

单个CsPbBr₃钙钛矿量子点的荧光闪烁特性

李斌 苗向阳

Photoluminescence blinking properties of single CsPbBr₃ perovskite quantum dots

Li Bin Miao Xiang-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 207802 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210908

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210908>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

发光铅卤钙钛矿纳米晶稳定性的研究进展

Research progress of stability of luminous lead halide perovskite nanocrystals

物理学报. 2020, 69(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191767>

钙钛矿NaFeF₃结构物性的理论研究及应力和掺杂调控

First principles study of structural, electric, and magnetic properties of fluoride perovskite NaFeF₃

物理学报. 2019, 68(14): 147101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190573>

高效绿光钙钛矿发光二极管研究进展

Research progress of efficient green perovskite light emitting diodes

物理学报. 2019, 68(15): 158504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190647>

基于N型纳米晶硅氧电子注入层的钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diodes based on n-type nanocrystalline silicon oxide electron injection layer

物理学报. 2019, 68(12): 128103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190258>

喷墨打印钙钛矿太阳能电池研究进展与展望

Inkjet printed perovskite solar cells: progress and prospects

物理学报. 2019, 68(15): 158807 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190302>

钙钛矿型氧化物非常规铁电研究进展

Recent progress of improper ferroelectricity in perovskite oxides

物理学报. 2018, 67(15): 157504 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180936>

单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光闪烁特性*

李斌[†] 苗向阳

(山西师范大学物理与信息工程学院, 原子分子和材料光谱测量与分析山西省重点实验室, 临汾 041004)

(2021年5月13日收到; 2021年6月10日收到修改稿)

钙钛矿量子点优异的光学特性使其成为太阳能电池、发光二极管、激光器、探测器等常规光电器件以及单光子源、纠缠光子源等非经典量子光源的理想材料. 对于单个钙钛矿量子点荧光闪烁特性的研究可以为微纳光电器件的制备提供技术支持. 针对如何有效分析钙钛矿单量子点的荧光闪烁机制这一关键问题, 本文基于荧光轨迹进行亮、暗态的幂律分析发现: 弱光激发下钙钛矿单量子点荧光的亮、暗态概率密度服从幂律统计, 量子点的荧光闪烁是表面俘获态的活化和非活化造成的; 强光激发下, 单量子点荧光的亮态概率密度服从指数截断的幂律统计, 量子点的荧光闪烁是量子点充、放电和表面俘获共同作用的结果.

关键词: 钙钛矿, 单量子点, 荧光闪烁, 幂律分布

PACS: 78.47.D-, 78.47.jd, 78.55.-m, 78.67.Hc

DOI: 10.7498/aps.70.20210908

1 引言

钙钛矿量子点 (quantum dots) 具有优异的光学特性, 如吸收系数高、发射光谱窄、荧光量子产率高、发射波长可调等, 是制备太阳能电池、发光二极管、激光器、探测器等光电器件的理想材料^[1-3]. 除了这些常规的光电器件外, 钙钛矿量子点具有的强量子限域效应为单光子源和纠缠光子源等非经典量子光源的制备提供了新方法^[4-6], 并在未来的量子计算和量子通信等领域发挥重要作用. 使用单量子点光谱研究钙钛矿量子点的荧光辐射特性可以去除系综平均效应^[7], 在单粒子水平上获取钙钛矿材料的信息, 为微纳光电器件的制备提供技术支持.

钙钛矿量子点和其他量子点存在着一个共同的特性, 即在激光激发下单个量子点的荧光会在亮态和暗态之间来回切换, 该现象被称为单量子点的荧光闪烁^[8,9]. 荧光闪烁现象是辨别单量子体系的

重要特征, 而且可用于随机光学重建显微技术 (STORM) 等超分辨成像技术中^[10], 因此对于钙钛矿量子点荧光闪烁特性的研究具有重要意义. 钙钛矿单量子点的荧光闪烁主要来源于两个原因: 单量子点的充、放电和量子点表面缺陷的活化和非活化. 量子点带电会形成带电态, 造成俄歇复合并降低量子产率^[11,12]; 活化的表面缺陷也会造成量子点激子的非辐射复合^[13,14]. 目前对于两种机制的区分主要是基于荧光寿命-强度分布图分析量子点辐射速率和非辐射速率的关系^[15,16], 然而早期的荧光闪烁模型都是基于单量子点荧光闪烁的幂律分布提出的^[17-19]. 因此, 从单量子点的荧光闪烁轨迹中提取概率密度函数并进行幂律拟合能够进一步探索钙钛矿量子点的荧光闪烁机制.

本文将使用共聚焦显微镜收集单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光, 结合时间标记、时间分辨和时间相关的单光子计数 (TTTR-TCSPC) 技术^[20,21] 记录探测器探测到的每一个荧光光子的到达时间. 根据这些时间信息, 提取单个钙钛矿量子点的荧光

* 国家自然科学基金 (批准号: 11974229) 和山西省高等学校科技创新计划 (批准号: 2021L257) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: libin@sxnu.edu.cn

强度随时间变化轨迹、荧光寿命、二阶关联函数等,并进一步统计单个钙钛矿量子点荧光闪烁轨迹中亮、暗态的概率密度分布. 使用幂律函数对该分布进行拟合,结合带电模型和俘获模型与拟合结果进行对比. 本项研究为解释单个钙钛矿量子点荧光闪烁的原因提供了进一步的依据.

2 实验

2.1 样品的准备

本项研究中所使用的 CsPbBr_3 钙钛矿量子点是基于湿化学法合成的^[22],量子点甲苯溶液的吸收光谱和荧光发射光谱如图 1(a) 所示,量子点的荧光光谱在 515 nm 波段,半高全宽是 20 nm. 室温下溶液中量子点的量子产率高于 50%. 量子点的透射电子显微镜成像如图 1(a) 所示,量子点的平均尺寸约为 10 nm. 通过 X 射线衍射测量,得到了室温下立方钙钛矿晶体结构,如图 1(b) 所示. 在制备单量子点样品前,需要用质量分数为 1% 的聚苯乙烯的甲苯溶液将量子点充分稀释. 然后,将其以

3000 r/min 的转速旋涂在干净的玻片上,旋涂过程在氮气手套箱内进行以避免水蒸气对钙钛矿量子点的影响. 甲苯挥发后形成的聚苯乙烯薄膜能够在共聚焦扫描过程中隔绝空气,提高钙钛矿量子点的稳定性. 为了实现单量子点光谱的测量,需要保证玻片上每 $0.1 \mu\text{m}^2$ 面积内不超过一个量子点. 此外,为了克服溶液中钙钛矿量子点的团聚现象对旋涂结果的影响,需要结合光子统计的方法在共聚焦扫描的过程中识别出单个的量子点^[20].

2.2 实验装置

本项研究中使用自建的共聚焦系统对单个 CsPbBr_3 钙钛矿量子点的荧光进行采集,如图 1(c) 所示. 使用波长为 485 nm、脉冲宽度为 90 ps、重复频率为 10 MHz 的脉冲激光器 (PDL808, PicoQuant) 激发量子点. 使用配备数值孔径为 1.3, 100 倍放大倍率的油浸物镜的倒置荧光显微镜 (IX71, Olympus) 收集单量子点的荧光. 使用压电扫描台 (Tritor 200/20 SG) 在倒置显微镜上安装一个 $x-y-z$ 反馈回路 实现对玻片上样品的扫描. 使用直径为

