

镉系量子点材料的制备及其发光二极管结构优化

孟宗羿 杨尊先* 郭太良*

(福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室 福州 350108)

Cadmium-Based Quantum Dot Material Synthesis and Optimization of its Light Emitting Diode Structure

MENG Zongyi, YANG Zunxian*, GUO Tailiang*

(National & Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract Quantum dots (QDs) nanocrystals possess outstanding narrow linewidth and easy tuning of size and emission wavelength, making them a rising star in the field of nanomaterials. The application of quantum dot light emitting diodes (QLEDs) has also garnered attention from researchers. In this study, through the design of material ratios, the size and emission wavelength of CdZnS-QDs are tuned to enhance the performance of auxiliary devices in CdSe-QDs-based QLEDs. Ultimately, blue-purple CdZnS-QDs with photoluminescence wavelengths ranging from 425 to 455 nm are obtained. The use of wide bandgap CdZnS-QDs as an inorganic interlayer material in the device optimizes band alignment, exciton transfer, and interface modification for CdSe-QDs as the emitting layer in QLEDs. Through comparative experiments to explore the optimal QDs synthesis strategy and precise control of the QDs' emission peaks, well-crystalline and uniformly sized quantum dots were prepared. These CdSe-QD-based electroluminescent devices incorporated CdZnS-QDs as an intermediate layer between the emitting layer and the inorganic electron transport layer. The resulting devices demonstrated a significant improvement in brightness, increasing from 227188 cd/m² to 313775 cd/m² at a current density of 1000 mA/cm², with a maximum current efficiency of 38.1 Cd/A. This method opens up new avenues for the design of QLED structures.

Keywords Inorganic interlayer, Quantum Dot Light Emitting Diodes, CdZnS quantum dot

摘要 量子点(QDs)纳米晶体具备出众的窄半峰宽,且尺寸和发光波长易调节等优点,成为纳米材料领域的新星,而量子点电致发光二极管(QLED)的应用也随之得到研究人员的关注。文章的研究通过材料配比的设计,调节CdZnS-QDs的尺寸和发光波长,使其在CdSe-QDs基QLED中辅助器件的性能提升,最终能得到光致发光波长在425~455 nm的蓝紫色CdZnS-QDs。使用宽带隙的CdZnS-QDs作为器件的无机插入层材料,能够对CdSe-QDs作为发光层的QLED的能带匹配、激子传递和界面修饰等进行优化。通过对比实验探索最佳的QDs合成策略,精确控制QDs的发光峰位,并将得到的结晶性强且尺寸均匀的量子点制备CdSe-QDs基电致发光器件,在发光层与无机电子传输层之间插入制备的CdZnS-QDs,得到的器件在电流密度为1000 mA/cm²时,亮度从227188 cd/m²提升到313775 cd/m²,最大的电流效率达到38.1 Cd/A。该方法可以为QLED结构的设计提供新的思路。

关键词 无机插入层 量子点发光二极管 CdZnS 量子点

中图分类号: TN27 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202401014

胶体量子点将光谱可调谐性和窄发射线宽与溶液可加工性相结合,具有强大的前景。基于量子

点的QLED是当前纳米显示材料领域最受欢迎的研究热点,被认为是理想的下一代无机显示材料^[1-9]。

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家科技部重点研发计划(2023YFB3611203; 2016YFB04010503; 2016YFB0401305; 2016YFB0401103); 国家自然科学基金项目(62374032; 61574039); 福建省自然科学基金计划(2022J01078)

* 联系人: E-mail: yangzunxian@hotmail.com; gtl-fzu@yahoo.com.cn

目前 QLED 的研究方向主要是解决器件中存在的能带失配和载流子不平衡。现有的 QLED 报道大多采用 ZnO 纳米颗粒作为电子传输层 (ETLs), 其优势在于无机材料的高稳定性和高的电子迁移率, 但空穴传输材料较少使用无机化合物, 而是采用空穴迁移率较高的有机半导体。如 TFB 和 PEDOT:PSS 等有机半导体已被广泛用于高性能和高性价比的 QLED 器件中。

一般而言, ZnO 的电子迁移率远远大于有机 HTL 的空穴迁移率几个数量级, 并且器件中空穴传输层与发射层界面之间存在较大的能量注入势垒, 空穴在注入过程中容易发生在界面处发生堆积, 大大增加了非辐射的俄歇复合, 降低了器件的发光效率。而电子得益于 ZnO 的高迁移率, 和与发射层更匹配的注入势垒, 电子往往会过量注入, 载流子的不平衡加剧会严重降低器件的性能^[10-13]。因此, 设计更合适的器件结构以平衡载流子注入已经迫在眉睫。

综上所述, 新型结构的设计已经势在必行, 本文通过调节 CdZnS-QDs 的尺寸和发光波长, 得到光致发光波长在 425 ~ 455 nm 的宽带隙蓝紫色 CdZnS-QDs。使用宽带隙材料作为器件的修饰层, 能够对 CdSe-QDs 作为发光层的 QLED 的能带匹配、激子传递和界面修饰等进行优化。在增加了 CdZnS-QDs 插入层的 QLED 的性能得到了明显改善, 并且在电流密度为 1000 mA/cm² 时, 绿色的 QLED 器件具备 313775 cd/m² 的高亮度, 最大的电流效率达到 38.1 Cd/A。新颖且高效的器件结构设计方法是提高光电子器件中辐射复合效率的重要方式, 以实现高性能的 QLED 应用。

1 实验

本文使用的 CdO(99.99%)、Se 粉(99.999%)、无水醋酸锌(99.99%)、1-辛硫醇(98%)、正己烷、正辛烷等, 购买于上海阿拉丁生化科技有限公司。升华硫粉(99%), 无水乙醇以及其他有机溶剂, 均购自国药试剂公司。三正辛基磷(TOP, 90%)、1-十八烯(ODE, 90%)和油酸(OA, 90%)购自西格玛奥德里奇上海贸易有限公司(Sigma-Aldrich)。

1.1 镉系量子点的制备

阳离子前驱体的制备: 将 0.07 mmol 的 CdO、2.55 mmol 的无水醋酸锌、2.5 mL 的 OA(油酸)和

10 mL 的 ODE(1-十八烯)加入到 250 mL 的三口烧瓶中。边加热边抽真空直到约 140℃。溶液出现暴沸的现象后维持 5 min, 然后充入 N₂ 即可。

油酸锌前驱体(壳前驱体)合成: 将 10 mmol 无水醋酸锌、10 mL OA(油酸)和 10 mL ODE 置于三口烧瓶中, 边抽真空边加热到 140℃, 保持暴沸状态 5 min 后充入 N₂, 维持温度在 120℃。

Se-S-TOP: 将 2 mmol 的 Se 粉、2 mmol 的 S 粉、2 mL TOP 置于 5 mL 玻璃瓶中, 80℃ 加热搅拌, 得到澄清溶液。

S-ODE: 将 0.75 mmol 的 S 和 2 mL ODE 置于 5 mL 玻璃瓶中, 150℃ 加热搅拌, 得到澄清溶液, 维持温度在 120℃。

CdSe-QDs 合成: 阳离子前驱体持续升温到 300℃, 在 300℃ 下注入 Se-S-TOP 前驱体, 然后在 5 min 内将温度升到 320℃, 然后维持反应 12 min。进一步对量子点进行包覆注入油酸锌前驱体溶液 5 mL, 然后用微量注射泵以 2 mL/h 的速度匀速缓慢滴加 1 mL 的辛硫醇和 4 mL 的 ODE 混合前驱体 2.5 h。然后退火后降温得到量子点溶液。

CdZnS-QDs 合成: 将 0.3 mmol 的 CdO、4.5 mmol 的无水醋酸锌、2.5 mL 的 OA(油酸)和 10 mL 的 ODE(1-十八烯)加入到 250 mL 的三口烧瓶中, 持续升温到 300℃, 在 300℃ 下注入 S-ODE 前驱体, 然后在 5 min 内将温度升到 310℃, 然后维持反应 12 min。然后退火后降温得到量子点溶液。

1.2 QLED 器件的制备

QLED 器件是通过在带有氧化铟锡(ITO)电极(电阻 ≤ 10 Ω)的玻璃基板(30 mm × 30 mm)上通过溶液旋涂的方法制作的, 电极为风车状。ITO 电极与器件顶层蒸镀的风车状图案的铝电极相交的区域是发光区, 面积大约是 4 mm²。在旋涂溶液之前需要对 ITO 玻璃基板进行清洗, 先使用去离子水在超声条件下清洗 20 min, 擦干净之后依次用丙酮和异丙醇分别超声清洗 15 min 以上。在旋涂之前, 用紫外线臭氧处理干净的 ITO 基片 15 min, 可以提高基片表面的亲水性和表面功函数。将 TFB 的氯苯溶液、QDs 的辛烷溶液和 ZnO 的乙醇溶液用 0.22 μm 的 N66 有机过滤头进行过滤, PEDOT:PSS 溶液使用 0.5 mm 的水性过滤头过滤。制备器件时, 先以 4000 r/min 的速度在玻璃基底上旋涂 PEDOT:PSS 溶液, 并保持 45 s, 然后在空气条件下, 使用加

热板设置 120℃ 加热退火 25 min。然后以相同的工艺旋涂 TFB 在 PEDOT: PSS 层上, 使用加热板设置 120℃ 退火后 20 min。紧接着以 2000 r/min 的转速将量子点的辛烷溶液旋涂在 TFB 层上, 并在 80℃ 下退火 10 min。最后将电子传输层材料的 ZnO 乙醇溶液以 2000 r/min 的速度旋涂在 QDs 层上。电极采用热蒸镀的方式将 Al 蒸镀到器件上即可获得器件。单空穴器件的结构是 ITO/PEDOT: PSS/TFB/QDs/MoO_x/Al, MoO_x 是通过热蒸发的方式蒸发到器件上的; 单电子器件的结构 ITO/ZnO/QDs/ZnO/Al。所有的层都是按照上述标准器件的方法准备的。

