

# 基于受激辐射损耗技术的量子点的原位分辨研究

陈昱翰 徐钦峰

(鲁东大学 物理与光电工程学院 山东 烟台 264039)

**摘要:** 钙钛矿量子点具有超窄发射线宽、波长可调谐以及超高量子产率等优点,目前已经广泛应用在光电器件中。掌握器件中相邻量子点间的作用机制及其动力学光学特性对提高器件的整体性能至关重要。目前由于受到衍射极限的影响,很难通过传统光学系统研究钙钛矿量子点器件纳米尺度下的光学特性。而 STED 技术与钙钛矿量子点结合能够实现器件中纳米尺度下量子点原位光学特性研究。本文通过 STED 超分辨技术研究了器件中纳米尺度下钙钛矿量子点的光学性质变化及动力学特性,对改善钙钛矿量子点纳米器件的性能具有重要意义。

**关键词:** 超分辨技术; 钙钛矿量子点; 受激辐射损耗技术

**中图分类号:** O472+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)01-0069-08

钙钛矿量子点因为具有优良的单色性、极高的量子效率以及通过成分调节可实现全可见光谱范围内发射波长等优良特性<sup>[1-3]</sup>,越来越广泛地应用于电脑及电视显示器等显示系统、荧光显微镜、太阳能电池等高新科技领域的光学器件中<sup>[4-10]</sup>。以共聚焦系统为代表的传统光学显微系统因为存在衍射极限的限制干扰,最大分辨率一般局限于 200 nm 以上,因此难以对由钙钛矿量子点制作的器件中的纳米级的单量子点进行原位超分辨成像以及探测<sup>[11-15]</sup>。如今,利用 STED 技术可以对量子点光学器件中纳米级的量子点进行原位超分辨成像<sup>[15-19]</sup>,但是在利用高功率 STED 技术分辨器件中的纳米级量子点时,损耗光难免会对量子点的荧光寿命、荧光闪烁、量子点的单光子发射等光学性质产生影响,如果可以更为透彻地分析其中的物理原理,将对钙钛矿量子点纳米器件的应用完善提供有效建议。

## 1 样品合成及表征

### 1.1 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的制备过程

#### 1) 油酸铯前驱体(Cs-oleate)的合成

将 0.2 g 碳酸铯 (Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Sigma-Aldrich, 99.9%) 与 0.6 mL 油酸(OA, Sigma-Aldrich, 90%) 和 7.5 mL 1-十八烯(ODE, Sigma-Aldrich, 90%) 装入一个洁净的 25 mL 三颈烧瓶中。保持真空,温度提升到 100 °C 后保持干燥 30 min,之后于氮气环境下加热至 130 °C 保持 15 min,直至碳酸铯全部与油酸反应溶解。

制备完成后溶液冷却并储存在氮气环境中。在下一步合成纳米晶溶液注入前,再将溶液加热至 100 °C,确保油酸铯完全溶解。

#### 2) 制备 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶

取溴化铅(PbBr<sub>2</sub>, 0.055 g, ABCR, 98%) 放入另一个洁净的 25 mL 三颈瓶中。三颈瓶中加入 5 mL 十八烯(ODE, Sigma-Aldrich, 90%)、0.5 mL 油酸(OA, Sigma-Aldrich, 90%) 与 0.5 mL 油胺(OA, Acros, 90%),保持真空状态,升高温度至 100 °C 除水 1 h。之后升温至 120 °C,于氮气环境下保持约 15 min 至沉淀完全溶解,再调整温度上升至 180 °C。取 0.8 mL 已经加热至 100 °C 的前驱体溶液迅速注入三颈瓶中,待混合后的溶液反应 5 s 后,迅速取下三颈瓶进行冰水浴。待溶液降温至 30 °C 且呈现鲜艳绿色则合成完毕。合成设备见图 1。

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-07-07

第一作者简介: 陈昱翰(1994—)男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为微纳光学与器件。E-mail: 745163062@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,研究方向为微纳体系中单光子特性、能量传递、多光子产生等光学效应研究。E-mail: 498165119@qq.com

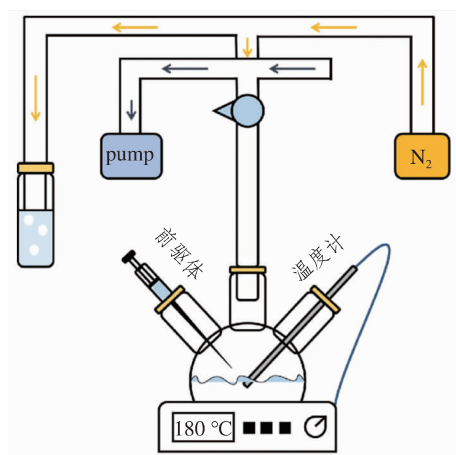
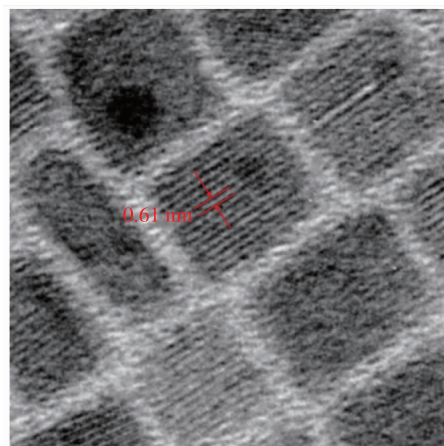


