

# 绿色磷光微腔有机电致发光器件研究

张春玉<sup>1</sup> 王庆凯<sup>1</sup> 荣 华<sup>1</sup> 秦 莉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>吉林建筑大学, 吉林 长春 130118

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 使用典型绿色磷光材料 Ir(ppy)<sub>3</sub> 作为发光层, DBR 和金属 Al 作为微腔的一对反射镜, 制备了结构为 Glass/DBR/ITO/MoO<sub>3</sub>(1 nm)/TcTa(40 nm)/CBP:Ir(ppy)<sub>3</sub>(40 nm,6%)/TPBI(47 nm)/LiF(1 nm)/Al(80 nm) 的绿色磷光微腔有机电致发光器件(MOLED), 同时制作了无腔对比 OLED 器件, 研究微腔结构对器件发光性能的影响。发现 OLED 的电致发光谱(EL) 的峰值是 510 nm, 半峰全宽(FWHM)为 70 nm, MOLED 的峰值是 514 nm, FWHM 为 35 nm, 比 OLED 窄化了 1/2, MOLED 的最大亮度、最大电流效率分别为 143000 cd/m<sup>2</sup> 和 64.4 cd/A, OLED 的最大亮度、最大电流效率分别为 103000 cd/m<sup>2</sup> 和 41.6 cd/A; 测试并计算了器件的外量子效率(EQE), MOLED 和 OLED 的最大 EQE 分别为 18.6% 和 14.3%。结果表明, 微腔器件发光性能比无腔器件得到了很大的改善。

**关键词** 光电子学; 发光二极管; 微腔器件; 有机材料

中图分类号 TN383

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0623002

## Study of Green Phosphorescent Microcavity Organic Light-Emitting Devices

Zhang Chunyu<sup>1</sup> Wang Qingkai<sup>1</sup> Rong Hua<sup>1</sup> Qin Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Green phosphorescent microcavity organic light-emitting devices (MOLEDs) in a architecture of Glass/DBR/ITO/MoO<sub>3</sub>(1 nm)/TcTa(40 nm)/CBP:Ir(ppy)<sub>3</sub>(40 nm,6%)/TPBI(47 nm)/LiF(1 nm)/Al(80 nm) using typical green phosphorescent Ir(ppy)<sub>3</sub> as luminous layer, DBR and Al as a pair of reflector of microcavity are fabricated. For comparison, OLED without cavity is also developed to investigate the effect of microcavity structure on luminescent properties of phosphorescent devices. The peak of electroluminescence (EL) spectrum of OLED is 510 nm, and the full-width at half-maximum (FWHM) is 70 nm. The peak of MOLED is 514 nm and the FWHM is 35 nm. The FWHM of MOLED is reduced by half for the OLED without microcavity. Compared with the EL spectrum of non-cavity OLEDs, the linewidth of MOLED is narrowed. Also, the colour purity of MOLED is improved. For MOLED, the maximum brightness and the maximum current efficiency are 143000 cd/m<sup>2</sup> and 64.4 cd/A, respectively. The maximum brightness and current efficiency of OLED are 103000 cd/m<sup>2</sup> and 41.6 cd/A. The maximum external quantum efficiency (EQE) of the device is tested and calculated, and the maximum EQEs of MOLED and OLED are 18.6% and 14.3%, respectively. The experimental results show that the luminescence properties of microcavity devices are improved greatly compared with that of the no-cavity devices.

