

氧化锌锡作为电子传输层的量子点发光二极管*

刘博智¹⁾ 黎瑞锋¹⁾ 宋凌云¹⁾ 胡炼¹⁾ 张兵坡¹⁾ 陈勇跃¹⁾
吴剑钟^{2)†} 毕刚²⁾ 王淼¹⁾ 吴惠桢^{1)‡}

1) (浙江大学物理学系, 杭州 310027)

2) (浙江大学城市学院, 杭州 310015)

(2013年3月30日收到; 2013年5月16日收到修改稿)

本文研究了以胶状量子点作为发光层和有机/无机混合材料作为电子-空穴传输层的电致发光二极管器件. CdSe 量子点以薄膜的形式夹在无机氧化锌锡电子传输层和有机 TPD 空穴传输层中间构成三明治结构. 氧化锌锡电子传输层采用磁控溅射实现, 有机 TPD 空穴传输层和量子点发光层则采用旋涂的方法制备, 得到的 QD-LEDs 器件结构界面陡峭、表面平整. 光电特性表征结果显示器件的电致发光具有良好的单色性、低的开启电压, 利用具有高电子迁移率和低载流子浓度的无机氧化锌锡薄膜作为电子传输层可以实现器件在大气环境下稳定、明亮的电致发光. 本文分析了器件的工作机理并通过改变氧化锌锡的电导率达到控制器件中电子和空穴的注入比的目的, 优化了器件的光电性能.

关键词: 量子点, 氧化锌锡, 电致发光, 电子传输层

PACS: 85.30.De, 85.30.Kk, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.158504

1 引言

胶体量子点 (QDs) 具有高的荧光效率、良好的单色性以及在整个可见光区域内发光波长可控等优点, 有潜力取代传统的有机或无机发光体成为下一代发光器件的核心部分. 基于量子点的发光二极管 (QD-LEDs) 可以分为以量子点作为荧光粉的下转换器件^[1]和量子点直接作为发光层的电致发光器件. 量子点作为荧光粉的下转换器件把来自衬底 LEDs 的部分高能光子转化为低能光子后混合产生白光发光. 量子点直接作为发光层的电致发光器件则类似于有机电致发光器件, 量子点以薄膜的形式夹在 p 型和 n 型半导体薄膜材料之间形成三明治结构, 电子和空穴直接注入到量子点中进行辐射复合发光^[2]. 自从 1994 年 Colvin 等人研制出第一个 QD-LEDs 以来^[3], 提高 QD-LEDs 的效率和稳定性使之能够商业化一直是人们的研究热点. Sun

等^[4]通过对量子点层厚度的优化, 使红、橙、黄和绿色的 QD-LEDs 的最强发光分别可以达到 9064, 3200, 4470 和 3700 cd/m², 然而由于使用了热稳定性不佳且暴露在氧气和水汽环境下性能容易退化有机半导体 Alq₃ 作为电子传输层, 器件的稳定性较差. Caruge 等^[5]利用全无机电子、空穴传输层提高了器件的稳定性, 然而传输层相对较高的载流子浓度引入的激子淬灭制约了器件的效率; Kwak 和 Bae 等^[6]利用反型结构并利用纳米氧化锌作为空穴传输层大大提高了发光效率和稳定性. 但是, 由磁控溅射、电子束蒸发或脉冲激光沉积等方法制造的氧化锌均为多晶薄膜稳定性有待提高.

本文的研究采用实验室自主合成的高效率 CdSe 量子点作为发光层, 分别利用氧化锌锡 (ZnSnO) 和热稳定性高的有机半导体材料 spiro-TPD [NN'-Bis(3-methylphenyl)-NN'-bis-(phenyl)-99-spiro-bifluorene] (简称为 TPD) 作为电子传输层和空穴传输层, 制备出结构为

* 国家自然科学基金 (批准号: 91021020, 61275108) 和浙江省自然科学基金 (批准号: Z610017, Z1110057) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wujianzhong@zucc.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: hzwu@zju.edu.cn

Ag/ZnSnO/QDs/TPD/ITO 的稳定高效的 QD-LEDs. 相比于利用热稳定性差且电子迁移率低 ($\sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 的有机物半导体 Alq₃ 的作为电子传输层, 利用射频磁控溅射生长的 ZnSnO 是非晶半导体薄膜 [7], 它作为电子传输层具有稳定性高、电子迁移率高和载流子浓度低等特点, 因此可以获得开启电压低、效率高和稳定性好的 QD-LEDs 器件. 我们分析了器件的工作机理并研究了不同 ZnSnO 电导率对器件的 J - V 曲线及发光效率的影响, 从而平衡了电子和空穴的注入比, 使器件的性能更加良好.

2 实验

2.1 CdSe 量子点的制备

我们采用热注入法方法合成 CdSe 胶状量子点 [8,9]. 所用试剂均购于 Alfa Aesar 公司, 所有试剂均没有另行提纯. 试剂包括: 氧化镉 (CdO9995%), 硒粉 (Se99999%), 油酸 (OA, 90%), 1-十八烯 (ODE, 90%) 三正辛基膦 (TOP, 90%), 三正辛基氧化膦 (TOPO, 90%), 十八胺 (ODA, 98%). 合成的步骤如下:

首先配置 Se 的前驱液: 在氮气氛围下, 将 0.47 g 硒粉和 5 mL 三正辛基氧化膦液的混合物进行超声得到无色 TOP-Se 的前驱液. 然后配置镉的前驱液: 取 0.1423 g 氧化镉, 11 mL 的十八烯以及 15 mL 的油酸混合在容积为 50 mL 的三口瓶中, 在氩气流下持续保持 100 °C 以上 30 min, 接着加热到 300 °C 以上形成淡黄色的澄清溶液, 得到镉的前驱液. 在三口瓶温度降至室温后, 加入 438 g 十八胺以及 145 g 三正辛基氧化膦, 继续在氩气氛围下将三口瓶加热到 300 °C. 快速地将硒的前驱液注入到三口瓶中, 反应数秒后马上将三口瓶进行水浴降温停止反应. 将反应得到的液体与丙酮以 1:3 比例混合, 在 4000 r/min 的转速下离心得到的沉淀物溶于氯仿后再次加入丙酮重复离心两次, 得到的沉淀溶于甲苯中得到表面没有多余有机残留物的高效率的 CdSe 量子点甲苯溶液. 利用上述方法合成的 CdSe 量子点, 我们已经成功地完成了微腔体中的荧光增强研究 [10] 以及实现了宽光谱发射 LED [11] 器件.

2.2 器件的制备

为了制备 QD-LEDs 器件, 我们把 ITO 衬底裁剪为 1 cm × 1 cm 的小方块, 依次经四氯化碳、丙酮、酒精、去离子水进行超声波清洗各 5 min, 用氮气吹干后进行紫外照射处理以降低 ITO 的功函数. 然后利用旋涂机把溶于氯仿中 10 mg/mL 的 TPD 溶液和溶于甲苯中 10 mg/mL 的 CdSe 量子点溶液先后旋涂到 ITO 表面分别作为空穴传输层和发光层. TPD 层和量子点层的厚度取决于溶液的浓度、溶剂的性质以及旋涂时的转速, 在制备器件时, 我们保持溶液的浓度不变通过改变旋涂时的转速来控制 TPD 层和量子点层的厚度. 由于 TPD 难溶于甲苯, 所以在旋涂量子点溶液时不会影响到 TPD 层的厚度和形貌, 因此可以同时有效的控制 TPD 层和量子点层的厚度. 接着我们利用射频磁控溅射在氩气氛围下生长 ZnSnO 电子传输层, ZnSnO 层的参数通过溅射气压、溅射功率以及生长时间控制. 最后我们利用热蒸发在低于 5×10^{-3} Pa 的气压下蒸镀 100 nm 的银电极, 用导电银浆固定金线并经 80 °C 烘烤 6 min 后对器件的性能进行测试. 器件的制备条件均为大气环境.

