

文章编号: 1000-7032(2022)03-0396-08

基于表面等离子体共振效应的荧光太阳集光器制备及其性能

曹修东¹, 张会红¹, 田野^{1*}, 张毅¹, 顾港伟¹, 张晓伟^{1,2*}

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 南京大学 固体微结构国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 金属纳米颗粒的表面等离子体共振效应能够对特定波长入射光的吸收或者散射增强, 正因其独特的光学性质, 金属纳米颗粒被尝试应用于荧光太阳集光器。本文利用全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点、Au 纳米颗粒和硫醇-烯聚合物制备荧光太阳集光器。研究发现, 掺杂适量 Au 纳米颗粒可以通过表面等离子体共振效应提高全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点荧光太阳集光器的外量子效率。当 Au 纳米颗粒的掺杂浓度为 2.0×10^{-6} 时, 荧光太阳集光器的外量子效率为 12.3%, 相比未掺杂 Au 纳米颗粒的荧光太阳集光器的外量子效率提升了 78.2%。进一步提高 Au 纳米颗粒的掺杂浓度, 荧光太阳集光器的外量子效率下降。荧光发射谱和荧光寿命谱测试结果显示, 当 Au 纳米颗粒的掺杂浓度超过 2.0×10^{-6} 时, 过高的 Au 纳米颗粒掺杂浓度导致 CsPbBr₃ 量子点与 Au 纳米颗粒之间发生非辐射能量转移, 荧光太阳集光器荧光量子产率 ($\eta_{\text{PL,LSC}}$) 下降导致了外量子效率下降。

关键词: 钙钛矿量子点; Au 纳米颗粒; 表面等离子体共振效应; 外量子效率; 非辐射能量转移

中图分类号: O482.31; TK513

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210387

Preparation and Performance of Luminescent Solar Concentrator Based on Surface Plasmon Resonance Effect

CAO Xiu-dong¹, ZHANG Hui-hong¹, TIAN Ye^{1*}, ZHANG Yi¹, GU Gang-wei¹, ZHANG Xiao-wei^{1,2*}

(1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

* Corresponding Authors, E-mail: tianye@nbu.edu.cn; zhangxiaowei@nbu.edu.cn

Abstract: The surface plasmon resonance effect of metal nanoparticles can enhance the absorption and scattering of incident light at a certain wavelength. Because of this unique optical property, the metal nanoparticles are developed for the applications of luminescent solar concentrators. In this paper, the Au nanoparticles with different concentrations are introduced to the luminescent solar concentrators based on the all-inorganic perovskite CsPbBr₃ quantum dots and the thiol-ene polymer. The results show that the Au nanoparticles with suitable concentration can improve the external quantum efficiency of the luminescent solar concentrators by the surface plasmon resonance effect. When the doping concentration of Au nanoparticles is 2.0×10^{-6} , the external quantum efficiency of the luminescent solar concentrator is 12.3%, which is enhanced by 78.2% compared with that of Au-free luminescent solar concentrator. With the further increase of Au nanoparticle doping concentration above 2.0×10^{-6} , the external quantum efficiency of the luminescent solar concentrators decreases.

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61974078, 61704094); 浙江省自然科学基金(LY21F040002); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金(SJLY2021012)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61974078, 61704094); Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LY21F040002); Fundamental Research Funds for The Provincial Universities of Zhejiang(SJLY2021012)

According to the photoluminescence emission spectra and the time-resolved photoluminescence emission curves, excessive Au nanoparticle doping concentration leads to the non-radiative energy transfer process between the CsPbBr₃ quantum dots and Au nanoparticles. The decreasing fluorescence quantum yield ($\eta_{\text{PL,LSC}}$) gives rises to decreasing external quantum efficiency of the luminescent solar concentrator.

Key words: perovskite quantum dot; Au nanoparticle; surface plasmon resonance effect; external quantum efficiency; non-radiative energy transfer

1 引言

随着能源危机和环境污染问题日益突出,全球光伏产业受到广泛关注。在“碳中和”背景下,我国光伏产业发展迅猛,光伏组件安装数量急剧攀升。在光伏发电组件中,电池材料成本占比高达55%。如何有效降低光伏组件材料成本是全球光伏产业面临的技术难题之一^[1]。为了提高光伏组件单位发电效率,基于菲涅尔透镜技术的传统聚光光伏得到了广泛研究,但其单位发电成本高、发热严重、铺设复杂等问题制约着其进一步发展^[2]。1976年,美国福特实验室的Weber和Lambe提出了一种比传统聚光器件更经济的太阳光子聚光器件,即荧光太阳集光器(Luminescent solar concentrator, LSC)^[3]。荧光太阳集光器主要由荧光材料和透明基质两部分组成。透明基质中的荧光材料吸收太阳光后,通过光致发光过程发出特定波长的光子,重新发射的光子通过全内反射(Total internal reflection, TIR)过程聚集到透明基质边缘,被安装在透明基质边缘的光伏电池收集,从而实现光电转换。