**Key words** optoelectronics; light-emitting diodes; microcavity devices; organic materials

**OCIS codes** 230.0250; 230.3670; 140.3948; 160.4890

## 1 引 言

有机电致发光器件(OLED)具有质轻、体薄、高亮度、快响应、低电压、高效率<sup>[1-3]</sup>等优点,被称为新一代显

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(10174077)、吉林省教育厅项目(2013-221)

作者简介: 张春玉(1968—),女,博士,副教授,主要从事有机光电器件及微腔物理方面的研究。E-mail: zhangccy68@163.com

示技术,受到人们广泛的关注。1987年,Tang等<sup>[4]</sup>,选用新材料并采用新结构,将空穴传输层引入到有机薄膜发光器件中,用有机荧光材料 Alq<sub>3</sub>作为发光层,制作了具有双层结构的 OLED 器件。有机发光领域中另一个重大突破是有机磷光发光器件的出现。1998年,Baldo等<sup>[5]</sup>在室温下将磷光材料掺入发光层,实现了三重态磷光发光。由于磷光发光可以利用 75%的三重态能量,理论上可以将器件的内量子效率上限由 25%提升至近 100%,因此具有高发光效率、高能量转化率、高亮度的新型有机磷光材料和新型高效的磷光器件结构成为近年来人们的研究热点<sup>[6-8]</sup>。

光学微腔是指具有高品质因子而尺寸至少有一维小至与谐振光波波长相比拟的光学微型谐振腔。1946年,Purcell<sup>[9]</sup>发现,如果把原子置于尺度与波长同数量级的微腔内,原子的自发辐射会与自由空间中的自发辐射不同。它不是一个孤立原子的运动,会受到微腔的控制而发生变化。

在微腔中,光场已出现量子效应,即微腔效应。如果用光学谐振腔来改变真空电磁场的模式结构就会发现,受激原子的自发辐射有很大改变,有的模式被抑制,有的模式被加强,具体取决于微腔长度的大小和受激原子在微腔内的具体位置。

微腔结构包括平面微腔,微球和微环等结构,最简单的是具有法布里-珀罗(F-P)腔结构的一维平面光学微腔,是由一组平面反射镜组成。微腔的发光在谐振模式(波长)处因相长干涉而得到加强。谐振模式满足的条件是光在腔内往返一周的相位改变是  $2\pi$  的整数倍或光程是波长的整数倍,有机微腔的谐振模式满足 Fabry - Perot 方程<sup>[10]</sup>:

$$(\phi_1 + \phi_2) - \frac{4\pi}{\lambda} \sum_i n_i d_i \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \theta}{n_i} \right) \right] = 2m\pi, \quad (1)$$

式中  $\phi_2$  和  $\phi_1$  分别为分布式布拉格反射镜(DBR)和金属反射镜的反射相移,  $\lambda$  为谐振波长,  $n_i$  和  $d_i$  为腔内各层薄膜的折射率和厚度,总和  $L$  为整个腔内的光学长度,  $\theta$  为外部探测角,  $m$  为模式级数,为整数。

近年来人们将平面光学微腔结构应用于各类光电子器件,比如应用于垂直腔面发射激光器和有机太阳能电池中<sup>[11-13]</sup>;因为 OLED 的总发光层厚度正好也是光波长量级,所以人们更多地把平面微腔结构用在 OLED 中用来改善器件的发光性能,可以提高器件的发光效率和色纯度等<sup>[14-15]</sup>。微腔 OLED 也是最近几年国际上的研究热点,Zhang等<sup>[16-17]</sup>制作出微腔顶发射有机发光二极管,Liu等<sup>[18]</sup>利用在银电极与衬底层之间用光刻胶印刷周期性的显微结构,制作的顶发射微腔白光 OLED,这种微结构,成功抑制了峰值发射波长随视角变化的情况。此外,在不同视角获得了稳定的发光谱和 CIE 色坐标。Zhang等<sup>[19]</sup>把 Au 纳米颗粒热沉积在 DBR 反射镜的玻璃衬底上,导致微腔效应和局部表面等离子体效应的实现。结果显示电流效率与普通氧化铟锡(ITO)阳极相比增加了 72%。Shin等<sup>[20]</sup>为了抑制微腔角度依赖效应和提高光提取,在 OLED 里引入了无规散射纳米结构层。Mazzeo等<sup>[21]</sup>利用多个微腔结构增加光子模式密度来提高白色 OLED 效率,对于磷光材料的微腔 OLED 研究方面,李韶杰等<sup>[22]</sup>制作了磷光金属微腔有机电致发光器件,比较了测量角度和不同掺杂浓度时对 OLED 发光特性的影响;张麦丽等<sup>[23]</sup>讨论了金属腔镜中腔长的变化对器件性能的影响;Xiang等<sup>[24]</sup>讨论了效率增强的磷光微腔绿、红、蓝色 OLED,得出电流效率提高和光谱积分强度增强的结论。但是他们都没有对微腔磷光器件的外量子效率进行相关研究和报道。

