

文章编号: 1000-7032(2019)03-0326-08

基于全无机钙钛矿量子点辐致荧光效应的同位素电池研究

陈 旺, 汤晓斌*, 刘云鹏, 许志恒, 张峥嵘

(南京航空航天大学 核科学与工程系, 江苏 南京 211106)

摘要: 辐致光伏效应同位素电池因其具有小型化、长寿命等特点, 已被广泛研究。研究工作主要致力于提升同位素电池的输出性能。本研究选取全无机钙钛矿量子点作为荧光材料, 利用其发射光可调的特性以匹配不同的后端光伏器件, 调控优化后同位素电池的最大输出功率显著提升, 可提高 2.51 ~ 3.97 倍。基于上述研究结果讨论了优化后端器件的适配性对于核探测和核医学成像等领域的应用价值和参考意义。

关 键 词: 全无机钙钛矿量子点; 辐致光伏效应同位素电池; 光谱调控

中图分类号: 0482.31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20194003.0326

Study on All-inorganic Perovskite Quantum Dot Radioluminescence Isotope Batteries

CHEN Wang, TANG Xiao-bin*, LIU Yun-peng, XU Zhi-heng, ZHANG Zheng-rong

(Department of Nuclear Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

* Corresponding Author, E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

Abstract: Radioluminescence isotope batteries have been extensively studied for their small size and long lifetime. The research work on isotope batteries is mainly aimed at improving the output performance. In this study, all-inorganic perovskite quantum dots were selected as fluorescent materials to match different photovoltaic devices with their tunable emission spectra. The maximum output power of the isotope battery is significantly increased after the spectral regulation, and can be increased by 2.51 – 3.97 times. At the same time, the application value and reference significance of spectral regulation in nuclear detection and nuclear medicine imaging are discussed.

Key words: all-inorganic perovskite quantum dots; radioluminescence isotope battery; spectral regulation

1 引 言

同位素电池是将放射性同位素的衰变能转化为电能的装置^[1-5], 是一种为深空探测提供稳定能源供应的可选方案。同位素电池有关的研究工作主要致力于提升同位素电池的输出性能。具体的研究内容包括遴选换能材料、改变物理参数、优化结构设

计和研究服役环境等^[6-8]。辐致荧光效应同位素电池作为一种间接换能的同位素电池, 由放射源、荧光材料、光伏单元组成^[9-11], 可减少直接换能中换能单元的辐照损伤, 从而有望应用于高活度、高能量密度的放射源。然而, 辐致荧光效应同位素电池由于未优化荧光材料发射光谱与换能单元匹配性等问题, 导致同位素电池整体的输出功率、能量转换效率低,

收稿日期: 2018-05-04; 修订日期: 2018-06-30

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(11675076); 国家自然科学基金青年科学基金(11505096); 南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj20170611)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11675076); National Science Foundation for Young Scientists of China(11505096); Foundation of Graduate Innovation Center in NUA A(kfj20170611)

因此寻求一种发射光谱可调的辐致荧光材料, 调控发射光谱以匹配于不同的换能单元, 是一种获得更优异电池输出性能的可行方案。

钙钛矿量子点在 LED、太阳能电池、传感器等领域均取得了飞速的发展^[12-15]。因其优异的光学性能和光谱调控等特性被越来越多的研究者所关注。为了获得更优异的电池输出性能, 本研究选择两种量子点 (CsPbBr₃、CsPbBr_{1.5}I_{1.5}) 针对传统液体闪烁体 PPO 的发射光谱进行光谱调控。主要研究了量子点荧光材料的表征、光谱调控前后辐致光伏效应同位素电池的光学性能和电学性能的增益以及光谱调控前后对于不同后端器件的适配因子计算。同时, 讨论了优化后端器件的适配性对于核探测和核医学成像等领域的应用价值和参考意义。

2 实验与方法

2.1 荧光材料的制备

热注入法合成钙钛矿量子点, 油胺和油酸作

为表面活性剂。表面烷基促进 CsPbBr₃ 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} 量子点 (QD) 在有机溶剂中的分散, 获得量子点溶液分散在甲苯中待用。将 20 mg 二, 五-二苯基恶唑 (PPO) 溶解在 10 mL 甲苯溶剂中, 以获得 PPO 的甲苯溶液。CsPbX₃ QD/PPO (X = Cl, Br, I) 溶液是通过将 20 mg PPO 粉末加入 10 mL 量子点溶液中, 磁力搅拌至完全溶解而获得。本文配制的 QD/PPO 和 QD 溶液中量子点的质量浓度均为 10 mg/mL, QD/PPO 和 PPO 溶液中 PPO 的质量浓度均为 2 mg/mL。

