

文章编号: 0258-7025(2008)12-2005-06

蓝光波段顶发射有机发光二极管

陈淑芬¹ 李雪² 刘式墉³

(¹ 南京邮电大学江苏省有机电子与信息显示重点实验室, 江苏 南京 210046
² 南京工程学院机械工程系, 江苏 南京 211167; ³ 吉林大学国家集成光电子联合实验室, 吉林 长春 130023)

摘要 针对顶发射有机发光二极管(TEOLEDs)中的微腔效应会增加蓝光波段 TEOLEDs 的制作难度这一问题, 提出利用高透明金属阴极并结合在阴极表面生长增透膜的方法来减小二极管阴极的反光性, 从而抑制二极管中的微腔效应(这里主要是指多光束干涉); 同时利用宽角干涉对器件结构进行设计来改善二极管的蓝光强度, 制备了基于有机蓝光材料 4,4'-bis(2,2'-diphenylvinyl)-1,1'-biphenyl 的顶发射有机发光二极管; 优化了增透膜的厚度, 研究了增透膜对于二极管电光性能的影响; 得到了性能(亮度、效率、色纯度等)可以与底发射有机发光二极管相比的蓝光波段 TEOLEDs。

关键词 光学器件; 有机发光二极管; 微腔效应; 顶发射; 蓝光; 宽角干涉

中图分类号 TN383⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.2005

Blue, Top Emissive Organic Light-Emitting Diodes

Chen Shufen¹ Li Xue² Liu Shiyong³

¹ Jiangsu Key Laboratory of Organic Electronics and Information Displays, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China
² School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China
³ State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China

Abstract Blue, top emissive organic light-emitting diodes (TEOLEDs) are hard to fabricate because of strong microcavity effects in these diodes. In this letter blue TEOLEDs based on the blue emissive material, 4,4'-bis(2,2'-diphenylvinyl)-1,1'-biphenyl, are acquired with the choice of a highly transparent cathode together with the utilization of a light outcoupling layer onto the cathode, in which microcavity effects, especially for multiple-beam interference, are restrained by decreasing the reflectivity of the cathode. It is worth mentioning that wide-angle interference is used in this letter to enhance the blue emission. The thickness of the light outcoupling layer is optimized and its effect on the electrical and optical characteristics of the TEOLEDs is also explored. As a result, the high performances such as high brightness, large luminous efficiency, and saturated chromaticity are obtained in the blue TEOLED, which are comparative to those in the bottom emissive OLEDs.

Key words optical devices; organic light-emitting diodes; microcavity effects; top emissive; blue; wide-angle interference

1 引言

与目前已实用化的阴极射线管、液晶、等离子显示相比,有机发光二极管(OLED)因具有色彩丰富、响应速度快、视角宽、重量轻、厚度薄、耗电少、可实现柔性显示等优点备受科学界和产业界的重视,被

普遍认为是很有潜力的下一代平板显示器件。一般,OLED可分为底发射 OLED (BEOLED)和顶发射 OLED (TEOLED)两种。BEOLED是将 OLED制作在覆盖有透明的铟锡氧化物(ITO)或铟锌氧化物(IZO)电极的玻璃衬底上,当对 OLED施加电压

收稿日期:2008-06-31; 收到修改稿日期:2008-09-24

基金项目:江苏省高校自然科学基金基础研究(08KJB510013)和南京邮电大学引进人才科研启动基金(NY207038)资助课题。

作者简介:陈淑芬(1978—),女,博士,讲师,主要从事有机发光二极管和有机太阳能电池器件制备及机理等方面的研究。

E-mail: iamshchen@njupt.edu.cn

时,二极管发出的光经过透明 ITO (或 IZO)电极和玻璃衬底射出^[1];而 TEOLED 是将不透明电极生长在玻璃或硅衬底上,再生长 OLED,对 OLED 施加电压时光从顶部的透明或半透明阴极射出^[2,3]。一般来说,实现高分辨率的 OLED 显示需要四个或者更多的晶体管来驱动每个 OLED 像素点,当使用 BEOLED 时这些晶体管要排布在 OLED 的周围,出现晶体管与 OLED 发光面积相互竞争的问题,降低了显示的开口率。而对于 TEOLED 来说,可以将晶体管制作在 OLED 的下方,避免了上述问题,开口率可接近 100%。利用红、绿、蓝三基色可实现全彩显示,然而,蓝色 TEOLED 的制作是一个难点。原因主要在于,TEOLED 中顶部透明(或半透明)阴极的制备方法直接影响着器件的光电性能。使用溅射的 ITO 或 IZO 时,底部的有机层容易遭到破坏,而使用半透明金属时,在微腔的作用下,满足蓝光谐振波长时的有机层厚度过薄或过厚。过薄的有机层易被电流击穿,过厚的有机层引起较高的驱动电压。

在前人报道的蓝光 TEOLED^[4~6]中,一般使用 Ag/ITO 双层结构作为反射阳极,这里,Ag 电极用于反射光,ITO 厚度可变以调整两反射电极间的腔长。这种方法得到的 TEOLED 色饱和度高,也避免了调整有机层带来的驱动电压升高的问题。近来,Chin 等^[7]报道的蓝光 TEOLED 仍然使用了 Ag/ITO 双层结构作为反射阳极,但是 ITO 厚度固定,通过调整导电性良好的空穴传输层以获得蓝光发射。但使用上述两种方法制备基于红、绿、蓝三基色的全彩显示屏时,制作工艺很复杂。与前面的方法不同,本文利用金属作阴极和阳极并固定腔内有机层的厚度,通过选择透明度高的阴极和增透膜来减弱微腔效应(即减弱多光束干涉, multiple-beam interference),同时利用宽角干涉(wide-angle interference)设计有机层结构来增强蓝光的发射,制备了发光性能得到提高的蓝光 TEOLED。该方法制备基于红、绿、蓝三基色的全彩显示屏时,减少了对板次数,且红、绿、蓝三基色的二极管均可使用相同的阴极和增透膜,简化了制备工艺。

2 理论分析

2.1 法布里-珀罗(Fabry-Pérot)腔

平板微腔是由两个平行镜面构成法布里-珀罗谐振器,满足^[8]

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sum 2nd \cos \theta - \Phi_1(\lambda) - \Phi_2(\lambda) = 2k\pi, \quad (1)$$

式中 λ 代表谐振波长, nd 代表有机层的实折射指数和厚度的乘积, θ 代表光线与镜面法线的夹角, $\Phi_1(\lambda)$ 和 $\Phi_2(\lambda)$ 对应阳极/空穴注入层和电子传输层/阴极界面的反射相移, k 为模数。考虑到光线与镜面不垂直入射($\theta \neq 0^\circ$)时,p 偏振光和 s 偏振光轨迹不再重合,有^[9]

s 偏振光

$$\Phi_{1,2}(\lambda) = \arctan\left(\frac{2n_0 B \cos \theta}{n_0^2 \cos^2 \theta - A^2 - B^2}\right), \quad (2)$$

p 偏振光

$$\Phi_{1,2}(\lambda) = \arctan\left\{\frac{2n_0 \cos \theta [2N_m K_m A - B(N_m^2 - K_m^2)]}{n_0^2 (A^2 + B^2) - \cos^2 \theta (N_m^2 + K_m^2)}\right\}, \quad (3)$$

式中 n_0 为与阳极或阴极相邻的有机层的折射率实部, N_m 和 K_m 分别为阳极或阴极金属层折射率的实部和虚部, $N_1 \cos \theta = (N_m - jK_m) \cos \theta = A - jB$ 。

在满足(1)式的腔体结构中,当两电极均具有较高的反射性时,器件发出的光在两电极间反复振荡,满足谐振波长 λ 的光最终被干涉增强后射出,光谱的半高宽被微腔调制变窄,这类干涉现象称为多光束干涉,如图 1(a)所示;当一个电极具有高反射性,另外一个电极反射性较弱时,多光束干涉的影响较弱,这时候宽角干涉占主要地位,宽角干涉指产生的光经高反射性电极反射回来与发光区的光产生干涉,如图 1(b)。在 TEOLED 中,只考虑宽角干涉时,(1)式中 $\Phi_2(\lambda) = 0$,变为

