

微腔效应对顶发射串联蓝光有机电致发光器件性能的影响

张娟 焦志强 闫华杰 陈福栋 黄清雨
康亮亮 刘晓云 王路 袁广才[†]

(京东方科技集团股份有限公司, 北京 102600)

(2019年10月15日收到; 2020年2月24日收到修改稿)

相比于传统有机电致发光器件, 串联有机电致发光器件的发光效率与寿命均得到明显提升. 因此, 深入研究微腔效应对顶发射串联有机电致发光器件性能的影响具有重要意义. 本文以蓝光器件为例, 通过光学仿真模拟与实际实验相结合的方法, 研究了顶发射串联蓝光器件的光学性能与电学性能变化规律. 具体实验为: 分别制备了顶发射串联蓝光器件, 使其两个发光层位置分别位于器件光学结构中的第一与第二反节点、第二与第三反节点、第三与第四反节点. 分析并确定了顶发射串联蓝光器件的两个发光层位置分别位于第二反节点与第三反节点处时, 器件性能较佳. 即: 当器件电流密度为 15 mA/cm^2 时, 器件电流效率为 10.68 cd/A (色坐标 $\text{CIE } x, y = 0.14, 0.05$), 其亮度衰减到 95% 所需时间为 1091.55 h . 可能原因是: 器件腔长较长时, 既可以改善第一发光单元的空穴与电子平衡度、削弱表面等离激元效应, 降低膜厚波动性对器件腔长的影响性; 又可以在一定程度内起到包裹 Partical 的作用, 提高效率, 延长寿命. 这一研究成果为设计高效率、长寿命的顶发射串联器件提供了重要依据.

关键词: 光学设计, 串联有机电致发光器件, 电流效率, 寿命

PACS: 61.82.Fk, 33.60.+q, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.69.20191576

1 引言

与传统液晶显示器 (liquid crystal display, LCD) 对比, 有机电致发光器件 (organic light-emitting device, OLED) 具有三大优势, 分别是: 1) OLED 具有自发光的技术, 减少了背光模组与偏光片, 使器件更加轻薄化^[1]; 2) 全固态结构, 可弯曲. OLED 器件为全固态结构, 无真空、无液态物质, 抗震性优于 LCD 器件, 并且可制备在柔性基板上, 因而可实现弯曲显示^[2]; 3) 色域广、视角宽、响应快、适应穿戴设备需求^[3,4]. 色域范围更广^[5]: OLED 的 NTSC 标准色域可以达到 110%, 而 LCD

只有 70%—90%; 视角更宽: OLED 自发光使得器件可视角度达到了 170° ^[6]; 响应速度更快^[7]: OLED 显示屏响应速度远远超过了液晶屏, 在显示动态画面时无拖尾现象^[8].

为了改善器件的电流效率和寿命, 研究者将多个独立的发光单元串联起来, 同样大小的电流先后流经多个不同的发光单元, 使发光单元共同发光从而提高发光亮度与效率, 制备出了串联 OLED 器件^[9,10]. 因此与传统 OLED 器件相比, 串联 OLED 器件在电流效率、发光亮度和寿命方面具有大幅的提升. 一方面, 在串联器件的设计与制备中, 两个或多个独立的发光单元连接处往往需要设计一个具有产生空穴与电子的功能层——电荷产生层 (charge generation layer, CGL). 良好的 CGL 可

[†] 通信作者. E-mail: yuanguangcai@boe.com.cn

以将串联 OLED 的能量最大化地提供给相邻的发光层, 使串联器件的发光亮度与效率成倍增长^[11]. 另一方面, 则通过制备新的有机材料、优化功能层膜厚、调节功能层掺杂浓度等方法来改善器件的性能^[12,13]. 但是, 目前针对顶发射串联器件的光学研究, 很少有课题组会从微腔效应^[14]着手, 系统地研究串联器件光学性能变化规律.

综上, 本文利用光学仿真技术结合具体实验, 对串联蓝光器件发光层位于器件光学结构中不同的反节点位置时, 器件光学性能的影响规律进行了深入研究, 该研究对于串联 OLED 器件的光学设计具有指导意义.

2 实验

蓝光 OLED 对于固态照明和全彩显示至关重要, 但蓝光 OLED 的电流效率与寿命仍比较差^[15]. 为了提高蓝光器件的效率, 我们利用光学仿真模拟与实验相结合的方法, 深入研究微腔效应对顶发射串联蓝光器件光学性能的影响. 其中, 微腔效应是指: 当器件的发光区域位于一个由全反射膜与半反射膜共同构成的谐振腔内, 当腔长与光波波长处于同一数量级时, 特定波长的光得到增强, 非特定波长的光被减弱, 光谱窄化的光学现象.

本文具体研究内容为: 系统地研究发光层一与发光层二分别位于第一反节点与第二反节点、第二反节点与第三反节点、第三反节点与第四反节点处, 器件性能的区别, 并深入地分析微腔效应影响器件性能的机理.

2.1 器件光学仿真

在顶发射 OLED 器件中, 微腔效应会使器件光谱半峰宽变窄, 同时随着视角变化, 器件色坐标发生变化. 微腔器件原理图^[5]如图 1 所示.

图 1 中 E_0 是器件的发光层发射的初始光强度, E_2 是透过半透明 Mg:Ag M_2 阴极的光强度, $\sqrt{R_1}e^{i\phi_1}$ 与 $\sqrt{R_2}e^{i\phi_2}$ 分别为全反射电极 M_1 、半反射电极 M_2 的复反射系数, T_2 为 M_2 的透射率, A_2 为 M_2 的反射率. 此外, L_1 , L_2 分别为发光层距离全反射电极、半反射电极的实际距离长度, L 是器件整体的腔长.

以简化后的微腔效应公式

$$2L/\lambda_{\max} + \phi/(2\pi) = m \quad (m \text{ 为整数}), \quad (1)$$

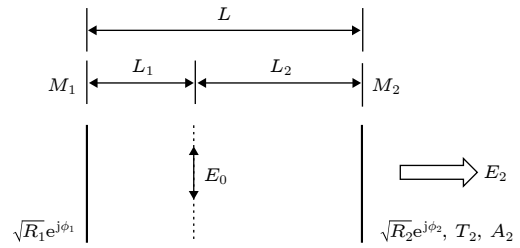


图 1 微腔器件原理图

Fig. 1. Schematic diagram of microcavity device.

为理论基础, 应用光学仿真软件模拟顶发射串联蓝光器件, 顶发射串联蓝光器件结构为:

器件 A) ITO/Al/ITO/HIL1 (20 nm)/HTL1 (X nm)/B-EML1 (20 nm, 5%)/ETL1 (35 nm)/CGL (15 nm)/HIL2 (20 nm)/HTL2 (10 nm)/B-EML2 (20 nm, 5%)/ETL2 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag (15 nm, 9:1)/CPL (65 nm).

其中, HIL 是指空穴注入层 (hole injection layer), HIL1 为有机蒸镀材料 dipyrzino[2,3-f:2',3'-h]quinoxaline-2,3,6,7,10,11-hexacarbonitrile(HAT-CN), HIL2 为有机蒸镀材料 N,N'-di-[(1-naphthalenyl)-N,N'-diphenyl]-(1, 1'-bi-phenyl)-4,4'-diamine (NPB); HTL 是空穴传输层 (hole transport layer), HTL1 与 HTL2 均为有机蒸镀材料 4,4',4''-tris(carbazol-9-yl)-triphenylamine (TCTA); EML 是指发光层 (emitting layer), B-EML1 与 B-EML2 均为 9,10-di-(2-naphthyl)anthracene (ADN):4-di-[4-(N,N-diphenyl)amino]styryl-benzene (DSA-ph) (ADN:DSA-ph); ETL 是指电子传输层 (electron transport layer), ETL1 与 ETL2 均为有机蒸镀材料 1,1'-(5'-(4-(1H-benzo[d]imidazol-1-yl)phenyl)-[1, 1':3',1''-terphenyl]-4,4''-diyl)bis(1H-benzo[d]imidazole) (TPBi); CGL 为 LiF (1 nm)/Al (5 nm)/HAT-CN(9 nm); CPL 是光取出层 (capping layer), 为 8-Hydroxyquinolinolato-lithium (Liq). 器件中各个功能层材料的分子结构式如图 2 所示.

本实验制备的是顶发射器件, 针对器件中各个功能层材料的折射率进行了详细的测试. 首先在白玻璃上蒸镀 50 nm 的有机薄膜, 然后利用 Complete EASE 所生产的椭偏仪测试设备对有机蒸镀材料 HAT-CN, NPB, TCTA, ADN:DSA-ph, TPBi, Liq 进行了折射率的测试. 各有机材料的折射率数值如表 1 所列, 材料折射率曲线如图 3 所示, 器件模拟结果如图 4 所示.

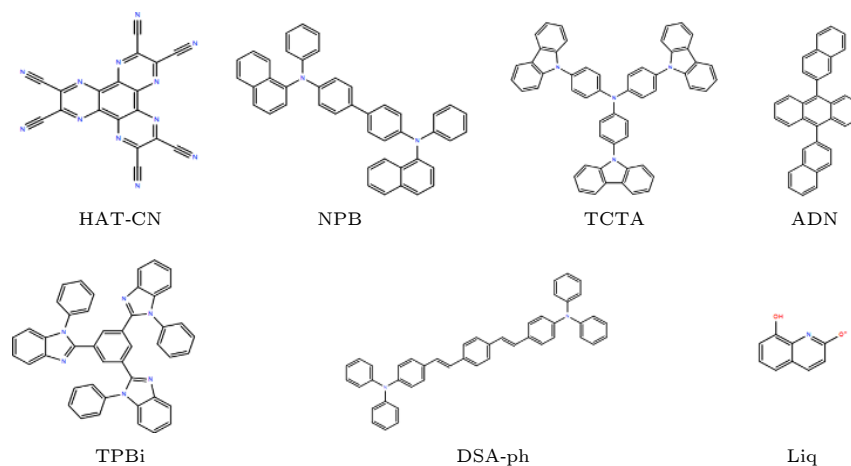


图 2 有机材料的分子结构式

Fig. 2. Molecular structure formula of organic materials.

表 1 有机材料的折射率

Table 1. Refractive index of organic materials.

波长/nm	折射率						
	HAT-CN	NPB	TCTA	ADN	DAS-ph	TPBi	Liq
465	2.02	2.05	1.96	2.09	1.96	1.70	1.85
545	1.92	1.94	1.88	1.89	1.88	1.66	1.79
620	1.88	1.89	1.85	1.83	1.85	1.64	1.76

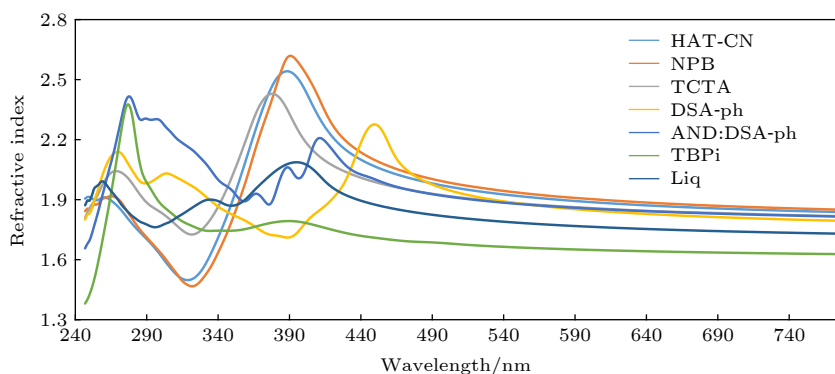


图 3 有机材料的折射率曲线

Fig. 3. Refractive index curve of organic materials.

本次光学仿真模拟中, 通过改变 HTL1 的膜厚来调整器件的腔长 L , 即发光层与全反射电极间的距离 L_1 加长, 发光层距离半反射电极长度 L_2 保持不变.

由器件 A1 (HTL 的膜厚为 5—145 nm) 发光性能模拟图 (图 4) 可以看出: 随着腔长的变化, 顶发射串联蓝光器件的色坐标 CIE_{xy} 、发光光谱与亮度均呈现周期性变化. 由图 4(a) 可知: HTL1 的膜厚增加, 器件色坐标 CIE_x 先减小后增大再减小, CIE_y 正好相反, 都呈周期性变化的趋势. 图 4(b) 表明: HTL1 的膜厚加厚, 器件光谱强度先减小后

增大再减小, 并且光谱先红移后蓝移再红移, 同样呈周期性变化. 当 HTL1 的膜厚为 5 与 125 nm 时, 光谱波峰为 465 nm, 强度分别为 0.515 与 0.528, 表明该腔长中器件的两个发光单元分别位于第一反节点与第二反节点、第二反节点与第三反节点处, 也说明顶发射串联蓝光器件的腔长变化周期约为 120 nm. 为后续制备三个或更多个发光单元的串联蓝光器件提供了部分数据依据. 图 4(c) 为器件的亮度曲线, 依然会随腔长变化而变化, 再一次验证了腔长对器件性能的影响趋势呈周期性变化.

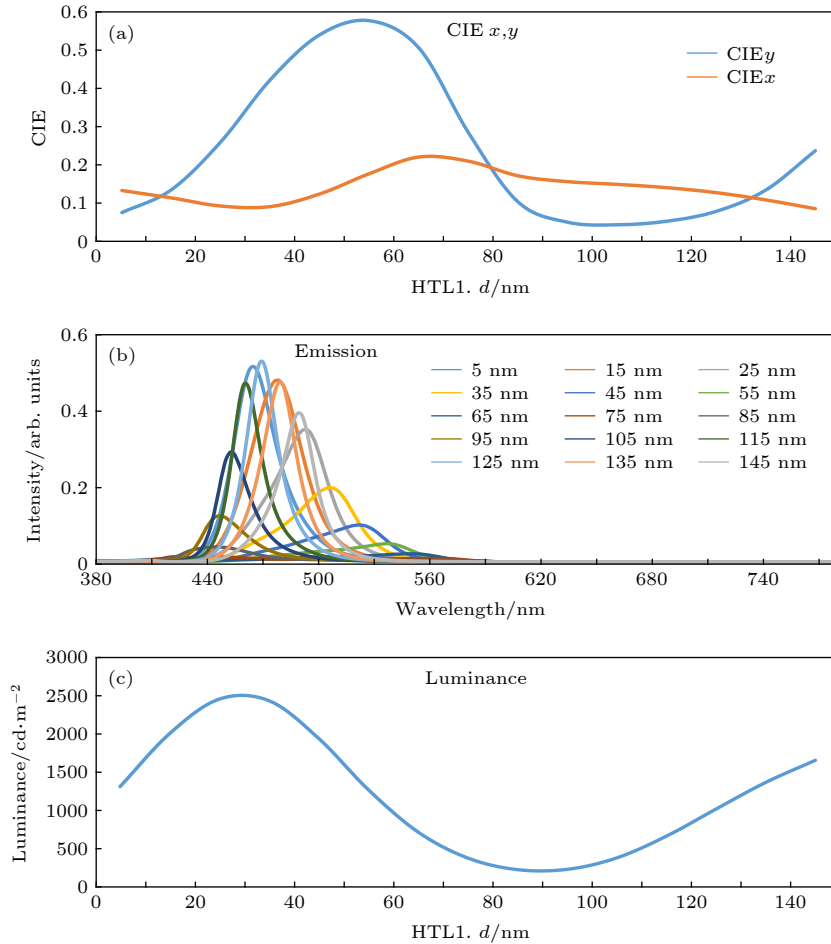


图 4 器件 A1 发光性能模拟图 (a) 不同的腔长对 OLED 器件 CIE x, y 的影响; (b) 不同的腔长对 OLED 器件发光光谱的影响; (c) 不同的腔长对 OLED 器件亮度的影响

Fig. 4. Simulated electroluminescence (EL) performance of devices A1: (a) Influence of length of microcavity on CIE x, y of OLED; (b) influence of length of microcavity on spectrum of OLED; (c) influence of length of microcavity on luminance of OLED.

为再次说明该顶发射串联蓝光器件的腔长变化周期约为 120 nm 的规律, 同样先进行了器件 A2 的仿真模拟, 其中 HTL1 的变化范围为 115—270 nm.

由器件 A2 发光性能模拟图 (图 5) 可知: 随着器件腔长 L 的加长, 顶发射串联蓝光器件的色坐标、光谱与亮度同样呈周期性的变化趋势. 由图 5(a) 可知: 随着器件中 HTL1 的加厚, 顶发射串联蓝光器件的色坐标 CIE x 先减小后增大再减小, CIE y 先增大后减小再增大; 由图 5(b) 器件光谱图可以看出: 当器件中 HTL1 的膜厚增加, 器件光谱强度先增大后减小再增大再减小, 光谱先红移后蓝移再红移, 均呈现周期性的变化趋势. 当器件中 HTL1 的膜厚为 125 和 245 nm 时, 器件的光谱强度较大, 分别为 0.528 和 0.531, 光谱波峰为 464 nm, 说明这两组器件的第一发光单元和第二发光单元分别位于第二反节点与第三反节点、第三反节点与第四

反节点, 再次验证了顶发射串联蓝光器件的腔长变化周期为 120 nm 的规律. 图 5(c) 器件的发光亮度曲线, 亮度先增大后减小再增大, 也表现出了器件变化的周期性.

2.2 结构设计与制备

为了说明电荷产生层产生空穴与电子的能力, 制备了电荷产生层的单一电子传输型器件 1、单一空穴传输型器件 2 和单一电荷产生层器件 3. 具体的器件结构为

器件 1 (单一电子传输型器件):

ITO/TPBi (35 nm)/LiF (1 nm)/Al (5 nm)/NPB (40 nm)/Al (150 nm);

器件 2 (单一空穴传输型器件):

ITO/TPBi (35 nm)/HAT-CN (9 nm)/NPB (60 nm)/Al (150 nm);

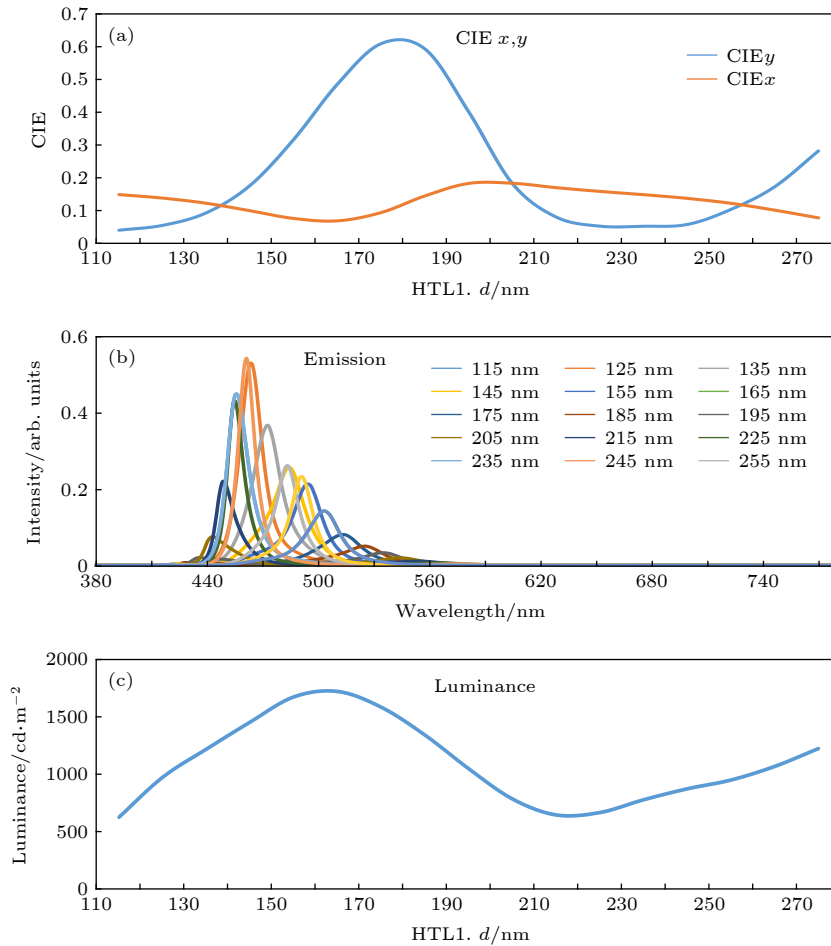


图 5 器件 A2 发光性能模拟图 (a) 不同的腔长对 OLED 器件 CIE x, y 的影响; (b) 不同的腔长对 OLED 器件发光光谱的影响; (c) 不同的腔长对 OLED 器件亮度的影响

Fig. 5. Simulated EL performance of devices A2: (a) Influence of length of microcavity on CIE x, y of OLED; (b) influence of length of microcavity on spectrum of OLED; (c) influence of length of microcavity on luminance of OLED.

器件 3 (单一电荷产生层器件):

ITO/TPBi (35 nm)/LiF (1 nm)/Al (5 nm)/HAT-CN (9 nm)/NPB (60 nm)/Al (150 nm).

器件的制备与性能表征大体分为三个步骤. 1) 顶发射基板的清洗: 将基板依次通过纯净水、去离子水、丙酮、异丙醇、酒精等液体清除杂质, 随后置于 180 °C 的烘烤箱中去除水汽. 2) OLED 器件制备: 将清洗干净的基板传送到真空蒸镀腔体中, 有机物的蒸镀速率为 0.01—0.02 nm/s, 金属阴极 Al, Mg 和 Ag 分别以 0.1, 0.09 和 0.01 nm/s 的速率完成蒸镀. 3) 器件性能的测试与分析: 器件的电流密度、亮度均由 Keithley-2400 与 PR650 光谱扫描分光光度计测得.

图 6 所示为器件 1, 2 和 3 的电流密度-电压特性曲线. 由图 6 可以看出, 器件 1 的电流密度几乎为零, 这表明电荷不是在 LiF/Al 的界面处产生的. 器件 2 的电流密度较大, 电荷可能是在 HAT-

CN/NPB 的界面处产生的. 可能的原因是: HAT-CN 为常用的强电子受体材料, 电荷产生层产生的电子会被拉到 HAT-CN 的最低未占据分子轨道 (LUMO) 能级, 同时产生的空穴将被留在 NPB 的最高占据分子轨道 (HOMO) 能级, 即产生了电荷. 随后, 当器件被施加一定的电压时, 产生的电子和空穴沿相反方向传输到相邻的发光层中. 器件 3 的电流密度随电压的增大而增大, 既说明电荷确实是

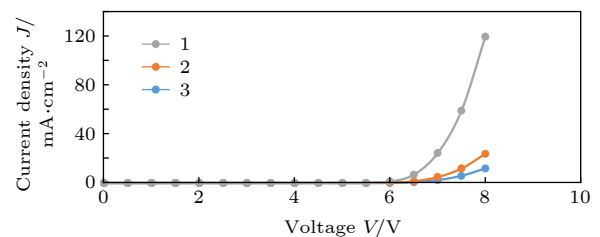


图 6 器件 1, 2, 3 的电流密度-电压特性曲线

Fig. 6. Current density-voltage characteristics of device 1, 2 and 3.

在 HAT-CN/NPB 的界面处产生的, 也表明 LiF/Al 的电子传输能力较佳. 当 NPB 与 HAT-CN 接触时, 为达到费米能级平衡的状态, 累积在 HAT-CN/NPB 界面处的电子-空穴对被分离成电子与空穴, 电子通过 HAT-CN 的 LUMO 能级传输到 LiF/Al, 空穴沿 NPB 的方向传输到发光层中.

图 7 为电荷产生层的能级示意图. 由图 7 可知, 在器件 3 中, 由于 ITO 与 TPBi 的 HOMO 能级势差为 1.4 eV, 空穴从阳极注入到 TPBi 是比较难的, 同样阴极 Al 与 NPB 的 LUMO 能级的能级差为 1.6 eV, 则电子也很难从阴极注入到 NPB 中. 给器件施加电压后, 所得的电流大小反映了电荷产生层 CGL 产生电荷的能力大小. 单一载流子器件 1 和器件 2 的 $J-V$ 曲线说明所施加的电压未使得电子和空穴分别从阴极和阳极注入到器件中, 因此, 对器件 3 所施加的电压不能给器件提供多余的载流子, 再次说明 $J-V$ 曲线呈现的电流由 CGL 所提供.

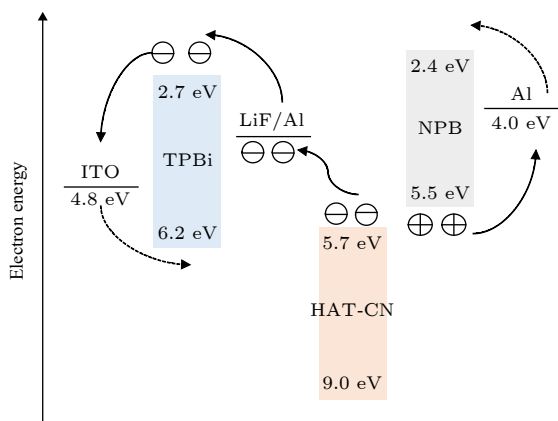


图 7 电荷产生层的能级示意图

Fig. 7. Energy level diagram of charge generation layer.

为了进一步说明理论拟合的正确性和最佳器件参数的可信性, 现制备了实验器件 A.

不同 HTL1 厚度器件的发光性能如图 8 所示. 表 2 为器件性能测试数据, 其中 V 表示电压, L 表示亮度, CE 表示电流效率, PE 表示功能效率, EQE 表示外量子效率.

图 8(a) 为器件 A 的光谱特性曲线图. 可知, 随着 HTL1 膜厚的增加, 器件的发光光谱先红移后蓝移再红移, 这是因为微腔效应具有部分波长的光得到增益, 部分光进行衰减, 则器件的发射光强度先降低后增高再降低再增高, 实验测试光谱位置的改变对光谱强度的影响趋势与仿真模拟得到的光谱强度影响趋势是一致的, 呈现周期性变化.

图 8(b) 为器件 A 的电流效率-亮度特性曲线图. 可以看出, HTL1 薄膜加厚, 器件的电流效率先减小后增大再减小再增大, 同样呈现周期性的变化. 当器件 HTL1 的膜厚为 5, 125 与 245 nm 时, 器件的发光强度较大, 器件的电流效率较高. 原因可能是当 HTL1 的膜厚为 5, 125, 245 nm 时, 微腔效应对蓝光进行了增益, 改善了器件的亮度, 使得器件效率增大.

图 8(c) 为器件 A 的电流密度-电压特性曲线图. 可以看出, 随着 HTL1 膜厚加厚, 器件的自身电阻增大, 则电流密度一定时, 器件的电压增大.

通过实验制备器件的测试与仿真结果的对比, 得出随着 HTL1 膜厚的增加, 器件的色坐标、发光强度、电流效率均呈现周期性变化的规律. 为此随后对器件 B, C, D, E 进行了更为详细的验证实验.

现制备了三组顶发射串联蓝光器件, 分别将串联器件中的两个发光单元的微腔腔长置于第一反节点与第二反节点、第二反节点与第三反节点、第三反节点与第四反节点处. 具体器件结构^[16,17]如图 9 所示.

器件 B) ITO/Al/ITO/HIL1 (20 nm)/HTL1 (85 nm)/B-EML1 (20 nm, 5%)/ETL1 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag (15 nm, 9:1)/CPL (65 nm);

器件 C) ITO/Al/ITO/HIL1 (20 nm)/HTL1 (5 nm)/B-EML1 (20 nm, 5%)/ETL1 (35 nm)/CGL (15 nm)/HIL2 (20 nm)/HTL2 (10 nm)/B-EML2 (20 nm, 5%)/ETL2 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag (15 nm, 9:1)/CPL(65 nm);

器件 D) ITO/Al/ITO/HIL1 (20 nm)/HTL1 (125 nm)/B-EML1 (20 nm, 5%)/ETL1 (35 nm)/CGL (15 nm)/HIL2 (20 nm)/HTL2 (10 nm)/B-EML2 (20 nm, 5%)/ETL2 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag (15 nm, 9:1)/CPL (65 nm);

器件 E) ITO/Al/ITO/HIL1 (20 nm)/HTL1 (245 nm)/B-EML1 (20 nm, 5%)/ETL1 (35 nm)/CGL (15 nm)/HIL2 (20 nm)/HTL2 (10 nm)/B-EML2 (20 nm, 5%)/ETL2 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag (15 nm, 9:1)/CPL (65 nm).

这四组器件分别是顶发射单发光单元器件 B、顶发射串联蓝光器件 C, D, E, 器件 C, D, E 除了空穴传输层 HTLI 的膜厚不同, 分别为 5 nm (器件 C)、125 nm (器件 D)、245 nm (器件 E) 以外, 其他功能层的材料、膜厚、掺杂比等均相同.

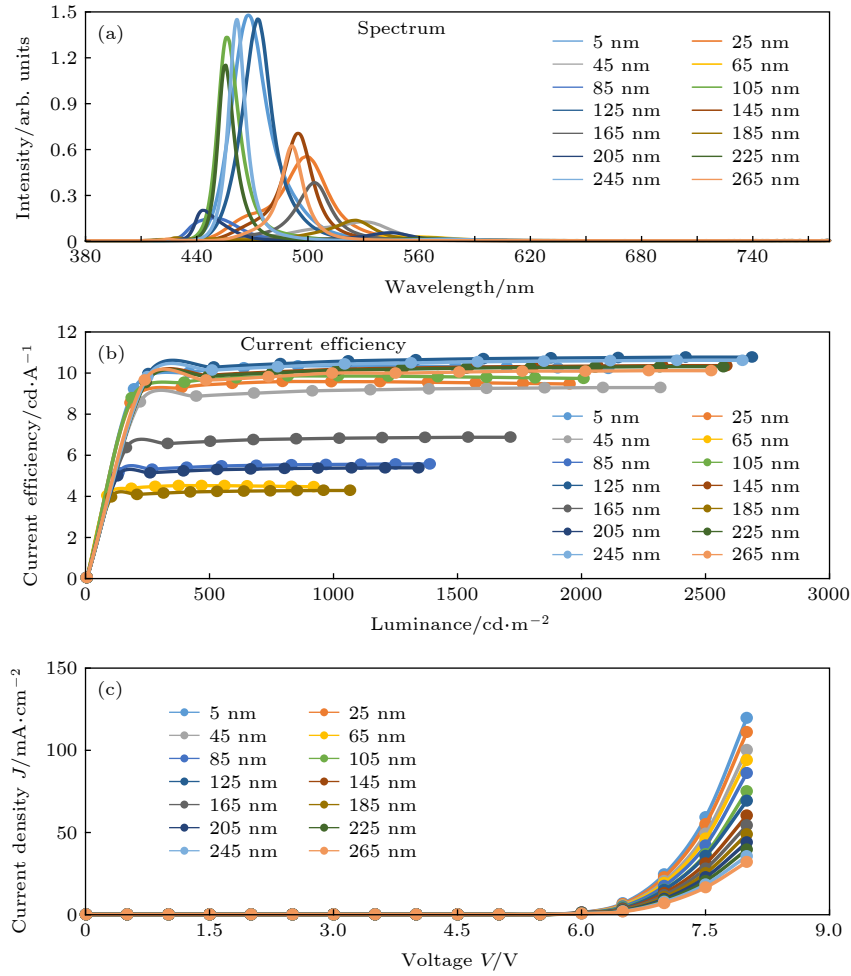


图 8 器件 A 的发光性能图 (a) 光谱特性曲线; (b) 电流效率-亮度特性曲线; (c) 电流密度-电压特性曲线

Fig. 8. The EL performance of devices A: (a) The spectrum characteristics; (b) the current efficiency-luminance characteristics; (c) the current density-voltage characteristics.

表 2 器件 A 的测试性能参数
Table 2. Performance parameters of device A.

Device@15 mA/cm ²	V/V	L/cd·m ⁻²	CE/cd·A ⁻¹	PE/lm·W ⁻¹	EQE/%	CIE _x	CIE _y
5 nm	6.76	1548	10.32	4.78	5.25	0.1372	0.0516
25 nm	7.11	1425	9.51	4.26	4.88	0.3463	0.4545
45 nm	7.42	1380	9.22	3.90	4.69	0.3425	0.6028
65 nm	8.30	615	4.13	1.61	2.20	0.3621	0.6218
85 nm	8.86	825	5.53	1.96	2.82	0.1375	0.0405
105 nm	9.51	1470	9.82	3.14	4.55	0.1318	0.4528
125 nm	10.21	1603	10.68	3.28	5.25	0.1369	0.0512
145 nm	10.80	1530	10.20	2.96	5.02	0.3326	0.4168
165 nm	11.11	1021	6.80	1.92	4.91	0.3463	0.4545
185 nm	11.32	634	4.23	1.16	2.32	0.3425	0.6028
205 nm	11.66	799	5.32	1.43	2.51	0.1375	0.0405
225 nm	11.98	1534	10.22	2.69	5.12	0.1310	0.4512
245 nm	12.34	1580	10.53	2.66	5.36	0.1369	0.0502
265 nm	12.62	1504	10.03	2.49	5.08	0.3512	0.4555

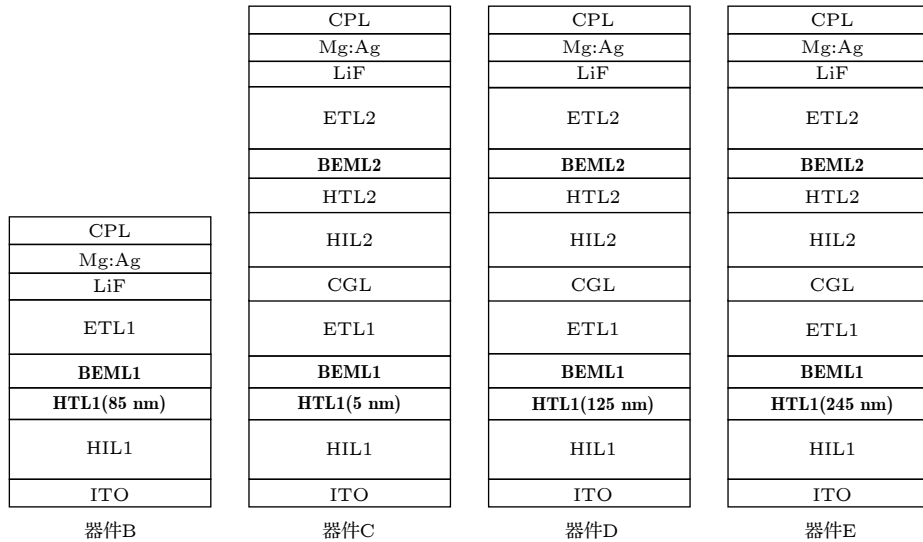


图 9 OLED 器件结构图

Fig. 9. Device structure of OLED.

2.3 测试结果与讨论

图 10 为顶发射单发光单元器件 B、顶发射串联蓝光器件 C (HTL1 膜厚 5 nm), D (HTL1 膜厚 125 nm), E (HTL1 膜厚 245 nm) 的发光性能图, 表 3 为器件测试所得数据.

图 10(a) 为器件 B, C, D, E 的光谱特性曲线图. 由图 10(a) 可知: 第一, 当 HTL1 膜厚分别为 5, 125 和 245 nm 时, 器件的色坐标分别为 (0.1372, 0.0516), (0.1369, 0.0512) 和 (0.1369, 0.0508), 光谱峰值均约位于光波波长 462 nm 处. 此外, 单发光单元器件 B 的光谱强度为 0.82, 器件 C, D, E 的光谱强度分别是 1.38, 1.49, 1.49, 约为器件 B 的 1.7 倍, 则说明两组器件中的发光层一、发光层二的微腔腔长分别位于第一反节点与第二反节点、第二反节点与第三反节点、第三反节点与第四反节点处; 第二, 随着 HTL1 膜厚的增加, 器件 C, D, E 的半峰宽越来越窄, 明显小于器件 B 的半峰宽, 表明 HTL1 膜厚的增加会增强器件中的微腔效应, 使得器件光谱变窄, 即当 HTL1 膜厚为 245 nm 时, 器件中的微腔效应更加显著^[18,19].

图 10(b) 为器件 B, C, D, E 的电流效率-亮度特性曲线图. 可以看出: 当器件的电流密度均为 15 mA/cm² 时, 器件 C, D, E 的电流效率分别为 10.32, 10.68, 10.52 cd/A, 相差很小, 均高于器件 B 的电流效率 6.52 cd/A, 则再次说明当 HTL1 的膜厚为 5, 125, 245 nm 时, 发光层一、二均处于反

节点处. 此外, 表面等离子激元是指金属中的自由电子和外界中的光场发生相互作用的电磁模, 器件外界的光场被共振的电子俘获, 形成了表面等离子激元 (SPP) 效应. 在平坦的金属/介质界面处, 由于金属的欧姆热效应, 表面等离子激元的能量被逐渐耗尽, 125 nm 的 HTL1 会将 SPP 效应削弱, 增大出光效率^[20]. 但当 HTL1 的膜厚为 245 nm 时, 由于器件膜层厚度增加, 降低了器件的出光效率. 也说明器件的发光层位置不是只要在反节点处即可, 当 HTL1 的膜厚为 125 nm 时, 器件性能最佳.

图 10(c) 为器件 B, C, D, E 的电流密度-功率效率特性曲线图. 可以看出: 当器件的电流密度均为 15 mA/cm² 时, 器件 B, C, D, E 的功率效率分别为 5.51, 4.71, 4.57, 4.06 lm/W. 这是由于器件的功率效率与器件的电流效率成正比、与器件的电压成反比, 由于器件中 HTL1 膜厚的增加, 器件的电阻增大, 则当电流密度一定时, 器件的电压增大, 功率效率增大, 即器件 B 的功率效率大于器件 C 的, 器件 C 的功率效率大于器件 D 的效率. 器件 B 的电压最低, 则虽然器件的电流效率较低, 但功率效率最高. 这就是串联器件的劣势.

图 10(d) 给出了器件 B, C, D, E 的电流密度-外量子效率特性曲线图. 可以看出: 在电流密度为 15 mA/cm² 时, 器件 B 的外量子效率为 3.32%, 器件 C 的外量子效率为 5.25%, 器件 D 的外量子效率为 5.43%, 器件 E 的外量子效率为 5.36%, 器件 C, D, E 的外量子效率均高于器件 B 的效率, 器

件的外量子效率是指发射出器件的光子数目占注入电子数目的比例. 产生该结果的原因是: 串联器件 C, D, E 中的电荷产生层 CGL 产生的电子、空

穴与阳极、阴极产生的空穴、电子进行了较高概率的复合, 提高了光子数量, 改善了器件的外量子效率.

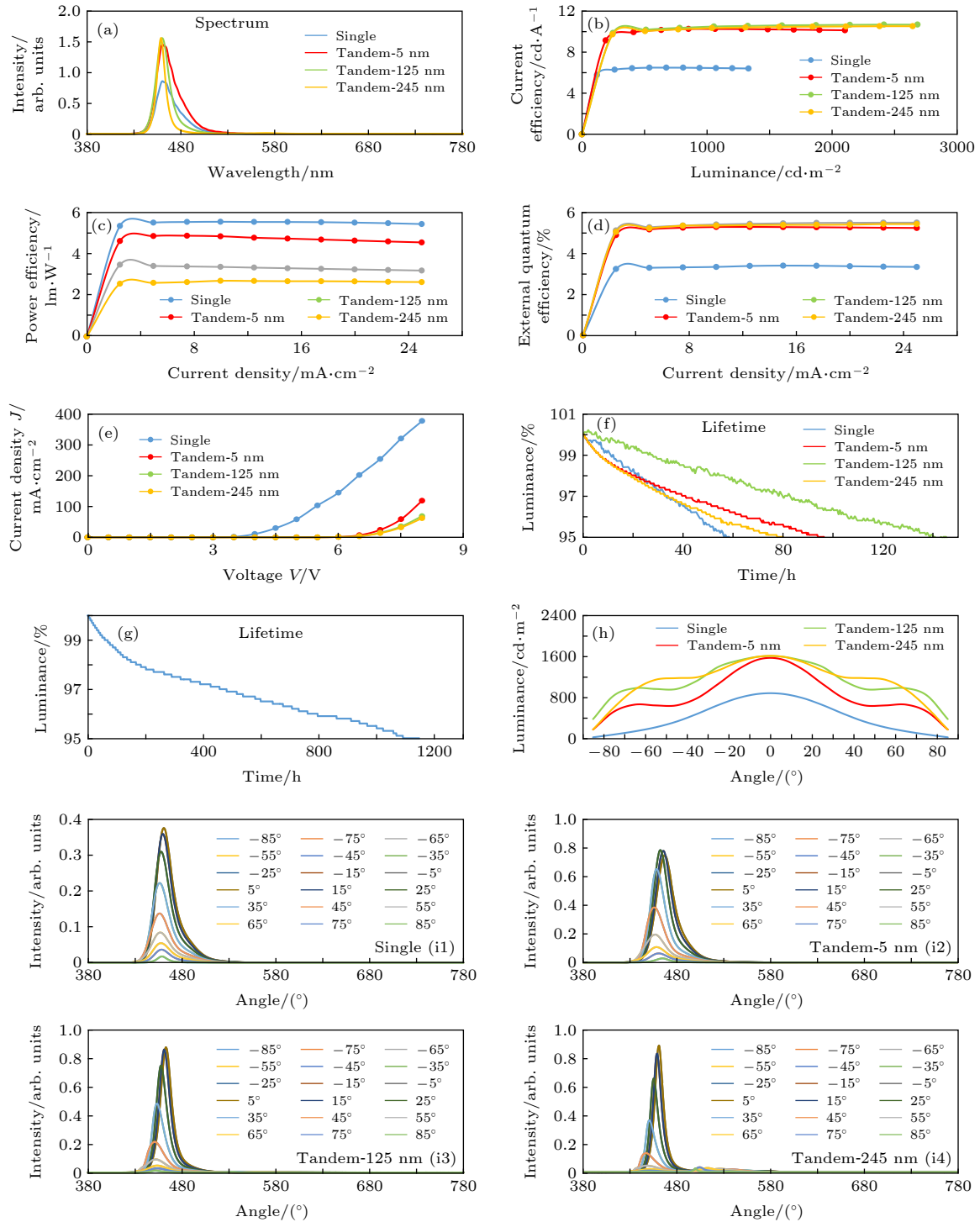


图 10 器件 B, C, D, E 的发光性能图 (a) 光谱特性曲线; (b) 电流效率-亮度特性曲线; (c) 电流密度-功率效率特性曲线; (d) 电流密度-外量子效率特性曲线; (e) 电流密度-电压特性曲线; (f) 寿命特性曲线@50 mA/cm²; (g) 寿命特性曲线@15 mA/cm²; (h) 亮度-视角特性曲线; (i) 光谱-视角特性曲线

Fig. 10. The EL performance of devices B, C, D and E: (a) The spectrum characteristics; (b) the current efficiency-luminance characteristics; (c) the current density-power efficiency characteristics; (d) the current density- external quantum efficiency characteristics; (e) the current density-voltage characteristics; (f) the lifetime characteristics @50 mA/cm²; (g) the lifetime characteristics @15 mA/cm²; (h) the luminance-angle characteristics; (i) the spectrum-angle characteristics.

表 3 器件 B, C, D, E 的性能参数
Table 3. Performance parameters of devices B, C, D and E.

Device@15 mA/cm ²	V/V	L/cd·m ⁻²	CE/cd·A ⁻¹	PE/lm·W ⁻¹	EQE/%	CIE _x	CIE _y	LT95(h) @50 mA/cm ²
B	3.71	978	6.52	5.51	4.08	0.1376	0.0514	58.26
C	6.87	1548	10.32	4.71	6.62	0.1372	0.0516	93.88
D	7.33	1603	10.68	4.58	6.86	0.1369	0.0512	140.65
E	8.12	1579	10.53	4.06	6.77	0.1369	0.0508	79.88

图 10(e) 为器件 B, C, D, E 的电流密度-电压特性曲线图. 可以看出: 当这四组器件被施加的电流密度为 15 mA/cm² 时, 器件 B, C, D, E 的电压依次为 3.71, 6.87, 7.33, 8.12 V. 串联器件 C, D, E 的电压均高于器件 B 的电压. 且器件 D, E 的电压均大于器件 B 的电压 6.87 V. 原因可能是: 有机材料均为半导体材料, 即电导率介于有机绝缘体和有机导体之间的一类有机化合物材料, 电导率一般为 10^{-10} — 10^2 ($\Omega\cdot\text{cm}$)⁻¹[21,22]. 随空穴传输层 HTL1 膜厚的增加, 器件中的电阻增大, 电流减小.

图 10(f) 为器件 B, C, D, E 的寿命特性曲线图. 图 10(f) 表明器件 D 寿命 (140.65 h) 长于器件 C 的寿命 (93.88 h), 器件 C 的寿命长于器件 E 的寿命 (79.88 h), 器件 B 的寿命 (58.26 h) 最短. 产生原因可能是: 一方面, 器件 C, D, E 具有两个发光单元, 当发光亮度相等时, 每一发光单元所需的电流较小, 产生的无效能量——热能较少, 可以延长器件寿命, 即长于单发光单元器件 B. 另一方面, 对于器件 C, D, E 而言, 器件 D 的 HTL1 膜厚较厚, 可削弱 SPP 效应, 增大出光效率, 延长器件寿命; 并且, 由于器件 D, E 中的 HTL1 膜厚较厚, 可以起到包裹 Partical 的作用, 同样使器件寿命得到提高. 产生该现象的原因可能为: 依据瓦格纳热击穿理论, 当器件的厚度较薄时, 在驱动电压的驱动下, 器件在发生热击穿时更易于形成新的通道, 即电荷沿因 Partical 引起的 HTL1 薄膜所形成的裂痕进行迁移, 使器件的可发光区域的面积不断减小, 故在发生热电击穿后器件寿命缩短; 而对于器件中 HTL1 膜层较厚的器件, 当器件发生热电击穿时, 随着时间的增加器件较难形成新的通道, 即未产生新的 Partical 裂痕, 所以器件在热电击穿后其可发光区域面积减小速率较小, 器件的亮度随时间的增加基本保持不变, 即器件寿命较长[23]. 但因器件 E 的膜厚较厚, 则可能由于自身电阻较大, 则相等时间、相等电流下, 器件产生的热能较大, 则加速了器件寿命的缩短, 即串联器件的发光层分别处

于第二反节点与第三反节点处, 器件性能最佳.

此外, 针对寿命性能最佳的器件 C, 测试了在 15 mA/cm² 的电流密度下, 其亮度衰减到 95% 的寿命为 1091.55 h, 测试结果如图 10(g) 所示. 原因是: OLED 器件在发光过程中产生的焦耳热会导致器件温度持续升高, 过多的热量引起材料发生形变与结晶, 进而产生电荷陷阱, 使得到达发光层的电荷减少, 发光层形成淬灭中心, 器件亮度衰减, 寿命缩短.

图 10(h) 所示为器件 B, C, D, E 在电流密度为 15 mA/cm² 时的亮度-视角特性曲线. 视角是指观测角度与器件表面法线之间的夹角. 单发光单元器件 B 的正面亮度约为 870 cd/m², 顶发射串联器件 C, D, E 的正面亮度均约为 1600 cd/m². 因测试视角的机台与测试 IVL 的机台为两种设备, 视角亮度数据与 IVL 测试数据略有差异. 对于单发光单元器件 B, 随着视角的增大, 器件亮度依次减小. 当观测角度为 40° 时, 器件 C (HTL1 膜厚为 5 nm) 的亮度为 697 cd/m², 器件 D (HTL1 膜厚为 125 nm) 的亮度为 1018 cd/m², 器件 E (HTL1 膜厚为 245 nm) 的亮度为 1180 cd/m²; 当观测角度为 50° 时, 器件 C (HTL1 膜厚为 5 nm) 的亮度为 630 cd/m², 器件 D (HTL1 膜厚为 125 nm) 的亮度为 926 cd/m², 器件 E (HTL1 膜厚为 245 nm) 的亮度为 1140 cd/m²; 当观测角度为 60° 时, 器件 C (HTL1 膜厚为 5 nm) 的亮度为 660 cd/m², 器件 D (HTL1 膜厚为 125 nm) 的亮度为 1000 cd/m², 器件 E (HTL1 膜厚为 245 nm) 的亮度为 1000 cd/m². 可以看出: 随着视角的增加, 器件的亮度逐渐减小, 之后略微增加. 其原因可能在于, 在阴极与阳极之间形成的微腔结构具有选择波长和提高正面光耦合输出的能力. 当光子从微腔底部发射出后, 最后会经过 CPL 才能射到空气中. 玻璃基板的折射率为 1.85, 空气的折射率为 1.0, 当光子经过玻璃基板与空气界面时, 会发射全反射, 临界角约为 45°. 传输到 CPL 中且入射角大于临界角的光将无法射

到空气中. 这就解释了器件 C, E 在视角为 45° 左右的光强度减小或增大的趋势问题. 而相对于器件 E 而言, 可能因器件膜厚增加, 随着视角的增大, 器件微腔腔长的变化量占器件自身微腔腔长的比例减小, 则对器件中两发光单元的 optical 影响较小, 但当视角为 60° 时, 器件腔长变化量才引起器件光学性能的波动.

图 10(i) 所示为器件 B, C, D, E 在电流密度为 15 mA/cm^2 时的光谱-视角特性曲线. 由图 10(i1) 可知: 单发光单元器件 B 随着视角的增大 (0 至 85° 或者 0 至 -85°), 器件 B 的光谱强度降低、光谱蓝移. 由图 10(i2)—(i4) 可以看出: 串联器件 C, D, E 随视角的增大, 器件的光谱强度均降低、光谱均蓝移. 但是对于不同的视角, 光谱的峰值和半峰宽几乎不随角度的变化而变化, 基本保持不变. 产生这种现象的原因可能是: 当光从微腔中出射时, 满足公式 $\lambda = 2j = 2nd \cos \theta$, 其中 λ 为出射光波长, n 表示微腔中介质的平均折射率, d 为微腔的厚度, θ 为反射角, 亦能够反映出射角的大小. 一般情况下, 对于确定的器件结构, n 和 d 不变, 那么随着角度 θ 的增加, 波长会减小, 由此可以看出, 随着视角的增加, 光谱出现了明显的蓝移现象.

综上所述, 器件 D (HTL1 膜厚 125 nm) 的发光性能 (当器件的电流密度为 15 mA/cm^2 时, 电流效率为 10.68 cd/A) 约为单发光单元器件 B (当器件的电流密度为 15 mA/cm^2 时, 电流效率为 6.52 cd/A) 的 1.6 倍, 并且优于串联器件 C (HTL1 膜厚 5 nm)、器件 E (HTL1 膜厚 245 nm). 主要因素为: 当 HTL1 的膜厚为 125 nm 时, 可削弱 SPP 效应, 增大出光效率, 并由于膜厚较厚, 既可以起到包裹 Partical 的作用, 又会对膜厚微小波动敏感度降低^[24], 使得顶发射串联蓝光器件的发光性能与寿命长度得到显著改善. 当 HTL1 的薄膜加厚, 器件本身的电阻增大, 所需的电压增大, 虽可削弱 SPP 效应、增大出光效果, 但散热能量加大, 缩短了器件寿命. 即后期制备高性能顶发射串联蓝光器件时, 优先考虑制备发光层位于第二反节点与第三反节点的器件结构.

对实验结果与光学仿真模拟软件模拟结论对比可知: 该光学仿真软件的模拟结果与实验结果变化趋势完全一致, 后期可在实验前先进行器件模拟, 既可以减少材料耗量、优化设备机时, 又可以增大实验成功率.

2.4 重复性验证实验

为了进一步验证“腔长对器件性能的影响趋势呈周期性变化”这一结论的普适性, 将浅蓝光发光材料更换为另一种浅蓝光发光材料, 制备了顶发射串联浅蓝光有机电致发光器件. 通过调节 HTL1 的膜厚, 来验证器件的色坐标、光谱、亮度等器件性能参数随着器件腔长的变化呈现周期性的变化规律.

顶发射串联浅蓝光器件结构为:

器件 F) ITO/Al/ITO/HIL1 (15 nm)/HTL1 (50 nm)/B-EML1 ($30 \text{ nm}, 6\%$)/ETL1 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag ($15 \text{ nm}, 9:1$)/CPL (65 nm);

器件 G) ITO/Al/ITO/HIL1 (15 nm)/HTL1 ($X \text{ nm}$)/B-EML1 ($30 \text{ nm}, 6\%$)/ETL1 (35 nm)/CGL (15 nm)/HIL2 (20 nm)/HTL2 (60 nm)/B-EML2 ($30 \text{ nm}, 6\%$)/ETL1 (35 nm)/LiF (1 nm)/Mg:Ag ($15 \text{ nm}, 9:1$)/CPL (65 nm).

其中 HIL1 为有机蒸镀材料 HAT-CN, HIL2 为有机蒸镀材料 NPB, HTL1 与 HTL2 均为有机蒸镀材料 TCTA, B-EML1 与 B-EML2 均为 ADN:TBPe (2,5,8,11-tert-tertbutylperylene), ETL1 与 ETL2 为有机蒸镀材料 TPBi, CGL 为 LiF (1 nm)/Al (5 nm)/HAT-CN (9 nm), CPL 为 Liq. 器件中各个功能层材料的分子结构式如图 11 所示.

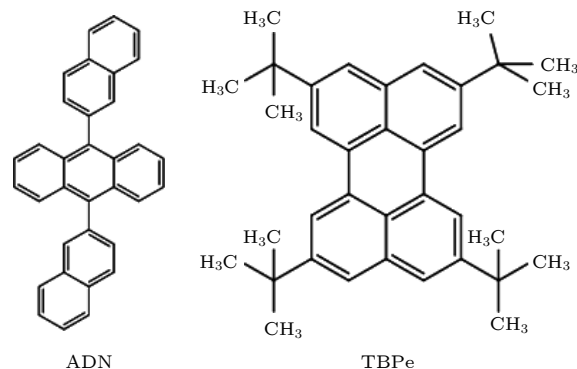


图 11 有机材料的分子结构式

Fig. 11. Molecular structure formula of organic materials.

本顶发射串联蓝光 OLED 器件的模拟仿真结果如图 12 所示.

图 12 为器件 G 的器件模拟特性曲线. 可以看出: 器件 G 中 HTL1 的膜厚增加, 器件的色坐标、光谱与发光亮度均呈周期性变化的趋势. 当 HTL1 的膜厚为 1 nm (器件 H)、 121 nm (器件 I) 和 241 nm (器件 J) 时, 器件的发光特性基本一致,

表明该顶发射串联蓝光器件的变化周期约为 120 nm.

顶发射串联红光 OLED 器件的实际实验结果如图 13 所示, 测试数值如表 4 所列.

图 13 为器件 F, H, I, J 的器件实验测试结果示意图.

图 13(a) 为器件 F, H, I, J 的光谱特性曲线. 可以看出: 单发光单元器件 F 的光谱强度约为顶发射串联器件 H, I, J 的一半, 说明串联器件结构中两个发光单元均正常工作. 当 HTL1 的膜厚分别为 1, 121 与 241 nm 时, 器件的光谱强度大小基本相等, 光谱峰值分别为 460, 459, 459 nm 大致重合, 说明两组器件中的发光层一、发光层二的光学腔长位置正好位于蓝光光谱的反节点处.

图 13(b) 给出了器件 F, H, I, J 的电流效率-亮度特性曲线图. 可以看出: 器件的电流密度均为

15 mA/cm² 时, 器件 F, H, I, J 的电流效率分别为 5.87, 8.26, 11.22 与 10.32 cd/A, 器件 I 的电流效率最高. 可能是由于 HTL1 较厚, 可以改善器件发光层中电子与空穴的复合率, 1 nm 的 HTL1 所提供的空穴传输能力较低, 电子数量多于空穴数量, 多余的电子的堆积, 进一步降低了器件的发光效率. 241 nm 的器件 J 由于 HTL1 较厚, 使得进入到第一发光单元的空穴多于电子数量, 同样降低了器件的发光性能.

图 13(c) 为器件 F, H, I, J 的电流密度-功率效率特性曲线图. 可以看出: 当器件的电流密度均为 15 mA/cm² 时, 器件 H, I, J 的功率效率分别为 3.59, 4.57, 3.90 lm/W. 虽然 HTL1 膜厚的增加, 使得器件电压增大, 但功率效率与电流效率成正比, 电流效率的改善, 进一步提高了器件的功率效率.

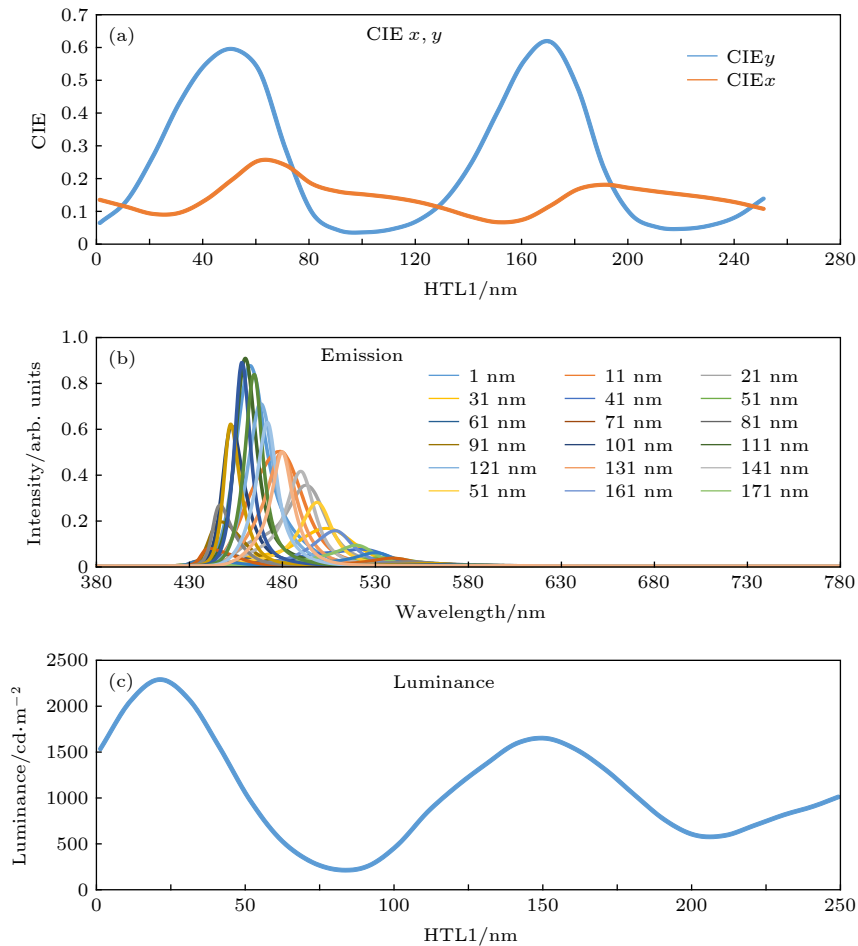


图 12 器件 G 发光性能模拟图 (a) 不同的腔长对 OLED 器件 CIE x, y 的影响; (b) 不同的腔长对 OLED 器件发光光谱的影响; (c) 不同的腔长对 OLED 器件亮度的影响

Fig. 12. Simulated EL performance of devices G: (a) Influence of the length of microcavity on CIE x, y of OLED; (b) influence of the length of microcavity on spectrum of OLED; (c) influence of the length of microcavity on luminance of OLED.

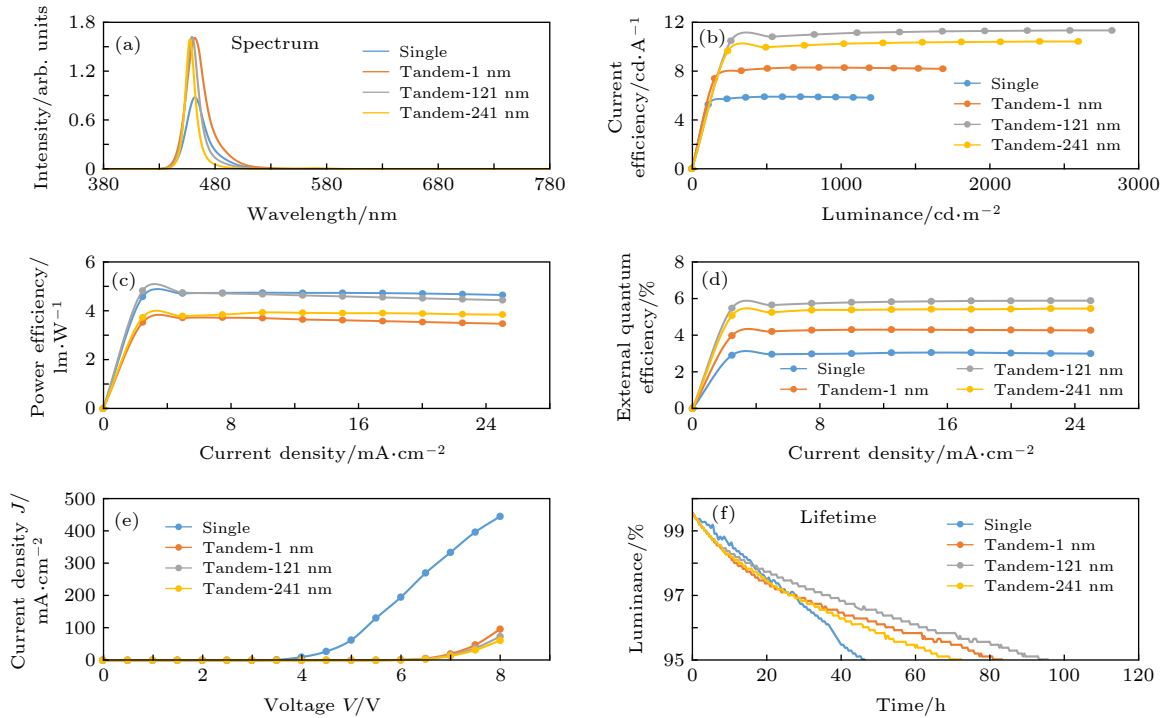


图 13 器件 F, H, I, J 的发光性能图 (a) 光谱特性曲线; (b) 电流效率-亮度特性曲线; (c) 电流密度-功率效率特性曲线; (d) 电流密度-外量子效率特性曲线; (e) 电流密度-电压特性曲线; (f) 寿命特性曲线@50 mA/cm²

Fig. 13. The EL performance of devices F, H, I and J: (a) The spectrum characteristics; (b) the current efficiency-luminance characteristics; (c) the current density-power efficiency characteristics; (d) the current density-external quantum efficiency characteristics; (e) the current density-voltage characteristics; (f) the lifetime characteristics @50 mA/cm².

表 4 器件 F, H, I, J 的性能参数
Table 4. Performance parameters of devices F, H, I and J.

Device@15 mA/cm ²	V/V	L/cd·m ⁻²	CE/cd·A ⁻¹	PE/lm·W ⁻¹	EQE/%	CIE _x	CIE _y	LT95(h) @50 mA/cm ²
F	3.90	880	5.87	4.72	3.05	0.1385	0.0504	46.12
H	7.21	1238	8.26	3.59	4.29	0.1383	0.0508	80.88
I	7.72	1683	11.22	4.57	5.86	0.1379	0.0511	93.21
J	8.31	1547	10.32	3.91	5.35	0.1378	0.0515	72.36

图 13(d) 为器件 F, H, I, J 的电流密度-外量子效率特性曲线图。可以看出: 同样为器件 I 的外量子效率最高, 为 5.86%。再次说明 HTL1 的膜厚为 121 nm 时, 器件中的空穴、电子复合率较佳, 改善了器件的发光性能。

图 13(e) 为器件 F, H, I, J 的电流密度-电压特性曲线图。可以看出: 当两组器件所施加的电流密度为 15 mA/cm² 时, 器件 F, H, I, J 的电压分别为 3.90, 7.21, 7.72, 8.31 V。一方面说明串联器件中的电荷产生层 CGL 的电学性能较佳, 不会消耗太多的电压; 另一方面因有机材料均为半导体材料, 则随着空穴传输层 HTL1 的膜厚增加, 器件中的电阻增大, 电流密度减小。

图 13(f) 为器件 F, H, I, J 的寿命特性曲线图。当器件电流密度为 50 mA/cm² 时, 器件 I (HTL1 膜厚 121 nm) 的寿命 (93.21 h) 较长, 约为单发光单元器件寿命 (46.12 h) 的 2.02 倍。同样由于 HTL1 的薄膜厚度适当, 既可以起到包裹 Partical 的作用, 降低漏电、尖端放电等缺陷的出现概率; 又可以提高第一发光层中空穴与电子的数量平衡性, 降低器件中空穴或电子的堆积现象的出现。

顶发射串联蓝光有机电致发光器件的仿真模拟结果与实际实验结论均表明: 腔长对器件性能的影响趋势是具有周期性的。模拟结果显示: 顶发射串联蓝光器件的变化周期为 120 nm, 且实验结果为: 顶发射串联蓝光器件的变化周期为 120 nm。即

实验结果与模拟结果完全一致. 则后期进行实验之前, 均可应用该实验结论, 以降低实验周期、实验成本.

3 结 论

本文详细研究了双发光单元的顶发射串联蓝光器件的发光单元分别位于不同反节点处, 器件的性能变化. 通过光学仿真软件模拟器件光学性能, 模拟结果表明了器件 HTL1 空穴传输层膜厚为 125 nm 时, 器件性能相比于 HTL1 为 5 和 245 nm 更佳, 即发光单元分别处于第二反节点、第三反节点处, 器件性能更优. 随后将同样结构的 OLED 器件进行了具体的实验, 再次说明 HTL1 膜厚为 125 nm 的器件效率与寿命较好. 当器件电流密度为 15 mA/cm² 时, 器件电流效率为 10.68 cd/A; 当电流密度为 50 mA/cm² 时, 器件亮度衰减到初始亮度的 95% 所需时间 LT95 为 140.65 h. 可能是由于 HTL1 的膜厚较厚时, 既可以改善第一发光单元的空穴与电子平衡度、削弱 SPP 效应, 降低膜厚波动性对器件腔长的影响性; 又可以在一定程度内起到包裹 Partical 的作用, 提高效率, 延长寿命. 这一研究成果为设计高效率、长寿命的顶发射串联器件提供了重要依据.

参考文献

- [1] Liu Y 2017 *M. S. Thesis* (Tianjin: Tianjin University of Technology) (in Chinese) [刘洋 2017 硕士学位论文 (天津: 天津理工大学)]
- [2] Sun H D, Chen Y H, Chen J SH, Ma D G 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **22** 1
- [3] Jing S, Wang H, Liu H H, Du X G, Miao Y Q, Pan C L, Zhou H F 2014 *Chin. J. Liq. Cryst. Displays* **29** 6 (in Chinese) [景姝, 王华, 刘慧慧, 杜晓刚, 苗艳勤, 潘成龙, 周禾丰 2014 *液晶与显示* **29** 6]
- [4] Lee H W, Lee J W, Lee S E, Lee J H, Kim Y K 2017 *J. Lumin.* **188** 112
- [5] Hong K, Lee J L 2011 *Electron. Mater. Lett.* **7** 77
- [6] Hoang V, Lee S E, Lee J G, Kim Y K, Lee J H 2017 *Opt. Express* **25** 31006
- [7] Lee S E, Lee H W, Lee J W, Hwang K M, Park S N, Yoon S S, Kim Y K 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 06F
- [8] Sun J X, Zhu X L, Peng H J, Wong M, Kwok H S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 093504
- [9] Chen C W, Lu Y J, Wu C C, Wu E H E, Chu C W, Yang Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 241121
- [10] Kuehne A J C, Gather M C 2016 *Chem. Rev.* **116** 12823
- [11] Zhang X, Dong H, Hu W 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801048
- [12] Muccini M 2006 *Nat. Mater.* **5** 605
- [13] Uoyama C, Gou S K, Shi Z K, Nomura H, Adachi C 2012 *Nature* **492** 234
- [14] Chen Y, Tian H, Chen Y, Geng Y, Yan D, Wang L, Ma D 2012 *J. Mater. Chem.* **22** 8492
- [15] Ban X, Sun K, Sun Y, Huang B, Ye S, Yang M, Jiang W 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 25129
- [16] Hsu S F, Lee C C, Hu A T, Chen C H 2004 *Curr. Appl. Phys.* **4** 663
- [17] Liao L S, Klubek K P, Tang C W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 167
- [18] Tsutsui T, Terai M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 440
- [19] Yang J P, Bao Q Y, Xiao Y, Deng Y H, Li Y Q, Lee S T, Tang J X 2012 *Org. Electron.* **13** 2243
- [20] Ho M H, Chen T M, Yeh P C, Hwang S W, Chen C H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 233507
- [21] Zhang J 2017 *M. S. Thesis* (Tianjin: Tianjin University of Technology) (in Chinese) [张娟 2017 硕士学位论文 (天津: 天津理工大学)]
- [22] Zhang J, Xin L W, Gao J, Liu Y, Rui H S, Lin X, Hua Y L, Wu X M, Yin S G 2017 *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **28** 12761
- [23] Li T T 2018 *M.S. Thesis* (Shaanxi: Shaanxi University of Science & Technology) (in Chinese) [李亭亭 2018 硕士学位论文 (西安: 陕西科技大学)]
- [24] Udagawa K, Sasabe H, Cai C, Kido J 2014 *Adv. Mater.* **26** 5062

Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices

Zhang Juan Jiao Zhi-Qiang Yan Hua-Jie Chen Fu-Dong Huang Qing-Yu
Kang Liang-Liang Liu Xiao-Yun Wang Lu Yuan Guang-Cai[†]

(*Beijing Oriental Science and Technology Group Co. Ltd., Beijing 102600, China*)

(Received 15 October 2019; revised manuscript received 24 February 2020)

Abstract

Comparing with traditional single organic light-emitting device (OLED), the luminance efficiency and lifetime of tandem OLED are significantly improved. Therefore, it is of crucial importance to in depth study the influence of microcavity effect on the performance of top emitting tandem OLED. In this paper, taking the blue organic light emitting device for example, the change rule of optical and electrical properties of top-emitting tandem blue-light device are studied by combining optical simulation with practical experiments. The specific experiment is as follows. The top emitting tandem blue organic light devices are fabricated, in which the two light-emitting layers are located at the first anti node and second anti node, the second anti node and third anti node, and the third anti node and fourth anti node in the optical structure of the device respectively. It is found that the performance of the device is better when the two emitting layers of the top-emitting tandem blue light device are located at the second anti node and third anti node in the optical structure of the device respectively. That is to say, when the current density of the device is 15 mA/cm², the current efficiency of the device reaches 10.68 cd/A, color coordinate (CIE x , y) of the device is (0.14, 0.05), and the time of the brightness decreases from 100% to 95% in 1091.55 hours, which is likely to be due to the fact that when the cavity length of the device is long, it can not only improve the recombination rate of hole and electron in the first light-emitting unit, weaken the surface plasmon polariton effect, reduce the influence of the fluctuation of the film thickness on the cavity length of the device, but also play a role of wrapping partials to a certain extent, improve the efficiency and prolong the device lifetime. The research results provide an important theoretical and data basis for designing the top-emitting tandem blue light device with high efficiency and long lifetime. In the future, we will continue to systematically and detailedly study the top emitting tandem organic light-emitting devices, which will provide strong support for preparing the laminated devices with high efficiency long-lifetime, and lower cost.

Keywords: optical design, tandem blue organic light emitting devices, current efficiency, lifetime

PACS: 61.82.Fk, 33.60.+q, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.69.20191576

[†] Corresponding author. E-mail: yuanguangcai@boe.com.cn