2.2 辐致荧光光谱测试系统

对荧光材料的辐致荧光 (RL) 光谱进行测量, 表征发射光谱。测试系统由 W 靶的 X 射线管 (管电压和管电流为 10 ~ 60 kV 和 100 ~ 1 000 μA) (KYW900A) 和荧光分光光度计 (Cary-Eclipse) 组成。发射光谱的测量范围为 200 ~ 1 000 nm。单色光发射器的狭缝宽度为 20 nm, 光电倍增管电压为 800 V。辐致荧光光谱测试系统^[15]的实物图和原理图如图 1 所示。

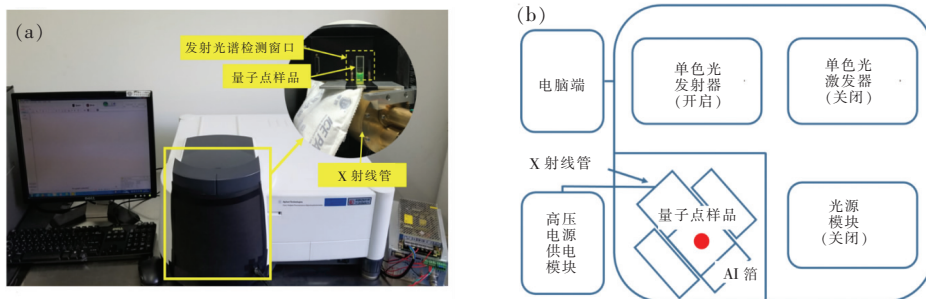


图 1 (a) 辐致荧光光谱测试系统实物图; (b) 辐致荧光光谱测试系统原理图。

Fig. 1 Physical diagram (a) and schematic diagram (b) of radioluminescence spectral measurement system

2.3 同位素电池的光学、电学性能测试系统

同位素电池的光学性能测试系统由佳能变焦镜头 (EF 24 ~ 70 mm f/2.8L II USM) 和电子倍增电荷耦合光学相机 (EMCCD Andor iXon Ultra 888

#BV, USA) 组成。所有图像的积分时间设置为 1 s。EMCCD 相机镜头 Φ82 mm, 图像分辨率为 1 024 pixel × 1 024 pixel。辐致荧光图像通过扣除在相同黑暗条件下关闭 X 射线管的背景本底

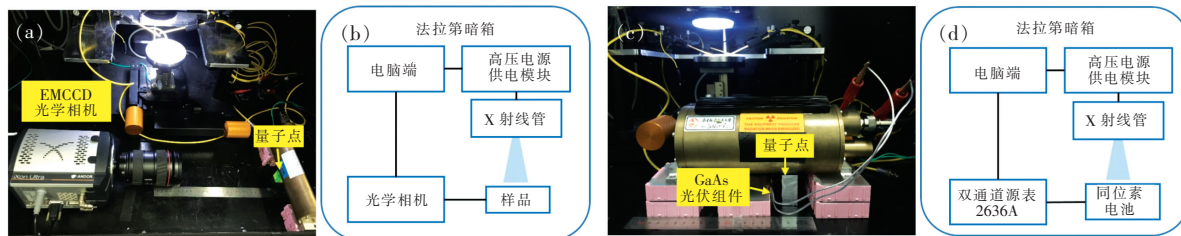


图 2 (a) 辐致荧光图像测试系统的实物图 (EMCCD); (b) 辐致荧光图像测试系统原理图; (c) 电学性能测试系统实物图 (2636A); (d) 电学性能测试系统原理图 (2636A)。

Fig. 2 (a, b) Physical diagram and schematic diagram of RL image test system (EMCCD). (c, d) Electrical property test system (2636A).

图像来获得。在实验测量过程中,所有仪器均放置在法拉第暗箱中。连续测量 3 次,计算每个样品测试结果的平均值和标准偏差。同位素电池的电流-电压 (I - V) 曲线通过双通道数字源表 (Keithley 2636A, USA) 测量。电学性能和光学性能测试系统的实物图和原理图如图 2 所示。

3 结果与讨论

3.1 量子点荧光材料的材料表征

相同浓度 (10 mg/mL) 的 CsPbBr_3 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ 量子点溶液的光致发光光谱 (PL)、辐致发光光谱 (RL) 和吸收光谱如图 3 所示。

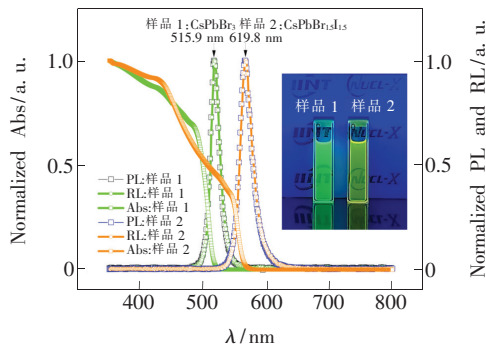


图 3 CsPbBr_3 QDs 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QDs 的光致荧光发射光谱、辐致荧光发射光谱和吸收光谱。

Fig. 3 RL spectra, PL spectra and absorption of perovskite CsPbBr_3 QDs and $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QDs.

