

室温下正己烷本底中 PbSe 量子点的荧光寿命

程 成 邵 航*

浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 利用透射电镜、近红外吸收谱、荧光光谱和时间分辨光谱等技术,在室温下测量离散在正己烷有机溶剂中,不同粒径的 PbSe 量子点的吸收谱和荧光谱,给出了第一吸收峰和荧光峰随粒径变化的经验公式。通过对瞬态荧光衰减曲线的测量和分析,得到了 PbSe 量子点的荧光寿命,其寿命与量子点的表面缺陷有关。在研究的粒径范围内,由于荧光跃迁仅为带间直接跃迁和仅为缺陷态跃迁两种极端情况,可得荧光寿命最宽分布区间位于 1.44~11.96 μs 。荧光寿命弱关联于粒径,并随粒径的增大而呈线性减小。当 PbSe 量子点的粒径为 2.7~5.7 nm 时,其实测的平均荧光寿命为 7.17~6.72 μs 。

关键词 材料; PbSe 量子点; 近红外吸收谱和荧光谱; 荧光寿命; 粒径

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0216003

Photoluminescence Lifetime of PbSe Quantum Dots Doped in Hexane at Room Temperature

Cheng Cheng Shao Hang

Institute of Intelligent Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract The absorption and photoluminescence (PL) spectra of PbSe quantum dots (QDs) with different sizes and doped in organic solvent-hexane are measured by using the transmission electron microscopy (TEM), near-infrared (NIR) absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy and time-resolved spectroscopy at room temperature. An empirical formula of the first absorption-peak wavelength and PL-peak wavelength varying with the size of QDs are obtained. The PL-lifetimes of PbSe QDs are determined by analyzing transient PL-decay curves. It is shown that the lifetime depends on both the surface defect and the size of QDs. The widest distribution of the lifetime ranges 1.44~11.96 μs , which can be deduced from two extreme conditions, i.e., the PL transition is only a direct interband transition and/or only a defected state transition in the range of particle size used. On the other hand, the PL lifetime is dependent weakly on the size of QDs, it will decrease with the increase of the particle size. As an example, the averaged lifetime is among 7.17~6.72 μs for the QDs diameter in the range of 2.7~5.7 nm.

Key words materials; PbSe quantum dot; infrared absorption-photoluminescence spectra; photoluminescence lifetime; particle size

OCIS codes 160.2290; 300.1030; 170.3650

1 引 言

半导体纳米晶体量子点是一种人工制备新型纳米材料,由于其明显的量子效应、独特的尺寸效应和发光特性等,使得量子点在光电子器件、太阳能电池以及生物荧光标记等领域有广泛的应用前景^[1]。

PbSe 量子点作为典型的 IV-VI 族材料,具有带隙窄、能级结构简单、荧光辐射强、荧光峰波长随粒径变化并可覆盖近红外 1200~1750 nm 的宽波段区域,使得 PbSe 量子点成为人们研究的热点^[2]。

收稿日期: 2015-9-7; 收到修改稿日期: 2015-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61274124, 61474100)

作者简介: 程 成(1953-),男,博士,教授,主要从事量子点及量子点光纤放大器和激光器等方面的研究。

E-mail: chengch@zjut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: 846753013@qq.com

荧光辐射寿命是量子点的基本特性,其寿命的长短对于量子点的荧光增益及其构成的器件至关重要。由于量子点复杂的结构、明显的尺寸效应和表面效应等,虽其荧光寿命有一些近似理论估计方法,例如Ladenburg-Fuchtbauer关系^[3]、Perrin方程^[4]等,但目前比较有效的手段还是实验测量,尤其是通过光谱来测量。

