

# 量子阱结构对有机电致发光器件效率的影响\*

朱海娜 徐征<sup>†</sup> 赵谔玲 张福俊 孔超 闫光 龚伟

(北京交通大学光电子技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

(2010 年 1 月 2 日收到; 2010 年 2 月 25 日收到修改稿)

实验中共制备了五种有机量子阱结构电致发光器件, 分别对这五种量子阱结构器件的电致发光特性进行了研究, 分析了量子阱结构的周期数和势垒层的厚度对器件电学性能的影响. 实验结果表明适当周期数的量子阱结构器件的亮度和电流效率比传统的三层结构器件的要大, 主要原因是量子阱结构对电子和空穴的限制作用, 这种限制作用提高了电子和空穴在发光层中形成激子和复合的概率, 从而提高了发光的亮度和效率. 当改变阱结构器件中势阱层的厚度时, 也会对器件的亮度和效率产生影响, 采用适当的势阱层厚度能够提高器件的亮度和效率.

**关键词:** 量子阱结构, 电致发光, 电流效率, 光谱

**PACC:** 7280L, 7860F, 7460J, 3220J

## 1. 引 言

量子阱结构首先在无机器件中得以广泛研究<sup>[1,2]</sup>. 基于无机量子阱的研究得到了量子限制效应等一系列特殊的性质. 量子阱结构的研究对于提高半导体光电器件的性能起到了很大的作用. 有机量子阱结构器件的研究始于 1989 年, So 和 Forrest 等人<sup>[3,4]</sup>首次报道了利用 PTCDA 和 NTCDA 制备的有机量子阱结构器件, 并在这种量子阱结构器件中得到了类似于无机量子阱的激子限制效应. 研究表明利用有机多层量子阱结构可以提高有机电致发光器件的性能<sup>[5-13]</sup>. Qiu 等人介绍了利用有机多量子阱结构作为有机电致发光器件的空穴传输层, 这种类似于 I 型量子阱结构的空穴传输层提高了有机电致发光器件的效率<sup>[14,15]</sup>. Yan 等人<sup>[16]</sup>制备了类似量子阱结构的器件, 提高了器件中电子和空穴复合的概率, 从而提高了器件的效率, 制备的器件具有较低的电流密度和较高的发光效率. 通过调节发光, 得到了色坐标为 (0.32, 0.32) 的白光器件.

本文讨论了由 tris-(8-hydroxyquinoline) alumi-

num ( $\text{Alq}_3$ ) 和 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline (BCP) 交替生长构成的有机多周期量子阱结构器件的电致发光特性. 器件中的  $N,N'$ -bis(3-methylphenyl)- $N,N'$ -diphenylbenzidine (TPD) 作为空穴传输层,  $\text{Alq}_3$  作为发光层和量子阱结构中的势阱层, BCP 作为空穴阻挡层和量子阱结构中的势垒层. 根据两种无机半导体量子阱结构的定义, 在半导体中的 I 型量子阱结构中, 窄带系材料的禁带在宽带系材料的禁带中, 由于势垒层作用可以将电子和空穴都限制在势阱层内, 在这种结构中势阱层同时作为器件的发光层. 而在 II 型量子阱结构中, 两种材料的导带和价带完全错开, 电子和空穴分别被限制在势阱层和势垒层中, 电子和空穴的复合只能发生在势阱层和势垒层的界面处的区域内. 因此, 从图 1 给出的器件中所用材料的能级来看, 实验中所制备的有机量子阱结构器件为 I 型量子阱结构. 与传统结构器件相比, 阱结构器件能够提高器件的电流效率. 在我们的实验条件下, 两个周期的量子阱结构器件的电流效率最大, 当量子阱结构的周期数大于 2 时, 器件的电流效率反而会下降. 实验结果表明, 量子阱结构的周期数并不是越大越好, 根据实验条件, 采用适当周期数的量子阱结构才能提高器件的效率. 并且适当地改变阱结构器件中阱层的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60978060, 10774013, 10804006, 10974013), 教育部博士点基金 (批准号: 20070004024), 博士点新教师基金 (批准号: 20070004031), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327704), 北京市自然科学基金 (批准号: 1102028), 北京市科技新星计划 (批准号: 2007A024) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

厚度,也能够提高器件的亮度和效率.

## 2. 实验内容

实验过程中共制备了下面五种有机量子阱结构电致发光器件:A:ITO/TPD(50 nm)/Alq<sub>3</sub>(30 nm)/BCP(15 nm)/Al;B:ITO/TPD(50 nm)/[Alq<sub>3</sub>(15 nm)/BCP(7.5 nm)]<sub>2</sub>/Al;C:ITO/TPD(50 nm)/[Alq<sub>3</sub>(10 nm)/BCP(5 nm)]<sub>3</sub>/Al;D:ITO/TPD(50 nm)/[Alq<sub>3</sub>(15nm)/BCP(5 nm)]<sub>2</sub>/Al;E:ITO/TPD(50 nm)/[Alq<sub>3</sub>(15nm)/BCP(3 nm)]<sub>2</sub>/Al. 比较了这五种量子阱结构电致发光器件的发光特性,分析了器件结构对器件电流密度,亮度和电流效率的影响.

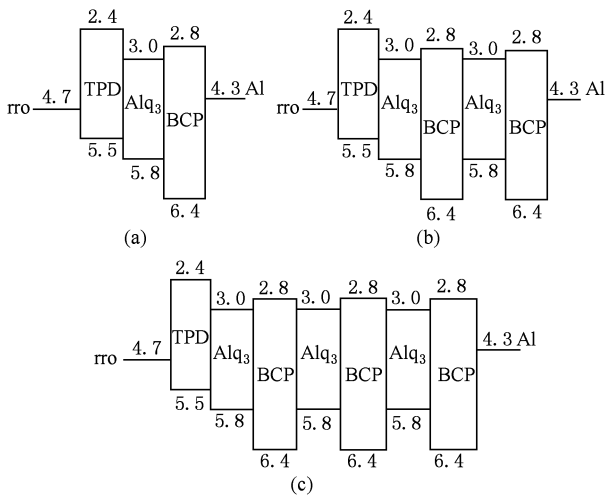


图1 (a)所制备的器件的能级结构器件 A,(b)器件 B,D 和 E;(c)器件 C

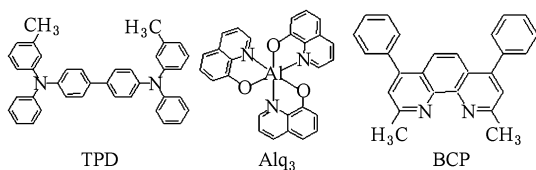


图2 所用有机材料分子的化学结构 TPD, Alq<sub>3</sub> 和 BCP

实验中所用衬底为 60 Ω/口的导电玻璃 ITO,在使用之前先用洗涤液清洗,再依次经过酒精、丙酮及去离子水超声清洗,每次各 10 min. 然后用氮气将衬底吹干. 实验中所用材料的分子结构如图 2 所示. 电致发光器件是利用热蒸发的方法制备的,蒸镀有机物的腔体真空度保持在  $5 \times 10^{-5}$  Pa. 有机物的蒸发速率保持在 0.04—0.09 nm/s. Al 电极的蒸镀是在无机蒸镀腔中完成的,蒸镀过程中无机腔的真空度保持在  $8 \times 10^{-4}$  Pa, Al 电极的蒸发速率保持在

1 nm/s,当器件从有机蒸发腔中被传送到无机腔过程中真空环境不被破坏. 采用石英晶体振荡测厚仪来监测材料的厚度和蒸发速率. Keithley 2400 作为直流电源. 实验结果的测试是在室温情况下测量的. 所有的电致发光光谱均由 CCD 测得.

## 3. 结果与讨论

利用 Alq<sub>3</sub> 和 BCP 两种材料交替生长制备成不同周期数的量子阱结构来作为器件的发光层和空穴阻挡层,为了研究量子阱结构的周期数对这种有机电致发光器件的电流,亮度和电流效率的影响,制备了器件 A,B 和 C,其中器件 A 为传统的三层结构器件,为一个周期的量子阱结构器件,器件 B 和 C 利用多层的发光层(Alq<sub>3</sub>)和空穴阻挡层(BCP)分别制备成两个和三个周期的量子阱结构器件. 三种器件的电流密度-电压特性曲线如图 3(a)所示,从该曲线中看出在驱动电压相同的情况下,三种器件中的电流密度大小随阱结构周期数的增加而变小. 这主要是因为量子阱结构对器件内部的电子和空穴具有限制作用,从图 1 器件的能级结构中可以看出,Alq<sub>3</sub> 和 BCP 两种材料构成了 I 型量子阱结构,这种结构由于势阱层与势垒层之间存在能极差,所以能够将电子和空穴限制在阱层(发光层)中,从而降低了在器件内部传输的电子和空穴的数量,并且这种限制作用会随着量子阱结构周期数的增加而增强,因此在相同电压下,三个器件的电流密度大小随周期数的增加而变小. 在相同的电流密度下,这三种器件的亮度也存在着一定的变化规律. 图 3(b)给出了这三种器件的亮度-电流密度特性曲线. 三种器件的电致发光亮度都随着电流密度的增大而增强. 在相同电流密度 50 mA/cm<sup>2</sup> 的情况下,器件 B 的亮度最大,其最大亮度值为 371 cd/m<sup>2</sup>,这主要是因为一定周期数的量子阱结构能够有效地将电子和空穴限制在发光层中,从而增加了发光层中激子的形成概率,因而提高了发光层中参与复合发光的激子的数量,使发光的亮度得到提高. 然而具有三个周期的量子阱结构器件 C 与传统的一个周期结构器件 A 相比亮度反而下降了. 这说明阱结构的周期数并不是越大越好,在我们的实验中两个周期的阱结构器件亮度最大,当阱结构周期数超过两个时,器件对载流子的限制效应过大,反而会降低器件的亮度. 并且随着周期数的增多,空穴由靠近 ITO 的第一个

周期的阱层传输到第二个周期的阱层的概率也会越小,这样有效发光层的厚度就变小了,所以当周期数大于2时,器件的亮度反而会下降.而且当器件的周期数增多时,器件内部的界面数也会随着增多,过多的界面会造成器件内部的无辐射复合增强,这可能也是器件周期数增多器件的亮度反而会下降的原因.

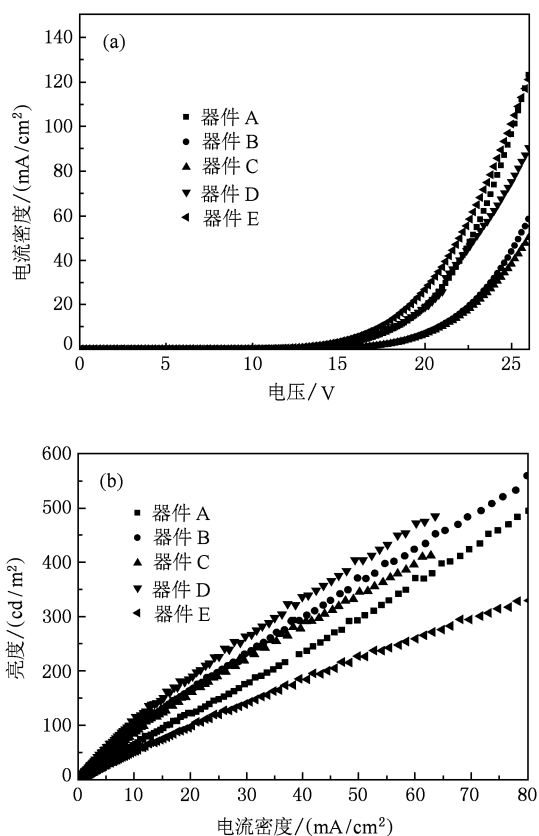


图3 (a)五个器件的电流密度-电压特性曲线;(b)亮度-电流密度特性曲线

本论文对于器件 A, B, 和 C 三个器件的电流效率-电流密度特性也给予了研究,图 4 给出了这三种器件的电流效率-电流密度特性曲线.从图中我们可以看出在相同电流密度下,器件 B 的电流效率最大,其最大值为 1.10 cd/A.其原因与器件 B 在相同驱动电压下具有最大亮度是一样.

为了研究器件中势垒层厚度对器件性能的影响,我们制备了器件 D 和 E.器件 D 和 E 是在器件 B 的基础上,改变了器件中势垒层 BCP 的厚度,将 BCP 的厚度由 7.5 nm 降到了 5 nm 和 3 nm,研究不同厚度的势垒层对器件性能的影响.如图 3(a)所示,在相同的电压下,器件中的电流密度随着势垒层 BCP 的厚度降低而增大,这主要是由于器件中空

穴阻挡层的厚度变薄时量子阱结构对载流子的限制作用会变弱,所以在相同电压下,器件中的电流密度会随着势垒层的厚度降低而增大.从图 3(b)和图 4 中可以看出,器件 D 具有相同电流密度 50 mA/cm<sup>2</sup> 情况下,最大的亮度 405 cd/m<sup>2</sup>,同时也具有最大的电流效率 1.25 cd/A.这是由于器件 D 的势垒层(空穴阻挡层 BCP)与器件 B 的势垒层要薄,适当地降低器件的势垒层厚度,能够减小器件的串联电阻,更有利于器件内部载流子的传输,但是势垒层的厚度并不是越薄越好,当势垒层的厚度降低到 3 nm 时,器件的电流密度反而会增大,亮度和电流效率会下降,3 nm 的 BCP 不能有效地将电子和空穴限制在势阱层(发光层 Alq<sub>3</sub>)中,因而亮度和电流效率会下降,实验结果表明,选择合适的势垒层厚度,才可以有效地提高器件的亮度和效率.

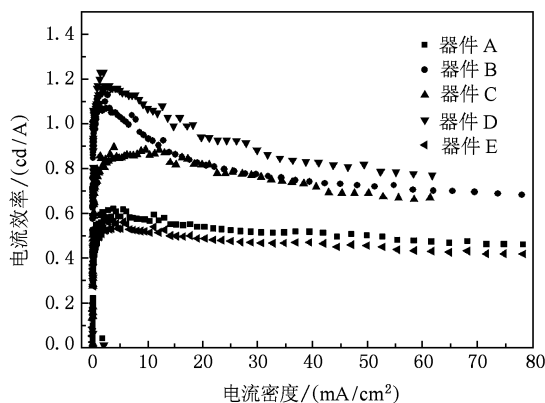


图4 五个器件 A, B, C, D 和 E 的电流密度-电流效率特性曲线

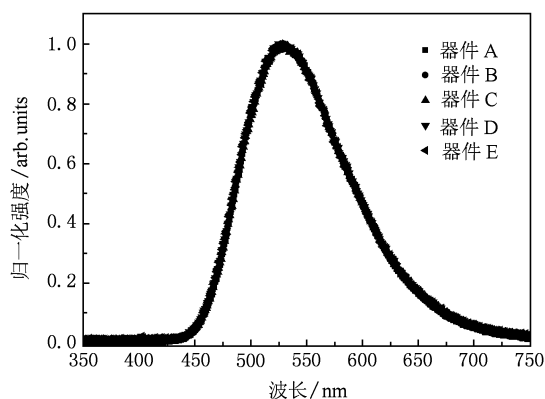


图5 五个器件 18 V 电压下归一化的电致发光光谱

实验的最后测量了五种器件的电致发光光谱,图 5 给出了 18 V 电压下五种器件的电致发光光谱.从光谱图中我们可以看出,当器件结构改变的时

候,只出现了位于 525 nm 的来自  $\text{Alq}_3$  的发光峰,没有产生新的发光峰,这进一步证明了器件的亮度和电流效率的提高是由于器件结构的改变而造成的,并不是由于新物质参与到发光中来,比如 TPD 的发光.因此进一步证明了适当的量子阱结构周期数和适当的势垒层厚度可以提高有机电致发光器件的亮度和电流效率.

#### 4. 结 论

利用热蒸发的方法制备了五种有机量子阱结

构电致发光器件,研究了这五种量子阱结构器件电流密度,亮度和电流效率的变化规律.在相同电流密度下,器件 C 具有最大的亮度和电流效率,器件 C 是具有最佳周期数的量子阱结构和最佳势垒层厚度的器件,这种结构能够有效地将器件内部的电子和空穴限制在发光层中,提高了激子的形成和复合的概率,从而提高了器件的亮度和效率.实验结果表明采用适当周期数的阱结构与合适的阱层厚度,可以有效地提高器件的亮度和效率.

- 
- [1] Lin C F, Su Y S, Wu C H 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 7032
- [2] Nikiforov A Y, Cargill III G S, Guo S P, Tamargo M C 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 114506
- [3] So F F, Forrest S R, Shi Y Q, Steier W H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 674
- [4] So F F, Forrest S R 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2649
- [5] Fujita S, Nakazawa T, Asano M, Fujita S 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 5301
- [6] Ohmori Y, Fujii A, Uchida M, Morishima C, Yoshino K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1871
- [7] Ohmori Y, Fujii A, Uchida M, Morishima C, Yoshino K 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 3250
- [8] An H Y, Hou J Y, Chen B J, Shen J C, Liu S Y 1998 *Thin Solid Films* **326** 201
- [9] Xie ZY, Huang J S, Li C N, Liu S Y, Wang Y, Shen J C, Wang Y, Li YQ, Shen J C 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 641
- [10] Zhao D W, Song S F, Zhang F J, Zhao S L, Xu C, Xu Z 2007 *Displays* **28** 81
- [11] Zhao D W, Song S F, Zhao S L, Zhang F J, Xu Z, Xu X R 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 1915
- [12] Yang K X, Gao W B, Liu H Y, Li C N, Zhao Y, Liu S Y, Huang J S. 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1658
- [13] Song S F, Zhao D W, Xu Z, Xu X R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3499 (in Chinese) [宋淑芳、赵德威、徐 征、徐叙稼 2007 物理学报 **56** 3499]
- [14] Qiu Y, Gao Y D, Wei P, Wang L D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2628
- [15] Qiu Y, Gao Y D, Wang L D, Wei P, Duan L, Zhang D Q, Dong G F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3540
- [16] Yang S H, Hong B C, Huang S F 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 113105

## Influence of well structure on efficiency of organic light-emitting diodes \*

Zhu Hai-Na Xu Zheng<sup>†</sup> Zhao Su-Ling Zhang Fu-Jun Kong Chao Yan Guang Gong Wei

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education,  
Institute of Optoelectronic Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 2 January 2010; revised manuscript received 25 February 2010)

### Abstract

Five kinds of organic quantum well structured light-emitting devices are fabricated, and their electrical characteristics are studied. The effects of quantum well period number and barrier thickness on device performance are analyzed. Experimental results show that appropriate cycle quantum well structured devices have higher brightness and current efficiency than the traditional three-layer devices. That is because of the limitation effect of quantum well structure on electrons and holes, and the structure of this kind could improve the composite probability of excitons in the light-emitting layer, thereby increasing brightness and efficiency of OLED. There is also an effect on brightness and efficiency when the potential well layer thickness of quantum well structured device is changed. Consequently, the adoption of appropriate potential well layer thickness can also improve the brightness and the efficiency of the device.

**Keywords:** quantum well structure, electroluminescence, current efficiency, spectra

**PACC:** 7280L, 7860F, 7460J, 3220J

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978060, 10774013, 10804006, 10974013), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20070004024), the Research Fund for the Youth Scholars of the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070004031) the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB327704), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 1102028), the Beijing NOVA Program (Grant No. 2007A024).

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn