

无机钙钛矿纳米晶 CsPbBr₃ 高温光致发光研究

单衍苏 徐钦峰

(鲁东大学 物理与光电工程学院, 山东 烟台 264039)

摘要: 无机钙钛矿纳米晶材料具有优良的物理特性,是光伏和光电领域有广泛用途的纳米材料;但高温时光致发光(PL)强度的降低,严重影响无机钙钛矿纳米晶的实际应用。本文制备了 CsPbBr₃@SiO₂ 核壳纳米晶,并在 300~550 K 的温度下研究了无机钙钛矿纳米晶 CsPbBr₃ 的 PL 行为。研究发现,随着测试温度的升高 CsPbBr₃ 纳米晶产生了不同程度的 PL 强度的降低和 PL 光谱蓝移,并且当测试温度高于 400 K 时荧光寿命明显减小。连续 PL 光谱测量表明,在低于 500 K 的温度下 CsPbBr₃ 纳米晶 PL 强度的损失很大程度上是可逆的,但在较高的温度下 PL 强度的损失是不可逆的。

关键词: 钙钛矿纳米晶;核壳纳米材料;光致发光光谱;荧光寿命

中图分类号: O472+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2021)03-0213-07

近年来,全无机卤化铯钙钛矿型纳米晶材料引起了人们的研究兴趣,原因在于它们具有超高的发光转换效率、可调谐的光学带隙、超窄的荧光光谱宽度以及良好的电子迁移率等优点^[1-3]。这些优点使其有望在光伏电池、发光二极管(LED)、激光器和光电探测器中得到应用^[4-5]。尽管和有机-无机钙钛矿纳米材料相比,无机钙钛矿纳米材料的稳定性有了很大的提高^[6-7],但其对外部环境(湿气、溶剂、温度和表面配体)仍极为敏感,材料的结构和光电性能容易随外部环境的改变而发生变化,从而降低器件效率^[8-10]。为了深入了解高温对无机钙钛矿材料性能产生的影响,本文在 300~550 K 温度下研究了 CsPbBr₃ 纳米晶的光致发光(PL)行为。由于 CsPbBr₃ 纳米晶高温时直接暴露在空气中易被氧化,且纳米晶之间会发生相互作用,为了获得更加准确的实验数据,本文使用一锅法制备了以 SiO₂ 为外壳、CsPbBr₃ 纳米晶为核心的 CsPbBr₃@SiO₂ 核壳结构的钙钛矿纳米材料,以隔绝实验中不良因素对 CsPbBr₃ 纳米晶的影响。此外,本文还通过连续冷热交替实验研究了 CsPbBr₃ 纳米晶在高温环境下的持续工作能力。

1 实验方法

1.1 样品制备

1) 材料准备。所需材料包括:溴化铯(CsBr, 99.9% 阿拉丁)、溴化铅(PbBr₂, 99.999% 阿拉丁)、油酸(OA, 90% 阿拉丁)、油氨(OLA, 80%~90% 阿拉丁)、二甲基甲酰胺(DMF, 西格玛)、四甲氧基硅烷(TMOS, 99%, 阿拉丁)、正己烷(99.5% 西格玛)。所有样品直接使用,无需进一步提纯。甲苯(Toluene, 99.95% 西格玛)使用前加入无水硫酸钠干燥 1 h。

2) 合成前体溶液。取 0.146 g PbBr₂、0.085 g CsBr、0.6 mL OLA 和 1.8 mL OA 加入含有 10 mL DMF 的三颈瓶中。90 °C 加热 2 h,溶液变为黄色。冷却至室温,加入氨水(400 μL, 2.8%), 300 r·min⁻¹ 搅拌 3 min 形成前体溶液。

3) 合成 CsPbBr₃ 纳米晶。取前体溶液 0.2 mL 快速加入到 10 mL 干燥过的甲苯, 1500 r·min⁻¹ 搅拌 5 min 后,将得到的反应粗溶液 5000 r·min⁻¹ 离

收稿日期: 2021-01-24; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2019MF057)

第一作者简介: 单衍苏(1993—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为新型材料和器件的设计与制备。E-mail: 1414024130@qq.com

通信作者简介: 徐钦峰(1981—), 男, 山东枣庄人, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为单分子光谱技术研究量子点荧光特性。E-mail: xuqf5678@163.com