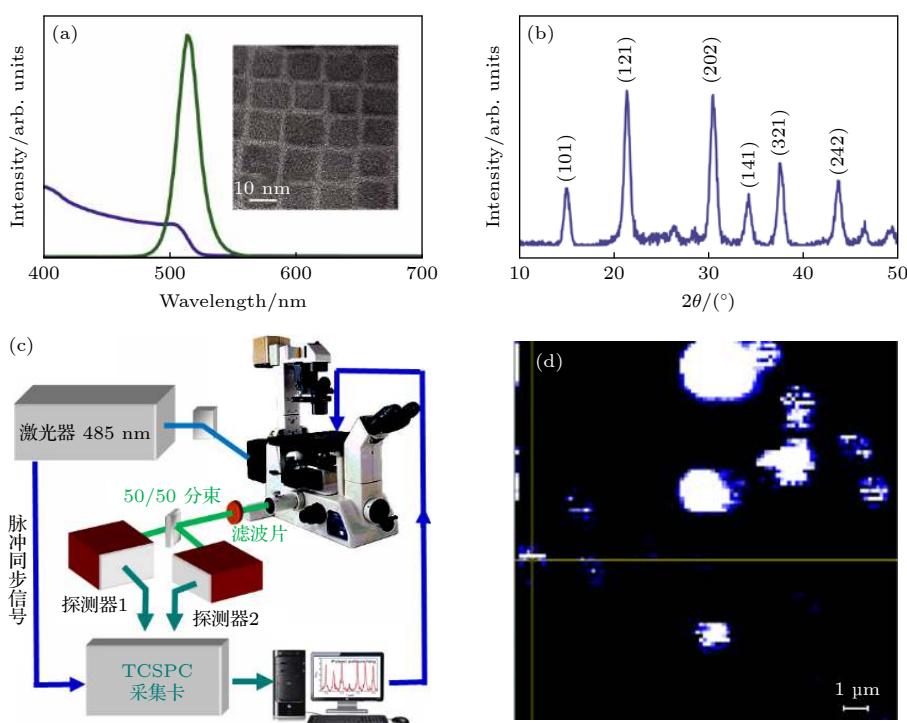


图 1 (a) CsPbBr_3 钙钛矿量子点的吸收光谱 (蓝色曲线)、发射光谱 (绿色曲线) 和透射电镜成像 (内插图); (b) X 射线衍射谱; (c) 单量子点光谱测量系统; (d) 玻片上 CsPbBr_3 钙钛矿量子点的共聚焦扫描成像, 十字叉丝位置为单个的量子点

Fig. 1. (a) Absorption spectroscopy (blue trace), emission spectroscopy (green trace) and TEM imaging (inset) of CsPbBr_3 perovskite quantum dots; (b) X-ray diffraction spectrum; (c) single quantum dot spectrum measurement system; (d) confocal scanning photoluminescence image of CsPbBr_3 perovskite quantum dots on glass substrate. The position of the cross wire is a single quantum dot.

0.1 mm 的针孔对荧光进行空间滤波以提高分辨率. 使用 50/50 分束棱镜将荧光等概率地分成两束, 由两个单光子探测器 (SPCM-AQR-15, Perkin-Elmer) 采集荧光信号. 使用时间标记、时间分辨和时间相关的单光子计数采集卡 (HydraHarp 400, Pico-Quant) 对每一个荧光信号的到达时间进行记录. 通过共聚焦扫描成像和空间符合计数相结合识别单个的量子点, 如图 1(d) 所示. 通过 MatLab 程序后处理获取单量子点的荧光强度轨迹、荧光衰减曲线、二阶关联函数等信息. 通过在样品上加一个氮气罩保证整个测量过程在室温氮气环境下进行.

3 实验结果与讨论

3.1 激发光功率对单个钙钛矿量子点荧光闪烁特性的影响

不同激发光功率激发下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的积分时间为 10 ms 的荧光强度随时间变化轨迹如图 2(a) 中黑色曲线所示, 绿色曲线为背

景荧光, 右侧为相应的强度分布柱状图. 其中 $\langle N \rangle$ 是每脉冲平均吸收光子数, 由量子点的吸收截面和激发光的功率密度决定^[23]. 在激光激发下单量子点的荧光强度在亮态 (bright state) 和暗态 (dark state) 之间来回切换, 该现象被称为单量子点的荧光闪烁. 在弱光激发 ($\langle N \rangle = 0.02$) 下, 量子点的荧光强度主要分布在亮态, 随着激发功率的提高, 量子点的荧光闪烁越来越剧烈, 且柱状图表示量子点荧光强度的分布向暗态集中.

我们从荧光轨迹中提取了不同时间段的荧光强度衰减曲线, 如图 2(b) 所示, 荧光强度衰减曲线的颜色和图 2(a) 中方框的颜色一一对应. 灰色的曲线代表仪器响应函数. 通过反卷积运算去除仪器响应函数的影响, 对每一个荧光衰减曲线进行单指数的拟合可以得到各个区域的荧光寿命. $\langle N \rangle = 0.02$ 时, 荧光轨迹中紫色区域和橙色区域相应的荧光强度衰减曲线寿命分别为 9.2 和 4.6 ns. $\langle N \rangle = 0.2$ 时, 荧光轨迹中紫色、橙色和粉色区域相应的荧光强度衰减曲线寿命分别为 10.5, 4.3 和 1.7 ns. $\langle N \rangle = 2$

