

文章编号: 1000-7032(2022)04-0501-08

基于不同 ZnSe 壳层厚度的 InP/ZnSe/ZnS 量子点光电性能

陈 祥, 赵浩兵, 罗芷琪, 胡海龙, 郭太良, 李福山*

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 磷化铟(InP)量子点(QDs)由于其不含重金属元素和出色的光电特性,在量子点发光二极管(QLED)领域引起了广泛关注。本文以 ZnSe 和 ZnS 作为壳层来制备绿色 InP/ZnSe/ZnS QDs,通过调控 ZnSe 壳层的厚度得到不同发光性能的 QDs。当 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比为 1:15 时,InP/ZnSe/ZnS QDs 的荧光发射峰为 522 nm,半峰宽为 45 nm,荧光量子效率高达 86%。同时制备了基于不同 ZnSe 壳层厚度的 QLED,并利用真空蒸发的方式去除 QDs 薄膜中残留的有机溶剂,避免了高温退火对 QDs 性能的破坏,最终得到稳定工作 QLED 器件,其最佳外量子效率为 2.2%。

关键词: 磷化铟量子点; 荧光量子效率; 发光二极管

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220034

Optoelectronic Properties of InP/ZnSe/ZnS Quantum Dots with Different ZnSe Shell Layer Thicknesses

CHEN Xiang, ZHAO Hao-bing, LUO Zi-qi, HU Hai-long, GUO Tai-liang, LI Fu-shan*

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

* Corresponding Author, E-mail: fsli@fzu.edu.cn

Abstract: Indium phosphide(InP) quantum dots(QDs) have drawn much attention in quantum dots light-emitting diodes(QLED) owing to their heavy-metal-free components and outstanding optics and electricity properties. In this paper, green InP/ZnSe/ZnS QDs were prepared with ZnSe and ZnS as the shell layers, QDs with various luminescence properties obtained by regulating the thickness of the ZnSe shell layer. When the mass ratio of Se powder to Zn(St)₂ is 1:15, the PL peak of InP/ZnSe/ZnS QDs is 522 nm, the half-peak width is 45 nm and the PLQY is as high as 86%. QLED based on different thicknesses of ZnSe shell layers was prepared, the residual organic solvent in the QDs films was removed by vacuum evaporation to avoid the destruction of QDs performance by high temperature annealing, and the best EQE of 2.2% was obtained for the QLED devices.

Key words: indium phosphide quantum dots; fluorescence quantum efficiency; light emitting diode

1 引 言

胶体量子点是一种零维的半导体材料,由于其独特的光学特性,如宽的激发谱和窄的发射谱、

良好的光学稳定性以及高荧光量子效率,在发光二极管、太阳能电池及生物成像等领域都表现出了巨大的潜力,尤其在量子点发光二极管(QLED)领域的发展非常迅速^[1-5]。随着近些年

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(62075043)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(62075043)

QLED 器件结构的优化和 QDs 合成技术的改进,目前基于II-VI族元素构成的红、绿、蓝镉系 QDs 的发光二极管的最佳外量子效率 (EQEs) 已分别达到 24.1%、27.6%、21.4%^[6-7]。除此以外,钙钛矿 QDs 作为胶体半导体量子点材料领域的一颗新星,相应的 QLED 器件的最高 EQE 也超过了 20%^[8]。虽然 QLED 的研究进展非常迅速,但镉系和钙钛矿量子点均含重金属元素(即 Cd、Pb、Hg 等),重金属元素会严重破坏环境以及影响人体健康,因而限制了 QLED 进一步的开发和商业化应用^[9]。

不含重金属元素的 InP QDs 由于发射波长覆盖了大多数可见光和近红外区域,被认为是最有前途的候选者,因此 InP QDs 的研究在显示领域具有重要意义。经过近些年的研究,InP QDs 的合成工艺也取得了巨大进展。Jang 通过加入氢氟酸来蚀刻磷 InP 核表面的氧化物,减少缺陷;Shen 通过对 InP 核进行离子掺杂降低核壳间的晶格不匹配,这些都极大地提高了 InP QDs 的质量^[10-12]。但基于 InP QDs 的发光器件还需进一步研究。

本文使用热注入法,通过在合成过程中调控 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比制备出不同 ZnSe 壳层厚度的绿色 InP/ZnSe/ZnS QDs,研究了不同 ZnSe

壳层厚度对 QDs 光学性能的影响。实验结果表明当 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比为 1:15 时制备的 InP/ZnSe/ZnS QDs 性能较好,其荧光发射峰为 522nm,PLQY 高达 86%。同时改进 QLED 制备过程中的退火工艺,利用真空蒸发的方式去除 QDs 薄膜中残留的有机溶剂,最终得到基于 InP/ZnSe/ZnS 的 QLED 器件最佳 EQE 为 2.2%。

