

# 紫外胶基底中 CdSe/ZnS 量子点的吸收与色散非线性关系的确定

程 成 翟诗滔\*

(浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

**摘要** 根据朗伯-比尔定律,利用吸收光谱法,测量了 CdSe/ZnS(核/壳)量子点紫外固化胶溶液在 0.073~0.367 mg·mL<sup>-1</sup> 掺杂浓度、450~850 nm 波长范围内的吸收系数,得到了吸收系数关于浓度、波长的经验公式。测量了在不同掺杂浓度下量子点溶液的折射率随波长的变化,得到了折射率关于浓度、波长的经验公式。估算了纯量子点的折射率,并与 CdSe 和 ZnS 块材料折射率作对比。由实验结果得到吸收系数直接关联于折射率的变化,给出了相应的物理解释。对比经典散射理论谐振子模型的吸收系数和实验结果,得到了 CdSe/ZnS 量子点的谐振频率和阻尼系数等参量。

**关键词** 量子光学;CdSe/ZnS 量子点;吸收系数;折射率;波长;谐振频率

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612009

## Determination of Nonlinear Dependence Between Absorption and Dispersion of CdSe/ZnS Quantum Dots Doped in Ultraviolet Glue

Cheng Cheng Zhai Shitao

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

**Abstract** Using absorption spectrum method and Lambert-Beer law, the absorption coefficient of CdSe/ZnS (core/shell) quantum dots (QDs) doped in ultraviolet (UV) glue is measured with wavelength range of 450~850 nm and doping concentration of 0.073~0.367 mg·mL<sup>-1</sup>. An empirical formula of absorption coefficient related with the wavelength and doping concentration is presented. The refractive index of the QD doping UV gel as a function of wavelength is measured with different doping concentrations. An empirical formula of the refractive index related with the wavelength and doping concentration is obtained. The refractive index of pure QDs is also estimated and compared with that of bulk CdSe and ZnS. Based on the experimental results, the absorption coefficient is further related with the refractive index, and physical interpretation is discussed. The resonance frequency and damping constant of CdSe/ZnS QDs in a harmonic oscillator model are proposed by comparison of the absorption coefficient between the classical scattering theory and the experimental results.

**Key words** quantum optics; CdSe/ZnS quantum dot; absorption coefficient; refractive index; wavelength; resonance frequency

**OCIS codes** 120.4530; 140.3380; 160.4236; 160.4760; 160.6000; 190.4410

## 1 引 言

半导体纳米晶体量子点是一种性能独特的纳米材料。由于其量子约束效应,量子点表现出许多独

特的光学特性,如荧光辐射强烈、发光稳定、波长随量子点尺寸改变而改变等,近年来引起了人们的极大兴趣<sup>[1-2]</sup>。

**收稿日期**: 2014-01-15; **收到修改稿日期**: 2014-02-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(61274124)

**作者简介**: 程 成(1953—),男,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(中国光学学会会员号: S0420112706)

\* **通信联系人**。E-mail: stzhai@126.com

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

量子点的吸收和折射率是其两个最基本、最重要的物理量。吸收特性表征了量子点的消光特性以及光增益特性,而光增益特性是量子点光电子器件的一个重要属性。折射率反映了光的色散特性,也反映了光在介质中的传播规律。因此,讨论和研究量子点的吸收特性和折射率是很有必要的。

在理论上,Xie<sup>[3-4]</sup>对不同形状的量子点,使用哈密顿矩阵对角化的方法,求解能量和波函数,得到了球形等量子点由基态跃迁到第一激发态过程的线性和非线性光学吸收系数。Zhang等<sup>[5]</sup>使用密度矩阵和迭代的方法研究了外加电场和磁场对抛物型量子点非线性光学吸收系数和折射率的影响。在实验上,Pu等<sup>[6-7]</sup>利用菲涅耳反射公式设计实验,测量了CdTe量子点水溶液的折射率随温度和浓度的变化,并得到了折射率关于温度和浓度的经验公式。程成等<sup>[8]</sup>将CdSe/ZnS量子点掺入甲苯等有机溶剂,灌入空芯玻璃光纤,形成以甲苯为本底的掺杂玻璃光纤,发现这种量子点光纤具有光增益,得到了CdSe/ZnS量子点掺杂光纤的吸收特性。然而,迄今为止,尚未见到以紫外(UV)胶为本底的CdSe/ZnS量子点[(CdSe/ZnS)/UV]的吸收系数关于折射率的研究报道,关于(CdSe/ZnS)/UV的吸收系数数据也并不完备。另一方面,经典的电磁散射理论对于块体材料的吸收有较为完备的描述。然而,对于具有量子效应的量子点,其对吸收系数的描述是否仍然可用于描述量子点,也是一个十分吸引人而又没有人做过的工作。

本文测量了(CdSe/ZnS)/UV的吸收谱和发射谱。利用吸收光谱法,测量了(CdSe/ZnS)/UV在不同的量子点掺杂浓度下、450~850 nm波长区的吸收系数,得到了随波长和浓度变化的吸收系数及其经验公式。测量了(CdSe/ZnS)/UV的折射率随波长和浓度的变化,估算了纯量子点介质的折射率,并与CdSe和ZnS块材料的折射率进行了比较。根据实验结果,给出了吸收系数直接关于折射率的经验公式。将由经典谐振子模型散射理论得出的吸收系数与本文的经验公式进行比较,得到了CdSe/ZnS量子点的谐振频率和阻尼系数等参量,与块体材料CdSe和ZnS进行了比较,并简要讨论了经典散射理论可适用于该量子点的原因。

实验表明<sup>[9]</sup>,UV胶在可见光波段吸收极小,实验室操作方便,是量子点掺杂光纤的一种较为理想的本底材料。因此,本文主要研究UV胶本底的情况。

本文是关于(CdSe/ZnS)/UV量子点光学基本

特性的一个工作,对于将CdSe/ZnS量子点进一步应用于光学放大器、传感器或激光器有重要的意义。

## 2 实 验

实验采用的CdSe/ZnS(核/壳)量子点总粒径为10 nm,其中核CdSe粒径约为6 nm。量子点原溶液为正己烷,由杭州纳晶科技有限公司提供,透射电子显微镜(TEM)图如图1所示。

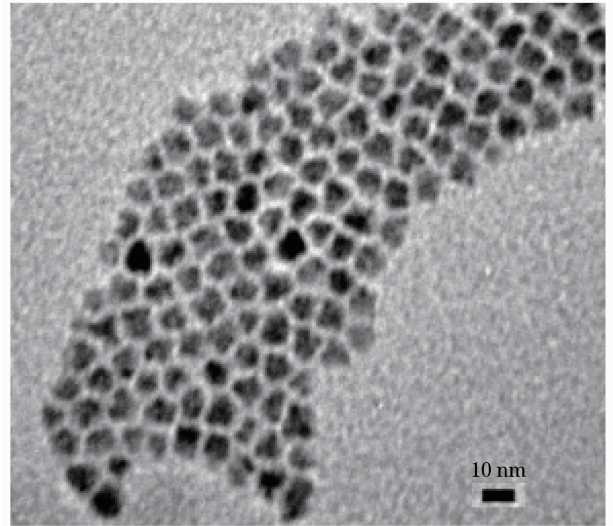


图1 CdSe/ZnS量子点的透射电子显微镜图  
Fig. 1 Transmission electron microscopy image of CdSe/ZnS quantum dots

吸收谱的测量采用UV-2550型紫外可见光光度计(日本岛津制作所,Shimadzu),测量范围为200~900 nm,扫描精度为1 nm。电致荧光(PL)发射谱的测量采用RF-5301型荧光光谱仪(日本岛津制作所,Shimadzu)进行测量,测量范围为280~800 nm,扫描精度为1 nm。折射率的测量用2WAJ型阿贝折射仪(上海光学仪器厂),用不同波长的滤光片选择单

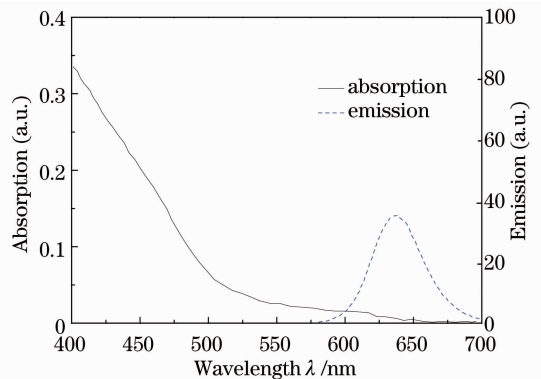


图2 紫外胶基底中CdSe/ZnS量子点的吸收谱和发射谱  
Fig. 2 Absorption-emission spectra of CdSe/ZnS quantum dots doped in UV glue

波长光作为折射率实验的光源。

图 2 是由分光光度计测量得到的(CdSe/ZnS)/UV 量子点的吸收谱和发射谱。由图 2 可见,在可见光区域,量子点没有明显的吸收峰,这是由于在量子点制备的过程中,采用了目前较为理想的反胶团合成法。采用合适的表面活性剂,使得外包覆层厚度均匀,并可使吸收峰大为降低。

量子点溶液制备的步骤如下:将 CdSe/ZnS 量子点正己烷原溶液进行稀释,然后将其与 UV 胶按不同的体积比混合。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 10 min 左右的振荡,以使量子点在 UV 胶中均匀分布,颜色表现一致。用此法可制备出不同掺杂浓度的(CdSe/ZnS)/UV。实验所采用的掺杂浓度(质量浓度,下同)分别为:

$c_1 = 0.073 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,  $c_2 = 0.220 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,  $c_3 = 0.294 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,  $c_4 = 0.367 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。当  $c = c_0 = 0$  时,为无量子点掺杂的 UV 胶本底。实验在室温下进行。

吸收系数测量的实验装置如图 3 所示。复色光源(400~800 nm)通过单色分光器选频,单色光由切光器平均分为两束,分别入射到参比池和样品池。参比池为空比色皿,样品池中放置(CdSe/ZnS)/UV 溶液。实验步骤是:在参比池和样品池中都放空比色皿,用来扫描校准基线,再在样品池中放入样品进行检测。通过样品池和参比池后的光强分别为  $I$ 、 $I_0$ ,经检测器处理,可得  $I_0/I$  的对数值。如此逐一扫描 400~800 nm 各个波长,即可得到样品在此波长范围内的吸收系数。

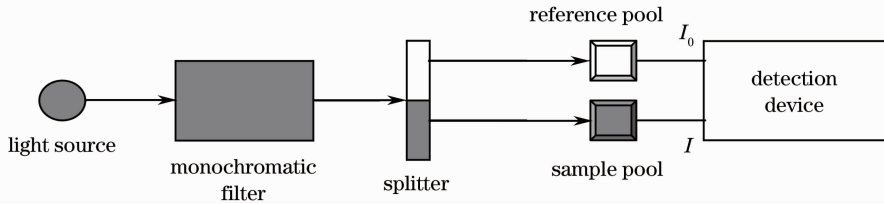


图 3 吸收系数测量的实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for the absorption coefficient measurement

用阿贝折射仪测量量子点 UV 胶溶液在不同浓度、不同波长下的折射率。滤光片选择的入射光波长  $\lambda$  分别为 450、470、490、510、535、550、565、580 nm。

### 3 结果与分析

根据朗伯-比尔定律,在线性均匀介质中,由吸收引起的非饱和光强的变化为

$$I = I_0 \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $L$  为光路长度,  $\alpha$  为吸收系数。

光传播中还存在散射,在本实验中,由于散射介质量子点的尺寸很小(小于 10 nm),远小于入射波长(450~580 nm),因此,光散射为瑞利散射。由瑞利散射截面的计算<sup>[10]</sup>可知,散射远小于吸收,因而散射可以忽略。

测量得到的吸收系数  $\alpha$  随波长的变化如图 4 所示。图中靠近横轴的水平线  $C_0$  为本底 UV 胶的吸收,它几乎不随波长变化。对不同的掺杂浓度,浓度越大,吸收越大,对不同的波长,吸收随波长的增加呈非线性减小。在 450~850 nm 范围内,吸收系数的变化为  $0.038 \sim 0.25 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 4 中吸收系数随波长变化的实验值可用如下

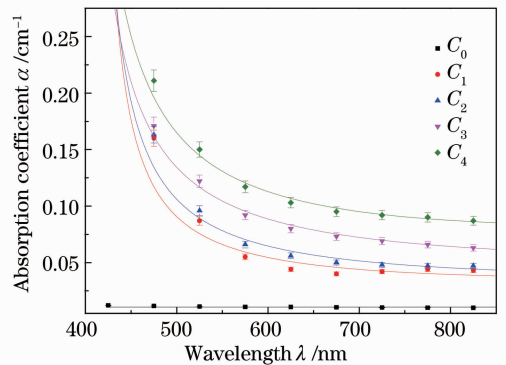


图 4 吸收系数  $\alpha$  随波长  $\lambda$  的变化

Fig. 4 Absorption coefficient  $\alpha$  versus wavelength  $\lambda$  的经验公式表示(除  $C_0$  外):

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{b_0 + b_1 \lambda^2 + b_2 \lambda^4}, \quad (2)$$

式中  $b_0$ 、 $b_1$  和  $b_2$  为与浓度相关的参量,具体数值如表 1 所示。

吸收系数随掺杂浓度的变化如图 5 所示。图中给出了 4 个波长的情况,其他波长情况类似,不再详举。由图 5 可见,吸收系数随掺杂浓度呈线性变化,浓度越高,吸收系数越大,其变化的速率(斜率)基本恒定,斜率约为  $0.1370 \sim 0.2125 \text{ cm}^{-1}/(\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$ ,

即浓度每增加  $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 吸收系数增加  $0.1370 \sim 0.2125 \text{ cm}^{-1}$ 。由图 5 可以估推出该掺杂浓度范围之外的吸收系数大小。

表 1  $b_0, b_1, b_2$  参量值

Table 1 Values of parameter  $b_0, b_1, b_2$

Concentration / ( $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	$b_0 / (10^{-8} \text{ cm}^3)$	$b_1 / \text{cm}$	$b_2 / (10^9 \text{ cm}^{-1})$
$c_1$	-0.6744	-4.6323	6.3576
$c_2$	-1.6443	5.6913	3.6351
$c_3$	-2.0327	12.6988	1.0576
$c_4$	-1.7478	11.7299	0.4575

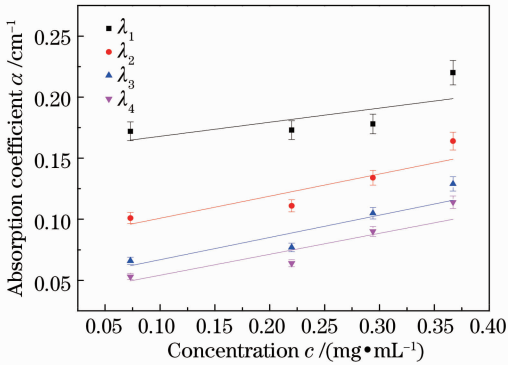


图 5 吸收系数  $\alpha$  随掺杂浓度  $c$  的变化

Fig. 5 Absorption coefficient  $\alpha$  versus doping concentration  $c$

由图 4 和图 5 可见, 吸收系数  $\alpha$  与掺杂浓度  $c$  和入射光波长  $\lambda$  有关, 即  $\alpha = \alpha(c, \lambda)$ 。于是, 吸收系数可表示为

$$\alpha = \alpha(c, \lambda) = \frac{d_1 c \lambda^2}{d_2 \lambda^4 + d_3 \lambda^2 + d_4}, \quad (3)$$

式中参量  $d_1 = 4.0278, d_2 = 2.8795 \times 10^9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-4}, d_3 = 6.3719 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}, d_4 = 1.5248 \times 10^{-8} \text{ mg}$ 。为了与后面的理论公式作比较, 仍然保留了(3)式中的分子  $d_1$ 。

介质的折射率与介质散射粒子数密度以及入射波长有关。为了探索量子点溶液的折射率与入射波长之间的关系, 进一步测量了(CdSe/ZnS)/UV 的折射率在不同浓度条件下随波长的变化, 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, (CdSe/ZnS)/UV 的折射率  $n$  随波长  $\lambda$  的变化属正常色散, 数值拟合为  $n = A + B/\lambda^2, A, B$  数值如表 2 所示。该表达式与柯西色散经验公式( $n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$ )<sup>[11]</sup> 形式相近, 但这里不包含  $\lambda^{-4}$  项, 即  $C = 0$ 。

表 2 中,  $c_{\text{max}}$  是指最大掺杂浓度, 此时的折射率即纯量子点的折射率(数据由实验结果推算出来)。进一步, 可将其与块体材料的折射率作比较, 结果如

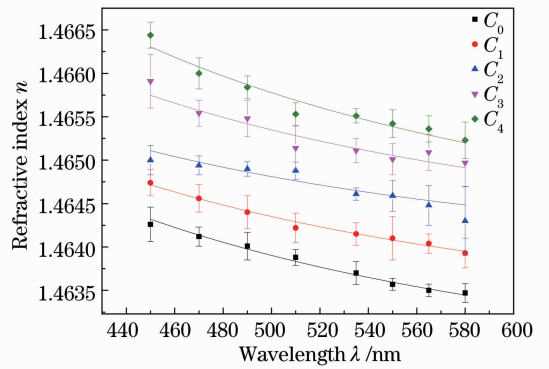


图 6 折射率  $n$  随波长  $\lambda$  的变化

Fig. 6 Refractive index  $n$  versus wavelength  $\lambda$

图 7 所示。由于没有核/壳结构的 CdSe/ZnS 块体材料, 故将其与 CdSe<sup>[12]</sup> 和 ZnS<sup>[13]</sup> 块体材料分别作比较。由图 7 可见, CdSe/ZnS 量子点的折射率要比 ZnS 块材料的大很多, 和 CdSe 块材料的较为接近。对于由核/壳结构构成的 CdSe/ZnS 量子点而言, 可见光的吸收和散射主要来自于核 CdSe 的作用。

表 2 A、B 参量值

Table 2 Values of parameter A, B

Concentration / ( $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	A	B / $\text{nm}^2$
$c_0$	1.4622	424.3286
$c_1$	1.4628	392.8940
$c_2$	1.46343	337.57182
$c_3$	1.4636	449.8306
$c_4$	1.4635	558.9261
$c_{\text{max}}$	3.1018	403.8541

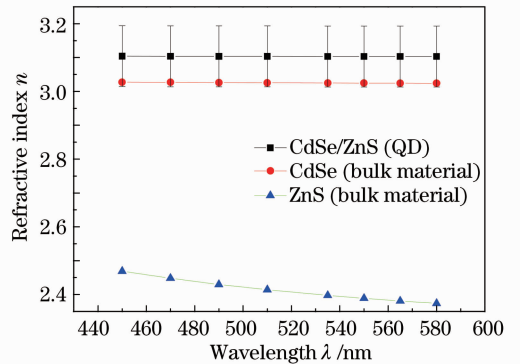


图 7 CdSe/ZnS 量子点折射率与 CdSe 和 ZnS 块体材料折射率的比较

Fig. 7 Comparison of refractive indexes between CdSe/ZnS QDs and bulk materials of CdSe, ZnS

实验发现, 量子点 UV 胶溶液的折射率随掺杂浓度呈线性增加(图 8), 且增加的速率(斜率)几乎相同, 为  $(0.0049 \pm 0.0005) / (\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1})$ , 即掺杂浓度每增加  $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 折射率增加  $0.0049 \pm 0.0005$ 。对照图 5 与图 8 可知, 吸收系数与折射率



随掺杂浓度都是线性变化,两者的区别在于吸收系数的线性变化与波长弱相关,而折射率的线性变化与波长几乎无关。

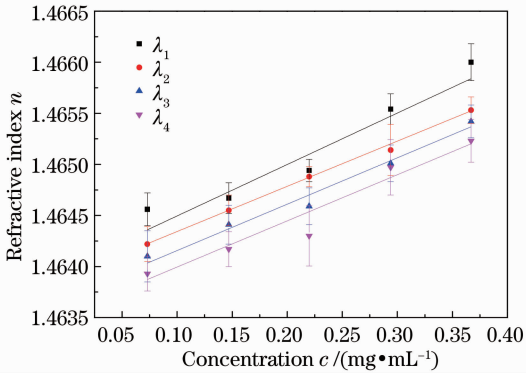


图 8 折射率  $n$  随量子点掺杂浓度  $c$  的变化

Fig. 8 Refractive index  $n$  versus doping concentration  $c$

上述实验结果表明,量子点掺杂溶液的折射率  $n$  可写为  $n = n(c, \lambda)$ 。结合图 6 和图 8 的实验数据,有

$$n = n(c, \lambda) = 1.4623 + 0.0049c + \frac{403.8541}{\lambda^2}. \quad (4)$$

对照实验图 3 和图 5 或拟合(3)式和(4)式,可知吸收系数  $\alpha$  也为掺杂浓度和波长的函数,即有  $\alpha = \alpha[n(c, \lambda)]$ ,可表达为

$$\alpha = \frac{a_0 c (n - 0.0049c - 1.4623)}{a_1 + a_2 (n - 0.0049c) + a_3 (n - 0.0049c)^2}, \quad (5)$$

式中常数  $a_0 = 4.0278$ ,  $a_1 = -8082.7966$ ,  $a_2 = 11048.5528$ ,  $a_3 = -3775.6209$ 。

由(5)式得到吸收系数与折射率的关系如图 9 所示。图中各点是实验数据点,曲线是根据(5)式得到的拟合曲线。由图可见,实验测量的结果基本符

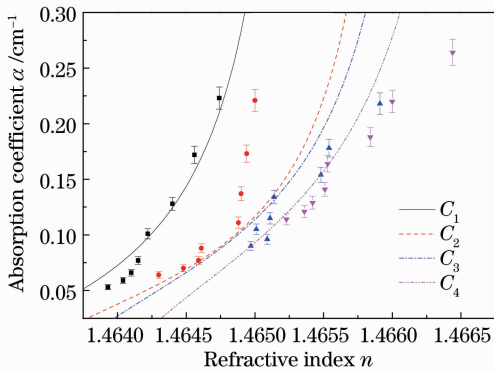


图 9 实验测量的吸收系数  $\alpha$  与折射率  $n$  的关系

Fig. 9 Relation between absorption coefficient  $\alpha$  and refractive index  $n$

合(5)式所反映的吸收系数随折射率的变化规律。

由图 9 可知,由(5)式给出的拟合曲线与实验结果基本一致。在同一浓度下,吸收系数随折射率的增加呈非线性增大,且折射率越大曲线越陡。此外,随着浓度的增加,吸收系数变化趋于平缓,也即增加的速率变小。以上两种变化趋势,都可以由量子点非线性吸收截面的特点(图 2)结合柯西色散公式得到解释。例如,对于同一浓度,随着折射率  $n$  增大(对应于波长减小、吸收截面增大),(5)式的变化率  $\partial\alpha/\partial n$  增大,即吸收系数的曲线变陡;对于同一折射率,随着浓度  $c$  增大(对应于波长增大、吸收截面减小),变化率  $\partial\alpha/\partial c$  减小,即吸收系数曲线变化趋于平缓。

量子点吸收截面的非线性与量子尺寸效应有关。当量子点的尺寸小到可与电子的德布罗意波长、相干波长及激子玻尔半径相比拟时,电子受限在纳米空间,电子输运受到限制,电子平均自由程缩短,电子的局限性和相干性增强,很容易形成激子,产生激子吸收带。随着粒径的进一步减小,激子带的吸收系数增加,出现激子强吸收,使得激子能量向高能方向移动(蓝移)。

图 9 中,拟合曲线和实验结果在较高浓度下差异增大,导致这一差异的原因除了实验误差外,还有可能是在  $n-\lambda$  曲线拟合时,为求数据处理简洁而忽略了前述的  $\lambda^{-4}$  项所致。下面分析实验误差及来源:

1) 量子点原溶液为正己烷,易挥发,这使得实验中所用的实际浓度比厂家提供的原溶液浓度高,估计增大为  $0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (误差为  $+2\%$ )。

2) 实验中,使用精密微量移液器来稀释溶液或量取 UV 胶,微量移液器接口内壁有微量残留  $\pm 5 \mu\text{L}$ ,其误差大小为  $\pm 1.5\%$ 。

3) 仪器测量精度误差约为  $\pm 1\%$ 。折射率实验中的阿贝折射率仪可能存在读数误差,约为  $\pm 0.5\%$ 。

综上所述,实验得到吸收系数误差  $\eta_1 = (+4.5 \sim -2.5)\%$ ,折射率误差  $\eta_2 = (+4.9 \sim -2.9)\%$ 。考虑误差,上述关于吸收系数的(2)式应乘上误差因子  $1 \pm \eta_1$ ,折射率(4)式应乘上  $1 \pm \eta_2$ 。误差已标示在前述相关的图中。

下面对吸收系数、掺杂浓度及入射光波长之间的相互关系作简单讨论。

在线性均匀介质中,在非饱和情况下,经典的光学吸收系数为

$$\alpha(\omega) = \omega \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \text{Im}[\epsilon_0 \chi(\omega)], \quad (6)$$

式中  $\mu, \epsilon$  分别为介质的磁导率和介电系数,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数,  $\omega$  为入射光圆频率,  $\chi(\omega)$  为介质的极化率。

在量子点掺杂的 UV 胶溶液中, 由于 UV 胶本底在本实验涉及的可见光区域没有吸收(图 4), 因此, 主要关心量子点本身的吸收。

在入射光波场的作用下, 假定量子点满足洛仑兹谐振子模型, 即可用谐振子来描述量子点在外光场作用下的振动。于是, 量子点的极化率可写为<sup>[14]</sup>

$$\chi(\omega) = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\Omega^2 - 2i\gamma\omega - \omega^2}, \quad (7)$$

式中  $N$  为量子点数密度,  $e, m$  为电子电荷和质量,  $\Omega$  为量子点谐振频率,  $\gamma$  为量子点谐振阻尼系数,  $i$  为虚数单位。

量子点数密度  $N$  和掺杂浓度  $c$  满足如下关系:

$$N = \frac{c}{m_q} = \frac{cN_A}{M_q}, \quad (8)$$

式中  $m_q, M_q$  分别为量子点质量和摩尔质量,  $N_A$  为阿伏伽德罗常数。

将圆频率  $\omega$  换成波长  $\lambda$  (用  $v_0$  表示光速), 于是, 量子点溶液的吸收系数  $\alpha$  与掺杂浓度  $c$ 、入射波长  $\lambda$  之间的关系为

$$\alpha(\lambda) = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{N_A e^2}{m M_q} \frac{8\pi^2 v_0^2 \gamma c \lambda^2}{\Omega^4 \lambda^4 + 8\pi^2 v_0^2 (2\gamma^2 - \Omega^2) \lambda^2 + 16\pi^4 v_0^4}. \quad (9)$$

(9)式可简写成如下形式:

$$\alpha(\lambda) = \frac{a_1 c \lambda^2}{a_2 \lambda^4 + a_3 \lambda^2 + a_4}, \quad (10)$$

式中常量  $a_{1,2,3,4}$  与量子点性质有关, 与掺杂浓度  $c$  和入射光波长  $\lambda$  无关。

(10)式是从经典理论得到的。与实验上得到的(3)式比较, 两者的形式一致, 这说明量子点材料的吸收系数也可从经典的散射理论获得。事实上, 量子点核 CdSe 的尺寸为 6.8 nm, 略大于其玻尔半径 4.9 nm<sup>[15]</sup>, 是一种中等偏弱约束的量子点, 即其量子效应比较弱, 这是可从经典散射理论入手来解释其吸收系数随波长变化规律的主要原因。

对于 CdSe/ZnS 量子点, (10)式中的待定常数  $a_{1,2,3,4}$  可由(3)式中的实验数据来确定。比较两式各系数并消去常数  $a_1$ , 可得到量子点的谐振频率  $\Omega = 3.9294 \times 10^{15}$  Hz, 谐振阻尼系数  $\gamma = 3.3811 \times 10^{15}$  Hz。

由于目前尚未见有量子点 CdSe/ZnS 材料的相关数据, 因而对上述的谐振频率和谐振阻尼系数数值无法进行比较。

对于块体材料 CdSe 和 ZnS, 根据已有的比热容、密度及分子质量等数据<sup>[16-17]</sup>, 可以得到其谐振频率  $\Omega$  数量级为  $10^{14}$  Hz, 比量子点的  $\Omega$  小一个数量级。存在的差别应当与 CdSe/ZnS 量子点的量子效应有关, 详细的机理尚不得知, 留待以后解决。

## 4 结 论

通过吸收光谱法, 测量了 CdSe/ZnS 量子点 UV 胶溶液的吸收系数随波长和浓度的变化。在 450~850 nm 波长区和  $0.073 \sim 0.367$  mg·mL<sup>-1</sup> 掺杂浓度范围内, 吸收系数的变化为  $0.038 \sim 0.25$  cm<sup>-1</sup>, 随波长增加呈非线性减小, 随掺杂浓度增加呈线性增大。实测了 CdSe/ZnS 量子点 UV 胶溶液的折射率, 给出了吸收系数直接关联于折射率的经验公式。对比由经典散射理论谐振子模型得出的吸收系数和经验公式, 得到 CdSe/ZnS 量子点的谐振频率为  $3.9294 \times 10^{15}$  Hz, 谐振阻尼系数为  $3.3811 \times 10^{15}$  Hz。

## 参 考 文 献

- 1 D Mocatta, G Cohen, J Schattner, *et al.*. Heavily doped semiconductor nanocrystal quantum dots [J]. *Science*, 2011, 332(6025): 77-81.
- 2 D V Talapin, J S Lee, M V Kovalenko, *et al.*. Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications [J]. *Chem Rev*, 2010, 110(1): 389-458.
- 3 W F Xie. Linear and nonlinear optical absorption of a two-electron quantum dot [J]. *Physical B*, 2010, 405(3436): 2102-2106.
- 4 W F Xie. Linear and nonlinear optical absorption of an exciton in a quantum ring [J]. *Physical E*, 2010, 43(101): 49-53.
- 5 Z H Zhang, K X Guo, B Chen, *et al.*. Theoretical studies on the optical absorption coefficient and refractive index changes in parabolic quantum dots in the electric and magnetic fields [J]. *Superlat and Microstruct*, 2010, 47(2): 325-334.
- 6 S L Pu, X F Chen, Y P Chen, *et al.*. Measurement of the refractive index of a magnetic fluid by the retroreflection on the fiber-optic end face [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(17): 171904.
- 7 J F Chen, X F Chen, R H Xu, *et al.*. Refractive index of aqueous solution of CdTe quantum dots [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(13): 3578-3580.
- 8 Cheng Cheng, Zeng Feng, Cheng Xiaoyu. Photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum dot doped fiber with high doping concentrations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2698-2704.
- 程 成, 曾 风, 程潇羽. 较高掺杂浓度下 CdSe/ZnS 量子点光纤光致荧光光谱[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2698-2704.
- 9 Cheng Cheng, Lin Yanguo, Yan Jinhua. Propagation characteristic of photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum-dot doped fiber in an ultraviolet curable adhesive background [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(6): 888-893.
- 程 成, 林彦国, 严金华. 以 UV 胶为纤芯本底的 CdSe/ZnS 量

- 子点光纤光致荧光光谱的传光特性[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 888—893.
- 10 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.
- 11 W J Smith. Modern Optical Engineering [M]. New York: McGraw-Hill Company, 2008. 208.
- 12 C B Gopal, G C Ghosh. Temperature dependent phase-matched nonlinear optical devices using CdSe and ZnGeP<sub>2</sub> [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 8(16): 838—843.
- 13 E D Palink. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. London: Academic Press, 1998. 606—607.
- 14 B E A Saleh, M C Teich. Fundamentals of Photonics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991. 175.
- 15 P N Prasad. Nanophotonics [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004. 81.
- 16 C Kittel. Introduction to Solid Physics [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005. 114—117.
- 17 G Baysinger, L I Berger, R N Goldberg, *et al.*. Handbook of Chemistry and Physics [M]. Florida: CRC Press, 2005. 2173—2175.

栏目编辑: 史 敏