1.3 结构的表征与器件测试

QLED 的电致发光光谱是使用光纤光谱仪 (Ocean Optics USB2000+) 获得的。使用配备有 500 W 氙灯 (Shimadzu, F4600) 的分光光度计测量 QD 溶液在己烷中的光致发光光谱。使用紫外-可见分光光度计 (Shimadzu, UV-3600) 测定量子点溶液的吸收光谱。为了观察量子点薄膜的质量和表面形态, 使用荧光显微镜 (OLYMPUS BX51) 检查量子点薄膜的荧光强度, 以检查量子点薄膜的形态和荧光。使用 Keithley 4200 半导体表征系统和 Topcon SR-3A 光谱辐射计的组合系统在氮气条件下测试 QLED 的电学特性, 包括外量子效率 (EQE)、电流效率、亮度和其他电学特性。

2 结果与讨论

量子点由于在尺寸上只有纳米级, 量子限域效应的影响导致材料的费米能级从连续的能级分裂成多个分立的能级, 因此可以通过控制量子点的尺寸和不同材料的元素配比, 对量子点的发光波长进行调控。镉系量子点包括 CdSe、CdS 和 CdTe 等常见的半导体量子点, 然而这些二元化合物的纳米晶体由于表面效应, 往往存在较多的表面缺陷, 因此已有的研究中通常加入 Zn 或者 S 填补晶体的表面缺陷, 形成合金化的 Cd_xZn_{1-x}Se_yS_{1-y} 量子点^[14], 而且通过控制不同的元素组成比例, 可以精确的控制量子点发射波长。除此之外, 量子点的波长控制也和前驱体的活性有关。ODE 和 TOP 作为最常见的溶剂, 常用 TOP 作为阴离子前驱体的载体。TOP 和 S、Se 和 Te 可以形成稳定的复合物, 有利于核的生长, 但较弱的活性并不适合核的产生, 导致量子点的核尺寸较大, 光致发光波长将会红移。为了得到小尺

寸、短波长的量子点, 非配位溶剂 ODE 也被用于阴离子前驱体的溶剂, 因为 ODE 与阴离子难以形成化学键, 在适当加热溶解后也只能得到悬浊液, 阴离子单体分散在溶液中, 可以快速和阳离子单体结合生成大量的核, 成核牺牲了大量单体和核的增多均可以使得量子点的波长蓝移, 从而使得带隙宽度增加。

图 1 为分别使用 ODE 和 TOP 成核的 CdZnS-QDs 光致发光光谱, 在相同的材料和温度配比下, 配体的区别将会导致成核颗粒大小和激发波长发生移动。其中使用 ODE 溶解硫粉作为阴离子前驱体的方法, 在发光波长上明显小于使用 TOP 合成的 QDs, 单体快速的被反应生成大量核心。当使用 TOP 生长的时候, 由于 S-TOP 发生了良好的配位, 在与阳离子重新配位的过程中需要能量释放断裂化学键, 因此导致成核较少且波长发生红移。单体的浓度在成核中不断下降, 以至于低于成核浓度的临界点, 此时进入纳米晶的生长阶段, 生长阶段单体浓度较低, 无法再生成新的纳米晶, 但量子点仍然可以继续长大。图 1 的 500~600 nm 处, 光致发光光谱存在明显的拖尾, 该范围内微弱的长波长激发来源于纳米晶体表面的阴阳离子空位缺陷^[15], 在两者中也存在明显的区别, 使用 TOP 合成的 QDs 的缺陷激发更为微弱, 这是因为 TOP 在单体重组的过程中, 会作为阴离子的表面配体吸附在纳米晶体表面, 因此能够一定程度上减少缺陷的产生。溶液中单体的浓度最终会逐渐趋向平衡浓度, 此时处在纳米晶体表面的与外界单体的一个动态平衡, 颗粒

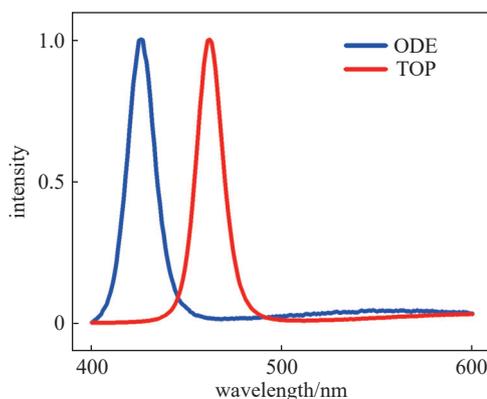


图1 成核阶段使用 ODE 和 TOP 的 CdZnS-QDs 的光致发光光谱

Fig. 1 Photoluminescence spectra of CdZnS quantum dots in the nucleation stage using ODE and TOP

不再会随着时间变化。为了更好的调控量子点的发光波长和成分比例,在量子点的元素配比中进行简单的处理就可以得到 Cd 和 Zn 的比例不同的量子点颗粒。

如图 2(a) 所示,作者探索了量子点成分对比对光致发光效果的影响,分别使用了不同的阳离子配比,这将会导致纳米晶体生长中的材料比例发生变化。在注入了 S-ODE 后,纳米晶进入快速成核阶段, Cd 与 S 的结合能较低,因此会优先结晶形成 CdS 晶体,在其外部将存在三元素共存的过度壳层,而最外表面将富含 ZnS 晶体。因此在 Zn 占比越高的情况下, QDs 的带隙将会越宽,从而使得波长发生蓝移。图 2 (a) 所示,在 Cd:Zn 为 1:7 的情况下, CdZnS-QDs 的发光波长为 452 nm。但在增加了 Zn 前驱体的占比后, QDs 的发光波长发生了位移,并

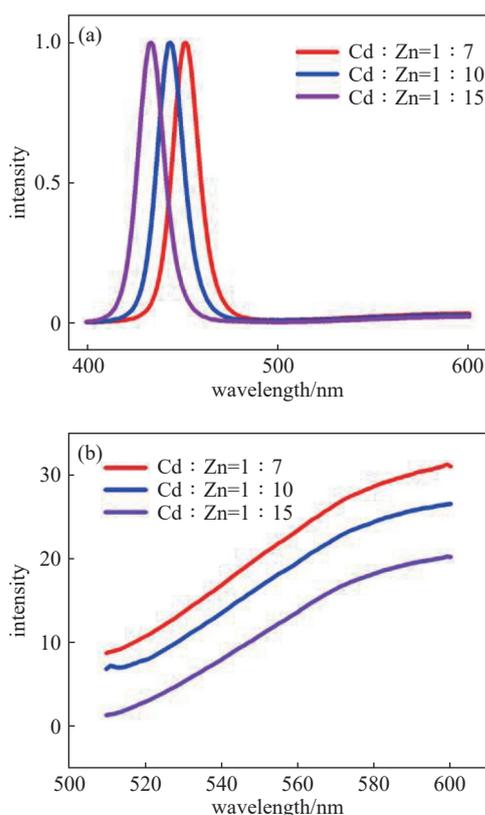


图2 CdZnS 量子点的光致发光光谱。(a)不同 Cd:Zn 配比下得到的归一化量子点的光致发光光谱,(b)放大 1000 倍下的量子点的缺陷光致发光光谱

Fig. 2 Photoluminescence spectra of CdZnS quantum dots. (a) Photoluminescence spectra of quantum dots obtained under different Cd:Zn ratios, (b) enlarge the defect photoluminescence spectrum of quantum dots under 1000 times magnification

且随着加入的 Zn 前驱体量的增多, PL 的发光峰位蓝移的越多,在 Cd:Zn 为 1:15 的时候相对移动了 18 nm。并且从实验中可以发现,在增加 Zn 元素占比的时候,也为量子点提供了表面钝化效果。如图 2 (b) 所示,作者研究了量子点的表面空位缺陷的光致发光强度受到 Zn 占比的影响。将三种配比的 QDs 的光致发光光谱归一化后,并对 500 ~ 600 nm 的缺陷发射强度放大 1000 倍,从图中明显可以看出随着 Zn 占比的提升,缺陷发射的强度在不断降低,说明高浓度的 Zn 单体,在纳米晶表面进行了额外生长,钝化了生长中的表面缺陷。

因此,本文在基于以上的研究中优化合成了两种不同的量子点,旨在探究量子点电致发光器件高效的新型结构。一方面,合成了 CdSe@ZnS 合金结构的量子点 CdSe-QDs,期望其作为 QLED 的发光层,提供亮度高且稳定的发光效果。一锅法生成的量子点核心的稳定性较差且表面的空位缺陷较多,容易出现团聚和沉淀,为了得到高质量的发光层,在 CdSe 核的基础上增长了 ZnS 外壳,无机外壳的生长可以增强量子点本身的稳定性和减少表面缺陷,最后得到了尺寸约为 14 nm,光致发光波长为 530 nm 的 CdSe-QDs,如图 3(a) 所展示。其次,合成发光波长为 433 nm 的 CdZnS-QDs,由于其宽带隙特性和较高的稳定性,被选作器件中的辅助插入层。由于能带与量子点的尺寸有重要的关系,精心设计了小尺寸的 CdZnS-QDs(约 5.25 nm),如图 3(b) 所示,以优化器件的能量注入。通过 X 射线衍射 (XRD) 分析(见图 3(c)-(d))和透射电子显微镜 (TEM) 结果, XRD 图谱中的各个晶向的峰值清晰而锐利,作者证实了两种量子点具有高度的尺寸均匀性和优良的结晶性。基于它们的形貌分析,两种量子点的颗粒大小分布均匀,且光学性能上表现出狭窄稳定的 PL 发射,这对于后续 QLED 器件的制备和分析是有利的。

为了验证宽带隙量子点作为插入层对 QLED 的性能影响,本研究设计并测试了一系列不同结构的 QLED 器件。在图 4 中展示了 QLED 器件的基本结构、顶部发射位置和能带结构的作用。CdZnS 常被用于当作 CdSe-QDs 的外壳生长,用以钝化缺陷和约束载流子的分布,但是过厚的外壳会导致量子点的电阻增大,且导电能力降低,但是 CdSe 基的 QLED 常受到电子注入过量的困扰,因此在量子点

