

doi: 10.3788/gzxb20174608.0823002

量子点发光二极管功能层厚度确定方法

陈雯柏¹, 叶继兴¹, 马航¹, 李邓化^{1,2}

(1 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100101)

(2 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:为改善量子点发光二极管器件载流子注入平衡, 提出一种量子点发光二极管各功能层厚度的确定方法。首先选定量子点发光层厚度, 基于隧穿模型进行仿真分析确定电子传输层厚度; 然后采用空间电荷限制电流模型进行仿真分析确定空穴传输层厚度。采用 CdSe/ZnS 量子点作为发光层、poly-TPD 作为空穴传输层、Alq₃ 作为电子传输层, 按照该方法仿真分析得到各功能层厚度进行旋涂-蒸镀法实物器件制备。对比实验结果表明: 当 poly-TPD、QDs 及 Alq₃ 厚度分别为 45 nm、25 nm 及 35 nm 时, 获得了较高的发光效率及色纯度, 器件性能最好。该方法确定的各功能层厚度有助于减少载流子在发光界面积累, 获得载流子的注入平衡, 从而改善 QLEDs 发光性能。

关键词:量子点发光二极管; 载流子注入平衡; 空穴传输层; 发光层; 电子传输层; 隧穿模型; 空间电荷限制电流模型

中图分类号: O472+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0823002-7

Thickness Estimation Method for Every Functional Layer of QLEDs

CHEN Wen-bai¹, YE Ji-xing¹, MA Hang², LI Deng-hua^{1,2}

(1 School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

(2 School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To balance the carrier injection in Quantum Dot Light Emitting Diode (QLEDs), a method to determine the thickness of each functional layer was proposed. The thickness of EL was set firstly, the thickness of Electron Transport Layer (ETL) was determined through tunneling model. On this basis, the thickness of Hole Injection Layer (HTL) was determined at last using space charge limited current model. Devices using red light CdSe/ZnS quantum dot was used as the Light-Emitting Layer (EL), poly-TPD as the HTL, Alq₃ as the ETL were fabricated through spin-coating and vacuum evaporation with the thickness of each layer obtained from the simulation results. Experiment results show that compared with other devices, the device with a 45 nm thickness of poly-TPD, 25 nm QDs and 35 nm Alq₃ has a higher luminous efficiency and color purity. QLEDs with the thickness of each layer chosen according to the method proposed have a more balanced carrier injection which is advantageous in improving device performance.

Key words: Quantum dot light emitting diode; Carrier injection balance; Hole transport layer; Light emitting layer; Electron transport layer; Tunneling model; Space charge limited current model

OCIS Codes: 230.0250; 230.2090; 300.2140; 310.6845

0 引言

量子点发光二极管(Quantum Dot Light Emitting Diodes, QLEDs)有色纯度高、响应速度快、发光颜色

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2015CB654605)资助

第一作者: 陈雯柏(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。Email: chenwb@bistu.edu.cn

通讯作者: 李邓化(1956-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为功能材料与器件、自动检测技术等。Email: ldh@bistu.edu.cn

收稿日期: 2017-02-08; 录用日期: 2017-04-06

<http://www.photon.ac.cn>

连续可调等特性^[1-3]. 自从量子点发光二极管在 1994 年被第一次报道以来, 器件亮度、发光效率、色纯度等性能指标的提升一直是该领域的研究热点^[4]. 针对载流子注入不平衡问题, 降低俄歇复合对器件的影响, 文献[5]利用氧化锌锡作为电子传输层, 通过改变氧化锌锡的电导率来控制器件中电子和空穴的注入平衡; 文献[6]把电子传输层 8-羟基喹啉铝(8-Hydroxyquinoline Aluminum Salt, Alq₃) 替换为无机电子传输层 ZnO, 从而提高了电子的注入能力; 文献[7]把聚[(9,9-二正辛基芴基-2,7-二基)-alt-(4,4'-(N-(4-正丁基)苯基)-二苯胺)](Poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(4,4'-(N-(4-butylphenyl), TFB) 作为空穴传输层, TiO₂ 作为电子传输层, 降低了器件的开启电压, 提高了流明效率; 文献[8]利用氧化镍(Nickelous Oxide, NiO) 作为空穴传输层, 并通过优化 NiO 的电阻率来调节空穴和电子在量子点层的注入平衡. 文献[9]通过在量子点层(QDs)与电子传输层之间嵌入优选厚度的电子阻挡层 PMMA, 很大程度上提高了器件的性能; 文献[10]通过在空穴传输层与发光层之间引入 TPBi, 将载流子积累区域与复合发光区域分开, 从而降低了俄歇复合效应, 并得到当 TPBi 厚度为 3.5 nm 时, 器件性能最佳; 文献[11]利用倒置结构制备了 QLED, 并采用 PEIE 作为电子注入层来提高电子的注入. 文献[12]在倒置结构的基础上, 把电子阻塞层 TCTA 嵌入到量子点发光层和空穴传输层之间, 将电子限制在量子点发光层, 同时提高了空穴的注入速率, 使得器件的发光性能得到提升. 通过引入载流子阻挡层以及使用迁移率更大、与发光层能级更加匹配的材料来提高器件效率, 但制备工艺更加繁琐且对材料性能要求更高.

本文提出了一种优化各功能层厚度的方法, 在不改变器件结构的基础上, 通过仿真分析, 优化器件各功能层的厚度来提高载流子注入平衡. 其具体步骤为: 首先任意设定合理的发光层厚度, 后通过隧穿模型确定电子传输层厚度; 在此基础上, 通过空间电荷限制电流模型确定空穴传输层厚度. 按照该方法, 本文根据仿真结果实验制备了具有不同电子传输层厚度的红光量子点发光二极管, 并结合仿真对不同器件性能进行了分析. 对比仿真与实验结果表明, 本文提出的各功能层厚度的确定方法是可行、有效的.

1 发光机理与载流子注入模型

本文对多层结构 QLEDs 进行了仿真分析, 器件结构见图 1, 器件由阳极(Anode)、空穴注入层(Hole Injection Layer, HIL)、空穴传输层(Hole Transport Layer, HTL)、量子点发光层(Light Emitting Layer, EL)、电子传输层(Electron Transport Layer, ETL)以及阴极(Cathode)组成. 器件的发光过程主要包括: 在外加电场作用下, 空穴与电子分别由阳极、阴极注入器件; 空穴经过空穴注入层及空穴传输层后到达发光层; 由阴极注入电子传输层的电子进入发光层; 电子与空穴在发光层内形成激子, 通过激子的辐射复合发光.

器件中载流子的注入与传输受到界面势垒、载流子传输层厚度、材料介电常数、载流子迁移率等因素的制约^[9]. 器件能级见图 2, 空穴注入层的引入不仅降低了空穴由阳极注入空穴传输层的势垒还起到了改善阳极的表面形态的作用. 载流子传输层的引入解决了正负电极的功函数与发光层不匹配的问题, 使得载流子更易于注入发光层, 很大程度上减少了载流子在电极附近的积累, 既解决了载流子注入平衡的问题, 又使得发光层远离电极, 有效防止了电极对发光的淬灭^[13].