II-VI族CdSe、CdS等量子点的制备技术已经比较成熟,也有较多方法测量其寿命。例如Wang等^[5]测试了真空条件下CdSe量子点的荧光寿命,发现其长寿命成分(15~20 μs)相对于短寿命成分(2~5 μs)的比例会随着样品的量子产率增加而变大,量子点表面的电子和空穴的复合会使和表面激射相关的长寿命部分增加。对于IV-VI族PbSe、PbS等量子点,其中有代表性的是最近Yanover等^[6]报道的工作,他们在室温、真空条件下,测量了不同尺寸(2~5 nm)PbSe量子点的荧光寿命,结果表明当量子点粒径从2 nm增大至3 nm,平均荧光寿命会从6.5 μs 迅速减小至3.5 μs ,之后随着粒径的增大,样品的平均荧光寿命对幅度的改变变小。Kigel等^[7]研究了在低温条件下,不同尺寸和不同介质中的PbSe量子点的荧光寿命,结果表明当温度从7 K变化至150 K时,其平均荧光寿命从6 μs 减小至1 μs 。在较高温度时,本底材料不同会引起荧光寿命的微小改变。Zaiats等^[8]研究了在真空、低温条件下核/壳型PbSe/CdSe量子点(2.0/1.6 nm)的荧光寿命随温度的变化,其平均荧光寿命约为40 μs 。当温度升高至300 K时,其寿命减小为9 μs 。国内尚未见关于PbSe量子点荧光寿命的相关报道。

由以上工作可见,虽然PbSe量子点荧光寿命国外有实验报道,但是其报道的寿命数据离散很大,上下可达4.5~40 μs ,且由于荧光寿命与量子点所处的本底材料以及温度有关,因此,对PbSe量子点的荧光寿命亟需开展进一步的研究。

本文在室温下,测量了分散在有机溶剂正己烷中的PbSe量子点的吸收谱和荧光光谱,通过光谱分析以及TEM形貌测量等,得到了PbSe量子点的吸收峰和发射峰随粒径变化的规律。测量了粒径在2.7~5.7 nm之间不同尺寸PbSe量子点的荧光光强随时间的变化,得到了与量子点表面缺陷和粒径相关联的荧光寿命。根据统计分析,确定了当荧光跃迁仅为带间直接跃迁和仅为缺陷态跃迁时荧光寿命最宽的分布区间。测量结果显示荧光寿命与量子点的粒径弱相关,并呈线性减小的规律,并与已报道的工作进行比较。

2 实验材料与表征

2.1 样品配制

实验采用十种半径不同的PbSe量子点,为了减少制备技术不同可能引起的对寿命的影响,实验采用苏州星烁纳米科技有限公司和杭州纳晶科技股份有限公司提供的量子点。先用电子分析天平称取适量的PbSe原粉,然后用微型移液器(法国Gilson)移取适量分析纯正己烷,配置成浓度为1 mg/mL的量子点溶液,存储在棕色试剂瓶中,并用Parafilm封口膜(美国Bemis公司)封口。然后用超声波振荡仪对其进行充分振荡,使量子点分布均匀,分别标记为样品1, 2, 3, ..., 10,密封储存在277 K~281 K的环境中。量子点浓度的选取对于寿命的测量没有影响,这里选择1 mg/mL是由于在该浓度区其光谱变化明显,可形成光增益^[9-10],有利于开展后续实验。

2.2 表征

实验中采用UV-3600型紫外-可见-近红外分光光度计(日本岛津公司)测量吸收谱;采用FLS920型稳态/瞬态荧光光谱仪(英国爱丁堡公司)测量荧光光谱和荧光寿命;采用Tecnai G2 F30 S-Twin型高分辨TEM(荷兰Philips-FEI公司)观测量子点的粒径和形貌。取样前先用超声波振荡仪将样品振荡30 min以上,确保PbSe量子点在正己烷中分布均匀。实验温度恒定在300 K。

在做TEM测试时,由于正己烷为有机溶剂,并且量子点样品的粒径大约在2~6 nm范围内,因此最终选择超薄碳膜作为载体。对于每个样品,在5 nm为标度尺的条件下,随机对不同的视场区拍摄尽可能多的照片,用于对样品粒径的统计分析。

吸收谱测试时,样品池和对比池中先不放任何样品进行基线扫描,然后在样品池用石英比色皿装取适量正己烷进行扫描,最后用同样规格的石英比色皿装取配制的1~10号样品进行扫描,利用分光光度计自带软件UVProbe 2.43,将样品的吸收谱数据集减去正己烷的吸收谱数据集,即得量子点的吸收谱数据集。