利用微腔结构和绿色磷光材料掺杂,制作出微腔有机发光器(MOLED),同时制作一个 OLED 用作对比的无微腔器件。为了改善绿色磷光 OLED 性能,设计谐振波长  $\lambda$  为绿光的中心波长 520 nm 的微腔结构,相应的设计 DBR 反射镜的高反射区中心波长也在 520 nm 处,通过微腔相关公式和 Fabry - Perot 方程进行优化模拟计算,设计 DBR 和金属反射镜的结构和各有机层厚度及发光层在腔中位置和厚度,使发光层处于谐振模式处。

实验所制备的两个器件具体结构分别为

MOLED: Glass/DBR/ITO/MoO<sub>3</sub>(1 nm)/TcTa(40 nm)/CBP:Ir(ppy)<sub>3</sub>(40 nm 6%)/TPBI(47 nm)/LiF(1 nm)/Al(80 nm)

OLED: Glass/ITO/MoO<sub>3</sub>(1 nm)/TcTa(40 nm)/CBP: Ir(ppy)<sub>3</sub>(40 nm 6%)/TPBI(47 nm)/LiF(1 nm)/Al(80 nm)

玻璃做基片,绿色磷光染料 Ir(ppy)<sub>3</sub>掺杂到母体 CBP 中作为发光层,MoO<sub>3</sub>为阳极修饰层,TcTa 空穴注入层,TPBI 电子传输层,以高反射的 Al 和 LiF 作为复合阴极,ITO 做阳极。MOLED 用的透明 DBR 与不透明的 Al 作为一对平面反射腔镜。设计微腔底部 DBR 反射镜的中心波长  $\lambda$  为绿光区域中心的 520 nm,DBR 由光学厚度为

1/4中心波长的高低折射率介质材料依照2[HL]ITO结构沉积而成。这里符号H表示高折射率材料TiO<sub>2</sub>,折射率为2.05,物理厚度为63.4 nm;L表示低折射率材料SiO<sub>2</sub>,折射率为1.46,物理厚度为89 nm;2是周期数;ITO为阳极同时本身可以看作是一层高折射率材料,折射率为2.0,物理厚度为65 nm。器件发光面积为1 mm×1 mm。

## 2 实验方法

在电子束镀膜机中,在玻璃基片上制作中心波长为520 nm的DBR反射镜及阳极ITO导电膜作MOLED基片,只在玻璃基片上镀阳极ITO导电膜作OLED的基片,ITO导电膜面电阻均为100 Ω。制作器件前,基片的清洗工艺如下:将基片依次放入酒精、丙酮和去离子水中超声波清洗5 min,最后用高压氮气吹干。实验所采用的镀膜设备是商品化的OLED有机多功能镀膜机,在沉积功能层前对ITO进行氧等离子体(O<sub>2</sub> plasma)处理1 min,然后在有机材料蒸镀室依次蒸镀不同的有机材料功能层。将发光主体材料和绿色磷光材料分别放入不同的蒸发舟中(不同加热源共蒸进行掺杂),通过控制舟的温度来调节蒸发速率,进而调节发光层中磷光材料的掺杂比例。最后在金属材料蒸镀室,蒸镀LiF膜和Al膜,Al膜作为阴极同时也是微腔器件的另一个反射镜,所有材料蒸发真空度优于5×10<sup>-4</sup> Pa,沉积速率0.1~0.2 nm/s,器件制备时衬底加温到60 °C。薄膜厚度和生长速度由石英晶体振荡器控制,并使用台阶仪进行校正。器件制作完毕后,未进行封装,在室温大气环境中进行测试。器件的伏安特性以及光谱特性通过自主搭建的测量系统完成。该系统由驱动电源2611和PR705扫描光度计构成,可以测量器件电流-电压-亮度特性以及器件的光谱。