荧光太阳集光器中的荧光材料可以分为两类:有机荧光染料和无机荧光材料。其中有机荧光染料主要包括二氰基亚甲基类荧光染料(DCM)^[4]、香豆素(Coumarin 6)^[5]等;无机荧光材料主要包括稀土离子与过渡金属离子复合物^[6-7]和半导体胶体量子点(Quantum dots, QDs)^[8]等。其中,半导体胶体量子点具有光学吸收截面大、热稳定性能好和荧光量子产率高等优点,是当前国内外研究的热点^[9-14]。由于量子限制效应,半导体量子点的能带带隙及发光峰位可以根据量子点尺寸、掺杂离子种类等参数精确调控,从而实现发光峰位大范围可调,易于匹配不同种类商用太阳能电池的最佳光谱响应窗口。

然而,目前已报道的荧光太阳集光器的集光效率并不高,普遍低于5%。平板型荧光太阳集光器中光子输运损耗主要包括以下三个方面^[15]:(1)自吸收损失,透明基质中半导体量子点重新发射的光子被周边量子点重新吸收;(2)逃逸锥损失,由于重新发射光子方向存在随机性,一部分光子将在逃逸锥内发射离开基质材料;(3)透射损失,一部分低能量入射光子直接穿过透明或半透明的基质材料,不被荧光材料吸收。近年来研究发现,金属纳米颗粒(Metal nanoparticle, MNP)的表面等离子体共振效应直接或间接影响作为发光中心材料的量子点的激发速率、辐射衰减速率和非辐射衰减速率^[16-17]。2021年,加拿大国家科学研究所Rosei课题组利用Ag纳米颗粒的表面等离子体共振效应提高碳量子点的光吸收和发射,研究表明通过引入40 nm Ag40@SiO₂纳米颗粒,利用金属纳米颗粒的表面等离子体共振效应,碳量子点荧光太阳集光器的集光效率提升了25%^[18]。2021年,美国加利福尼亚大学Ghosh课题组利用Au纳米颗粒使100 cm²面积的平板型CH₃NH₃PbBr₃量子点荧光太阳集光器集光效率达到2.87%^[19]。可见,可以通过调控量子点和金属纳米颗粒之间的表面等离子体相互作用来提高荧光太阳集光器的光吸收与发射,从而提高荧光太阳集光器的外量子效率。此外,金属纳米颗粒的表面等离子体共振效应已广泛应用于光催化^[20]、纳米激光器^[21]、光动力学治疗^[22]、光波导^[23]、光学器件^[24]、隐形材料^[25]等方面,并且在光电、光热转换等领域具有广泛的实际应用价值。

本文选取Au纳米颗粒(Au nanoparticles, Au NPs)作为金属纳米颗粒的代表,通过在基于全无机钙钛矿CsPbBr₃量子点的荧光太阳集光器中引入不同浓度的Au纳米颗粒,研究了不同Au掺杂

浓度对荧光太阳集光器外量子效率的影响规律。首先,采用传统的热注入法合成了平均尺寸为 (12.4 ± 2.0) nm 的全无机钙钛矿 CsPbBr_3 量子点,作为荧光太阳集光器的荧光材料。随后,利用柠檬酸钠还原法合成平均尺寸为 (16.8 ± 1.8) nm 的 Au 纳米颗粒。最后,采用硫醇-烯聚合物作为透明基质,制备了 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的荧光太阳集光器。通过调节 Au 纳米颗粒的浓度,基于全无机钙钛矿 CsPbBr_3 量子点的荧光太阳集光器展现了不同的外量子效率。当 Au 纳米颗粒掺杂浓度为 2.0×10^{-6} 时,荧光太阳集光器呈现最大外量子效率 12.3%,与没有添加 Au 纳米颗粒的荧光太阳集光器相比,外量子效率增强了 78.2%。

2 实 验

2.1 全无机钙钛矿量子点合成

本文通过传统的热注入法制备全无机钙钛矿 CsPbBr_3 量子点。首先,将 2.5 mL 油酸(OA, 90%), 20 mL 1-十八烯(ODE, 90%) 和 440 mg 碳酸铯(Cs_2CO_3 , 99.99%) 加入 50 mL 三颈烧瓶中,并不断搅拌加热直至固体颗粒物完全溶解。其次,另取 50 mL 的三颈烧瓶加入 10 mL 1-十八烯、10 mL 油酸、3.0 mL 油胺(OA, 80% ~ 90%) 和 138 mg 溴化铅(PbBr_2 , 99.99%), 并搅拌加热至 110°C ; 然后在氮气保护下持续搅拌加热至 200°C ; 随后快速加入 1.0 mL 前驱液,反应 2 min 后,迅速置于冰水浴中冷却至室温。最后,将制备的混合溶液多次离心清洗处理,并将最终产物分散在正己烷溶液中。