2 实 验

2.1 实验材料

实验材料:氯化铟(InCl₃, 99.999%),碘化锌(ZnI₂, 98%),油胺(Oleylamine, OLA, 80%~90%),三(二甲胺基)磷((DMA)₃P, 97%),硒粉(Se, 99.999%),1-十二硫醇(DDT, 99%),三正辛基磷(TOP, 97%),硬脂酸锌(Zn(St)₂, 90%),1-十八烯(ODE, 90%),无水乙醇(C₂H₆O, AR)和丙酮(CH₃COCH₃, 98%),PEDOT:PSS 的水溶液(15 mg/mL),TFB 的氯苯溶液(7 mg/mL),ZnMgO 纳米颗粒分散在乙醇中(25 mg/mL)。

2.2 绿色 InP/ZnSe/ZnS QDs 制备

利用高温热注入法制备 InP/ZnSe/ZnS QDs,实验流程如图 1 所示。

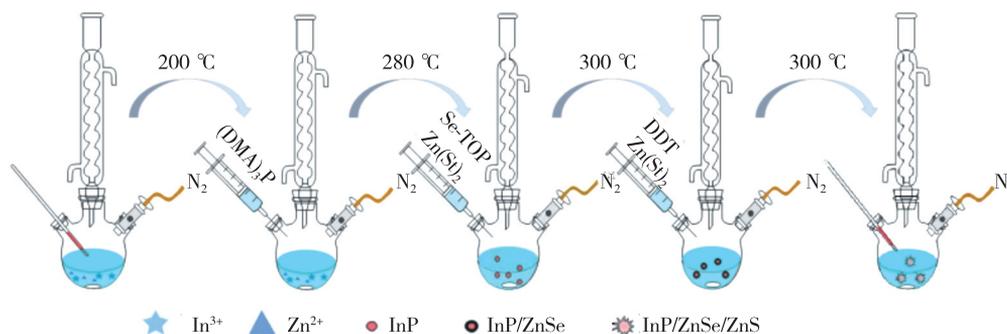


图 1 InP/ZnSe/ZnS QDs 制备工艺流程图

Fig.1 Schematic illustration of as-synthesized InP/ZnSe/ZnS QDs

2.2.1 P、Se、Zn 前驱体制备

P 前驱体:将 0.3 mL (DMA)₃P 溶解在 1 mL OLA 中,在 40 °C 下搅拌 20 min。Se 前驱体:将 0.1 g Se 粉溶解在 1 mL TOP 中,并在 40 °C 下搅拌 20 min。Zn 前驱体:将 1.5 g Zn(St)₂ 溶解在 6 mL ODE 中,并在 40 °C 下搅拌 20 min。

2.2.2 绿色 InP 核制备

将 0.34 mmol InCl₃ 和 5 mL OLA 加入三颈烧瓶中,并加入 2.2 mmol ZnCl₂ 作为反应的催化剂。

反应体系首先被抽成真空,并引入氮气,使反应体系处于无水氧环境。然后将反应体系在 140 °C 下搅拌 1 h,使 InCl₃ 和 ZnI₂ 溶解在 OLA 溶剂中,并将温度提高到 200 °C。加入磷前驱体反应 8 min 得到 InP 核。

2.2.3 绿色 InP/ZnSe QDs 制备

将 Se 前驱体加入到准备好的 InP 核溶液中,并将反应体系的温度提高到 280 °C,然后缓慢滴加 Zn 前驱体,反应进行 1 h 得到 InP/ZnSe QDs。

2.2.4 绿色 InP/ZnSe/ZnS QDs 制备

将 InP/ZnSe QDs 溶液的温度提高到 300 °C。首先加入 1.5 mL DDT, 然后再次缓慢滴加 Zn 前驱体, ZnS 壳层生长 1 h 得到 InP/ZnSe/ZnS QDs。

2.2.5 InP/ZnSe/ZnS QDs 纯化

将制备好的 InP/ZnSe/ZnS QDs 溶解在 5 mL 正辛烷中, 以 8 000 r/min 离心 5 min, 以去除大颗粒杂质。将上清液与无水乙醇以 1:3 的体积比混合, 在 11 000 r/min 下离心 8 min, 去除游离的配体。离心后加入 5 mL 正辛烷溶解沉淀, 然后加入 15 mL 丙酮, 在 11 000 r/min 下离心 8 min, 用丙酮重复离心清洗两次, 去除难以清洗的硬脂酸锌杂质。离心后将沉淀溶于正辛烷中, 得到干净的 InP/ZnSe/ZnS QDs。

2.3 QLED 器件制备

QLED 器件结构: 氧化铟锡 (ITO)/聚 3,4-乙撑二氧噻吩 (PEDOT:PSS)/聚[9,9-二辛基芴-共-N-[4-(3-甲基丙基)]-二苯基胺] (TFB)/InP QDs/ZnMgO/Ag, 如图 2 所示。ITO 玻璃基底使用前依次在异丙醇、丙酮和去离子水中超声清洗, 每次 10 min。将空穴注入层 PEDOT:PSS 和空穴传输层 TFB 以 3 000 r/min 的转速旋涂到 ITO 玻璃基底上, 时间为 50 s, 然后在 130 °C 下退火 30 min。随后, 将发光层 InP/ZnSe/ZnS QDs 和电子传输层 ZnMgO 以 2 000 r/min 的转速旋涂 50 s; 然后将样品置于真空仓中抽干表面溶剂; 最后, 在 ZnMgO 层上蒸镀出 Ag 电极得到 QLED 器件。

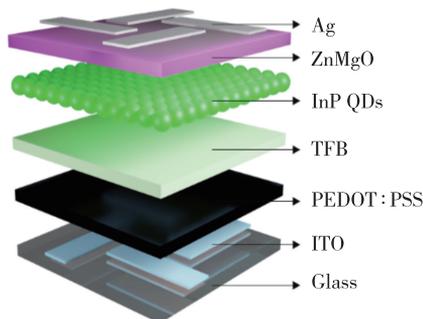


图2 QLED 器件结构图

Fig.2 Diagram of QLEDs

3 结果与讨论

3.1 ZnSe 壳层厚度对 InP QDs 光学性能的影响

ZnSe 和 ZnS 作为宽带隙的材料通常作为

QDs 的壳层, 在 QDs 壳层制备过程中, 加入过量 Zn 离子更有利于壳层的均匀生长, 减少核壳间晶格失配而产生的缺陷。本工作采取了这一策略, 在合成过程中加入了过量的 Zn(St)₂, 且保持加入的 Zn(St)₂ 量为定值。在此基础上, 通过调控 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比便可以制备不同 ZnSe 壳层厚度的 InP/ZnSe/ZnS QDs。在 Se-TOP 中加入 0, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14 g 的 Se 粉, 此时 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比分别为 0:15, 0.8:15, 1:15, 1.2:15 和 1.4:15。其中当 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比为 0:15 时, InP/ZnS QDs 的吸收光谱与荧光光谱图如图 3(a) 所示, 与图 3(b) 中 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比为 1:15 的 InP/ZnSe/ZnS QDs 相比, 半峰宽增宽了 10 nm。这是由于 ZnS 壳层和 InP 核之间的晶格失配度相对较大为 7.7%, 导致 InP 核与 ZnS 壳层间存在许多缺陷, 而 ZnSe 壳层与 InP 核之间的晶格失配度为 3.3%, 使得 InP 核与 ZnSe 壳层能形成更好的接触^[13]。图 3(b) 右上角的插图 of 溶液状态的 InP/ZnSe/ZnS QDs 在紫外灯下的荧光实物图, 该方法制备的 QDs 可以很好地分散在正辛烷、正己烷和甲苯等有机溶剂中。

通过改变 ZnSe 壳层厚度可以制备出不同荧光发射峰的 InP/ZnSe/ZnS QDs, 荧光光谱如图 3(b)、(c) 所示。当 Se 粉与 Zn(St)₂ 的质量比为 0.8:15, 1:15, 1.2:15 和 1.4:15 时, 对应的 InP/ZnSe_{0.08}/ZnS QDs、InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs、InP/ZnSe_{0.12}/ZnS QDs 和 InP/ZnSe_{0.14}/ZnS QDs 的荧光发射峰分别为 518, 522, 533, 546 nm, 在其他合成条件不变的情况下, 仅增加 Se-TOP 中 Se 粉的量, QDs 的荧光发射峰会在一定范围内逐渐红移。这是由于 ZnSe 壳层厚度的增加会导致 QDs 对电子的束缚能力越来越弱, 电子将更容易扩散到壳层中, 从而导致荧光发射峰的红移。InP/ZnSe/ZnS QDs 的吸收光谱如图 3(d) 所示, 大约在 475 nm 处出现特征峰, 与发射峰相比有一定程度的蓝移, 与斯托克斯位移中的描述一致^[14-15]。不同 ZnSe 壳层厚度的 InP/ZnSe/ZnS QDs 的荧光寿命分别为 47.2, 55.3, 62.4, 64.3 ns, 均表现出了较长的荧光寿命, 如图 3(e) 所示。我们对不同 ZnSe 壳层厚度 QDs 的荧光量子效率 (PLQY) 进行测试, Se 粉量为 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 g 时, QDs 的 PLQY 分别为 65.5%、86.2%、79.9%、58.3%; 当没有 ZnSe

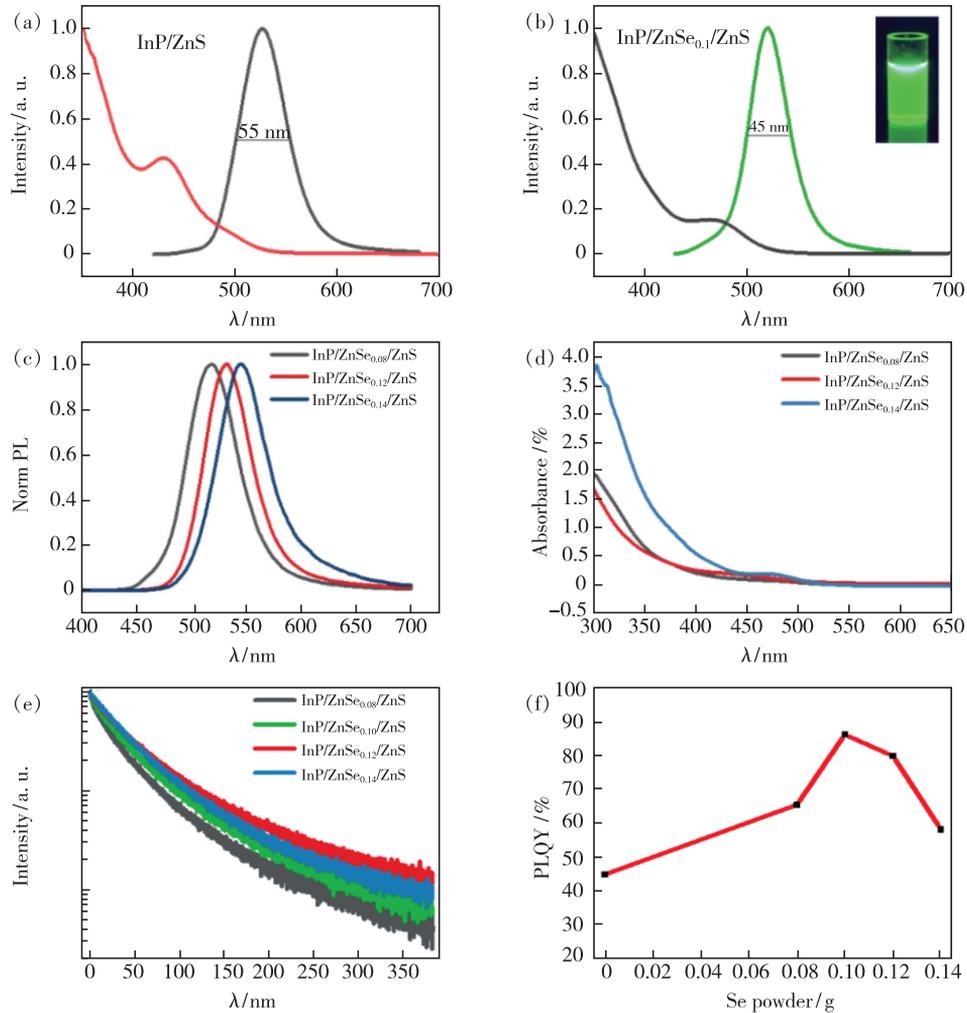


图3 InP/ZnS QDs (a) 和 InP/ZnSe/ZnS QDs (b) 的吸收光谱和荧光光谱, 插图为对应的荧光图像; 不同 ZnSe 壳层厚度的 InP/ZnSe/ZnS QDs 的荧光光谱 (c)、吸收光谱 (d)、时间分辨荧光光谱 (e) 和荧光量子效率 (f)。

Fig. 3 UV-Vis absorption and PL spectra of InP/ZnS QDs (a) and InP/ZnSe/ZnS QDs (b), the inset shows the corresponding fluorescent images. PL spectra (c), UV-Vis absorption spectra (d), time-resolved fluorescence spectra (e) and PLQY (f) of InP/ZnSe/ZnS QDs with different ZnSe shell layer thicknesses.

壳层时, QDs 的 PLQY 仅为 45%。从图中可以观察到随着 ZnSe 壳层厚度的增加, QDs 的 PLQY 呈现先增加后减小的趋势。

3.2 InP/ZnSe/ZnS QDs 结构及形貌表征

当 Se 粉与 $Zn(St)_2$ 的质量比为 1:15 时, 得到的 QDs 的荧光性能最高, 因此对 InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs 的结构和形貌进行表征。图 4 为 InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs 的 X 射线衍射图, 根据 X 射线衍射图, QDs 的 3 个衍射峰分别位于 27.47°、45.63° 和 54.09°, 分别对应于 InP QDs 闪锌矿结构的 (111)、(220) 和 (311) 平面, 证明了 InP QDs 的成功制备。使用透射电子显微镜观察制备的 QDs 形貌, 如图 5 所示。QDs 的形状类似圆形, 尺寸分布比较均匀, 没有出现团簇现象, 能很好地分散在

有机溶剂中。左上角的插图是在高分辨显微镜下 QDs 的形貌, 证明该方法制备的 QDs 结晶性良好。右下角的插图是 QDs 的粒径分布直方图, 经

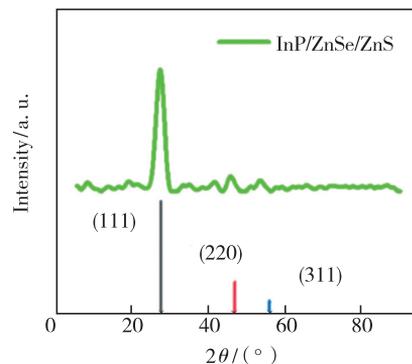


图4 InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs 的 X 射线衍射图

Fig. 4 XRD patterns of InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs

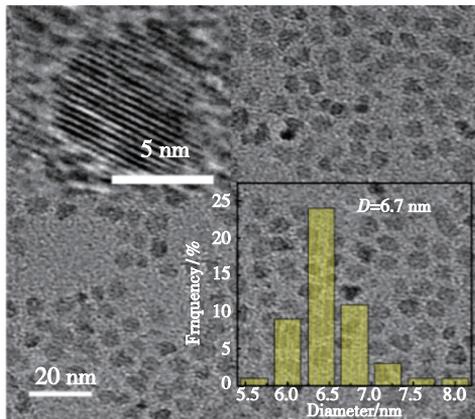


图5 InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs 在透射电子显微镜下的形貌图,左上插图为高分辨透射电子显微镜形貌图,右下为粒径分布直方图。