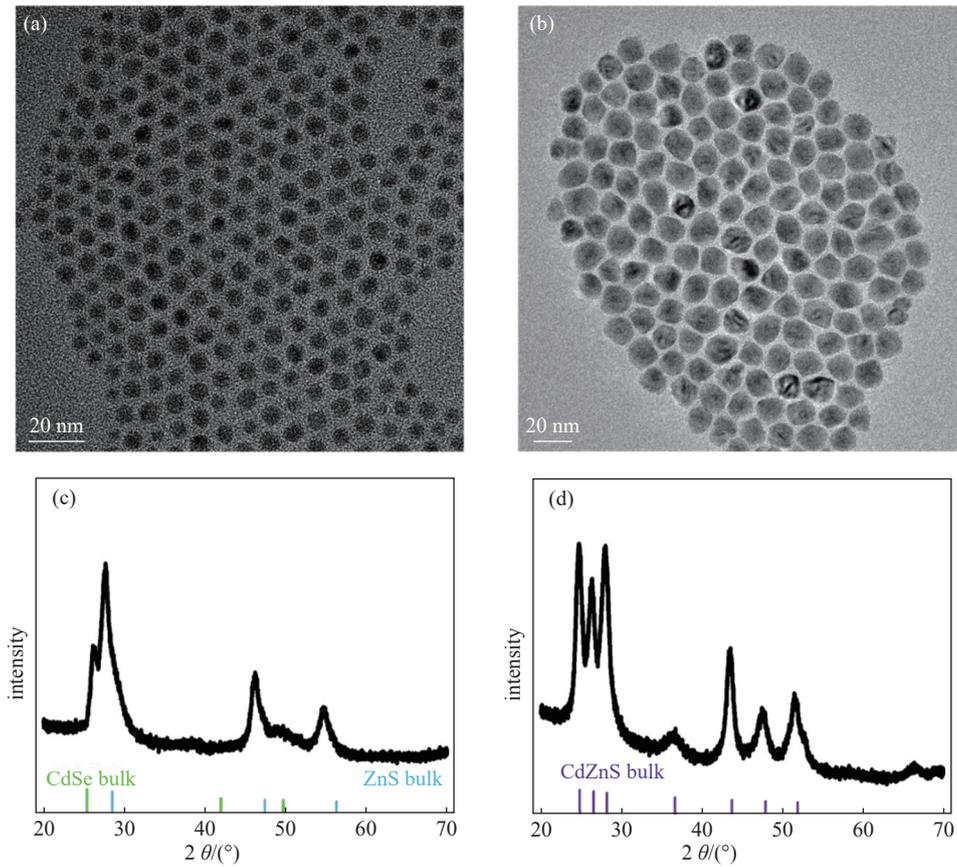


图3 CdZnS 量子点的 TEM 图像及其 XRD 图像。(a) CdZnS-QDs 的 TEM 图像, (b) CdSe-QDs 的 TEM 图像, (c) CdZnS-QDs 的 XRD 图像, (d) CdSe-QDs 的 XRD 图像

Fig. 3 TEM and XRD images of CdZnS quantum dots. (a) TEM image of CdZnS-QDs, (b) TEM image of CdSe-QDs, (c) XRD image of CdZnS-QDs, (d) XRD image of CdSe-QDs

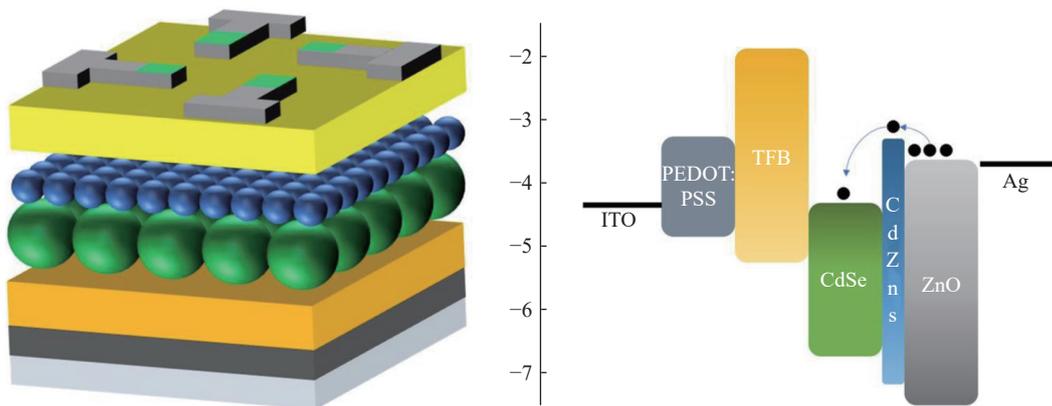


图4 量子点发光二极管的器件以及能带结构

Fig. 4 The device and energy band structure of quantum dot light-emitting diodes

发光层与电子传输层之间再增加一层 CdZnS 量子点是可行的方式,其作用等效于加厚了电子注入端的外壳,但对空穴注入不产生影响。

对这一系列 QLED 器件进行电学测试,从图 5(a)可以看出,由于 CdZnS-QDs 在其合成过程中

外壳生长较少,其表面存在较多缺陷,稳定性较差,这导致其 EL 光谱相当不稳定,与光学薄膜中的光致发光发射存在显著差异。此外,其发射强度和效率较差,最大亮度和 EQE 分别仅为 2000 cd/m^2 和 0.14%。该器件的低效表现符合设计预期。相比之