## 3 结果与讨论

为了方便比较,MOLED和OLED的有机层结构排列和各层厚度完全一样,制作条件相同,只是MOLED有DBR反射镜,OLED没有,即有无微腔的区别。

图1是制作MOLED用的带DBR基片的反射谱,由图可见,反射谱的中心波长520 nm处的反射率最大为

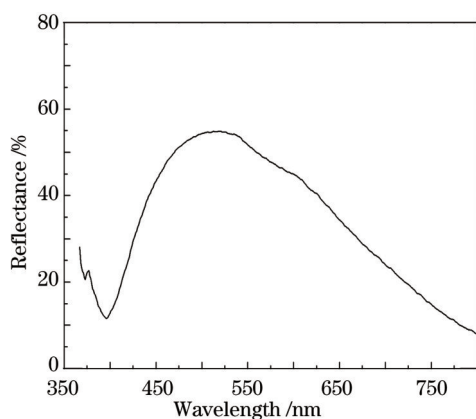


图1 DBR的反射谱

Fig.1 Reflectance spectrum of DBR

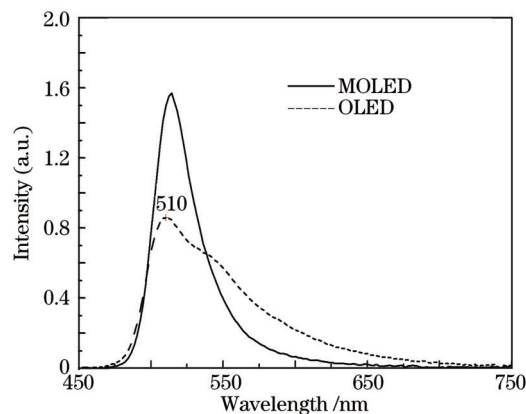


图2 MOLED和OLED的电致发光谱

Fig.2 Electro luminescent spectra of MOLED and OLED

54.8%。高反射区是被设计并限制在绿光波长520 nm附近一定宽度范围内的区域。介质腔镜与金属镜相比较,优点是可以设计并限制高反射率的范围,就是说,制作绿色器件,就可以控制绿光中心波长范围内的反射率比较大,其余的蓝光和红光部分的反射率比较小。微腔增强效应使绿光部分强度增加,进而提高绿光的色纯度和发光性能。在设计发光器件选用DBR反射镜时,通过模拟计算知道,DBR的周期越大,反射镜的反射率越高,微腔效应越大,但是同时其透射率降低,会导致出射光相应地也减小,这对于发光器件是不利的。所以需要注意的是DBR的设计周期要控制在一定范围,这样才能既可以使绿光部分得到谐振增强,同时还能使光较多地透过DBR出射出来。

图2是测量得到的MOLED和OLED的电致发光(EL)谱特性比较。可以看到,OLED的EL的峰值位于510 nm,半峰全宽(FWHM)为70 nm,在550 nm处有一个尖峰;MOLED的EL的峰值只有一个,位于514 nm,FWHM为35 nm。微腔器件相比无腔器件的FWHM窄化了50%,提高了器件的色纯度。

图3是MOLED和OLED电流密度-电压关系曲线,启亮电压OLED为4.47 V,MOLED为1.72 V,表明微

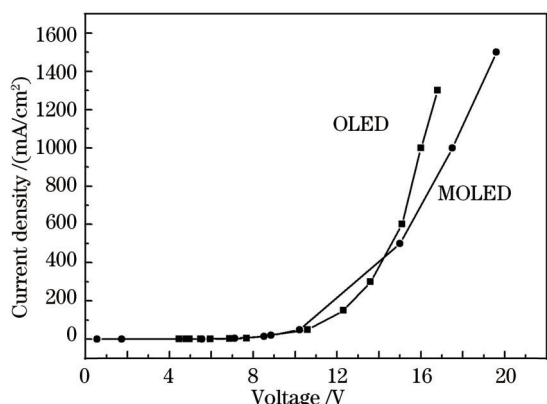


图3 MOLED和OLED电流密度-电压曲线  
Fig.3 Current density-voltage characteristics of OLED and MOLED