2.3 分析测试

器件的 SEM 图由 Hitachi S-4800 扫描电子显微镜拍摄; 电致发光谱和光致发光谱均由 Edinburgh FLS92 扩展型荧光光谱仪测试, 光致发光谱测试所用激发光源为 325 nm 氩-镉激光器; 器件所加偏压由 PS-303DM 型直流稳压电源提供, 电流大小则通过 GDM-8055 型电流计测定. 器件的光电特性均在室温和大气环境下测试.

3 结果与讨论

3.1 器件的形貌特征

图 1(a) 为器件用量子点的 SEM 表面图, 可以看出旋涂于 TPD 层表面的量子点层表面可以在较大的面积内均匀无孔洞. 我们的采用的器件结构为 Ag/ZnSnO/QDs/TPD/ITO. 图 1(b) 则展示了器件的 SEM 截面图, 从下往上依次为 160 nm 的 ITO 层, 50 nm 的 TPD 层, 25 nm 的量子点层, 130 nm 的 ZnSnO 层以及 100 nm 的 Ag 电极, 层与层之间均匀可分辨, 有效地降低了器件的漏电流从而保证了器件的性能.

3.2 器件的光电特性

图 2 为量子点的光致发光谱 (PL 谱) 和 8V 偏压时器件的电致发光谱 (EL 谱). 器件所加偏压不同时, EL 谱的形状均保持不变. 由图可以看出, 器件的 EL 谱同量子点的 PL 谱完全对应, 没有出现 TPD 或者 ZnSnO 的紫外或蓝色发光, 说明器件的发光完全来自量子点的带边发光, 表现出良好的单色性和稳定性. 同时我们观测到, 量子点的 PL 谱峰位在 583 nm, 对应的半高宽为 32 nm; 而器件的 EL 谱峰位红移到 586 nm, 对应的半高宽展宽至 39 nm. 器件的 EL 谱相对于 PL 谱出现 3 nm 峰位移动和半高宽展宽可以由电场作用下的量子限制斯塔克效应及强激子极化诱导的 LO 声子-光子耦合来解释 [12].

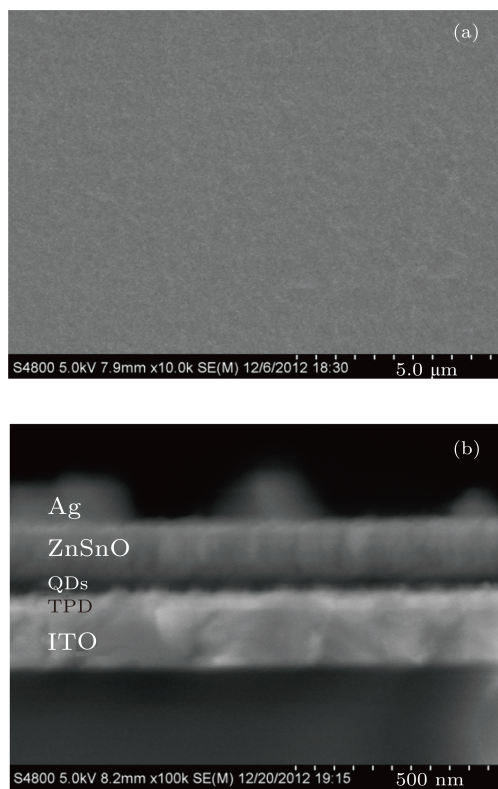


图 1 (a) 旋涂于 TPD 上的量子点层表面的 SEM 图; (b) QD-LEDs 器件 SEM 截面图, 从上往下依次为 Ag/ZnSnO/QDs/TPD/ITO

图 3 给出了 Ag(100 nm)/ZnSnO(100 nm)/QDs (~10 nm)/TPD(50 nm)/ITO 器件的 J - V 特性曲线及器件发光强度同器件所加偏压之间的关系. 由 J - V 特性曲线可以看出, 器件呈现了良好的整流特性, 通过对 J - V 特性曲线进行分段线性拟合, 我们得到了两条不同斜率的直线, 分别对应了两个不同的区域——欧姆接触区和陷阱-限制传导区. 当偏压小于