图 1 合成设备示意图

Fig.1 Diagram of synthetic equipment

图 2 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶 TEM 图像Fig.2 TEM image of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals

### 3) 提纯 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶

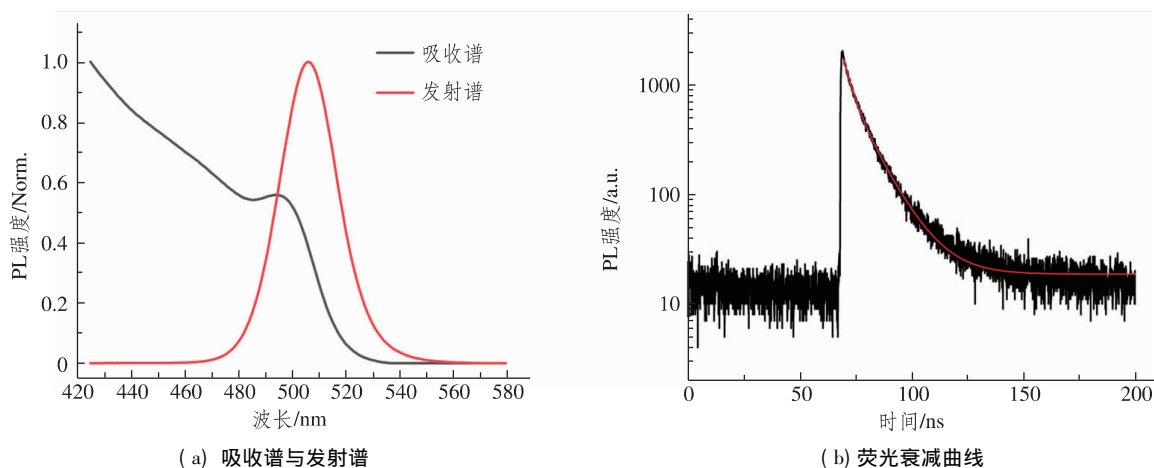
将上一步三颈瓶中获得样品溶液用滴管取出并分别倒入两只离心管内,利用电子秤分别称量两只离心管,保证两只装入溶液后的离心管质量误差在 0.05 g 以下;之后放入离心机离心,转速为  $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,持续 5 min。计时结束后取出样品并倒掉第一次上清液,将剩余沉淀溶于正己烷,该过程重复二到三次,最终取上清液,从而得到较为纯净的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶。

#### 1.2 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的性质表征

图 2 为热注入法合成的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的透射电镜 TEM 图像,由图 2 可知:该纳米晶颗粒的晶面间距大约为 0.61 nm,基本符合参考资料中立方 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶对应的(100)晶面。

图 3(a) 为利用紫外可见分光光度计(UV/Vis)以及荧光光谱仪测得的利用热注入法(HI)合成的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的吸收与发射光谱,可以看出:所合成的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶具有典型的斯托克斯位移现象,其荧光发射峰中心波长位于 506 nm 处;而明显的吸收肩位于 495 nm 处,吸收肩相较于荧光发射峰明显蓝移;小于 506 nm 的激光均可作为激发光用于激发 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶产生荧光;并且 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的发射谱半高宽仅为 26 nm,具有相对较好的单色性。

利用 TCSPC 时间相关单光子计数分析仪测得 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的荧光寿命,其衰减曲线如图 3(b) 所示。根据拟合结果可得荧光寿命约为 14.5 ns,长度适中,适用于后续的超分辨实验。



(a) 吸收谱与发射谱

(b) 荧光衰减曲线

图 3 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的吸收发射光谱与荧光寿命Fig.3 Absorption spectra, photoluminescence spectra and the fluorescence lifetime of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals

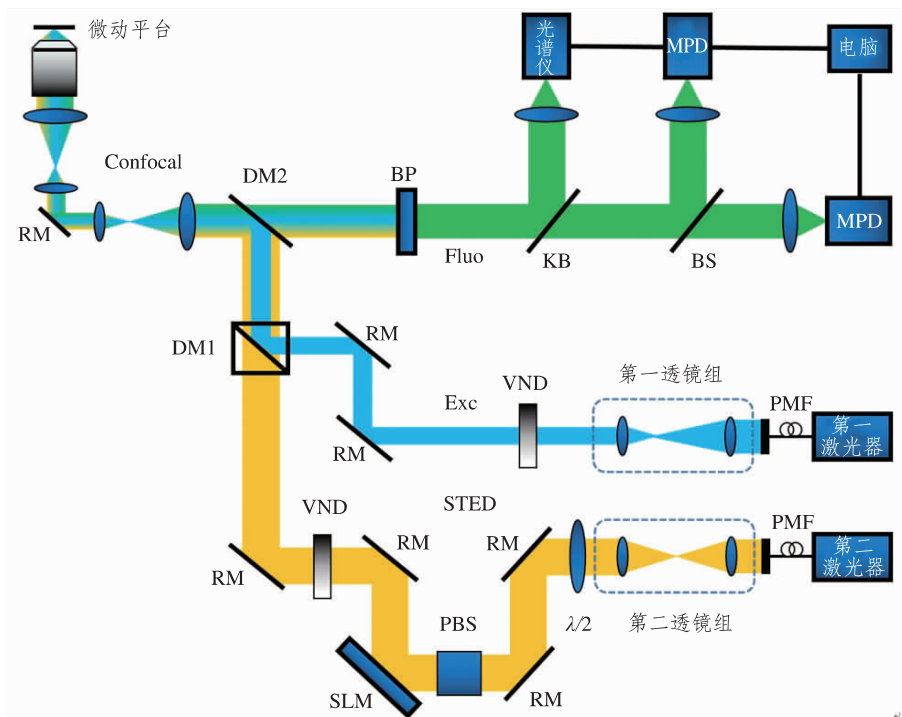
## 2 STED 光路设计

如图 4 所示, 第一激光器产生用于激发样品的脉冲激光, 在第一激光器与反射镜组之间设置一组 4f 系统对激发光的光斑质量进行调整。第二激光器产生用于损耗的超连续激光, 在通过一组 4f 系统后经过一个半波片, 通过调整半波片的旋转角度保证所得连续激光为水平的线偏振光, 从而保证经过空间光调制器所得超连续激光调制效率最高。

空间光调制器 (SLM) 用于调制超连续损耗光相位延迟从而产生中心光强近乎为零的环形光斑。激发光与损耗光在第一双色镜处汇聚后入射

进入共聚焦显微镜。共聚焦显微镜内部放置第二双色镜, 设置在第一双色镜的出射光路上, 用于对上述激发光与损耗光进行反射。经由第二双色镜反射后的激发光与损耗光经过物镜汇聚照射在样品上。样品被放置在物镜上方的微动平台处, 通过软件控制微动平台在所选范围内进行移动扫描。

样品被激发后产生的荧光与受激辐射产生的光经过二向色镜透射后从显微镜反射到扫描光路中。在显微镜的出射光路上放置带通滤波片, 用于完全滤除激发光与损耗光, 透过样品荧光。经过带通滤波片的荧光出射到扫描光路, 被光子计数器 MPD 收集后经过处理, 在软件上得到图像, 并可以进行进一步的性质分析。



RM—反光镜; DM—二向色镜; BP—带通滤波片; KB—底座可调反射镜; BS—分光镜; MPD—光子计数器;  
VND—连续可调中性密度衰减片; PMF—保偏光纤;  $\lambda/2$ —半波片; PBS—偏振分光棱镜; SLM—空间光调制器。

图 4 实验光路简图

Fig.4 Diagram of experimental light path

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶稳定性

首先对通过热注入法合成的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶

的抗漂白性进行验证, 将稀释后的钙钛矿样品悬涂在石英载玻片上。单独利用波长为 405 nm、重复频率为 5 MHz 的激发光对所选位置进行共聚焦扫描, 激发功率为 100 nW, 得到普通的共聚焦图像, 扫描面积为 10  $\mu\text{m}$  × 10  $\mu\text{m}$ , 如图 5 (a) 所示; 之后加入 3 mW 的 568 nm 损耗光进行超分辨扫

描,得到图 5(b)。分别将样品暴露在波长为 568 nm、损耗功率为 3 mW 的超连续损耗激光照射下连续开关扫描 6 次,记录红线位置处的荧光强度,得到图 5(c),其中第 1、3、5 次为加入 STED 光进行的扫描,其余荧光强度为单独利用激发光对同一位置进行共聚焦扫描得到。

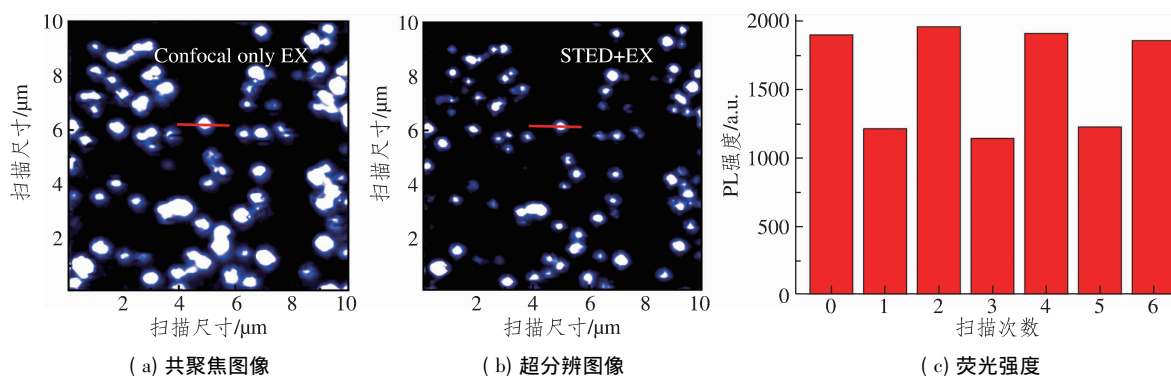


图 5 STED 超分辨扫描图

Fig.5 Image of STED super-resolution

### 3.2 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶超分辨现象

为了更好地探究样品的超分辨现象,需要确定荧光样品的饱和功率。根据不同功率下超分辨图像中 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的横向尺寸作图得到图 7,拟合对应曲线可得饱和功率约为 0.973 mW。可以根据估算的光斑大小( $7.85 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ )得到饱和功率密度约为  $1.24 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;接下来可根据公式<sup>[3]</sup>得到吸收截面约为  $2.328 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 。然而因为所制备样品的粒径尺寸并不完全均一,较大的颗粒可能具有更大的吸收截面,也导致了同样功率的损耗光对悬涂样品中不同颗粒的损耗效果不完全相同;同时多个 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的聚集也导致了图 5(b)中某些大块区域并没有完全区分开单个的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶。