Fig. 5 TEM images of InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs, the upper left inset shows the HRTEM image, and the lower right inset shows the histogram of particle size distribution.

过统计测量, QDs 的平均直径约为 6.7 nm。

3.3 真空蒸发处理 InP QDs 薄膜对 QLED 器件性能的影响

在制备 QLED 器件前,我们研究了退火对 QDs 光电性能的影响。高温退火是制备 QLED 器件必要的一道工序,因为旋涂后的 QDs 薄膜内部残留难以挥发的有机溶剂,不去除会降低 QLED 器件的性能。QDs 常用的溶剂为正辛烷,其沸点为 125.6 °C,需要在高温下才能将其完全去除;但是 QDs 在较高的温度下,其表面配体会被破坏, QDs 表面的缺陷增多,导致 QDs 发光猝灭,降低 QDs 的光学性能,进而影响 QLED 器件的性能^[16-17]。虽然使用双壳层对 QDs 进行包覆已经极大地提高了 QDs 的热稳定性,但是 QDs 的性能还是会受到影响。我们利用旋涂的方式制备 InP/ZnSe/ZnS QDs 薄膜来研究其热稳定性,如图 6 左上角插图所示,将 QDs 薄膜依次在不同的温度下进行退火处理,待降温后通过测量薄膜的荧光发射强度和 PLQY 来判断 QDs 的热稳定性。图 6 分别展示了 QDs 薄膜经过 25, 50, 100, 150, 200 °C 退火处理后荧光强度的变化,可以发现 QDs 的荧光强度有较小范围内的衰减。同时还对不同温度退火的 QDs 薄膜进行 PLQY 测试,如图 7 所示,未经过处理的 QDs 薄膜的 PLQY 仅为 18.6%,与 QDs 溶液的 PLQY 相差较大。这是由于薄膜状态下 QDs 间的距离较近,相邻的 QDs 间发生荧光共

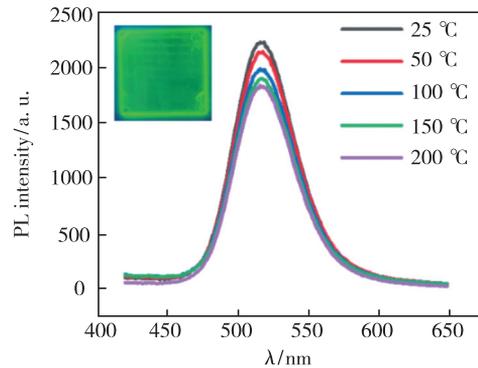


图6 InP/ZnSe/ZnS QDs 的热猝灭光谱

Fig. 6 Thermal burst spectra of InP/ZnSe/ZnS QDs

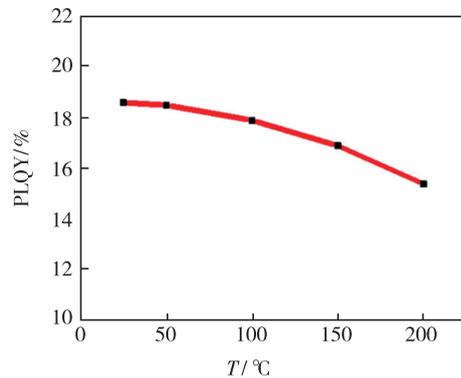


图7 经过不同退火温度处理的 QDs 薄膜的 PLQY

Fig. 7 PLQY of QDs films after annealing at different temperatures

振能量转移所导致的。较小尺寸 QDs 的激发能会转移到处于基态的较大尺寸的 QDs 上,导致 QDs 薄膜的 PLQY 大幅度下降。当退火温度较低时, QDs 薄膜的 PLQY 基本不变。使用较高温度处理后 PLQY 逐渐下降,当温度达到 200 °C 时,冷却后的 QDs 薄膜的 PLQY 仅为 15.4%。这说明高温退火的确会降低 QDs 薄膜的荧光性能。

双壳层包覆的 InP/ZnSe/ZnS QDs 与文献中报道的 QDs 相比,已经具有很好的热稳定性,但是仍然会受到热猝灭效应的影响。我们采用一种真空蒸发的方式处理旋涂后的 QDs 薄膜,在低压状态下,正辛烷的沸点降低,在室温下便能完全从 QDs 薄膜中去除,且不会对 QDs 薄膜的性能造成破坏,也能进一步提高 QLED 器件的性能。为了进一步验证,我们分别制备了 25 °C 真空蒸发和 120 °C 高温退火的对比器件。图 8 (a) 为器件的能级结构图, PEDOT: PSS 和 TFB 作为器件的空穴注入和传输层, ZnMgO 为电子传输层,电子和空穴从 Ag 阴极和 ITO 阳极在电压的作用下被传输到 QDs 层复合发光^[18-21]。图 8 (b) 是基于 InP/

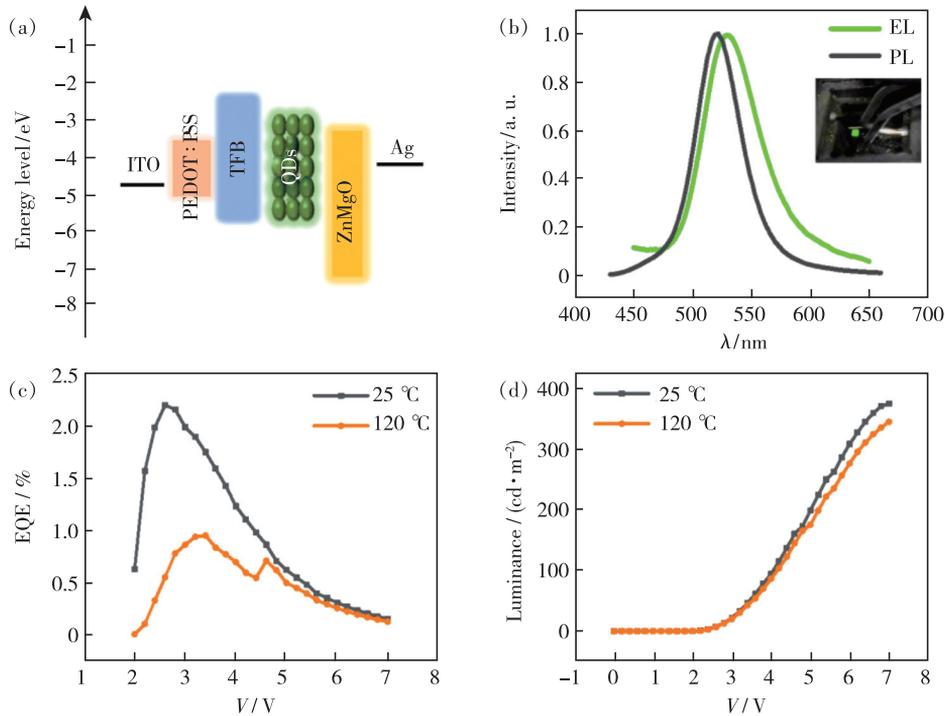


图 8 (a) QLED 器件能级图; (b) InP/ZnSe_{0.1}/ZnSQDs 器件的 EL 光谱; 25 °C 真空蒸发和 120 °C 高温退火的 QLED 器件性能: 外量子效率-电压 (c) 和亮度-电压 (d) 关系。

Fig. 8 (a) Energy level diagram for QLED devices. (b) EL spectral of QLED devices. QLED device performance with vacuum evaporation at 25 °C and high temperature annealing at 120 °C: (c) EQE *versus* current density, (d) luminance *versus* voltage.

