

较高浓度 PbSe 量子点硅酸盐玻璃的制备及光学表征

许周速 程 成 马德伟

(浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 采用高温熔融-热处理法,以 ZnSe 作为 PbSe 量子点的硒源,成功制备了较高浓度的 PbSe 量子点硅酸盐玻璃。透射电子显微镜(TEM)测试表明,量子点在玻璃基质中的体积比高达 2%~4%,高于采用 Se 作为硒源时的掺杂体积比。X 射线衍射(XRD)测试表明,PbSe 量子点呈立方晶体结构。光致发光(PL)光谱测试表明,量子点有强烈的荧光发射,发光波长半峰全宽(FWHM)覆盖 1400~2600 nm,其 PL 峰值强度和 FWHM 均大于以 Se 为硒源时的情形。以 ZnSe 代替 Se 作为 PbSe 量子点的硒源,可有效避免 Se 组分的高温挥发,同时,残余 Zn 形成的 ZnO 有利于玻璃中 PbSe 量子点的析晶,从而提高了 PbSe 量子点在玻璃中的含量。该 PbSe 量子点玻璃,可用来进一步制备成超带宽、高增益的红外光纤放大器。

关键词 材料;光纤材料;PbSe 量子点;硅酸盐玻璃;熔融-热处理法;光致发光光谱

中图分类号 TN213 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0916002

Preparation and Optical Characterization of PbSe Quantum Dot-Doped Silicate Glass with High Concentration

Xu Zhousu Cheng Cheng Ma Dewei

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

Abstract A silicate glass doped PbSe quantum dot (QD) with high concentration is prepared by using a high-temperature melting heat treatment method and taking ZnSe as a precursor of PbSe QD. The transmission electron microscopy (TEM) shows that the QD volume ratio in the glass reaches 2%~4%, which is higher than that of using simple substance Se as a precursor of PbSe. The X-ray diffraction (XRD) measurement shows that the PbSe QD constitute a cubic crystal structure. The measured photoluminescence (PL) spectra shows that the QD glass has strong photoluminescence emission, with full width at half maximum (FWHM) in the range from 1400 nm to 2600 nm. Under the same heat treatment condition, both the PL peak intensity and the FWHM are greater than that of simple substance Se. Instead of Se, ZnSe can avoid vaporization of Se component in high temperature, and be beneficial to crystallization of PbSe QDs in the glass due to the remaining Zn forming ZnO, as a result, QD concentrations in the glass is increased. The PbSe QD glass, with high doping concentration, can be used for preparing IR fiber optical amplifiers with broadband and high gain.

Key words materials; fiber materials; PbSe quantum dot; silicate glass; melting-heat treatment method; photoluminescence spectrum

OCIS codes 160.2290; 160.4236; 160.4670; 140.4480; 160.2750

1 引 言

半导体量子点(QD)及其光学特性是人们的研究热点。在众多的量子点种类中,IV-VI族半导体量子点(如 PbSe、PbS)由于具有强光学吸收和荧光辐

射特性,受到了人们极大地关注。研究表明,与天然稀土元素(如铟、铋等)掺杂的光纤器件相比,由 PbSe 量子点构成的光纤放大器具有宽带宽、增益平坦等优点^[1];PbSe 量子点光纤激光器具有抽运效率

收稿日期: 2012-03-22; **收到修改稿日期**: 2012-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(60777023)和浙江省公益技术项目(2011C21047)资助课题。

作者简介: 许周速(1981—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事纳米材料和激光技术等方面的研究。

E-mail: xuzhousu@zjut.edu.cn

导师简介: 程 成(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事量子点制备、光学表征及光电子器件等方面的研究。

E-mail: chengch@zjut.edu.cn(通信联系人)

高、饱和浓度低和光纤饱和长度短等特点^[2],展现了 PbSe 量子点在光增益器件方面广阔的应用前景。

制备量子点的方法很多,如分子束外延法^[3,4]、溶胶-凝胶法^[5]、本体聚合法^[6]和高温熔融法^[7,8]等。其中熔融法是近年来人们关注的热点之一。熔融法通过热处理,直接在玻璃基质中生长量子点,形成了量子点与基底玻璃之间的介电限域效应,从而增强了量子点的荧光辐射。同时,玻璃基质为量子点提供了稳定的基底环境,使得量子点的热稳定性和化学稳定性都得到了提高。

国内外对熔融法制备 PbSe 量子点玻璃曾有一些报道。Kolobkva 等^[9,10]以 PbO 和 ZnSe 等作为 PbSe 量子点的前驱体,制备了含 PbSe 量子点的磷酸盐玻璃($\text{Na}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{Ga}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{AlF}_3$)。但磷酸盐玻璃具有熔点较低(约 1050 °C^[10])、粘度较低、机械性能稍差等缺点,无法与常规 SiO_2 光纤直接熔接。Chang 等^[11]将 PbSe 掺入到 $\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{K}_2\text{O}$ 中,获得了含 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃。Silva 等^[12]以 PbO_2 和 Se 作为量子点前驱体,制备了含 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃($\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{CO}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$)。文献[11,12]的热处理温度较低(小于等于 510 °C),因此,制备的量子点数密度较低,粒度分布较窄,其光致发光(PL)峰的半峰全宽(FWHM)约为 200~400 nm。文献[11,12]将样品 PL 峰值强度归一化,没有涉及热处理条件对 PL 强度和 FWHM 的影响,因而无从得知硅酸盐玻璃中 PbSe 量子点 PL 强度的具体情况。而 PL 强度及其 FWHM 对于量子点光电子器件非常重要,因此,有必要进一步详细地研究在硅酸盐玻璃中 PbSe 量子点的 PL 强度及其 FWHM。

本课题组曾用 PbO 和 Se 作为前驱体,制备了含 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃($\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{AlF}_3-\text{Na}_2\text{O}$)^[7,8]。但由于硅酸盐玻璃熔融温度较高(大于 1350 °C),而 Se 在高温下极易挥发,因此,在高温制备过程中,玻璃中留下的 Se 实际含量并不高。经过大量的实验,发现采用该技术路线所能得到的量子点的体积比一般很难超过 1%。而量子点体积比或浓度对于增益型器件(如量子点光放大器、量子点激光器)至关重要,因此,希望有更高的体积比(大于 1%~2%),来实现高增益的量子点光电子器件。

为了避免单质 Se 组分的高温易挥发的问题,本文用高温下不易挥发的 ZnSe 来代替 Se 单质,以钠铝硼硅酸盐玻璃作为基底材料,采用熔融-热处理法,制备了较高浓度 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃。检测表

明,该玻璃中量子点的体积比高达 2%~4%,量子点数密度为 $(9.05\sim 12.44)\times 10^{22}\text{ m}^{-3}$,量子点颗粒直径为 5~9 nm。玻璃有强烈的荧光辐射,荧光辐射峰位于 C-L 通信波带的 1585~2195 nm,其 FWHM 达 200~570 nm。在相同热处理条件下,该玻璃中的量子点浓度、PL 峰值强度和 FWHM 均大于用 Se 单质作为 PbSe 量子点前驱体的情形。这些特点,对于制备超宽带、高增益的红外量子点光放大器非常有利。

2 实验制备

2.1 配合料

采用熔融法制备含较高浓度 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃,玻璃基质配方参考文献[7,8]。选用 SiO_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 ZnO 、 AlF_3 和 Na_2O 为玻璃基质材料,PbO 和 ZnSe 作为 PbSe 量子点的前驱体, SiO_2 、 B_2O_3 、 Al_2O_3 、 ZnO 、 AlF_3 、 Na_2O 、PbO、ZnSe 的质量分数比分别为 56.50%、4.33%、3.85%、8.57%、2.12%、15.11%、5.78% 和 3.74%。与文献[7,8]相比,采用 ZnSe 代替 Se 作为 PbSe 量子点的硒源,主要考虑以下两个方面:1)单质 Se 易挥发(熔点:217 °C,沸点:684.9 °C),而 ZnSe 熔点较高,可达 1520 °C,因此经高温熔融后,ZnSe 基本都可留存在玻璃基质中;2)残余 Zn 形成的 ZnO 在玻璃体系中是中间体氧化物,有利于玻璃中 PbSe 量子点晶体的形成,因此经过这样处理,就有可能得到较高浓度的 PbSe 量子点玻璃。

2.2 制备

首先将配合料混合均匀,置于刚玉坩埚中,而后把刚玉坩埚放入箱式电炉,在 1400 °C 高温熔融 1 h。然后,将熔体倾倒在金属模具上,在空气气氛中快速冷却,得到金黄色的透明玻璃。此时,玻璃中应无 PbSe 晶体生成,该样品记为 G_0 。而后,对 G_0 样品分别在 530 °C(T_1)、550 °C(T_2)和 600 °C(T_3)热处理 5 h,样品分别记为 G_1 、 G_2 和 G_3 ;对 G_0 样品分别在 530 °C、550 °C 和 600 °C 热处理 10 h,样品分别记为 G_4 、 G_5 和 G_6 。经热处理后得到黑色玻璃。

2.3 表征

取样品 G_4 、 G_5 和 G_6 的一部分,分别用玛瑙研钵研磨成粉末,用荷兰帕纳科公司生产的 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪(XRD)(采用 Cu 靶 $K\alpha$ 射线,X 射线波长 $\lambda=0.1541\text{ nm}$,工作电压为 40 kV,电流为 40 mA)分析样品的结晶情况。取样品 G_4 、 G_5 和 G_6 一部分,用玛瑙研钵研磨成粉末,用荷兰 Philips-FEI 公司生产的 Tecnai G2 F30S-Twin 型

300 kV 高分辨透射电子显微镜 (TEM) 分析样品中 PbSe 量子点的尺寸大小和分布。用英国 Edinburgh Instruments 公司生产的 FLSP920 型光谱仪 (测量范围为 1100~3500 nm, 扫描精度为 2 nm, 采用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器, 激发波长为 1064 nm), 测量样品 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 和 G_6 的 PL 谱。

3 结果与分析

3.1 玻璃颜色和热处理温度

当热处理时间为 5 h 时, 不同热处理温度的样品颜色明显不同。当热处理时间延长到 10 h 之后, 样品的颜色趋于一致。对于热处理时间 5 h 的样品 G_1 、 G_2 和 G_3 (热处理温度 $T_1 < T_2 < T_3$), G_1 颜色为微黄, G_2 变深, G_3 为纯黑。由此, 从样品颜色可以定性判断量子点的结晶情况, 即随着热处理温度的升高, 量子点的结晶浓度提高。对于热处理时间为 5 h, 对比文献[7]的析晶温度为 550 °C, 本文的析晶温度为 600 °C (T_3), 这是由于 ZnSe 的熔点较高所致。

文献[10]采用 PbO 和 ZnSe 作为 PbSe 量子点的前驱体制备磷酸盐玻璃, 其析晶温度为 544 °C。本文采用同样的 PbSe 量子点前驱体, 但基质玻璃为硅酸盐玻璃, 硅酸盐玻璃的熔点高于磷酸盐玻璃, 故 Pb^{2+} 和 Se^{2-} 离子扩散的最佳温度也较高, 因此, 适用的热处理温度也较高。

3.2 XRD 分析

图 1 为不同热处理温度下制得的含 PbSe 量子点玻璃的 XRD 图谱。由图可见, 3 个样品 G_4 、 G_5 和 G_6 在衍射角分别为 25.178°、29.153°和 41.699°时均出现了明显的衍射峰。对比粉末衍射标准联合会 (JCPDS) 标准卡片 No. 65-0136 可知, 衍射峰对应 PbSe 立方晶体, 其对应的晶面分别为 (111)、(200) 和 (220) 晶面。这表明, 经过不同温度热处理后, 玻璃基质中均析出了 PbSe 晶体。由图可知, 随着热处理温度升高, 量子点的衍射强度逐渐增加, 这表明量子点的结晶浓度随温度提高而增大。

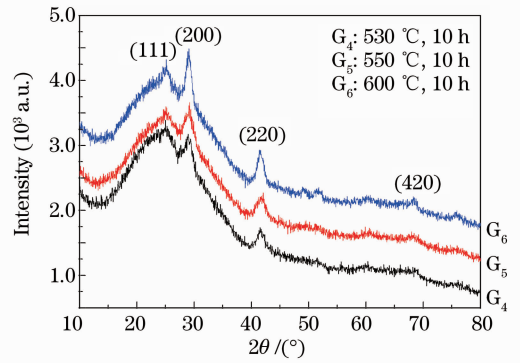


图 1 不同热处理温度的 PbSe 量子点掺杂玻璃的 XRD 谱
Fig. 1 XRD patterns of PbSe QD-doped glasses treated at different temperatures

3.3 TEM 分析

图 2 为经 530 °C、550 °C 和 600 °C 热处理 10 h

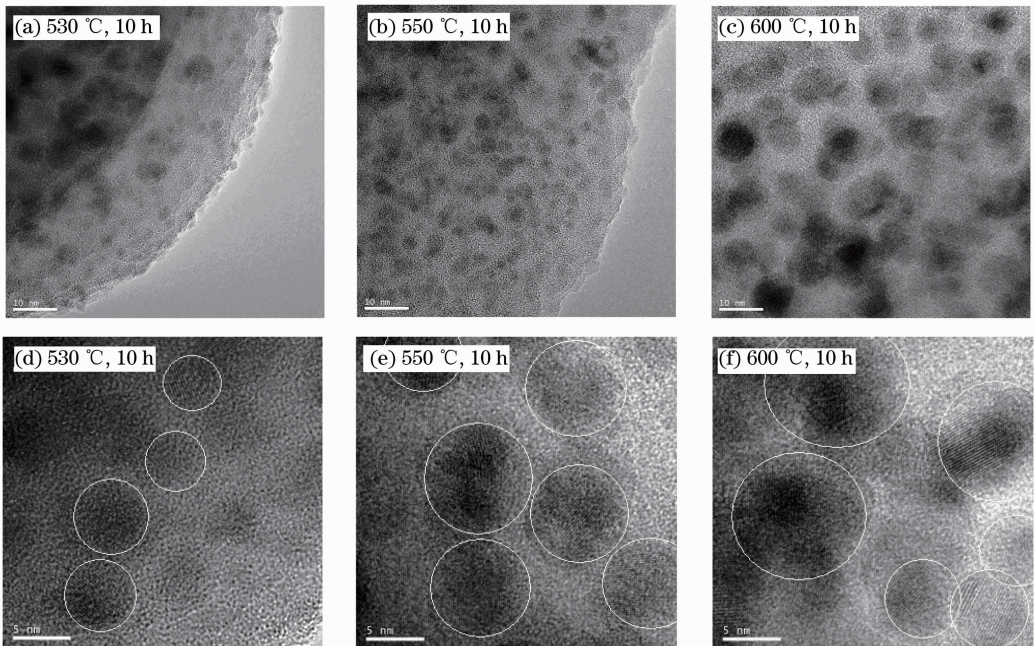


图 2 不同热处理温度的 PbSe 量子点掺杂玻璃的 TEM 图
Fig. 2 TEM micrographs of PbSe QD-doped glasses treated at different temperatures

后的样品 TEM 图,白圈内为具有清晰晶格结构的量子点。由图可知,经过热处理后,玻璃中析出了分布较均匀并具有一定数密度分布的 PbSe 量子点。采用文献[7]中体积比计算方法进行估算,量子点与基质的体积比约为 2% [图 2(b)] 和 4% [图 2(c)], 高于文献[7]报道的 1%。对应地,量子点数密度分别为 $9.05 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ [图 2(b)] 和 $1.24 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ [图 2(c)]。由此可见,采用 ZnSe 代替 Se 作为量子点 PbSe 的硒源,确实可提高玻璃中量子点的体积比或数密度。图 2 中样品 G_4 、 G_5 和 G_6 的平均尺寸分别约为 6、7.5 和 8.5 nm。因此,随着热处理温度的升高,量子点的尺寸和量子点掺杂体积比均随之增大。

图 3 为样品 G_6 的高分辨 TEM 图。图中可以清楚看到晶格结构,表明 PbSe 量子点具有较好的结晶

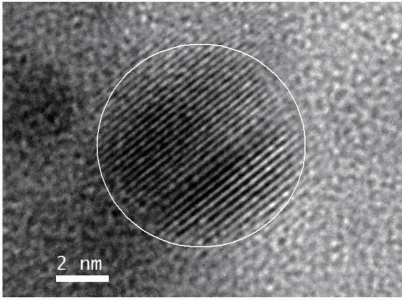


图 3 样品 G_6 的高分辨率 TEM 图

Fig. 3 TEM micrograph with high resolution for sample G_6

质量。经测量和计算其晶面间距约为 0.3011 nm, 接近 PbSe 量子点(200)的晶面间距(0.3062 nm)。

随着热处理温度升高,玻璃基质的粘度降低,离子扩散速率增大,更容易形成 PbSe 量子点,同时也更容易发生小尺寸量子点聚合,使得量子点掺杂体积比和平均尺寸增大。如图 2(f) 所示,TEM 图上出现了量子点的粘合,这是小尺寸量子点的聚合现象。

3.4 PL 谱分析

图 4 为不同热处理温度下的 PbSe 量子点的 PL 谱,其中样品 G'_2 和 G'_3 数据来自文献[7]。图中,2128 nm 波长处出现的窄峰为激励光(1064 nm)的二级散射光谱。可见,经过热处理后,各样品分别在不同波长处出现不同强度的 PL 辐射峰,其光谱特性如表 1 所示。PbSe 量子点的尺寸为^[13]

$$E_g(d) = E_g(\infty) + \frac{1}{0.0105d^2 + 0.2655d + 0.0667}, \quad (1)$$

式中 d 为 PbSe 量子点的有效直径, $E_g(d)$ 为 PbSe 量子点的有效带隙能, $E_g(\infty)$ 为 PbSe 体材料的有效带隙能, $E_g(\infty) = 0.26 \text{ eV}$ ^[14]。(1)式右边第 2 项中,包含了量子受限项($\propto d^{-2}$)、电子-空穴间库仑作用项($\propto d^{-1}$)和常数项(有效 Rydberg 能量)。取 PL 峰值波长能量为 $E_g(d)$, 将 PL 峰值波长代入(1)式,计算结果如表 1 所示,计算结果与 TEM 的分析结果基本相符。

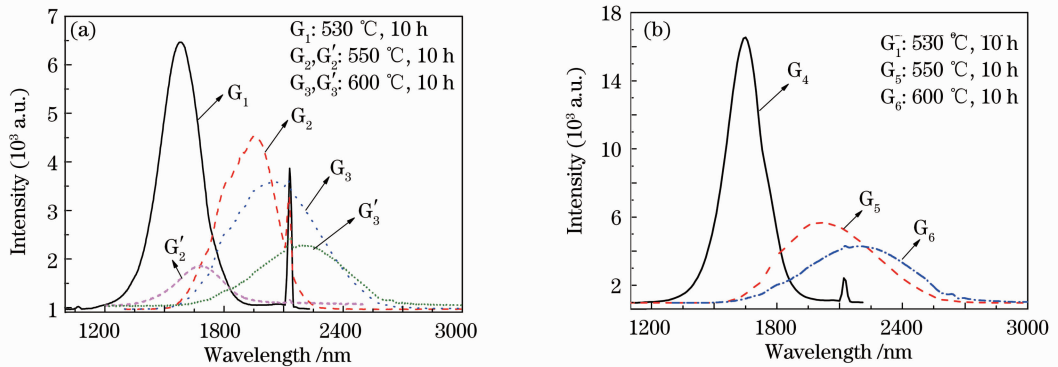


图 4 不同热处理温度的 PbSe 量子点掺杂玻璃的 PL 谱。(a) 5 h; (b) 10 h

Fig. 4 PL spectra of PbSe QD-doped glass treated at different temperatures. (a) 5 h; (b) 10 h

由图 4 和表 1 可见,随着热处理温度的升高, PbSe 量子点的 PL 峰值波长红移,峰值强度逐渐降低。由图 4(a) 可知,本文制备的玻璃中的量子点 PL 峰值强度和 FWHM 均大于文献[7],其增大倍数为 1.5~3。由于 PL 辐射强度正比于量子点数密

度或浓度,因此,本文制备的量子点浓度高于文献[7],这与 TEM 图的结果是一致的。在热处理时间为 10 h、热处理温度为 600 °C 时,本文制备的量子点玻璃 PL 峰 FWHM 可达 570 nm,远大于在相同制备工艺下得到的 200~400 nm^[11,12]。比较图 4(a)

和(b),在相同热处理温度下,当热处理时间从 5 h 延长到 10 h 时,PL 峰值强度均增大,但 FWHM 变

化不大。这表明,热处理时间从 5 h 延长到 10 h,可使玻璃中的量子点浓度增大,但粒度分布不变。

表 1 PbSe 量子点掺杂玻璃的 PL 光谱特性

Table 1 PL spectra of the PbSe QD-doped glass

Sample	Thermal treatment temperature / °C	Thermal treatment time / h	PL peak wavelength / nm	PL peak intensity I_p (a. u.)	FWHM $W_{1/2}$ / nm	QD average size* / nm	Total PL energy (10^6 a. u.)
G ₁	530	5	1585	6465	220	5.6766	1.4
G ₂	550	5	1952	4531	380	7.5300	1.7
G ₂	600	5	2053	3592	539	8.0962	1.9
G ₄	530	10	1650	16550	225	5.9855	3.7
G ₅	550	10	2020	5664	530	7.9059	3.0
G ₆	600	10	2195	4290	570	8.9294	2.4

* QD average sizes is estimated according to the formula (1), slightly different from the data estimated by TEM.

4 讨 论

由表 1 可知,随热处理温度升高,PL 峰的 FWHM 逐渐增大。这是因为,随热处理温度升高, Pb^{2+} 和 Se^{2-} 离子扩散速度变大,导致量子点尺寸分布的不均匀性就越大,使得玻璃中的量子点尺寸分布范围变宽。

众所周知,PL 峰值强度及其半峰全宽的乘积正比于荧光辐射总能量。在入射的激励激光能量或能量密度恒定的情况下,量子点玻璃吸收了激励光的能量之后,所能辐射的荧光总能量与导带中发生跃迁的量子点数密度 n_c 成正比,即

$$I_p W_{1/2} \propto n_c, \quad (2)$$

式中的 I_p 为荧光辐射峰值强度,FWHM 为荧光辐射的半高宽。 n_c 与总量子点数密度有关。各个样品的荧光辐射总能量的计算结果如表 1 最后一列。由表 1 实验数据可知,在低掺杂浓度下, n_c 与总量子点数密度成正比。但在高掺杂浓度下,则有相反的现象,即荧光辐射的总能量(或辐射的占比)随掺杂浓度的提高反而下降。这是由于量子点之间相距较近,导带中的电子与电子的库仑作用增强,而作为三体参与的非辐射俄歇复合,在高密度情况下复合几率将增大;同时,导带内电子非辐射跃迁以热振动或辐射声子的方式,消耗了一部分能量,从而使得带间跃迁的荧光辐射的总能量降低。因此,硅酸盐玻璃中存在着一个 PL 辐射能量或能量密度最大的 PbSe 量子点饱和掺杂浓度。

由表 1 可知,在热处理时间为 5 h 条件下,玻璃中量子点浓度较低。随热处理温度升高,量子点密度增大,荧光辐射总能量增大。在热处理时间为 10 h 条件下,玻璃中量子点浓度较高。随热处理温

度升高,量子点密度增大,但荧光辐射强度反而减弱。这也与文献[15]的实验观测结果一致。在本文的实验范围内,样品 G₄ 的荧光辐射总能量最大,此时的荧光辐射能可视为饱和,对应的量子点密度可视为饱和密度。由图 2 可知,当量子点直径约为 6 nm 时,该饱和密度值约为 $9 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 。在此之后,随热处理温度升高,量子点浓度和尺寸增大,所测得 FWHM 逐渐增大,但荧光辐射强度下降,其辐射总能量逐渐降低。

5 结 论

采用高温熔融法,以 PbO 和 ZnSe 作为 PbSe 量子点的前驱体,在热处理温度为 530 °C ~ 600 °C 的范围内,制备了含 PbSe 量子点的硅酸盐玻璃。玻璃中 PbSe 量子点直径为 5 ~ 9 nm,直径随热处理温度增高而增大。玻璃中量子点的体积比高达 2% ~ 4%,具有强荧光辐射,辐射峰位于近红外的 1585 ~ 2195 nm,其 FWHM 为 200 ~ 570 nm。在热处理温度为 530 °C、热处理时间为 10 h 条件下,荧光辐射总能量达到最大值。本文制备的 PbSe 量子点玻璃,可用于制备超宽带、高增益的近红外光纤放大器。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Cheng Cheng, Wei Kaihua. Numerical simulation of PbSe quantum-dot-doped fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(5): 815~818
- 程 成, 魏凯华. PbSe 量子点光纤激光器的数值模拟[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(5): 815~818
- 3 P. Lach, G. Karczewski, P. Wojnar *et al.*. Pressure coefficients

- of the photoluminescence of the II-VI semiconducting quantum dots grown by molecular beam epitaxy[J]. *J. Lumin.*, 2012, **132**(6): 1501~1506
- 4 A. Pulzara-Mora, E. Cruz-Hernández, J. S. Rojas-Ramirez *et al.*. Structural and optical properties of InAs quantum dots grown by molecular beam epitaxy[J]. *Microelectronics Journal*, 2008, **39**(11): 1248~1250
- 5 Xiang Weidong, Tang Shanshan, Zhang Xiyan *et al.*. PbS quantum dot doped glass prepared by sol-gel method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(7): 4607~4611
向卫东, 唐珊珊, 张希艳. 溶胶-凝胶法制备 PbS 量子点玻璃的研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(7): 4607~4611
- 6 Cheng Cheng, Wang Ruodong, Yan Jinhua. PbSe/PMMA quantum dot-doped fiber materials fabricated by a bulk polymerization method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0616005
程 成, 王若栋, 严金华. 本体聚合法制备 PbSe/PMMA 量子点光纤材料[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 616005
- 7 Cheng Cheng, Jiang Huilü, Ma Dewei. PbSe quantum dot-doped sodium-aluminum-borosilicate glass fabricated by a melting method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0216005
程 成, 江慧绿, 马德伟. 熔融法制备 PbSe 量子点钠硼铝硅酸盐玻璃[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0216005
- 8 Cheng Cheng, Jiang Huilü, Ma Dewei *et al.*. An optical fiber glass containing PbSe quantum dots[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4491~4495
- 9 E. V. Kolobkova, A. A. Lipovskii, V. D. Petrikov *et al.*. Fluorophosphate glasses containing PbSe quantum dots[J]. *Glass Phys. Chem.*, 2002, **28**(4): 246~250
- 10 V. G. Melekhin, E. V. Kolobkova, A. A. Lipovskii *et al.*. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics[J]. *Glass Phys. Chem.*, 2008, **34**(4): 351~355
- 11 J. Chang, C. Liu, J. Heo. Optical properties of PbSe quantum dots doped in borosilicate glass[J]. *J. Non-Crys. Solids*, 2009, **355**(37-42): 1897~1899
- 12 R. S. Silva, P. C. Morais, A. M. Alcalde *et al.*. Optical properties of PbSe quantum dots embedded in oxide glasses[J]. *J. Non-Crys. Solids*, 2006, **352**(32-35): 3522~3524
- 13 G. Allan, C. Delerue. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**(24): 245321
- 14 J. Heo, C. Liu. PbS quantum-dots in glass matrix for universal fiber-optic amplifier [J]. *J. Mater. Sci.; Mater. Electron.*, 2007, **18**(S1): S135~S139
- 15 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 凤, 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

栏目编辑: 韩 峰