图 6(a)是利用激发功率为 100 nW、波长为 405 nm 的激发光对悬涂好的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶样品进行的共聚焦扫描图像,由于衍射极限的存在,分辨率普遍在 270~300 nm 以上。图 6(b)是在利用激发功率为 100 nW、波长为 405 nm 的激发光的基础上,引入波长为 568 nm、激发功率为 3 mW 的环形损耗光对同一区域的超分辨成像。图 6(c)为图 6(a)、图 6(b)中红线处的强度剖面曲线,通过拟合曲线得到的半高宽作为系统分辨率,可得最小分辨率约在 110 nm 以下。

由图 5(a)、(b)、(c)可知,除了极少数量子点发生了不可逆的光漂白现象,大部分量子点仍能保持较强的荧光强度,由此表明了后续的 STED 超分辨现象是由于加入损耗光造成的受激辐射损耗导致而不是量子点的光漂白现象导致的假象。

图 6(d)为利用不同损耗功率测得的横向分辨率与损耗光功率的关系图。由测得数据进行拟合对应曲线,可得对应应在波长为 405 nm 的激发光处的饱和功率约为 0.973 mW。

### 3.3 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶荧光闪烁的改变

荧光闪烁是单个 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的常见现象。因为单个 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶存在表面缺陷与陷阱态,被激发到激发态的电子在向下跃迁过程中释放出的光子被缺陷捕获或者能量被吸收参与非辐射复合,从而使单个 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶在被激发过程中无法正常发射出连续的荧光,在统计信息中显示出亮、暗交替的现象。荧光闪烁现象也是表征钙钛矿量子点发光特性的重要指标之一。借由单个量子点的荧光闪烁中亮态(on 态)与暗态(off 态)的比例变化,可以为进一步分析钙钛矿量子点的发光方式、内部载流子的复合渠道等物理性质提供重要的实验参考价值。

在本实验中,所用激发光均选择脉冲频率为 5 MHz、波长为 405 nm 的脉冲激光,损耗光均选择波长为 568 nm 的超连续激光。

图 7(a)、7(b)分别展示了图 6(a)、6(b)中划线区域的荧光闪烁变化。在只有 200 nW 激发光存在的情况下,由于受到两个距离较近的荧光团的干扰,图 6(a)划线区域的荧光闪烁现象并不明显,同

时划线标注的区域也难以明显判定为单个量子点发出的荧光。而在加入了 3 mW 损耗光之后, 不仅可以从图 6 (b) 中粗略判定出所选位置为单个量子点, 由图 7 (a)、(b) 对比可见: 所选位置处荧光闪烁现象明暗交替也变得更加明显。进一步地分析, 根据图 7 (a)、7 (b) 对应做出亮态暗态分布图(见图 8 (a)、8 (b)), 可以看出: 加入损耗光后明显地表现为暗态的比例增加, 增加幅度高达 42%。

相对于激发光高几个数量级的损耗光, 在损耗功率超过量子点饱和功率后, 大大增加了受激辐射所占比例, 而受激辐射产生的光又被滤波片滤除, 所以用于辐射复合的载流子数目急剧减少, 导致图 7 (b) 上显示猝灭现象的比例明显增加, 进而消除多余荧光的相互干扰, 使原本无法通过分辨的两个荧光发射体分辨开来, 明显提升了单个量子点纳米晶的有效分辨率。