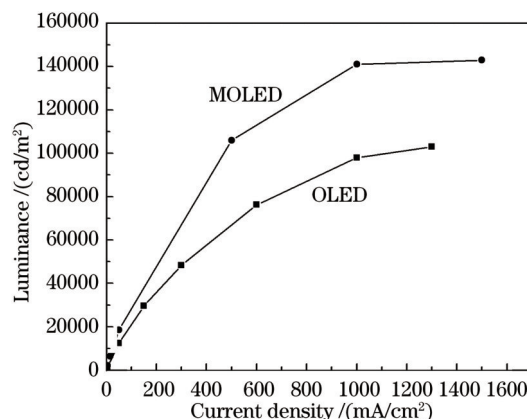


图4 MOLED和OLED的亮度-电流密度曲线  
Fig.4 Luminance-current density characteristics of MOLED and OLED

腔结构降低了器件的启亮电压。

图4为MOLED和OLED的亮度-电流密度关系曲线,可以看到,两个器件随着电流密度增加,其发光亮度均越来越强,微腔器件在相同电流密度下的亮度均高于无腔器件,最大亮度分别为143000 cd/m<sup>2</sup>和103000 cd/m<sup>2</sup>。

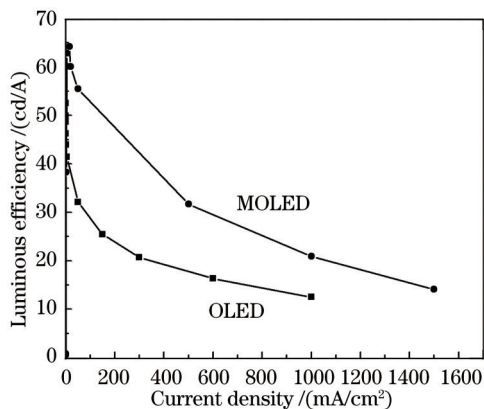


图5 MOLED和OLED的发光效率-电流密度曲线

Fig.5 Luminescent efficiency-current density characteristics of MOLED and OLED

图5是MOLED和OLED的电流效率-电流密度关系曲线,可以看到二者的电流效率都是随着电流密度的增加而逐渐减小,OLED最大电流效率是在电流密度为5 mA/cm<sup>2</sup>时,为41.6 cd/A。MOLED最大电流效率是在电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>时,为64.4 cd/A。相同电流密度下MOLED电流效率均高于OLED。

最后,我们对OLED和MOLED的外量子效率进行测试和计算,并进行比较。

OLED的外量子效率为发射出的光子总数与注入的电子总数的比值,具体可以用下面公式计算<sup>[25]</sup>,

$$n_c = \frac{\int ph(\lambda)d\lambda}{J/e}, \quad (2)$$

$$ph(\lambda) = \frac{\pi Sp(\lambda)\text{corr}(\lambda)}{h\nu} = \frac{\pi Sp(\lambda)\text{corr}(\lambda) \cdot \lambda}{hc}, \quad (3)$$

OLED可以看作是余弦发射体,从0°到180°的积分数值为 $\pi$ ,  $ph(\lambda)$ 是光子的密度分布, $J$ 为注入电流密度, $e$ 为基本电荷量, $S$ 为OLED器件的发光面积, $h$ 为普朗克常数, $\nu$ 为光子频率, $c$ 为光速, $p(\lambda)$ 为实际由PR705测试得到的器件的EL光谱分布, $\text{corr}(\lambda)$ 代表的是校正系数,一个校正光谱对应一个输出光强以及亮度,在已知OLED的EL和器件面积的情况下,就可以得到不同电流下器件的输出功率,进而得到不同电流密度下的输出光子总数,在特定电流下注入的电子数,计算出对应的外量子效率。