实验结果表明量子点荧光材料的 RL 光谱和 PL 光谱的峰位和半高宽 (FWHM) 均无明显差异。 CsPbBr_3 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ 量子点的 RL 光谱的峰位分别为 515.9 nm 和 619.8 nm, 半高宽 (FWHM) 分别为 10.2 nm 和 16.1 nm。相比于传统荧光材料 (FWHM 普遍大于 50 nm, 见表 1), 钙钛矿量子点具有更窄的半高宽, 且发射光谱的峰位可以通过改变量子点组分进行调控, 可实现可见光范围内的全谱调控。

3.2 同位素电池电学性能表征

单结 GaAs 作为光伏组件转换荧光材料的辐致荧光并产生电输出。通过 2.3 中的实验方法测量不同荧光材料 (PPO, $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QD/PPO 和 CsPbBr_3 QD/PPO) 同位素电池的 I - V 曲线, 对比了利用量子点光谱调控前后同位素电池的电学性能差异。双通道数字源表采集到的 I - V 曲线如图 4 所示。

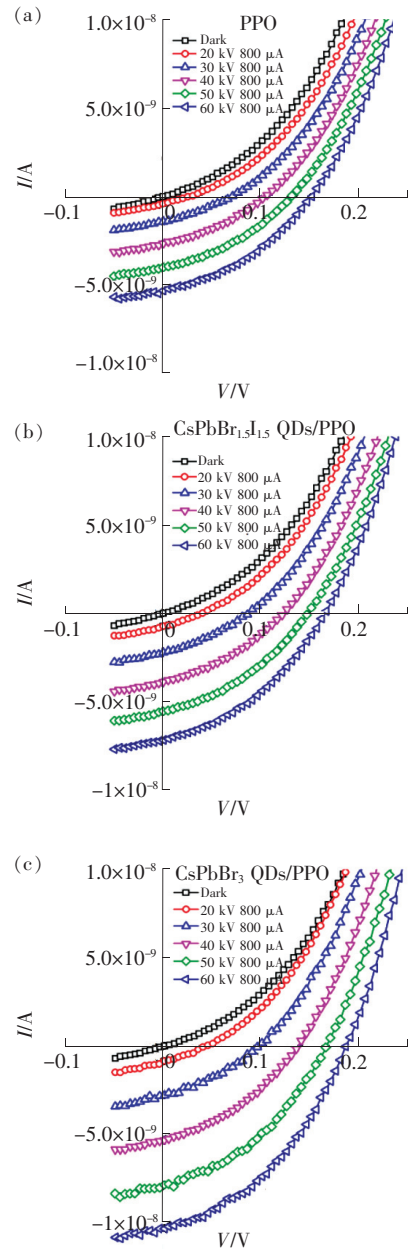


图 4 PPO (a)、 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QD/PPO (b) 和 CsPbBr_3 QD/PPO (c) 同位素电池的 I - V 曲线。

Fig. 4 I - V characteristic curves of PPO (a), $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QD/PPO (b), and CsPbBr_3 QD/PPO (c) radioluminescent nuclear batteries.

使用短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大输出功率 (P_{max}) 和填充因子 (K) 等电学参数来评价同位素电池的电学性能。从上述 I - V 曲线中获取数据。最大功率点 P_{max} 处的电压和电流分别表示为 I_{mp} 和 V_{mp} 。其中 P_{max} 和 K 由公式 (1) 和 (2) 计算得到:

$$P_{max} = V_{mp} I_{mp}, \quad (1)$$

$$K = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2)$$

I - V 曲线测试结果表明,随着 X 射线源增大(增大 X 射线管的管电压),同一体系荧光材料的

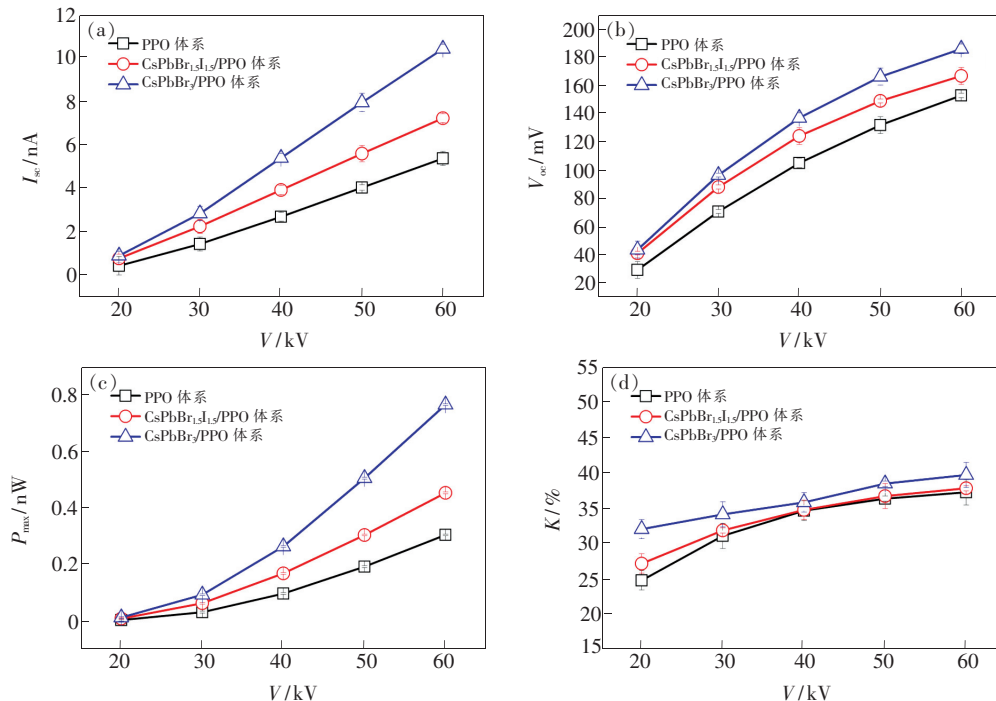


图5 X 射线管管电流为 $800 \mu\text{A}$ 时,不同管电压下同位素电池的短路电流(I_{sc}) (a)、开路电压(V_{oc}) (b)、最大输出功率(P_{max}) (c)和填充因子(K) (d)。

Fig. 5 Short-circuit current (I_{sc}) (a), open-circuit voltage (V_{oc}) (b), maximum output power (P_{max}) (c) and fill factor (K) (d) of the radioluminescent nuclear batteries at different voltage. The current is $800 \mu\text{A}$.

短路电流(I_{sc})、开路电压(V_{oc})、最大输出功率(P_{max})和填充因子(K)这四项电学参数是评价同位素电池电学性能的关键参数。由上述实验结果可知,随着 X 射线管的管电压增大,同位素电池的各项电学性能参数均增大。在不同的 X 射线辐照环境下,QD/PPO 体系的各项电学参数均比 PPO 体系要优异。相比于未利用量子点光谱调控的 PPO 体系而言,利用量子点进行光谱调控对辐致光伏效应同位素电池的电性能具有显著的增益效果。其中最大输出功率 P_{max} 的增益可达 2.51~3.97 倍。同位素电池电学性能的实验结果充分证明了利用量子点光谱调控的可行性和显著增益。为了解释同位素电池电学性能增益的原因,对同位素电池的光学性能进行了表征。

3.3 同位素电池的光学性能表征

使用 2.3 的辐致荧光图像测试系统中的 EMCCD 相机在不同 X 射线辐照条件下,实验记录不同荧光材料 (CsPbBr₃ QD 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD,

电学性能均增强。其中 QD/PPO 体系的电学性能显著优于 PPO 体系。QD/PPO 体系和 PPO 体系同位素电池的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_{max} 和 K 的值由 I - V 曲线中的数据使用公式(1)和(2)计算得到,如图 5 所示。

PPO, CsPbBr₃ QD/PPO 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO 各 5 mL) 的辐致荧光图像,如图 6 所示。

从 EMCCD 表征的辐致荧光图像可明显观察到,随着 X 射线管的管电流和管电压变大,不同体系(QD 体系、PPO 体系、QD/PPO 体系)的同位素电池光学性能均增强,QD/PPO 体系相比于 PPO 体系和 QD 体系的辐致荧光图像中的计数热区范围更大。实验结果表明,QD/PPO 体系比 PPO 体系和 QD 体系产生更多的计数信息。从实验获取的辐致荧光图像可知,若单一使用 PPO 体系或 QD 体系作为辐致荧光效应同位素电池的荧光材料得到的荧光光子数远小于 QD/PPO 体系。辐致荧光的荧光光子计数较低是 PPO 体系的同位素电池电学性能较差的主要原因。图 7 是各体系辐致荧光图像的荧光光子的计数统计。