由于样品的荧光峰位于近红外1000~1600 nm区域,近红外探测器的本底噪声将会影响测量结果。因此,实验前用液氮将近红外探测器的探头冷却并恒定在195 K。测试时激励光源为氙灯,通过前期实验发

现,光源波长选在 470 nm 得到的荧光光谱强度最佳。此外,选 470 nm 的另一个好处是它是可见光,方便调节光路,使光束能准确地照射到样品上。

前期研究发现 PbSe 量子点的荧光寿命处于微秒量级,因此,选择纳秒快脉冲闪光灯(英国爱丁堡公司)作为测试的激励光源,其脉冲宽度为 0.8 ns,脉冲周期为 100 μs,且可调。每次实验时都要做背景噪声扫描(IRF),以消除本底和仪器噪声的影响。实验时,以 5000 个光子数作为衰减的截止条件,图像用光谱仪匹配的软件 F900 进行拟合、记录和保存数据。

3 结果与讨论

3.1 TEM 分析

利用高分辨 TEM 分别测量了 1~10 号样品的形貌,以 4 号样品为例,如图 1 所示,图 1(a)圆圈内显示出清晰的量子点晶格结构;图 1(b)可见样品中量子点粒径大小基本一致,分布均匀。

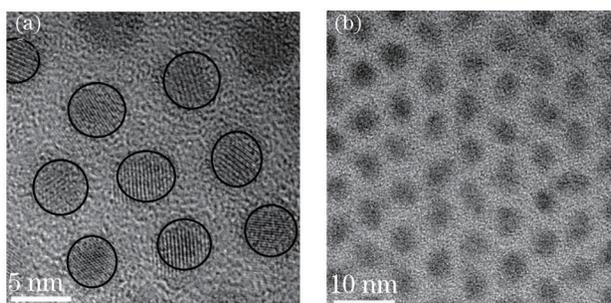


图 1 4 号样品的 TEM 图

Fig.1 TEM images of No. 4 sample

通过对量子点 TEM 图中大量量子点的统计分析,可得如图 2 所示的量子点粒径分布。由图可见,粒径为高斯分布,通过数值拟合可得其分布函数为

$$f(d) = \exp[-8.667(d - 3.57)^2 + 0.0009], \quad (1)$$

式中心粒径 $d=3.57$ nm,在 ± 0.3 nm 处量子点的占比下降到不足 15%。

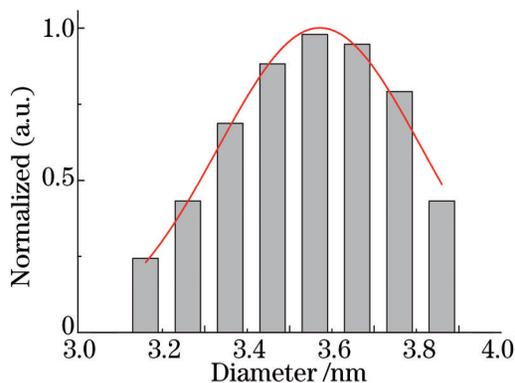


图 2 4 号样品的粒径分布统计图,中心粒径为 3.57 nm

Fig.2 Size distribution of No. 4 sample, the center diameter is 3.57 nm

利用同样的方法,可得到如表 1 所示的 1~10 号样品中量子点的粒径。

表 1 各样品对应的量子点中心粒径

Table 1 Center diameter of QDs for NO.1~10 samples

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter /nm	2.75	3.02	3.36	3.57	3.98	4.1	4.28	4.73	5.2	5.61

3.2 近红外光谱分析

量子点的荧光吸收的衰减主要来自吸收和散射。由于本实验量子点的尺寸远小于入射光波长,散射属于瑞利散射。根据米氏散射理论,瑞利散射的散射截面远小于吸收截面,因而可以忽略散射效应,仅考虑吸收^[11]。

图3为各个样品的近红外光谱,其中图3(a)为吸收谱,图3(b)为荧光谱。表2为各个样品的第一吸收峰波长 λ_A 和荧光峰波长 λ_P , $\Delta\lambda$ 为斯托克斯频移。