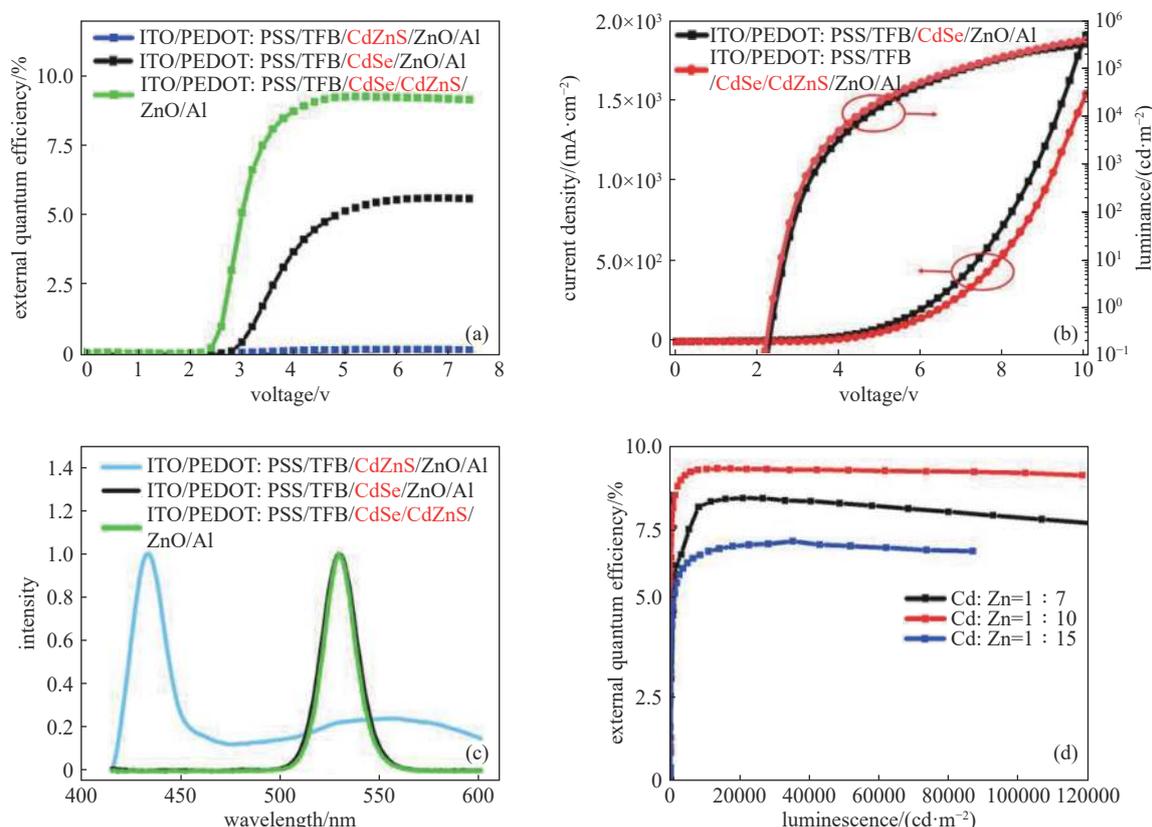


图5 不同结构的量子点发光二极管的电学性能。(a)不同结构 QLED 的外量子效率-电压曲线, (b) 不同结构 QLED 的电流-电压-亮度曲线, (c) 不同结构 QLED 的电致发光光谱, (d) 不同配比的 CdZnS-QDs 插入层 QLED 的外量子效率-亮度曲线

Fig. 5 Electrical properties of quantum dot light emitting diodes with different structures. (a) External quantum efficiency-voltage curves of QLEDs with different structures, (b) current-voltage-luminance curves of QLEDs with different structures, (c) electroluminescence spectra of QLEDs with different structures, (d) external quantum efficiency-luminance curves of QLEDs with different ratios of CdZnS-QDs insertion layers

下, 仅以 CdSe-QDs 作为发射层的 QLED, 其最大 EQE 为 5.6%, 而在将 CdZnS-QDs 插入层加入后, 最大 EQE 提升至 9.2%。从图 5(b) 中可以看出, B-QD 层的引入能显著降低电流密度, 同时导致器件 EQE 显著提升, 因此 CdZnS 插入层的加入起到了改善电子注入, 优化器件能带的效果。此外, 从图 5(c) 中可见, 对 EL 光谱的检查不存在任何蓝色波段的激发, 这暗示了 CdZnS-QDs 的插入层或许还含有其他的改进作用。综上所述, 器件间如此巨大的性能差异与插入层的加入直接相关。但是插入层起到的其他作用还存在一些疑问。

在此基础上, 为了深入理解插入层在 QLED 中的作用, 继续研究了插入层材料配比对器件性能的影响。如图 5(d) 所示, 通过在发射层和 ZnO 界面之间引入不同阳离子配比(1:7、1:10、1:15)的插入层, 可以观察到随着 Zn 占比的增加, 器件的性能发生

了显著的变化。这一结果可归因于额外加入的插入层能带结构可以阻碍电子注入, 以及电子迁移率较低。尤其当 Cd:Zn 为 1:10 时, 与不含有插入层的参考器件相比, 器件效率提高了 1.67 倍, 这表明适当的能带结构和缺陷控制, 能够调控 ZnO 和发射层之间的电荷注入, 从而提高发光效率。插入绝缘材料或者掺杂小分子材料可以降低电子电流密度, 促进载流子注入的平衡, 但在 QLED 中使用绝缘材料要求厚度要保持在 10 nm 以下, 这个工艺要求非常苛刻, 因此, 宽带隙半导体材料由于其特性, 被人们考虑用于电子阻挡层^[16]。为了验证插入层是否可以有效抑制电子, 继续制备了单电子器件, 并观察到在插入层存在下, 电子电流密度明显降低(见图 6(a)), 表明阻挡效果确实存在。

在量子点之间的距离小于 10 nm 的条件下, 激子的能量会从带隙较大的量子点流向小带隙的量

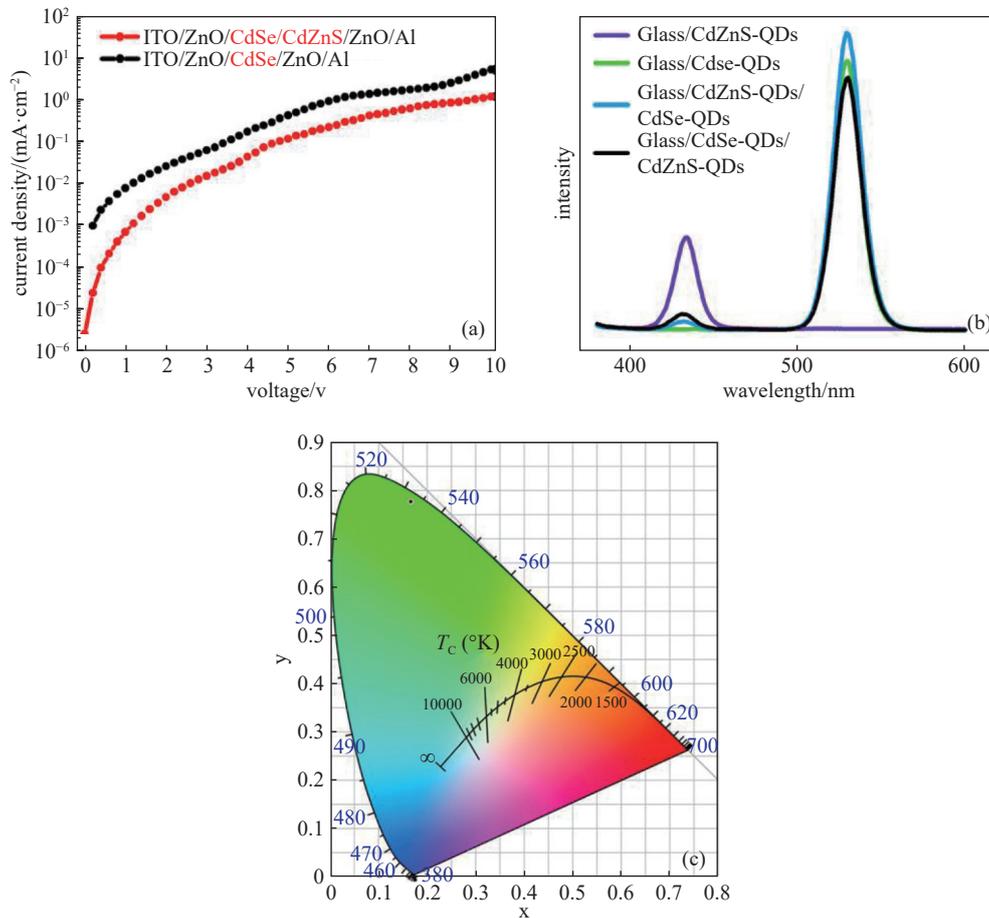


图6 器件的单电子器件及其光致发光光谱。(a)单电子器件的电流-电压曲线,(b)光学薄膜中的能量共振,(c) QLED 电致发光的 CIE 坐标位置

Fig. 6 Single electron devices of devices and their photoluminescence spectra. (a) Current-voltage curve of a single electron device, (b) energy resonance in optical thin films, (c) CIE coordinates of QLED electroluminescence positions for QLED electroluminescence

子点^[17-21]。图 6 (b) 展示了典型的量子点薄膜中的光学能量转移过程, CdZnS-QDs 是小尺寸的宽带隙量子点, 将作为供体把能量转移到颗粒较大的窄带隙 G-QD 中。在没有能量转移发生的情况下, Glass/CdZnS-QDs 和 Glass/CdSe-QDs 各自表现出纯净的 PL 发射特性。然而, 当两种量子点直接接触时, 观察到蓝色的 PL 强度显著减弱, 这一变化标志着能量传递的发生。特别是在 Glass/CdZnS-QDs/CdSe-QDs 的结构中, 在 530 nm 处观测到的 PL 强度明显高于 Glass/CdSe-QDs 结构, 并且在 433 nm 观测到了明显的 PL 衰减, 这说明了蓝色波段的能量已经被转移到绿色波段的激发当中。前文提及插入层的加入不仅降低了电流密度, 却也大大增强了器件的亮度, 并且蓝色的激发在最后完全消失, 这些证据指向了量子点薄膜之间发生的能量共振。

以上实验结果均证明了能量传递在 QLED 体系中发生的效果, 且最终观察了 QLED 发光在 CIE 当中的位置, 没有任何的蓝色波段, 保持了非常好的单色性, 因此该器件结构的设计思路有助于其他光电子器件的研究。

3 总结

综上所述, 通过非配位溶剂的更换和使用不同能带的前驱体材料配比, 可以从根本上改变量子点的带隙, 从而得到短发光波长的量子点。同时也探究了不同的材料对比对量子点的表面缺陷的影响, 证明了成核时富阳离子的表面, 能够有效的钝化缺陷, 降低缺陷发射强度。紧接着基于以上研究内容, 成功合成了高质量且波长可调的量子点, 并将其制备 QLED 应用。设计通过插入宽禁带的量子点层,

成为单侧阻挡电子的“外壳层”而不干扰空穴注入。进一步研究发现插入层除了有对电子的阻挡效果和 QLED 的能带调谐作用外,还凭借量子点薄膜之间的能量转移,能够明显的增强 QLED 的发光强度并保持良好的单色性,在 1000 mA/cm^2 的电流密度下,亮度从原先的 227188 cd/m^2 提高到 313775 cd/m^2 ,最大电流效率达到 38.1 Cd/A 。

参 考 文 献

- [1] Sun Q J, Subramanyam G, Dai L M, et al. Highly efficient quantum-dot light-emitting diodes with DNA-CTMA as a combined hole-transporting and electron-blocking layer[J]. *Acs Nano*, 2009, 3(3): 737–743
- [2] Kim J, Shim H J, Yang J W, et al. Ultrathin quantum dot display integrated with wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(38): 1700217
- [3] Sun Y Z, Wang W G, Zhang H, et al. High performance quantum dot light-emitting diodes based on Al-doped ZnO nanoparticles electron transport layer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(22): 18902–18909
- [4] Chen H, He Z Q, Zhang D D, et al. Bright quantum dot light-emitting diodes enabled by imprinted speckle image holography nanostructures[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(9): 2196–2201
- [5] Wu Z H, Liu P, Zhang W D, et al. Development of InP quantum dot-based light-emitting diodes[J]. *ACS Energy Letters*, 2020, 5(4): 1095–1106
- [6] Li X Y, Lin Q L, Song J J, et al. Quantum - dot light - emitting diodes for outdoor displays with high stability at high brightness[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 8(2): 1901145
- [7] Liu B C, Guo Y, Su Q, et al. Cadmium doped zinc sulfide shell as a hole injection springboard for red, green, and blue quantum dot light-emitting diodes[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(15): 2104488
- [8] Li B X, Lu M X, Feng J T, et al. Colloidal quantum dot hybrids: an emerging class of materials for ambient lighting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(31): 10676–10695
- [9] Bae W K, Park Y S, Lim J, et al. Controlling the influence of auger recombination on the performance of quantum-dot light-emitting diodes[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2661
- [10] Liang X Y, Bai S, Wang X, et al. Colloidal metal oxide nanocrystals as charge transporting layers for solution-processed light-emitting diodes and solar cells[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(6): 1730–1759
- [11] Sun W J, Xie L M, Guo X J, et al. Photocross-Linkable hole transport materials for inkjet-printed high-efficient quantum dot light-emitting diodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(52): 58369–58377
- [12] Feng H W, Yu Y C, Tang G, et al. Carrier transport regulation with hole transport trilayer for efficiency enhancement in quantum dot light-emitting devices[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 231: 117785
- [13] Chen F, Liu Z Y, Guan Z Y, et al. Chloride-passivated Mg-Doped ZnO nanoparticles for improving performance of cadmium-free, quantum-dot light-emitting diodes[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(9): 3704–3711
- [14] Huang Q C, Yang Z X, Zhou Y Q, et al. Effective growth strategy of colloidal quantum dots with low defects and high brightness[J]. *Optical Materials*, 2023, 138: 113628
- [15] Torres E T S, Aoki R M, Jesus J P A, et al. Synthesis and characterization of CdS/ZnS heterostructures to improve the optical properties of CdS quantum dots[J]. *Journal of Luminescence*, 2023, 257: 119706
- [16] Mude N N, Khan Y, Thuy T T, et al. Stable ZnS electron transport layer for high-performance inverted cadmium-free quantum dot light-emitting diodes[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(50): 55925–55932
- [17] Siboni H Z, Sadeghimakki B, Sivoththaman S. Very high brightness quantum dot light-emitting devices via enhanced energy transfer from a phosphorescent sensitizer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(46): 25828–25834
- [18] Santos M C D, Algar W R. Quantum dots for forster resonance energy transfer[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 125: 115819
- [19] Han Y W, Lee E J, Joo J W, et al. Photon energy transfer by quantum dots in organic–inorganic hybrid solar cells through FRET[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(27): 10444–10453
- [20] Zheng K, Židek K, Abdellah M, et al. Directed energy transfer in films of CdSe quantum dots: beyond the point dipole approximation[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(17): 6259–6268
- [21] Nguyen D, Gruebele M. Imaging and manipulating energy transfer among quantum dots at individual dot resolution[J]. *Acs Nano*, 2017, 11(6): 6328–6335