

文章编号: 1000-7032(2015)03-0272-07

HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点的制备与表征

胡 军, 秦瑞飞, 金崇君*

(中山大学 物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 采用一种简单的方法合成 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点。首先,以 1-硫代甘油为稳定剂,在水相溶液中制备出 HgTe 核量子点;然后,采用外延生长法依次在 HgTe 核量子点表面包覆 CdS 和 ZnS 壳层,合成出最终具有稳定近红外发光的 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点。该合成方法仅需 3 个步骤,具有操作简单、成本低廉的优点。实验结果显示,当反应温度为 90 °C、反应溶液 pH 为 11.0、反应加热回流时间为 4 min 时,HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点具有最高荧光量子产率 36%。

关键词: HgTe/CdS/ZnS 量子点; 外延生长; 荧光量子产率

中图分类号: O842.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20153603.0272

Synthesis and Characterization of HgTe/CdS/ZnS Multi-shell Quantum Dots

HU Jun, QIN Rui-fei, JIN Chong-jun*

(School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

* Corresponding Author, E-mail: jinchjun@mail.sysu.edu.cn

Abstract: A simple method for HgTe/CdS/ZnS multi-shell quantum dots (QDs) synthesizing was developed. Firstly, HgTe core QDs were synthesized in aqueous solution with 1-thioglycerol as the stabilizer. Then, CdS and ZnS shells were grown on the surface of HgTe core by epitaxial growth method. The resultant HgTe/CdS/ZnS multi-shell QDs have stable near-infrared light-emitting property. This synthetic method contains only three steps with the advantages of simple operation and low cost. The experimental results indicate that HgTe/CdS/ZnS multi-shell QDs can reach the highest fluorescence quantum yield of 36% as the reaction solution (pH = 11.0) is heated reflux for 4 min at 90 °C.

Key words: HgTe/CdS/ZnS quantum dots; epitaxial growth; fluorescence quantum yield

1 引 言

近十年来,随着人们对近红外荧光光谱认识的逐步加深,近红外发光量子点的制备与表征的相关研究也在迅速地发展^[1-7]。其中,大多数汞的硫族化合物因为其具有半金属性质而被广泛用于红外传感领域^[8-10]。基于量子点限域效应,HgTe 量子点 (Quantum dots, QDs) 展现出了其特

有的不同于其他类似材料的光电性质,从光电器件到生物荧光探针领域都有着广泛的应用前景^[11-12]。例如,HgTe 发光量子点在二氧化硅光纤通信材料中具有低损耗的传输窗口,因而合成具有稳定近红外发光的 HgTe 量子点在光放大领域显得尤为重要^[14-15]。此外,近红外光能够渗入几厘米深的细胞组织,因此,作为近红外发光的 HgTe 纳米材料在深层细胞组织的光学成像领域

收稿日期: 2014-11-01; 修订日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(11374376,11174374); 广东省教育厅科研项目(2012CXZD0001)资助

有着潜在的应用^[16-18]。

然而, HgTe 量子点的荧光量子产率在常温下会随着时间的推移而不断减小, 且其发光峰也会不断红移直至猝灭^[19], 因此要制备出在常温下具有稳定近红外发光的裸核 HgTe 量子点是一件非常困难的事情。研究显示, 在负带隙材料 HgTe 量子点(295 K 下约为 -0.15 eV) 外生长一层有更宽带隙的 CdS(2.64 eV) 能很好地改善其发光稳定性^[20]。这种 HgTe/CdS 核/壳结构量子点不仅能有效提高 HgTe 量子点的荧光量子产率, 而且增强了其近红外发光的稳定性^[20-21]。但是, 这种发光稳定的核/壳结构仍含有有毒重金属离子(Hg^{2+} , Cd^{2+}), 限制了其在生物检测等领域的应用。因此, 在该结构表面再生长一种生物相容性高的无机材料是非常必要的。ZnS 由于具有更宽的带隙(3.68 eV) 和良好的生物相容性而成为最常用的材料。但是, ZnS 对于 HgTe 的晶格失配度远大于 CdS、ZnSe 等材料^[22], 如果用来直接包覆 HgTe 则会在两者界面间引入较多的缺陷。在 HgTe 表面先包覆一层 CdS, 然后再包覆一层 ZnS, 形成 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点则能够有效减缓核壳材料间的晶格突变, 降低界面处两种晶格的应力, 提高 HgTe 量子点的光稳定性和荧光量子产率^[22-23]。

本文采用外延生长法, 以 1-硫代甘油为稳定剂, 在水相溶液中制备了 HgTe 核量子点。然后, 在 HgTe 核量子点外先生长一层 CdS, 再进一步以 HgTe/CdS 为核量子点, 在其表面外延生长一层具有更宽带隙(3.68 eV) 的 ZnS, 合成了具有稳定近红外发光的 HgTe/CdS/ZnS 多壳层包覆量子点。采用透射电子显微镜、X 射线衍射仪、紫外-可见-近红外分光光度计及飞秒激光振荡器等对 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点的性质和结构进行表征, 研究了时间、温度和 pH 值等外界因素对其发光光谱的影响。

2 实 验

2.1 试剂及仪器

高氯酸汞($\text{Hg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, >99%) 购于 Strem Chemicals 公司。碲粉(Te, 99.99%)、1-硫代甘油(1-thioglycerol, 95%)、谷胱甘肽(GSH, 98%)、硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.99%)、硫脲(thiourea, 99%) 购于 Aladdin 公司。高氯酸镉

($\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.999%) 购于 Alfa Aesar 公司。氢氧化钠(NaOH, >96%)、稀硫酸(H_2SO_4 , 0.5 mol/L)、异丙醇(2-propanol, >99.7%)、无水乙醇购于天津市大茂化学试剂厂。IR-125 染料购于森泉科技有限公司。实验用水为去离子水。

美国 Perkin Elmer Lambda 950 紫外-可见-近红外分光光度计用于吸收光谱的测量。美国 Mai Tai 一体式钛宝石飞秒激光振荡器测量量子点发光光谱。日本电子 200 kV JEM-2010(HR) 透射电子显微镜用于表征发光量子点的粒径与形貌。荷兰 Panalytical 公司 Empyrean(锐影) X 射线衍射仪用于测定晶格结构。

2.2 HgTe 核量子点的制备

取 0.453 5 g(1.00 mmol) 的 $\text{Hg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 溶于 120 mL 去离子水中, 在不断搅拌下加入 0.264 mL(3.05 mmol) 1-thioglycerol, 并以浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 10.2。将溶液倒入一个 250 mL 三口烧瓶中, 通氮气 30 min。在不断搅拌下, 向上述溶液中通入 H_2Te 气体, 其中 H_2Te 气体是由 Te 棒(由 Te 粉高温煅烧而成) 与浓度为 0.5 mol/L 的 H_2SO_4 电化学反应制成^[24]。将溶液置于常温(25 °C) 下 1 h, 即合成了未加热回流的 HgTe 量子点。取 40 mL 上述合成的 HgTe 量子点溶液, 逐滴加入 2-propanol 至浑浊, 离心收集 HgTe 沉淀颗粒。将沉淀颗粒用无水乙醇超声清洗一次并离心, 再用去离子水清洗一次并离心收集, 最后将 HgTe 沉淀颗粒重新溶于 2 mL 去离子水中用作下一步合成。

2.3 HgTe/CdS 核/壳量子点的制备

称取 0.167 8 g(0.4 mmol) $\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.245 9 g(0.8 mmol) GSH 溶于 100 mL 去离子水中, 搅拌并用浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 7.0。然后, 加入上述清洗干净的 HgTe 量子点 2 mL, 并加入 0.030 4 g(0.4 mmol) 硫脲, 再次以浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 值调节至 11.0。保证混合溶液中 Cd^{2+} /thiourea/GSH 的比例为 1:1:2。混合溶液于 90 °C 下加热回流 5 min 取样, 并将样品溶液迅速取出置于 0 °C 冰浴中冷却, 即合成了 HgTe/CdS 量子点。取 20 mL 上述合成的 HgTe/CdS 量子点用 2-propanol 沉淀后离心, 再用无水乙醇和去离子水各清洗一次。最后, 将 HgTe/CdS 沉淀颗粒重新溶于 2 mL 去离子水中用作下一步合成。

2.4 HgTe/CdS/ZnS 核/壳/壳量子点制备

称取 0.059 5 g (0.2 mmol) 的 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.122 9 g (0.4 mmol) GSH 溶于 50 mL 去离子水中, 搅拌并以浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 7.0。然后, 加入上述清洗干净的 HgTe/CdS 量子点 2 mL, 并加入 0.015 2 g (0.2 mmol) 硫脲, 再次以浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 值调节至 11.0。混合溶液于 90 °C 下加热回流 5 min, 分别在不同回流时间取样, 并将样品溶液迅速取出置于 0 °C 冰浴中冷却, 即得到不同发射波长的量子点。

3 结果与讨论

3.1 形貌与晶体结构

图 1 给出了 HgTe、HgTe/CdS 以及最终获得的 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点样品的透射电子显微镜 (TEM) 和对应的高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 照片。从图 1 (b)、(d)、(f) 的插图中可以明显看到晶格间距, 证实所有量子点都具有高质量的结晶。由于用的是同批 HgTe 和 HgTe/CdS 量子点溶液来分别制备 HgTe/CdS 和 HgTe/CdS/ZnS 量子点, 因此, 可以根据 HRTEM 图片结果来估计核和壳层厚度的大小, 并确定 CdS 和 ZnS 壳层的尺寸。由图可见, 纳米晶粒接近球形, 最初的裸核 HgTe 量子点的平均粒径约为 3.7 nm, 经过一次生长 CdS 壳层后平均粒径约为 4.3 nm, 在生长了 ZnS 壳层之后其平均粒径增长至 5.3 nm。基于这些结果, 可以看出量子点粒径逐步增大, 证实了量子点表面无机壳层的生长, 并可以得出内层 CdS 和外层 ZnS 的厚度分别约为 0.6 nm 和 1.0 nm。

图 2 给出了 HgTe、HgTe/CdS 和 HgTe/CdS/ZnS 量子点的粉末 X 射线衍射 (XRD) 结果。从图中可以看到, HgTe 量子点具有闪锌矿结构, 晶体的 (111)、(220) 和 (311) 面分别位于 23.87°、39.92° 和 46.67°。形成 HgTe/CdS 量子点后, 衍射峰朝着高角度有了轻微的移动, 分别平移到 24.24°、39.98° 和 46.72°, 反映了 CdS 壳层的生成。形成 HgTe/CdS/ZnS 量子点后, 衍射峰继续向着更高角度分别平移到了 24.26°、40.13° 和 47.14°, 反映了 ZnS 壳层的形成。随着量子点的生长, XRD 衍峰峰的宽度和形状几乎保持不变, 这进一步印证了壳层的形成, 因为量子点在同类

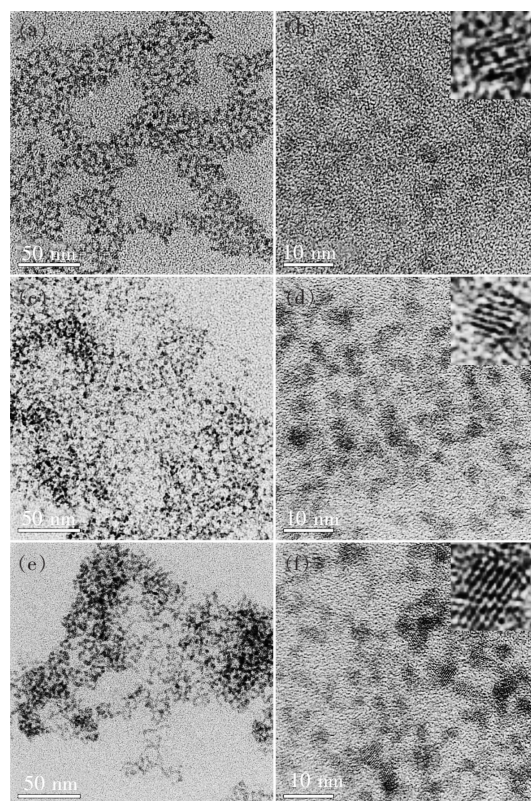


图 1 透射电镜和高分辨率透射电镜图。(a, b) HgTe 核量子点; (c, d) HgTe/CdS 核/壳量子点; (e, f) HgTe/CdS/ZnS 核/壳/壳量子点。

Fig. 1 TEM and HRTEM images of HgTe core QDs (a, b), HgTe/CdS core/shell QDs (c, d), and HgTe/CdS/ZnS core/shell/shell QDs (e, f), respectively.

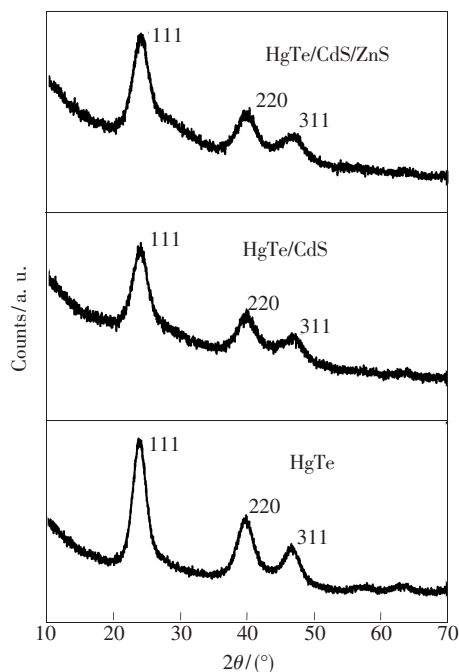


图 2 样品的 X 射线粉末衍射谱

Fig. 2 XRD patterns of the samples

硫族金属化合物包覆下引起的粒径增长会表现出较窄的 XRD 峰宽^[25]。

3.2 HgTe/CdS/ZnS 量子点的发光性质

HgTe 核量子点加入 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 前驱体溶液以及含硫溶液有可能形成 $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ 合金或者核/壳/壳结构量子点,具体合成哪种结构可以通过分析合成产物的光谱移动来判定。形成合金量子点会导致吸收光谱和发光光谱蓝移,相反,形成核/壳/壳结构量子点则会导致吸收光谱和发光光谱红移^[26]。图 3 为 HgTe、HgTe/CdS 以及 HgTe/CdS/ZnS (加热回流 4 min) 量子点的吸收光谱和发光光谱。与 HgTe 量子点相比,HgTe/CdS、HgTe/CdS/ZnS 量子点的吸收光谱和发光光谱均有明显红移,证实了 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点的形成。进一步地,我们以 IR-125 染料(在二甲亚砜溶液中量子产率为 13%)为参照测算了不同量子点的荧光量子产率^[21]。最初的 HgTe 的荧

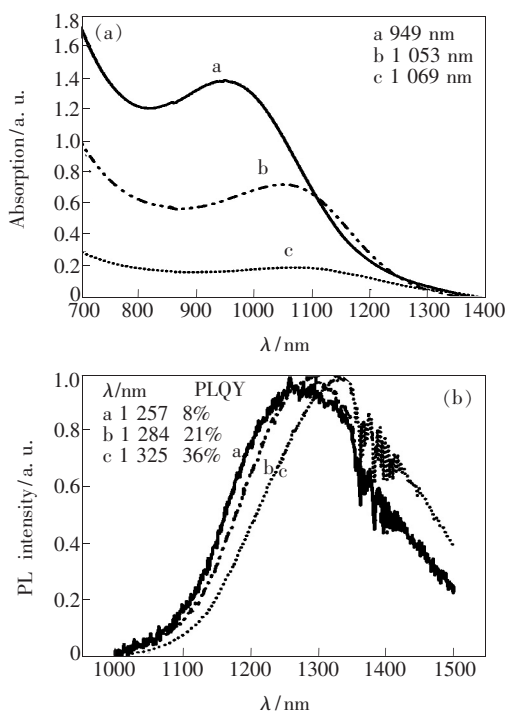


图3 HgTe、HgTe/CdS 和 HgTe/CdS/ZnS 量子点的吸收光谱(a)和发光光谱(b)。图(b)中 1 380 nm 左右的吸收谷是由吸附在样品表面的水和空气中的水蒸气的吸收造成的。

Fig. 3 Absorption spectra (a) and photoluminescence spectra (b) of HgTe, HgTe/CdS and HgTe/CdS/ZnS QDs, where the dip around 1 380 nm in (b) is caused by the absorption of the water on the surface and atmosphere.

光量子产率为 8%,生长 CdS 壳层后大幅提升到 21%,在无毒 ZnS 壳层生长之后达到了 36%。荧光量子产率的提高也表明 CdS/ZnS 多壳的生长对 HgTe 缺陷态具有很好的修饰作用。

3.3 加热回流时间对 HgTe/CdS/ZnS 量子点性能的影响

图 4 显示了加热回流时间对水相溶液中制备的 HgTe/CdS/ZnS 量子点吸收光谱和发光光谱的影响。当加热回流为 5 min 时,吸收峰从 1 034 nm 红移至 1 095 nm,发光峰从 1 284 nm 红移至 1 329 nm。量子点的荧光发射强度先增大后减小,当回流时间为 4 min 时,荧光发射最强,测算得到荧光量子产率为 36%。这表明加热回流为 4 min 时,CdS/ZnS 多壳层能最有效地减少 HgTe 量子点的表面缺陷,也表明 HgTe/CdS/ZnS 量子点的带隙和近红外发光峰位可以通过加热回流时间来调节。

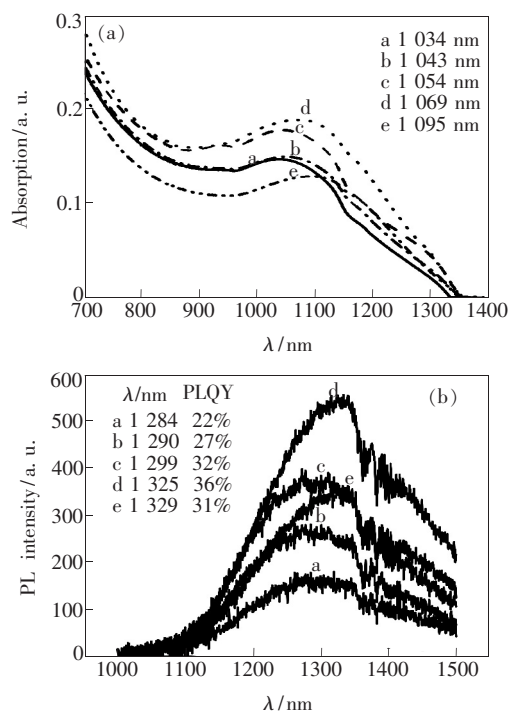


图4 加热回流时间对 HgTe/CdS/ZnS 量子点吸收谱(a)和发光光谱(b)的影响,这里 a、b、c、d 和 e 分别表示 1、2、3、4、5 min 的加热回流时间。

Fig. 4 Influence of refluxing time on the absorption spectra (a) and photoluminescence spectra (b) of HgTe/CdS/ZnS QDs, where a, b, c, d and e represent the refluxing time of 1, 2, 3, 4, 5 min, respectively.

3.4 加热回流温度对 HgTe/CdS/ZnS 量子点性能的影响

在研究加热回流温度对 HgTe/CdS/ZnS 量子

点性能的影响时,由于 HgTe/CdS/ZnS 量子点在 pH 值为 11.0 且加热 4 min 时具有最高荧光量子产率,所以设定反应时间为 4 min,反应 pH 值为 11.0。选择同一批次 HgTe/CdS 溶液进行实验(量子点溶液密度均匀)。如图 5 所示,当反应温度从 60 °C 增加到 100 °C 时,HgTe/CdS/ZnS 量子点的荧光量子产率先增大后减小;当反应温度为 90 °C 时,荧光量子产率最高。当反应温度相对较低时,反应速率小,ZnS 壳层形成率低。在 90 °C 时,ZnS 壳层生成速率最高且能最有效地减少 HgTe 量子点的表面缺陷,生成的 ZnS 壳层结晶度最好,量子点的荧光量子产率也最高。随着反应温度的提高,ZnS 壳层生成速率继续增大,但过快的生长速度反而产生了大量的表面缺陷,从而降低了荧光量子产率。

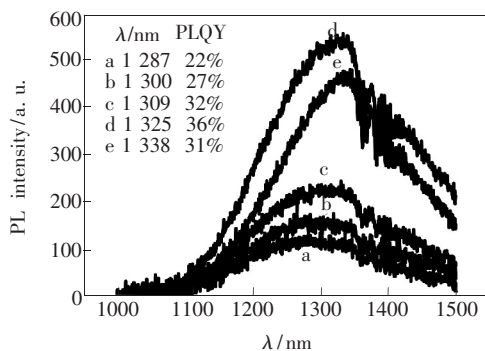


图 5 加热回流温度对 HgTe/CdS/ZnS 量子点发光特性的影响,这里 a、b、c、d 和 e 表示加热温度为 60, 70, 80, 90, 100 °C。

Fig. 5 Influence of refluxing temperature on the photoluminescence of HgTe/CdS/ZnS QDs, where a, b, c, d and e represent the reflux temperature of 60, 70, 80, 90, 100 °C, respectively.

3.5 pH 值对 HgTe/CdS/ZnS 量子点性能的影响

设定反应温度为 90 °C,反应时间为 4 min。图 6 显示了反应溶液 pH 值在 9.0 ~ 13.0 之间变化时对 HgTe/CdS/ZnS 量子点荧光发射强度的影

响。当反应溶液 pH 值为 9.0 ~ 11.0 时,HgTe/CdS/ZnS 量子点的荧光发射随着 pH 值的增大而逐步增强。当反应溶液 pH 值为 11.0 时,荧光发射强度最大,说明此时的 pH 值最适合 ZnS 壳层的生长。当反应溶液 pH 值继续增大时,HgTe/CdS/ZnS 量子点的荧光发射强度却迅速减小。根据反应溶液颜色变化推测,溶液碱性环境太强可能导致部分 HgTe/CdS 核/壳结构分离^[27],过量的 OH⁻与核/壳结构中分离出的 Hg²⁺反应产生了红色 HgO 沉淀,沉淀覆盖于 HgTe/CdS/ZnS 量子点表面,减小了量子点的荧光发射强度。

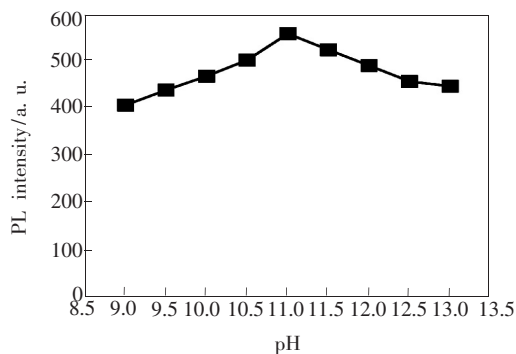


图 6 pH 值对 HgTe/CdS/ZnS 量子点荧光强度的影响
Fig. 6 Influence of pH on the fluorescence intensity of HgTe/CdS/ZnS QDs

4 结 论

利用外延生长法,分别以 HgTe 和 HgTe/CdS 为核量子点,成功地合成了具有稳定近红外发光的 HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点。该合成方法具有工艺简单、成本低廉且生产高效的优点。HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点在反应温度为 90 °C、反应溶液 pH 值为 11.0、反应加热回流时间为 4 min 时具有最高荧光量子产率(36%)。HgTe/CdS/ZnS 多壳层量子点的成功制备不仅符合绿色环保的要求,而且对进一步扩大 HgTe 近红外荧光量子点在光电器件以及生物检测等领域的应用具有重大意义。

参 考 文 献:

- [1] Mirzai H, Nordin M N, Curry R J, *et al.* The room temperature phosphine-free synthesis of near-infrared emitting HgSe quantum dots [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 2(12):2107-2111.
- [2] Keuleyan S, Kohler J, Guyot-Sionnest P. Photoluminescence of mid-infrared HgTe colloidal quantum dots [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2014, 118(5):2749-2753.

- [3] Liu S Y, Wang Y L, Yang K. Determination of copper ion by near-infrared-emitting CdSeTe quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2014, 35(2):257-262 (in Chinese).
- [4] Wang Y L, Tong Z F, Lu J P, *et al.* Synthesis and characterization of water-soluble CdHgTe alloyed quantum dots [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2011, 26(7):735-738.
- [5] Lesnyak V, Lutich A, Gaponik N, *et al.* One-pot aqueous synthesis of high quality near infrared emitting Cd_{1-x}Hg_xTe nanocrystals [J]. *J. Mater. Chem.*, 2009, 19(48):9147-9152.
- [6] Tang B, Yang F, Lin Y, *et al.* Synthesis and characterization of wavelength-tunable, water-soluble, and near-infrared-emitting CdHgTe nanorods [J]. *Chem. Mater.*, 2007, 19(6):1212-1214.
- [7] Gaponik N, Radtchenko I L, Gerstenberger M R, *et al.* Labeling of biocompatible polymer microcapsules with near-infrared emitting nanocrystals [J]. *Nano Lett.*, 2003, 3(3):369-372.
- [8] Becker C R, Hatch S D, Goschenhofer F, *et al.* Photoluminescence of HgTe/Hg_{1-x}Cd_xTe superlattices and a study of minibands [J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 75(11):115115-1-5.
- [9] Shi G W, Zhang X, Zhang J P. Unobscured catadioptric infrared optical systems [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2014, 22(8):1995-2000 (in Chinese).
- [10] Tan G J, Xie J J, Zhang L M, *et al.* Recent progress in mid-infrared laser technology [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2013, 6(4):501-512 (in Chinese).
- [11] Zhou J, Fang Q Q, Wang B M, *et al.* Preparation and luminescence properties of Zn_{1-x}Mg_xO thin films by sol-gel method [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, 29(6):1036-1040 (in Chinese).
- [12] Rogach A L, Eychmuller A, Hickey S G, *et al.* Infrared-emitting colloidal nanocrystals: Synthesis, assembly, spectroscopy, and applications [J]. *Small*, 2007, 3(4):536-557.
- [13] Bruchez M, Moronne M, Gin P, *et al.* Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels [J]. *Science*, 1998, 281(25):2013-2016.
- [14] O'Connor E, O'Riordan A, Doyle H, *et al.* Near-infrared electroluminescent devices based on colloidal HgTe quantum dot arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(20):201114-1-3.
- [15] Harrison M T, Kershaw S V, Burt M G, *et al.* Colloidal nanocrystals for telecommunications. Complete coverage of the low-loss fiber windows by mercury telluride quantum dots [J]. *Pure Appl. Chem.*, 2000, 72(1):295-307.
- [16] Cai W J, Jiang L M, Yi D M, *et al.* High quality CdHgTe nanocrystals with strong near-infrared emission: Relationship between composition and cytotoxic effects [J]. *Langmuir*, 2013, 29(12):4119-4127.
- [17] Cai W B, Shin D W, Chen K, *et al.* Peptide-labeled near-infrared quantum dots for imaging tumor vasculature in living subjects [J]. *Nano Lett.*, 2006, 6(4):669-676.
- [18] Gaponik N, Radtchenko I L, Gerstenberger M R, *et al.* Labeling of biocompatible polymer microcapsules with near-infrared emitting nanocrystals [J]. *Nano Lett.*, 2003, 3(3):369-372.
- [19] Rogach A, Kershaw S, Burt M, *et al.* Colloidally prepared HgTe nanocrystals with strong room-temperature infrared luminescence [J]. *Adv. Mater.*, 1999, 11(7):552-555.
- [20] Harrison M T, Kershaw S V, Rogach A L, *et al.* Wet chemical synthesis of highly luminescent HgTe/CdS core/shell nanocrystals [J]. *Adv. Mater.*, 2000, 12(2):123-125.
- [21] Zhang W H, Yang J, Yu J S. Synthesis of stable near-infrared emitting HgTe/CdS core/shell nanocrystals using dihydroliptic acid as stabilizer [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(13):6383-6388.
- [22] Talapin D V, Mekis I, Götzinger S, *et al.* CdSe/CdS/ZnS and CdSe/ZnSe/ZnS core-shell-shell nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, 108(49):18826-18831.
- [23] Xie R G, Kolb U, Li J X, *et al.* Synthesis and characterization of highly luminescent CdSe-core CdS/Zn_{0.5}Cd_{0.5}S/ZnS multishell nanocrystals [J]. *J. Am. Chem. Soc.* 2005, 127(20):7480-7488.
- [24] Rogach A L, Franzl T, Klar T A, *et al.* Aqueous synthesis of thiol-capped CdTe nanocrystals; State-of-art [J]. *J. Phys. Chem.*, 2007, 111(40):14628-14637.
- [25] He Y, Lu H T, Sai L M, *et al.* Microwave synthesis of water-dispersed CdTe/CdS/ZnS core-shell-shell quantum dots with excellent photostability and biocompatibility [J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(18):3416-3421.
- [26] Pan D C, Wang Q, Jiang S C, *et al.* Synthesis of extremely small CdSe and highly luminescence CdSe/CdS core-shell

nanocrystals via a novel two-phase thermal approach [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(2):176-179.

- [27] Deng W, Chen G, Wang M Y, *et al.* Influences of pH and amount of precursor on the morphology of PSt/SiO₂ core-shell composite microspheres [J]. *Acta Polym. Sinica* (高分子学报), 2011, 3(3):307-312 (in Chinese).



胡军(1988 -),男,湖南郴州人,硕士研究生,2012年于湖南师范大学获得学士学位,主要从事光子纳微结构的制备工艺的研究。

E-mail: 418624628@qq.com



金崇君(1969 -),男,浙江临海人,教授,1997年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光子晶体和表面等离子在微纳结构光电子器件上应用的研究。

E-mail: jinchjun@mail.sysu.edu.cn

《发 光 学 报》

——EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-1116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org