3 V 时, 直线的拟合斜率为 0.6, 器件处于欧姆接触区, 表现为欧姆接触, 此时未能观测到器件发光; 随着偏压逐渐增大电流急剧增大到直线的拟合斜率变为 5.5, 器件由欧姆接触区过渡到陷阱-限制传导区. 研究表明, 当 $J \propto V^n$ 且 $n > 2$ 时, 量子点表现出陷阱-限制传导行为 [13], 可以俘获外部能量并以其他形式耗散, 这一能量耗散形式在我们的器件中主要表现为量子点中的电子空穴对的辐射复合发光. 因此当所加偏压大于 3 V 时开始能够探测到器件的发光, 标志了器件的开启. 从图中器件发光强度同所加偏压的关系可以看出, 在器件开启之后, 其发光强度先随偏压的增大呈现出指数增长, 在 8 V 时逐渐趋于饱和, 之后继续增大偏压, 发光强度不再增强. 从插图中器件加反向偏压时漏电流的大小可以看出, 漏电流保持在较小的水平, 能够保证器件的性能.

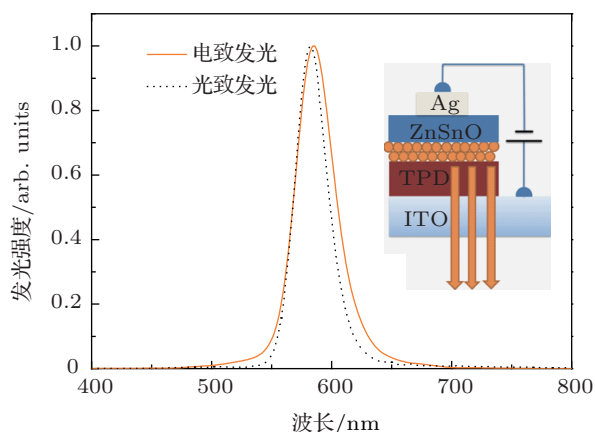


图 2 归一化后的量子点的光致发光谱 (虚线) 和器件的电致发光谱 (实线), 插图为 QD-LEDs 器件结构示意图, 器件的电致发光谱通过 ITO 底部测试

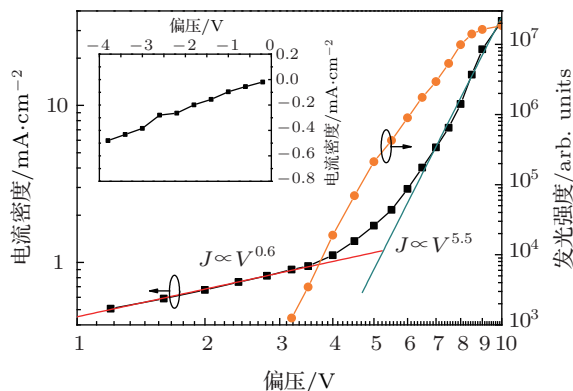


图 3 器件的发光强度与偏压的关系 (橙色圆点) 和 J - V 特性曲线 (黑色方块), J - V 特性曲线的两条拟合直线分别为欧姆接触区 (红色) 和陷阱-限制传导区 (蓝色); 插图是器件在反向偏压下的漏电流大小

3.3 器件的工作机理和性能优化

在利用量子点作为发光层的 QD-LEDs 中, 能量的注入机理主要有两种 [14,15], 一种是电子和空穴直接注入到量子点中进行辐射复合发光, 另外一种则是电子和空穴先在有机物中形成激子, 激子再以福斯特能量共振转移的形式 [16] 转移给量子点, 并在量子点内产生电子-空穴对的辐射复合发光. 这两种机理并不是竞争的关系, 而是能够同时存在使器件的发光强度最大化 [2]. 图 4(a) 为器件的能带结构示意图, 其中 Ag 电极和 ITO 电极的功函数, ZnSnO 和量子点的导带/价带值以及 TPD 的 HOMO/LUMO 值取自于先前发表的实验数据 [17,18]. 由图可知, 电子由 Ag 电极注入后经 Zn-SnO 层传输并注入到量子点所碰到的势垒约为 0.3 eV, 因此电子能够有效的注入到量子点中; 虽然空穴由 ITO 注入时碰到的 TPD 层与量子点之间的势垒相对较大 (~ 11 eV), 但是仍然可以有效地注入到量子点中并与注入的电子进行辐射复合发光 [19]. 另外, TPD 较高的 LUMO 以及 ZnSnO 较低的价带也可以有效的阻挡注入的电子和空穴, 把电子和空穴限制在量子点中. 然而, 由于电子较空穴更容易在量子点中输运 [20,21], 电子仍可能漂移至 TPD 空穴层好量子点发光层的界面处并与从 ITO 注入的空穴形成激子后直接进行辐射复合发光或者通过福斯特能量共振转移进入量子点. 福斯特能量共振转移取决于能量受体的吸收谱与能量给体的荧光谱的重叠程度及两者之间的间距 [16,22], 图 4(b) 中 TPD 的荧光谱和量子点的吸收谱的重叠证明了形成于 TPD 中的激子能够有效的把能量转移给量子点. 图 2 中器件的电致发光谱中未出现 TPD 的发光峰说明能量能够完全从 TPD 共振转移到量子点.

低发光效率的 QD-LEDs 器件中电子/空穴的比例远离于 1, 主要原因有两方面: 一是多余的载流子在量子点周围积累形成内建电场后阻碍载流子的继续注入, 造成器件电流下降从而影响器件的稳定性 [23]; 二是量子点周围多余的载流子增加了非辐射俄歇复合过程造成器件的发光效率下降 [24]. 因此, 研究器件中的主导载流子, 调控电子/空穴注入比使其接近于 1:1 能够显著提高器件的稳定性和发光效率. 此外, 量子点层与电极之间的等离子猝灭效应也会降低器件的发光效率, 这一效应随两者间的间距增大而减弱, 因此器件的 ZnSnO 层和 TPD 层的厚度必须选取适当, 过薄时等离子猝灭效应强使器件效率低, 太厚则会提高器件的开启电压.

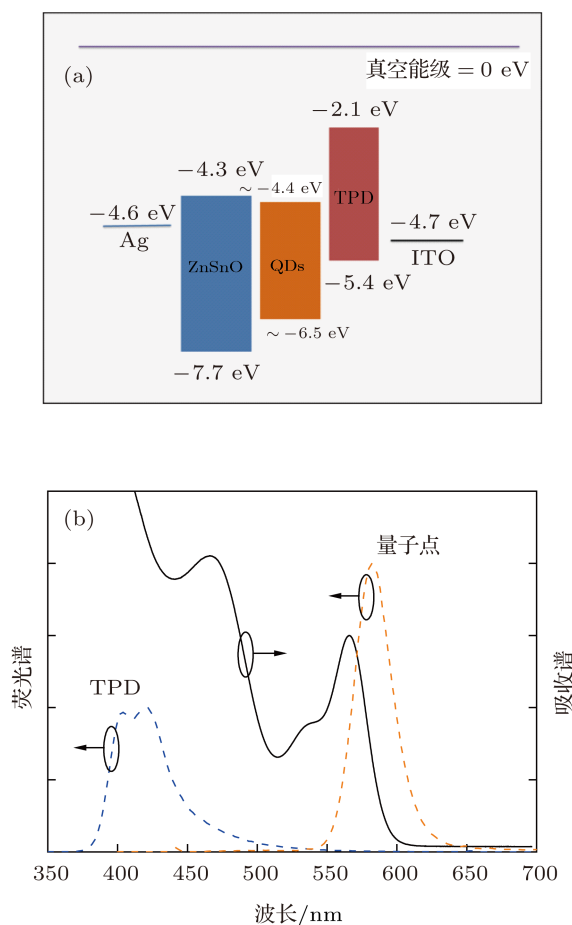


图 4 (a) 器件的能带结构示意图; (b) TPD 和量子点的荧光谱 (虚线) 及量子点的吸收谱 (实线)