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sum 2nd \cos \theta - \Phi_1(\lambda) = 2k\pi, \quad (4)$$

这时, nd 是介于发光层和高反射电极之间的有机层的实折射指数和厚度的乘积。

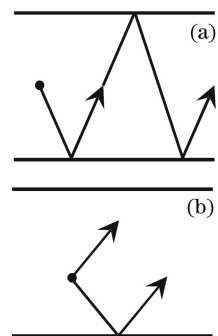


图 1 (a)多光束干涉和(b)宽角干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) multiple-beam and (b) wide-angle interference

2.2 反射率和透射率

对于 p 偏振光^[9],考虑到光非垂直射到镜面时,

有

$$\eta_p = N / \cos \theta, \quad (5)$$

$$R_p = [|r_p| \exp(j\Phi_{pr})]^2 = \left(\frac{\eta_{0p} - \eta_{1p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} \right) \left(\frac{\eta_{0p} - \eta_{1p}}{\eta_{0p} + \eta_{1p}} \right)^* = \left(\frac{n_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} \right) \left(\frac{n_0 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0} \right)^*, \quad (6)$$

$$T_p = \frac{N_1}{n_0} [|t_p| \exp(j\Phi_{pt})]^2 = \frac{N_1}{n_0} \left(\frac{2\eta_{0p} \cos \theta_0}{\eta_{0p} + \eta_{1p} \cos \theta_1} \right) \left(\frac{2\eta_{0p} \cos \theta_0}{\eta_{0p} + \eta_{1p} \cos \theta_1} \right)^* = \frac{N_1}{n_0} \left(\frac{2n_0 \cos \theta_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0 \cos \theta_1} \right) \left(\frac{2n_0 \cos \theta_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_0 \cos \theta_1} \right)^*. \quad (7)$$

对于 s 偏振光^[9]

$$\eta_s = N \cos \theta, \quad (8)$$

$$R_s = [|r_s| \exp(j\Phi_{sr})]^2 = \left(\frac{\eta_{0s} - \eta_{1s}}{\eta_{0s} + \eta_{1s}} \right) \left(\frac{\eta_{0s} - \eta_{1s}}{\eta_{0s} + \eta_{1s}} \right)^* = \left(\frac{n_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \right) \left(\frac{n_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \right)^*, \quad (9)$$

$$T_s = \frac{N_1}{n_0} [|t_s| \exp(j\Phi_{st})]^2 = \frac{N_1}{n_0} \left(\frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_1} \right) \left(\frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_1} \right)^* = \frac{N_1}{n_0} \left(\frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \right) \left(\frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} \right)^*. \quad (10)$$

式中 r_p 和 r_s 是 p 和 s 偏振光波的非涅耳复反射系数, R_p 和 R_s 是 p 和 s 偏振光波的能量反射系数或反射率, θ 代表光线与镜面法线的夹角, N_1 和 n_0 代表电极和相邻于电极的有机物的折射率。

3 实验及结果分析

将覆盖 1600 nm SiO_2 的 Si 衬底清洗干净, 并依次用丙酮、乙醇、去离子水各超声 10 min, 取出用氮气吹干, 置于真空度高于 10^{-4} Pa 的真空镀膜室内生长 Ag 反射阳极, 之后移至紫外灯下照射 30 s 产生一层薄的 Ag_2O 薄膜以改善空穴注入, 再移至真空镀膜室内生长有机和绝缘层, 依次为空穴注入层 m -MTDATA、空穴传输层 NPB、蓝光发光层 DPVBi、电子传输层 Alq_3 以及电子注入层 LiF。其中, m -MTDATA 和 NPB 厚度待定, DPVBi、 Alq_3 和 LiF 厚度分别为 30 nm, 20 nm 和 1 nm。常用的性能稳定的 Ag 阴极反光性强, 透光性较差, 如图 2 所示。同时 Ag 的功函数为 4.6 eV, 与有机层 Alq_3 的最低未被占有分子轨道 (LUMO, 3.1 eV) 间产生了 1.5 eV 的势垒, 不利于电子的注入。而金属 Sm 在可见光范围内具有良好的透光性和低反光性 (如图 2), 同时 Sm 具有低的功函数 (~ 2.8 eV), 有利于电子的注入。不足之处, Sm 的化学性质相对活泼, 不利于制备长寿命的 TEOLED, 因此, 本文将 Sm 和 Ag