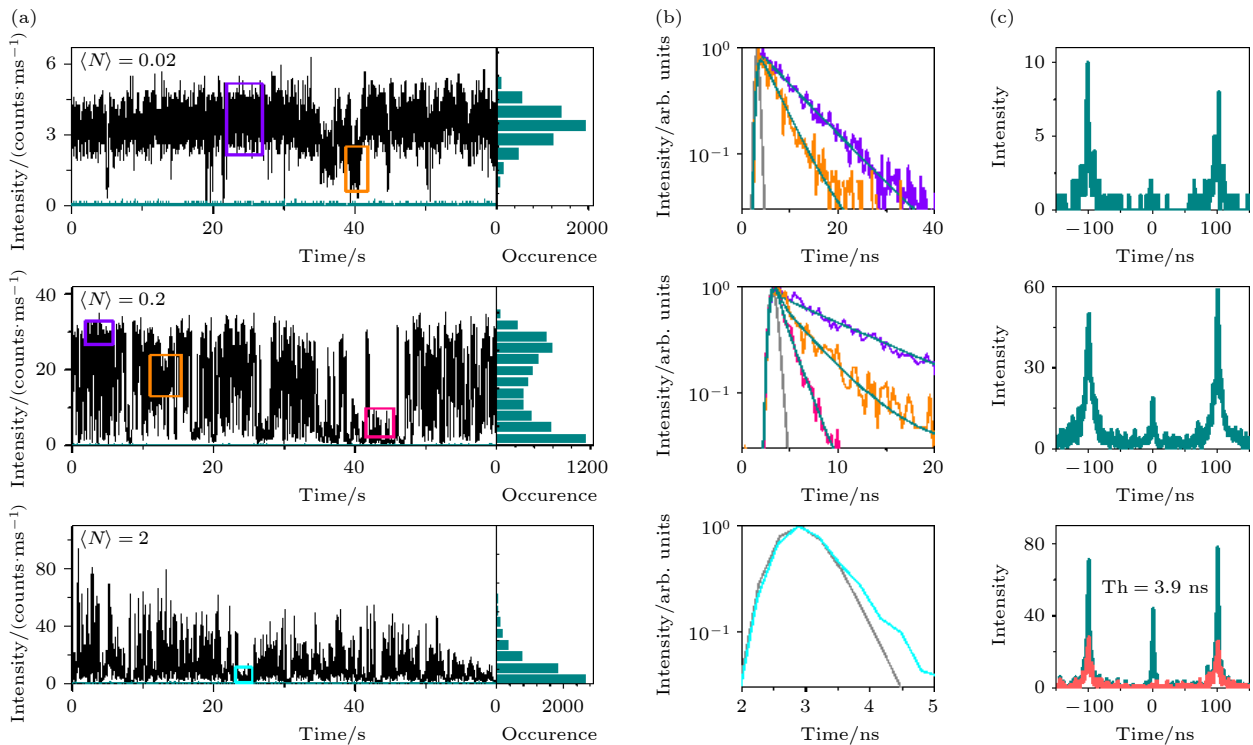


图 2 (a) 左侧为不同激发功率下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光强度随时间变化轨迹图, 右侧为相应的荧光强度分布图; (b) 图 (a) 中各方框区域内荧光相应的衰减曲线 (颜色一一对应) 及相应的单指数拟合曲线 (绿色), 灰色曲线为仪器响应函数; (c) 绿色曲线为相应的二阶关联函数, 粉色曲线为门控二阶关联函数

Fig. 2. (a) Typical photoluminescence intensity time trajectories and corresponding intensity distributions of a single CsPbBr₃ QD under different excitation powers; (b) photoluminescence decay curves obtained from the corresponding square in Figure (a); the green and gray curves are single exponential fitted curves and instrument response function, respectively; (c) corresponding second-order correlation function curves (green) and time-gated second-order correlation function curves (pink).

时, 荧光轨迹中青绿色区域相应的荧光强度衰减曲线寿命为 0.7 ns. 由以上数据可以看出, 在弱光激发下, 量子点的荧光强度和寿命呈正比关系, 这说明荧光闪烁过程是量子点表面俘获的活化和非活化过程导致的^[24]. 当激发光变强时, 量子点的充、放电过程也会造成单量子点的荧光闪烁, 如粉色方框区域标识. 青色方框区域所示的荧光可能是由于量子点带两个电荷导致的. 我们将在讨论部分对这两种机制进行分析和比较.

利用二阶关联函数可以证明所测量的数据来源于单个的钙钛矿量子点, 如图 2(c) 中绿色曲线所示. 在脉冲光激发下测得的二阶关联函数中, 零延时位置对应的面积与边峰面积之比小于 0.5 是单光子源的重要特征^[25]. 在弱光激发下, 二阶关联函数表明探测到的荧光来自于单个的量子点. 当功率增强时, 零延时位置面积增大的原因是: 双激子在高激发功率下更容易形成并辐射双光子. 由于双激子的寿命很小, 因此通过门控 (阈值为 3.9 ns) 的方法重构二阶关联函数可以去除双激子的影响^[26,27], 如图 2(c) 中的粉色曲线所示. 在去除了双激子的影响后, 零延时位置面积相对趋于 0.