我们通过改变 ZnSnO 的电导率来研究器件的主导载流子. 这一系列实验中, 我们固定 TPD 层 (~ 0.001 S/cm) 厚度为 50 nm; 从提高器件的良率考虑, ZnSnO 层的厚度则固定为 130 nm; 参考 Sun 等人对量子点层的优化以及对 Förster 能量共振转移效率的考虑 [16,22], 量子点层则选取为 3—4 层单量子点层 (~ 10 nm) 不变. ZnSnO 的载流子浓度过高 ($\sim 10^{14}$ cm $^{-3}$) 也会对激子产生猝灭作用 [25,26], 所以实验中我们通过控制生长的 ZnSnO 参数, 使其具有较低的载流子浓度 (10^{12} — 10^{13} cm $^{-3}$) 以降低激子猝灭效应, 同时具有较高的迁移率 (~ 28 cm 2 ·V $^{-1}$ ·s $^{-1}$) 以降低器件的开启电压. 在不改变空穴的注入条件下, 改变 ZnSnO 的电导率从而改变电子的注入条件, 所获得器件的 J - V 特性曲线及发光强度同电流的关系展示在图 5 中. 由图 5(a) 可以看出, ZnSnO 的电导率为 63×10^{-7} S·cm $^{-1}$ 时, 器件的开启电压约为 7 V, 而当 ZnSnO 的电导率增大到 48×10^{-6} S·cm $^{-1}$ 时, 器件的开启电压降低至 4 V 左右, 随着 ZnSnO 电导率

继续增大到 $11 \times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 器件的开启电压不再明显降低.

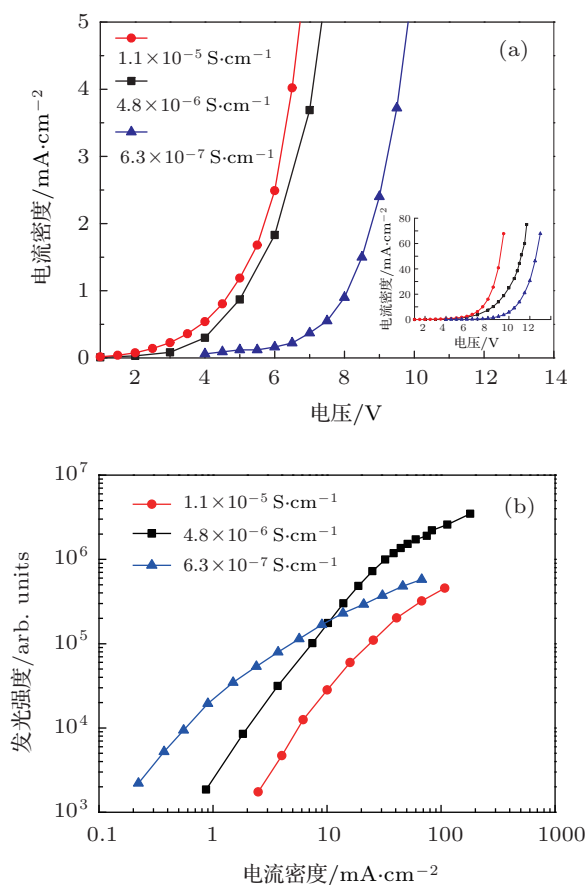


图5 (a) 改变 ZnSnO 的电导率时器件的 J - V 特性曲线的局域图, 分别为 $11 \times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (圆点), $48 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (方块), $63 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (三角形), 插图为完整的 J - V 特性曲线图; (b) 改变 ZnSnO 的电导率时器件的发光强度和电流的关系, 分别为 $11 \times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (圆点), $48 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (方块), $63 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (三角形)

我们知道, 器件的开启由少数载流子决定. 当电压增大到器件中有足够多的少数载流子能够与多数载流子进行辐射复合发光并被探测器感知时, 该电压值称为器件的开启电压. 通过对比图 5(a) 中的 J - V 特性曲线可以知道, 当 ZnSnO 的电导率

由 $63 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 增大到 $48 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 从而增大电子/空穴的比例时, 器件的开启电压显著降低, 说明 ZnSnO 的电导率为 $63 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时器件的少数载流子为电子; 随着 ZnSnO 的电导率由 $48 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 继续增大到 $11 \times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 器件的开启电压基本不变, 说明此时器件中电子/空穴的比例大于 1, 空穴成为了少数载流子, 继续增加电子/空穴的比例只会使器件的电流密度变大, 并不能进一步降低器件的开启电压. 由图 5(b) 中器件的发光强度同电流的关系看出, 由于 ZnSnO 的电导率为 $48 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时器件中电子/空穴的比例最接近于 1:1, 器件具有最低的载流子积累效率效应和非辐射俄歇复合的过程, 所以器件的发光效率最高, 性能最稳定. 同时也可以看出, 在注入电流较小时, ZnSnO 电导率较低器件 (空穴主导型) 的发光强度比电导率较高器件 (电子主导型) 的弱, 但是随着电流增大, 两者的发光强度趋于相近, 均弱于电子/空穴注入比接近于 1:1 的器件, 说明电子在量子点间的输运对器件的效率有一定影响, 但是影响有限.

4 结论

我们利用实验室自组合成的高效率 CdSe 量子点作为发光层, 同时利用具有高载流子迁移率和低载流子浓度的无机金属氧化物 ZnSnO 作为电子传输层, 有机 TPD 作为空穴传输层, 制备出了在大气环境下稳定工作的 QD-LEDs 器件. ZnSnO 电子传输层采用磁控溅射实现, 有机 TPD 空穴传输层和量子点发光层则采用旋涂的方法制备, 得到的器件结构界面陡峭、表面平整器件具有良好的单色性、较低的开启电压、较高的发光效率等特点. 本文的研究成果提供了一种 QD-LEDs 器件制备的新方法, 有助于实现基于胶体量子点的稳定、高效的电致发光器件.

[1] Achermann M, Petruska M A, Koleske D D, Crawford M H, Klimov V I 2006 *Nano Lett.* **6** 1396
 [2] Kumar B, Hue R, Gladfelter W L, Campbell S A 2012 *Journal of Applied Physics* **112** 034501
 [3] Colvin V L, Schlamp M C, Alivisatos A P 1994 *Nature* **370** 354
 [4] Sun Q J, Wang Y A, Li L S, Wang D Y, Zhu T, Xu J, Yang C H, Li Y F 2007 *Nat. Photon* **1** 717
 [5] Caruge J M, Halpert J E, Wood V, Bulovi V, Bawendi M G 2008 *Nat. Photon* **2** 247

[6] Kwak J, Bae W K, Lee D, Park I, Lim J, Park M, Cho H, Woo H, Yoon D Y, Char K, Lee S, Lee C 2012 *Nano Lett.* **12** 2362
 [7] Wang X, Cai X K, Yuan Z J, ZHU X M, Qiu D J, Wu H Z *Acta Phys. Sin.* **60** 37305 (in Chinese) [王雄, 才玺坤, 原子健, 朱夏明, 邱东江, 吴惠楨 2011 物理学报 **60** 37305]
 [8] Hu L, Wu H Z, Cai C F, Xu T N, Zhang B P, Jin S Q, Wan Z F, Wei X D 2012 *The Journal of Physical Chemistry C* **116** 11283
 [9] Chen D A, Shen L, Zhang J Y, Cui Y P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6340 (in Chinese) [陈定安, 沈里, 张家雨, 崔一平 2007 物理学报 **56** 6340]