实验结果表明 QD/PPO 体系的计数大于 QD 体系和 PPO 体系,同位素电池光学性能的实验结果与同位素电池电学性能的实验结果相一致。在

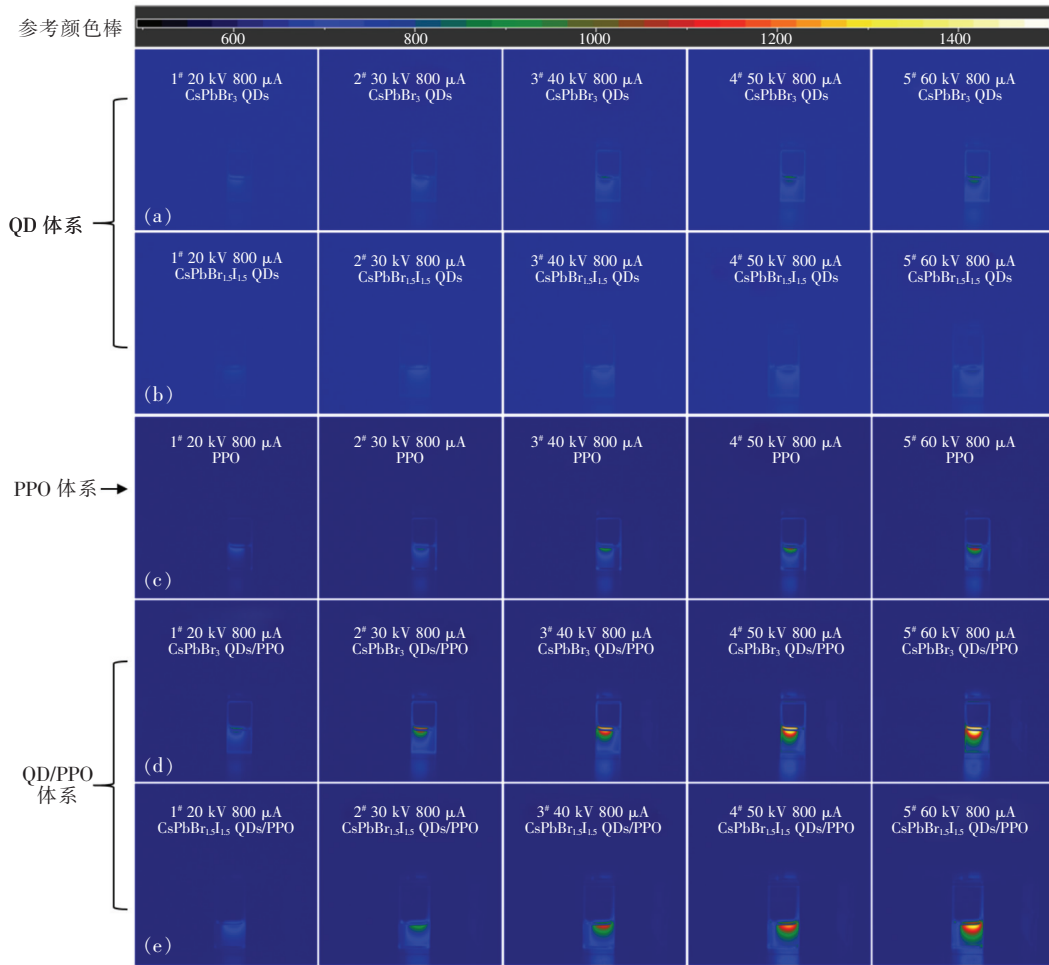


图 6 EMCCD 获取在不同 X 射线辐照下 CsPbBr₃ QDs (a)、CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QDs (b)、PPO (c)、CsPbBr₃ QD/PPO (d) 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO (e) 的辐致荧光图像。

Fig. 6 Image taken by the EMCCD. CsPbBr₃ QDs (a), CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QDs (b), PPO (c), CsPbBr₃ QD/PPO (d) and CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO (e) under different X-ray irradiation conditions.

QD/PPO 体系中量子点的荧光由两部分组成,分别为量子点在 X 射线辐照下量子点本身辐致激发产生的辐致荧光(QD 体系的荧光光子计数)及量子点吸收 PPO 的辐致荧光光致激发量子点产生的光致荧光。根据计数统计结果,QD/PPO 体系产生的荧光由 4.79%~5.35% 的辐致荧光(QD 体系的荧光光子计数占 QD/PPO 体系的荧光光子计数的份额)和接近 95% 的光致荧光组成。CsPbBr₃ 量子点具有较高的荧光量子效率是 CsPbBr₃ QD/PPO 体系的计数略高于 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO 体系的原因。实验结果表明,利用 CsPbBr₃ 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} 量子点光谱调控后的 QD/PPO 体系的光学性能得到显著提升。QD/PPO 体系相比于 PPO 体系光学性能的增益可达 2.36~2.83 倍。对于辐致光伏效应同位素电池而言,利用量子点进行光谱调控可获