心 10 min 将上清液丢弃 加入 2 mL 甲苯将沉淀溶解 4000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 4 min 弃沉淀 保存含有纯净 CsPbBr_3 纳米晶的上清溶液备用。

4) 合成 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 核壳纳米晶。将 0.2 mL 前驱体溶液快速加入到含 5 μL TMOS 的 10 mL 无水硫酸钠干燥后甲苯中 以 1500 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 强力搅拌 10 s 后降至 150 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 120 min 最终溶液 9000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min。弃上清 沉淀分散到 1 mL 甲苯中保存 得到含有 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 壳纳米晶的溶液。

1.2 温度相关的光致发光光谱和荧光寿命测量

取 10 ~15 μL 离心纯化后的 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 核壳纳米晶溶液 滴涂到特制的覆有导电 ITO 的 SiO_2 基片(厚度大约 0.13 mm)上 室温干燥得到钙钛矿纳米晶固体薄膜 用于钙钛矿纳米晶的光学表征。温度的产生利用了电流热效应 对阻值一定的导电玻璃接通恒定电流作为稳定的热量来源 通过对电流的控制实现温度变化(升温时间 1 ~4 s) 用贴合式温度传感器精确测量温度。采用可调谐直流电流源(0 ~76 V ρ ~20 A) 作为电流输出源。采用输出为 10 MHz、输出波长为 405 nm 的皮秒二极管激光器作为激励源。钙钛矿纳米晶产生的荧光信号采集后经 CCD 光谱仪进行 PL 光谱测量分析。荧光信号也可经 50/50 非偏振选择的分束镜产生两束光路 分别经两个 APD 单光子探测器进行时间相关的光子计数来采集分析荧光寿命 整个荧光寿命探测系统的时间分辨率约 250 ps。

2 实验结果与讨论

2.1 样品表征

本文通过一锅法制备了 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 核壳纳米材料和 CsPbBr_3 纳米晶^[11]。图 1 为 CsPbBr_3 纳米晶和 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 纳米晶的 PL 光谱 激发光为 405 nm 黑色为 CsPbBr_3 的 PL 光谱 红色为 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 纳米晶的 PL 光谱。对比 PL 光谱发现 CsPbBr_3 纳米晶和 $\text{CsPbBr}_3@ \text{SiO}_2$ 纳米晶的 PL 光谱相同 发射峰都在 ~525 nm 半高宽都为 ~21 nm。这说明通过该方法包覆的透明二氧化硅壳层材料 并不影响内部钙钛矿量子点 CsPbBr_3

的光学性质。

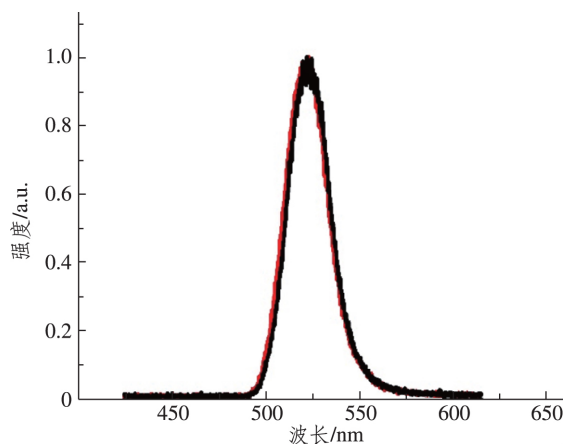
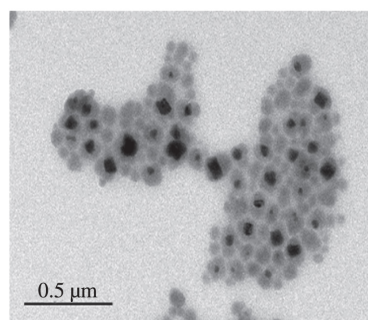


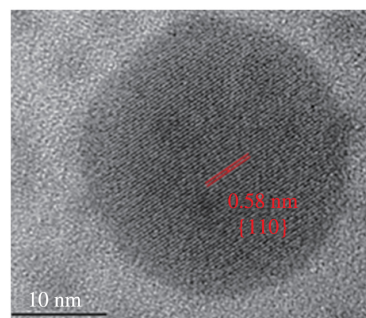
图 1 CsPbBr_3 纳米晶(黑色)和 $\text{CsPbBr}_3/\text{SiO}_2$ 纳米晶(红色)的 PL 光谱