- [10] Du L X, Hu L, Zhang B P, Cai X K, Lou T G, Wu H Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117803 (in Chinese) [杜凌霄, 胡炼, 张兵坡, 才玺坤, 楼腾刚, 吴惠楨 2011 物理学报 **60** 117803]
- [11] Lou T G, Hu L, Wu D K, Du L X, Cai C F, Si J X, Wu H Z 2012 *J Inorg Mater* **27** 1211 (in Chinese) [楼腾刚, 胡炼, 杜凌霄, 蔡春锋, 斯剑宵, 吴惠楨 2012 无机材料学报 **27** 1211]
- [12] Empedocles S A, Bawendi M G 1997 *Science* **278** 2114
- [13] Hikmet R A M, Talpin D V, Weller H 2003 *Journal of Applied Physics* **93** 3509
- [14] Chin P T K, Hikmet R A M, Janssen R A J 2008 *Journal of Applied Physics* **104** 013108
- [15] Coe-Sullivan S, Woo W K, Steckel J S, Bawendi M, Bulović V 2003 *Organic Electronics* **4** 123
- [16] Anikeeva P O, Madigan C F, Halpert J E, Bawendi M G, Bulović V 2008 *Phys. Rev. B* **78** 085434
- [17] Coe S, Woo W K, Bawendi M, Bulović V 2002 *Nature* **420** 800
- [18] Anikeeva P O, Halpert J E, Bawendi M G, Bulović V 2009 *Nano Lett.* **9** 2532
- [19] Cho K S, Lee E K, Joo W J, Jang E, Kim T H, Lee S J, Kwon S J, Han J Y, Kim B K, Choi B L, Kim J M 2009 *Nat Photon* **3** 341
- [20] Ginger D S, Greenham N C 2000 *Journal of Applied Physics* **87** 1361
- [21] Wehrenberg B L, Guyot-Sionnest P 2003 *Journal of the American Chemical Society* **125** 7806
- [22] Shaheen S E, Kippelen B, Peyghambarian N, Wang J F, Anderson J D, Mash E A, Lee P A, Armstrong N R, Kawabe Y 1999 *Journal of Applied Physics* **85** 7939
- [23] Huang H, Dorn A, Nair G P, Bulović V, Bawendi M G 2007 *Nano Lett.* **7** 3781
- [24] Klimov V I, Mikhailovsky A A, McBranch D W, Leatherdale C A, Bawendi M G 2000 *Science* **287** 1011
- [25] Mei J, Bradley M S, Bulović V 2009 *Phys. Rev. B* **79** 235205
- [26] Wood V, Panzer M J, Halpert J E, Caruge J M, Bawendi M G, Bulović V 2009 *ACS Nano* **3** 3581

QD-LED devices using ZnSnO as an electron-transporting layer*

Liu Bo-Zhi¹⁾ Li Rui-Feng¹⁾ Song Ling-Yun¹⁾ Hu Lian¹⁾ Zhang Bing-Po¹⁾
Chen Yong-Yue¹⁾ Wu Jian-Zhong^{2)†} Bi Gang²⁾ Wang Miao¹⁾ Wu Hui-Zhen^{1)‡}

1) (Department of Physics, State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

(Received 30 March 2013; revised manuscript received 16 May 2013)

Abstract

We have investigated the light-emitting diodes based on colloidal CdSe quantum dots (QD-LEDs), in which inorganic ZnSnO thin films and organic TPD thin films were used as the electron-transporting layer (ETL) and hole-transporting layer (HTL), respectively. The quantum dots were embedded between the inorganic ETL and organic HTL to form a sandwich structure. ZnSnO ETL was made by magnetron sputtering, while the TPD and QD films were made by spin-coating method. The QD-LEDs display sharp interface and smooth morphology. Optical and electrical characterizations show that QD-LEDs have low turn-on voltage, good monochromaticity, bright electroluminescence and good stability in atmosphere ambient. These characteristics are attributed to the utility of high electron mobility and low carrier concentration of the ZnSnO films used as the ETL. To investigate the device's operation mechanism, the conductivity of ZnSnO was varied during deposition to realize equal injection rate for both electrons and holes, which allows the device to operate optimally.

Keywords: quantum dots, ZnSnO, electroluminescence, electron-transporting layer

PACS: 85.30.De, 85.30.Kk, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.158504

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91021020, 61275108), and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant Nos. Z610017, Z1110057)

† Corresponding author. E-mail: wujianzhong@zucc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hzwu@zju.edu.cn