2.2 Au 纳米颗粒溶液合成

采用柠檬酸钠还原法制备 Au 纳米颗粒溶液。将 50 mL 氯金酸(HAuCl_4) 溶液加热至 95°C , 添加 50 mL 柠檬酸钠($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$) 溶液,继续加热至 95°C 。然后保温 40 min, 室温下冷却,即可得到 Au 纳米颗粒溶液。

2.3 荧光太阳集光器制备

首先分别称取 7.6 g 硫醇单体(季戊四醇四(3-巯基丙酸酯), 98%) 和 7.6 g 丙烯单体(三烯丙基-1,3,5-三嗪-2,4,6(1H,3H,5H)-三酮, > 90%) 依次加入 25 ml 烧杯,均匀混合。然后将全无机钙钛矿 CsPbBr_3 量子点和不同浓度的 Au 纳米颗粒加入上述混合溶液中,并加入 0.076 g 光引发剂(Irgacure-184)。其中光引发剂、硫醇单体

与丙烯单体的质量比控制在 0.01:1:1。将混合溶液超声震荡 15 min, 超声后的混合溶液置于真空干燥箱内进行脱泡处理。混合溶液在小于 0.01 Pa 的真空环境下保持 60 min, 随后将混合溶液轻轻注入玻璃模具中, 采用中心波长为 365 nm 的紫外灯均匀照 10 min, 进行固化成型处理。最后进行脱模工艺, 将样品切割并进行光学抛光, 尺寸固定为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 并在器件边缘安装经过激光切割的标准商用多晶硅太阳能电池。实验流程如图 1 所示。

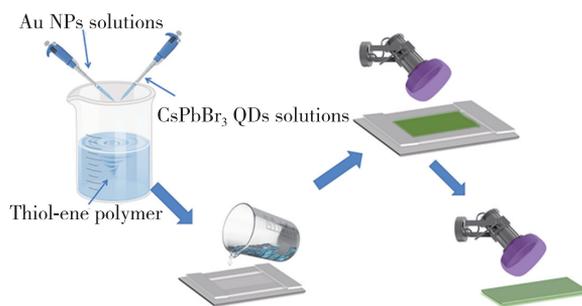


图 1 荧光太阳集光器制备流程图

Fig. 1 Flow diagram of the LSC fabrication process

2.4 结构表征与性能测试

采用 Tecnai G2 F30 S-TWIN 场发射透射电子显微镜对 Au 纳米颗粒、 CsPbBr_3 量子点进行结构表征。采用 UV-3600 型紫外-可见近红外分光光度计对 Au 纳米颗粒的吸收谱、 CsPbBr_3 量子点在正己烷溶液和在硫醇-烯聚合物基质中的吸收谱进行测试。采用 Horiba Jobin Yvon 的 Fluorolo-3 稳态荧光测试系统测试 CsPbBr_3 量子点的荧光发射谱, 激发光源为 450 W 氙灯, 探测器为 R928 光电倍增管(PMT)。采用英国爱丁堡公司的 FLS-1000 系统, 利用时间相关单光子计数技术测试了 CsPbBr_3 量子点的荧光衰减曲线。采用 Quantaurus-QY Plus 系统测试并计算 CsPbBr_3 量子点的荧光量子产率。

3 结果与讨论

图 2(a) 为 Au 纳米颗粒的透射电子显微镜测试结果。采用柠檬酸钠还原法制备的 Au 纳米颗粒分布均匀、尺寸均一。插图 Au 纳米颗粒尺寸统计分布图, 其平均尺寸为 (16.8 ± 1.8) nm。根据图 2(b) 吸收谱测试结果, Au 纳米颗粒的吸收峰在波长 525 nm 处。金属纳米颗粒的表面等离子体共振吸收峰会随着尺寸增大而红移。根据

Prasad 等^[26]的研究结果,当 Au 纳米颗粒的平均尺寸为 9 nm,表面等离子体共振吸收峰在 520 nm。随着 Au 纳米颗粒的平均尺寸增加到 99 nm,表面等离子体共振吸收峰红移至 575 nm。本文中,Au 纳米颗粒的表面等离子体共振吸收峰在 525 nm,根据估算,Au 纳米颗粒的尺寸分布在 12~22 nm,这与透射电子显微镜测试结果一致。图 2(c)为采用热注入法制备的全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点的高分辨透射电子显微镜图片。从图中可以看出,正己烷溶液中 CsPbBr₃ 量子点分布均匀、尺寸均一。插图 of CsPbBr₃ 量子点尺寸统计分布图,其平均尺寸为(12.4 ± 2.0) nm。图 2(d)显示了全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点在正己烷溶液中的荧光发射谱、吸收谱和 Au 纳米颗粒的吸收谱,荧光发射中心波长在 523 nm。从图中看出,Au 纳米颗粒吸收谱与 CsPbBr₃ 量子点的吸收谱有明显的重叠。在入射光的作用下,Au 纳米颗粒中的电子做集体振荡。当电子云偏离原

子核时,电子云和原子核之间的库伦相互作用使偏离的电子云向原子核重新靠近,这种电子云在原子核附近的振荡称为表面等离子体振荡。当入射光的频率与自由电子的固有振荡频率一致时,即形成表面等离子体共振,这种共振将导致颗粒周围的局域电场模密度显著提高。荧光团的激发速率与局域电场模密度成正比,通过表面等离子体共振效应,Au 纳米颗粒可以增强 CsPbBr₃ 量子点附近的局域电场模密度,进而增强 CsPbBr₃ 量子点的光吸收过程^[16]。此外,当 Au 纳米颗粒的表面等离子体共振吸收峰与 CsPbBr₃ 量子点发光峰位置一致时,发光分子偶极子引起 Au 纳米颗粒极化,两者耦合时 CsPbBr₃ 量子点辐射复合速率得到提高^[19,27]。

图 3(a)为 CsPbBr₃ 量子点、Au 纳米颗粒和硫醇-烯聚合物基质构成的荧光太阳集光器实物图,CsPbBr₃ 量子点和 Au 纳米颗粒均匀地分布在硫醇-烯聚合物基质中。由于硫醇-烯聚合物基质

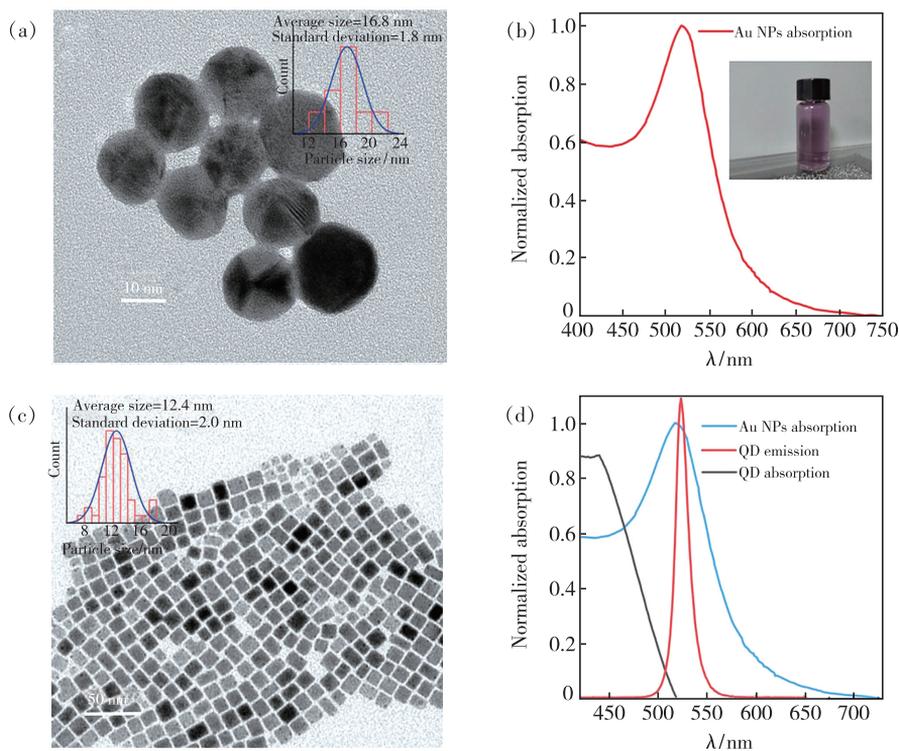


图 2 (a) Au 纳米颗粒透射电子显微镜图,插图为 Au 纳米颗粒尺寸统计分布图;(b) Au 纳米颗粒吸收谱,插图为 Au 纳米颗粒溶液实物图;(c) 全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点透射电子显微镜图,插图为全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点尺寸统计图;(d) 全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点在正己烷溶液中的荧光发射谱、吸收谱和 Au 纳米颗粒吸收谱。

Fig. 2 (a) TEM image of Au nanoparticles, the inset is the size distribution of Au nanoparticles. (b) The absorption of Au nanoparticles, the inset is the digital image of Au nanoparticles solution. (c) TEM image of all-inorganic perovskite CsPbBr₃ quantum dots, the inset is the size distribution of CsPbBr₃ quantum dots. (d) Photoluminescence emission and absorption spectra of all-inorganic perovskite CsPbBr₃ quantum dots in hexane solution and the absorption spectrum of Au nanoparticles.