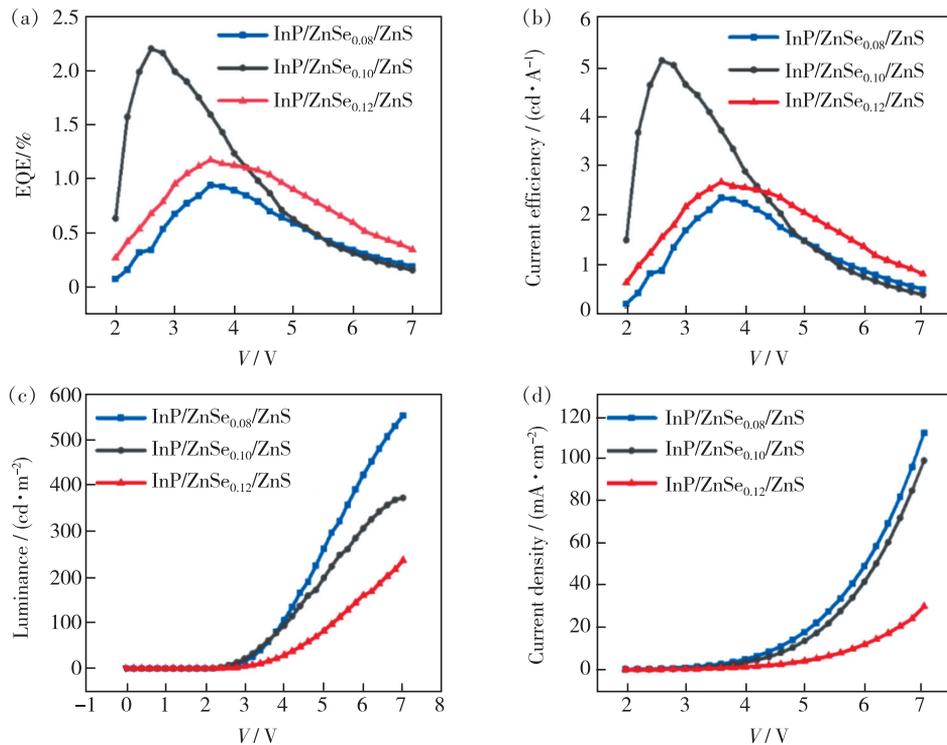


图 9 基于不同 ZnSe 壳层厚度的 InP/ZnSe/ZnS 的 QLED 器件性能。(a) 外量子效率-电压关系; (b) 电流效率-亮度关系; (c) 亮度-电压关系; (d) 电流密度-电压关系。

Fig. 9 Performance of QLED devices based on different ZnSe shell layer thicknesses. (a) EQE *versus* current density. (b) Current efficiency *versus* current density. (c) Luminance *versus* voltage. (d) Current density *versus* voltage.

ZnSe_{0.1}/ZnS QDs 器件电致发光(EL)光谱,与光致发光(PL)峰相比,EL光谱发光峰红移到529 nm,EL光谱的半峰宽为57 nm,比PL光谱的半峰宽高了12 nm。出现这种现象的原因是由于QDs薄膜中出现了荧光共振能量转移,以及在外电场的作用下发生的 Stark 效应所导致的^[22-23]。如图8(c)、(d)所示,基于真空蒸发下处理的QDs薄膜的QLED器件最大外量子效率(EQE)可以达到2.2%,在7 V电压下器件的亮度为375 cd/m²;而采用高温退火的QLED器件的最大EQE仅为0.95%,在7 V电压下器件的亮度为344 cd/m²,真空蒸发方式处理的QLED器件的EQE和亮度较高温处理的QLED器件均有一定程度的提高。这说明真空蒸发方式相比较高温退火处理InP/ZnSe/ZnS QDs薄膜在制备QLED器件时更具优势,不但提高了器件的性能,还具备安全便捷的优点。

在真空蒸发处理QLED器件的基础上,我们使用荧光量子效率较高的InP/ZnSe_{0.08}/ZnS和InP/ZnSe_{0.12}/ZnS QDs来制备QLED器件,与荧光量子效率最高的InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs器件对比。图9(a)是QLED器件EQE对比,器件的EQE与QDs的PLQY大小趋势成正比,PLQY最高的InP/ZnSe_{0.1}/ZnS QDs制备的QLED器件EQE最高为2.2%,基于InP/ZnSe_{0.12}/ZnS和InP/ZnSe_{0.08}/ZnS QDs的器件EQE分别为1.17%和0.94%。图9(b)为器件的电流效率,大小趋势与EQE曲线一致。InP/ZnSe_{0.1}/

ZnS、InP/ZnSe_{0.12}/ZnS和InP/ZnSe_{0.08}/ZnS QDs器件在7 V电压下的亮度分别为374,237,555 cd/m²,如图9(c)所示。图9(d)为QLED器件的电流密度,趋势同样与亮度曲线一致。

4 结 论

本文采用热注入法制备了InP/ZnSe/ZnS QDs,在量子点合成过程中,通过调控Se粉与Zn(St)₂的质量比可以获得不同ZnSe壳层厚度的QDs,并且Se粉与Zn(St)₂适当的比例能够使得ZnSe壳层均匀生长,使得量子点形状更加规则,减少ZnSe与ZnS壳层间的缺陷,提高量子点的荧光性能。其中当Se粉与Zn(St)₂的质量比为1:15时制备的InP/ZnSe/ZnS QDs的PLQY高达86%,发光峰为522 nm,半峰宽为45 nm。同时通过研究InP/ZnSe/ZnS QDs热猝灭效应,发现传统的高温退火会破坏量子点薄膜,进而降低QLED器件的性能;而使用真空蒸发的方式去除QDs薄膜中残留的有机溶剂,可以有效地避免高温退火对QLED器件性能的破坏。在此基础上分别制备了基于不同ZnSe壳层厚度QDs的器件,最终得到QLED器件的最大EQE为2.2%。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220034>.

参 考 文 献:

- [1] KIM T, KIM K H, KIM S, *et al.* Efficient and stable blue quantum dot light-emitting diode [J]. *Nature*, 2020, 586(7829):385-389.
- [2] CORREA-BAENA J P, ABATE A, SALIBA M, *et al.* The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2017, 10(3):710-727.
- [3] LIU Y, ZHENG Y H, ZHU Y B, *et al.* Unclonable perovskite fluorescent dots with fingerprint pattern for multilevel anti-counterfeiting [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(35):39649-39656.
- [4] SHEN H B, GAO Q, ZHANG Y B, *et al.* Visible quantum dot light-emitting diodes with simultaneous high brightness and efficiency [J]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(3):192-197.
- [5] 湛志华, 陈莞而, 莫大幸, 等. 单激发双发射近红外荧光碳量子点制备、荧光性能与细胞成像 [J]. *发光学报*, 2021, 42(8):1307-1313.
ZHAN Z H, CHEN C E, MO D X, *et al.* Preparation, fluorescent properties and cell imaging of near infrared fluorescent carbon quantum dots with single excited double emission [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(8):1307-1313. (in Chinese)
- [6] WON Y H, CHO O, KIM T, *et al.* Highly efficient and stable InP/ZnSe/ZnS quantum dot light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2019, 575(7784):634-638.
- [7] CAO F, WANG S, WANG F J, *et al.* A layer-by-layer growth strategy for large-size InP/ZnSe/ZnS core-shell quantum dots

- enabling high-efficiency light-emitting diodes [J]. *Chem. Mater.*, 2018,30(21):8002-8007.
- [8] PENG X D, YAN C, CHUN F J, *et al.* A review of low-dimensional metal halide perovskites for blue light emitting diodes [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021,883:160727.
- [9] XIAO Z X, PENG M, MEI Y C, *et al.* Effect of organosilicone and mineral silicon fertilizers on chemical forms of cadmium and lead in soil and their accumulation in rice [J]. *Environ. Pollut.*, 2021,283:117107.
- [10] KIM T G, ZHEREBETSKYY D, BEKENSTEIN Y, *et al.* Trap passivation in indium-based quantum dots through surface fluorination; mechanism and applications [J]. *ACS Nano*, 2018,12(11):11529-11540.
- [11] ZHANG H, MA X Y, LIN Q L, *et al.* High-brightness blue InP quantum dot-based electroluminescent devices; the role of shell thickness [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2020,11(3):960-967.
- [12] ZHANG W D, DING S H, ZHUANG W D, *et al.* InP/ZnS/ZnS core/shell blue quantum dots for efficient light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020,30(49):2005303-1-9.
- [13] WU Z H, LIU P, ZHANG W D, *et al.* Development of InP quantum dot-based light-emitting diodes [J]. *ACS Energy Lett.*, 2020,5(4):1095-1106.
- [14] WEI J X, HU Z, ZHOU W J, *et al.* Emission tuning of highly efficient quaternary Ag-Cu-Ga-Se/ZnSe quantum dots for white light-emitting diodes [J]. *J. Colloid Interface Sci.*, 2021,602:307-315.
- [15] PELAYO-CEJA J E, ZAZUETA-RAYNAUD A, LOPEZ-DELGADO R, *et al.* Anomalous Stokes shift of colloidal quantum dots and their influence on solar cell performance [J]. *Microsyst. Technol.*, 2019, doi:10.1007/s00542-019-04603-z.
- [16] 胡炼, 吴惠祯. 退火对 CdSe 量子点荧光影响的色度学研究 [J]. *发光学报*, 2015,36(6):610-616.
HU L, WU H Z. Colorimetric study of annealing effect on fluorescence performance of CdSe quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015,36(6):610-616. (in Chinese)
- [17] 陈肖慧, 袁斌, 华杰, 等. 壳层相关的 CdSe 核/壳量子点发光的热稳定性 [J]. *发光学报*, 2014,35(9):1051-1057.
CHEN X H, YUAN X, HUA J, *et al.* Shell-dependent thermal stability of CdSe core/shell quantum dot photoluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014,35(9):1051-1057. (in Chinese)
- [18] SHIN D W, SUH Y H, LEE S, *et al.* Waterproof flexible InP@ZnSeS quantum dot light-emitting diode [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020,8(6):1901362-1-7.
- [19] WANG Y C, CHEN Z J, WANG T, *et al.* Efficient structure for InP/ZnS-based electroluminescence device by embedding the emitters in the electron-dominating interface [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2020,11(5):1835-1839.
- [20] LEE T, HAHM D, KIM K, *et al.* Highly efficient and bright inverted top-emitting InP quantum dot light-emitting diodes introducing a hole-suppressing interlayer [J]. *Small*, 2019,15(50):1905162-1-7.
- [21] LI Y, HOU X Q, DAI X L, *et al.* Stoichiometry-controlled InP-based quantum dots: synthesis, photoluminescence, and electroluminescence [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019,141(16):6448-6452.
- [22] LAUFERSKY G, BRADLEY S, FRÉCAUT E, *et al.* Unraveling aminophosphine redox mechanisms for glovebox-free InP quantum dot syntheses [J]. *Nanoscale*, 2018,10(18):8752-8762.
- [23] HENS Z, MARTINS J C. A solution NMR toolbox for characterizing the surface chemistry of colloidal nanocrystals [J]. *Chem. Mater.*, 2013,25(8):1211-1221.



陈祥(1997 -),男,河南驻马店人,硕士研究生,2019年于泉州师范学院获得学士学位,主要从事磷化铟量子点合成及其发光二极管制备的研究。

E-mail: 466956846@qq.com



李福山(1978 -),男,福建莆田人,博士,研究员,博士生导师,2005年于北京大学获得博士学位,主要从事纳米光电材料与器件的研究。

E-mail: fsl@fzu.edu.cn