3.2 单个钙钛矿量子点荧光亮、暗态统计

在量子点荧光闪烁特性研究中, 通过对荧光亮、暗态概率密度分布 ($P_{\text{on/off}}(t)$) 进行拟合也同样可以获得量子点充、放电过程以及量子点表面俘获态对量子点荧光闪烁特性的影响. 在荧光强度上设一个阈值将荧光轨迹分为两个态: 阈值以上为亮态 (on-state), 阈值以下为暗态 (off-state). 阈值强度取背景荧光强度的平均值加三倍方差^[28-30]. 通过统计不同激发功率下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光在亮、暗态的持续时间可以得到概率密度分布, 如图 3(a)–(c) 所示. 弱光激发 ($\langle N \rangle = 0.02$) 下单量子点的亮、暗态概率密度分布服从幂律统计:

$$P_i(t) \propto t^{-\alpha_i}, \quad (i = \text{on or off}). \quad (1)$$

当激发功率变强时 ($\langle N \rangle = 0.2$ 和 $\langle N \rangle = 2$), 量子点的亮、暗态概率密度分布服从指数截断的幂律统计:

$$P_i(t) \propto t^{-\alpha_i} \exp(-t/\tau_i), \quad (i = \text{on or off}), \quad (2)$$

其中 α 为幂律指数; τ 为截断时间. 拟合结果如表 1

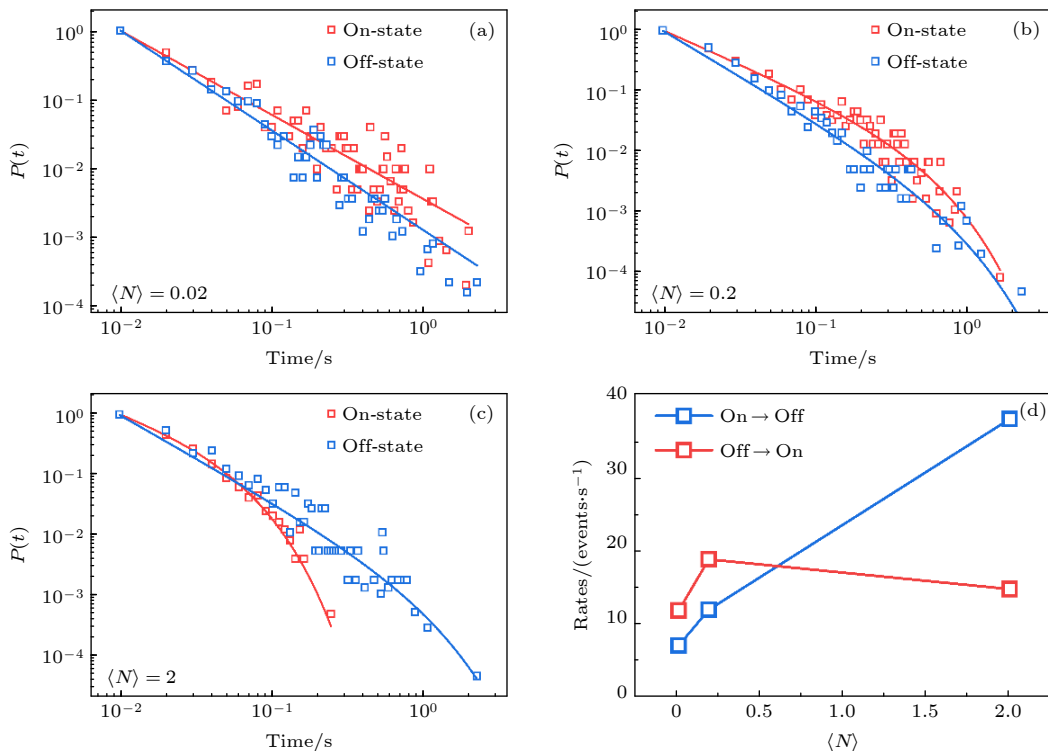


图 3 (a)–(c) 不同功率激发下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的亮、暗态概率密度分布及相应的拟合曲线. On-state 代表亮态, Off-state 代表暗态; (d) 不同功率激发下亮态到暗态以及暗态到亮态的转换速率

Fig. 3. (a)–(c) The probability density distributions and fitted curves of the bright (on) and dark (off) states of a single CsPbBr₃ perovskite quantum dot under different power excitations; (d) conversion rate from bright state to dark state and dark state to bright state under different power excitations.

所列. 因此, 弱光激发下荧光闪烁对应一个俘获中心(即浅俘获), 在较大激发功率下, 亮、暗态概率密度由幂律和指数截断两部分组成, 所以荧光闪烁是两种俘获(深俘获和浅俘获)共同作用的结果, 该实验结果与传统 CdSe 类量子点相同^[31]. 其中, 指数截断部分随功率变化较大, 代表深俘获; 幂律部分随功率变化很小, 代表浅俘获.

表 1 不同功率激发下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的亮、暗态概率密度分布的拟合参数

Table 1. Fitted parameters for the probability density distributions of the bright and dark states of a single CsPbBr₃ perovskite quantum dot under different power excitations.

激发光强度 (每脉冲平均吸收光子数)	亮态		暗态	
	α_{on}	τ_{on}/s	α_{off}	τ_{off}/s
弱光激发($\langle N \rangle = 0.02$)	1.22	—	1.45	—
中等强度光激发($\langle N \rangle = 0.2$)	1.09	0.46	1.48	0.76
强光激发($\langle N \rangle = 2$)	0.81	0.04	1.42	0.92

除了亮、暗态概率密度分布, 亮态到暗态的转换速率 $r_{(on \rightarrow off)}$ 以及暗态到亮态的转换速率 $r_{(off \rightarrow on)}$ 同样可以揭示单量子点的荧光闪烁机制^[32]. 转换速率的计算公式为

$$r_{(on \rightarrow off)} = N_{(on \rightarrow off)} / t_{on}, \quad (3)$$

$$r_{(off \rightarrow on)} = N_{(off \rightarrow on)} / t_{off}, \quad (4)$$

其中 $N_{(on \rightarrow off)}$ 和 $N_{(off \rightarrow on)}$ 是亮态到暗态以及暗态到亮态转换的总次数; t_{on} 和 t_{off} 是亮态和暗态的总持续时间. 不同功率激发下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的亮、暗态转换速率如图 3(d) 所示. 亮态到暗态的转换速率与激发光功率呈线性关系, 这是因为只有光激发在量子点内产生激子才会引起量子点带电以及量子点表面俘获的活化. 暗态到亮态的转换速率随激发光功率变化不大, 这说明量子点放电以及表面俘获的非活化在无光下也能进行, 且与激发光功率关系较小.

4 讨论部分

CsPbBr₃ 钙钛矿单量子点的荧光闪烁现象源自于表面缺陷的活化和非活化以及量子点充、放电, 如图 4 所示.

表面缺陷引起的荧光闪烁. 量子点表面分布有一些由于晶体生长时突然中断产生的未配对的化

学键(表面缺陷)并且具有较高的自由能, 表面原子的非共享原子轨道会产生量子点导带和价带间隙内的局部能级, 即量子点的表面俘获态. 量子点导带中的电子(价带中的空穴)被表面俘获态俘获, 随后与价带中的空穴(导带中的电子)非辐射复合^[33]. 该非辐射复合速率与量子点的辐射速率相近, 因此被称为浅俘获. 在激光激发下, 表面原子在两个准稳态位置之间来回跃迁导致了量子点表面缺陷的活化和非活化(活化的表面缺陷形成俘获态), 从而造成了量子点的荧光闪烁.

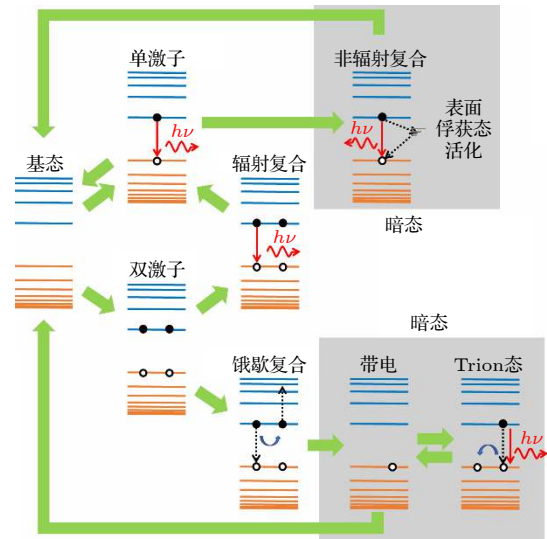


图 4 CsPbBr₃ 钙钛矿单量子点的荧光闪烁原理图. 蓝色能级为导带, 橙色能级为价带, 实心 and 空心圆分别代表电子和空穴

Fig. 4. Photoluminescence blinking mechanisms of single CsPbBr₃ perovskite quantum dots. The blue and orange levels are conduction band and valence band, respectively. The solid and hollow circles represent electrons and holes, respectively.