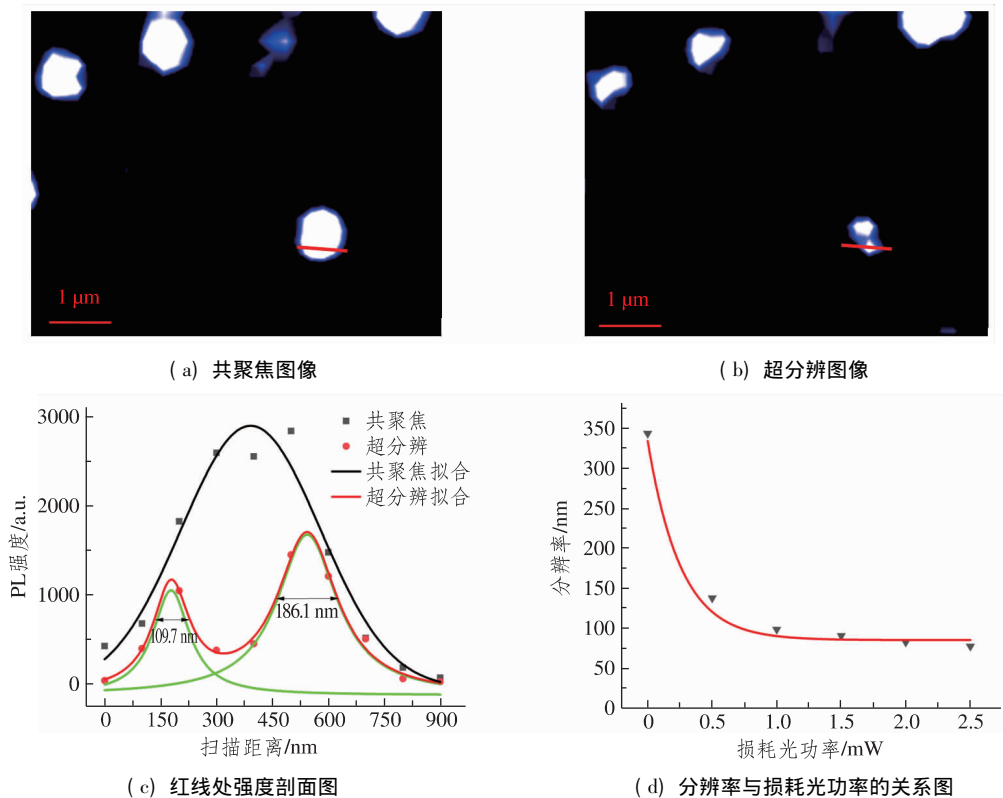


图 6 STED 超分辨现象

Fig.6 STED super-resolution phenomenon

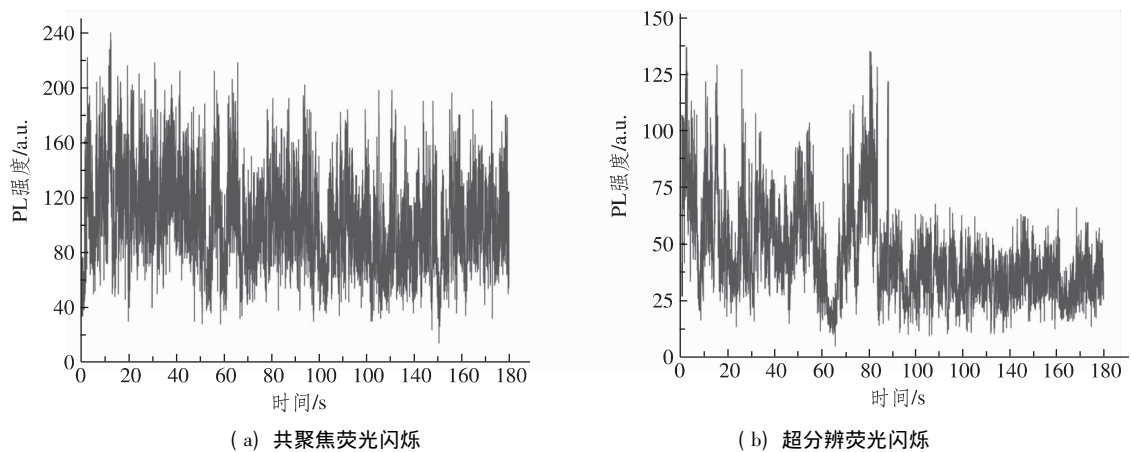
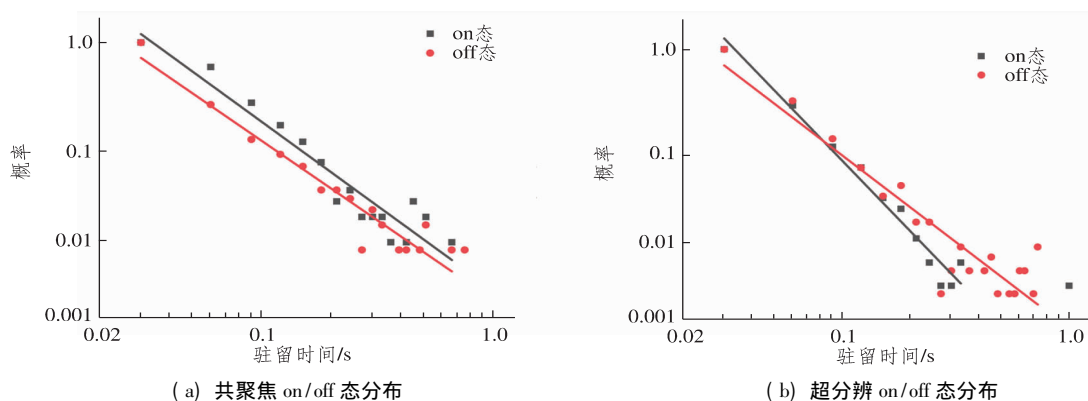


图 7 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的闪烁变化

Fig.7 Blinking changes of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals



(a) 共聚焦 on/off 态分布

(b) 超分辨 on/off 态分布

图 8 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶闪烁 on/off 态变化Fig.8 On/off state changes of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals

### 3.4 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶荧光寿命的改变

当量子点被激发光激发后,会因自发辐射产生荧光,而其荧光强度会随时间推移逐步减弱。发光物体最大荧光强度减少到其  $1/e$  的荧光强度时所耗费的时间被定义为发光物体的荧光寿命。

通常,一个量子点的荧光寿命为单指数衰减,表现为只有一个荧光发射通道,即只存在单一的激子复合通道。但当其寿命拟合表现为双指数甚至三指数时,则其中存在多个不同的发光方式,即存在多种复合渠道。

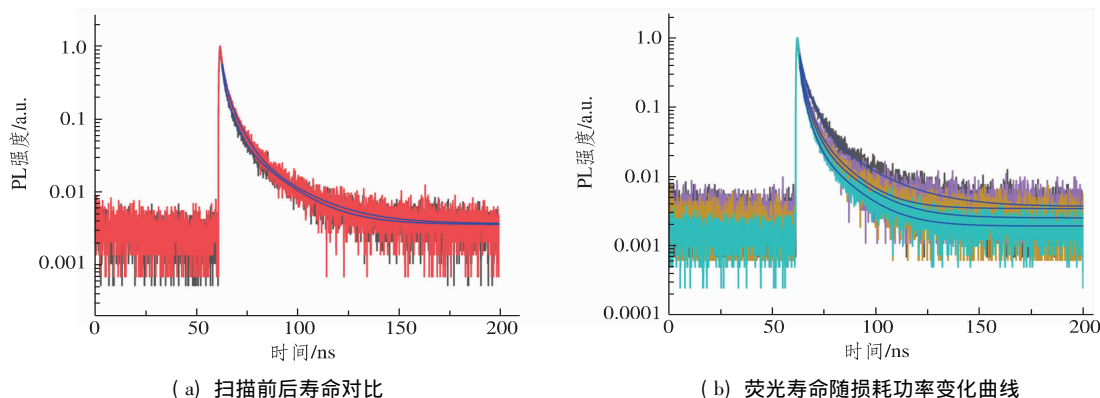
本实验均采用频率为 5 MHz、波长为 405 nm 的脉冲激光作为激发光,损耗光为波长 568 nm 的超连续激光。所测得的 CsPbBr<sub>3</sub> 钙钛矿量子点的荧光寿命可用双指数公式进行拟合:

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

图 9(a) 为对图 6(a) 红线位置 5 轮扫描前后的钙钛矿量子点的荧光寿命的对比。第一轮只使用脉冲激光作为激发光进行扫描测量,得到此处

荧光寿命约为 25.1 ns;再加入不同功率损耗光进行寿命测量,之后再关闭损耗光,只使用脉冲激发光对同一位置进行荧光寿命测量,得到荧光寿命约为 21.8 ns,表明实验过程中量子点的寿命变化应为损耗光的影响而不是光漂白。

图 9(b) 展示了不同损耗光功率下对 6(a) 红线位置处所测荧光寿命的变化,详细数据见表 1。根据  $\tau_1$  短寿命大约在 2 ns 左右,可基本判定为带电激子之间的复合发光,而长寿命应该为 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶内普遍存在且占比较高的普通激子复合过程所体现出来的。也就是说,高功率损耗光将原本用于普通复合的激子转换成了其他复合方式,可能是类似于不会发光的俄歇复合方式的多激子复合方式,或者加速了被表面缺陷捕获载流子的过程,因而导致长寿命的衰减;也可能是受激辐射产生的光被滤除因而无法被探测器收集。而其荧光寿命  $\tau_1$  与荧光寿命  $\tau_2$  的变化趋势与 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶类似,进一步说明利用 STED 超分辨技术与 CsPbBr<sub>3</sub> 量子点的光学性质表征在原本无法区分为单点的区域中明确分辨出了单个 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶。



(a) 扫描前后寿命对比

(b) 荧光寿命随损耗功率变化曲线

图 9 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶荧光寿命变化Fig.9 Fluorescence lifetime changes of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals

表 1 不同损耗功率下的荧光寿命

Tab.1 Fluorescence life time under different loss power

损耗光功率/mW	荧光寿命( $\tau_1$ )/ns	荧光寿命( $\tau_2$ )/ns
0	5.3	19.8
1	3.5	15.7
2	3.2	14.3
3	2.9	13.2

结合上一节荧光闪烁测量中暗态比例的大幅增加,这里更倾向于损耗光使产生荧光的激子复合更多地转变成了俄歇复合,或者促进被表面缺陷捕获等过程造成的不发射光子激子复合方式,或者是因受激辐射的影响产生的光被滤波片滤除。

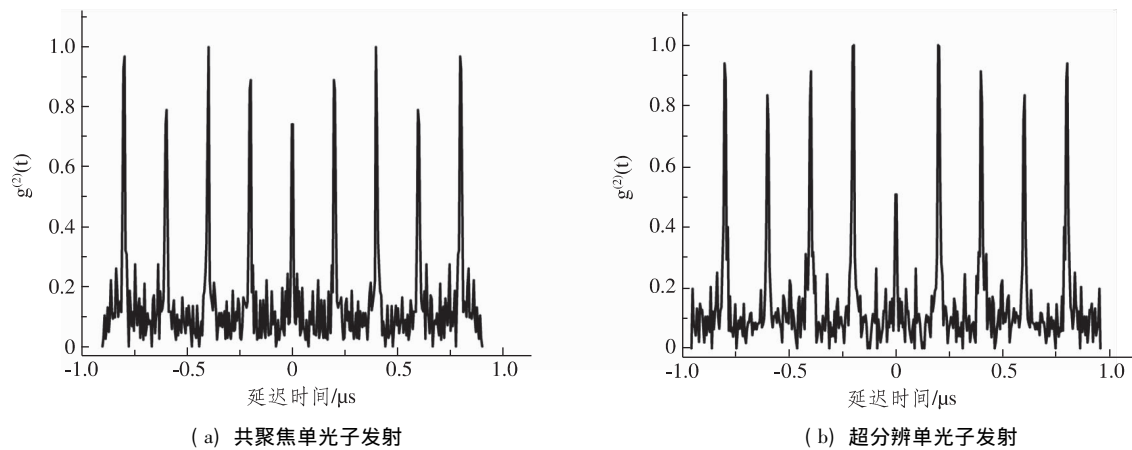
### 3.5 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶单光子发射的改变

由于在大尺寸荧光材料中载流子之间存在明显的库伦作用等因素的影响,俄歇作用导致的荧光猝灭并不占主要分数,因此不仅难以观察到荧光闪烁的存在,更无法将体材料作为单光子发射源。相对于体材料,单量子点体系中因为存在的俄歇效应使单个量子点的荧光发射产生明显的亮暗交替,即 Blinking 现象,伴随俄歇效应等非辐射

复合过程产生的暗态(off 态)的存在也使单量子点更容易产生单光子发射,单光子发射对应的反聚束现象也成为了表征单个量子点的重要指标。

若 0 时刻峰值  $g^2(0)$  和侧峰  $g^2(nt)$  的比值在 0.5 以下,则可以将发射源定义为单光子发射源。图 10(a)、10(b) 分别对应于图 6(a)、6(b) 中划线区域的反聚束分析结果,可以明显看出:在只有激发光存在时,从图像上难以分别出所选位置为单个量子点,二阶相关函数曲线也没有看到反聚束现象,0 时刻峰值与侧峰之比几乎为 1;然而在加入了 3 mW 损耗光后,不仅图像上较为明显地判断出定位处为单个样品,从二阶相关函数曲线上也看到了明显的反聚束现象,0 时刻峰值与侧峰比例降低到了 0.4,已经可以判断出所选定位处为单光子发射源的 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶样品。

在排除了光漂白现象的影响后,结合荧光寿命与荧光闪烁的性质变化分析,进一步确认:高功率损耗光对量子点的受激辐射抑制了自发辐射荧光对于单光子发射的干扰,也对于俄歇作用再复合通道与表面缺陷捕获载流子过程造成的非辐射复合的占比起到了正向作用。

图 10 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶反聚束效应变化Fig.10 Antibunching changes of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals

## 4 结论

在实现了对 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶的原位超分辨成像的基础上进一步分析其荧光闪烁特性的改变,发现高功率损耗光的加入抑制了其亮态的存在比例,因为受激辐射使原本的激子自发辐射复合方

式转换成为了其他的非辐射的复合方式。

因为其激子复合方式的转变导致其荧光寿命成分中的正常激子复合产生的荧光寿命成分衰减,而对带电激子的复合影响较小,整体表现为荧光寿命的缩短。

因为受益于受激辐射损耗实现的多余荧光的消除,提升了俄歇复合等非辐射复合方式在 CsPbBr<sub>3</sub>

纳米晶被激发过程中所占比例,进而使得 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶单光子效应所表现出的反聚束的效果得到了大幅提升。使原本无法分辨出的单光子发射源在原位超分辨显微成像后显现出了明显的反聚束效应,成功分辨出了单光子发射源的位置。

总而言之,作为新兴的荧光探针材料,全无机钙钛矿量子点具有无限的发展前景与应用潜力。研究清楚 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶在超分辨显微成像时的光学性质变化,为 CsPbBr<sub>3</sub> 纳米晶更好地应用于荧光探针领域提供了新的意见与参考,并且对其未来更加成熟的应用以及在量子点器件设计过程中提供改善方案,都具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] DOMINIK W, RITTWEGGER E, KASTRUP L, et al. STED microscopy with a supercontinuum laser source [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9614.
- [2] YE S, GUO J Q, SONG J, et al. Achieving high-resolution of 21nm for STED nanoscopy assisted by CdSe@ZnS quantum dots [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(4): 041101.
- [3] YE S, YAN M J, ZHAO X P, et al. Low-saturation-intensity, high-photostability, and high-resolution STED nanoscopy assisted by CsPbBr<sub>3</sub> quantum dots [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(23): e1800167.
- [4] KOVALENKO M V. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites( CsPbX<sub>3</sub>, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Letters*, 2016, 15(6): 3692-3696.
- [5] NEDELUCU G, PROTESESCU L, YAKUNIN S, et al. Fast anion-exchange in highly luminescent nanocrystals of cesium lead halide perovskites ( CsPbX<sub>3</sub>, X = Cl, Br, I) [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5635-5640.
- [6] RAINO G, LANDUYT A, KRIEG F, et al. Underestimated effect of a polymer matrix on the light emission of single CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3648-3653.
- [7] DUTTA A, DUTTA S K, PRADHAN N, et al. Tuning the size of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals: all at one constant temperature [J]. *ACS Energy Letters*, 2018, 3(2): 329-334.
- [8] PAN A Z, HE B, FAN X Y, et al. Insight into the ligand-mediated synthesis of colloidal CsPbBr<sub>3</sub> perovskite nanocrystals: the role of organic acid, base, and cesium precursors [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 7943-7954.
- [9] UTZAT H, SHULENBERGER K E, ACHORN O B, et al. Probing linewidths and biexciton quantum yields of single cesium lead halide nanocrystals in solution [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(11): 6838-6846.
- [10] WANG D, WU D, DONG D, et al. Polarized emission from CsPbX<sub>3</sub> perovskite quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(22): 11565-11570.
- [11] WANG Y, LI X M, ZHAO X, et al. Nonlinear absorption and low-threshold multiphoton pumped stimulated emission from all-inorganic perovskite nanocrystals [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 448-453.
- [12] SHEKHIREV M, GOZA J, TEETER J D, et al. Synthesis of cesium lead halide perovskite quantum dots [J]. *Journal of Chemical Education*, 2017, 94(8): 1150-1156.
- [13] KRIEG F, OCHSENBEIN S T, YAKUNIN S. Colloidal CsPbX<sub>3</sub>( X = Cl, Br, I) nanocrystals 2.0: zwitterionic capping ligands for improved durability and stability [J]. *ACS Energy Letters*, 2018, 3(3): 641-646.
- [14] LIGNOS I, STAVRAKIS S, NEDELUCU G. Synthesis of cesium lead halide perovskite nanocrystals in a droplet-based microfluidic platform: fast parametric space mapping [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(3): 1869-1877.
- [15] SUN S B, YUAN D, XU Y. Ligand-mediated synthesis of shape-controlled cesium lead halide perovskite nanocrystals via reprecipitation process at room temperature [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(3): 3648-3657.
- [16] ZHONG Q X, CAO M H, XU Y F. L-type ligand-assisted acid-free synthesis of CsPbBr<sub>3</sub> nanocrystals with near-unity photoluminescence quantum yield and high stability [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 4151-4157.
- [17] BOHN B J, TONG Y, GRAMLICH M. Boosting tunable blue luminescence of halide perovskite nanoplatelets through postsynthetic surface trap repair [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 5231-5238.
- [18] ZHANG T X, CHEN Z H, SHI Y M, et al. The photoluminescence mechanism of CsPb<sub>2</sub>Br<sub>5</sub> microplates revealed by spatially resolved single particle spectroscopy [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(7): 3186-3192.
- [19] ZHOU H, YUAN S P, WANG X X, et al. Vapor growth and tunable lasing of band gap engineered cesium lead halide perovskite micro/nanorods with triangular cross section [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(2): 1189-1195.

(下转第 82 页)



## Process Conditions of Lees Grass Carp Production

MAO Ankang , ZHANG Xiuzheng , MA Limei , LIU Haimei

( School of Food Engineering ,Ludong University ,Yantai 264039 ,China)

**Abstract:** Using fresh grass carp as raw material ,the optimal processing technology of grass carp with distiller's grains was optimized by changing different processing methods and process conditions ( addition ratio of auxiliary material ,drying time and curing time) .Finally ,the optimized process for making grass carp with distiller's grains was as follows: grass carp was salted for 12 h in 8.00% salt ,0.50% MSG ,2.00% ginger juice and 2.00% garlic juice ,dried in 4.5 h at 50 degrees drying oven ,added 2% sucrose ,3.00% liqueur ,2 times distiller's grains ,0.05% white pepper and 0.10% chili powder ,and marinated at room temperature for 3 days. The products have moderate sweet and salty taste ,harmonious taste ,outstanding wine aroma ,suitable hardness and softness ,and good color.It is a grass carp product with good flavor.

**Keywords:** grass carp; salt cure; dry; bad system

( 责任编辑 李维卫)

---

( 上接第 76 页)

**Abstract ID:** 1673-8020( 2022) 01-0069-EA

## In-situ Resolution of Quantum Dots Based on STED

CHEN Yuhan , XU Qinfeng

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

**Abstract:** Perovskite quantum dots have been widely used in optoelectronic devices due to their ultra narrow emission linewidth ,tunable wavelength and ultra-high quantum yield. It is very important to master the interaction mechanism and dynamic optical properties between adjacent quantum dots in the device to improve the overall performance of the device.At present ,due to the influence of diffraction limit ,it is difficult to study the optical properties of perovskite quantum dot devices in nano scale by traditional optical system.The combination of STED technology and perovskite quantum dots can realize the in-situ optical properties of quantum dots in nano scale.In this paper ,the optical properties and dynamic characteristics of perovskite quantum dots in nano scale were studied by STED super-resolution technology ,which is of great significance to improve the performance of nano devices.

**Keywords:** super-resolution; perovskite quantum dots; stimulated emission depletion

( 责任编辑 李秀芳)