结合起来制备了双层结构 Sm/Ag 阴极, 其透光性尤其在蓝光区域的透光性接近 Sm 的透光性, 同时其反光性能较 Ag 电极相比也有了大幅度降低。

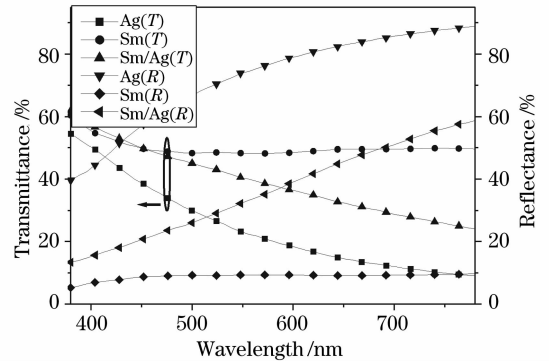


图 2 Ag(23 nm), Sm(23 nm) 和 Sm(11 nm)/Ag(12 nm) 层的反射率和透射率曲线

Fig. 2 Reflectivity (R) and transmittivity (T) characteristics of Ag(23 nm), Sm(23 nm), and Sm(11 nm)/Ag(12 nm) layers

为了进一步改善阴极在可见光区的透光性能, 同时降低其反射性能, 本文选择有机材料 BCP 作为增透膜, BCP 厚度变化对于阴极透射、反射性能的影响如图 3 所示。在此, 器件中 DPVBi 层产生蓝光, 假设激子辐射复合发光位于 DPVBi 与 NPB 界面处, 经过 DPVBi, Alq_3 , LiF, Sm, Ag 和 BCP 射出或被反射回器件内部。从图 3 中可以看出, 当 BCP 厚度等于 25 nm 和 35 nm 时, 仅考虑垂直入射, 多层膜系 DPVBi (30 nm)/ Alq_3

(20 nm)/Sm (11 nm)/Ag (12 nm)/BCP 在 DPVBi 的发光峰(464 nm)附近反射率和透射率分别达到最小值和最大值,为 14%和 60%,具体计算方法见参考文献[10]。低的反射率有利于抑制多光束干涉,透射率高有利于光的导出。在此,分别选择 0, 25 nm 和 35 nm BCP 制备了 TEOLED。

考虑到从器件发出的光一部分直接来自 DPVBi 发光,一部分是 DPVBi 发出的光经过 NPB 和

m-MTDATA,射到 Ag 阳极表面被反射回 DPVBi 层,这两部分光满足宽角干涉条件时,蓝光相干增强,有利于提高蓝光的光强。基于此,结合(4)式和图 4 中 Ag, *m*-MTDATA 和 NPB 的折射指数和消光系数,计算得出 *m*-MTDATA 和 NPB 的厚度为 45 nm 和 5 nm 时,宽角干涉的相干波长位于 452 nm 处。宽角干涉的结果有利于获得色度更纯的蓝光发光。

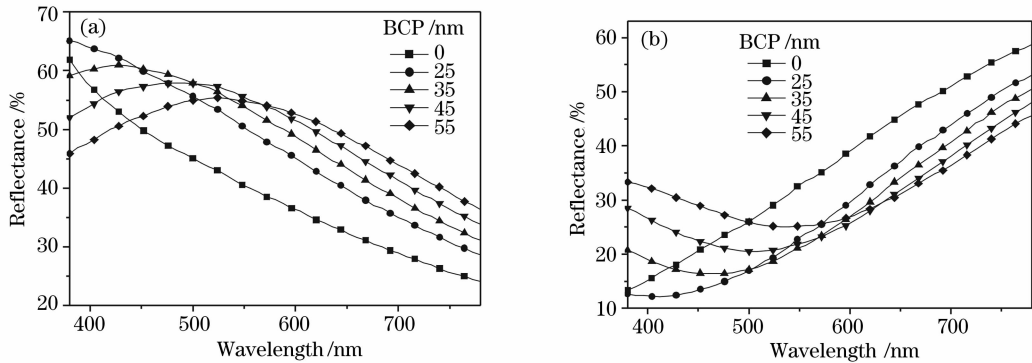


图 3 多层膜系 DPVBi (30 nm)/Alq₃ (20 nm)/Sm (11 nm)/Ag (12 nm)/BCP (0~55 nm) 的透射率(a)和反射率(b)曲线 (1 nm LiF 薄层被忽略)

Fig. 3 Transmittance (a) and reflectance (b) characteristics for DPVBi (30 nm)/Alq₃ (20 nm)/Sm (11 nm)/Ag (12 nm)/BCP (0~55 nm) multilayer system (1 nm thick LiF thin layer is neglected)

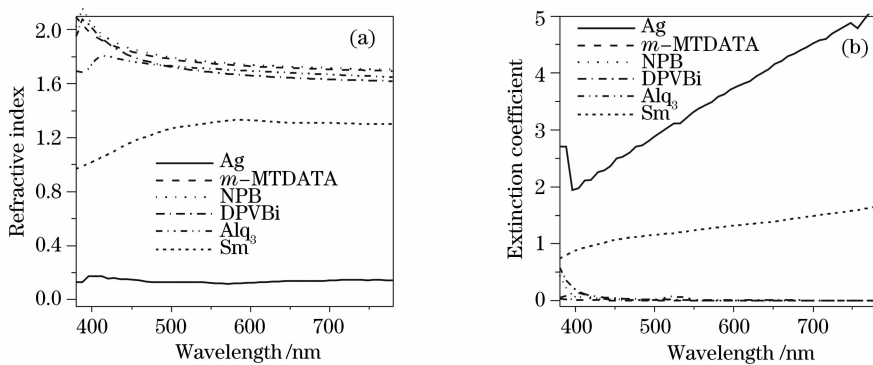


图 4 各材料的折射指数(a)和消光系数(b)

Fig. 4 Refractive index (a) and extinction coefficient (b) for used materials

图 5(a)为 BCP 增透膜厚度分别为 0, 25 nm 和 35 nm 时 TEOLED 的电致发光(EL)光谱。从图中可以看出,未加 BCP 增透膜时,TEOLED 的 EL 光谱包含一 468 nm 的主峰和一约为 575 nm 的肩峰。经计算,仅考虑多光束干涉时,其谐振峰位于 571 nm 处,由此可推测,肩峰的产生是多光束干涉作用的结果。从图 3(b)中可以看出,BCP 厚度为 0 时,阴极的反射率在整个可见光范围也并不高,因此多光束干涉作用也较弱,体现在 EL 谱上仍以 DPVBi 的发光为主。当 BCP 厚度为 25 nm 或 35 nm 时,器件 EL 谱的差别不大,BCP 的加入导致阴极透射率继

续降低,使得多光束干涉作用逐渐消失,光谱主要以 DPVBi 的发光为主,同时出现 456 nm 的次峰,与宽角干涉的相干波长 452 nm 相比,可推测这主要来自于宽角干涉作用的结果。图 5(b)为器件 A(未加 BCP 层)的 EL 光谱随视角的变化曲线。随着视角的变大,光谱峰值逐渐红移,从 0°时的 468 nm 转移到 80°时的 504 nm,明显不同于 TEOLED 中常见的蓝移现象^[11]。当视角偏离 0°时,p 偏振光和 s 偏振光对应的反射率、反射相变等的变化幅度不同,因此要分别考虑 p 偏振光和 s 偏振光在腔体内的变化情况。结合(1)式~(3)式、图 4 中各材料的参数,可以

计算出光在阴极、阳极界面的反射相移随角度发生变化,同时随着视角的增大实际的有效腔长变小。计算的结果,当角度增加到 40° 时,多光束干涉造成的 p 偏振光和 s 偏振光的谐振波长分别为 526 nm 和 483 nm,与 DPVBi 本身的发光波峰 464 nm 叠加,完全有可能形成主峰位于 500 nm 附近的 EL 光谱。当角度增加到 80° 时,p 偏振光的谐振波长位于 703 nm,而 s 偏振光的谐振波长在红外或紫外区域,由于谐振波长远离 DPVBi 的发光区域,因此在光谱上未表现出明显的新峰。但是与 0° 的光谱相比,主波峰仍然保持红移状态,这有待于进一步研究。而对于器件 B (device B),由于阴极反射率的进一步减小,使得器件内部的微腔效应(即多光束干涉)很弱,EL 光谱随角度的变化很小,在 $0\sim 75^\circ$ 范围内几乎没有变化。体现在 CIE 色坐标上,器件 A 的色坐

标 6 V 下位于(0.243, 0.315),电压增大到 17 V,色坐标变化到(0.223, 0.270);而器件 B 在 6~17 V 范围内变化较小,仅从(0.201, 0.263)变化到(0.173, 0.199),色度相对较好,可与基于 DPVBi 发光的 BEOLED 的色度(0.165, 0.169) [11] 相比。

图 6 给出了器件 A 和 B 的亮度-电流密度-电压和效率-电压曲线。从图 6(a)中可以看出,生长 BCP 增透膜对于器件的电流注入几乎没有影响,覆盖增透膜的器件 B 的亮度和效率提高到 1.3 倍以上,最大值分别达到 28167 cd/m^2 和 4.36 cd/A ,电压分别位于 16 V 和 7 V。与器件 A 相比,器件 B 虽然提高了阴极透射率,但是同时抑制了器件中多光束干涉效应带来的光增益,因此,亮度和效率的提高并不很明显。

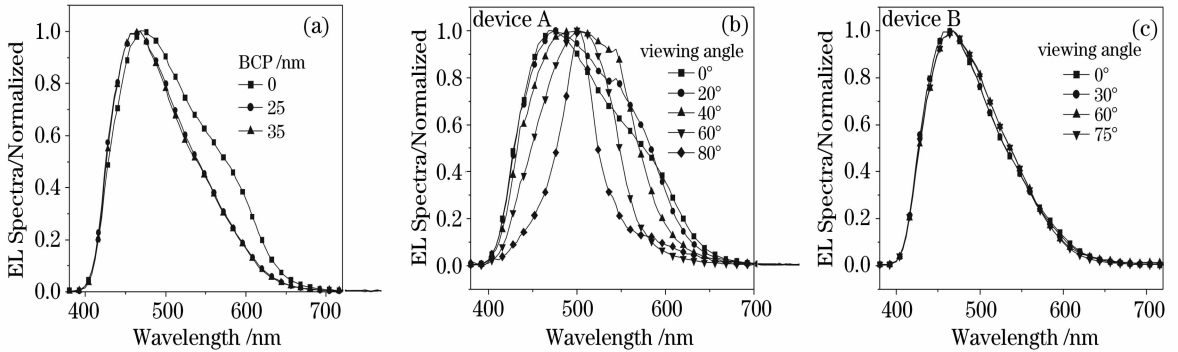


图 5 (a)不同 BCP 增透膜厚度下 TEOLED 的 EL 光谱,BCP 增透膜厚度分别为 0 (b, 器件 A)和 35 nm (c, 器件 B)时, EL 光谱随视角的变化情况

Fig. 5 (a) EL spectra for TEOLEDs with 0, 25 nm, and 35 nm BCP outcoupling layer, dependence of EL spectra on viewing angle for the TEOLED without (b, device A) and 35 nm (c, device B) BCP outcoupling layer

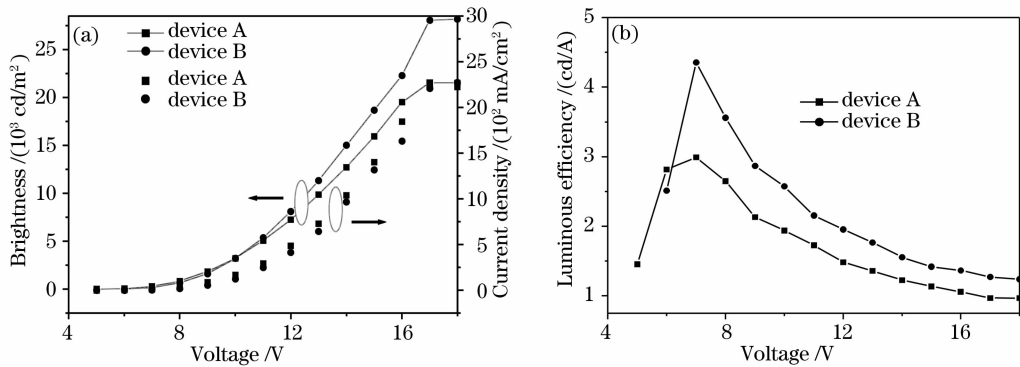


图 6 器件 A 和 B 的亮度-电流密度-电压(a)和效率-电压(b)曲线

Fig. 6 (a) Brightness-current density-voltage and (b) luminous efficiency-voltage characteristics of devices A and B

4 结 论

制备了基于蓝光发光材料 DPVBi 的蓝光波段顶发射有机发光二极管(TEOLED)。其特点如下:

- 1) 首次制作出了基于金属作阴极和阳极的蓝光波段 TEOLED;
- 2) 首次引入有机物 BCP 增透膜/减反膜,通过

调整 BCP 厚度来抑制二极管中的多光束干涉;

3) 首次利用宽角干涉来改善蓝光的强度和色度,并获得了性能可以和底发射有机发光二极管相比的蓝光 TEOLED。

参 考 文 献

- 1 C. W. Tang, S. A. van Slyke. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 913~915
- 2 Cao Jin, Zhang Xiaobo, Wei Fuxiang *et al.*. Novel blue organic light emitting diode with highly saturated color and weak current-induced quenching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 275~278
曹 进, 张晓波, 委福祥 等. 新型高色纯度弱电流猝灭性蓝色有机发光器件[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 275~278
- 3 Liu Shanpeng, Bai Yu, Liu Xiang *et al.*. Lifetime prolongation by graded junction for blue organic light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1687~1690
刘善鹏, 白 钰, 刘 向 等. 利用缓变结提高蓝色有机发光二极管的寿命[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1687~1690
- 4 Zhong Gaoyu, Zhou Suyun, Chen Guanyu *et al.*. An invalidation mechanism in organic light-emitting diodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 35~38
钟高余, 周素云, 陈冠雨 等. 有机发光器件的一种失效机制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 35~38
- 5 M.-H. Lu, M. S. Weaver, T. X. Zhou *et al.*. High-efficiency top-emitting organic light-emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**: 3921~3923
- 6 H. Riel, S. Karg, T. Beierlein *et al.*. Phosphorescent top-emitting organic light-emitting devices with improved light outcoupling[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**: 466~468
- 7 S.-F. Hsu, C.-C. Lee, A. T. Hu *et al.*. Fabrication of blue top-emitting organic light-emitting devices with highly saturated color[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2004, **4**: 663~666
- 8 J. Cao, X. Liu, M. A. Khan *et al.*. RGB tricolor produced by white-based top-emitting organic light-emitting diodes with microcavity structure[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2007, **7**: 300~304
- 9 S.-F. Hsu, C.-C. Lee, S.-W. Hwang *et al.*. Color-saturated and highly efficient top-emitting organic light-emitting devices [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **478**: 271~274
- 10 B. D. Chin. Effective hole transport layer structure for top-emitting organic light emitting devices based on laser transfer patterning[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 5541~5546
- 11 Djurišić A B, Rakić A D. Organic microcavity light-emitting diodes with metal mirrors; dependence of the emission wavelength on the viewing angle[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**: 7650~7656
- 12 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principles of Optical Films[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 63~65
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 63~65
- 13 S. Chen, W. Xie, Y. Meng *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]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**: 054506
- 14 W. Xie, Z. Wu, S. Liu. Non-doped-type white organic light-emitting devices based on yellow-emitting ultrathin 5,6,11,12-tetraphenyl-naphthalene and blue-emitting 4,4'-bis(2,2'-diphenyl vinyl)-1,1'-biphenyl[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: 2331~2334