微腔OLED的EL谱是随着观测角度的不同而不断发生变化的,和法线方向夹角为 $\theta$ 的微腔发光谱由下式决定:

$$|E_c(\lambda)|^2 = \frac{(1 - R_d)[1 + R_m + 2\sqrt{R_m} \cos(\frac{4\pi L_1}{\lambda})]}{1 + R_m R_d - 2\sqrt{R_m R_d} \cos(\frac{4\pi L}{\lambda})} |E_n(\lambda)|^2 \times \cos \theta, \quad (4)$$

式中  $R_d$  和  $R_m$  分别是 DBR 和金属的反射率,  $L_1$  为激子与金属电极间的有效光学距离,  $L$  为微腔的总有效腔长,  $|E_n(\lambda)|^2$  为发光材料在自由空间的光谱分布。

同一个电流密度下的总光子数是所有角度下光谱的光子数的总和。输出的光子数是用积分球测得。然后计算发射出的光子总数与注入的电子总数的比值即为 MOLED 的外量子效率。

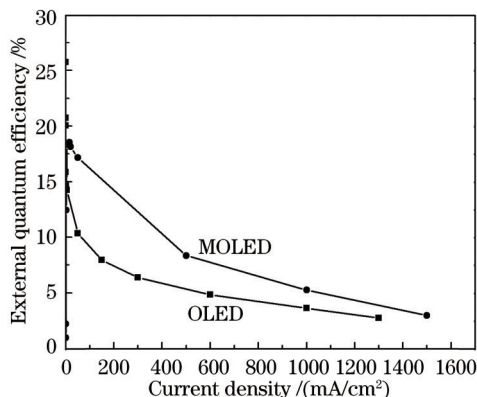


图 6 MOLED 和 OLED 的外量子效率-电流密度曲线

Fig.6 External quantum efficiency-current density characteristics of the MOLED and OLED

图 6 是 MOLED 和 OLED 的电流密度-外量子效率关系曲线。可以看出,随着电流密度的增加,外量子效率均逐渐减小,MOLED 的最大外量子效率为 18.6%,OLED 为 14.3%,相同电流密度下微腔器件的外量子效率均高于无腔器件。说明微腔结构可以使绿色磷光 OLED 的发光性能得到很大改善。

## 4 结 论

设计并制作了绿色磷光 MOLED 和无腔器件即绿色磷光 OLED,研究了微腔对绿色磷光 OLED 的发光性能的影响。实验结果表明:微腔结构可以提高 OLED 的发光性能,MOLED 的最大电流效率为 64.4 cd/A,最高亮度可以达到 143000 cd/m<sup>2</sup>,最大外量子效率为 18.6%。OLED 的最大电流效率为 41.6 cd/A,最高亮度可以达到 103000 cd/m<sup>2</sup>。最大外量子效率为 14.3%。MOLED 的各项发光性能均好于无腔 OLED。

## 参 考 文 献

- 1 Xiao Y, Yang J P, Cheng P P, *et al.*. Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating Au nanoparticles[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(1): 013308.
- 2 Liu F L, Ruden P P, Camphell L H, *et al.*. Exciplex current mechanism for ambipolar bilayer organic light emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(12): 123301.
- 3 Yu Xindong, Wu Zhenying. W-OLED Lighting Technology Research[J]. Advanced Display, 2012, 142: 5-7.  
俞鑫东,吴振英. OLED 白光照明技术的研究[J]. 现代显示, 2012,142: 5-7.
- 4 C W Tang, S A Van Slyke. Organic electroluminescent diodes[J]. Appl Phys Lett, 1987, 51(12): 913-915.
- 5 Baldo M A, Brien D F, You Y, *et al.*. Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices[J]. Nature, 1998, 395(10): 151-154.
- 6 Tao Ran, Qiao Juan, Duan Lian, *et al.*. Blue phosphorescence materials for organic light-emitting diodes[J]. Progress in Chemistry, 2010, 22(12): 2255-2267.  
陶 然, 乔 娟, 段 炼, 等. 蓝色磷光有机发光材料[J]. 化学进展, 2010, 22(12): 2255-2267.
- 7 Zhao Jiang, He Zhiqun, Zhang Jiao, *et al.*. Formation and suppression of multi-component exciplex in white organic light-emitting devices[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0823002.  
赵 江, 何志群, 张 娇, 等. 白色有机电致发光器件中多组份电致激基复合物形成及抑制[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0823002.

