

热处理温度对量子点玻璃介电函数的影响

陈 钢 徐 军

浙江工业大学应用物理系, 浙江 杭州 310023

摘要 为了明确热处理温度对熔融法制备 PbSe 量子点玻璃光电特性中介电函数的影响, 实验上在不同核化时间、晶化温度条件下制备了多种样品。通过对样品透射电子显微镜的观测, 确认样品在不同条件下都有一定的晶体形成。由于晶化程度、晶体大小及浓度有所不同, 导致其吸收光谱有一定差异。利用各个样品的吸收光谱, 结合米氏散射理论和克拉默斯-克勒尼希关系, 通过多次迭代运算, 从吸收光谱中分离出相应的介电函数的实部和虚部, 最终获得材料的吸收系数和折射率。分析表明退火温度对量子点玻璃的吸收系数和折射率分布有明显的影响, 为了获得具有优良光电性能的量子点材料, 退火时间和退火温度的合适选择至关重要。

关键词 量子光学; PbSe 量子点; 退火温度; 吸收光谱; 介电函数

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0516003

Influence of Annealing Temperature on the Dielectric Function of Quantum Dots Doped Glass

Chen Gang Xu Jun

Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract In order to reveal the influence of annealing temperature on the photoelectric characteristic of PbSe quantum dots doped glass produced by a melt-annealing technique, experiments are carried out to compare the influence of different nucleation time and crystallization temperature. The transmission electron microscope images show that a certain amount of PbSe crystals are crystallized in the glass. While the degrees of crystallization, particle size and density have some slightly difference. A procedure combined the Mie scatter theory and the Kramers-Krönig relation is used to calculate the real and imaginary parts of the dielectric function from the experimental absorption spectrum. The calculation results indicate that the annealing temperature has obvious influence on the absorption coefficient and the refractive index. So the suitable annealing temperature and duration are the important factors in the preparation process of quantum dots doped glass with excellent photoelectric properties.

Key words quantum optics; PbSe quantum dots; annealing temperature; absorption spectrum; dielectric function

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

1 引 言

半导体量子点材料由于其量子尺寸效应、限域效应和表面效应等特点, 展现出许多独特的电学、光学和磁学特性^[1-4]。最为显著的是其吸收和发射峰随量子点尺寸而出现有规律的变化, 导致其光谱特性可以覆盖 490~2300 nm 很宽的波带, 并有望制备出多波段、宽频带的发光材料^[5], 进而实现多波段光纤放大器或激光器^[6-7]。以溶液形式存在的量子点材料, 由于其制备方法简单, 有望制备成大面积发光器件^[8-9], 分子束外延生长的量子

收稿日期: 2014-12-30; 收到修改稿日期: 2015-01-23

基金项目: 浙江工业大学校基金重点项目(2013XZ010)、浙江省科技厅项目(Y200908017)

作者简介: 陈 钢(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事纳米光电材料、激光物理等方面的研究。

E-mail: gangchen@zjut.edu.cn

点材料虽不能大面积制备,但其均匀性、可控性的优点也使其在各种探测器、太阳能电池方面得到大力发展^[10-11]。而玻璃掺杂形式的量子点材料可以实现大规模生产,满足光纤放大器的要求,这就要求能够制备出高质量的量子点玻璃,进而拉制成光纤^[12-13]。

在熔融法制备量子点玻璃的过程中,热处理温度对晶体成核和生长的影响至关重要,而这个过程却很难直接控制,只能依据一定的理论和实验进行尝试。对制备的样品进行物理表征和光电特性测试,进而获取制备过程的一些微观信息,对实验配方和热处理温度进行一定的反馈,从而探索制备出均匀性好,晶体尺寸可调的量子点玻璃的实验途径^[14]。光学材料的介电函数是材料重要的参数,有很多实验仪器都是用来测试这些参数的,如阿贝折射仪、椭圆偏振仪,但在材料研究阶段,针对大量制备样品,进行精确地直接测量往往很难满足。而利用能够快速测量的材料的吸收光谱,结合 Kramers-Krönig (K-K)关系可以快速地推导出介电函数,从而间接地得到折射率、吸收系数等光学常数。该方法不仅可以得到材料的介电函数^[15],也可以计算颗粒的大小和浓度的分布情况^[16],甚至可以计算材料的吸收截面和发射截面^[17],在材料光电特性研究中有广泛的应用。本文首先在实验上制备了不同核化时间、晶化温度、晶化时间等条件下的多种样品,然后分别测量各个样品的吸收光谱,然后利用米氏散射理论和 K-K 关系,从吸收光谱中计算得到材料介电函数的实部和虚部,进而得到材料的折射率和吸收系数,为进一步研究该材料的光电特性提供一定的参考。

2 实 验

2.1 实验制备

量子点玻璃的原料配方和制备过程与之前的研究类似^[13],由于之前实验中没能测量到明显的吸收光谱,所以在制备量子点玻璃材料时,对热处理温度进行了重点尝试。两步热处理法可以保证在材料中有一定的量子点晶体形成^[12,14],这在透射电子显微镜(TEM)图中能清晰地看出。实验中制备了不同热处理温度和时间下的多个样品,第一组样品的第一步的热处理温度(核化温度)为 500 °C,热处理时间为 1~10h,每个样品增加 1 h,第二步的热处理温度(晶化温度)为 540 °C,时间 10 h,分别记为 500_1 h、500_2 h、500_3 h 和 500_4 h 等。第二组样品选取第一组样品中比较理想的核化条件,即核化温度和时间为 500 °C 和 3 h,晶化温度分别为 495 °C、510 °C、520 °C 和 540 °C,晶化时间均为 10 h。

2.2 TEM 表征

实验中对比了核化温度 500 °C,核化时间 3 h,晶化温度分别为 495 °C、510 °C、520 °C 和 540 °C 时量子点晶体的形成情况,晶化时间均为 10 h。TEM 测试结果如图 1 所示,在 TEM 图中,深色的圆点代表 PbSe 晶体颗粒,颜色的深浅代表晶化的程度。从图 1 中可以看到,四种热处理温度下均有晶体生成,但晶化程度、均匀性、晶体尺寸有所不同。在第一步热处理 500 °C 时,玻璃中 Pb^{2+} 和 Se^{2-} 通过热扩散已经基本完成成核过程,晶粒数量已基本饱和。在第二步热处理时,当晶化温度为 495 °C 时,颗粒分布比较均匀,但图中颗粒的颜色较淡。这说明温度较低时,晶体生长缓慢,形成的晶体尺寸不大,晶体之间也没有出现粘连和团聚现象。随着晶化温度升高,晶体生长速度加快,围绕晶核生长成较大的晶体,尤其在 540 °C 时,晶体团聚现象明显,局部晶体连成一片。这些形貌上的变化反应了热处理温度对晶体形成的影响,进而影响其光电特性,在后面吸收谱和介电函数的分析中有明显的体现。

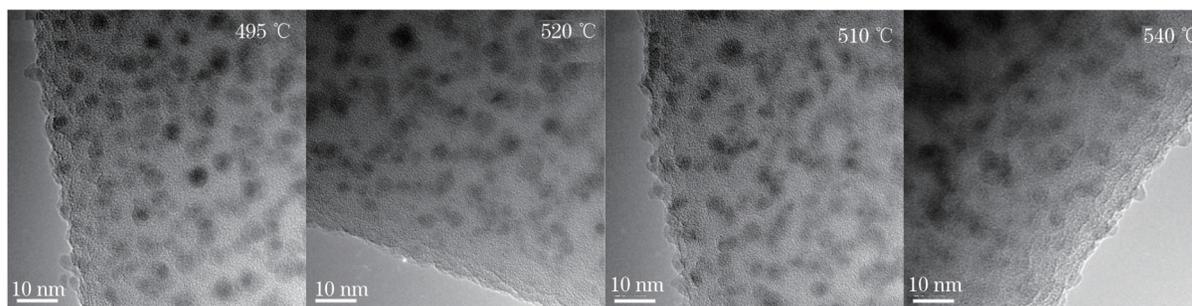


图 1 不同晶化温度时量子点玻璃的 TEM 图

Fig.1 TEM images of samples with different crystallization temperature

2.3 吸收光谱

对制备的两组样品,分别进行了吸收光谱测量,所用仪器为岛津公司的UV-3600型分光光度计,测量范围200~3000 nm。实验中由于量子点玻璃在可见光区有较强烈吸收,导致吸收数据饱和,而2000 nm以上吸收非常弱,所以实际测量时只测量了1000~2200 nm范围的吸收光谱,结果如图2所示。由于热处理时间4 h以后的数据都没有明显的吸收峰,且吸收系数更小,因此图2(a)中只给出了1~4 h的数据加以比较。

从图2(a)中可以看到,核化时间对吸收光谱的影响非常明显,随着核化时间增加,吸收光谱的强度逐渐下降。这表明随着核化时间增长,原材料中的 Pb^{2+} 和 Se^{2-} 通过热扩散形成晶核的数量不断增加,材料从均匀的玻璃体逐步过渡到有晶体镶嵌的量子点玻璃。由于晶体的成核和生长,改变了材料的局部光学特性,使其透过率增加,吸收减小。另外从图2(a)中吸收峰的强弱也可以看到,核化时间从1 h增大到3 h过程中,吸收峰逐渐明显,并且出现了红移现象。而核化时间较长的4 h以及更长的时间,吸收光谱中并没有出现明显的吸收峰值。这表明经过3 h左右玻璃中的离子成核过程已经基本完成,晶核数量不再明显增加,而此时晶体围绕晶核已经开始生长。如果核化温度继续长时间维持在500 °C,对晶体的生长不利,此时只有尽快提高晶化温度才能保证量子点晶体的尺寸大小和一定浓度,因此在后续的制备中选取核化时间在2~3 h。

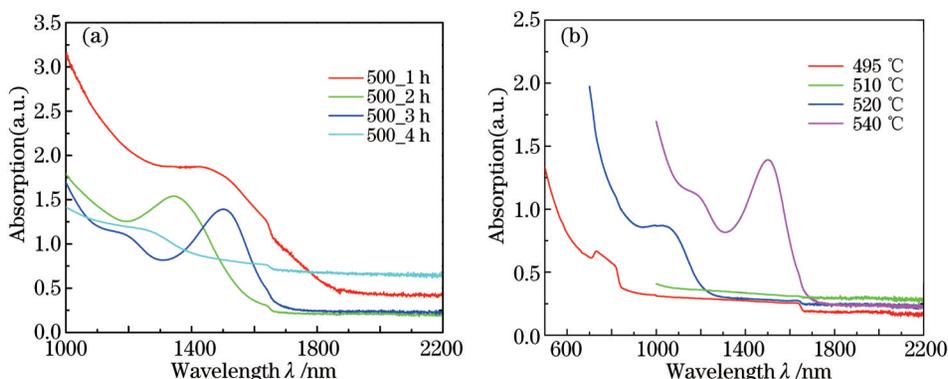


图2 吸收光谱。(a)不同核化时间;(b)不同晶化温度

Fig.2 Absorption spectrum. (a) Nucleation duration; (b) crystallization temperature

不同晶化温度时制备的样品其吸收光谱如图2(b)所示,从图中可以看到,在晶化温度较低的495 °C时,吸收光谱在可见光区吸收较强,而在红外波段非常弱,这与普通的玻璃的吸收特性比较一致^[18]。虽然此时玻璃体内已经有PbSe晶体析出,但其尺寸较小、浓度较低,对吸收光谱特性还没有形成较大影响。当晶化温度升高到520 °C时,形成的PbSe量子点晶体在1000 nm附近开始出现明显吸收。当晶化温度继续升高到540 °C时,吸收峰已经移动到1500 nm附近。这个变化表明温度升高,晶体生长速度加快,尺寸增大,晶体的浓度有大幅提高,使得材料在红外波段出现了明显的吸收峰。但当晶化温度进一步升高,比如之前实验中的550 °C^[13],却没能测量到明显的吸收峰,TEM图显示此时晶体团聚严重,尺寸过大,破坏了量子点的尺寸要求,其光谱特性也就改变了。

3 介电函数计算

3.1 理论模型

吸收光谱的测试分析表明,热处理温度对PbSe量子点玻璃中晶体的形成有非常明显的影响,为了制备满足一定光电要求的量子点材料,必须寻求合适的热处理温度。为了能够从微观角度理解热处理温度在量子点形成过程的作用原理,或者说热处理温度对材料微观参量的影响,下面将从吸收光谱数据出发,结合散射理论和K-K关系,求解出微观的介电函数,从而理解热处理温度对材料光学特性的影响。

材料的介电函数一般写成复数形式, $\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$,其中实部代表材料的折射率,即 $\epsilon_r' = n^2$,虚部与吸收系数 α 有关。实部和虚部通过K-K关系联系如下,

$$\epsilon_r'(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} \rho \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_r''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (1)$$

式中 ρ 为柯西主值, ω 为做研究的频段内的特定频率, ω' 作为积分变量,表示了全频段频率积分。

另外,吸收系数 α 还可由米氏散射理论通过材料介电函数的实部和虚部计算得到,

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda n_s} |f_{LF}|^2 \varepsilon_1 = \frac{18\pi n_s^3}{\lambda} \frac{\varepsilon_1 p}{(\varepsilon_R + 2n_s^2)^2 + \varepsilon_1^2}, \quad (2)$$

式中 n_s 为衬底介质折射率, f_{LF} 为局域场因子, p 为衬底介质中弥散介质的体积分数。因此通过实验测量得到的吸收光谱,经过归一化处理可以得到该材料的吸收系数,再联立(1)式和(2)式即可求出介电函数的实部和虚部。

直接从(1)式和(2)式中求解出 ε_R 和 ε_1 是比较困难的,可以尝试使用数值迭代方法代替直接求解从而解决该问题^[15-16]。数值迭代时首先将(1)式转化成波长形式,进而转化为求和形式,

$$\varepsilon_R(\lambda_j) = 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k \neq j} \frac{\lambda_j^2 \Delta\lambda}{\lambda_k (\lambda_j^2 - \lambda_k^2)} \varepsilon_1(\lambda_k), \quad (3)$$

其中 λ_j 为光谱范围内的某一个波长, k 为求和变量,从0到无穷, λ_k 代表求和范围内的一个波长。由于光谱数据一般都是等间距的,利用 $\lambda_{j(k)} = j(k) \cdot \Delta\lambda$,简化(3)式为,

$$\varepsilon_{Rj} = 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k \neq j} \frac{j^2}{k(j^2 - k^2)} \varepsilon_{1k}, \quad (4)$$

为了方便运算,可以使用矩阵形式,把 ε_R 和 ε_1 写成列向量,另外,把(4)式中的1替换成 ε_∞ ,取为背景材料的折射率,以弥补求和数有限时的误差,可以得到,

$$\varepsilon_R = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} A \cdot \varepsilon_1, \quad (5)$$

式中矩阵 A 为,

$$A_{jk} = \frac{j^2}{k(j^2 - k^2)}, A_{jj} = 0. \quad (6)$$

具体迭代计算时令 $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}$, $\Delta\varepsilon_{ij}$ 的增量和吸收系数的误差取正比例关系,比例系数可选一个小于1的小数,具体值可视收敛精度而变化。吸收系数的误差向量 M_j 定义为,

$$M_j = \frac{\alpha}{\alpha_j} - 1. \quad (7)$$

3.2 数值计算

为了得到吸收系数,将吸收谱数据在400 nm处按照块体PbSe的吸收系数进行归一化处理^[15],取 $\alpha = 2.03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 。由吸收谱可以看到,该量子点玻璃的吸收峰大致位于1500 nm附近,相应的带宽约为150 nm。所以计算中试探函数 ε_{i0} 可以采用洛伦兹分布形式,峰值位于1600 nm,带宽100 nm。另一个峰值按照块体PbSe材料的吸收峰选取500 nm^[19],带宽100 nm。试探函数的峰值大小按照块体材料适当选取,其分布如图3所示。

将图2中的吸收光谱进行归一化处理得到的吸收系数作为目标函数,用图3中的试探函数 ε_{i0} ,按照(5)式计算出 ε_{R0} ,再将实部和虚部带入(2)式,即可求出吸收系数 α_0 。然后利用(7)式计算误差 $\Delta\varepsilon_{ij} = kM_j$,进而利用 $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}$ 不断迭代,直到 α_k 逐步逼近到实验值 α 。图4给出了一个样品的实验测量值和迭代结果的比较,均方根误差为 10^{-6} ,可以看出迭代收敛性非常好。

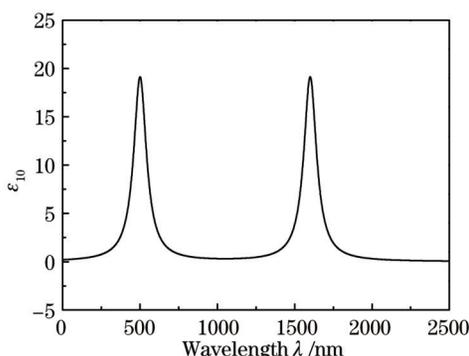


图3 试探函数的洛伦兹分布形式

Fig.3 Lorentz distribution of trial function

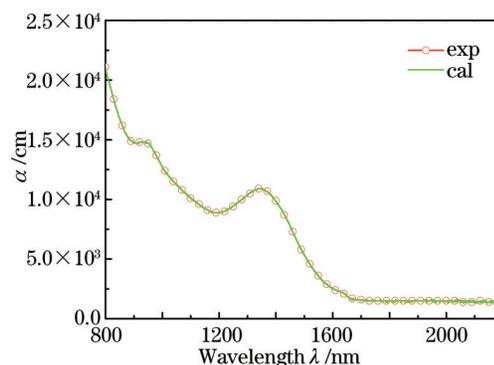


图4 吸收系数的实验值和计算值

Fig.4 Experimental and calculated value of absorption coefficient

4 讨 论

以吸收系数作为目标函数,当吸收系数通过迭代和实验值不断逼近后,介电函数的实部和虚部也通过不断迭代被确定下来,结果如图5和图6所示。介电函数的虚部和吸收系数成一定比例关系,如(2)式所示,因此计算得到的介电函数虚部和实验测量到的吸收光谱曲线分布非常相似。由于量子点材料吸收峰的位置和颗粒大小有关,不同直径的量子点材料其吸收峰有所不同^[6],所以一般从吸收光谱也可以间接分析出材料中颗粒大小及其分布。吸收光谱较宽表明颗粒尺寸分布范围大,吸收光谱出现多个峰值表明材料中有多个尺寸的颗粒分布^[20]。但是宏观上的吸收光谱与材料的微观参量之间还是有一定的差异,实际上微观的 ϵ_1 和宏观上的吸收光谱还是存在一定的差异,这些差异在研究辐射强度、吸收截面及发射截面等微观参量时有非常重要的研究意义^[15-17]。因此利用吸收光谱分离出 ϵ_1 能更好地认识量子点形成过程中热处理温度的影响,另外一旦得到了 ϵ_1 ,便很容易得到整个波段的 ϵ_r ,从而得到折射率这个重要的参数,可以进一步分析材料的色散关系及非线性效应^[21]。

图5给出了不同核化时间对介电函数的影响,从图5(a)中可以看到,随着核化时间的增加,在红外波段, ϵ_1 的展宽在不断减小,峰值位置出现明显的红移。另外随着时间增加, ϵ_1 的分布越来越复杂,从1 h时的平坦分布,过渡到2 h时的单峰分布,进而过渡到3 h的多峰结构。这表明量子点晶体在成核初期,其尺寸较小,但是分布比较均匀。当核化时间增加后,晶体开始围绕晶核生长,尺寸逐渐增大,玻璃体中的量子点晶体浓度不断增大, ϵ_1 也在红外波段出现峰值,吸收光谱表现出较强的吸收峰。

图5(b)给出了从吸收谱分离出的介电函数的实部,由于 $\epsilon_r = n^2$,实际上可以分析材料红外波段的色散关系及热处理温度对折射率大小及分布的影响。从图中可以看到,随着核化时间的增加, ϵ_r 呈现增大并红移的现象。由等效折射率理论分析可知,等效折射率的增加表明镶嵌在背景材料中的颗粒的体积分数在增加,也即粒子浓度在增加,更加直观地体现了热处理温度对光电性能的影响,表明核化时间增长,晶体开始围绕晶核不断生长成尺寸较大的晶体。

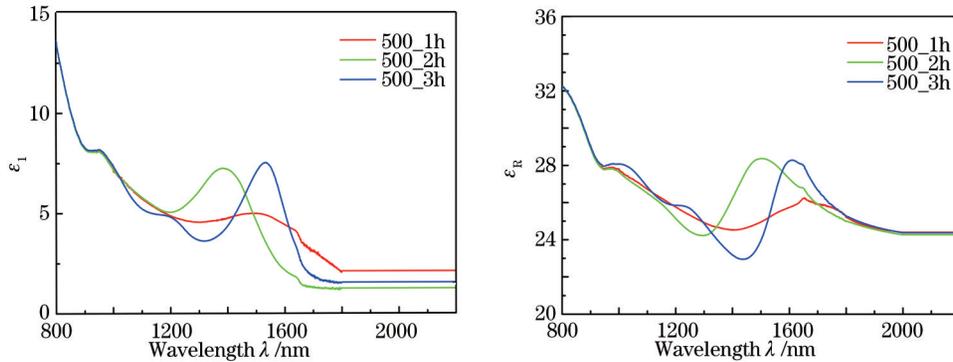


图5 不同核化时间计算得到的结果。(a)介电函数虚部;(b)介电函数实部

Fig.5 Calculated results of the dielectric function of different nucleation duration. (a) Real part; (b) imaginary part

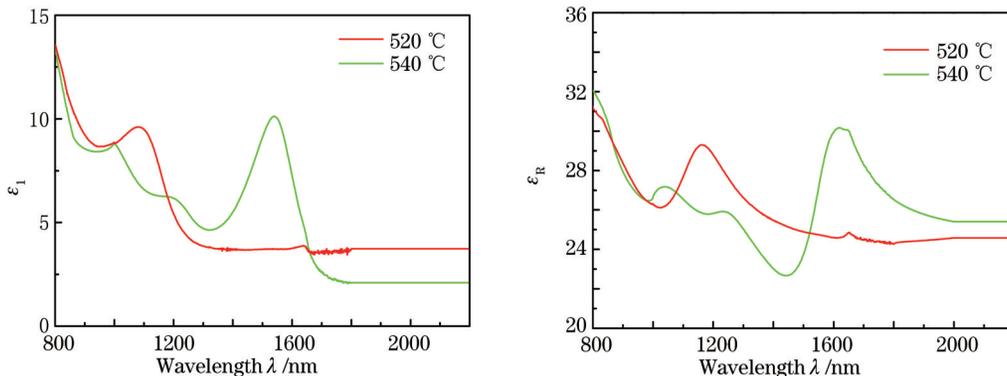


图6 不同晶化温度计算得到的结果。(a)介电函数虚部;(b)介电函数实部

Fig.6 Calculated results of the dielectric function of different crystallization temperature. (a) Real part; (b)imaginary part

图 6 给出了不同晶化温度对介电函数的影响,从图 6(a)中可以看到,随着晶化温度的增加,在红外波段, ε_1 的峰值不断增大,峰值位置也出现明显的红移。另外随着晶化温度增加, ε_1 的分布越来越复杂,这和核化时间增加时的现象非常一致。表明经过第一阶段的核化处理,玻璃中形成了大量的晶核,随着晶化温度增加,晶体生长加速,尺寸逐渐增大,玻璃体中的量子点晶体浓度不断增大。图 6(b)中 ε_r 随晶化温度的升高,色散区域从 1000 nm 附近移动到 1500 nm 附近,折射率的数值增加明显,表明 PbSe 粒子浓度在不断增加, PbSe 的红外光谱特性逐渐显现出来。

5 结 论

为了研究热处理温度对量子点玻璃材料微观光电参量的影响,进而探索制备具有优良光电性能的量子点玻璃方案,实验上对比研究了核化时间、晶化温度对样品吸收光谱和介电函数的影响。理论上从吸收光谱数据出发,利用米氏散射理论和 K-K 关系,可以分离出材料的介电函数实部和虚部。利用理论分析得到的微观光电参量,可以进一步研究宏观热处理温度对材料微观光电参量的影响。从而明确量子点玻璃的光学辐射特性,如辐射强度,吸收和辐射界面等,以及材料制备过程的物理特性,如颗粒大小、浓度及其分布。

参 考 文 献

- 1 M Law, M C Beard, S Choi, *et al.*. Determining the internal quantum efficiency of PbSe nanocrystal solar cells with the aid of an optical model[J]. *Nano Lett*, 2008, 8(11): 3904–3910.
- 2 He Zhicong, Li Fang. Optical properties of third-order nonlinearities of CdSeS quantum dots/polystyrene composite film[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1007001.
何志聪,李 芳. CdSeS 量子点/聚苯乙烯薄膜的三阶非线性光学特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1007001.
- 3 Xue Zhenjie, Li Kuiying, Sun Zhenping, *et al.*. Carrier transport characteristics in CdSe/CdS/Thioglycolic acid ligand quantum dots with a core-shell structure[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(6): 066801.
薛振杰,李葵英,孙振平,等. 核壳结构硒化镉/硫化镉/巯基乙酸量子点载流子输运特性[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 066801.
- 4 S Hoogland, V Sukhovatkin, I Howard, *et al.*. A solution-processed 1.53 μm quantum dot laser with temperature-invariant emission wavelength[J]. *Opt Express*, 2006, 14(8): 3273–3281.
- 5 Zeng Feng, Zhu Xiaojun, Wang Wei, *et al.*. Research on background of the CdSe/ZnS quantum-dot doped fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010606.
曾 风,朱晓军,王 伟,等. CdSe/ZnS 量子点光纤芯基底的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 010606.
- 6 Huang Wei. Tunable Infrared Luminescence and Optical Amplification in PbS Doped Glass[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 23–30.
黄 伟. PbS 掺杂量子点玻璃的超宽带红外发光和光放大[D]. 杭州:浙江大学, 2008: 23–30.
- 7 Cheng Cheng, Yuan Fang, Cheng Xiaoyu, *et al.*. Study of an unsaturated PbSe qd-doped fiber laser by numerical simulation and experiment[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2014, 50(11): 882–889.
- 8 X L Dai, Z X Zhang, Y Z Jin, *et al.*. Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots[J]. *Nature*, 2014, 515(7525): 96–99.
- 9 Zhang Wenjun, Zhai Baocai, Xu Jian, *et al.*. Fabrication and characterization of green CdSe quantum dot light emitting diodes with ZnO electron-transport layer[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(11): 401–406.
张文君,翟保才,许 键,等. ZnO 作为电子传输层的绿光胶体 CdSe 量子点 LED(QD-LED)的制备与表征[J]. *发光学报*, 2012, 33(11): 401–406.
- 10 J Wu, Z M Wang, V G Dorogan, *et al.*. Effects of rapid thermal annealing on the optical properties of strain-free quantum ring solar cells[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2013, 8(1): 1–5.
- 11 Qu Xiaosheng, Zhang Sisi, Xiong Liling, *et al.*. Research progress of quantum-dot intermediate band solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020008.
屈晓声,张思思,熊丽玲,等. 量子点中间带太阳能电池的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020008.
- 12 R S Silva, P C Morais, A M Alcalde, *et al.*. Optical properties of PbSe quantum dots embedded in Oxide glass[J]. *J Non-Crys Solids*, 2006, 352(32–35): 3522–3524.
- 13 Jiang Huilu, Cheng Cheng, Ma Dewei, *et al.*. Synthesis and characterization of PbSe quantum dot doped glass [J]. *J Optoelectronic*

- Laser, 2011, 22(6):872-875.
- 江惠绿, 程 成, 马德伟, 等. PbSe量子点掺杂玻璃的制备及表征[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 872-875.
- 14 D W Ma, C Cheng, Y N Zhang, *et al.*. Preparations of PbSe quantum dots insilicate glasses by a melt-annealing technique[J]. Optical Materials, 2014, 37: 834-839.
- 15 I Moreels, G Allan, B D Geyter, *et al.*. Dielectric function of colloidal lead chalcogenide quantum dots obtained by a Kramers-Krönig analysis of the absorbance spectrum[J]. Phys Rev B, 2010, 81(23): 235319.
- 16 Y Yang, H Zhang, C Cheng, *et al.*. Scheme for extracting size-distribution information of a quantum dot ensemble from its absorption spectrum[J]. J Opt Soc Am B, 2013, 30(11): 3022-3026.
- 17 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.
- 18 Sheng Yubang, Yang Lvyun, Luan Huaixun, *et al.*. Gamma radiation effects on absorption and emission properties of erbium-doped silicate glasses[J]. Acta Phys Sinica, 2012, 61(11): 401-406.
- 盛于邦, 杨旅云, 栾怀训, 等. γ 辐照对掺Er硅酸盐玻璃吸收和发光特性的影响. 物理学报, 2012, 61(11): 401-406.
- 19 I Moreels, K Lambert, D De Muynck, *et al.*. Composition and size-dependent extinction coefficient of colloidal PbSe quantum dots [J]. Chem Mater, 2007, 19(25): 6101-6106.
- 20 N Suzuki, K Sawai, S Adachi, *et al.*. Optical-properties of Pbse[J]. J Appl Phys, 1995, 77(3): 1249-1255.
- 21 Cheng Cheng, Zhai Shitao. Determination of nonlinear dependence between absorption and dispersion of CsSe/ZnS quantum dot doped in ultraviolet glue[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612009.
- 程 成, 翟诗滔. 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[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612009.

栏目编辑: 刘丰瑞