得更优异的光学和电学性能。

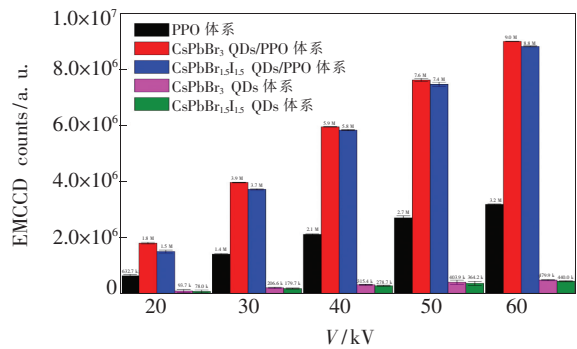


图 7 不同辐照条件(管电流为 800 μA)下由 EMCCD 获取不同体系荧光材料辐致荧光图像的计数统计

Fig. 7 Counting statistics of radioluminescence images of different solutions taken by EMCCD under different radiation conditions (The current is 800 μA)

3.4 荧光材料光谱适配因子计算

QD/PPO 体系和 PPO 体系的归一化 RL 光谱和不同器件 (EMCCD 和 GaAs PV) 的外量子效率曲线如图 8 所示。QD/PPO 和 PPO 辐致荧光光谱与不同器件的光谱适配因子 (F) 可通过公式 (3) 计算得到^[16]:

$$F = \frac{\int S_p(\lambda) S_D(\lambda) d\lambda}{\int S_p(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

其中, λ 是光谱波长, $S_p(\lambda)$ 是 QD/PPO 体系和

PPO 体系的 RL 光谱数据, 代表不同荧光材料的特征发射光谱的具体数值; $S_D(\lambda)$ 是 EMCCD 和 GaAs 的外量子效率曲线数据, 代表不同光电器件的外量子效率的具体数值。光谱适配因子描述的是荧光材料的特征发射光谱与不同光电转换器件适配程度的参数, 可作为光谱调控前后与不同光电转换器件的适配性的评价标准。

通过使用图 4 和式 3 中的数据计算 PPO, CsPbBr₃ QD/PPO 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO 分别与 EMCCD、GaAs 的光谱适配因子。具体数据见表 1。

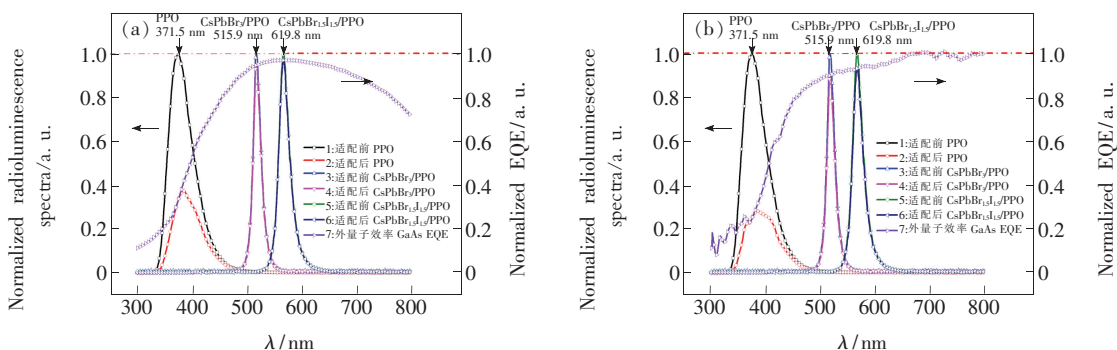


图 8 (a) PPO、CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO、CsPbBr₃ QD/PPO 的归一化辐致荧光光谱和 EMCCD 的外量子效率曲线; (b) PPO、CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO、CsPbBr₃ QD/PPO 的归一化辐致荧光光谱和 GaAs 的外量子效率曲线。(光谱适配前后对比)

Fig. 8 (a) Normalized radioluminescence spectra of PPO, CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO, CsPbBr₃ QD/PPO and the external quantum efficiency curve of EMCCD. (b) Normalized radioluminescence spectra of PPO, CsPbBr_{1.5}I_{1.5} QD/PPO, CsPbBr₃ QD/PPO and the external quantum efficiency of GaAs. (Emission spectrum adaptability comparison)

表 1 QD/PPO 和 PPO 与 EMCCD 和 GaAs 的光谱适配因子

Tab. 1 QD/PPO and PPO SMF of EMCCD and GaAs PV

荧光材料	EMCCD/%	GaAs/%	λ_{Peak}/nm	FHWM/nm
PPO	42.48	36.76	371.5	54.2
CsPbBr ₃ QD/PPO	91.74	88.34	515.9	10.2
CsPbBr _{1.5} I _{1.5} QD/PPO	95.44	92.38	619.8	16.1

从图 8 中的 RL 光谱可知, CsPbBr₃ 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} 量子点将由 PPO 产生的辐致荧光完全转化到各自的特征发射波长处 (CsPbBr₃ 量子点 515.9 nm 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} 量子点 619.8 nm), 实现了对 PPO 荧光光谱的光谱调控。针对 EMCCD 和 GaAs 这两种后端器件而言, CsPbBr₃ 和 CsPbBr_{1.5}I_{1.5} 量子点的 RL 光谱具有比 PPO 更适宜的峰位和更窄的半高宽 (FHWM)。计算结果表明 QD/PPO 体系的光谱适配因子是 PPO 体系的两倍左右, 光谱适配因子的显著改善是量子点光谱调控后光学性能和电学性能显著增益的主要原因。

3.5 全无机钙钛矿量子点应用展望

在以往辐致荧光效应同位素电池的研究中, 主要集中于放射源、荧光材料、光伏单元这 3 个方面。其中放射源的研究相对较少, 考虑到电离辐射屏蔽等环境安全问题一般选取 α 和 β 放射源居多, 如 ³H、²¹⁴Am、¹⁴⁷Pm、⁶³Ni 等。光伏单元的研究主要借鉴于太阳能电池领域的研究基础, 一般选取禁带宽度较高的 III-V 族半导体如 GaAs、In-GaP 等。荧光材料的主要选择是荧光粉晶体 (ZnS: Ag、ZnS: Cu、ZnS: Cu Al 等)、闪烁体材料 (LYSO、CsI: Tl、PPO 等)^[8-11]。本文针对传统荧光材料发射光谱相对确定, 利用量子点荧光材料发

射光谱可调的特性改善传统荧光材料与不同后端器件的适配性。通过改变全无机钙钛矿量子点的组分,可改变量子点的发射波长进而可实现可见光波段的全谱调控。不同组分的全无机钙钛矿量子点的实物图和归一化的辐致荧光发射光谱如图 9 所示。

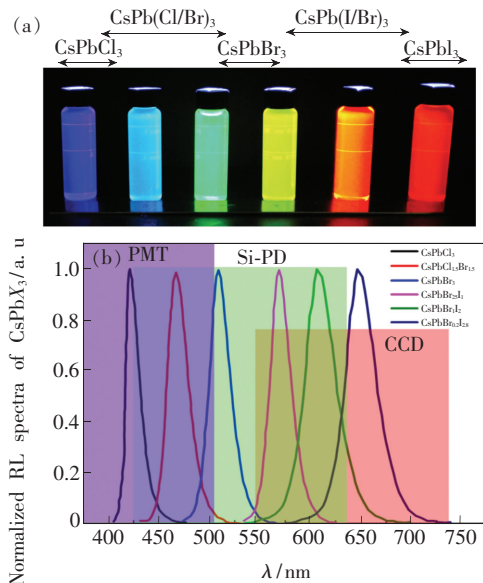


图 9 (a)全无机钙钛矿量子点 CsPbX_3 (Cl, Br, I) 的实物图; (b)全无机钙钛矿量子点 CsPbX_3 (Cl, Br, I) 的辐致荧光发射光谱。

Fig. 9 (a) Physical diagram of all-inorganic perovskite CsPbX_3 (Cl, Br, I) QDs. (b) RL spectra of all-inorganic perovskite CsPbX_3 (Cl, Br, I) QDs.

全无机钙钛矿量子点可实现可见光范围内的全谱调控,以适配于对不同光谱区间有响应需求的后端器件(PMT 光电倍增管、Si-PD 硅光电二极管、CCD 电荷耦合器件等)。利用可实现光谱调控的量子点荧光材料改善光电器件与发射光谱适配性的研究思路,在辐射传感器、核电池、辐射探测器以及核医学成像等领域具有一定的参考意义

参 考 文 献:

- [1] QIAO D Y, CHEN X J, REN Y, *et al.*. A micro nuclear battery based on SiC Schottky barrier diode [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2011, 20(3):685-690.
- [2] DE CUMIS M S, FARSI A, MARINO F, *et al.*. Radiation pressure excitation and cooling of a cryogenic micro-mechanical systems cavity [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106(1):013108-1-18.
- [3] LI H, LIU Y B, HU R, *et al.*. Simulations about self-absorption of tritium in titanium tritide and the energy deposition in a silicon Schottky barrier diode [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2012, 70(11):2559-2563.
- [4] LANDIS G A, BAILEY S G, CLARK E B, *et al.*. Non-solar photovoltaics for small space missions [C]. *Proceedings of The*

和应用价值。

4 结 论

本文提出的钙钛矿量子点辐致光伏效应同位素电池可作为一种显著提升同位素电池输出功率的可行方案,为开发服役于低功耗 MEMS 的同位素电池提供了技术基础和参考依据。本文选取 CsPbBr_3 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ 钙钛矿量子点调控 PPO 的辐致荧光发射光谱,获得了更优异的器件适配性及同位素电池整体电学性能,得到以下结论:

(1)热注入合成的 CsPbBr_3 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ 量子点表征各体系的辐致荧光光谱和图像。利用量子点光谱调控后,RL 光谱的峰位从 371.5 nm (PPO)变为 515.9 nm (CsPbBr_3 QD/PPO)和 619.8 nm ($\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ QD/PPO)。

(2)PPO、 CsPbBr_3 /PPO 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ /PPO 与 EMCCD 的光谱适配因子值分别为 42.48%、91.74% 和 95.44%。QD/PPO 体系的 EMCCD 荧光计数比 PPO 体系增加 2.36~2.83 倍。

(3)利用量子点光谱调控后,QD/PPO 辐致荧光效应同位素电池相比于 PPO 辐致荧光效应同位素电池的电学性能显著提升。短路电流 I_{sc} 提升 1.35~2.07 倍,开路电压 V_{oc} 提升 1.09~1.49 倍,最大输出功率 P_{max} 提升 2.51~3.97 倍,填充因子 FF 提升 1.01~1.10 倍。PPO、 CsPbBr_3 /PPO 和 $\text{CsPbBr}_{1.5}\text{I}_{1.5}$ /PPO 与 GaAs 的光谱适配因子值分别为 36.76%、82.34% 和 92.38%。

(4)验证了全无机钙钛矿量子点应用于辐致荧光效应同位素电池的可行性。表明了量子点光谱调控可显著提高辐致荧光效应同位素电池的整体输出性能,同时也探究了量子点在核探测以及核医学成像技术等领域的潜在应用价值。

38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, 2012:002819-002824.

- [5] 张华明,胡睿,王关全,等. ^{63}Ni 辐射伏特同位素电池原型的研制 [J]. 原子能科学技术, 2013,47(3):490-496.
ZHANG H M, HU R, WANG G Q, *et al.*. Development of ^{63}Ni voltaic nuclear micro-battery prototype [J]. *At. Energy Sci. Technol.*, 2013,47(3):490-496. (in Chinese)
- [6] PRELAS M A, WEAVER C L, WATERMANN M L, *et al.*. A review of nuclear batteries [J]. *Prog. Nucl. Energy*, 2014, 75:117-148.
- [7] XU Z H, TANG X B, HONG L, *et al.*. Structural effects of ZnS: Cu phosphor layers on beta radioluminescence nuclear battery [J]. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2015,303(3):2313-2320.
- [8] SYCHOV M, KAVETSKY A, YAKUBOVA G, *et al.*. Alpha indirect conversion radioisotope power source [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2008,66(2):173-177.
- [9] HONG L, TANG X B, XU Z H, *et al.*. Radioluminescent nuclear batteries with different phosphor layers [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B: Beam Interact. Mater. At.*, 2014,338:112-118.
- [10] TANG X B, LIANG H, XU Z H, *et al.*. Temperature effect of a radioluminescent nuclear battery based on $^{147}\text{Pm}/\text{ZnS: Cu}/\text{GaAs}$ [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2015,97:118-124.
- [11] RUSSO J, LITZ M, RAY II W, *et al.*. A radioluminescent nuclear battery using volumetric configuration: ^{63}Ni solution/ $\text{ZnS: Cu, Al}/\text{InGaP}$ [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2017,130:66-74.
- [12] 余彬海, 卢汉光, 饶龙石, 等. 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 [J]. 发光学报, 2018, 39(4):440-448.
YU B H, LU H G, RAO L S, *et al.*. Synthesis of high quality inorganic perovskite quantum dots *via* microchannel reactor and their application in LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(4):440-448. (in Chinese)
- [13] 王俊, 禹豪, 张继华, 等. 采用 MoO_3 阳极缓冲层的钙钛矿太阳能电池研究 [J]. 发光学报, 2018,39(3):322-328.
WANG J, YU H, ZHANG J H, *et al.*. Study on perovskite solar cells with MoO_3 anode buffer layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(3):322-328. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] NIKOLOPOULOS D, VALAIS I, MICHAEL C, *et al.*. Radioluminescence properties of the CdSe/ZnS quantum dot nanocrystals with analysis of long-memory trends [J]. *Radiat. Meas.*, 2016,92:19-31.
- [16] VALAIS I, NIKOLOPOULOS D, KALIVAS N, *et al.*. A systematic study of the performance of the CsI: Tl single-crystal scintillator under X-ray excitation [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 2007,571(1-2):343-345.



陈旺(1993 -),男,湖北宜昌人,硕士研究生,2016年于三峡大学获得学士学位,主要从事纳米荧光材料在辐射能量转换、辐射探测以及核医学中的应用的研究。

E-mail: wangchen9@nuaa.edu.cn



汤晓斌(1978 -),男,江苏常州人,博士,教授,博士生导师,2009年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事核技术及应用、辐射物理与效应等方向的研究。

E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn