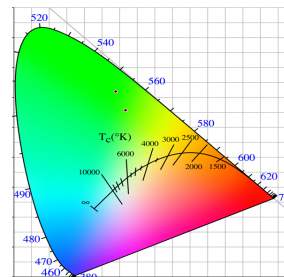




双发光层结构和双金属电极的 绿光微腔 OLED

安涛*, 吴俊宇, 李朋, 杨圣, 丁志明

西安理工大学电子工程系, 西安 710048



摘要: 制备双金属电极的绿光微腔器件, 其结构为 Al(15 nm)/MoO₃(4 nm)/2T-NATA(10 nm)/NPB(15 nm)/NPB:C545T(x%, 20 nm)/Alq₃:C545T(4%, 20 nm)/Bphen(35 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm), 其中 x 为掺杂浓度。实验表明: 当掺杂浓度为 3% 时, 器件有最好的光电性能, 记为器件 B₁。为分析微腔效应, 制备基于 ITO 的参考器件 B₂。B₁ 和 B₂ 色坐标分别为 (0.289, 0.620) 和 (0.317, 0.557), 所以微腔器件的发光颜色更绿。在 100 mA/cm² 时, 器件 B₁ 和 B₂ 的亮度分别为 5076 cd/m² 和 4818 cd/m², 且最大亮度为 9277.7 cd/m², 10440 cd/m²; 在 100 mA/cm² 时, 器件 B₁ 和 B₂ 的发光效率为 6.0 cd/A 和 5.61 cd/A, 且最大发光效率分别为 8.6 cd/A 和 7.97 cd/A。与参考器件相比, 绿光微腔器件具有更好的发光效率和颜色纯度, 其主要归因于微腔效应。

关键词: OLED; 绿光微腔器件; 双发光层结构; 双金属电极

中图分类号: TN31

文献标志码: A

Green OLED based on double metallic mirrors in microcavity structures and double light-emitting structure

Tao An*, Junyu Wu, Peng Li, Sheng Yang and Zhiming Ding

Department of Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: Green microcavity organic light-emitting diodes (OLEDs) are fabricated by using double metallic mirrors in microcavity structures and double light-emitting structures. The structure of the device consists of Al(15 nm)/MoO₃(4 nm)/2T-NATA(10 nm)/NPB(15 nm)/NPB:C545T(x%, 20 nm)/Alq₃:C545T(4%, 20 nm)/Bphen(35 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm), where x is the doping concentration. When the doping concentration is 3%, the device has the best photoelectric properties, which is named as device B₁. The reference device B₂ is prepared based on ITO, for the analysis of microcavity effect. B₁ and B₂ CIE are (0.2889, 0.620) and (0.3168, 0.5571), so the microcavity device could emit more green light. At 100 mA/cm², the brightness of devices B₁ and B₂ is 5076 cd/m² and 4818 cd/m², and the maximum brightness of the both devices are 9277.7 cd/m² and 10440 cd/m². At 100 mA/cm², luminance efficiency of devices B₁ and B₂ are 6.0 cd/A and 5.61 cd/A, and the luminance efficiency of the both devices are 8.6 cd/A and 7.97 cd/A. Compared with the reference devices, green microcavity device has a higher current efficiency and better color purity, which attributes to the microcavity effect.

Keywords: OLED; green microcavity device; double light-emitting layer structure; double metallic mirrors

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.012

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(3): 356–361

收稿日期: 2016-09-28; 收到修改稿日期: 2016-12-19

* E-mail: antao@xaut.edu.cn

1 引言

OLED (organic light-emitting diode)具有高亮度、高对比度,以及柔性和曲面等优越性能,因此在固体照明和平板显示方面备受重视^[1-4]。为提高器件的光电性能,目前主要从三个方面入手:一是工艺方面,采用涂敷工艺或者激光加热转换工艺(laser induced thermal image, LITI)形成三基色阵列;二是分子方面,研究新型的有机发光分子材料,比如新型的热激活延迟荧光材料(thermally activated delayed fluorescence, TADF)^[5],其内量子效率理论可达到100%,比常规荧光材料的内量子效率大得多;三是器件结构方面,比如采用微腔结构^[6]、量子阱结构^[7]和超薄结构^[8]等。由于振动边带和不均匀加宽效应,无论是有机小分子还是高分子聚合物发光材料,其光谱半宽度 FWHM 往往大于 80 nm,因而在利用红、绿、蓝三基色合成而制备的彩色显示器中利用效率很低。