Fig.1 PL spectra of CsPbBr_3 nanocrystals (black) and $\text{CsPbBr}_3/\text{SiO}_2$ nanocrystals (red)

图 2(a) 为透射电子显微镜(TEM)图像 图中颜色较深的为 CsPbBr_3 钙钛矿纳米晶 颜色较淡的为 SiO_2 外壳 并且可以看到 CsPbBr_3 纳米晶很好地被 SiO_2 包覆。通过高分辨透射电子显微镜(HRTEM)图像能明显观察到: 表面的二氧化硅壳层属于非晶体结构; CsPbBr_3 纳米晶为晶体结构, 晶格间距为 0.58 nm 对应 110 面(见图 2(b))。



(a) TEM 图像



(b) HRTEM 图像

图 2 CsPbBr_3 纳米晶的形貌表征

Fig.2 Morphological characterization of CsPbBr_3 nanocrystals

2.2 实验测量

实验中,为了了解温度对 CsPbBr₃ 钙钛矿纳米晶 PL 的影响,本文对 CsPbBr₃ 纳米晶稳态 PL 的温度依赖性进行了测量分析,实验结果见图 3。因为 SiO₂ 包裹后的 CsPbBr₃ 纳米晶与同方法制备的 CsPbBr₃ 纳米晶相比没有光学损伤,且 SiO₂ 包裹后可以阻止 CsPbBr₃ 纳米晶之间的相互作用,进而本文在进行温度相关的实验测量时使用样品为 SiO₂ 包裹后的 CsPbBr₃ 纳米晶。

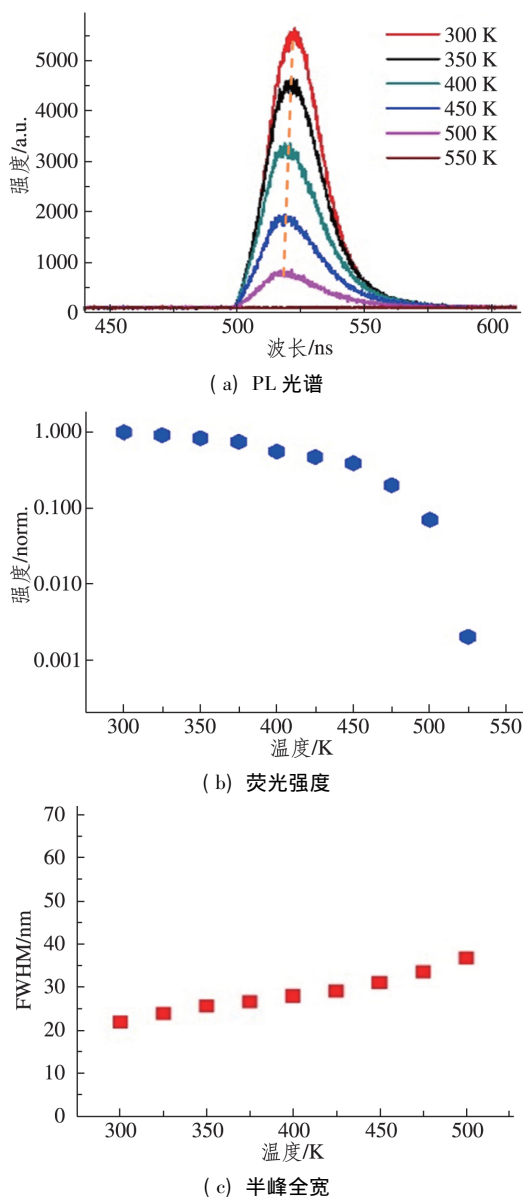


图3 不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 光谱、
荧光强度和 PL 半峰全宽变化曲线

Fig.3 PL spectrum, fluorescence intensity and PL half-peak full width curve of CsPbBr₃ nanocrystals at different temperatures

图 3(a) 为在不同温度(300 ~550 K) 下测量的 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 光谱,从图中可以明显看出:随着温度的升高 CsPbBr₃ 纳米晶 PL 强度逐渐减小,当温度在 550 K 时 PL 强度几乎为零;另外,随着实验温度的升高 PL 峰值还伴随着一定程度的蓝移(见图 3(a),黄色虚线辅助线),这意味着样品的带隙能量随着温度升高而增加。带隙随温度的变化可以用 Varshni 拟合^[12]:

$$E_g(T) = E_{g0} - \alpha \frac{T^2}{T + \beta}, \quad (1)$$

式中: E_{g0} 是温度 0 K 时的带隙; β 为拟合常数,原则上与德拜温度相近(~300 K)^[13]; α 是温度系数,拟合为 -1.7×10^{-4} 。CsPbBr₃ 纳米晶带隙随温度的变化与传统的 PbS 纳米晶类似,这种带隙变化与高温促使的电子与声子耦合有关^[14],类似的现象也可以在其他类型的钙钛矿材料中观察到^[15-16]。图 3(b) 是在指数坐标下绘制的在不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 强度变化曲线,可以看到:实验温度高于 450 K 时,PL 的强度开始急剧下降;当实验温度达到 525 K 时样品 PL 的强度相比 300 K 时降低了近 3 个数量级。图 3(c) 展示了不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 半峰全宽(FWHM) 的数值变化,随着温度的提升,FWHM 的数值由最初 300 K 时的 21 nm 增加到 525 K 时的 38 nm。与传统的 CdSe/ZnS 纳米晶相比, CsPbBr₃ 纳米晶在相同温度范围(300 ~500 K) 内具有更加剧烈的 FWHM 变化^[17]。

本文通过连续 PL 测量,观察了不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 变化行为(见图 4),图中颜色变化与 PL 强度有关,蓝色为背景颜色,由黄色到绿色表示 PL 强度由强到弱。实验时前 30 s 为室温测量,30 至 90 s 施加恒定温度,90 至 330 s 观察停止加热后 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 变化行为,所有测量的积分时间间隔为 1 s。

图 4(a) 为室温参照实验,整个记录过程没有施加额外的热量,图中 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 随着记录时间的增加 PL 强度会有所减弱,这是长时间激光激发造成的光降解^[18]。图 4(b) 测试温度为 400 K,可以看到: CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 强度明显下降,当不再加热时 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 强度会紧随着恢复到正常水平(相较于室温测量)。图 4(c) 的测试温度为 550 K,可以明显地观察到:高温测量后即使温度回到室温, CsPbBr₃ 纳米晶

的 PL 强度也无法恢复到正常水平。

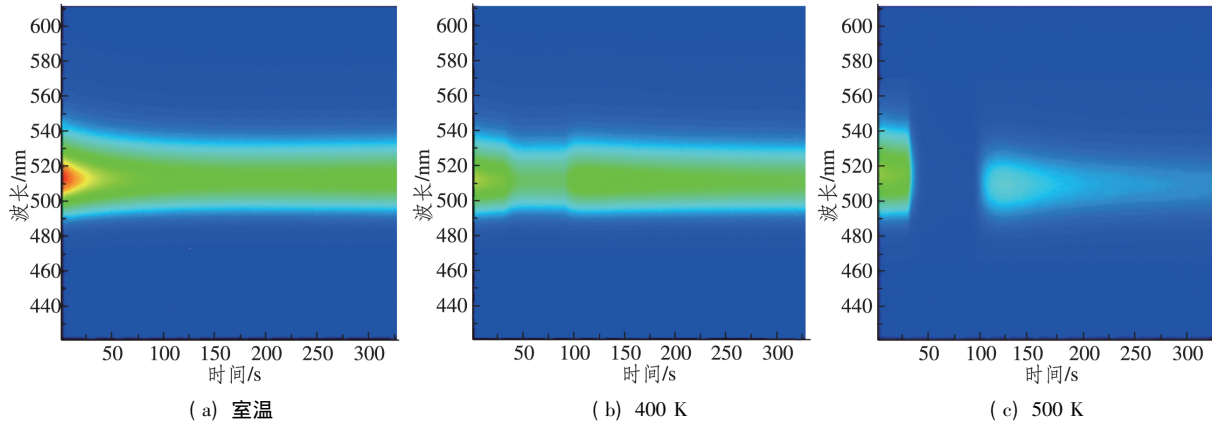


图 4 CsPbBr₃ 纳米晶在室温、400 K 及 550 K 温度时的连续 PL 光谱测量

Fig.4 Continuous PL spectroscopic measurements of CsPbBr₃ nanocrystals at room temperature 400 K and 550 K

通过对时间分辨的 PL 衰减曲线的分析,本文进一步探究了高温下 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 变化的原因,PL 衰减曲线见图 5。

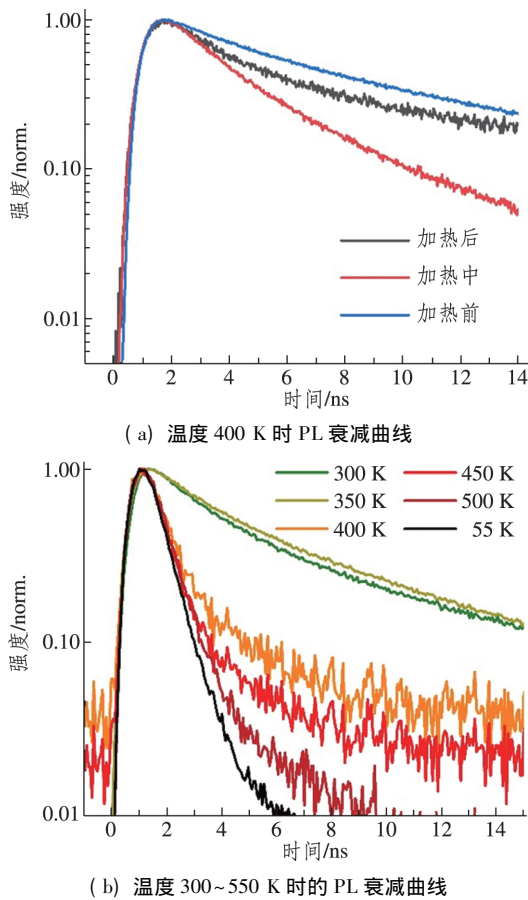


图 5 CsPbBr₃ 纳米晶在 400 K 温度下不同测量阶段的时间相关的 PL 衰减曲线和在 300~550 K 温度下的时间相关的 PL 衰减曲线

Fig.5 Time-related PL decay curves of CsPbBr₃ nanocrystals at different measurement stages at 400 K and

time-related PL strength trajectories between 300 K and 550 K 图 5(a) 统计了图 4(b) 在 400 K 实验温度时不同测量阶段 CsPbBr₃ 纳米晶的时间相关的 PL 衰减曲线。PL 衰减曲线可由双指数模型拟合计算^[19]

$$I(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (2)$$

平均寿命为

$$\tau_{ave} = \frac{A_1 \tau_1^2 + A_2 \tau_2^2}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2}. \quad (3)$$

由公式(2)、(3)计算得出加热前的 PL 平均寿命为 8.6 ns, 温度升为 400 K 时 PL 平均寿命衰减为 4.1 ns。经过 30 s 高温加热后恢复到室温时 PL 衰减曲线与最初衰减曲线相比有轻微差别,平均寿命为 7.5 ns。由于钙钛矿纳米晶在合成时使用了大量的表面配体,这些配体与 CsPbBr₃ 纳米晶表面结合并不牢固,高温会促使表面配体与 CsPbBr₃ 纳米晶之间的成键断裂,产生一些表面缺陷影响激子正常辐射复合;进而加热前后 PL 寿命的差异归可因于与高温时 CsPbBr₃ 纳米晶表面配体的解离^[20-21]。图 5(b) 为荧光寿命探测系统记录的不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的稳态寿命,可以看出:在 300 至 350 K 时 PL 寿命随温度升高有所增加,由 9 ns 增长为 10.2 ns;当温度上升到 400 K 以上时 PL 衰减速度明显变快,当测试温度增加到 550 K 时,PL 寿命仅仅只有 0.98 ns。PL 寿命的减小意味着 CsPbBr₃ 纳米晶内大量的激子是无辐射的方式进行复合^[22]。根据上述和图 4 所示的实验结果,当 CsPbBr₃ 样品加热到 550 K 时会出现不可逆的 PL 损失。先前的报道中 CsPbBr₃ 在高于 600 °C 才会发生分解^[23],所以样

品分解不可能是不可逆的 PL 损失的原因,而表面配体与纳米晶表面只有少量的成键结合,不能够造成大量的 PL 损失。在进一步分析中发现, CsPbBr₃ 纳米晶在 400 K 时会由正交晶相转换为四方晶相,430 K 时会进一步转换为立方晶相^[24] 进而推测高温下 CsPbBr₃ 纳米晶 PL 的猝灭可能与其晶相的转换有关。高温下 CsPbBr₃ 纳米晶发生了晶格相变,会产生大量的空位缺陷,激子在复合过程中被这些空位缺陷捕获导致激子的辐射复合无法正常进行,进而产生了 PL 猝灭现象。当实验温度为 400 K 时,随着温度回到室温 CsPbBr₃ 纳米晶恢复到了最初始的晶相,相变产生的空位缺陷消失,降低的 PL 强度得到了恢复;当测试温度为 550 K 时, CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 强

度无法恢复,可能是因为测试温度过高使 CsPbBr₃ 纳米晶的晶相在室温时无法完全恢复到初始晶相, CsPbBr₃ 纳米晶内部仍然有大量的空位缺陷存在。

为了分析 CsPbBr₃ 纳米晶在高温下的持续工作性能,本文采用连续冷热交替的方法对 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 进行测量(见图 6)。测量时,温度恒定持续 30 s,每 60 s 为一个周期。可以发现:在 350~450 K 时, CsPbBr₃ 纳米晶在经历了 6 个周期的实验测量后, PL 依然可以恢复,没有呈现出明显的 PL 强度损失。当测量温度为 500~550 K 时,可以明显看到 PL 强度的损失;特别是 550 K 时,在第 5 个周期之后的 PL 强度几近消失。

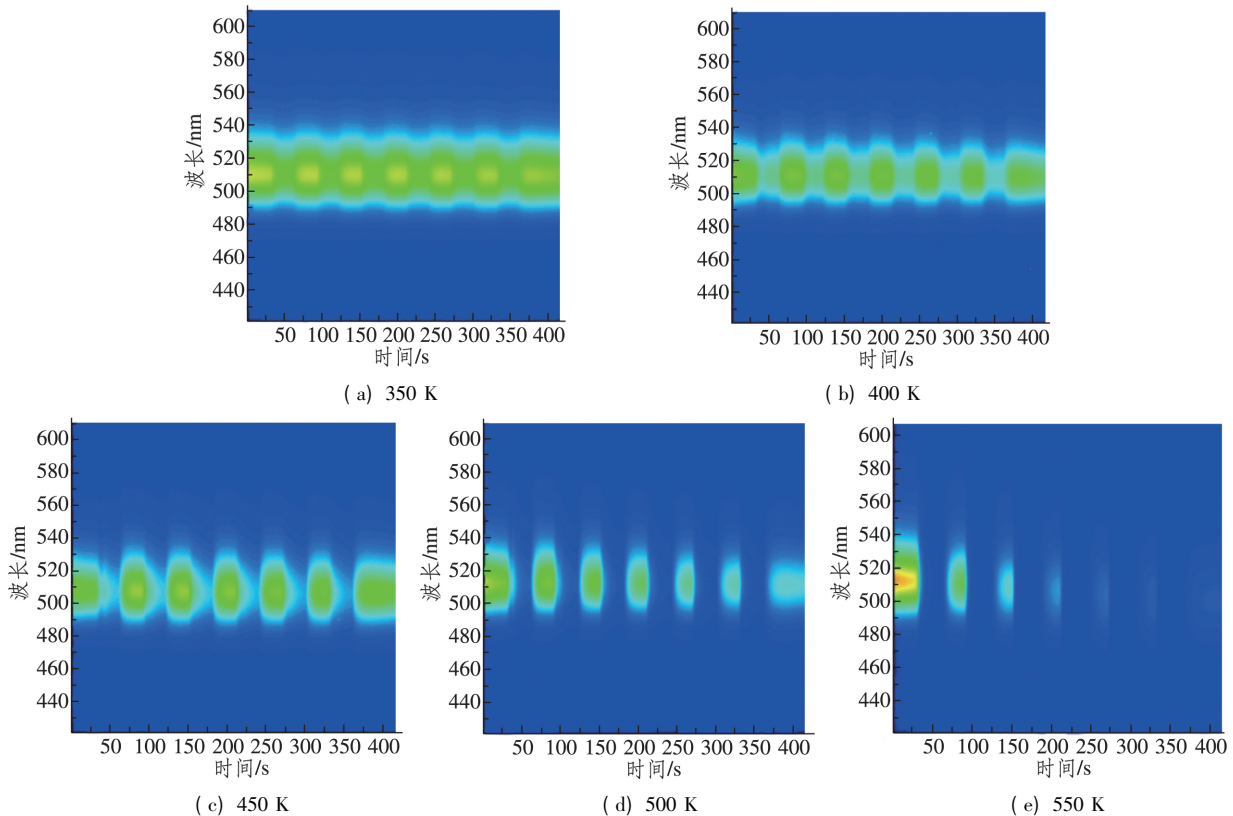


图 6 不同温度下 CsPbBr₃ 纳米晶的冷热交替实验结果

Fig.6 Experimental results of cold/hot alternation of CsPbBr₃ nanocrystals at different temperatures

3 结语

本文在 300~500 K 的温度下研究了无机钙钛矿纳米晶 CsPbBr₃ 的 PL 行为,研究发现:随着测试温度的升高 CsPbBr₃ 纳米晶产生了不同程度的

PL 强度的降低和 PL 光谱蓝移,而且 PL 的半峰全宽受温度影响变化较大。PL 衰减曲线统计和连续 PL 光谱测量实验暗示了 CsPbBr₃ 纳米晶的 PL 猝灭与高温时 CsPbBr₃ 纳米晶的晶相变化及表面配体丢失产生的缺陷有关。此外,本文还采用连续冷热交替实验的方法测试了 CsPbBr₃ 纳米

晶高温下的持续工作能力,发现 CsPbBr₃ 纳米晶对 450 K 以下的温度表现出良好的耐受性。这些结果表明,虽然 CsPbBr₃ 纳米晶的优良的物理特性来源于其晶体缺陷的高容忍性,但高温时产生的晶体缺陷仍然是其性能下降的重要原因。本文的研究为 CsPbBr₃ 纳米晶在光电领域的应用提供了可靠参考。

参考文献:

- [1] KOVALENKO M V, PROTESESCU L, BODNARCHUK M I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals [J]. *Science*, 2017, 358(6364): 745–750.
- [2] RAJAGOPAL A, YAO K, JEN A K Y. Toward perovskite solar cell commercialization: a perspective and research roadmap based on interfacial engineering [J]. *Advanced Materials* 2018, 30(32): 1800455.
- [3] MANSER J S, CHRISTIANS J A, KAMAT P V. Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116 (21): 12956–13008.
- [4] YANG T, ZHENG Y P, DU Z T, et al. Superior photo-detectors based on all-inorganic perovskite CsPbI₃ nanorods with ultrafast response and high stability [J]. *ACS Nano* 2018, 12(2): 1611–1617.
- [5] CHEN Q S, WU J, OU X Y, et al. All-inorganic perovskite nanocrystal scintillators [J]. *Nature*, 2018, 561 (7721): 88–93.
- [6] KULBAK M, GUPTA S, KEDEM N, et al. Cesium enhances long-term stability of lead bromide perovskite-based solar cells [J]. *Physical Chemistry Letters* 2016, 7(1): 167–172.
- [7] SUTTON R J, EPERON G E, MIRANDA L, et al. Bandgap-tunable cesium lead halide perovskites with high thermal stability for efficient solar cells [J]. *Advanced Energy Mater* 2016, 6(8): 1502458.
- [8] MISRA R K, AHARON S, LI B, et al. Temperature and component-dependent degradation of perovskite photovoltaic materials under concentrated sunlight [J]. *Physical Chemistry Letters* 2015, 6(3): 326–330.
- [9] LI X, DAR M I, YI C Y, et al. Improved performance and stability of perovskite solar cells by crystal crosslinking with alkylphosphonic acid ω-ammonium chlorides [J]. *Nature Chemistry* 2015, 7(9): 703–711.
- [10] WANG Y G, LU X J, YANG W G, et al. Pressure-induced phase transformation, reversible amorphization, and anomalous visible light response in organolead bromide perovskite [J]. *Journal of the American Chemical Society* 2015, 137(34): 11144–11149.
- [11] ZHONG Q X, CAO M H, HU H C, et al. One-pot synthesis of highly stable CsPbBr₃@SiO₂ core-shell nanoparticles [J]. *ACS Nano* 2018, 12(8): 8579–8587.
- [12] JING P T, ZHENG J J, IKEZAWA M, et al. Temperature-dependent photoluminescence of CdSe-core CdS/CdZnS/ZnS-multishell quantum dots [J]. *The Journal of Chemistry C* 2009(31): 13545–13550.
- [13] VARSHNI Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors [J]. *Physica*, 1967 (34): 149–154.
- [14] WEI K, XU Z G, CHEN R Z, et al. Temperature-dependent excitonic photoluminescence excited by two-photon absorption in perovskite CsPbBr₃ quantum dots [J]. *Optics Letters* 2016, 41(41): 3821–3824.
- [15] ZHANG F, ZHONG H Z, CHEN C, et al. Brightly luminescent and color-tunable colloidal CH₃NH₃PbX₃ (X = Br, I, Cl) quantum dots: potential alternatives for display technology [J]. *ACS Nano* 2015, 9(4): 4533.
- [16] LÜ Q, WEI H H, SUN W Z, et al. The role of excitons on light amplification in lead halide perovskites [J]. *Advanced Materials* 2016, 28(46): 10165.
- [17] VALERINI D, CRETÌ A, LOMASCOLO M, et al. Temperature dependence of the photoluminescence properties of colloidal CdSe / ZnS core/shell quantum dots embedded in a polystyrene matrix [J]. *Physical Review B* 2005, 71(23): 235409.
- [18] BOOTE B W, ANDARAARACHCHI H P, ROSALES B A, et al. Unveiling the photo and thermal-stability of cesium lead halide perovskite nanocrystals [J]. *ChemPhysChem* 2019, 20(20): 2647–2656.
- [19] 石艺, 刘明良, 徐钦峰. 全无机混合卤化物钙钛矿量子点 CsPbBr_xI_{1-x} 相分离研究 [J]. *鲁东大学学报(自然科学版)* 2020, 36(3): 211–219.
- [20] LIAO M L, HAN B B, LI M. In situ raman spectroscopic studies of thermal stability of all-inorganic cesium lead halide (CsPbX₃, X = Cl, Br, I) perovskite nanocrystal [J]. *Physical Chemistry Letters* 2019, 10(6): 1217–1225.
- [21] 胡峰瑞, 王晓勇. 单个半导体纳米晶多激子相关性质的研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.

- [22] ZHAO Y M ,RIEMERSMA C ,PIETRA F ,et al.High-temperature luminescence quenching of colloidal quantum dots [J].ACS Nano 2012 6(10) : 9058–9067.
- [23] KULBAK M ,GUPTA S ,KEDEM N ,et al.Cesium enhances long-term stability of lead bromide perovskite-based solar cells [J].The Journal of Physical Chemistry Letter 2016 7(1) : 167–172.
- [24] AHMAD M ,REHMAN G ,ALI L ,et al.Structural ,electronic and optical properties of CsPbX₃(X= Cl ,Br ,I) for energy storage and hybrid solar cell applications [J]. Journal of Alloys and Compounds ,2017 ,705 (25) : 828–839.

High Temperature Photoluminescence of Inorganic Perovskite Nanocrystals CsPbBr₃

SHAN Yansu , XU Qinfeng

(School of Physics and Optoelectronic Engineering ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China)

Abstract: Inorganic perovskite nanocrystals materials have excellent physical properties and are widely used in photovoltaic and optoelectronic fields. However ,the decrease of PL intensity at high temperature seriously affects the practical application of inorganic perovskite nanocrystals. In this paper ,CsPbBr₃@ SiO₂ core-shell nanocrystals were prepared and the PL behavior of inorganic perovskite nanocrystals CsPbBr₃ was studied at the temperature from 300 to 500 K. It was found that CsPbBr₃ nanocrystals had different PL intensity decrease and PL spectrum blue shift with the increase of test temperature ,and the fluorescence lifetime decreased significantly when the test temperature was higher than 400 K. Continuous PL spectrometric measurements show that the PL strength loss of CsPbBr₃ nanocrystals at temperatures below 500 K is largely reversible ,but the PL strength loss is not reversible at higher temperatures.

Keywords: perovskite nanocrystals; core-shell nanocrystals; photoluminescence spectrum; fluorescence lifetime

(责任编辑 李秀芳)