- 8 Yang Huishan. Fabrications of white organic light-emitting diode based on fluorescent sub-monolayer combine with phosphorescent doping layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323005.  
杨惠山. 荧光亚单层结合磷光掺杂层制备白色有机发光器件[J]. *光学学报* 2013, 33(3): 0323005.
- 9 Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Phys Rev*, 1946, 69: 681-685.
- 10 Boo Young Jung, Nam Young Kim, Changhee Lee. Control of resonant wavelength from organic light-emitting materials by use of a Fabry-Perot microcavity structure[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(16): 3312-3318.
- 11 Li Xiushan, Ning Yongqiang, Jia Peng, et al.. Rectangular mesa shaped vertical cavity surface emitting laser with shallow surface Relief[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1202005.  
李秀山, 宁永强, 贾 鹏, 等. 浅面浮雕矩形台面垂直腔面发射半导体激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202005.
- 12 Y Jin, J Feng, M Xu, et al.. Matching photocurrents of sub-cells in double-junction organic solar cells via coupling between surface plasmon polaritons and microcavity modes[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(11): 809-813.
- 13 G Kozyreff, D C Urbanek, L T Vuong, et al.. Microcavity effects on the generation, fluorescence, and diffusion of excitons in organic solar cells[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): A336-A354.
- 14 Shizuo Tokito, Yasunori Taga. Microcavity organic light-emitting diodes for strongly directed pure red, green, and blue emissions[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 86 (5): 2407-2411.
- 15 Zhang Chunyu, Xiao Liguang, Lu Jingbin et al.. Study on luminescence properties of red color microcavity organic light emitting device with different thicknesses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1788-1791.  
张春玉, 肖力光, 陆景彬, 等. 不同厚度红色有机微腔电致发光器件性能研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1788-1791.
- 16 X W Zhang, J W Xu, H R Xu, et al.. Improving electron injection and microcavity effect for constructing highly efficient inverted top-emitting organic light-emitting diode[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, 45: 181-184.
- 17 O Kasdorf, J Vollbrecht, B Ohms, et al.. Enhanced organic light-emitting diode based on a columnar liquid crystal by integration in a microresonator[J]. *International Journal of Energy Research*, 2014, 38(4): 452-458.
- 18 Y F Liu, J Feng, D Yin, 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.
- 19 Hongmei Zhang, Shufen Chen, Dewei Zhao. Surface-plasmon-enhanced microcavity organic light-emitting diodes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S7): A1776.
- 20 J W Shin, D H Cho, J Moon, et al.. Random nanostructure scattering layer for suppression of microcavity effect and light extraction in OLEDs[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3527-3530.
- 21 M Mazzeo, F Mariano, A Genco, et al.. High efficiency ITO-free flexible white organic light-emitting diodes based on multi-cavity technology[J]. *Organic Electronics*, 2013, 14(11): 2840-2846.
- 22 S Li and Y Li. Characteristics of blue phosphorescent microcavity organic electrolu minescent 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.
- 23 M Zhang, F Zhang, W Zhang, 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.
- 24 Chaoyu Xiang, Wonhoe Koo, Franky So, et al.. A systematic study on efficiency enhancements in phosphorescent green, red and blue microcavity organic light emitting devices[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(6): e74.
- 25 Yi He, Reiji Hattori, Jerzy Kanicki. Light output measurements of the organic light-emitting devices[J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, 71 (5): 2104-2107.

栏目编辑: 张 雁