为了制备具有窄带发射的有机发光二极管,人们将目光转向具有窄带发射的稀土配合物发光材料,但所制备器件的亮度、发光效率及稳定性远远低于一般常用的宽带发射材料制成的器件。另一方面人们通过改变发光二极管的结构,制备有机电致发光的 Fabry-Perot(F-P)光学微腔来获得高亮度的窄带发射。光学微腔不仅实现了窄带发射,而且相对于无微腔结构的器件,发光效率大大增强,并能够实现波长的可调谐性及彩色显示。

微腔研究开始于1991年, Suzuki 等人^[9]利用 L-B (Langmuir-Blodgett)技术制备了光学微腔,其结构为 F-P(Fabry-Perot)微腔而且器件厚度与波长长度相当。通过这种结构大大的改变了有机材料的发光光谱、发光强度和自发辐射寿命,这些都归功于微腔效应。同年, Takada 和 Tsutsui^[10]使用双金属来制备光学微腔器件,其结构为: Ag(36 nm)作为器件阳极, TAD(250 nm)为空穴传输层, NSD(15 nm)作为器件的发光层, OXD(240 nm)为电子传输层, MgAg(250 nm)为器件的阴极。并将其与参考器件作比较(其他不变,阳极改为 ITO),微腔器件的性能发生很大的改变。2013年, Liu Yuefeng 等^[11]研究了基于褶皱阳极 Ag 的顶发光微腔器件,器件可以发白光,而且光谱没有视角依赖性。郭荣新等^[12]研究了基于双金属电极的微腔器件,通过光学模拟的方法可以减弱微腔器件的光谱角度依赖性。李韶杰等^[13]研究了基于蓝色磷光材料 Firpic 和双金属电极 Al 的微腔器件。在12 V 时,器件的亮度可达18870

cd/m²。张麦丽等^[14]制备了基于双金属电极 Al 的红磷光微腔器件。2015年, Jiao Bo 等制备了基于波纹微腔器件^[15]。

本文研究的重点是采用双金属电极作为器件的电极而制备绿光微腔 OLED 层器件,从而得到性能良好的绿光发光器件。工艺采用真空蒸镀,器件的双金属电极为: Al/MoO₃为器件的阳极及空穴注入层, LiF/Al 作为器件的阴极及电子注入层。有机材料 C545T 作为绿光微腔器件的发光材料。最后实验结果表明,与参考器件相比,基于双金属电极和双发光层结构的绿光微腔器件具有更好的发光效率和发光颜色纯度。

2 实验

2.1 实验材料

1) 电极材料

金属铝(Al)和金属银(Ag)常用作 OLED 器件的阴极,因为其有较低的功函数,能有效地从阴极注入电子。本文采用 Al 做器件的阴极,主要是因其工艺简单,容易控制。为了进一步提高器件的电子注入能力,可以在有机层/Al 间加入薄层氟化锂(LiF)。由于要制备双金属电极的微腔 OLED, Al 也可以用来作为器件的阳极。但是其较低的功函数(4.3 eV)与有机层的 HOMO 能级相差较大,从而会形成大的能级势垒,不利于空穴的注入。同样,为提高器件的空穴注入能力,可以用 MoO₃来修饰阳极表面,降低能级势垒,从而大大增强空穴注入能力。

本文的金属材料 Al 采购于郑州化玻仪器供应站,材料的纯度≥99.99%;氟化锂(LiF)采购于吉林奥莱德光电有限公司,其纯度≥99.9%。

2) 有机材料

本实验主要用到的有机功能材料有: 2T-NATA: (4', 4', 4''-[N,N-(2-naphthyl)-N-phenylamino]-triphenylamine), 空穴传输材料: NPB(N, N'-Bis(naphthalene-1-yl)-N, N'-bis(phenyl)-benzidine), 荧光绿光发光有机材料: C545T(10-(2-benzothiazolyl)-2,3,6,7-tetrahydro-1,1,7,7-tetramethyl-1H,5H,1[H-(1)-benzopyrroprano(6,7-8-i,j)]quinolizin-1-one), 空穴阻挡材料 CBP: (4, 4-N, N'-dicarbazole-biphenyl), 电子传输材料 Alq₃: (8-羟基喹啉)铝(tris(8-quinolinolato)aluminum)和 Bphen: (4,7-diphenyl-1,10-phenanthro-line)。

2.2 器件制备和工艺

绿光微腔器件: Al(15 nm)/MoO₃(4 nm)/2T-NATA

(10 nm)/NPB(15 nm)/NPB: C545T($x\%$, 20 nm)/Alq₃: C545T(4%, 20 nm)/Bphen(35 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm), 其中掺杂浓度 $x=1, 2, 3, 4, 5$ (质量分数比)。测量器件的电学特性、发光光谱和发光特性, 找到 NPB: C545T 的最优掺杂浓度比例。然后制备一个基于 ITO 的参考器件, 其和最优性能的器件比较只有电极不同。

先在玻璃衬底上蒸镀阳极 Al/MoO₃。然后, 蒸镀有机材料, 蒸镀时的大气压约为 5.5×10^{-4} Pa, 基片的温度控制在 50℃。在阳极上依次真空蒸镀不同的有机传输材料和发光材料, 有机材料的蒸镀速率为 0.5~2 nm/s。最后, 沉积阴极电极 Al。本实验仪器是使用有机真空蒸镀机调控不同蒸镀源的温度来控制有机材料蒸镀速率, 同时利用 SI-TM216 型石英晶体膜厚检测仪检测材料的生长厚度。

3 微腔 OLED 理论

在微腔器件中, 满足谐振条件的光波波长会因强干涉而使得其强度得到大大加强。即腔内产生的光在腔内往返一周产生的总相移是 2π 的整数倍或者总光程是光波半波长的整数倍, 其公式为

$$L(\lambda) \cos \theta = m \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

其中: $L(\lambda)$ 为微腔在共振波长 λ 的总光程, θ 为微腔器件的光发射的内部出射角, $m=1, 2, 3, \dots$ 。

对于本文的双金属电极的微腔 OLED, 其构成图可简化成如图 1 所示。

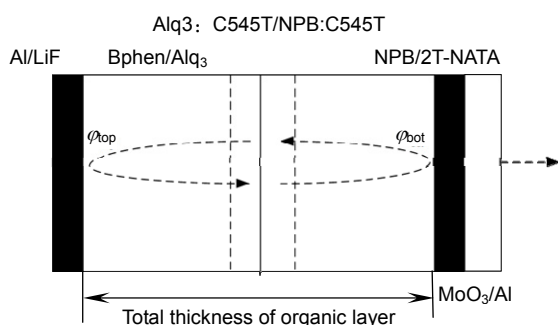


图 1 绿光微腔 OLED 结构。

Fig. 1 Green microcavity OLED structures.

其有效腔长:

$$L(\lambda) = \left| \frac{\lambda \varphi_{\text{bot}}}{4\pi} \right| + \sum_i n_i d_i + \left| \frac{\lambda \varphi_{\text{top}}}{4\pi} \right|, \quad (2)$$

式中: λ 为共振波长, φ_{top} 和 φ_{bot} 为顶部和底部的金属

相移, n_i 为有机层的折射率, d_i 为有机层厚度。一和三是由前后金属发射镜的反射相移引起的穿透深度, 其与金属的厚度、共振波长和出射角都有关系。要想准确地测量金属反射镜的反射相移是相当困难的, 一般都采用理论计算, 然后和实验对比再修正。

当光从微腔中出射时, 理论上其在正方向的光谱表达式^[16]为

$$\left| E_{\text{cav}}(\lambda) \right|^2 = \frac{|E_{\text{nc}}(\lambda)|^2}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi L/\lambda)} \times \frac{(1-R_2)}{i} \sum_i \left[1 + R_1 + 2\sqrt{R_1} \cos\left(\frac{4\pi x_i}{\lambda}\right) \right], \quad (3)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为微腔发射镜的反射率, E_{cav} 和 E_{nc} 分别为微腔的光谱和自由空间有机材料的发光光谱, L 为总的微腔腔长, x_i 为发光偶极子距离金属镜的距离, i 就是把有机层分层 N 层中的一小层。从正面发出的光, 当考虑腔对场的重分布和对有机材料的激发态跃迁速率的影响时, 其发光相对自由空间在 λ 处的增益表达式如下:

$$G_{\text{cav}}(\lambda) = \frac{|E_{\text{cav}}|^2}{|E_{\text{nc}}|^2} \times \frac{\tau_{\text{cav}}}{\tau_0} = \left[1 - \frac{1}{(1+\sqrt{R_2})} \times 4\sqrt{R_1} \sin^2\left(\frac{\varphi_{\text{top}} - 2kL_1}{2}\right) \right] \times \left[\frac{T_2(1+\sqrt{R_1})^2}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2((\varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{bot}} - 2kL)/2)} \right] \times \frac{\tau_{\text{cav}}}{\tau_0}, \quad (4)$$

式中: τ_{cav} 和 τ_{nc} 对应于微腔器件和自由空间的有机材料激发态寿命, T_2 为前反射镜的透射率, k 为有机材料的波矢。

4 结果与讨论

图 2 所示为器件的能级图。当电子、空穴分别从阴极和阳极注入器件时, 经过传输材料 Bphen 和 NPB 传输到发光层。由于电子从 Alq₃ 传输 NPB 需要克服 0.5 eV 的能级势垒, 所以此处会堆积电子。而空穴从 NPB 传输到发光层 Alq₃ 也要克服 0.3 eV 的能级势垒, 所以部分空穴也会堆积在此处, 与电子形成激子。然后激子向两边扩散, 从而被双发光层结构充分利用。由于 Alq₃: C545T 厚度为 20 nm, 小部分空穴会传送到 Alq₃/Bphen 界面, 要克服 0.2 eV 的势垒才能输运到 Bphen 电子传输层。所以此处的空穴被很好的阻挡在 Alq₃/Bphen 界面, 与传输过来的电子形成激子而发绿

光。通过采用双发光层结构和高迁移率的 Bphen 电子传输材料,一方面,可以扩展复合区域,充分利用激子提高发光效率,也能降低大电流下的效率滚降效应;另一方面,可以形成两处复合区域,即 NPB/Alq₃ 和 Alq₃/Bphen 界面。

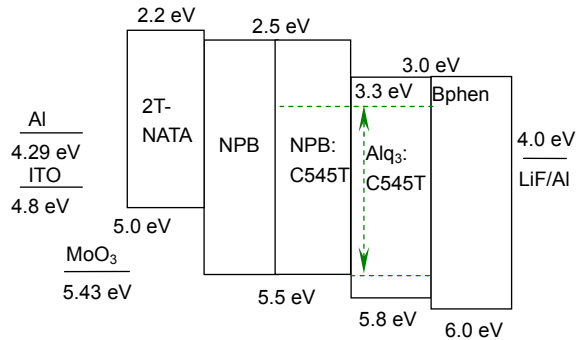


图 2 基于双发光层的绿光器件能级图。

Fig. 2 Energy level diagram of green device based on double EL layer.

图 3 为绿光微腔器件的性能曲线图。图 3(a)为器件在不同 C545T 掺杂浓度下,绿光器件的电流密度-电压(J-V)曲线,在相同电压下,器件的电流密度随着 C545T 掺杂浓度先增大后减小。随着 C545T 掺杂在 NPB 中,由图 2 可知, C545T 的 LUMO 能级比 NPB 的 LUMO 低 0.8 eV,其 HOMO 能级和 NPB 的 HOMO

能级一样, C545T 对电子和空穴有捕获作用。随着掺杂浓度增加,捕获作用增加,促进电子空穴注入,从而电流密度增加。当进一步增加 C545T 掺杂浓度,由于发光材料的迁移率远远小于传输材料的迁移率,从而降低发光层的迁移率,使得电流密度减小。在 10 V 时,器件在不同 C545T 掺杂浓度(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)下的电流密度大小为 130 mA/cm², 140.2 mA/cm², 151 mA/cm², 147.9 mA/cm², 134.2 mA/cm²。绿光器件的亮度-电流密度(L-J)曲线如图 3(b)所示。其变化趋势为:当掺杂浓度增加,发光亮度先增加后变小,与电流密度变化趋势一致。在 100 mA/cm² 时,器件在不同浓度(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)下的亮度为 4301.4 cd/m², 4709 cd/m², 5076 cd/m², 4902 cd/m², 4093 cd/m², 且不同浓度下的最大亮度为 7743 cd/m², 8645 cd/m², 10440 cd/m², 9185 cd/m², 8110.3 cd/m²。

图 3(c)所示为绿光器件的电流效率-电流密度曲线图。其变化趋势和发光特性一样,先增大后变小。100 mA/cm² 时,器件在不同掺杂浓度下的电流效率为 4.8 cd/A, 5.3 cd/A, 6.0 cd/A, 5.59 cd/A, 5.06 cd/A。且每个掺杂浓度下的最大电流效率为 6.7 cd/A, 7.4 cd/A, 8.6 cd/A, 7.99 cd/A, 7.02 cd/A。由上可知,通过在 NPB 中掺杂 C545T,当掺杂浓度为 3%时,器件有最优的电学特性,记为器件 B₁。我们既希望器件有

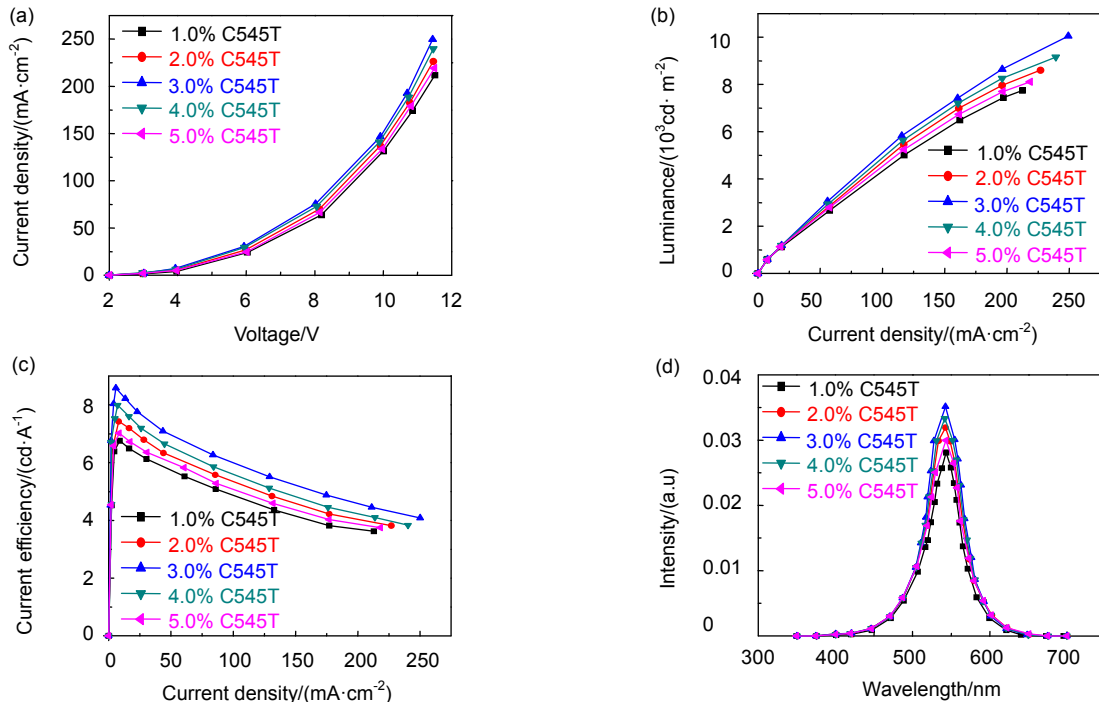


图 3 不同 C545T 掺杂浓度器件的光电性能。

Fig. 3 Optical and electrical properties of different C545T doping devices.

好的电学特性,也希望有良好的光谱特性。当电流为 100 mA/cm^2 时,器件在不同掺杂浓度下的发光光谱如图 3(d)所示。发光光谱的发射峰基本位于 542 nm 处,且器件的半高宽在 48 nm 左右。由上可知,当 C545T 掺杂浓度为 3% 时,此时基于双发光层结构的绿光微腔有良好的光电特性。

为了进一步比较绿光微腔器件 B_1 和基于阳极 ITO 器件的差别,制备了参考器件 B_2 , 其结构为 ITO/MoO₃(4 nm)/2T-NATA(10 nm)/NPB(15 nm)/NPB:C545T(3%, 20 nm)/Alq₃:C545T(4%, 20 nm)/Bphen(35 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm)。在 100 mA/cm^2 时,图 4(a) 为器件 B_1 和 B_2 的电致发光光谱,由图可知,基于 ITO

的器件 B_2 发光光谱的波峰和半高宽分别为 544 nm 和 91 nm 。而基于微腔的器件 B_1 其发光光谱的波峰和半高宽分别为 542 nm 和 48 nm , 可以看到明显的光谱窄化现象。 B_1 和 B_2 其色坐标分别为 (0.2889, 0.6199) 和 (0.3168, 0.5571)。在 100 mA/cm^2 时,器件 B_1 和 B_2 的色坐标如图 4(b)所示。可知,器件 B_1 更靠近纯绿色,所以微腔器件可以通过窄化光谱来提高发光纯度。

使用微腔结构,一方面可以提高器件的发光纯度,另一方面可以提高器件在正方向的发光亮度和发光效率。对器件 B_1 和 B_2 的电学特性进行详细讨论。图 5(a) 为器件 B_1 和 B_2 的电流特性曲线图。从图可知,相同电压下, B_2 器件的电流密度大于 B_1 器件的电流密度,

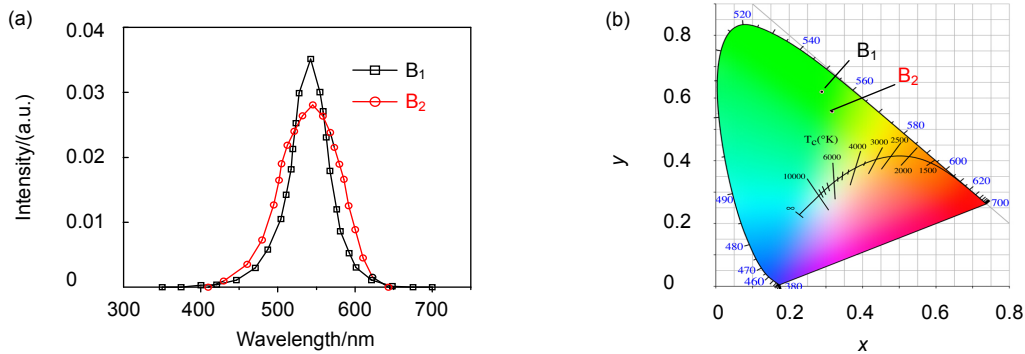


图 4 器件 B_1 和 B_2 对比。
Fig. 4 Comparison of B_1 and B_2 .

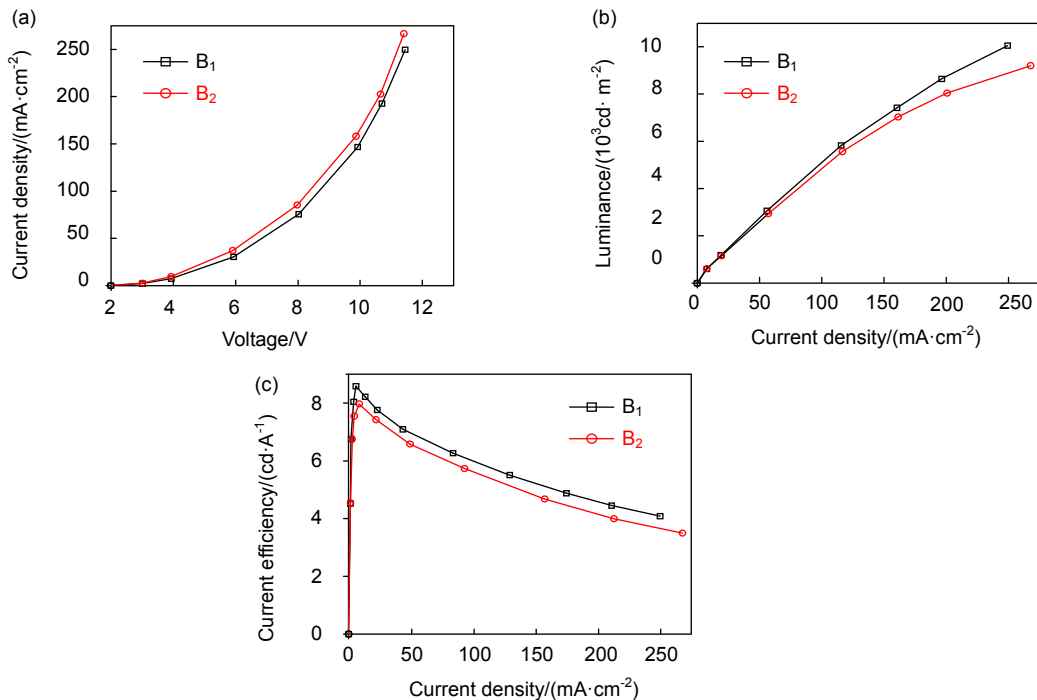


图 5 器件 B_1 和 B_2 性能对比。
Fig. 5 Performance comparison of B_1 and B_2 .

其主要原因是: Al 的功函数(4.29 eV)远高于 ITO 的功函数(4.8 eV),所以 B₁ 器件空穴注入时要克服更大的能级势垒。图 5(b)为绿光器件 B₁ 和 B₂ 的发光特性曲线图。在 100 mA/cm² 时,器件 B₁ 和 B₂ 的亮度分别为 5076 cd/m² 和 4818 cd/m²,且器件 B₁ 和 B₂ 的最大亮度为 9277.7 cd/m² 和 10440 cd/m²,可知 B₁ 器件的发光亮度高于 B₂ 器件,主要是因为 B₁ 为基于双金属的微腔器件,通过合适的设计器件结构能使器件有最优的电学性能。微腔效应使 B₁ 器件在发光波峰处的发光强度增强,从而可以提高正向的发光亮度。图 5(c)为器件 B₁ 和 B₂ 的电流效率-电流密度曲线图。在 100 mA/cm² 时,器件 B₁ 和 B₂ 的发光效率为 6.0 cd/A 和 5.61 cd/A,且 B₁ 和 B₂ 的最大发光效率分别为 8.6 cd/A 和 7.97 cd/A。

综上所述,相对 ITO 阳极的绿光 OLED 器件,采用双金属电极的绿光微腔器件不但光谱特性表现良好,而且其发光亮度和发光效率都得到很大提高。

5 结 论

本文制备了基于双发光层结构和 Bphen 电子传输层的绿光微腔器件。首先,将不同浓度(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)C545T 掺杂在主体材料 NPB 中,研究其光电特性。实验表明,当 C545T 的掺杂浓度为 3% 时,器件 B₁ 有最优的光电特性,其参数为:在电流密度为 100 mA/cm² 下,器件的亮度和发光效率分别为 5076 cd/m² 和 6.0 cd/A,最大发光亮度和发光效率分别为 10440 cd/m² 和 8.6 cd/A。为进一步分析微腔效应,制备参考器件 B₂,其阳极为 ITO(其结构和 B₁ 只是阳极不同)。通过对比两器件 B₁ 和 B₂ 可以看出,微腔器件 B₁ 的发光光谱窄化,发光颜色纯度相对较高,且 B₁ 的发光亮度和发光效率也都相对较高,从而说明得到了一个性能良好的绿光器件。

基金项目

国家自然科学基金(61106043)资助项目。

参考文献

- Gao Qiang, Yin Yongming, Yu Jing, *et al.* High-efficiency phosphorescent organic light-emitting devices based on bipolar host[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(6): 717-721.
高强,尹勇明,于晶,等.基于双极传输母体的高效有机磷光发光器件[J].*发光学报*,2014,**35**(6):717-721.
- Ji Yongcheng, Liu Shihao, Liu Wenbo, *et al.* One-direction-emission red transparent organic Light-emitting devices[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(11): 1354-1358.
纪永成,刘士浩,刘文博,等.单向发射的透明红光有机发光器件[J].*发光学报*,2014,**35**(11):1354-1358.
- Tian Miaomiao, He Xiaoguang, Qi Jingang, *et al.* High efficiency green organic light-emitting diode without roll-off under high current density[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(11): 1307-1310.
田苗苗,贺小光,祁金刚,等.一种高电流密度下效率不降低的绿光有机电致发光器件[J].*发光学报*,2015,**36**(11):1307-1310.
- Tian Miaomiao, He Xiaoguang, Qi Jingang, *et al.* Preparation of transparent conductive praseodymium titanate doped indium oxide film and its application in organic opto-electronic devices[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(10): 1162-1166.
田苗苗,贺小光,祁金刚,等.IPTO 薄膜制备及其在有机光电器件中的应用[J].*发光学报*,2015,**36**(10):1162-1166.
- Uoyama H, Goushi K, Shizu K, *et al.* Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence[J]. *Nature*, 2012, **492**(7428): 234-238.
- Nakayama T, Itoh Y, Kakuta A. Organic photo- and electroluminescent devices with double mirrors[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**(5): 594-595.
- Zhao Bo, Su Zisheng, Li Wenlian, *et al.* High efficient white organic light-emitting diodes based on triplet multiple quantum well structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(5): 053310.
- Zhao Yongbiao, Chen Jiangshan, Ma Dongge. Ultrathin nondoped emissive layers for efficient and simple monochrome and white organic Light-Emitting diodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, **5**(3): 967-971.
- Suzuki M, Yokoyama H, Brorson S D, *et al.* Observation of spontaneous emission lifetime change of dye-containing Langmuir-Blodgett films in optical microcavities[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **58**(10): 998-1000.
- Takada N, Tsutsui T, Saito S. Control of emission characteristics in organic thin-film electroluminescent diodes using an optical-microcavity structure[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**(15): 2032-2034.
- Liu Yuefeng, Feng Jing, Yin Da, *et al.* Viewing-angle independence of white emission from microcavity top-emitting organic light-emitting devices with periodically and gradually changed cavity length[J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(6): 1597-1601.
- Guo Rongxin, Chen Yan, Wang Jiaxian. Study and fabrication of top-emitting organic light-emitting devices[J]. *Semiconductor Technology*, 2013, **38**(3): 189-193.
郭荣新,陈燕,王加贤.顶发射有机发光器件的研制[J].*半导体技术*,2013,**38**(3):189-193.
- Li Shaojie, Li Yanfei. Characteristics of blue phosphorescent microcavity organic electroluminescent light emitting device[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, **24**(10): 1873-1877.
李韶杰,李艳菲.蓝光磷光微腔有机电致发光器件特性的研究[J].*光电子·激光*,2013,**24**(10):1873-1877.
- Zhang Maili, Zhang Fanghui, Zhang Wei, *et al.* Influence of microcavity structure on the properties of red phosphorescent organic light emitting devices[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, **24**(5): 887-891.
张麦丽,张方辉,张微,等.微腔结构对红光磷光 OLED 的性能的影响研究[J].*光电子·激光*,2013,**24**(5):887-891.
- Jiao Bo, Yu Yue, Dai Yang, *et al.* Improvement of light extraction in organic light-emitting diodes using a corrugated microcavity[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(4):4055-4064.
- Deppe D G, Lei C, Lin C C, *et al.* Spontaneous emission from planar microstructures[J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, **41**(2): 325-344.