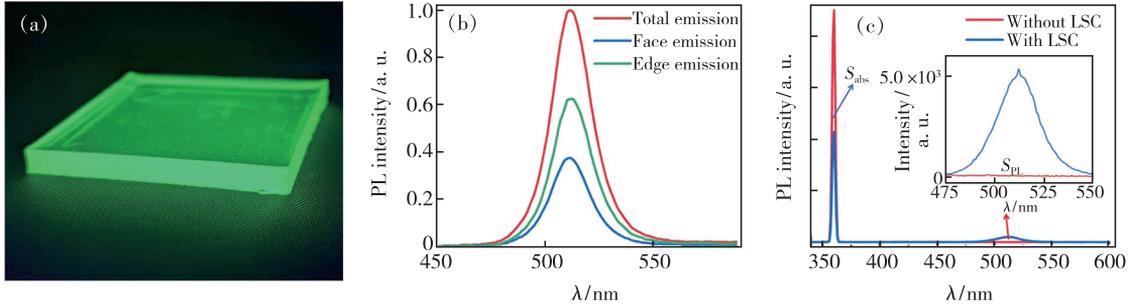


图 3 (a) 荧光太阳集光器实物图; (b) 荧光太阳集光器的总发射、面发射、边缘发射荧光光谱; (c) 放入荧光太阳集光器前后积分球收集的荧光发射谱。

Fig. 3 (a) The digital image of the LSC. (b) Photoluminescence emission spectra of the LSC. (c) Photoluminescence emission spectra collected by the integrating sphere with/without the LSC.

的折射率远远大于空气的折射率,光子会聚集在荧光太阳集光器边缘。为了定量评价基于 CsPbBr₃ 量子点和 Au 纳米颗粒掺杂硫醇-烯聚合物基质的荧光太阳集光器的外量子效率,本文测量了荧光太阳集光器的边缘发射效率,根据公式

$$\eta_{\text{Edge}} = \frac{I_{\text{Edge}}}{I_{\text{Total}}}, \quad (1)$$

利用积分球测量整个荧光太阳集光器的总 PL 积分强度 (I_{Total}), 然后用黑色胶带覆盖 LSC 边缘测量由于光子逃逸锥而损失的 PL 积分强度 (I_{Face}); 两者相减, 得到 LSC 边缘 PL 积分强度 (I_{Edge}); 最后利用边缘 PL 积分强度 (I_{Edge}) 除以总的 PL 积分强度 (I_{Total}), 即可得到边缘发射效率^[28-30], 如图 3(b) 所示。其次利用积分球定量测算荧光太阳集光器的荧光量子产率 ($\eta_{\text{PL,LSC}}$), 其定义为发光材料吸收光后发射出的光子总数与发光材料吸收光子总数之比。如图 3(c) 所示, S_{PL} 是基于 CsPbBr₃ 量子点、Au 纳米颗粒掺杂硫醇-烯聚合物基质的荧光太阳集光器发射的光子总数, S_{abs} 是荧光太阳集光器吸收光子总数。根据公式

$$\eta_{\text{PL,LSC}} = \frac{S_{\text{PL}}}{S_{\text{abs}}}, \quad (2)$$

可计算出荧光量子产率。根据公式

$$\eta_{\text{int}} = \frac{S_{\text{edge}}}{S_{\text{abs}}} = \eta_{\text{PL,LSC}} \times \eta_{\text{Edge}}, \quad (3)$$

可计算出内量子效率。根据公式

$$\eta_{\text{abs}} = (1 - R) \times (1 - 10^{-\alpha d}), \quad (4)$$

可以测量荧光太阳集光器的吸收效率^[31]。其中, R 是表面发射系数, α 是荧光太阳集光器的吸收系数, d 是荧光太阳集光器的平均厚度。外量子效率定义为边缘收集光子数与入射光子数之

比。根据公式(5)可计算出荧光太阳集光器的外量子效率:

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{abs}} \times \eta_{\text{int}}. \quad (5)$$

在不同 Au 纳米颗粒掺杂浓度下, 荧光太阳集光器的外量子效率计算结果如表 1 所示。随着荧光太阳集光器中 Au 纳米颗粒掺杂浓度的增加, 外量子效率呈现先增加后减小的趋势。Au 纳米颗粒掺杂浓度为 2×10^{-6} 的荧光太阳集光器的外量子效率为 12.3%, 相比于未掺杂 Au 纳米颗粒的荧光太阳集光器, 外量子效率提高了 78.2%。外量子效率的提高是由于 Au 纳米颗粒的引入导致荧光太阳集光器的荧光量子产率提高和吸收效率增加。荧光量子产率提高是由于 CsPbBr₃ 量子点发射峰与 Au 纳米颗粒的共振吸收峰重合, 位于 Au 纳米颗粒增强场范围内的 CsPbBr₃ 量子点辐射复合速率增加。吸收效率的增加是因为 Au 纳米颗粒提高了 CsPbBr₃ 量子点的激发速率, 进而提高了 CsPbBr₃ 量子点的光吸收过程。随着 Au 纳

表 1 不同 Au 纳米颗粒浓度荧光太阳集光器的边缘发射效率、荧光量子产率、内量子效率、吸收效率和外量子效率

Tab. 1 Edge emission efficiency, fluorescence quantum yield, internal quantum efficiency, absorption efficiency and external quantum efficiency of the LSCs with different Au nanoparticle concentrations