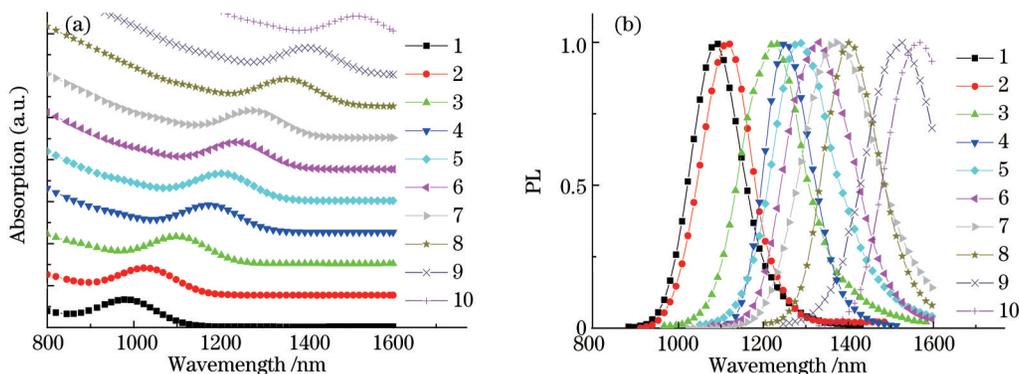


图3 各种不同尺寸PbSe量子点样品的近红外吸收谱(a)和荧光光谱(b)

Fig.3 Normalized absorption spectra (a) and photoluminescence (PL) spectra (b) of the QDs at different size

表2 各样品第一吸收峰和荧光峰波长

Table 2 First absorption-peak and PL-peak wavelengths of samples

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter /nm	2.75	3.02	3.36	3.59	3.98	4.1	4.28	4.73	5.24	5.61
λ_A / nm	992	1027	1130	1175	1203	1239	1273	1354	1422	1516
λ_P / nm	1090	1118	1224	1254	1288	1322	1372	1406	1526	1567
$\Delta\lambda$ /nm	98	91	94	79	85	83	99	52	104	51

由表2可知,PbSe量子点的荧光峰与吸收峰之间的斯托克斯频移约为80 nm。斯托克斯频移与量子点中的激子有关,由于量子点的尺寸效应和量子约束效应,量子点能级分裂增大,带隙增宽,导致吸收光谱产生蓝移,从而产生斯托克斯频移,这是量子点区别于体材料的一个重要特征。

由表2和图3可给出如图4所示的第一吸收峰波长 λ_A 和荧光峰波长 λ_P 随粒径的变化,图中还给出了文献[12-14]的测量结果,以作比较。

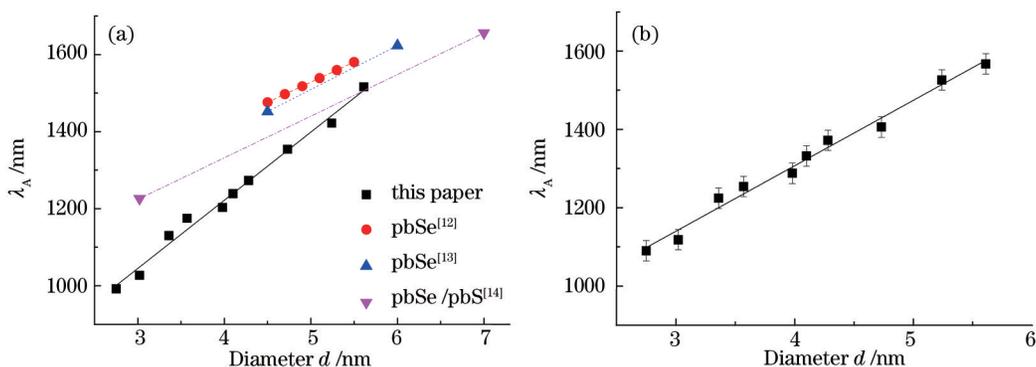


图4 PbSe量子点第一吸收峰(a)和荧光峰波长(b)随粒径变化

Fig.4 First absorption-peak wavelength (a) and PL-peak wavelength (b) varying with the diameter of QDs