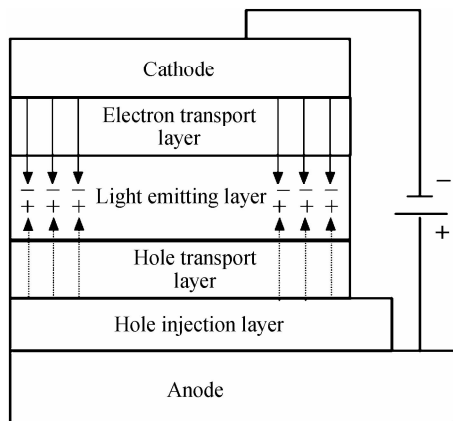


图 1 器件结构

Fig. 1 Schematic diagram of QLED

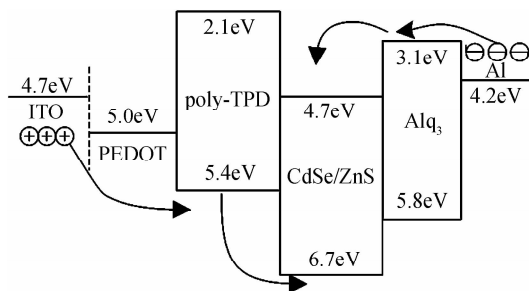


图 2 器件能级

Fig. 2 Energy-band diagram of QLED

由图 2 可知,空穴注入层与空穴传输层之间的势垒差约为 0.4 eV,此时认为阳极与空穴传输层之间为欧姆接触。

欧姆接触时,接触界面所产生的阻抗要远小于材料内部串联阻抗^[13]。此时,材料内部电流密度与材料的相对介电常数、载流子迁移率、材料厚度等有关。当注入的载流子速率大于材料载流子的迁移速率时在材料内部就会有电荷的积累^[13-16]。此时,限制注入电流的主要原因是空间电荷的积累,所以注入电流称为空间电荷限制电流(Space Charge Limited Current, SCLC),其模型可表示为

$$J_n = 9(\epsilon\epsilon_0\mu V^2/d^3)/8 \quad (1)$$

式中, ϵ 为有机材料的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, d 为样片的厚度, V 为端电压, μ 为电子或空穴的迁移率。

由图 2 可知,空穴传输层与发光层之间存在较大能级差,约为 1.3 eV。因此,空穴由空穴传输层注入发光层受到限制,为肖特基接触。

基于肖特基接触的载流子注入有两种方式:热电子注入和隧穿注入。器件在正常工作时,热电子注入效应不明显,载流子通过隧穿注入器件。隧穿注入认为,注入器件中的电流大小和温度是没有关系的,电流的大小取决于金属-有机界面接触势垒和载流子传输层的厚度^[17-19]。隧穿模型可表示为

$$J_n = \frac{q^3 m_{\text{eff}}}{8\pi m_{\text{diel}} h q \Phi_1} E^2 \exp\left(-\frac{8\pi \sqrt{2m_{\text{diel}}(q\Phi_1)^3}}{3hqE}\right) \quad (2)$$

式中, m_{eff} 为电极载流子的有效质量, m_{diel} 为介电材料载流子的有效质量, q 为电子的电荷量, h 为普朗克常数, E 为平均电场强度, Φ_1 为势垒高度。

由图 2 可知,阴极与电子传输层之间能级差约为 1.1 eV,实际情况下,金属和半导体界面之间存在接触势垒。在外加电场作用下,器件阴极与电子传输层之间的接触势垒会降低 $\Delta\phi$,可表示为

$$\Delta\phi = \sqrt{q^3 E/4\pi\epsilon_0} \quad (3)$$

式中: E 为电场强度, q 为电子的电荷量, ϵ 为有机材料的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数。

Al-Alq₃ 界面存在接触势垒与外加电场的关系如图 3 所示。由图 3 可知,由于接触势垒的存在,使得载流子注入势垒降低,有利于电子注入。但界面势垒仍然影响着电子的注入,故为肖特基接触。

由 SCLC 模型及隧穿模型可知,载流子注入与材料内部场强密切相关。忽略空穴注入层分压的情况下,根据麦克斯韦方程,可以得出在外加电场作用下,各层薄膜的电场强度为^[20]

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\epsilon_1 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_1 d_3 + \epsilon_2 d_1 + \epsilon_2 d_3 + \epsilon_3 d_1 + \epsilon_3 d_2} \\ E_2 = \frac{\epsilon_2 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_1 d_3 + \epsilon_2 d_1 + \epsilon_2 d_3 + \epsilon_3 d_1 + \epsilon_3 d_2} \\ E_3 = \frac{\epsilon_3 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_1 d_3 + \epsilon_2 d_1 + \epsilon_2 d_3 + \epsilon_3 d_1 + \epsilon_3 d_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, V 为外加偏置电压, ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 分别为 poly-TPD、CdSe/ZnS 和 Alq₃ 的相对介电常数, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 poly-TPD、CdSe/ZnS 和 Alq₃ 的厚度。

结合式(1)、(2)、(4),可得各功能层厚度与载流子注入速率的关系。这为确定各层厚度提供了理论依据。

2 各功能层厚度的确定方法

本文以红光量子点器件为例,首先选定量子点发光层厚度,通过隧穿模型确定了该厚度下,空穴隧穿注入量子点(Quantum Dot, QDs)的速率;接着通过隧穿模型,确定当电子隧穿速率与空穴隧穿速率相等时 Alq₃ 的厚度;在此基础上,仿真得到 Alq₃ 在该厚度下,根据 SCLC 模型,仿真得到电子注入速率;后通过