Au NPs/ 10^{-6}	$\eta_{\text{Edge}}/\%$	$\eta_{\text{PL,LSC}}/\%$	$\eta_{\text{int}}/\%$	$\eta_{\text{abs}}/\%$	$\eta_{\text{ext}}/\%$
0	63.0	25.0	15.7	43.8	6.9
1.0	65.1	33.1	21.4	46.4	9.9
2.0	67.5	37.3	25.0	49.2	12.3
3.0	66.6	32.2	21.3	54.5	11.6
4.0	65.8	30.3	19.7	55.6	10.9

米颗粒浓度的进一步增加, 掺杂 Au 纳米颗粒的荧光太阳集光器的外量子效率减小。这是由于 Au 纳米颗粒与 CsPbBr₃ 量子点之间的距离较小 (小于几个纳米), CsPbBr₃ 量子点中激发态的电子和空穴通过非辐射能量转移的方式转移到 Au 纳米颗粒, 增强 CsPbBr₃ 量子点非辐射衰减速率, 从而减小了荧光太阳集光器的外量子效率^[32]。

为了进一步证明不同 Au 纳米颗粒掺杂浓度对 CsPbBr₃ 量子点荧光太阳集光器外量子效率的影响规律, 本文测量了荧光太阳集光器的荧光发射谱和荧光寿命谱。如图 4 所示, 荧光太阳集光

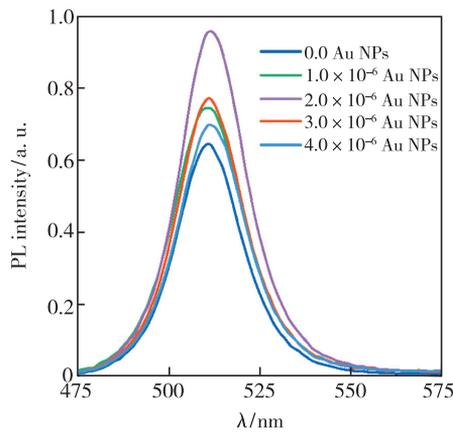


图 4 不同 Au 纳米颗粒掺杂浓度的荧光太阳集光器荧光发射谱

Fig. 4 Photoluminescence emission spectra for the LSC with different Au nanoparticles doping concentration

器的荧光发射强度随 Au 纳米颗粒浓度的增加呈现出先增强后减弱的变化趋势。当 Au 纳米颗粒浓度高于 2.0×10^{-6} 时, 高浓度的 Au 纳米颗粒导致荧光太阳集光器外量子效率减小。

图 5 显示的是不同 Au 纳米颗粒掺杂浓度的荧光太阳集光器的荧光寿命谱。样品的平均荧光寿命采用双指数函数拟合, 其平均荧光寿命由公式

$$\tau_{av} = \frac{a_1 \tau_1^2 + a_2 \tau_2^2}{a_1 \tau_1 + a_2 \tau_2}, \quad (6)$$

计算得出。其中, a_i 和 τ_i 分别为拟合 PL 曲线寿命的权重系数和荧光寿命系数。随着硫醇-烯聚合物基质中 Au 纳米颗粒掺杂浓度提高, CsPbBr₃ 量子点特征发光平均荧光寿命分别为 7.52, 8.57, 10.06, 8.29, 7.65 ns, 呈现先增加再减小的趋势。当 Au 纳米颗粒浓度高于 2.0×10^{-6} 时, 荧光太阳集光器在 523 nm 处发光峰的荧光寿命减小, 与荧光发射谱变化趋势一致。通过对荧光太阳集光器荧光发射谱和荧光寿命谱的测量, 进一步证明高浓度 Au 纳米颗粒荧光太阳集光器的外量子效率减小是由于 Au 纳米颗粒和 CsPbBr₃ 量子点之间发生了非辐射能量转移。当 Au 纳米颗粒的掺杂浓度为 2.0×10^{-6} 时, 荧光太阳集光器的光电转换效率最高, 商用多晶硅太阳能电池的开路电压为 0.57 V, 短路电流密度为 2.88 mA/cm², 填充因子为 72.24%, 光电转换效率为 1.18%。