由图4可见,峰值波长随粒径线性增大,其经验公式可表达为

$$\begin{cases} \lambda_A = 176.9d + 514.2 \\ \lambda_P = 167.2d + 638.1 \end{cases} (2.7 < d < 5.7) . \quad (2)$$

文献[12]通过实验给出PbSe量子点在UV照射中第一吸收峰随粒径变化的经验公式为 $\lambda_A = 104d + 1006.2$ 。文献[13]通过实验给出核壳型量子点PbSe/PbSe_{1-x}S_x在油酸等有机溶剂中的第一吸收峰随粒径变化的经验公式为 $\lambda_A = 114d + 939$ 。文献[14]通过实验给出在磷酸盐玻璃中的裸核量子点PbSe第一吸收峰随粒径变化的经验公式为 $\lambda_A = 108d + 900$ 。这些经验公式均为线性,但斜率略不同。当粒径较小时相差较大,粒径较大时数据接近。产生差别的主要原因在于文献[12]和[13]测量的量子点直径分别为4.5~5.6 nm和

4.5~6 nm, 粒径分布较窄, 两者皆未涉及小粒径的情形。而本实验量子点粒径分布较宽(2.7~5.7 nm), 这有利于实验统计数据准确度的提高。此外, 本底材料不同, 本实验本底材料为正己烷, 而文献[12]和[13]本底材料分别为 UV 胶和油酸。由于本底材料的介电系数相差较大, 使得其表面产生的极化效应相差较大, 从而对峰值波长产生了不同的影响。文献[14]研究的是 PbSe/PbS 核/壳型量子点, 外面有包覆层 PbS, 结构不同。更深层次的原因分析及定量计算, 还有待于进一步确认。

3.3 荧光寿命分析

利用荧光光谱仪测量样品荧光寿命时, 探测器记录每一时刻样品的荧光强度。当脉宽为 0.8 ns 的尖顶快脉冲光入射到样品中, 迅速将量子点价带顶部附近的电子激励到导带上去。脉冲结束时, 导带中的电子在到导带内快速弛豫布居(特征时间为 4 ps^[15]), 然后电子跃迁回价带并辐射出荧光光子, 荧光强度随时间的变化为

$$I_t = I_0 \exp(-t/\tau), \quad (3)$$

式中 I_t 表示某一时刻检测到的荧光强度; I_0 是初始光强; τ 为荧光寿命。由于导带能级的简并布居和量子点表面缺陷等原因, 当激励光熄灭后, 激发态上有的电子立即跃迁回到基态, 有的电子通过缺陷态跃迁迟至几倍于荧光寿命的时间才返回到基态, 即量子点的荧光寿命是由长寿命 τ_1 和短寿命 τ_2 两部分组成的。研究表明^[15,16]长寿命来自于表面效应, 如表面缺陷、空位和杂质等造成的诱捕态慢衰减; 短寿命来自于带边激子态的直接跃迁辐射, 即导带底部附近直接跃迁回价带的辐射。于是, 测量到的荧光衰减应当满足多指数衰减

$$I(t) = \sum B_i \exp(-t/\tau_i), \quad (4)$$

经过尝试, 采用双指数函数 $I_t = B_1 \exp(-t/\tau_1) + B_2 \exp(-t/\tau_2)$ 对实验数据进行拟合, 可得到很好的结果, 其相关系数 R 高达 0.997 以上(表 3)。相关系数 R 定义为 $R = \left[1 - \frac{\sum (I_t - \hat{I}_t)^2}{\sum (I_t - \bar{I}_t)^2} \right]^{0.5}$, I_t 为某时刻测量的荧光光强; \hat{I}_t 为拟合计算的荧光光强; \bar{I}_t 为荧光光强的平均值。 R 越接近于 1 表示拟合精度越高。

图 5(a) 为各个样品实测的归一化荧光寿命, 图 5(b) 给出了对应的拟合曲线, 其中平均荧光寿命定义为

$$\tau_{\text{avg}} = \frac{B_1 \tau_1^2 + B_2 \tau_2^2}{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2}, \quad (5)$$

荧光寿命 τ_1 和 τ_2 所占权重分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ,

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{B_1 \tau_1}{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2} \\ \phi_2 = \frac{B_2 \tau_2}{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2} \end{cases}, \quad (6)$$

于是, 平均荧光寿命可用 $\tau_{\text{avg}} = \phi_1 \tau_1 + \phi_2 \tau_2$ 来计算, 具体结果见表 3。

表 3 各个样品的荧光寿命数据分析

Table 3 Data analyzing of PL lifetime of the samples

Sample	$\phi_1 / \%$	$\tau_1 / \mu\text{s}$	$\phi_2 / \%$	$\tau_2 / \mu\text{s}$	R	$\tau_{\text{avg}} / \mu\text{s}$
1	48.24	11.95951	51.76	2.2868	0.99826	6.953135
2	52.86	11.59077	47.14	2.22084	0.99761	7.173414
3	54.33	11.18953	45.67	1.82005	0.9981	6.910198
4	51.31	11.6116	48.69	1.83307	0.99786	6.850821
5	51.77	11.5394	48.23	2.28103	0.99702	7.073966
6	51.24	11.5249	48.76	1.9298	0.99829	6.839011
7	53.94	10.9877	46.06	2.0784	0.99836	6.883758
8	51.35	11.59831	48.65	1.90454	0.99762	6.881878
9	53.98	11.0333	46.02	2.05903	0.99784	6.902974
10	57.65	10.5979	42.35	1.44252	0.99787	6.720302

结合表 3, 对图 5 中的实验数据进行数值拟合, 可知平均荧光寿命与粒径之间满足式(7)所示的线性关系

$$\tau_{\text{avg}} = 7.2537 - 0.082d \quad (2.7 < d < 5.7). \quad (7)$$

迄今为止, 对于 PbSe 量子点的荧光寿命, 除 Yanover[6]最近有报道之外, 尚无类似的工作报道。图 6 给出

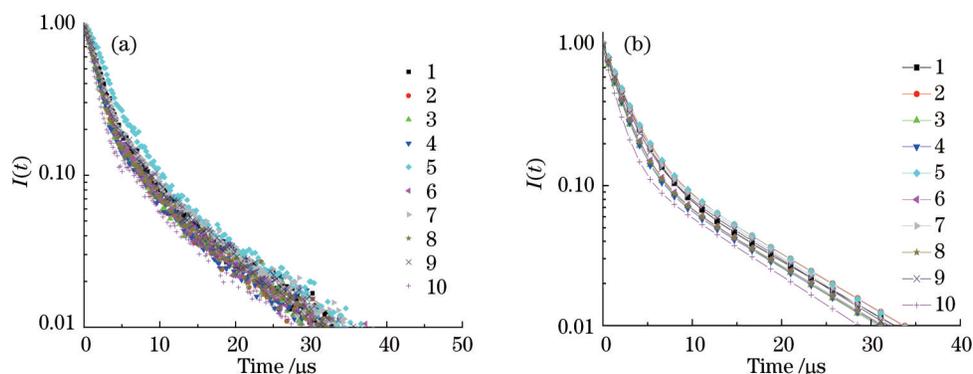


图5 各样品的荧光衰减曲线。(a) 荧光寿命测量的原始数据; (b) 荧光寿命的拟合曲线

Fig.5 Transient PL decay curves. (a) Primary data of each sample; (b) fitting of each sample

了 Yanover 在真空、室温条件下测量的 PbSe 量子点的荧光寿命与测量数据的比较结果。

由图 6 可知,测量的平均荧光寿命略大于 Yanover 的结果,但寿命变化的趋势相近,即荧光寿命跟量子点的粒径弱相关,且随量子点粒径的增大而降低。图 6 中的拟合直线的斜率很小,即荧光寿命与粒径关系为弱相关。寿命随粒径增大而减小的原因,主要是在粒径增大的过程中,量子点的比表面积在缩小,量子点的尺寸效应趋于稳定,表面缺陷、空位以及杂质等慢衰减成分对量子点寿命的影响降低,使得荧光寿命中的长寿命部分的影响降低(这可由 $\phi_1 \times \tau_1$ 乘积随半径增大而逐渐减小的规律看出),最终导致平均荧光寿命减小。

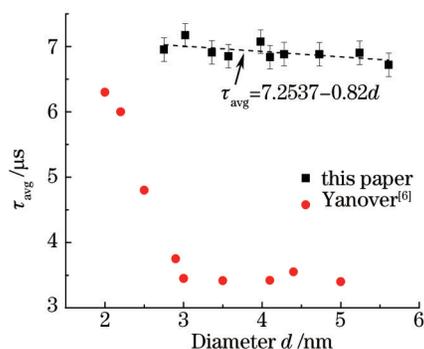


图6 量子点的平均荧光寿命随粒径的变化

Fig.6 Average PL lifetime varying with the diameter

为了对荧光寿命的组成有一个更清楚的了解,根据表 3 中长寿命和短寿命各自所占的权重以及不同的粒径,考虑两种极限状态:当跃迁仅为带间直接跃迁而无缺陷态跃迁时 ($\phi_2 = 1, \phi_1 = 0$),此时荧光寿命 $\tau = 1.44 \sim 2.29 \mu s$ (对不同粒径);当跃迁仅为缺陷态跃迁而无带间直接跃迁时 $\phi_1 = 1, \phi_2 = 0$,此时 $\tau = 10.60 \sim 11.96 \mu s$ (对不同粒径)。由此可见 PbSe 量子点的荧光寿命最宽的分布区间应当位于 $1.44 \sim 11.96 \mu s$ (在本文粒径范围内)。作为一个例子,当粒径 $d = 4.1 \text{ nm}$,量子点缺陷所占的权重 $\phi_1 = 16.38\%$ 时, $\tau_{avg} = 3.5 \mu s$,该寿命与 Yanover 的数据相符。

寿命有不同数据的原因主要归结于三个方面:1) 来自于不同制备工艺的量子点的表面效应不同,如表面缺陷、空位和杂质等造成的慢衰减,使得实验测量的寿命发生变化;2) 实验的本底材料不同,本实验的样品本底是正己烷, Yanover 的实验无本底材料(纯 PbSe 粉末)且测试条件为真空。在不同的本底中,由于量子点与本底介电系数的不同而产生的表面极化效应会对受限激子产生不同的影响。如果将 PbSe 量子点掺杂在正己烷中,大多数电子-空穴对将从原先位于量子点内部向表面捕获态变化,即径向电荷分布趋向集中在表面附近,这个表面极化效应将使电荷分离和能级分离加大,从而造成基态激子偶极矩的增强和寿命加大;3) 实验误差。

3.4 误差分析

误差来源主要有以下几个方面:

1) 用 TEM 图对粒径进行统计测量时的误差。根据 Wu 等^[17]的量子点粒径分布方差公式: $\xi = W / 4(\hbar\omega - E_g)$ (其中 ξ 为量子点粒径的标准偏差; W 为吸收谱的 FWHM; $\hbar\omega$ 为光子能量峰值; E_g 是体材料的有效带隙能)。

由此,该项误差为 $\pm 7\%$ 。

2) 测量误差。测量误差来自于仪器测量误差、读数误差以及数据处理误差等,这部分误差较小,估计小于 $\pm 1\%$ 。

总误差 $\eta \approx \pm 8\%$, 误差棒已标于各图。最终的寿命数据需乘以因子 $(1 + \eta)$ 。

4 结 论

在室温下和正己烷有机溶剂本底中,通过测量不同粒径的PbSe量子点的吸收谱、荧光光谱及其时间衰减,得到了量子点的荧光寿命、吸收峰波长和荧光峰波长随粒径的变化。荧光强度随时间的变化为多指数衰减类型。测量的平均荧光寿命与量子点的表面缺陷有关。在研究粒径范围内,由荧光跃迁仅为带间直接跃迁和仅为缺陷态跃迁两种极端情形,可得荧光寿命最宽的分布区间位于 $1.44\sim 11.96\ \mu\text{s}$ 。荧光寿命与量子点的粒径弱相关,并呈线性减小的规律。当量子点粒径 $d=2.7\sim 5.7\ \text{nm}$ 时,实测的平均荧光寿命为 $7.17\sim 6.72\ \mu\text{s}$ 。得到的PbSe量子点荧光寿命对量子点增益型光电子器件的研制具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 X Y Cheng, S B Lowe, J J Gooding, *et al.*. Colloidal silicon quantum dots: from preparation to the modification of self-assembled monolayers (SAMs) for bio- applications[J]. *Chem Soc Rev*, 2014, 43(8): 2680-2700.
- 2 O E Semonin, J M Luther, M C Beard. Quantum dots for next generation photovoltaics[J]. *Mater Today*, 2012,15(11): 508-515.
- 3 M Schmidt, H Haberland. Phase transitions in clusters[J]. *C R Phys*, 2002, 3(3): 327-340.
- 4 J R Lakowicz. Principle of Fluorescence Spectroscopy[M]. New York: Academic Press, 1999: 95-163.
- 5 X Y Wang, L H Qu, X G Peng, *et al.*. Surface-related emission in highly luminescent CdSe quantum dots[J]. *Nano Lett*, 2003, 3(8): 1103-1106.
- 6 D Yanover, R Vaxenburg, E Lifshitz, *et al.*. Significance of small-sized PbSe/PbS core/shell colloidal quantum dots for optoelectronic applications[J]. *J Phys Chem C*, 2014, 118(30): 17001-17009.
- 7 A Kigel, M Brumer, G Maikov, *et al.*. Thermally activated photoluminescence in lead selenide colloidal quantum dots[J]. *Small*, 2009, 5(14): 1675-1681.
- 8 G Zaiats, D Yanover, R Vaxenburg, *et al.*. PbSe/CdSe thin-shell colloidal quantum dots[J]. *Z Phys Chem*, 2015, 229(1-2): 3-21.
- 9 V I Kilmov, A Mikgailovsky, S Xu, *et al.*. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots[J]. *Science*, 2000, 290(5490): 314-347.
- 10 V I Kilmov. Mechanisms for photogeneration and recombination of multiexcitons in semiconductor, nanocrystals: implications for lasing and solar energy conversion[J]. *J Phys Chem B*, 2006, 110(34): 16827-16845.
- 11 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Nanophotonics and Devices[M]. Beijing: Science Press, 2013: 159-166.
程 成,程潇羽. 纳米光子学及器件[M]. 北京:科学出版社, 2013: 159-166.
- 12 Cheng Cheng, Xu Yinhui. Near IR absorption-emission cross-sections of IV-VI group PbSe quantum dots doped in UV gel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0916002.
程 成,徐银辉. UV胶基底中IV-VI族PbSe纳晶量子点近红外光谱的吸收截面和辐射截面[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0916002.
- 13 M Brumer, M Sirota, A Kigel, *et al.*. Nanocrystals of PbSe core, PbSe/PbS, and PbSe/PbSe_{1-x}S_x core/shell as saturable absorbers in passively Q-switched near-infrared laser[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(28): 7488-7497.
- 14 A Lipovskii, E Kolobkova, V Petrikov, *et al.*. Synthesis and characterization of PbSe quantum dots in phosphate glass[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(23): 3406-3408.
- 15 B L Wehrenberg, C Wang, P Guyot Sionnest, *et al.*. Interband and intraband optical studies of PbSe colloidal quantum dots[J]. *J Phys Chem B*, 2002, 106(41): 10634-10640.
- 16 G Schlegel, J Bohnenberger, I Potapova, *et al.*. Fluorescence decay time of single semiconductor nanocrystals[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 8(13): 137401.
- 17 W Y Wu, J N Schulman, T Y Hsu, *et al.*. Effect of size nonuniformity on the absorption spectrum of a semiconductor quantum dot system [J]. *Appl Phys Lett*, 1987, 51(10): 710-712.

栏目编辑: 刘丰瑞