量子点带电引起的荧光闪烁. 量子点在光的激发下会吸收一个光子, 将价带中的电子激发到导带中形成电子空穴对(即单激子), 或者同时吸收两个光子形成双激子. 双激子中的一个电子和空穴辐射复合能够发射一个荧光光子并形成单激子, 单激子辐射复合能够发射一个荧光光子形成基态. 此外, 双激子也会发生俄歇复合, 即一个电子和空穴将能量传递给另一个电子或空穴并将其电离的非辐射复合过程, 被电离的电子或空穴会被深俘获(俘获时间远大于量子点激子寿命), 并造成量子点带电. 这个额外的电荷会造成新形成的激子的俄歇复合, 从而造成量子产率的下降, 形成暗态. 在激光激发

下,量子点的充、放电过程会造成量子点的荧光闪烁.当激发功率变大时,量子点同时吸收两个光子形成双激子的概率就变大,从而更容易发生俄歇复合并带电.因此充、放电引起的荧光闪烁与激发功率有关.

5 结 论

本文基于时间标记、时间分辨和时间相关的单光子计数技术对不同功率激光激发下单个 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的荧光轨迹进行亮、暗态的概率密度分析.结果表明:弱光激发下,单量子点的荧光轨迹中亮、暗态的概率密度分布服从幂律统计;激发功率变大后,亮态的概率密度分布服从指数截断幂律统计.因此,弱光激发下 CsPbBr₃ 钙钛矿单量子点的荧光闪烁源于表面俘获态的活化和非活化,强光激发下,单量子点的荧光闪烁是量子点充、放电和表面俘获共同作用的结果.该结论与之前的基于荧光寿命-强度分布图得到的结果相一致,且对于实验设备要求更低(不需要时间分辨).如果能够配合量子电表面钝化技术对量子点表面俘获态进行修饰,则可以解释单个钙钛矿量子点荧光闪烁的原因提供更多帮助.

感谢香港城市大学 Andrey L. Rogach 教授和黄河博士的讨论.

参考文献

- [1] Becker M A, Vaxenburg R, Nedelcu G, et al. 2018 *Nature* **553** 189
- [2] Akkerman Q A, Raino G, Kovalenko M V, Manna L 2018 *Nat. Mater.* **17** 394
- [3] Dai G, Wang L, Cheng S, Chen Y, Liu X, Deng L, Zhong H 2020 *ACS Photonics* **7** 2390
- [4] Utzat H, Sun W, Kaplan A E K, et al. 2019 *Science* **363** 1068
- [5] Senellart P, Solomon G, White A 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 1026
- [6] Yin C Y, Chen L Y, Song N, Lv Y, Hu F R, Sun C, Yu W W, Zhang C F, Wang X Y, Zhang Y, Xiao M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 026401
- [7] Zhou J, Chizhik A I, Chu S, Jin D 2020 *Nature* **579** 41
- [8] Nirmal M, Dabbousi B O, Bawendi M G, Macklin J J, Trautman J K, Harris T D, Brus L E 1996 *Nature* **383** 802
- [9] Qin H Y, Meng R Y, Wang N, Peng X G 2017 *Adv. Mater.* **29** 160692316
- [10] Rust M J, Bates M, Zhuang X 2006 *Nat. Methods* **3** 793
- [11] Han X, Zhang G, Li B, Yang C, Guo W, Bai X, Huang P, Chen R, Qin C, Hu J, Ma Y, Zhong H, Xiao L, Jia S 2020 *Small* **16** 2005435
- [12] Chouhan L, Ito S, Thomas E M, Takano Y, Ghimire S, Miyasaka H, Biju V 2021 *ACS Nano* **15** 2831
- [13] Yuan G, Ritchie C, Ritter M, Murphy S, Gómez D E, Mulvaney P 2018 *J. Phys. Chem. C* **122** 13407
- [14] Trinh C T, Minh D N, Nguyen V L, Ahn K J, Kang Y, Lee K G 2020 *APL Mater.* **8** 031102
- [15] Li B, Huang H, Zhang G, Yang C, Guo W, Chen R, Qin C, Gao Y, Biju V P, Rogach A L, Xiao L, Jia S 2018 *J. Phys. Chem. Lett.* **9** 6934
- [16] Li B, Chen R, Qin C, Yang C, Guo W, Han X, Gao Y, Zhang G, Xiao L, Jia S 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 112003
- [17] Cordones A A, Leone S R 2013 *Chem. Soc. Rev.* **42** 3209
- [18] Efros A L, Rosen M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1110
- [19] Li B, Zhang G, Wang Z, Li Z, Chen R, Qin C, Gao Y, Xiao L, Jia S 2016 *Sci. Rep.* **6** 32662
- [20] Li B, Zhang G, Yang C, Li Z, Chen R, Qin C, Gao Y, Huang H, Xiao L, Jia S 2018 *Opt. Express* **26** 4674
- [21] Li B, Zhang G, Zhang Y, Yang C, Guo W, Peng Y, Chen R, Qin C, Gao Y, Hu J, Wu R, Ma J, Zhong H, Zheng Y, Xiao L, Jia S 2020 *J. Phys. Chem. Lett.* **11** 10425
- [22] Huang H, Bodnarchuk M I, Kershaw S V, Kovalenko M V, Rogach A L 2017 *ACS Energy Lett.* **2** 2071
- [23] Hu F R, Lv B H, Yin C Y, Zhang C F, Wang X Y, Lounis B, Xiao M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 106404
- [24] Yuan G, Gómez D E, Kirkwood N, Boldt K, Mulvaney P 2018 *ACS Nano* **12** 3397
- [25] Dong S L, Huang T, Liu Y, Wang J, Zhang G F, Xiao L T, Jia S T 2007 *Phys. Rev. A* **76** 063820
- [26] Hiroshige N, Ihara T, Kanemitsu Y 2017 *Phys. Rev. B* **95** 245307
- [27] Feng S W, Cheng C Y, Wei C Y, Yang J H, Chen Y R, Chuang Y W, Fan Y H, Chuu C S 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 143601
- [28] Li B, Zhang G F, Jing M Y, Chen R Y, Qin C B, Gao Y, Xiao L T, Jia S T 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 218201 (in Chinese) [李斌, 张国峰, 景明勇, 陈瑞云, 秦成兵, 高岩, 肖连团, 贾锁堂 2016 物理学报 **65** 218201]
- [29] Wang Z, Zhang G F, Li B, Chen R Y, Qin C B, Xiao L T, Jia S T 2016 *Acta Phys. Sin.* **64** 247803 (in Chinese) [王早, 张国峰, 李斌, 陈瑞云, 秦成兵, 肖连团, 贾锁堂 2016 物理学报 **64** 247803]
- [30] Jin S, Song N, Lian T 2010 *ACS Nano* **4** 1545
- [31] Galland C, Ghosh Y, Steinbrück A, Sykora M, Hollingsworth J A, Klimov V I, Htoon H 2011 *Nature* **479** 203
- [32] Meng R Y, Qin H Y, Niu Y, Fang W, Yang S, Lin X, Cao H J, Ma J L, Ling W Z, Tong L M, Peng X G 2016 *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 5176
- [33] Frantsuzov P A, Volkan-Kacso S, Janko B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 207402

Photoluminescence blinking properties of single CsPbBr₃ perovskite quantum dots*

Li Bin[†] Miao Xiang-Yang

(*Key Laboratory of Spectral Measurement and Analysis of Shanxi Province, College of Physics and Information Engineering, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China*)

(Received 13 May 2021; revised manuscript received 10 June 2021)

Abstract

Owing to their excellent optical properties, perovskite quantum dots become ideal materials for conventional optoelectronic devices such as solar cells, light-emitting diodes, lasers, detectors, and non-classical quantum light sources such as single photon sources and entangled photon sources. The research on the photoluminescence blinking dynamics of single perovskite quantum dots can provide technical support for the preparation of nano-optoelectronic devices. In recent years, some achievements have been made based on the photoluminescence lifetime and photoluminescence intensity of single perovskite quantum dots. In this paper, the bright (on) state probability density and the dark (off) state probability density are extracted from photoluminescence intensity trajectories of single quantum dots and fitted by the (truncated) power-law function. It is found that the on-state probability density of single perovskite quantum dot under weak excitation condition can be fitted by a power-law function, which indicate that the photoluminescence blinking originates from the activation and deactivation of surface trap states. Under strong excitation condition, the on-state probability density of single perovskite quantum dot obeys exponential truncated power-law statistics, which indicate that the photoluminescence blinking is affected not only by the surface trap state, but also by the charging and discharging process.

Keywords: perovskite, single quantum dot, photoluminescence blinking, power law distribution

PACS: 78.47.D-, 78.47.jd, 78.55.-m, 78.67.Hc

DOI: [10.7498/aps.70.20210908](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210908)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11974229) and the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi, China (Grant No. 2021L257).

[†] Corresponding author. E-mail: libin@sxnu.edu.cn