

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2021.01.005

荧光波长可调的InP/ZnS量子点的制备及其色彩转换研究*

陈诗瑶, 陈培崎, 翁雅恋, 吴 艳, 吴朝兴, 周雄图, 张永爱**, 郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350002)

摘 要: 以三(二甲氨基)膦为磷源, 氯化铟为铟源, 采用热注射法制备波长可调的无毒InP/ZnS量子点, 研究了反应物P与In的摩尔比、ZnI₂和ZnCl₂的摩尔比以及ZnS的反应时间对合成的InP/ZnS量子点微观结构和光学性能的影响。实验结果表明, 在反应物摩尔比为 $n_{\text{P}^{3-}}:n_{\text{In}^{3+}}=5:1$ 、ZnS反应时间为60 min时, 合成的InP/ZnS量子点近似球形, 属于闪锌矿结构, 其荧光光谱在460 nm~620 nm范围内可调。蓝色、绿色、红色波段的InP/ZnS量子点的半高宽分别约为52、52、59 nm, 平均粒径分别为3.05、3.32、3.44 nm, 荧光寿命分别为59.41、61.44和68.08 ns。利用激光辅助制备绿色图形化InP/ZnS薄膜, 以蓝光OLED作为激发光源, 结合DBR微结构, 薄膜的色彩转换效率可达到20.9%, 色坐标从(0.22, 0.30)变化到(0.29, 0.63)。这些InP/ZnS量子点发光器件在照明和显示方面具有潜在的应用价值。

关键词: InP/ZnS量子点; 图形化量子点薄膜; 激光辅助; 色彩转化

中图分类号: TN873 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)01-0027-07

Study on Fabrication and Color Conversion of InP/ZnS Quantum Dots with Adjustable Fluorescence Wavelength

CHEN Shiyao, CHEN Peiqi, WENG Yalian, WU Yan, WU Chaoxing, ZHOU Xiongtu,
ZHANG Yongai*, GUO Tailiang

(School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN)

Abstract: InP/ZnS quantum dots (QDs) with excellent and nontoxic fluorescence properties were prepared by a thermal-injection method in aqueous solution, using tris (dimethylamino) phosphine as phosphine source and indium chloride as indium source. The experimental results showed that the InP/ZnS QDs with a spherical shape belong to sphalerite structure when the molar ratio of reactants was $n_{\text{P}^{3-}}:n_{\text{In}^{3+}}=5:1$ and ZnS reaction time was 60 min. The fluorescence spectra of InP/ZnS QDs was adjustable in the range of 460 nm~620 nm. The full width at half maximum (FWHM) of InP/ZnS QDs with blue, green and red band were about 52 nm, 52 nm and 59 nm, respectively, and

收稿日期:2020-10-20

* 基金项目:国家自然科学基金(61775038, 61904031); 福建省自然科学基金(2019J01221)

作者简介:陈诗瑶(1996—),女,硕士研究生,研究方向为量子点合成及色彩转换;(E-mail: 758690245@qq.com)

陈培崎(1997—),男,硕士研究生,研究方向为色彩转换及器件研究;

翁雅恋(1993—),女,博士研究生,研究方向为基于量子点的色彩转化及其显示应用研究。

** 通讯作者:张永爱(1977—),女,研究员,研究方向为量子点材料与器件。(E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn)

the average particle sizes were 3.05 nm, 3.32 nm and 3.44 nm, respectively. The fluorescence lifetime were 59.41 ns, 61.44 ns and 68.08 ns, respectively. In addition, the patterned InP/ZnS quantum dots photoresist (QDPR) film was prepared by the laser-assisted route. With the assistance of blue OLED and 5.5 pairs distributed Bragg reflector (DBR) structures, the CCE of color conversion based InP/ZnS QDPR film could reach 20.9% and the color coordinate could change from (0.22, 0.30) to (0.29, 0.63). Based on these results, InP/ZnS QDPR film is potentially useful for the fabrication of light emitting devices in the fields of lighting and display.

Key words: InP/ZnS QDs; patterned QDPR film; laser assistance; color conversion

引 言

量子点(Quantum dots, QDs),又称为半导体纳米晶体,由于尺寸小而产生量子尺寸效应、量子隧道效应、量子限域效应等,具有独特的光学和电学特性,被视为理想的发光材料,可广泛应用于发光与显示、太阳能电池、生物、传感等研究领域^[1-3]。近三十多年来,镉基量子点(例如CdS、CdSe、CdTe和合金量子点)由于具有半峰宽窄、量子产率高、荧光波长可调等光学特性,已被研究学者深入研究^[4-7]。然而,镉基量子点由于具有较高的毒性,在应用中受到限制。

磷化铟(InP)量子点作为Ⅲ-V族半导体材料,由于其毒性低、玻尔激子半径大(~14 nm)和从可见光到近红外的宽光谱覆盖,被认为是Cd基量子点的替代材料^[8-11]。对比镉基量子点,纯InP量子点具有相对较低的光致发光量子产率(Photoluminescence quantum yield, PLQY)和较差的稳定性^[9-15]。因此,研究人员在InP核表面生长了一层ZnS壳层,以提高其光学性能和稳定性。例如,Peng等人用一锅法在190℃下合成了单分散性好、粒径均匀的InP量子点,并通过生长ZnS壳层,使其PLQY达到40%,远高于InP量子点^[16]。Jeong等人利用InP核在140℃相对低温下成功地合成了InP/ZnS量子点,PLQY可达到52%^[17]。Eunseog及其团队通过函数计算和实验证据,证明了InP核上的ZnS壳钝化会显著提高其带边跃迁^[18]。此外,图形化量子点薄膜对色彩转换乃至下一代全彩显示的制造都具有重要意义。目前,研究学者利用光刻技术和喷墨打印制备了图形量子点薄膜,利用蓝光激发红、绿量子点薄膜实现色彩转换,并制备高效率、彩色化的发光器件^[19-21]。对比喷墨打印和光刻技术,激光辅助制备图形化量子点薄膜可有效解决传统方法的复杂问题,还可有效地改善量子点薄膜的任意图案化和分辨率。

1 实验部分

1.1 实验试剂

InP/ZnS量子点合成的主要试剂包括氯化铟(InCl₃, 99.999%),三(二甲胺基)膦(P[N(CH₃)₂]₃, 97%),硬脂酸锌(Zn(ST)₂, 90%),1-十八烯(1-Octadecene, ODE, 90%),1-十二硫醇(C₁₂H₂₆S, 99%),氯化锌(ZnCl₂, 98%),碘化锌(ZnI₂, 98%),油胺(Oleylamine, OLA, 80~90%),无水乙醇(C₂H₆O, AR)和甲苯(C₇H₈, AR)。

1.2 InP/ZnS量子点的制备

采用热注射法制备InP/ZnS量子点,具体工艺流程如图1所示,主要包括以下几个过程:

(1) In前驱体溶液的制备:称取0.075 2 g(0.34 mmol) InCl₃于三颈烧瓶中,然后加入0.702 24 g(2.2 mmol) ZnI₂和5 ml OLA,通入氮气搅拌30 min后,加热到140℃,并在140℃下保持1 h。

(2) P前驱体的制备:量取0.311 7 ml(1.70 mmol) P[N(CH₃)₂]₃和1.0 ml OLA放入样品瓶中,搅拌使其完全溶解。

(3) Zn-S的制备:称取1.50 g Zn(ST)₂,再加入6 ml ODE混合搅拌30 min后再注入1.05 ml C₁₂H₂₆S,继续搅拌使其混合均匀。

(4) InP/ZnS量子点的合成:三颈烧瓶内In前驱体溶液升温至200℃,迅速将P的前驱体溶液注入烧瓶内,反应20 min后,缓慢向烧瓶内注入含Zn-S的混合溶液,再升温至300℃,并在该温度下保持反应1 h,待反应结束后,用冷水将烧瓶内溶液快速冷却至室温,即可得到InP/ZnS量子点胶体溶液。

(5) InP/ZnS量子点的纯化:在得到的InP/ZnS量子点胶体溶液中加入少量甲苯溶解,后按照乙醇与甲苯-胶体溶液的体积比为3:1滴入离心管内,待静置分层后,在转速12 000 r/min下离心10 min,将

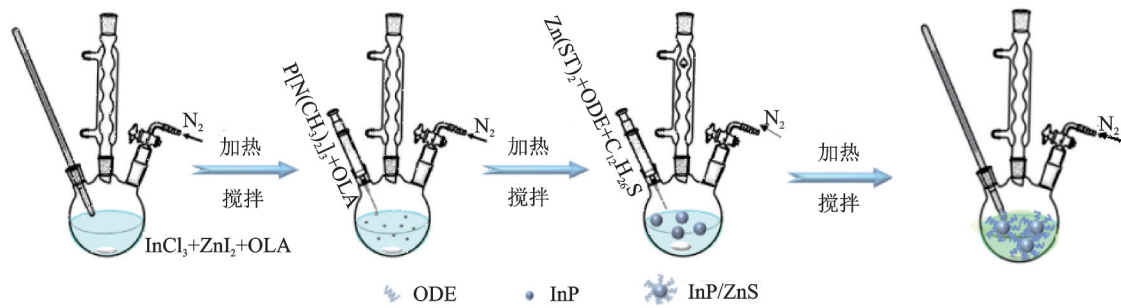


图1 InP/ZnS量子点的合成工艺流程图

Fig.1 Illustration schematic of as-synthesized InP/ZnS QDs

上清液倒出后,用甲苯溶解,即可得到干净的InP/ZnS量子点溶液。

2 结果与讨论

2.1 反应条件对InP/ZnS量子点光学性能的影响

图2(a)给出了不同P/In摩尔比的荧光光谱(PL)图,图2(b)为对应的PL峰波长变化图谱。随着P和In比值增大,其发射峰的半峰宽明显减少,当摩尔比达到5:1时,量子点的荧光性能最好。这

主要是因为 $P[N(CH_3)_2]_3$ 的中度歧化反应速度可有效地调节整个反应速度,进而能够控制量子点的尺寸分布^[22]。此外, $P[N(CH_3)_2]_3$ 也可以与卤化锌结合形成卤化胺钝化层,大大减少了量子点表面缺陷。图2(a)插图的InP/ZnS荧光图中观察到的颜色变化与PL光谱基本对应。

图2(c)为ZnS的不同反应时间下所对应的InP/ZnS量子点的PL谱图,图2(d)给出了对应的PL峰波长。在30 min到60 min的生长时间内,PL峰出现蓝移,在60 min到90 min时间内,PL峰又发生红移。因此可以通过改变ZnS生长时间调控InP/ZnS

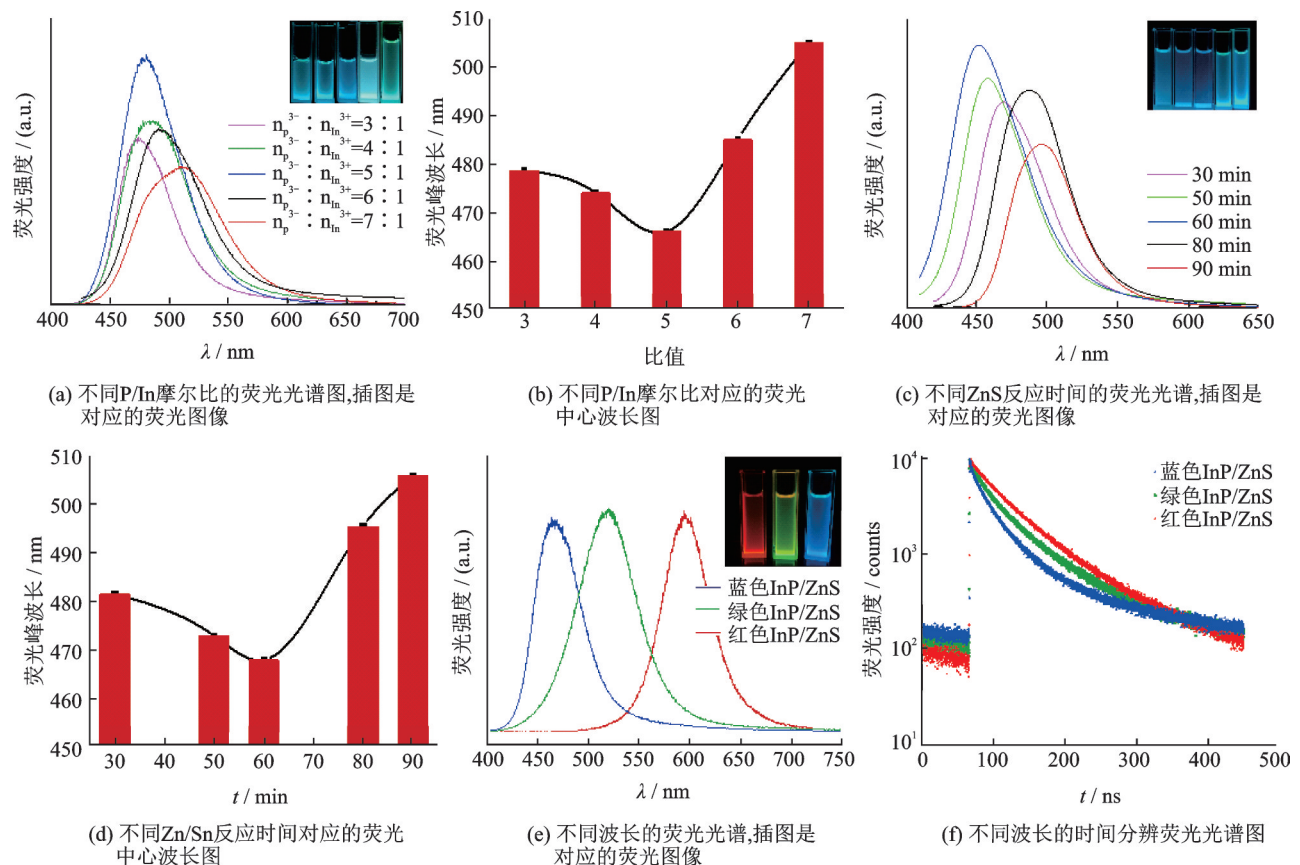


图2 InP/ZnS量子点的光学性能

Fig. 2 Optical properties of InP/ZnS QDs

量子点的荧光波长,发生这种现象的主要原因是由于硬脂酸锌分解,生成的硬脂酸对 InP 核的表面有刻蚀作用,导致 InP 核的粒径减少,进而导致光谱蓝移。60 min 后壳层生长到一定程度,导致 PL 峰红移。图 2(c)插图中 InP/ZnS 量子点的荧光图再次验证了这一结论。

不同卤素原子会影响量子点的发光性能,如 I⁻可以促进壳层的生长,减少 InP 量子点的尺寸分散。在 $n_p^{3-}:n_m^{3+} = 5:1$ 、ZnS 反应时间 60 min 的最佳反应条件下,文中通过调控 ZnI₂ 和 ZnCl₂ 的摩尔比来制备不同波长的 InP/ZnS 量子点。图 2(e)为不同颜色的 InP/ZnS 量子点的荧光光谱,图中可以看出其荧光峰波长分别为 466、559、616 nm,半高宽分别是 52.8、52、59 nm。插图是对应光谱下的荧光图,其中蓝色量子点仅添加 ZnI₂,绿色量子点中 ZnI₂ 和 ZnCl₂ 的摩尔比为 $n_{ZnI_2}:n_{ZnCl_2} = 3:1$,红色量子点则只添加 ZnCl₂。制备的量子点的荧光发射光谱主要是由带边发射组成,仅存在较弱的拖尾峰,表明量子点的发光质量较好。图 2(f)展

示了不同发射波长 InP/ZnS 量子点的荧光衰减变化。经过函数拟合后得出所制备的蓝色、绿色和红色 InP/ZnS 量子点的荧光寿命分别约为 $\tau = 59.41$ 、61.44、68.08 ns。从结果可知,量子点的尺寸越大,对应的荧光寿命越长,产生这种现象的主要原因是随着量子点粒径的增大,量子点的限域效应逐渐降低,即电子与空穴的波函数发生重叠的概率降低,辐射复合的速度降低,从而导致量子点的荧光寿命增长。

2.2 InP/ZnS 量子点的物相结构与形貌表征

图 3(a)为不同波长 InP/ZnS 量子点的 XRD 图谱。从 XRD 图中可明显地看到三个衍射峰,InP/ZnS 量子点为闪锌矿结构,蓝色 InP/ZnS 量子点对应的晶面为(111)、(220)、(311),晶格衍射峰的位置分别位于 $2\theta = 28.55^\circ$ 、 47.51° 、 56.289° 处,绿色和红色 InP/ZnS 的晶格位置依次向高角度移动,说明量子点的尺寸逐渐增大,在 InP 晶格结构中有 ZnS 衍射角,进一步证明 InP 表面被成功包覆一层 ZnS。

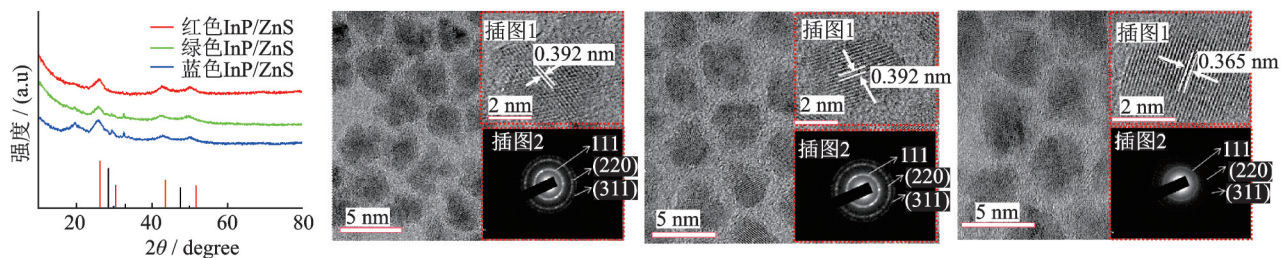


图 3 InP/ZnS 量子点的 XRD 与 HRTEM 图(插图 1 为高倍率图谱,插图 2 为选区电子衍射谱图)

Fig. 3 XRD and HRTEM of InP / ZnS quantum dots. (Inset 1 is the high-magnification pattern and Inset 2 is the selected area electron diffraction (SAED) pattern.)

图 3(b)、(c)和(d)分别是蓝色、绿色、红色 InP/ZnS 量子点的高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)形貌图。从图中可知,合成的量子点近似球形,分散性较好,没有出现团聚现象,量子点的平均粒径分别为 3.05、3.32、3.44 nm。插图 1 是不同尺寸下 InP/ZnS 量子点相邻的晶面间距,分别约为 0.392、0.392、0.358 nm,与 InP/ZnS 的(111)晶面间距基本一致,也符合 XRD 图谱的测试结果。插图 2 是对量子点的选区电子衍射花样(Selected area electron diffraction, SAED),三个圆环分别对应 InP/ZnS 的(111)、(220)、(311)三个晶面。

XPS 测试了绿色 InP/ZnS 量子点的元素表面化学性质,其中图 4(a)中 XPS 测量光谱可以明显观察到 In 3d、P 2p、Zn 2p 和 S 2p 的特征峰,此外,还发现了 O 1s 和 C 1s 的特征峰,氧和碳元素的存在表示

样品表面被污染。图 4(b)中 O 1s 可以拟合成三个峰,最低结合能在 530.80 eV,说明了 In₂O₃ 的存在,同时表示样品中可能存在少量 In(OH)₃;最高结合能在 531.3 eV,说明有 InPO_x 生成。尽管在 N₂ 环境中进行化学反应,但是仍不可能完全隔绝氧气^[23],在 InP 与 ZnS 之前存在着非晶体氧化层,虽然可以降低晶格应变,但是该界面也有可能影响壳层的沉积,进而改变量子产率^[21]。图 4(c)显示的是 In 3d 能谱,在 443.90 eV 和 451.38 eV 两个位置出现了 In 3d 的特征峰,分别对应了 In 3d_{5/2} 和 In 3d_{3/2},两个特征峰的位置相差约为 7.48 eV,这与标准的 In³⁺ 的分裂能 7.5 eV 相吻合^[24]。图 4(d)中 P 2p 的自旋轨道信号最明显的位置在 P 2p_{2/3} 为 130 eV 和 P 2p_{1/2} 为 130.9 eV,自旋轨道分裂能约为 0.9 eV,这是环境氧化导致 InPO_x 生成的结果^[25]。图 4(e)是 Zn 2p 的自旋轨道

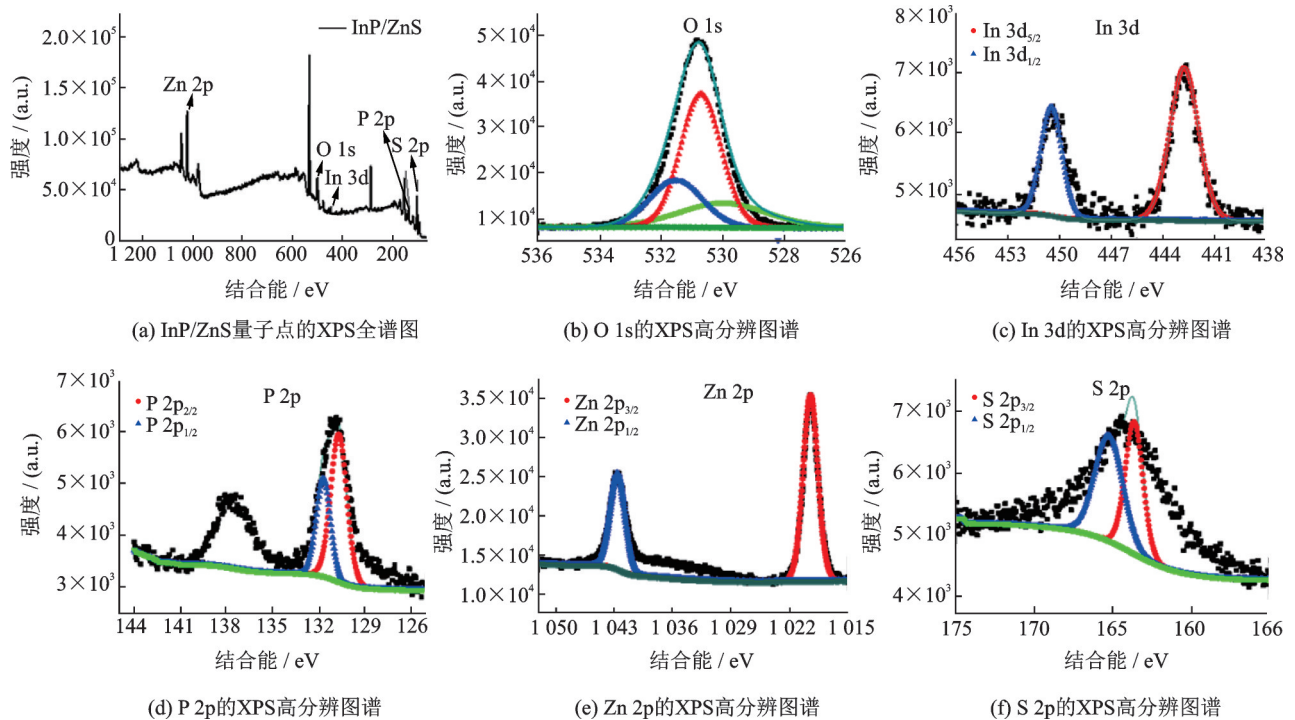


图4 InP/ZnS量子点的XPS光谱图
Fig. 4 XPS spectra of the InP/ZnS QDs

分裂图,Zn 2p_{3/2}和Zn 2p_{1/2}的特征峰出现在结合能为1 020.8 eV和1 044.7 eV的位置,且峰位相差 Δ Zn 2p=23.9 eV,与Zn²⁺的分裂能相吻合^[26]。图4(f)中S 2p的双峰位置分别为S 2p_{3/2}为161.8 eV和S 2p_{1/2}为164.0 eV,其自旋轨道分裂能约为 Δ S 2p=2.2 eV,这与Zn—S键的存在有关。

2.3 图形化InP/ZnS QDPR薄膜色彩转换研究

以绿色InP/ZnS量子点为例,将量子点溶液与光刻胶混合,通过旋涂工艺制成厚度为5.5 μ m的InP/ZnS QDPR薄膜。图5(a)和图5(b)分别展示了薄膜的荧光光谱图和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)形貌图。从图5(a)中可知,薄膜的PL峰约在540 nm,半高宽为52 nm。对比溶液和

薄膜的PL光谱,发现量子点薄膜荧光峰发生红移,吸收谱基本保持不变。主要原因是薄膜内的量子点被再吸收,发生能量转移。由图5(b)可知,绿色InP/ZnS QDPR薄膜表面均方根粗糙度为0.25 nm,表明量子点与光刻胶混合后,量子点分散均匀,没有发生团聚,且在膜的表面几乎观察不到裂纹和裂缝。

以517 nm的绿光激光器为加工光源,在激光能量 $J=20$ J/cm²,扫描速度 $v=250$ mm/s,离焦距离 $z=0.2$ mm条件下制备图形化InP/ZnS QDPR薄膜。从图5(c)的荧光图可以看出,激光辅助刻蚀出来的图形化薄膜边缘整齐,槽内基本无残留。从图5(d)的SEM图可进一步看出,刻蚀后凹槽内表面留下残渣较少,且刻蚀宽度较窄,约为23 μ m。

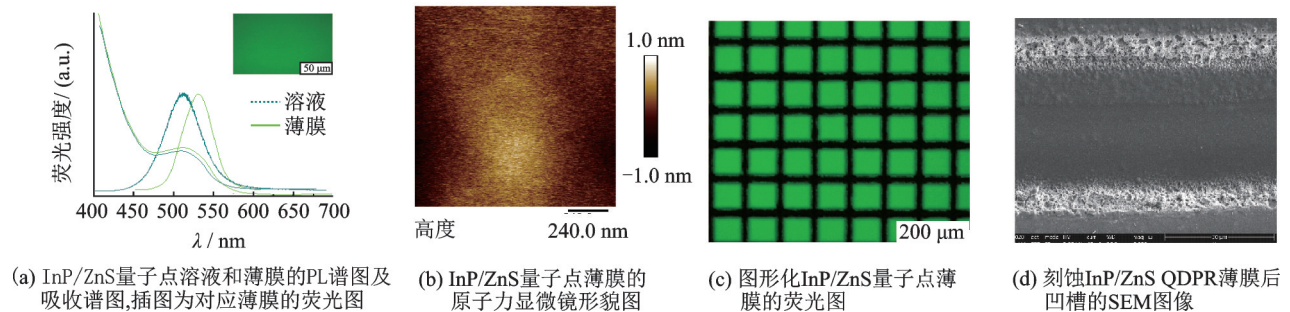


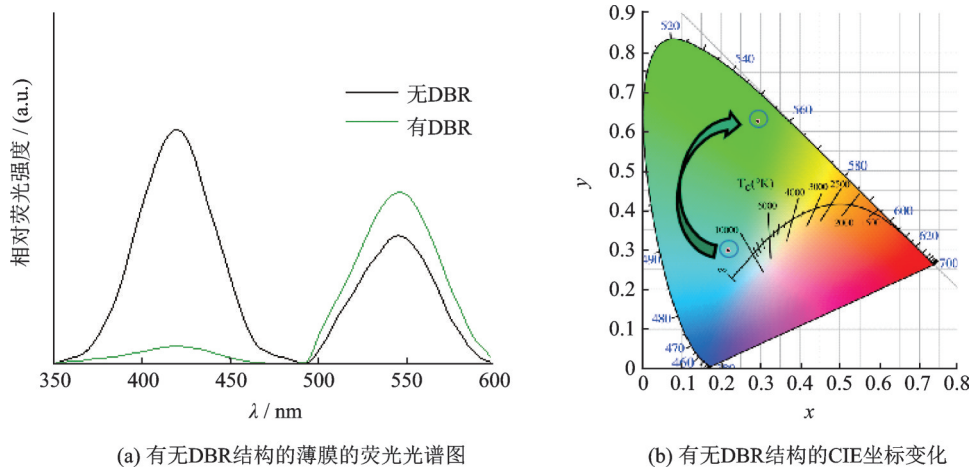
图5 InP/ZnS QDPR薄膜的性能表征
Fig.5 Characterization of InP/ZnS QDPR films

以蓝光 OLED 为激发源, 图形化 InP/ZnS QD-PR 薄膜作为色彩转换层, 结合 5.5 对 DBR 微结构, 测试图形化 InP/ZnS QDPR 薄膜对色彩转换效率的影响, 其结果如图 6(a) 所示。这里采用色彩转换效率 (Color Conversion Efficiency, CCE) 来表征蓝光激发绿色 InP/ZnS QDPR 薄膜后产生绿光的强度, 计算公式如下:

$$CCE = \frac{\int_{\text{QD-band}} \left(\frac{\lambda}{hc}\right) \times [I_{\text{em}}^{\text{QD}}(\lambda) - I_{\text{em}}^{\text{ref}}(\lambda)] d\lambda}{\int_{\text{Blue-band}} \left(\frac{\lambda}{hc}\right) \times [I_{\text{ex}}^{\text{ref}}(\lambda) - I_{\text{ex}}^{\text{QD}}(\lambda)] d\lambda} \quad (1)$$

式中, $I_{\text{em}}^{\text{QD}}(\lambda)$ 和 $I_{\text{em}}^{\text{ref}}(\lambda)$ 分别表示有量子点薄膜和没有量子点薄膜发射光的强度, $I_{\text{ex}}^{\text{QD}}(\lambda)$ 和 $I_{\text{ex}}^{\text{ref}}(\lambda)$ 分别

表示有量子点薄膜和没有量子点薄膜的蓝光激发强度。结果表明, 在 DBR 微结构辅助下, 图形化 InP/ZnS QDPR 薄膜色彩转换层的转换效率为 20.92%。对比没有 DBR 微结构 (转换效率 17.39%), 其转换效率提升了 20.3%。这主要是由于 DBR 结构能有效地反射蓝光而再次激发绿色 InP/ZnS QDPR 薄膜, 导致绿光增强, 提高色彩转换层的发光效率。由图 6(b) 的绿色 InP/ZnS 薄膜 CIE 坐标图可以看出, 样品的 CIE 坐标为 (0.22, 0.30), DBR 结构覆盖后样品的 CIE 坐标为 (0.29, 0.63), 进一步说明发射光的颜色越来越纯净。实验结果表明, 所合成的 InP/ZnS 量子点在光致发光和电致发光等光电子器件的制备中具有潜在的应用前景。



(a) 有无 DBR 结构的薄膜的荧光光谱图

(b) 有无 DBR 结构的 CIE 坐标变化

图 6 DBR 结构对 InP/ZnS QDPR 薄膜色彩转换效果的影响

Fig.6 The effect of DBR structure on the color conversion of InP/ZnS QDPR films

3 结 论

采用热注射法制备波长可调的高质量 InP/ZnS 量子点, 合成的蓝色、绿色、红色量子点平均粒径分别为 3.05、3.32 和 3.44 nm, 均属于闪锌矿结构, 荧光寿命分别为 59.41、61.44 和 68.08 ns。利用激光辅助制备边缘整齐的图形化 InP/ZnS QDPR 薄膜, 结合蓝色 OLED 和 5.5 对 DBR 结构后, InP/ZnS QDPR 薄膜的色彩转换效率可达到 20.92%, 样品 CIE 坐标从 (0.22, 0.30) 变化到 (0.29, 0.63)。实验结果表明, InP/ZnS 量子点能成为 Cd 基量子点的有力替代者, 在照明、发光与显示器件中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Michalet X, Pinaud F F, Bentolila L A, et al. Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics [J]. Science, 2005, 307(5709): 538-544.
- [2] 谢淦澈, 彭俊彪. 钙钛矿发光二极管稳定性研究进展 [J]. 光电子技术, 2019, 39(3): 145-158.
- [3] Luo Z Y, Xu D M, Wu S T. Emerging quantum-dots-enhanced LCDs [J]. J. Disp. Technol., 2014, 10(7): 526-539.
- [4] Speranskaya E S, Beloglazova N V, Lenain P, et al. Polymer-coated fluorescent CdSe-based quantum dots for application in immunoassay [J]. Biosens. Bioelectron, 2014, 53: 225-231.
- [5] 胡 鹏, 王新军, 徐志梁, 等. TBA 配体修饰 CsPbBr₃ 量子点制备及热稳定性研究 [J]. 光电子技术, 2020, 40(2): 119-124.
- [6] Chen O, Zhao J, Chauhan V P, et al. Compact high-quality CdSe-CdS core-shell nanocrystals with narrow emission linewidths and suppressed blinking [J]. Nat. Mater., 2013, 12(5): 445-451.
- [7] 宁平凡, 刘宏伟, 牛萍娟, 等. SiO₂ 钝化提高 CdSe/ZnS 量子点的发光稳定性 [J]. 发光学报, 2018, 39(2): 109-114.
- [8] Shen W, Tang H, Yang X, et al. Synthesis of highly fluorescent InP/ZnS small-core/thick-shell tetrahedral-shaped quantum dots for blue light-emitting diodes [J]. J. Mater. Chem., 2017, 5(32): 8243-8249.
- [9] And D B, Peng X. Formation of high quality InP and InAs

- nanocrystals in a noncoordinating solvent [J]. *Nano Lett.*, 2002, 2(9): 1027-1030.
- [10] Brunetti V, Chibli H, Fiammengio R, et al. InP/ZnS as a safer alternative to CdSe/ZnS core/shell quantum dots: in vitro and in vivo toxicity assessment [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(1): 307-317.
- [11] Navazi Z R, Nemati A, Akbari H, et al. The effect of fatty amine chain length on synthesis process of InP/ZnS quantum dots [J]. *Orient J. Chem.*, 2016, 32(4): 2163-2169.
- [12] Tamang S, Lincheneau C, Hermans Y, et al. Chemistry of InP nanocrystal syntheses [J]. *Chem. Mater.*, 2016, 28(8): 2491-2506.
- [13] Haubold S, Haase M, Kornowski A, et al. Strongly luminescent InP/ZnS core-shell nanoparticles [J]. *Chem. Phys. Chem.*, 2001, 2(5): 331-334.
- [14] Liu Z, Kumbhar A, Xu D, et al. Coreduction colloidal synthesis of III - V nanocrystals: the case of InP [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, 47(19): 3540-3542.
- [15] Jun K W, Khanna P K, Hong K B, et al. Synthesis of InP nanocrystals from indium chloride and sodium phosphide by solution route [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2006, 96(2-3): 494-497.
- [16] Xie R, Battaglia D, Peng X, et al. Colloidal InP nanocrystals as efficient emitters covering blue to near-infrared [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129(50): 15432-15433.
- [17] Jeong D, Seo H W, Byun Y T, et al. Influence of interface defects on the optical properties of InP/ZnS quantum dots by low temperature synthesis of InP core [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, (476): 757-760.
- [18] Cho E, Taehyung K, Seon-Myeong C, et al. Optical characteristics of the surface defects in InP colloidal quantum dots for highly efficient light-emitting applications [J]. *ACS Appl. Mater. Inter.*, 2018, 1(12): 7106-7114.
- [19] Kim H J, Shin M H, Lee J Y, et al. Realization of 95% of the Rec 2020 color gamut in a highly efficient LCD using a patterned quantum dot film [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10724.
- [20] Lin H Y, Sher C W, Hsieh D H, et al. Optical cross-talk reduction in a quantum dot-based full-color micro-light-emitting-diode display by a lithographic-fabricated photoresist mold [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 411-416.
- [21] Chen S W H, Huang Y M, Singh K J, et al. Full-color micro-LED display with high color stability using semipolar (20-21) InGaN LEDs and quantum-dot photoresist [J]. *Photon Res*, 2020, 8(5): 630-636.
- [22] Shen W, Tang H, Yang X, et al. Synthesis of highly fluorescent InP/ZnS small-core/thick-shell tetrahedral-shaped quantum dots for blue light-emitting diodes [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(32): 8243-8249.
- [23] Virieux H, Troedec M L, Crosagneux A, et al. InP/ZnS nanocrystals: Coupling NMR and XPS for fine surface and interface description [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(48): 19701-19708.
- [24] Stein J L, Holden W M, Venkatesh A, et al. Probing surface defects of InP quantum dots using phosphorus $K\alpha$ and $K\beta$ X-ray emission spectroscopy [J]. *Chem. Mater.*, 2018, 30(18): 6377-6388.
- [25] Granada-Ramirez D A, Arias-Cerón J S, Gómez-Herrera M L, et al. Effect of the indium myristate precursor concentration on the structural, optical, chemical surface, and electronic properties of InP quantum dots passivated with ZnS [J]. *J. Mater. Sci-Mater. El.*, 2019, 30(5): 4885-4894.
- [26] Xue X, Chen L, Zhao C, et al. One-pot synthesis of highly luminescent and color-tunable water-soluble Mn:ZnSe/ZnS core/shell quantum dots by microwave-assisted method [J]. *J. Mater. Sci-Mater. El.*, 2018, 29(11): 9184-9192.