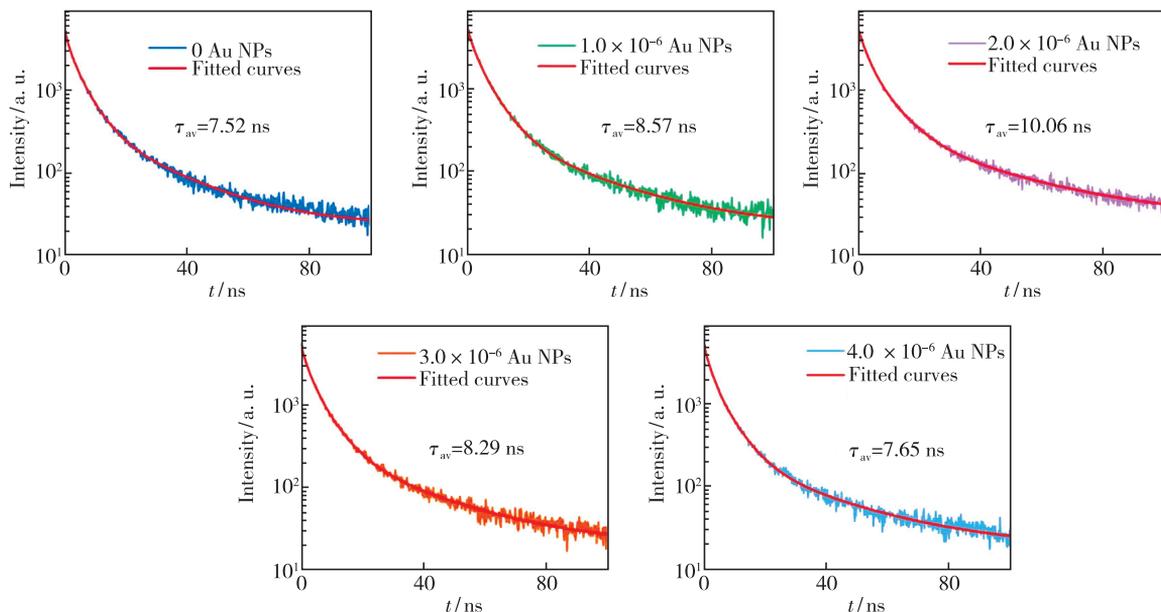


图 5 在 372 nm 脉冲光源下测得的荧光寿命谱

Fig. 5 Time-resolved PL curves recorded by use of a 372 nm pulsed laser as the excitation source

4 结 论

本文研究了不同 Au 掺杂浓度对基于全无机钙钛矿 CsPbBr₃ 量子点的荧光太阳集光器外量子效率的影响规律。当 Au 纳米颗粒掺杂浓度为 2.0×10^{-6} 时, 荧光太阳集光器的外量子效率为 12.3%, 相比未掺杂 Au 纳米颗粒的荧光太阳集光器的外量子效率提升了 78.2%。荧光太阳集光器的荧光发射谱和荧

光寿命谱证实低浓度的 Au 纳米颗粒可通过表面等离子体共振效应提高荧光太阳集光器的外量子效率, 高浓度的 Au 纳米颗粒由于非辐射能量转移过程导致荧光太阳集光器的外量子效率降低。

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.20210387>.

参 考 文 献:

- [1] GREEN M A. Third generation photovoltaics: ultra-high conversion efficiency at low cost [J]. *Prog. Photovoltaics*, 2001, 9(2):123-135.
- [2] EJAZ A, BABAR H, ALI H M, *et al.* Concentrated photovoltaics as light harvesters: outlook, recent progress, and challenges [J]. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 2021, 46:101199.
- [3] WEBER W H, LAMBE J. Luminescent greenhouse collector for solar radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1976, 15(10): 2299-2300.
- [4] EL-SHAHAWY M A. Polymethyl methacrylate mixtures with some organic laser dyes: I. Dielectric response [J]. *Polym. Test.*, 1999, 18(5):389-396.
- [5] CURRIE M J, MAPEL J K, HEIDEL T D, *et al.* High-efficiency organic solar concentrators for photovoltaics [J]. *Science*, 2008, 321(5886):226-228.
- [6] AOUAINI F, MAAOUI A, MOHAMED N B H, *et al.* Visible to infrared down conversion of Er³⁺ doped tellurite glass for luminescent solar converters [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 894:162506.
- [7] LIU C, DENG R J, GONG Y L, *et al.* Luminescent solar concentrators fabricated by dispersing rare earth particles in PMMA waveguide [J]. *Int. J. Photoenergy*, 2014, 2014:290952-1-5.
- [8] BOMM J, BÜCHTEMANN A, CHATTEN A J, *et al.* Fabrication and full characterization of state-of-the-art quantum dot luminescent solar concentrators [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2011, 95(8):2087-2094.
- [9] BERGREN M R, MAKAROV N S, RAMASAMY K, *et al.* High-performance CuInS₂ quantum dot laminated glass luminescent solar concentrators for windows [J]. *ACS Energy Lett.*, 2018, 3(3):520-525.
- [10] YOU Y M, TONG X, WANG W H, *et al.* Eco-friendly colloidal quantum dot-based luminescent solar concentrators [J]. *Adv. Sci.*, 2019, 6(9):1801967-1-24.
- [11] ZHAO H G, BENETTI D, JIN L, *et al.* Absorption enhancement in “Giant” core/alloyed-shell quantum dots for luminescent solar concentrator [J]. *Small*, 2016, 12(38):5354-5365.
- [12] ZHAO H G, ZHOU Y F, BENETTI D, *et al.* Perovskite quantum dots integrated in large-area luminescent solar concentrators [J]. *Nano Energy*, 2017, 37:214-223.
- [13] HU Y J, SHU J P, ZHANG X W, *et al.* Encapsulation of colloid perovskite nanocrystals into solid polymer matrices: impact on electronic transition and photoluminescence [J]. *J. Lumin.*, 2020, 219:116938-1-8.
- [14] ZHAO H G, SUN R J, WANG Z F, *et al.* Zero-dimensional perovskite nanocrystals for efficient luminescent solar concentrators [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(30):1902262-1-8.
- [15] SETHI A, CHANDRA S, AHMED H, *et al.* Broadband plasmonic coupling and enhanced power conversion efficiency in luminescent solar concentrator [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2019, 203:110150-1-6.
- [16] CHANDRA S, DORAN J, MCCORMACK S J, *et al.* Enhanced quantum dot emission for luminescent solar concentrators using plasmonic interaction [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2012, 98:385-390.
- [17] MORITA H, KAWAI H, TAKEHARA K, *et al.* Emission enhancement of water-soluble porphyrin immobilized in DNA ultrathin films by localized surface plasmon resonance of gold nanoparticles [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2019, E102.C(2):100-106.

- [18] LIU X, BENETTI D, ROSEI F. Semi-transparent luminescent solar concentrators based on plasmon-enhanced carbon dots [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2021, 9(41):23345-23352.
- [19] MENDEWALA B, VICKERS E T, NIKOLAIDOU K, et al. High efficiency luminescent solar concentrator based on organo-metal halide perovskite quantum dots with plasmon enhancement [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(20):2100754.
- [20] YANG X H, FU H T, WONG K, et al. Hybrid Ag@TiO₂ core-shell nanostructures with highly enhanced photocatalytic performance [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(41):415601-1-10.
- [21] MA R M, OULTON R F, SORGER V J, et al. Room-temperature sub-diffraction-limited plasmon laser by total internal reflection [J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10(2):110-113.
- [22] LOO C, LIN A, HIRSCH L, et al. Nanoshell-enabled photonics-based imaging and therapy of cancer [J]. *Technol. Cancer Res. Treat.*, 2004, 3(1):33-40.
- [23] OULTON R F, SORGER V J, GENOV D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation [J]. *Nat. Photonics*, 2008, 2(8):496-500.
- [24] WU J L, CHEN F C, HSIAO Y S, et al. Surface plasmonic effects of metallic nanoparticles on the performance of polymer bulk heterojunction solar cells [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(2):959-967.
- [25] CHO A. High-tech materials could render objects invisible [J]. *Science*, 2006, 312(5777):1120.
- [26] PRASAD P N. Polymer science and technology for new generation photonics and biophotonics [J]. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 2004, 8(1):11-19.
- [27] MAGGIONI G, CAMPAGNARO A, CARTURAN S, et al. Dye-doped parylene-based thin film materials; application to luminescent solar concentrators [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2013, 108:27-37.
- [28] 顾港伟, 郑子达, 张鑫, 等. 基于 CsPbBr₃ 纳米晶掺杂硫醇-烯聚合物的荧光太阳集光器制备及集光性能 [J]. *发光学报*, 2021, 42(5):724-732.
GU G W, ZHENG Z D, ZHANG X, et al. Fabrication and optical efficiency of CsPbBr₃ nanocrystals and thiol-ene polymer-based luminescent solar concentrator [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(5):724-732. (in Chinese)
- [29] GU G W, ZHANG X, GUO Y Q, et al. Optical characterization and photo-electrical measurement of luminescent solar concentrators based on perovskite quantum dots integrated into the thiol-ene polymer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(1):011905.
- [30] LI H B, WU K F, LIM J, et al. Doctor-blade deposition of quantum dots onto standard window glass for low-loss large-area luminescent solar concentrators [J]. *Nat. Energy*, 2016, 1(12):16157-1-9.
- [31] KLIMOV V I, BAKER T A, LIM J, et al. Quality factor of luminescent solar concentrators and practical concentration limits attainable with semiconductor quantum dots [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6):1138-1148.
- [32] GEDDES C D, LAKOWICZ J R. Editorial: Metal-enhanced fluorescence [J]. *J. Fluoresc.*, 2002, 12(2):121-129.



曹修东(1997-),男,山东济宁人,硕士研究生,2020年于聊城大学获得学士学位,主要从事微纳光电子器件的研究。
E-mail: 2011082219@nbu.edu.cn



张晓伟(1987-),男,河北石家庄人,博士,副教授,2016年于南京大学获得博士学位,主要从事稀土掺杂硅基薄膜发光材料与光电子器件方面的研究。
E-mail: zhangxiaowei@nbu.edu.cn



田野(1988-),男,山东枣庄人,博士,讲师,2019年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事硅基光电子器件方面的研究。
E-mail: tianye@nbu.edu.cn