

引用格式: WANG Zhen, LIANG Zhenshan, XIAO Fei, et al. Second-order Microcavity Length Based on Top-emitting Organic Light-emitting Diodes[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0423002

王振, 梁真山, 肖飞, 等. 基于顶发射有机发光二极管的二阶微腔长度性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0423002

## 基于顶发射有机发光二极管的二阶微腔长度性能研究

王振<sup>1</sup>, 梁真山<sup>1</sup>, 肖飞<sup>2</sup>, 陈家雯<sup>1</sup>, 卢永生<sup>1</sup>, 彭悦<sup>1</sup>, 张文霞<sup>1</sup>, 王玉婵<sup>1</sup>

(1 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

(2 重庆市南岸区教师进修学院, 重庆 400060)

**摘 要:**在玻璃衬底生长金属铝作为不透明阳极, 制备了结构为 Al(100 nm)/TAPC( $x$  nm)/TCTA(10 nm)/TCTA:Ir(ppy)<sub>3</sub>(10%, 25 nm)/TPBi(30 nm)/LiF(2 nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/Alq<sub>3</sub>( $y$  nm) 作为顶发射的有机发光器件, 其中  $x$  为 30、130、160、170 和 180,  $y$  为 20、40、60 和 80, 研究了器件的二阶腔长及出光耦合性能。实验表明, 通过改变空穴传输层的厚度, 使器件微腔长度处于第二阶微腔效应增强区, 可以提高器件的光电性能。同时当光输出耦合层厚度发生改变时, 半透明阴极的光线穿透率与反射率发生改变, 从而有效改善器件的光电性能。当微腔长度为 230 nm、光输出耦合厚度为 80 nm 时, 器件具有最佳的光电性能, 并且光谱的角度稳定性强。器件最大亮度、电流效率和功率效率分别达到 25 960 cd/m<sup>2</sup>、19.1 cd/A 和 16.01 lm/W。

**关键词:** 顶发射有机发光二极管; 微腔效应; 光耦合层; 光电效率; 角度稳定性

中图分类号: TN383+.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215004.0423002

## Second-order Microcavity Length Based on Top-emitting Organic Light-emitting Diodes

WANG Zhen<sup>1</sup>, LIANG Zhenshan<sup>1</sup>, XIAO Fei<sup>2</sup>, CHEN Jiawen<sup>1</sup>, LU Yongsheng<sup>1</sup>, PENG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Wenxia<sup>1</sup>, WANG Yuchan<sup>1</sup>

(1 College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(2 Chongqing Nanan Teacher's Training Academy, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** A Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes (TEOLEDs) with the configurations of Al(100 nm)/TAPC( $x$  nm)/TCTA(10 nm)/TCTA:Ir(ppy)<sub>3</sub>(10%, 25 nm)/TPBi(30 nm)/LiF(2 nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/Alq<sub>3</sub>( $y$  nm) ( $x=30, 130, 160, 170$  and  $180$ ) ( $y=20, 40, 60$  and  $80$ ) was fabricated. The experiments illustrate that photoelectric performance of the device can be improved by changing the thickness of the hole transport layer, which make the length of the device microcavity was in the enhancement zone of second-order microcavity effect. Moreover, by changing the light output coupling layer of the device, the transmittance and reflectance of the cathode of the device were changed, which can effectively improve the photoelectric performance of the device. A green TEOLEDs with the best photoelectric performance is achieved when the length of microcavity is 230 nm and the thickness of optical output coupling is 80 nm. The peak luminance, peak current efficiency and peak power efficiency of the

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61804020), 重庆市基础研究与前沿探索项目(Nos. cstc2018jcyjAX0462, cstc2018jcyjAX0547, cstc2018jcyjAX0560), 重庆市教委科学技术研究项目(Nos. KJQN201900643, KJQN201900630)

第一作者: 王振(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为有机光电材料与器件。Email: wangzhen@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2020-11-05; 录用日期: 2020-12-07

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

TEOLEDs reach 25 960 cd/m<sup>2</sup>, 19.1 cd/A and 16.01 lm/W, respectively.

**Key words:** Top-emitting organic light-emitting diodes; Microcavity effect; Light coupling layer; Photoelectric efficiency; Angular stability

**OCIS Codes:** 230.2090; 230.3670; 160.4890; 310.6860; 310.4165

## 0 引言

有机发光二极管(Organic Light Emitting Diodes, OLED)具有自发光、高亮度、响应速度快以及低功耗等特点,近些年得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。根据器件的出光方向的不同可以分为两类——底发射有机发光二极管(Bottom Emitting Organic Light Emitting Diodes, BEOLED)与顶发射有机发光二极管(Top Emitting Organic Light Emitting Diodes, TEOLED)。BEOLED通常的发光方向为阳极基板方向,而由于基板上存在驱动电路,会影响器件的开口率,造成一部分光的浪费<sup>[6]</sup>。TEOLED的基板上生长的是不透明且具有高反射率的金属阳极,发光方向为半透明阴极。因此与BEOLED相比,TEOLED具有更好的颜色纯度与开口率,对于制备有源矩阵有机发光二极管而言具有更强的优势<sup>[7-10]</sup>。

然而在器件的实际工作过程中,TEOLED与BEOLED相比存在较强的微腔效应<sup>[11-12]</sup>。微腔效应主要是因为发光层位于不透明阳极与半透明阴极之间,器件的微腔长度与发光层的发光波长处于同一数量级时,导致特定的波长会被减弱或者加强<sup>[13]</sup>。虽然利用微腔效应可以提高器件的出光效率,使光谱窄化,但是微腔效应导致TEOLED对光角度具有严重的依赖<sup>[14]</sup>。近些年来,许多研究致力于实现高性能顶发射器件。主要有提高阴极的透明度,如使用合金电极<sup>[11, 15]</sup>、氧化物-金属-氧化物电极<sup>[16]</sup>或直接使用ITO溅射<sup>[17]</sup>等;增加光输出耦合层,有效提高复合阴极的透射率<sup>[18-20]</sup>;调节器件的微腔长度,使器件处于微腔效应加强区<sup>[21-24]</sup>。在改变微腔长度的过程中,主要是通过理论计算进而改变有机层厚度实现的。WANG Qiang等<sup>[25]</sup>将腔长保持在第一阶微腔长度处,获得电流效率为23.28 cd/A,功率效率为21.55 lm/W,对比其制备的BEOLED效率有近一倍的提升。HOFMANN S等<sup>[26]</sup>通过改变腔长,令器件分别位于第一、第二和第三阶微腔长度处,外量子效率分别为29%、17%、12%。然而当前的研究主要是针对第一阶微腔长度进行优化的,而对二阶及以上的微腔长度对器件性能影响的研究鲜有报道。此外,大部分研究致力于提升器件效率,对不同角度光谱稳定性的研究存在不足。与此同时,一阶微腔长度位于100 nm附近,其厚度在实际的大规模生产中受到严重的限制<sup>[27]</sup>,对于要在TEOLED中引入多发光层OLED或叠层结构OLED产生影响,极大的阻碍了TEOLED的发展和应。

因此,本文立足于二阶微腔效应的TEOLED,阴极采用Al/Ag双金属结构<sup>[28]</sup>,理论计算与实验相结合,通过制备一系列顶发射器件,验证器件在二阶微腔长度周围的光电特性,并且通过对器件的光输出耦合层进行优化,最后获得优化后的绿光顶发射器件,改善了器件的角度依赖特性,提升器件的光电性能。

## 1 实验

### 1.1 实验步骤

采用玻璃作为衬底,依次使用丙酮、无水乙醇和去离子水将衬底进行超声清洗,烘干后将衬底放置于压强低于 $7 \times 10^{-5}$  Pa的真空腔体内进行制备。材料蒸镀速率由石英晶振进行监控。其中有机材料与无机材料的蒸镀速率分别为0.1 nm/s和0.2 nm/s。器件制备完成后使用Keithley2450电流-电压源仪与PR670光度计构成的测量系统进行测量,测得器件的电流密度、亮度、电流效率和电致发光光谱等光电数据。整个测试过程在室温和大气环境进行,所有器件均未采用任何封装技术。

### 1.2 OLED器件制备

通过真空镀膜的方法,制备了一系列发光器件。依次蒸镀Al作为不透明阳极,MoO<sub>3</sub>作为空穴注入层,4,4'-环己基二[N,N-二(4-甲基苯基)苯胺](4,4'-cyclohexylidenebis[N,N-bis(p-tolyl)aniline], TAPC)作为空穴传输层,4,4',4'-三(咪唑-9-基)三苯胺(4,4',4'-Tris(carbazol-9-yl)-triphenylamine, TCTA)作为激子阻挡层和发光层主体材料,三(2-苯基吡啶)合铱(Tris(2-phenylpyridine)iridium, Ir(ppy)<sub>3</sub>)作为发光层掺杂材料,1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(1,3,5-Tris(1-phenyl-1H-benzimidazol-2-yl)benzene, TPBi)作为电子传输层,LiF作为电子注入层,Al/Ag作为半透明阴极,8-羟基喹啉和铝(8-

hydroxyquinoline, aluminum salt, Alq<sub>3</sub>)作为光输出耦合层。器件结构如图 1 所示。

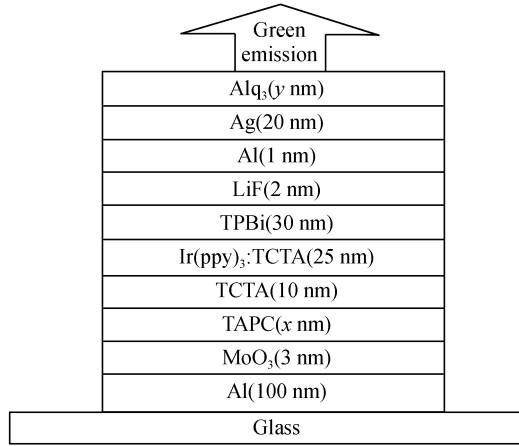


图 1 器件结构图

Fig.1 Device structure diagram

## 2 结果与讨论

### 2.1 微腔长度优化

由于顶发射器件是由全反射阳极、有机功能层和半透明阴极组成,当发光区域位于两层电极构成的谐振腔内时,必须要对于微腔效应进行考虑,所以有机腔层的厚度十分重要。存在微腔效应的器件发出的光谱强度  $I(\lambda)$  由式(1)得出<sup>[28]</sup>。

$$I(\lambda) = \frac{(1 - R_h) \left[ 1 + R_f + 2\sqrt{R_f} \cos\left(\frac{4\pi Z}{\lambda}\right) \right]}{1 + R_f R_h - 2\sqrt{R_f R_h} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)} I_0(\lambda) \quad (1)$$

式中,  $I_0(\lambda)$  表示自由空间的光谱强度,  $L$  是微腔光学长度。  $Z$  是发光层与全反射镜之间的距离,  $R_f$  和  $R_h$  分别代表全反射镜与半透明反射镜的反射率。而微腔的光学长度  $L$  表示为

$$L = \sum n_m d_m + \left| \frac{\lambda_q}{4\pi} \sum \phi_i(\lambda) \right| = q \frac{\lambda_q}{2} \quad (2)$$

式中,  $n_m$  是特定材料的折射率,  $d_m$  表示对应材料的厚度,  $q$  (整数) 是发射模的阶数,  $\lambda_q$  是阶数为  $q$  的共振波长,  $\phi_i(\lambda)$  为金属镜面的反射相移。因此,通过改变顶发射器件的有机层长度,可调节器件微腔长度改善器件性能。

通过调整空穴传输层厚度使微腔长度处于第二阶加强区,通过制备一系列器件来获得第二阶微腔长度最佳光电性能。实验中制备了器件 A<sub>1</sub>~A<sub>3</sub>, 其结构为: Glass/Al(100 nm)/MoO<sub>3</sub>(3 nm)/TAPC( $x$  nm)/TCTA(10 nm)/TCTA:Ir(ppy)<sub>3</sub>(10%, 25 nm)/TPBi(30 nm)/LiF(2 nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/Alq<sub>3</sub>(40 nm), 其中  $x = 30, 130, 180$ , 分别代表器件 A<sub>1</sub> 微腔长度为 100 nm、A<sub>2</sub> 微腔长度 200 nm 和 A<sub>3</sub> 微腔长度为 250 nm。器件的光电性能如表 1 所示, A<sub>1</sub> 在亮度、电流效率、功率效率与外量子效率表现最佳, 而 A<sub>2</sub> 最差, A<sub>3</sub> 的光电性

表 1 器件的光电性能

Table 1 Optoelectronic performance of devices under different cavity lengths

Device	Maximum luminance/(cd·m <sup>-2</sup> )	Maximum current efficiency/(cd·A <sup>-1</sup> )	Maximum power efficiency/(lm·W <sup>-1</sup> )	EQE
A <sub>1</sub>	80 850	48.61	39.4	13.20%
A <sub>2</sub>	2 814	0.65	0.3	0.19%
A <sub>3</sub>	46 860	35.54	33.05	10.11%
A <sub>4</sub>	10 500	13.51	9.76	4.04%
A <sub>5</sub>	31 260	27.21	25.26	9.09%

能相对  $A_2$  有提升。因为  $A_1$  与  $A_3$  分别为一阶与二阶微腔长度加强区, 而  $A_2$  远离微腔加强区, 导致效率出现明显下降, 从而得出当器件腔长处于一阶加强区与二阶加强区时, 对于器件的光电效率存在加强作用但是二阶加强区的器件效率理论上低于一阶加强区<sup>[21-22]</sup>。图 2 是  $A_1 \sim A_3$  的电流密度-电压 (Current density-Voltage,  $J-V$ ) 特性曲线, 可见, 随着腔长的增加,  $A_2$  与  $A_3$  的电流密度相当于  $A_1$  增加相对缓慢。这是由于空穴传输层变厚, 导致器件串联电阻变大, 故腔长越长, 器件电流密度变化越缓慢<sup>[29-30]</sup>。

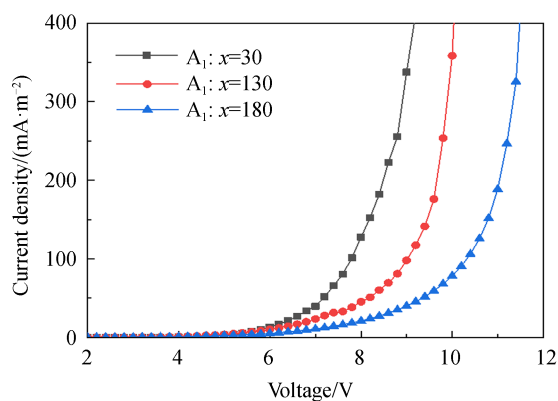


图 2 器件  $A_1$ 、 $A_2$  与  $A_3$  的  $J-V$  特性曲线

Fig.2  $J-V$  characteristic cures of the devices  $A_1$ 、 $A_2$  and  $A_3$

不同角度光谱图如图 3(a)~(c) 所示, 可见器件  $A_3$  随测量角度的增加光谱出现明显蓝移, 而  $A_1$  与  $A_2$  光谱稳定, 其主要原因是器件的腔体构成法布里-珀罗谐振腔, 当观察器件的角度增大时, 由于腔体共振造成光谱蓝移<sup>[31]</sup>。随后, 通过减少微腔长度制备了器件  $A_4$  和  $A_5$ ,  $x$  分别为 160、170, 对应器件的腔长分别为 230 nm、240 nm, 其不同角度光谱图如图 3(d)、(e) 所示, 随着腔长变短, 角度稳定性明显增强, 器件  $A_4$  的发光光谱几乎

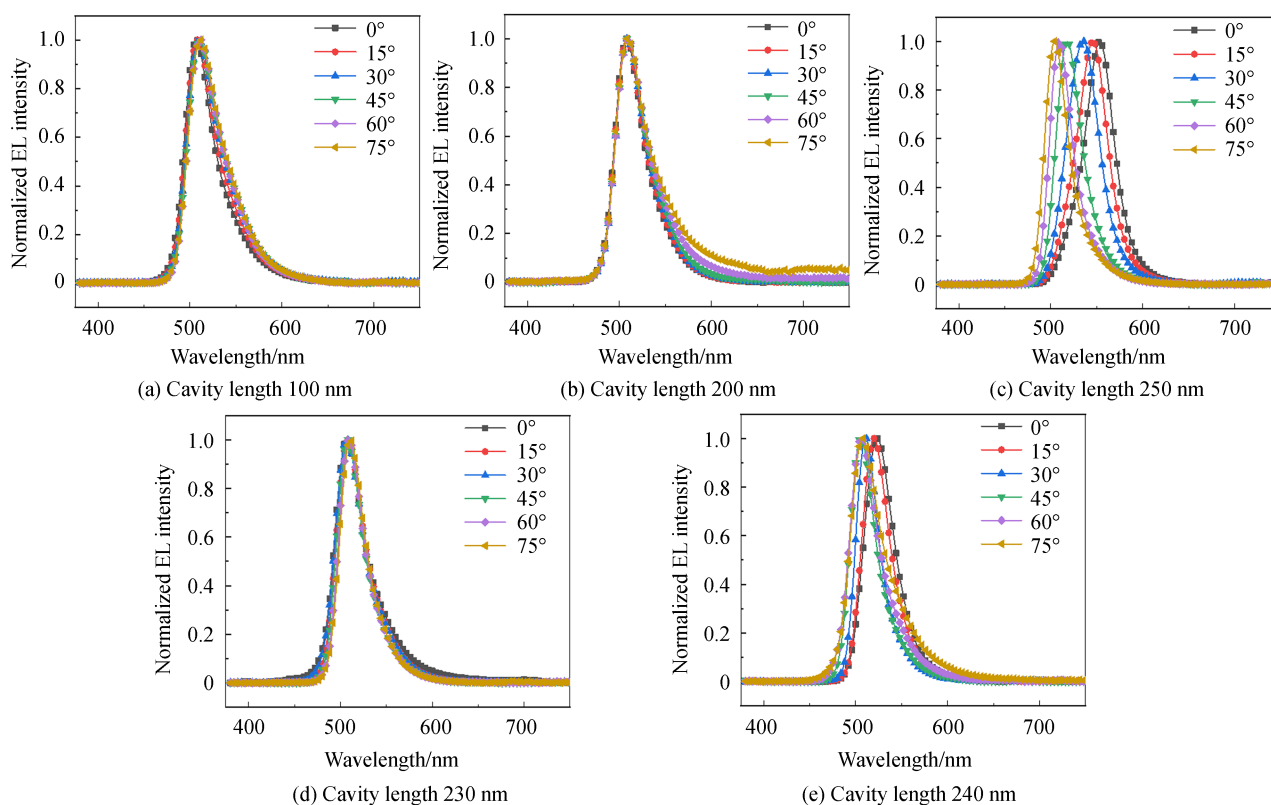


图 3 不同腔长器件多角度归一化光谱

Fig.3 Multi-angle normalized spectra of devices with different cavity lengths

不随角度的变化发生改变。由器件的光电性能表1所示,尽管器件 $A_4$ 光谱角度稳定性增强,但相比于 $A_3$ ,器件的亮度、电流效率、功率效率与外量子效率出现明显下降,从 $46\ 860\ \text{cd}/\text{m}^2$ 、 $35.54\ \text{cd}/\text{A}$ 、 $33.05\ \text{lm}/\text{W}$ 和 $10.11\%$ 下降到 $10\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 、 $13.51\ \text{cd}/\text{A}$ 、 $9.76\ \text{lm}/\text{W}$ 和 $4.04\%$ ,主要原因是 $A_4$ 与二阶微腔加强存在一定偏离,导致其增强的效果没有器件 $A_3$ 处强。所以在二阶微腔长度附近,光谱角度稳定性最佳为微腔长度 $230\ \text{nm}$ ,光电效率最佳为微腔长度 $250\ \text{nm}$ 。

### 2.3 光输出耦合层厚度优化

前面的结果表明,当器件微腔长度为 $230\ \text{nm}$ 时,光谱的角度稳定性较强,但是其光电效率与腔长 $250\ \text{nm}$ 的器件相比存在明显差距。因此,研究中接着选择在腔长 $230\ \text{nm}$ 时,通过对光输出耦合层进行优化来进一步改善器件性能。选择光输出耦合层材料为 $\text{Alq}_3$ ,制备了器件 $B_1\sim B_4$ : Glass/Al( $100\ \text{nm}$ )/ $\text{MoO}_3$ ( $3\ \text{nm}$ )/TAPC( $160\ \text{nm}$ )/TCTA( $10\ \text{nm}$ )/TCTA:Ir(ppy) $_3$ ( $10\%$ ,  $25\ \text{nm}$ )/TPBi( $30\ \text{nm}$ )/LiF( $2\ \text{nm}$ )/Al( $1\ \text{nm}$ )/Ag( $20\ \text{nm}$ )/ $\text{Alq}_3$ ( $y\ \text{nm}$ ),其中 $y$ 分别为 $20, 40, 60$ 和 $80$ 。器件 $B_1\sim B_4$ 的光谱如图4所示,器件 $B_1$ 与器件 $B_3$ 的光谱随着观察角度变化出现较为明显的蓝移,而器件 $B_2$ 与 $B_4$ 光谱较为稳定。当耦合层厚度为 $40\ \text{nm}$ 与 $80\ \text{nm}$ 时,阴极折射率与光吸收特性符合发光层光谱波长,从而抑制多光束干涉,因此光谱角度稳定性更佳<sup>[32]</sup>。

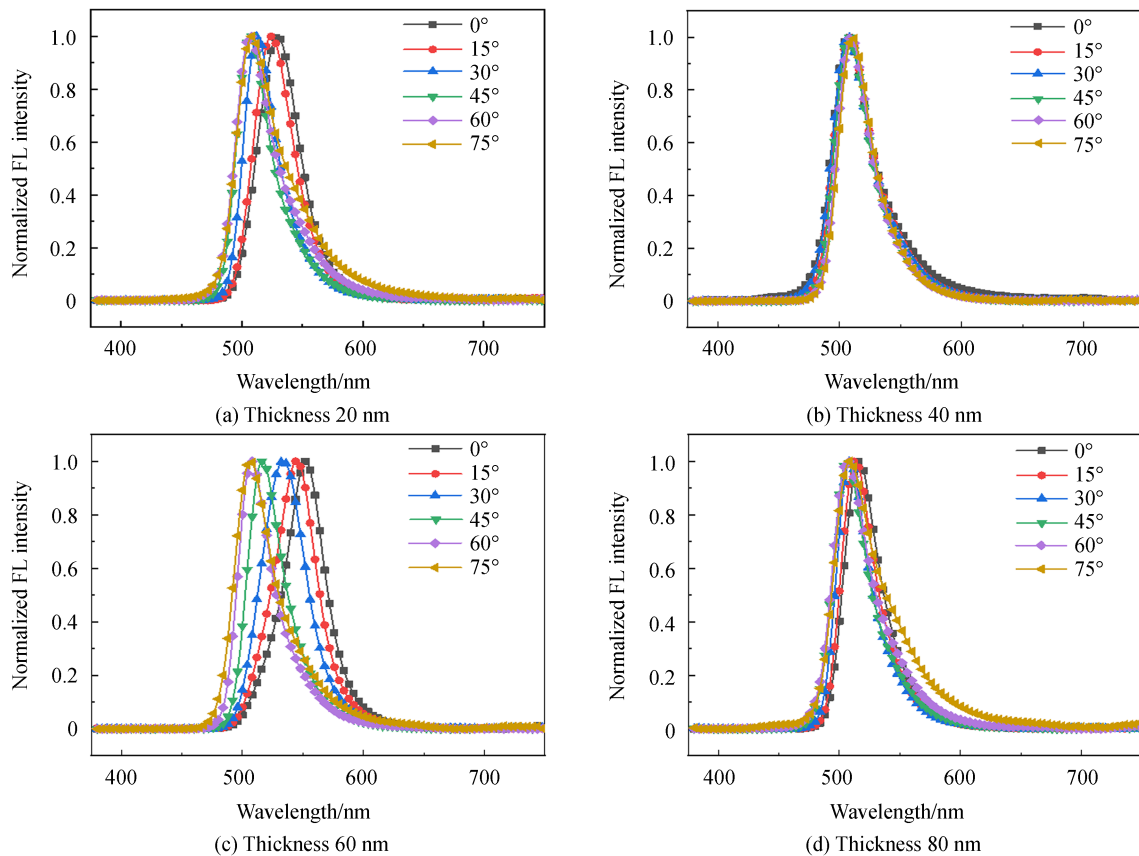
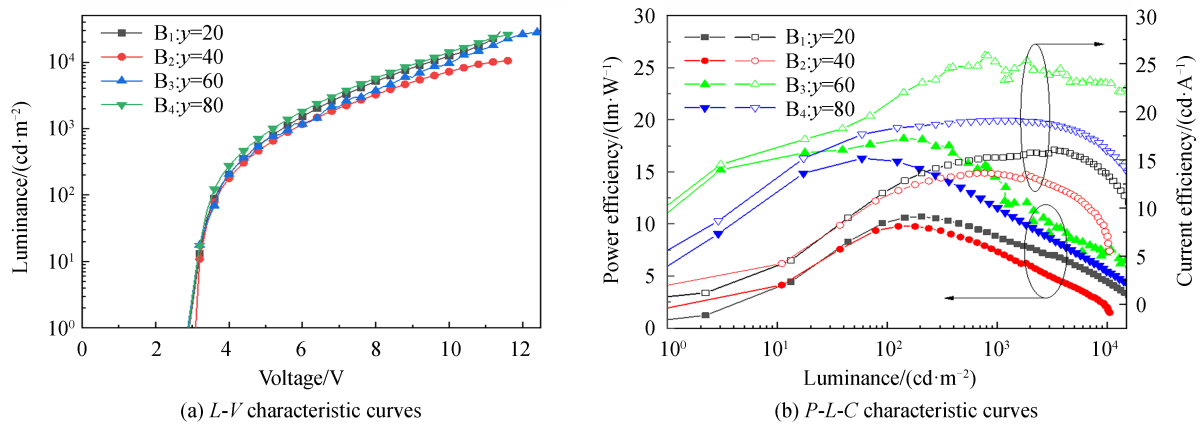
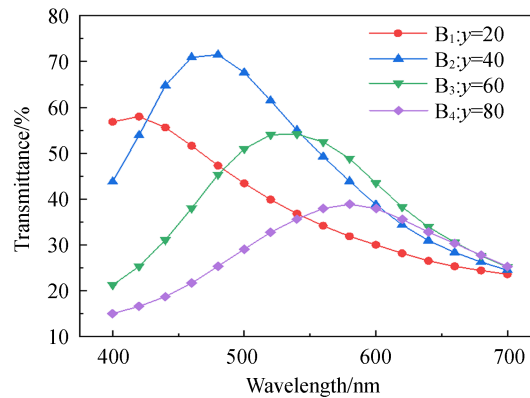


图4 同光输耦合层器件归一化光谱

Fig.4 The normalized spectra of devices with different optical transmission and coupling layers

器件的亮度-电压(Luminance-Voltage,  $L-V$ )与功率效率-亮度-电流效率(Power efficiency-Luminance-Current efficiency,  $P-L-C$ )曲线如图5(a)、(b)所示,器件 $B_1\sim B_4$ 的最大亮度分别为 $28\ 080\ \text{cd}/\text{m}^2$ 、 $10\ 500\ \text{cd}/\text{m}^2$ 、 $28\ 460\ \text{cd}/\text{m}^2$ 、 $25\ 960\ \text{cd}/\text{m}^2$ ,最大电流效率分别为 $20\ \text{cd}/\text{A}$ 、 $13\ \text{cd}/\text{A}$ 、 $25\ \text{cd}/\text{A}$ 、 $19\ \text{cd}/\text{A}$ ,最大功率效率为 $10.7\ \text{lm}/\text{W}$ 、 $9.76\ \text{lm}/\text{W}$ 、 $18.19\ \text{lm}/\text{W}$ 、 $16.01\ \text{lm}/\text{W}$ 。器件 $B_1\sim B_4$ 阴极透射曲线如图6所示。由于改变光输出耦合层引起器件阴极的穿透率与反射率发生改变,器件的微腔效应会影响光束的增强因子,从而导致器件在不同光耦合层厚度时,器件效率不同<sup>[33]</sup>。 $B_3$ 的光输出耦合层具有最大增强因子, $B_4$ 、 $B_1$ 与 $B_2$ 增强因子依次减小,所以微腔效应对器件性能的提升变小,器件效率变低。

图5 器件 $B_1 \sim B_4$ 的 $L-V$ 和 $P-L-C$ 特性曲线Fig.5  $L-V$  and  $P-L-C$  characteristic curves of devices  $B_1 \sim B_4$ 图6 器件 $B_1 \sim B_4$ 透射曲线Fig.6 Cathode transmission curves of devices  $B_1 \sim B_4$ 

综上所述,当器件处于第二阶微腔长度时,光输出耦合层的变化引起阴极的反射率与透射率的变化,并且厚度为40 nm与80 nm时器件的光谱稳定性较强。在光输出耦合层厚度为80 nm时,相比于厚度为40 nm,亮度提升一倍,电流效率提高46%,功率效率提高56%。

## 4 结论

通过对器件的腔长研究,结果表明,改变器件的空穴传输层的厚度使得器件处于微腔效应第二阶微腔长度的位置,在腔长为230 nm时,器件处于二阶微腔加强区附近,器件的光谱在不同角度下相对稳定。进一步对器件的光输出耦合层的厚度进行优化,随着光输出耦合层厚度的增加,器件的光电特性呈现周期性的变化。当光输出耦合层厚度为80 nm时,器件获得光谱角度稳定性强且效率高的绿光器件,其最大亮度为25 960  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,最大电流效率为19.1  $\text{cd}/\text{A}$ ,最大功率效率为16.01  $\text{lm}/\text{W}$ 。该结果对顶发射在第二阶腔长的应用有参考意义,在大规模生产TEOLED中将产生积极影响。

### 参考文献

- [1] CHENG Tianyou, LEE Jiunhaw, CHEN Chiahsum, et al. Carrier transport and recombination mechanism in blue phosphorescent organic light-emitting diode with hosts consisting of Cabazole- and Triazole-Moiety[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 3612-3654.
- [2] LEE Jaejin, LI Peicheng, KUNG Haoting, et al. Highly efficient top-emission organic light-emitting diode on an oxidized aluminum anode[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(14): 145501.
- [3] SIM Y, LEE H, JUNG H, et al. Hybrid white organic light emitting diodes using dual core blue fluorescent emitter[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19(2): 1141-1144.
- [4] THOMSCHKE M, NITSCHKE R, FURNO M, et al. Optimized efficiency and angular emission characteristics of white

- top-emitting organic electroluminescent diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(8): 83303.
- [5] LIN Wenyan CHEN Ning, et al. Preparation of highly-efficient tandem OLED based on B3PyMPM: Cs [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0123003.  
林雯嫣,陈宁,吴志军,等. 基于B3PyMPM:Cs高效叠层OLED器件的制备[J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 0123003.
- [6] HE Y, HATTORI R, KANICHI J. Four-thin film transistor pixel electrode circuits for active-matrix organic light-emitting displays[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(3): 1199-1208.
- [7] CHO H, SONG J, KWON B, et al. Stabilizing color shift of tandem white organic light-emitting diodes[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 69: 414-421.
- [8] NAJAFABADI E, KNAUER K A, HASKE W, et al. High-performance inverted top-emitting green electrophosphorescent organic light-emitting diodes with a modified top Ag anode[J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(5): 1271-1275.
- [9] WU Zhijun, GUO Hengqun, WANG Jiaxian. Highly efficient green top-emitting organic light-emitting devices with metal electrode structure[J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38(6-7): 686-689.
- [10] CHEN Shufen, DENG Lingling, XIE Jun, et al. Recent developments in top-emitting organic light-emitting diodes[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(46): 5227-5239.
- [11] KWON S K, LEE E H, KIM K S, et al. Efficient micro-cavity top emission OLED with optimized Mg:Ag ratio cathode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29906-29915.
- [12] WANG Xiao, ZHENG Yanqiong, LIN Yang, et al. Fabrication and characterization of double-sided organic light-emitting diodes using silver and nickel as the metal linking layer[J]. *Displays*, 2016, 44: 37-41.
- [13] DONG Chen, FU Xiangyu, CAO Linyu, et al. Multi-mode organic light-emitting diode to suppress the viewing angle dependence[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(28): 31667-31676.
- [14] JI Wenyu, ZHANG Letian, GAO Ruixue, et al. Top-emitting white organic light-emitting devices with down-conversion phosphors: theory and experiment[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15489-15494.
- [15] CHEN Shufen, JIE Zhonghai, ZHAO Zhenyuan, et al. Improved light outcoupling for top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(4): 43505.
- [16] YU Wenjuan, SHEN Liang, MENG Fanxu, et al. Effects of the optical microcavity on the performance of ITO-free polymer solar cells with WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> transparent electrode [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 100: 226-230.
- [17] YASUDA Y, KOBAYASHI S, UCHIDA T, et al. Top-emission organic light emitting diode with indium tin oxide top-electrode films deposited by a low-damage facing-target type sputtering method[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 698: 137868.
- [18] KNAUER K A, NAJAFABADI E, HASHE W, et al. Stacked inverted top-emitting green electrophosphorescent organic light-emitting diodes on glass and flexible glass substrates[J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(10): 2418-2423.
- [19] CHEN Shufen, ZHAO Yi, CHENG Gang, et al. Improved light outcoupling for phosphorescent top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 153517.
- [20] XIE Wenfa, CHEN Shufen, ZHANG Letian, et al. Top-emitting organic light-emitting devices with different-thickness top silver cathodes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(19): 5888-5891.
- [21] ZHANG Juan, JIAO Zhiqiang, YAN Huajie, et al. Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(9): 229-243.  
张娟,焦志强,闫华杰,等. 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[J]. *物理学报*, 2020, 69(9): 229-243.
- [22] MAN J X, HE S J, SHI C S, et al. Optical design of connecting electrodes for tandem organic light-emitting diodes[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3561-3564.
- [23] CHEN Shufen, ZHAO Zhenyuan, JIE Zhonghai, et al. A green top-emitting organic light-emitting device with improved luminance and efficiency[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): 3738-3741.
- [24] CHEN Shufen, LI Xue, XIE Wenfa, et al. Improved performances in a top-emitting green organic light-emitting device with light magnification[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(10): 3364-3367.
- [25] WANG Qiang, DENG Zhaoqi, MA Dongge. Realization of high efficiency microcavity top-emitting organic light-emitting diodes with highly saturated colors and negligible angular dependence[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 233306.
- [26] HOFMANN S, THOMSCHKE M, FREITAG P, et al. Top-emitting organic light-emitting diodes: Influence of cavity design[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(25): 253308.
- [27] SONG Y H, PARK M J, PODE R, et al. High efficiency top-emission organic light emitting diodes with second and third-order microcavity structure[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2016, 5(1): R3131-R3137.
- [28] JI Wenyu, ZHANG Letian, ZHANG Tianyu, et al. Top-emitting white organic light-emitting devices with a one-dimensional metallic-dielectric photonic crystal anode[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2703-2705.
- [29] JUNG E, LEE H, CHEA H, et al. Effect of hole-transport-layer thickness on deep-blue emission in top-emitting cavity

- organic light-emitting diodes[J]. *Electronic Materials Letters*, 2015, 11(5): 764-768.
- [30] YANG Xiu, LI Weizhi, ZHONG Zhiyou, et al. Influence of thickness of hole transport layer on performance of OLED [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(5): 958-961.  
阳秀, 黎威志, 钟志有, 等. 空穴传输层厚度对 OLED 性能的影响[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(5): 958-961.
- [31] XU Weifeng, HONG Cyuntai, KUO Chenkuan. P-186: reducing angular color shift in RGB OLEDs by the Introduction of a circular polarizer with a diffractive optical element [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 1932-1934.
- [32] WU C, LIN C, HSIEH P, et al. Methodology for optimizing viewing characteristics of top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(20): 3966-3968.
- [33] CHEN Shufen, XIE Wenfa, MENG Yanlong, et al. Effect of 2, 9-dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer on electroluminescent performances in top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(5): 466.