lower and whole liquid phase of the reactor can be realized by changing the density of the reaction solvent. The higher the polarity of the solvent, the lower the crystallinity, the lower the luminescence intensity and stability. High solvent viscosity is not conducive to the preparation of high quality CsPbBr₃ perovskite nanocrystals. The method proposed in this paper is expected to further improve its application in solar cells, lasers, photodetectors and light-emitting diodes.

Key words: CsPbBr₃; liquid-phase precipitation; solvent; perovskite

收稿日期: 2020-07-02; 修订日期: 2020-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61805047); 广州市科创委对外科技合作项目(201807010108); 广东省自然科学基金(2019A1515011379)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61805047); Guangzhou Science Technology and Innovation Commission (201807010108); Natural Science Foundation of Guangdong Province(2019A1515011379)

1 引 言

量子点, 又称半导体纳米晶, 是一种粒径小且具有明显量子限域效应的半导体纳米材料。与传统的多色荧光粉相比, 半导体纳米晶具有荧光光谱半峰宽窄、发射光谱宽、成本低等诸多优势, 是一种极具吸引力的新型发光材料^[1]。然而, 传统的 II-IV 族半导体纳米晶的缺点在于: (1) 材料制备的重复性差, 尺寸分布不一, 严重限制其发光特性; (2) 材料尺寸小, 纳米材料比表面积过大, 从而产生了大量表面缺陷, 影响了荧光量子产率。因此, 迫切需要开发出新型半导体纳米晶材料^[2-3]。

近几年来, 由于全无机 CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) 钙钛矿纳米晶具有高量子产率、窄线宽和可见光全波段发光等优异的光电性能, 因而受到了研究者的极大关注^[4-6]。CsPbX₃ 纳米晶已经在太阳能电池^[7-10]、激光器^[11-13]、光探测器^[14-17]以及发光二极管^[18-21]等光电领域具有十分广泛的应用。

全无机钙钛矿纳米晶通常采用高温热注射法制备^[22-27]。然而, 这种制备方法需要高温、惰性气体以及局部注射, 严重阻碍了其大规模应用。近年来, 陆续报道了其他制备方法避免在高温下合成全无机钙钛矿纳米晶。2016 年, Li 等^[28]首先提出室温下采用过饱和结晶法制备全无机钙钛矿纳米晶。在典型的 CsPbBr₃ 合成中, 将 PbBr₂ 和 CsBr 溶于二甲基甲酰胺或者二甲基亚砜中作为前驱体溶液, 再加入油酸和油胺作为表面配体稳定前驱体溶液, 随后在剧烈搅拌下将前驱体溶液快速加入甲苯中, 几秒后便能制备得到高性能的全无机钙钛矿纳米晶。2019 年, Wei 等^[29]提出了在微流控芯片中制备全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶, 该反应过程在室温、流动状态下实现。2020 年, Lin 等^[30]进一步研究了室温下在微流控芯片中制备掺杂型的全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶。采用上述这些合成方法在室温下不需要惰性气体保护也可以快速合成高性能的全无机钙钛矿纳米晶。

本文在室温下通过液相沉淀法制备 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶, 考察了溶剂密度、极性和粘度对钙钛矿纳米晶的反应过程、晶体结构、微观形貌和光学性能的影响。本文提出的多种溶剂中快速制备 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的方法有望进一步拓展其在太阳能电池、激光器、光探测器以及发光二极管

等光电领域的应用。

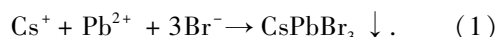
2 实 验

2.1 材料

溴化铅 (PbBr₂)、溴化铯 (CsBr)、二甲基甲酰胺 (DMF)、油酸、油胺、甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇、油酸山梨醇酯均购自阿拉丁试剂公司, 均为分析纯, 所有试剂无需进一步纯化即可直接使用。

2.2 材料的合成

如图 1 所示, 本文采用室温下的液相沉淀法制备钙钛矿 CsPbBr₃ 纳米晶。首先在超声辅助下将 CsBr 和 PbBr₂ 溶解于二甲基甲酰胺中, 得到无色透明的离子溶液。然后在剧烈搅拌的条件下, 将一定体积的上述离子溶液迅速加入到甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂中。由于 Cs⁺、Pb²⁺ 和 Br⁻ 在这些不良溶剂中难以有效溶解, 这些离子将同步析出, 形成钙钛矿 CsPbBr₃ 纳米晶。反应方程式如下:



在每一种不良溶剂的反应体系中, 不良溶剂的体积固定为 10 mL, 含有 Cs⁺、Pb²⁺ 和 Br⁻ 的离子溶液的体积分别是 0.1, 0.3, 0.5 mL, 其体积比为 100, 33.3, 20。这样的高比例不良溶剂可以实现前驱体离子的充分析出和结晶, 促进 CsPbBr₃ 纳米晶的生成。

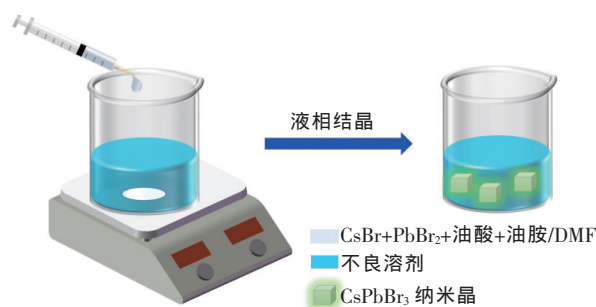


图 1 合成 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the synthesis process of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals

2.3 测试和表征

使用数码相机 (Canon, 6D) 拍摄小瓶中 CsPbBr₃ 纳米晶的数字图像。通过粉末衍射仪 (Empyrean, PANalytical), 使用未过滤的 CuK α 辐射 ($\lambda = 0.15406 \text{ nm}$) 在 45 kV 和 40 mA 下获得 CsPbBr₃ 纳米晶的 X 射线衍射 (XRD) 数据。通过拍摄透

射电子显微镜 (TEM) 图像, 可以在 JEOL JEM-2100 TEM 上观察 200 kV 加速电压下 CsPbBr_3 纳米晶的微观结构。使用 UV-Vis-NIR 光谱仪 (Lengguang, UV-9000) 测试吸收光谱。使用荧光光谱仪 (HORIBA Scientific, Jobin Yvon) 记录 CsPbBr_3 纳米晶的荧光光谱。通过荧光显微镜 (Mingmei, 4X) 获得 CsPbBr_3 量子点的荧光图像。整个研究过程中的温度由 Linkam 加热和冷却阶段控制, 速率为 $1\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

图 2 所示为不同溶剂中采用液相沉淀法制备得到的产物, 日光下呈现淡黄色或者深黄色, 在紫外光辐照下基本都呈现绿色。从图中可看出, CsPbBr_3 纳米晶在液相中的反应位置是不尽相同的。在甲苯、四氢呋喃和油酸山梨醇酯中, 产物的荧光呈现在整个反应体系中, 这是由于甲苯的密度与产物配体的密度接近。在二氯甲烷中, 产物的

荧光呈现在反应体系的上部分, 这是由于二氯甲烷的密度比产物配体的密度大。在异丙醇和乙醇中, 产物的荧光呈现在反应体系的下部分, 这是由于异丙醇和乙醇的密度比产物配体的密度小。此外, 随着离子溶液体积的增加, 产物的荧光强度也随之增强, 这是由生成的 CsPbBr_3 纳米晶的质量增加导致的。由于甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂的极性和粘度各不相同, CsPbBr_3 纳米晶的生长过程是有差异的^[31-33]。由于 Cs^+ 、 Pb^{2+} 和 Br^- 等前驱体离子在甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃和乙醇中的溶解性是依次增强的, 导致前驱体离子的析出程度逐渐减小, 得到的 CsPbBr_3 纳米晶也逐渐减少。需要特别指出的是, 虽然 Cs^+ 、 Pb^{2+} 和 Br^- 等前驱体离子在油酸山梨醇酯中的溶解性很低, 有利于离子的析出和纳米晶的生成, 但是其粘度太大, 导致离子析出后的碰撞和结合受阻, 同样不利于纳米晶的生成。

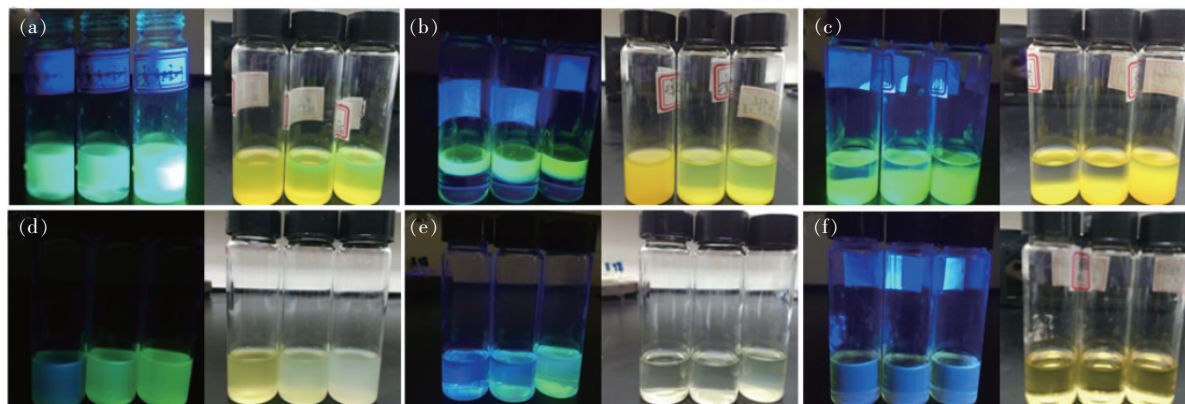


图 2 不同溶剂中制备 CsPbBr_3 纳米晶的荧光图片和日光下图片 (激发波长 365 nm), 样品分别在甲苯 (a)、二氯甲烷 (b)、异丙醇 (c)、四氢呋喃 (d)、乙醇 (e) 和油酸山梨醇酯 (f) 中制备。每一组的 3 个样品瓶中, 前驱体离子溶液的体积从左到右分别是 0.1, 0.3, 0.5 mL。

Fig. 2 Fluorescence pictures and sunlight pictures of CsPbBr_3 nanocrystals prepared in different solvents (excitation wavelength 365 nm). The samples were prepared in toluene (a), methylene chloride (b), isopropanol (c), tetrahydrofuran (d), ethanol (e), and sorbitol oleate (f), respectively. In each group of three sample bottles, the volume of precursor ion solution is 0.1, 0.3, 0.5 mL respectively.

图 3 是在甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂中制备的 CsPbBr_3 纳米晶的 X 射线衍射图谱。从图中可以看出, 在不良溶剂甲苯和二氯甲烷中结晶析出的纳米晶具有很强的衍射峰, 与标准 X 射线衍射图谱是匹配的。在异丙醇和四氢呋喃中结晶析出的纳米晶的衍射峰显著减弱。在乙醇和油酸山梨醇酯

中结晶析出的纳米晶的衍射峰基本消失。说明钙钛矿 CsPbBr_3 制备过程中反应溶剂对纳米晶的晶体结构具有重要影响, 强极性溶剂和高粘度溶剂会抑制纳米晶的形成过程。

图 4 是在甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂中制备的 CsPbBr_3 纳米晶的透射电镜图。从图中可以看出, 在

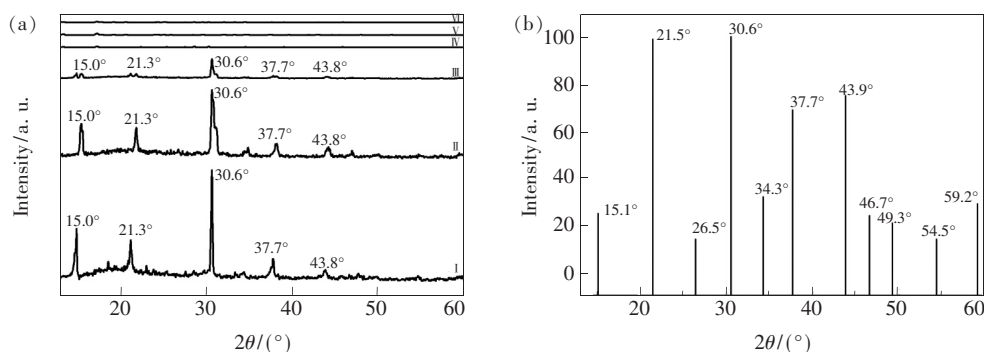


图 3 (a)不同溶剂中制备 CsPbBr₃ 的 X 射线衍射图谱,样品分别在甲苯(I)、二氯甲烷(II)、异丙醇(III)、四氢呋喃(IV)、乙醇(V)和油酸山梨醇酯(VI)中制备(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL);(b)CsPbBr₃ 的标准 X 射线衍射图谱(PDF No. 54-0752)。

Fig. 3 (a) X-ray diffraction patterns of CsPbBr₃ prepared in different solvents. The samples were prepared in toluene(I), methylene chloride(II), isopropanol(III), tetrahydrofuran(IV), ethanol(V) and sorbitol oleate(VI) (the volume of precursor ion solution is 0.1 mL). (b) Standard X-ray diffraction patterns of CsPbBr₃ (PDF No. 54-0752).

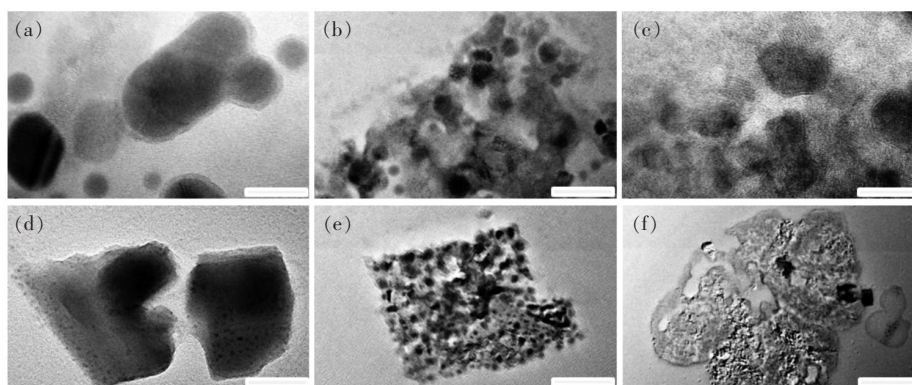


图 4 不同溶剂中制备 CsPbBr₃ 的透射电镜照片,样品分别在甲苯(a)、二氯甲烷(b)、异丙醇(c)、四氢呋喃(d)、乙醇(e)和油酸山梨醇酯(f)中制备(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL),标尺 10 nm。

Fig. 4 Transmission electron micrographs of CsPbBr₃ prepared in different solvents. The samples were prepared in toluene(a), dichloromethane(b), isopropanol(c), tetrahydrofuran(d), ethanol(e), and sorbitol oleate(f) (the volume of the precursor ion solution is 0.1 mL). The scale is 10 nm.

甲苯中结晶析出的纳米晶具有清晰的晶粒结构,随着反应溶剂极性的增强,晶粒发生团聚,尺寸增大。

图 5 是在甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂中制备的产物的吸收光谱。从图中可以看出,在甲苯、二氯甲烷和异丙醇中反应得到的 CsPbBr₃ 纳米晶在 509 nm 附近存在特征吸收^[34-35]。在四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等溶剂中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶在该区域不存在明显的光吸收。

图 6 是在甲苯、二氯甲烷、异丙醇、四氢呋喃、乙醇和油酸山梨醇酯等不良溶剂中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的荧光发射光谱。从图中可以看出,在甲苯、二氯甲烷和异丙醇中反应得到的 CsPb-

Br₃ 纳米晶在 537 nm 处存在特征的荧光发射峰,在四氢呋喃和乙醇中反应得到的 CsPbBr₃ 纳米晶分别在 532 nm 和 530 nm 处存在特征的荧光发射峰。在油酸山梨醇酯中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶在可见光区基本不存在荧光发射。荧光发射波长发生的蓝移现象可能是由于不同反应溶剂中制备的纳米晶的晶格结构发生变化引起的^[36]。此外,纳米晶的相对荧光强度随着反应溶剂极性的增强逐渐减弱。

为了比较在不同溶剂下制备的钙钛矿 CsPbBr₃ 纳米晶的稳定性,选取了在甲苯、异丙醇和乙醇中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶作为研究样本。将 3 个样品置于 120 °C 的密闭空间中,每隔一段时间记录它们的荧光图片。如图 7、图 8 所示,在初始

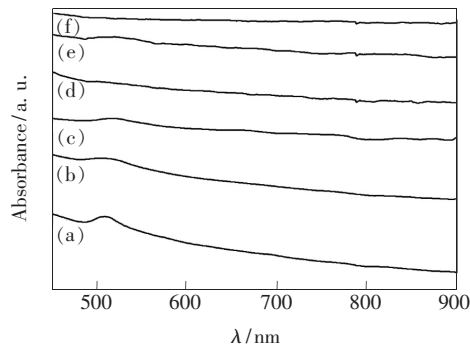


图 5 不同溶剂中制备 CsPbBr₃ 的可见吸收光谱,样品分别在甲苯(a)、二氯甲烷(b)、异丙醇(c)、四氢呋喃(d)、乙醇(e)和油酸山梨醇酯(f)中制备(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL)。

Fig. 5 Visible absorption spectra of CsPbBr₃ prepared in different solvents. The samples were prepared in toluene (a), methylene chloride (b), isopropanol (c), tetrahydrofuran (d), ethanol (e) and sorbitol oleate (f) (the volume of precursor ion solution is 0.1 mL).

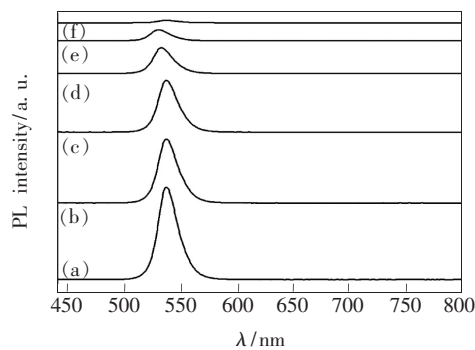


图 6 不同溶剂中制备 CsPbBr₃ 的荧光光谱,样品分别在甲苯(a)、二氯甲烷(b)、异丙醇(c)、四氢呋喃(d)、乙醇(e)和油酸山梨醇酯(f)中制备(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL)。

Fig. 6 Fluorescence spectra of CsPbBr₃ prepared in different solvents. The samples were prepared in toluene (a), dichloromethane (b), isopropanol (c), tetrahydrofuran (d), ethanol (e) and sorbitol oleate (f) (the volume of precursor ion solution is 0.1 mL).

状态下,甲苯、异丙醇和乙醇中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的发光强度依次减弱。随着时间的推移,在甲苯和异丙醇中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的发光强度降低得很缓慢,在乙醇中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的发光强度降低得很快,CsPbBr₃ 纳米晶发光强度的降低主要取决于高温引起的晶体结构的变化。上述现象说明,在甲苯、异丙醇和乙醇中制备的 CsPbBr₃ 纳米晶的发光稳定性依次减弱。

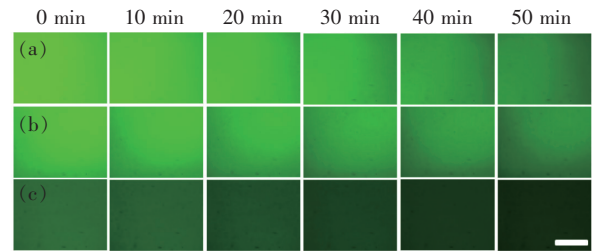


图 7 CsPbBr₃ 纳米晶在 120 °C 下的荧光图像随时间的变化,样品分别在甲苯(a)、异丙醇(b)和乙醇(c)中制备(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL),标尺 100 μm。

Fig. 7 Fluorescence image of CsPbBr₃ nanocrystals at 120 °C with time. The samples were prepared in toluene (a), isopropanol (b) and ethanol (c) (the volume of the precursor ion solution is 0.1 mL) respectively. The scale is 100 μm.

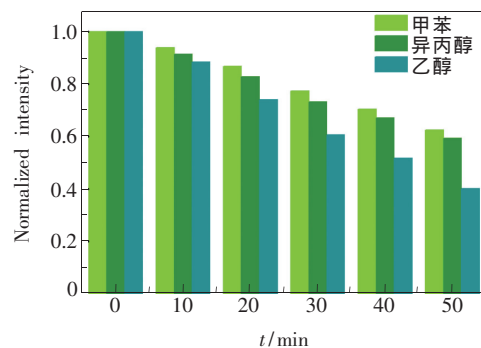


图 8 CsPbBr₃ 纳米晶在 120 °C 下的荧光强度随时间的变化(前驱体离子溶液的体积均为 0.1 mL)

Fig. 8 Fluorescence intensity of CsPbBr₃ nanocrystals at 120 °C (the volume of the precursor ion solution is 0.1 mL)

4 结 论

本文在室温下通过液相沉淀法制备了 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶,考察了溶剂密度、极性和粘度对钙钛矿纳米晶的反应过程、晶体结构、微观形貌和光学性能的影响。结果表明,通过改变反应溶剂的密度可以实现 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶在反应器上部、下部以及整个液相中的生长。溶剂的极性越大,制备的 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的结晶度越低、发光强度和稳定性越低。过高的溶剂粘度不利于高质量 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的制备。本文提出的多种溶剂下快速制备 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶的方法有望进一步拓展其在太阳能电池、激光器、光探测器以及发光二极管等领域的应用。

参 考 文 献:

- [1] 高小钦,卓宁泽,王海波,等. 半导体量子点在白光 LED 器件上的应用研究 [J]. 物理学报, 2015,64(13):137801-1-6.
GAO X Q,ZHUO N Z,WANG H B,*et al.*. Application of semiconductor quantum dots no white-light-emitting diodes [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2015,64(13):137801-1-6. (in Chinese)
- [2] ZHAO T S,OH N,JISHKARIANI D,*et al.*. General synthetic route to high-quality colloidal III-V semiconductor quantum dots based on pnictogen chlorides [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019,141(38):15145-15152.
- [3] 刘玉王,陈斐,孔淑祺,等. 全无机钙钛矿量子点的合成、性质及发光二极管应用进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(2):117-133.
LIU W Y,CHEN F,KONG S Q,*et al.*. Synthesis,properties and application of all-inorganic perovskite quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(2):117-133. (in Chinese)
- [4] ZHANG Y X,WANG H Y,ZHANG Z Y,*et al.*. Photoluminescence quenching of inorganic cesium lead halides perovskite quantum dots (CsPbX₃) by electron/hole acceptor [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017,19(3):1920-1926.
- [5] LI M,ZHANG X,DU Y Y,*et al.*. Colloidal CsPbX₃ (X = Br,I,Cl) NCs:morphology controlling,composition evolution, and photoluminescence shift [J]. *J. Lumin.*, 2017,190:397-402.
- [6] SHINDE A,GAHLAUT R,MAHAMUNI S. Low-temperature photoluminescence studies of CsPbBr₃ quantum dots [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2017,121(27):14872-14878.
- [7] YANG W S,NOH J H,JEON N J,*et al.*. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange [J]. *Science*, 2015,348(6240):1234-1237.
- [8] EPERON G E,STRANKS S D,MENELAOU C,*et al.*. Formamidinium lead trihalide:a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2014,7(3):982-988.
- [9] MEI A Y,LI X,LIU L F,*et al.*. A hole-conductor-free,fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability [J]. *Science*, 2014,345(6194):295-298.
- [10] NEJAND B A,NAZARI P,GHARIBZADEH S,*et al.*. All-inorganic large-area low-cost and durable flexible perovskite solar cells using copper foil as a substrate [J]. *Chem. Commun.*, 2017,53(4):747-750.
- [11] SCHÄFER J,MONDIA J P,SHARMA R,*et al.*. Quantum dot microdrop laser [J]. *Nano Lett.*, 2008,8(6):1709-1712.
- [12] DESCHLER F,PRICE M,PATHAK S,*et al.*. High photoluminescence efficiency and optically pumped lasing in solution-processed mixed halide perovskite semiconductors [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2014,5(8):1421-1426.
- [13] WANG Y,LI X M,SONG J Z,*et al.*. All-inorganic colloidal perovskite quantum dots:a new class of lasing materials with favorable characteristics [J]. *Adv. Mater.*, 2015,27(44):7101-7108.
- [14] LIU H,ZHANG X W,ZHANG L Q,*et al.*. A high-performance photodetector based on an inorganic perovskite-ZnO heterostructure [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017,5(25):6115-6122.
- [15] GRIM J Q,MANNA L,MOREELS I. A sustainable future for photonic colloidal nanocrystals [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015,44(16):5897-5914.
- [16] LI X M,YU D J,CHEN J,*et al.*. Constructing fast carrier tracks into flexible perovskite photodetectors to greatly improve responsivity [J]. *ACS Nano*, 2017,11(2):2015-2023.
- [17] RAMASAMY P,LIM D H,KIM B,*et al.*. All-inorganic cesium lead halide perovskite nanocrystals for photodetector applications [J]. *Chem. Commun.*, 2016,52(10):2067-2070.
- [18] ZHANG X Y,SUN C,ZHANG Y,*et al.*. Bright perovskite nanocrystal films for efficient light-emitting devices [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2016,7(22):4602-4610.
- [19] LI J H,XU L M,WANG T,*et al.*. 50-fold EQE improvement up to 6.27% of solution-processed all-inorganic perovskite CsPbBr₃ QLEDs *via* surface ligand density control [J]. *Adv. Mater.*, 2017,29(5):1603885-1-9.
- [20] LI G R,TAN Z K,DI D W,*et al.*. Efficient light-emitting diodes based on nanocrystalline perovskite in a dielectric polymer matrix [J]. *Nano Lett.*, 2015,15(4):2640-2644.
- [21] KIM Y H,CHO H,HEO J H,*et al.*. Multicolored organic/inorganic hybrid perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2015,27(7):1248-1254.

- [22] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.*. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX_3 , $X = \text{Cl, Br, and I}$): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(6):3692-3696.
- [23] HUANG H, BODNARCHUK M I, KERSHAW S V, *et al.*. Lead halide perovskite nanocrystals in the research spotlight: stability and defect tolerance [J]. *ACS Energy Lett.*, 2017, 2(9):2071-2083.
- [24] ZHANG D D, EATON S W, YU Y, *et al.*. Solution-phase synthesis of cesium lead halide perovskite nanowires [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, 137(29):9230-9233.
- [25] LI C L, ZANG Z G, CHEN W W, *et al.*. Highly pure green light emission of perovskite CsPbBr_3 quantum dots and their application for green light-emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(13):15071-15078.
- [26] HAMES B C, SÁNCHEZ R S, FAKHARUDDIN A, *et al.*. A comparative study of light-emitting diodes based on all-inorganic perovskite nanoparticles (CsPbBr_3) synthesized at room temperature and by a hot-injection method [J]. *ChemPlusChem*, 2018, 83(4):294-299.
- [27] TSIWAH E A, DING Y X, LI Z X, *et al.*. One-pot scalable synthesis of all-inorganic perovskite nanocrystals with tunable morphology, composition and photoluminescence [J]. *CrystEngComm*, 2017, 19(46):7041-7049.
- [28] LI X M, WU Y, ZHANG S L, *et al.*. CsPbX_3 quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(15):2435-2445.
- [29] WEI Z, CHEN Y, LIN P C, *et al.*. Synthesis and encapsulation of all inorganic perovskite nanocrystals by microfluidics [J]. *J. Mater. Sci.*, 2019, 54(9):6841-6852.
- [30] LIN P C, CHEN H B, WEI Z, *et al.*. Continuous-flow synthesis of doped all-inorganic perovskite nanocrystals enabled by a microfluidic reactor for light-emitting diode application [J]. *Sci. China Mater.*, 2020, 63(8):1526-1536.
- [31] GUAN H L, ZHAO S Y, WANG H X, *et al.*. Room temperature synthesis of stable single silica-coated CsPbBr_3 quantum dots combining tunable red emission of Ag-In-Zn-S for High-CRI white light-emitting diodes [J]. *Nano Energy*, 2020, 67:104279.
- [32] LI Y, DONG L B, CHEN N, *et al.*. Room-temperature synthesis of two-dimensional hexagonal boron nitride nanosheet-stabilized CsPbBr_3 perovskite quantum dots [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(8):8242-8249.
- [33] LI W, CHUN F J, FAN X Q, *et al.*. Ethanol-water-assisted room temperature synthesis of $\text{CsPbBr}_3/\text{SiO}_2$ nanocomposites with high stability in ethanol [J]. *J. Mater. Sci.*, 2019, 54(5):3786-3794.
- [34] GUO H Y, PEI Y, ZHANG J, *et al.*. Doping with SnBr_2 in CsPbBr_3 to enhance the efficiency of all-inorganic perovskite solar cells [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7(36):11234-11243.
- [35] REN Y K, HAO Y Z, ZHANG N, *et al.*. Exploration of polymer-assisted crystallization kinetics in CsPbBr_3 all-inorganic solar cell [J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 392:123805.
- [36] YAO J S, GE J, HAN B N, *et al.*. Ce^{3+} -doping to modulate photoluminescence kinetics for efficient CsPbBr_3 nanocrystals based light-emitting diodes [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, 140(10):3626-3634.



方骏(1998 -),男,广东惠来人,在读本科生,主要从事纳米晶体材料的研究。

E-mail: 862157137@qq.com



林鹏程(1987 -),男,湖南常德人,博士,副教授,2016年于东北大学获得博士学位,主要从事微(纳)流控芯片设计、制造及在化学分析和材料制备中应用的研究。

E-mail: pclin@gdut.edu.cn