

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

程 成 徐银辉

(浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 测量了三种不同直径(4.5, 5.0, 5.6 nm)的 IV-VI 族 PbSe 量子点的近红外吸收光谱,给出了吸收峰值波长随量子点直径变化的经验公式。用吸收光谱法,根据 Lambert-Beer 定律,测量了光谱的吸收截面峰值和吸收系数及其随波长和掺杂浓度的变化,发现吸收截面对掺杂浓度有弱相关性,得到了吸收截面随掺杂浓度变化的指数近似表达式。测量了量子点的荧光辐射谱,由 McCumber 关系和实测的吸收截面,确定了量子点光谱的辐射截面峰值及随波长的变化。这些光谱截面数据对 PbSe 量子点掺杂的增益型器件和传感器设计有重要的意义。

关键词 光谱学; PbSe 量子点; 吸收-辐射光谱; 截面; 掺杂浓度

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0916002

Near IR Absorption-Emission Cross-Sections of IV-VI Group PbSe Quantum Dots Doped in UV Gel

Cheng Cheng Xu Yinhui

(*Institute of Laser and Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China*)

Abstract A linear empirical formula of the absorption-peak wavelength depending on quantum dots (QDs) diameters is presented by measuring the near IR-absorption spectra of PbSe QDs with three diameters (4.5, 5.0, 5.6 nm). Both the absorption cross-section and absorption coefficient of QDs varying with the doping concentration and wavelength are determined by absorption-spectrum method and according to Lambert-Beer's law. There is evidence to show that the absorption is weak dependent on the doping concentration, which can be expressed by an exponential decrease with the increased doping concentration. The photoluminescence (PL) spectrum of QDs is measured, and the PL-cross-section peak varying with wavelength is determined according to McCumber's relationship between the absorption and emission. As the primary spectrum data of the QDs, the suggested cross-sections are useful for designing photoelectronic gain devices and sensors doped with QDs.

Key words spectroscopy; PbSe quantum dot; absorption-emission spectra; cross section; doping concentration

OCIS codes 160.4236; 160.2290; 300.1030; 300.2140; 300.6280

1 引 言

半导体纳米晶体量子点(QDs)是一种准零维多原子系统。量子点的三个维度的尺寸都在几十个纳米以下,电子和空穴在三个维度上都受到约束,从而引起一系列特殊的量子效应,展现出许多奇特的物理化学性质,引起了人们的极大关注^[1-2]。位于近红外光谱区的主要是 IV-VI 族的 PbSe、PbS 等量子

点,由于 PbSe 能级结构简单,量子产率很高,甚至达到 700%^[3],因而 PbSe 量子点展现了极为广阔的应用前景。

吸收截面和辐射截面是量子点的基本物理和光学参量,它表征了量子点的吸收特性和荧光增益特性。对于 PbSe 量子点的吸收截面和辐射截面,目前人们已经有了一些工作。例如, Du 等^[4]测量了

收稿日期: 2014-03-20; **收到修改稿日期**: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61274124)

作者简介: 程 成(1953—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纳米晶体量子点光纤、量子点光纤放大器、量子点光纤激光器等方面的研究。E-mail: chengch@zjut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

PbSe 量子点在 1000~1850 nm 范围内的吸收光谱和发射光谱,确定了直径为 3~8 nm 的 PbSe 的吸收峰值波长为 1120~1880 nm,直径为 3~4.5 nm 的 PbSe 的发射峰值波长 1210~1450 nm 以及约为 300 ns 的荧光寿命。Brumer 等^[5]用光谱测量的方法,测量了有机溶剂热合成法制备的 PbSe, PbSe/PbS, PbSe/PbSe_xS_{1-x} 等单核心结构和核壳结构的吸收和发射截面,得到了直径为 5.4 nm 的 PbSe 量子点的吸收峰值截面和发射峰值截面分别为 $1.25 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 和 $0.55 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$,其他结构量子点截面也在同一数量级上。Cheng^[6]测量了在正己烷有机溶剂中的 PbSe 量子点的吸收光谱和发射光谱,得到了量子点的吸收截面峰值为 $3.59 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。

上述工作报道的或是单一尺寸量子点的吸收和辐射截面,或是没有考虑量子点掺杂浓度对截面的影响。实际上,截面依赖于量子点的尺寸,量子点在介质中的掺杂浓度对截面的测量也有影响。此外,由于量子点和介质的介电系数不同,量子点产生表面效应,使得量子点的共振捕获增强和表面缺陷态减少,从而使得辐射-吸收截面可能会产生变化。因此,研究不同直径、不同掺杂浓度下的量子点在一些特定介质[例如紫外(UV)胶]中的截面,是一个很有意义的工作。

研究表明,UV 胶是一种较为理想的量子点光纤掺杂材料,它在近红外区吸收极小,无水收缩率低,折射率($n=1.464$)稍高于光纤外包层。将 PbSe 掺入其中并灌入空芯光纤,可以构成具有光增益性能的量子点光纤,甚至于量子点光纤放大器和激光器^[7]。因此,主要研究在 UV 胶基底中量子点的截面情况。

本文测量了掺杂在 UV 胶基底中的三种不同尺寸 PbSe 量子点的吸收光谱和发射光谱,得到了第一、第二吸收峰值波长与量子点直径之间的经验公式。用吸收光谱法,由 Lambert-Beer 定律,测量得到了 PbSe 量子点在 800~2000 nm 范围内的吸收截面和吸收系数随掺杂浓度和波长的变化,得到了吸收截面随量子点掺杂浓度变化的经验公式。由 McCumber 关系,根据测量的辐射谱以及吸收截面,确定了 PbSe 量子点的辐射截面,并与他人实验结果进行了对比。对于人们进一步详细了解 IV-VI 族 PbSe 量子点的光学特性,将 PbSe 量子点作为增益介质应用于增益型光电子器件以及传感器等,具有重要的意义。

2 实验材料与方法

实验采用的 PbSe 量子点的直径 d 为 4.5, 5.0, 5.6 nm,量子点由青岛星汉纳米科技有限公司提供。图 1 为直径 5.6 nm 的量子点透射电子显微镜(TEM)图,本底为正己烷,TEM 图采用高分辨透射电子显微镜(型号 Tecnai G2 F30)测量得到。

实验中,首先将 PbSe 量子点正己烷原溶液进行稀释,然后将其与 UV 胶按不同的比例混合。将混合液放入三孔烧瓶,置于磁力搅拌器上加热,待正己烷挥发完全后(加热 5 min 左右),再放入超声振荡器中进行振荡,以使量子点在 UV 胶中均匀分布。用此法可制备出不同掺杂浓度的 PbSe 溶液。

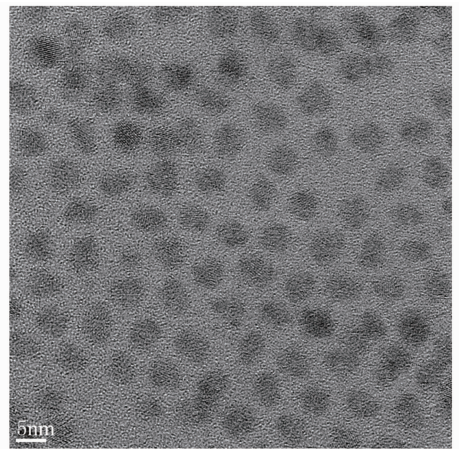


图 1 PbSe 量子点($d=5.6 \text{ nm}$)的 TEM 图

Fig. 1 TEM image of PbSe QDs ($d=5.6 \text{ nm}$)

实验对三种尺寸 PbSe 量子点采用的质量浓度均为 $c_1 = 0.25 \text{ mg/mL}$, $c_2 = 0.50 \text{ mg/mL}$, $c_3 = 0.75 \text{ mg/mL}$, $c_4 = 1.00 \text{ mg/mL}$, $c_5 = 1.25 \text{ mg/mL}$, $c_6 = 1.50 \text{ mg/mL}$,这是由于在该浓度范围中,光谱变化明显,且该浓度范围位于可能形成光增益的区间内(为以后的光增益器件做准备)。实验测量在室温下进行。

吸收谱的测量采用 Lambda-750 型紫外-可见-近红外分光光度计(美国 PE 公司制),发射光谱的测量采用 FLS920 型稳态/瞬态荧光光谱仪(英国爱丁堡公司制)。选用的 UV 胶为 UV-6182 型,在光谱测量过程中,UV 胶未经固化(为了测量方便),为胶体状态。

吸收光谱测量的实验步骤是:先在参比池和样品池放入只装 UV 胶本底的比色皿,用以扫描校准基线,以便去掉本底 UV 胶的影响。再在参比池和样品池中分别放本底材料和量子点 UV 胶溶液进行检测。由检测器得到透射参比光强 I_0 和样品池

光强 I 之比的对数值,即可得量子点的吸收率或吸收系数。通过逐一波长的扫描,可得到 800 ~ 2500 nm 范围内的吸收光谱以及吸收系数。荧光辐射测量的实验步骤是:先使用液氮冷却 Ge 探测器探头,使其保持在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$,当无样品时,噪声光子数降到 10000 个以下后,使用 980 nm 的低功率(40~80 mW)半导体激光器(LD)激光光源作为激励光,入射样品后使用 Ge 探测器进行光谱接收,记录各个波长处的光子数。

3 结果与讨论

3.1 吸收光谱与吸收截面

光在介质中的传播,其光衰减主要来自于吸收和散射。根据米氏散射理论,波长为几百纳米的红外光入射到直径只有几纳米的量子点上,其散射是瑞利散射,散射作用远小于吸收^[8]。因此,实验测量的光强可只考虑由吸收引起。此外,UV 胶在 800 ~ 2500 nm 区域的吸收很小^[7],可以忽略。

图 2 为实测的直径为 5.6 nm 的 PbSe 量子点的吸收光谱。由图 2 可见,量子点有两个吸收峰,峰值波长分别位于 1310 nm 和 1590 nm。1590 nm 峰为第一吸收峰波长 λ_{P1} ,它是 $1S_{h(e)} - 1P_{e(h)}$ 的能级跃迁,即价带顶部与导带底部之间的跃迁。1310 nm 吸收峰为第二吸收峰波长 λ_{P2} ,它是量子点的 $1S_{h(e)} - 1P_{e(h)}$ 的能级跃迁,即价带顶部与导带上部之间的跃迁。

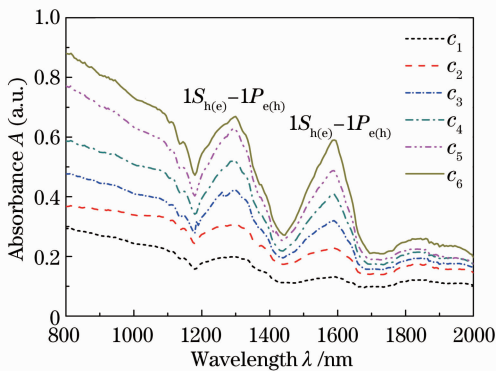


图 2 UV 胶基底中的 PbSe 量子点($d=5.6\text{ nm}$)的吸收光谱图

Fig. 2 Absorption spectra of PbSe QDs ($d=5.6\text{ nm}$) in UV gel

图 3 是浓度为 c_6 时,三个不同直径的 PbSe 量子点的吸收光谱图。图中,对于直径为 4.5 nm 的 PbSe 量子点,实测的第一、第二峰值波长分别为 $\lambda_{P1}=1475\text{ nm}$, $\lambda_{P2}=1195\text{ nm}$;对于直径为 5.0 nm

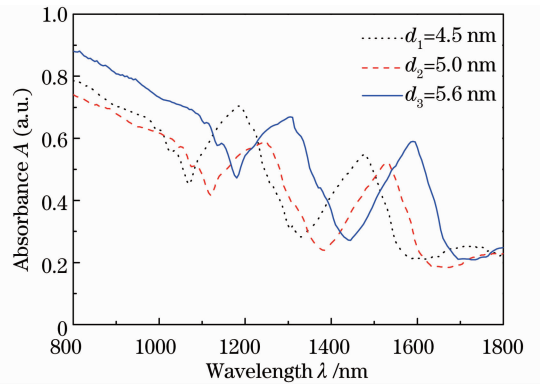


图 3 三个不同直径的 PbSe 量子点的吸收光谱图(浓度为 c_6)

Fig. 3 Absorption spectra of PbSe QDs with three diameters in c_6 concentration

的 PbSe 量子点, $\lambda_{P1}=1530\text{ nm}$, $\lambda_{P2}=1250\text{ nm}$ 。

由以上实验数据,可粗略得到吸收峰波长随量子点直径变化的线性关系为

$$\begin{cases} \lambda_{P1} = 1006.2 + 104.4d \\ \lambda_{P2} = 726.2 + 104.4d \end{cases} \quad (4.5\text{ nm} < d < 5.6\text{ nm}), \quad (1)$$

可见无论是对第一或第二吸收峰值波长,波长随量子点直径的增大均为线性关系,即量子点直径每增大 1 nm,第一或第二吸收峰值波长增大 104.4 nm。(1)式虽然给出量子点直径的使用范围,但是,位于近红外辐射波带的 PbSe 量子点的尺寸大部分都在 4~6 nm,因此,(1)式仍具有较大的意义。

图 4 给出几组数据的比较,其中 \blacksquare 是测量的结果(量子点在 UV 胶中)。 \blacktriangle 是 Brumer 等^[5]对核/壳结构的 PbSe/PbSe_xS_{1-x}量子点(在油酸等有机溶剂中)的测量,拟合直线方程为 $\lambda_{P1}=939+114d$ 。 \bullet 是 Lipvskii 等^[9]对裸核 PbSe 量子点(在磷酸盐玻璃

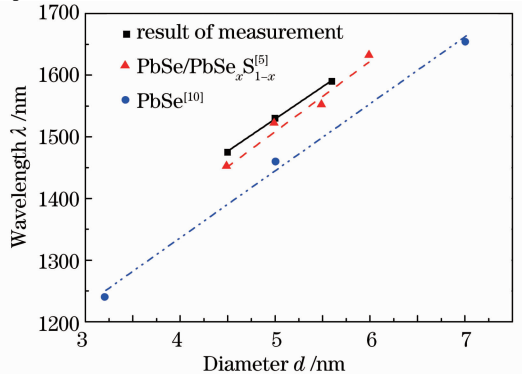


图 4 PbSe 量子点第一吸收峰值波长随量子点直径的变化

Fig. 4 First absorption-peak wavelength varying with the diameter of PbSe QDs

中)的测量,拟合直线方程为 $\lambda_{P1} = 900 + 108d$ 。于是,在室温条件下,PbSe 量子点红外第一、第二吸收峰值波长随量子点直径变化的速率系数的变化范围为 104~114 之间,且与本底材料的关系不大。

PbSe 量子点的玻尔半径为 46 nm^[10],而采用的量子点尺寸仅约为 5 nm,因而是一种强约束量子点。对于强约束量子点,可用有效质量近似来描述第一吸收峰值波长与其量子点半径的关系^[11]:

$$E_g(R) \approx \frac{\hbar C}{\lambda_{a,p1}} \approx E_g^{\text{bulk}} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu R^2} - 1.786 \frac{e^2}{\epsilon R}, \quad (2)$$

式中 E_g 为量子点带隙, \hbar 为普朗克常数, C 为光速, $\lambda_{a,p1}$ 为第一吸收峰值波长, R 为量子点半径 ($R = d/2$), E_g^{bulk} 为块材料带隙, μ 为量子点的折合质量, e 为电子电量, ϵ 为材料的介电常数。

当 PbSe 量子点直径 $d=2R>5$ nm,由(2)式计算的带隙与实验测量的第一吸收峰值波长吻合较

表 1 测量的 PbSe 量子点($d=5.6$ nm)峰值波长处的吸收系数 α 和吸收截面 σ_a

Table 1 Measured absorption coefficient α and absorption cross-section σ_a of PbSe QDs ($d=5.6$ nm) at the absorption-peak wavelength

Concentration c / (mg·mL ⁻¹)	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	
α / cm ⁻¹	λ_{P1}	0.131	0.227	0.320	0.409	0.488	0.590
	λ_{P2}	0.196	0.303	0.412	0.505	0.606	0.65
σ_a / (10 ⁻¹⁶ cm ²)	λ_{P1}	3.70	3.20	3.01	2.89	2.75	2.78
	λ_{P2}	5.54	4.27	3.88	3.57	3.42	3.06

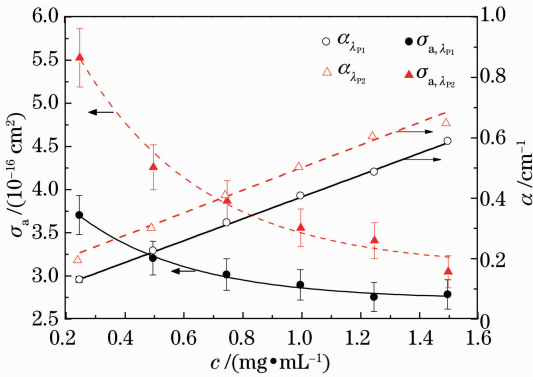


图 5 PbSe 量子点($d=5.6$ nm)峰值吸收截面和吸收系数随掺杂浓度的变化(误差分析见后面)

Fig. 5 Peak-absorption cross-section of PbSe QDs ($d=5.6$ nm) and absorption coefficient as a function of doping concentration (measured errors are discussed below)

由图 5 可知,对于给定的波长,吸收系数 α 随掺杂浓度呈线性增加,满足 $\alpha_{P1} = 0.044 + 0.362c$ cm⁻¹,式中浓度 c 的单位为 mg·mL⁻¹,图中典型的吸收系数位于 0.19~0.7 cm⁻¹ 之间。当掺杂浓度为零时(即未掺杂的 UV 胶本底),吸收系数趋近于零。对于吸收截面 σ_a ,当掺杂浓度较低时,吸收截面较大;

好。但是当量子点直径 $d<5$ nm 时,(2)式的计算值与实验测量值差别较大。(1)式能更好地反映对不同直径的 PbSe 量子点的第一吸收峰值波长的变化。

介质吸收的 Lambert-Beer 定律为

$$I(\lambda, c) = I_0 \exp(-\alpha L) = I_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda, c) N(c) L], \quad (3)$$

式中 $I(\lambda, c)$ 为通过样品后的出射光强, $I_0(\lambda)$ 为入射参比光强, α 为吸收系数, L 为光通过样品的长度,粒子数密度 $N = cN_A$ (N_A 为阿伏伽德罗常数, c 为量子点溶液的物质的量浓度), $\sigma(\lambda, c)$ 为量子点的吸收截面。于是,根据给定的掺杂浓度和实测的吸收光谱强度比 I/I_0 ,通过波长扫描,即可得到吸收截面和吸收系数随波长的分布。测量结果如表 1 和图 5 所示,图中实线的波长为 λ_{P1} 、虚线为 λ_{P2} 。

随着掺杂浓度的增加,吸收逐渐趋于饱和,即吸收截面不再随掺杂浓度变化,而趋于某个常数截面。吸收截面弱关联于掺杂浓度,且呈指数形式下降,其变化规律可用如下的指数式来近似

$$\begin{cases} \sigma_{a,\lambda_{P1}} = 2.73 + 1.87 \exp(-2.63c) \\ \sigma_{a,\lambda_{P2}} = 3.09 + 1.87 \exp(-2.38c) \end{cases}, \quad (4)$$

式中截面 σ_a 的单位为 10⁻¹⁶ cm²。

由(4)式可见,在第一、二吸收峰值波长处,PbSe 量子点的吸收截面 σ_a 对掺杂浓度的变化分别位于 $(2.73 \sim 4.6) \times 10^{-16}$ cm² 和 $(3.09 \sim 4.96) \times 10^{-16}$ cm² 之间。

图 6 给出了测量的第一吸收峰值平均截面与他人结果的对比,其中实心标识符为吸收截面。■▼分别为 Brumer 等^[5]报道的 PbSe 量子点($d=5.4$ nm)和 PbSe/PbS(核/壳)结构量子点(核直径 $d=5.8$ nm)在油酸等有机溶剂中的吸收截面;●为 Cheng^[6]报道的 PbSe 量子点($d=5.5$ nm)在正己烷有机溶剂中的吸收截面;▲为所测量量子点($d=4.5, 5.0, 5.6$ nm)对浓度平均的吸收截面。由图 6 可知,吸收截面随量子点尺寸变化,其变化区间位于比较窄的(1.25~

$4.70) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 区域。可见,对于具有核/壳结构的 PbSe/PbS,其内核 PbSe 尺寸最大,吸收截面也最大。

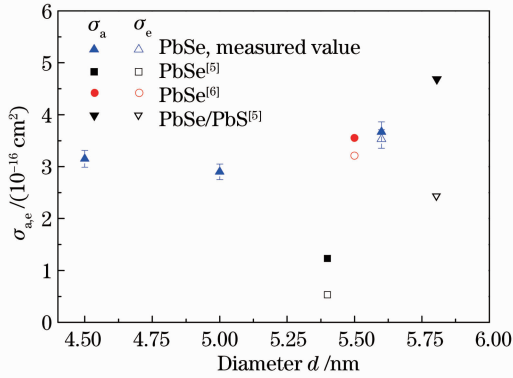


图 6 测量的 PbSe 量子点的吸收-辐射截面随量子点直径的变化

Fig. 6 Measured absorption and emission cross-sections of PbSe QDs varying with the diameter of QDs

3.2 发射光谱与发射截面

图 7 为测量得到的量子点的荧光光谱图,其中荧光光谱的峰值波长分别为 $\lambda_p = 1525 \text{ nm}$ (直径 $d_1 = 4.5 \text{ nm}$), $\lambda_p = 1580 \text{ nm}$ (直径 $d_2 = 5.0 \text{ nm}$), $\lambda_p = 1640 \text{ nm}$ (直径 $d_3 = 5.6 \text{ nm}$)。由图可见,量子点的辐射呈光滑的单峰形状。在短波长区,辐射很小。对于直径 d_3 的量子点,当波长大于 1550 nm 之后,辐射逐渐增大,峰值波长为 $\lambda_p = 1640 \text{ nm}$,其单峰形状可用如下归一化的高斯函数来近似:

$$I_c = 0.17 + 0.82 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - 1643}{44} \right)^2 \right] \quad (1550 \text{ nm} < \lambda < 1750 \text{ nm}), \quad (5)$$

式中 λ 的单位为 nm 。上式指数中的 1643 对应于峰值波长,单位为 nm ,与实验测量的 1640 nm 仅相差 3 nm ,其拟合曲线如图 7 中虚线所示。

由能带理论,结合图 7,可知 PbSe 量子点的导

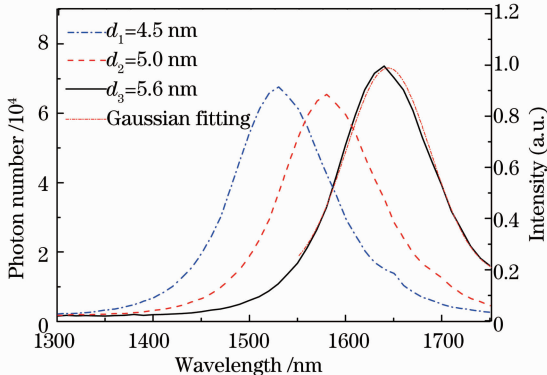


图 7 PbSe 量子点的荧光光谱图(浓度为 c_1)

Fig. 7 Fluorescence spectrum of PbSe QD concentration of c_1

带和价带为简单的、非简并的,这种简单的能带结构满足电偶极光学跃迁定则,从而使得辐射几率很大。此外,PbSe 量子点中电子的有效质量和空穴的有效质量很小,其介电常数和激子的玻尔半径很大,使得它很容易被强约束,也使得表面效应比较弱。导带内的电子在很短时间内(约 $4 \text{ ps}^{[12]}$)在带内迅速跃迁,很快达到热平衡,很容易满足 McCumber 关系^[13]成立的条件。于是,辐射截面为

$$\sigma_e(\nu, c) = \frac{g_1}{g_2} \sigma_a(\nu, c) \exp \left(\frac{E_0 - h\nu}{kT} \right), \quad (6)$$

式中 $g_{1,2}$ 、 h 、 k 、 T 分别为上下能级的统计权重(权重比可取为 1)、普朗克常数、玻尔兹曼常数和绝对温度, E_0 为材料的本征能,可由量子点的吸收-发射截面峰值的归一化来确定。

下面以 d_3 直径的量子点为例。由实测的辐射谱(浓度 c_4),可得归一化后的 $\lambda_0 = hc/E_0 = 1610 \text{ nm}$,于是,辐射峰值波长 λ_p 处的辐射截面 $\sigma_{e,\lambda_p} = 3.52 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ (图 6 中的空心标识符)。对于其他的掺杂浓度,由于本征能 E_0 不变,因此,可采用简单的与 c_4 时的吸收截面比的方式来处理。于是,峰值辐射截面分别为 $\sigma_{e,\lambda_p}(c_{1,2,3,4,5,6}) = (4.48, 3.87, 3.64, 3.52, 3.33, 3.36) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。由此可见,辐射截面的变化范围位于较窄的 $(3.30 \sim 5.55) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 区间。辐射截面随浓度的变化可近似表达为

$$\sigma_{e,\lambda_p} = 3.30 + 2.25 \exp(-2.63c), \quad (7)$$

式中指数部分与吸收截面的(4)式相同。曲线如图 8 所示,曲线形状与吸收截面随浓度的变化基本一致。

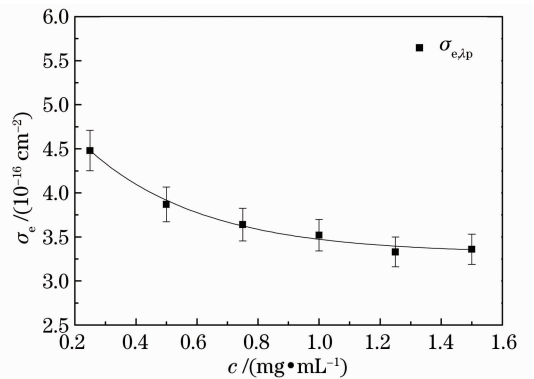


图 8 PbSe 量子点($d_3 = 5.6 \text{ nm}$)峰值辐射截面随掺杂浓度的变化(误差分析见后面)

Fig. 8 Peak-emission cross-section of PbSe QDs ($d_3 = 5.6 \text{ nm}$) as a function of doping concentration (measured errors are discussed below)

对于其他两个不同直径的量子点,辐射截面随掺杂浓度的变化与此类似,不再赘述。

对于辐射截面,在图 6 中还给出了相关文献报道的数据对比。由图 6 可见,虽然量子点来自于不同的制备技术和有不同的尺寸,抑或是裸核或是核/壳结构,其辐射截面都处在 $(0.55 \sim 3.52) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 的区间,差别不大。对于裸核的 PbSe 量子点,其辐射峰值波长随量子点直径的增大而增大。但对于有外包覆层的核/壳型量子点 PbSe/PbS,虽然核尺寸较大(5.8 nm),但是其辐射截面略小于直径 5.6 nm 的裸核 PbSe 量子点(吸收截面没有这种现象)。这种现象与量子点的外包覆层 PbS 有关,外包覆层使得量子点的表面结构发生变化,在减弱其表面活性和改善表面效应的同时,也部分吸收了内核的辐射。另一方面,也可能来自于不同文献的测量误差。

3.3 误差分析

1) 配比误差:在配比 PbSe 量子点溶液的过程中,使用的是微量移液器($10 \sim 50 \mu\text{L}$, $50 \sim 250 \mu\text{L}$)。实验过程中在比色皿中灌量子点溶液的容积为 $500 \sim 700 \mu\text{L}$,配一种样品使用的微量移液器不超过 3 次,每次残留不超过 $5 \mu\text{L}$,该项误差为 $\pm 3\%$ 。

2) 量子点浓度不均匀误差:量子点经过一段时间之后,在 UV 胶本底中会出现少许沉淀,使得采用的量子点溶液浓度不均匀,此项照成的误差约为 $\pm 1\%$ 。

3) 测量误差:量子点溶液配比的测量误差约为 $\pm 1\%$;量子点光谱测量误差约为 $\pm 0.1\%$ 。

综上,实验总误差为 $\eta = \pm 5.1\%$ 。考虑误差,上述的各相关截面和吸收系数应乘以因子 $(1 + \eta)$ 。

4 结 论

测量了三种不同直径的 PbSe 量子点在 $800 \sim 2500 \text{ nm}$ 波带的吸收光谱,得到了第一、第二吸收峰值波长与量子点直径之间的经验公式。用吸收光谱法,测量得到了量子点吸收截面和吸收系数随掺杂浓度和波长的变化,其第一吸收峰值波长处的吸收截面随掺杂浓度的变化范围为 $(2.73 \sim 4.60) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$,吸

收系数随浓度 c 的变化为 $\alpha_{\lambda_{\text{p1}}} = 0.044 + 0.362c \text{ cm}^{-1}$ 。应用 McCumber 关系,根据测量的荧光光谱和吸收截面,确定了 PbSe 量子点的辐射截面峰值。对于直径为 5.6 nm 的量子点,其辐射峰值截面随掺杂浓度变化的范围为 $(3.30 \sim 5.55) \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。在高于 1550 nm 波长的区间,其辐射截面可用一高斯函数来近似。

参 考 文 献

- 1 C E Ekuma, D J Singh, J Morenoet, *et al.*. Optical properties of PbTe and PbSe [J]. Phys Rev B, 2012, 85(8): 085205.
- 2 P Dey, J Paul, J Bylsma, *et al.*. Origin of the temperature dependence of the band gap of PbS and PbSe quantum dots [J]. Solid State Commun, 2013, 165: 49–54.
- 3 R D Schaller, M Sykora, J M Pietryga, *et al.*. Seven excitons at a cost of one: redefining the limits for conversion efficiency of photons into charge carriers [J]. Nano Lett, 2006, 6(3): 424–429.
- 4 H Du, C Chen, R Krishnan, *et al.*. Optical properties of colloidal PbSe nanocrystals[J]. Nano Lett, 2002, 2(11): 1321–1324.
- 5 M Brumer, M Sirota, A Kigel, *et al.*. Nanocrystals of PbSe core, PbSe/PbS, and PbSe/PbSe_xS_{1-x} core/shell as saturable absorbers in passively Q-switched near-infrared lasers [J]. Appl Opt, 2006, 45(28): 7488–7497.
- 6 Cheng Cheng. A multi-quantum-dot-doped fiber amplifier with characteristics of broadband, flat gain and low noise [J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(11): 1404–1410.
- 7 Cheng Cheng, Bo Jianfeng, Yan Jinhua. Experimental observation of a PbSe nanocrystal quantum dot doped fiber laser with single/multiple modes [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0914001.
程 成, 薄建风, 严金华. PbSe 纳米晶体量子点单/多模光纤激光的实验实现[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0914001.
- 8 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Nanophotonics and Devices [M]. Beijing: Science Press, 2013. 64–69.
程 成, 程潇羽. 纳米光子学及器件[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 64–69.
- 9 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.
- 10 T Okuno, A A Lipovskii, T Ogawa, *et al.*. Strong confinement of PbSe and PbS quantum dots [J]. J Lumines, 2000, 87(89): 491–493.
- 11 P N Prasad. Nanophotonics [M]. New York: John Wiley and Sons, 2004. 27–38.
- 12 B L Wehrenberg, C Wang, P Guyot-Sionnest. Interband and intraband optical studies of PbSe colloidal quantum dots [J]. J Phys Chem B, 2002, 106(41): 10634–10640.
- 13 D E McCumber. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra [J]. Phys Rev, 1964, 136(4A): A954–A957.