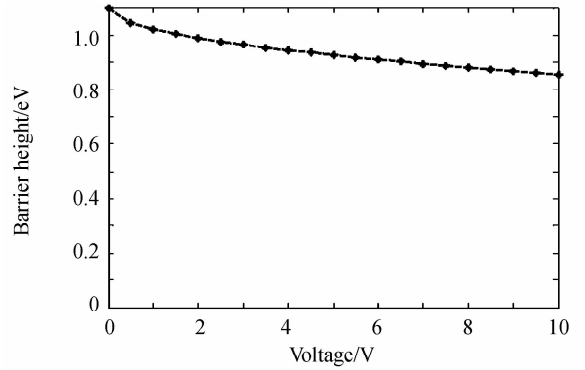


图 3 Al-Alq₃ 界面势垒与外加电场关系
Fig. 3 Voltage-dependent potential barrier height of Al-Alq₃ interface

SCLC 模型确定空穴传输层的厚度.

2.1 量子点层厚度的确定

理想状态下,当量子点发光层为单层时,通过调节空穴传输层及电子传输层之间的厚度,可以使得器件的载流子注入平衡,且此时器件性能最好.但由于工艺等原因,很难控制量子点发光层的厚度,使得其为单层量子点,量子点越薄,器件漏电流越大;与此同时,量子点层厚度的变薄也意味这空穴传输层以及电子传输层得随之变薄,当器件过薄时,电极对激子的淬灭作用明显.实验中优选量子点发光层厚度为 25 nm.

poly-TPD 与阳极为欧姆接触,符合 SCLC 模型,不同 poly-TPD 厚度下,poly-TPD 内 SCLC 模型仿真结果见图 4,由隧穿模型得 poly-TPD 中空穴注入厚度为 25 nm 的 QDs 薄膜的空穴电流密度见图 5.

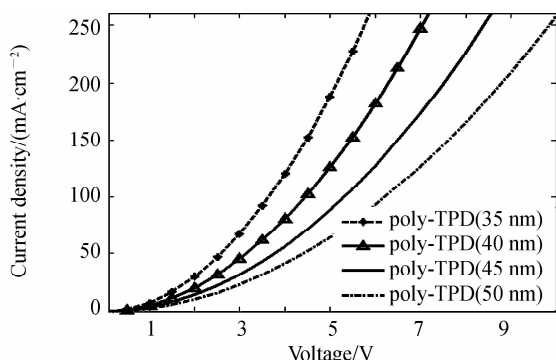


图 4 poly-TPD 中 SCLC 密度

Fig. 4 SCLC density of poly-TPD with different thickness

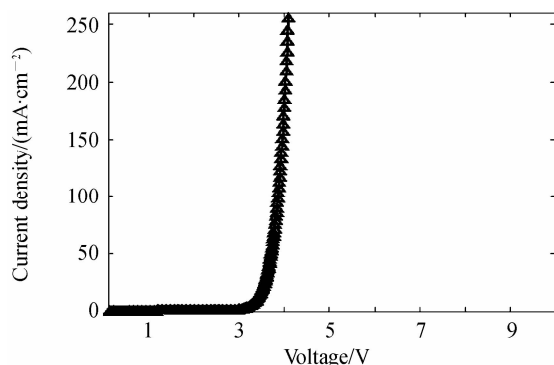


图 5 Poly-TPD 中空穴隧穿 QDs(25 nm) 电流密度

Fig. 5 Hole tunneling current density from poly-TPD to QDs (25 nm)

由仿真结果可知,隧穿模型随着器件内部场强的增加而指数增加,SCLC 模型增加平缓.因此,不同厚度的 poly-TPD 中 SCLC 电流模型 J-V 曲线与 QDs 中隧穿电流密度 J-V 曲线均存在交点,称之为转变电压,且不同的传输层器件的转变电压也存在着差异.

当外加电压低于转变电压时,由阳极注入 poly-TPD 的空穴数量明显大于由 poly-TPD 隧穿进入 QDs 的空穴,因而在 poly-TPD 与 QDs 界面处有电荷积累,从而阻碍阳极空穴进入 poly-TPD,使注入 poly-TPD 的空穴数量与从 poly-TPD 隧穿注入 QDs 的空穴数量基本一致.此时,由 poly-TPD 隧穿进入 QDs 内部空穴电流决定最终由阳极注入的空穴电流,故只需考虑 poly-TPD 到 QDs 的隧穿空穴电流密度.

2.2 电子传输层厚度的确定

电子由阴极 Al 注入电子传输层 Alq₃ 需要克服的势垒由图 3 给出,由图可知,Alq₃ 与 QDs 之间存在一个 -0.9 eV 的势垒,电子能够由 Alq₃ 直接注入 QDs 无需克服势垒.因此,注入 QDs 的电子电流约等于由 Al 注入 Alq₃ 的电子电流,阴极电子隧穿注入 Alq₃ 电流见图 6.

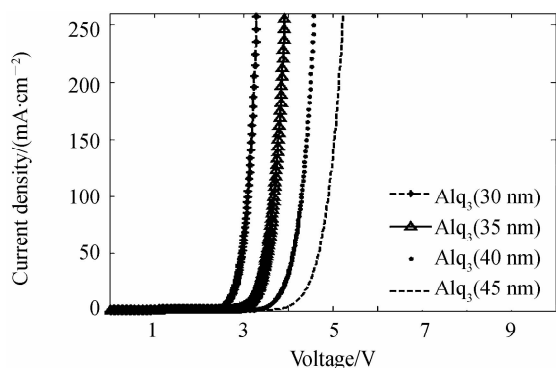
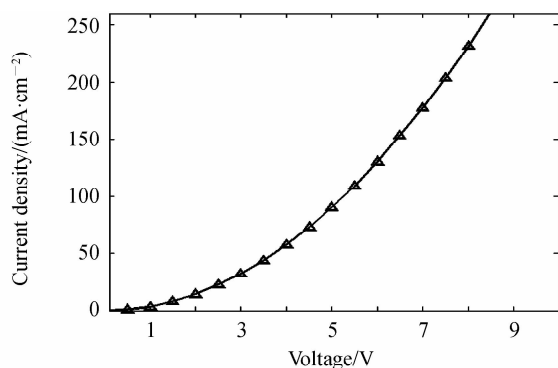
由图 5、图 6 可知,为使得在外加偏置电压低于转变电压,器件中的载流子注入达到平衡,当选定 QDs 厚度为 25 nm 时,应选定 Alq₃ 厚度应为 35 nm.此时,由阴极隧穿注入 Alq₃ 的电子电流与隧穿注入 QDs 的空穴电流大小基本一致.

2.3 空穴传输层厚度的确定

隧穿模型随着器件内部场强的增加而指数增加,在高于转变电压时,由 poly-TPD 隧穿注入 QDs 的空穴电流大于由阳极注入 poly-TPD 的空穴电流.此时,进入 QDs 内部空穴电流受到空穴传输材料本身载流子迁移率的制约,限制了注入 QDs 的空穴电流.因此,当外加偏置电压高于转变电压时,注入 QDs 的空穴电流与由阳极注入 poly-TPD 的空穴电流大小基本一致.

同理,当外加偏置电压高于转变电压时,由阴极注入发光层的电子电流与由阴极注入 Alq₃ 的电子电流基本一致.当 Alq₃ 为 35 nm 时,Alq₃ 内部 SCLC 电流密度见图 7.

确定电子传输层厚度之后,比较图 6 与图 7 可知,器件的转变电压约为 3.7 V,当外加电压低于转变电压时,Alq₃ 中电流符合隧穿模型;当外加电压高于转变电压时,Alq₃ 中电流符合 SCLC 模型.

图6 不同厚度下 Alq₃ 电子隧穿电流密度Fig. 6 Electron tunneling current density with different thickness of Alq₃图7 Alq₃ (35 nm) 中 SCLC 电流密度Fig. 7 SCLC density of Alq₃ (35 nm)

比较图 4 与图 7 可知,为使得器件在外加偏置电压高于转变电压时,载流子注入达到平衡,应选定 poly-TPD 厚度为 45 nm. 此时 poly-TPD 中 SCLC 电流与 Alq₃ 中 SCLC 电流大小基本相等.

首先优选 QDs 厚度为 25 nm, 在外加偏置电压低于转变电压时,由隧穿模型得到 Alq₃ 厚度应为 35 nm, 此时,由 poly-TPD 隧穿注入发光层的空穴电流与由阴极隧穿注入 Alq₃ 的电子电流大小基本一致. 同理,在外加偏置电压高于转变电压时,由 SCLC 模型可知,poly-TPD 厚度应为 45 nm,此时注入 poly-TPD 空穴电流与注入 Alq₃ 的电子电流大小相同. 因此,当选定发光层厚度为 25 nm 时、电子传出层厚度与空穴传输层厚度应分别为 35 nm、45 nm.

3 实验

本文采用旋涂-蒸镀工艺相结合的方法,分别实验制备了结构参数为:ITO/ PEDOT/poly-TPD (45 nm)/CdSe/CdS(25 nm)/Alq₃ (20/25/30/35/40/50 nm) /Al(100 nm) 的红光量子点发光二极管. 实验流程见图 8.

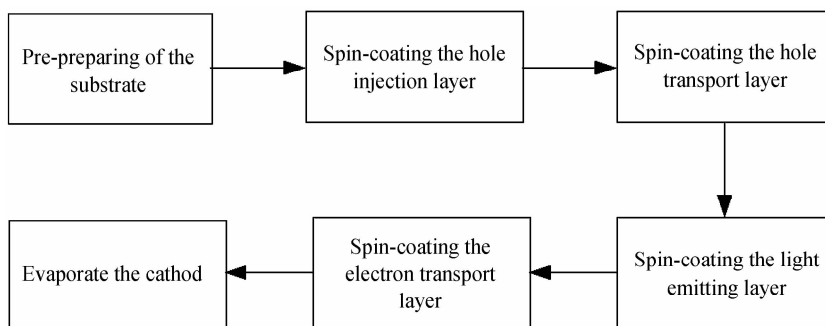


图8 实验流程

Fig. 8 Fabrication process of the devices

3.1 实验结果

采用 Keithley2410 测得不同样片 J-V 曲线,其中 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ 分别表示器件的电子传输层厚度为 20 nm、25 nm、30 nm、35 nm、40 nm、50 nm. 如图 9 所示,当 Alq₃ 厚度为 20 nm 时,电流密度最大,约为 260 mA/cm²;随着 Alq₃ 厚度的增加,器件电流密度逐渐降低;当 Alq₃ 厚度为 50 nm 时,电流密度最小,约为 60 mA/cm². 此外,随着 Alq₃ 厚度的增加,器件开启电压逐渐升高.

利用日本 Topcon 公司的 SR-3AR 型分光辐射度计,测得不同样片在 10 V 偏置电压下的光谱. 如图 10 所示,当电子传输层厚度为 35 nm 时,器件亮度最大,约为 5000 cd/m²;如图 11 所示,当电子传输层厚度小于 35 nm 时,随着电子传输层厚度的增加,器件电流密度降低,亮度及发光效率增加;当电子传输层厚度大于 35 nm 时,器件发光效率开始降低,随着电子传输层厚度增加到一定值时,器件发光色纯度降低,开始出现 Alq₃ 发光光谱.

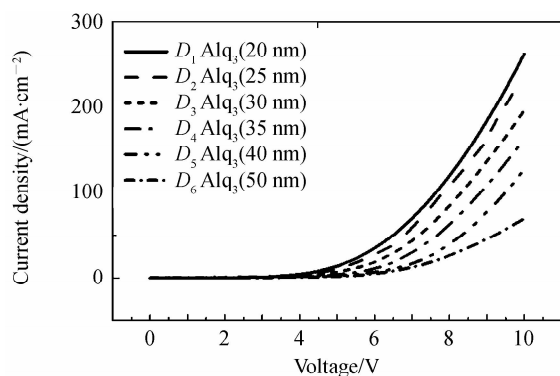


图9 器件 J-V 曲线

Fig. 9 Current density-voltage characteristics of the devices

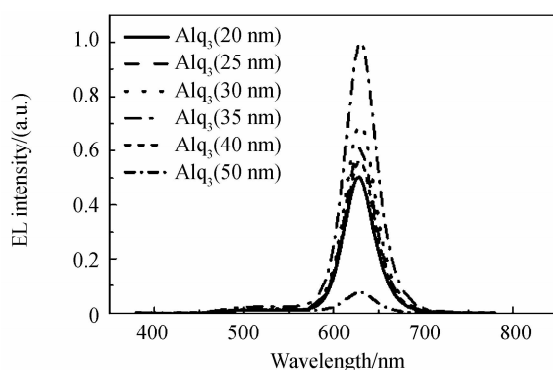


图10 偏置电压为 10 V 时,不同器件光谱

Fig. 10 Current density-voltage characteristics of the devices

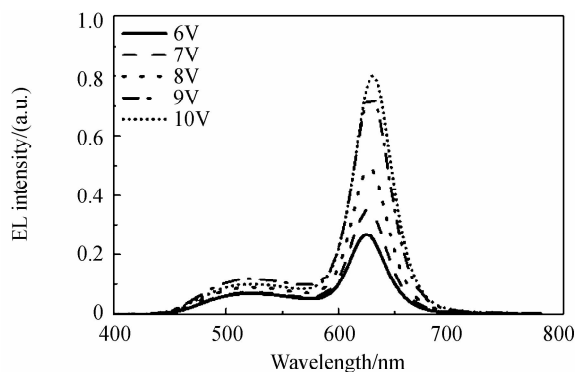


图11 Alq₃ 厚度为 50 nm, D₆ 器件光谱

Fig. 11 EL spectra of device D_6 with 50 nm thickness of Alq₃

3.2 结果与讨论

由实验结果可知,当 poly-TPD、QDs 及 Alq₃ 厚度分别为 45 nm、25 nm 及 35 nm 时,器件性能最好,与仿真结果相符,说明本文提出的方法是切实有效的.此时,器件中空穴与电子注入基本平衡,很大程度上避免了激子的俄歇复合,提高了器件的发光效率.

当 Alq₃ 厚度小于 35 nm 时,电子注入速率大于空穴注入速率,使得激子-电子对的增多,这将导致激子的俄歇复合.由文献[21]可知,激子辐射复合速率远远低于俄歇复合速率.因此,载流子注入不平衡会导致激子迅速猝灭,严重影响了器件的发光效率,且俄歇复合发热也使得器件容易失效.因此,电子传输层不宜过薄,电子传输层过薄会降低器件效率.

当 Alq₃ 厚度大于 35 nm 时,空穴注入速率大于电子注入速率.由图 2 可知,空穴能直接进入 Alq₃ 层与 Alq₃ 层电子形成的激子.由于 Alq₃ 的发射光谱覆盖了 QDs 的吸收谱,在电子传输层内形成的激子通过 Förster 能量转移将能量传递给发光层,激发量子点发光.因此,当电子传输层厚度为 40 nm 时,器件发光效率降低,但色纯度不变.随着电子传输层厚度的进一步增加,Alq₃ 内激子与 QDs 层距离大于能量转移半径,器件开始出现 Alq₃ 发光光谱.

4 结论

1) 载流子注入不平衡将引起俄歇复合效应,从而影响着量子点发光二极管的效率.由载流子注入与传输数学模型可知,载流子注入速率不仅与材料性能有关,还与各功能层厚度密切相关,厚度选取不当对器件性能也有着很大的影响.

2) 在不改变器件结构的基础上,首先任意设定发光层厚度,通过隧穿模型确定电子传输层厚度;然后通过空间电荷限制电流模型确定空穴传输层厚度.选定量子点发光层厚度为 25 nm,为使得由阴极隧穿注入 Alq₃ 的电子速率与隧穿注入 QDs 的空穴速率基本一致,应选定 Alq₃ 厚度应为 35 nm.为使得 poly-TPD 中 SCLC 电流密度与 Alq₃ 中 SCLC 电流密度基本相等,poly-TPD 厚度应为 45 nm.

3) 根据仿真结果实验制备了具有不同电子传输层厚度的红光量子点发光二极管,当 poly-TPD、QDs 及 Alq₃ 厚度分别为 45 nm、25 nm 及 35 nm 时,器件性能最好。载流子传输层过薄时,导致激子俄歇复合,在降低器件的性能同时也使得器件不耐压;载流子传输层过厚时,器件色纯度降低。实验与仿真结果的一致性,说明本文提出的方法是有效的。

参考文献

- [1] MASHFORD B S, STEVENSON M, POPOVIC Z, *et al.* High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection[J]. *Nature photonics*, 2013, **7**(5): 407-412.
- [2] QIAN L, ZHENG Y, XUE J, *et al.* Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures[J]. *Nature photonics*, 2011, **5**(9): 543-548.
- [3] SUPRAN G J, SHIRASAKI Y, SONG K W, *et al.* QLEDs for displays and solid-state lighting[J]. *MRS Bulletin*, 2013, **38**(09): 703-711.
- [4] COLVIN V L, SCHLAMP M C, ALIVISATOS A P. Light-emitting-diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer[J]. *Nature*, 1994, **370**(6488): 354-357.
- [5] LIU Bo-zhi, LI Rui-feng, SONG Ling-yun, *et al.* Quantum-dot light emitting device using ZnSnO as the electron transport layer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(15): 158504.
刘博智,黎瑞锋,宋凌云,等. 氧化锌锡作为电子传输层的量子点发光二极管[J]. 物理学报, 2013, **62**(15): 158504.
- [6] WU Wei-na, HAN Jing, LIU Xiao-hui, *et al.* Preparation of high luminescent efficiency deep-red CdSe/ZnCdS quantum dots[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*. 2015, **26**(11):2246-2250.
吴卫娜,韩靖,刘小慧,等. 高荧光效率深红色硒化镉核壳量子点的制备[J]. 光电子·激光, 2015, **26**(11): 2246-2250.
- [7] CHO K S, LEE E K, JOO W J, *et al.* High-performance crosslinked colloidal quantum-dot light-emitting diodes[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(6): 341-345.
- [8] CARUGE J M, HALPERT J E, BULOVIC V, *et al.* NiO as an inorganic hole-transporting layer in quantum-dot light-emitting devices[J]. *Nano letters*, 2006, **6**(12): 2991-2994.
- [9] DAI X, ZHANG Z, JIN Y, *et al.* Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots [J]. *Nature*, 2014, **515**(7525): 96-99.
- [10] JI W, TIAN Y, ZENG Q, *et al.* Efficient quantum dot light-emitting diodes by controlling the carrier accumulation and exciton formation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, **6**(16): 14001-14007.
- [11] SON D I, KIM H H, CHO S, *et al.* Carrier transport of inverted quantum dot LED with PEIE polymer[J]. *Organic Electronics*, 2014, **15**(4): 886-892.
- [12] PENG H, WANG W, CHEN S. Efficient quantum-dot light-emitting diodes with 4, 4, 4-Tris (N-Carbazolyl)-Triphenylamine(TcTa) electron-blocking layer[J]. *Electron Device Letters, IEEE*, 2015, **36**(4): 369-371.
- [13] 黄维,密保秀,高志强. 有机电子学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [14] TAKESHITA S. Modeling of space-charge-limited current injection incorporating an advanced model of the Poole-Frenkel effect[J]. 2008.
- [15] MIHAILETCHI V D, WILDEMAN J, BLOM P W M. Space-charge limited photocurrent [J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(12): 126602.
- [16] MONTERO J M, BISQUERT J, GARCIA-BELMONTE G, *et al.* Trap-limited mobility in space-charge limited current in organic layers[J]. *Organic Electronics*, 2009, **10**(2): 305-312.
- [17] FORBES R G. Refining the application of Fowler - Nordheim theory[J]. *Ultramicroscopy*, 1999, **79**(1): 11-23.
- [18] KHLIFI Y, KASSMI K, ROUBI L, *et al.* Modeling of Fowler-Nordheim current of metal/ultra-thin oxide/semiconductor structures[J]. *MJ Condensed Matter*, 2000, **3**(1): 53-56.
- [19] BENDER J P, WAGER J F. Alternating-current thin-film electroluminescent device modeling via SPICE Fowler-Nordheim diode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, **47**(5): 1113-1115.
- [20] GAO Hui, LI Deng-hua, YI Li-na, *et al.* Research on the relationship between the level changes and driving voltage in the light emitting layer of QLEDs[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, **36**(4): 556-559.
高慧,李邓化,伊丽娜,等. 量子点电致发光器件发光层能级变化与驱动电压的关系研究[J]. 半导体光电, 2015, **36**(4): 556-559.
- [21] KLIMOV V I, MIKHAILOVSKY A A, MCBRANCH D W, *et al.* Quantization of multiparticle Auger rates in semiconductor quantum dots[J]. *Science*, 2000, **287**(5455): 1011-1013.