

微腔结构顶发射有机发光器件*

曹 进 刘 向 张晓波 委福祥 朱文清 蒋雪茵† 张志林 许少鸿

(上海大学新型显示技术与应用集成教育部重点实验室, 上海大学材料学院, 上海 201800)

(2005 年 12 月 27 日收到, 2006 年 7 月 28 日收到修改稿)

以 Ag/ITO 为全反射阳极, 以 Al/Ag 为半透明复合阴极, 制备了绿色、蓝色两种微腔结构顶发射有机发光器件, 研究了微腔效应对顶发射器件颜色的影响, 通过调节光程, 实现了用同一种有机发光层制备出不同波长的发射. Alq 基顶发射器件得到波长峰值从 500 nm 到 584 nm 的不同颜色的器件, 发光光谱半高宽由传统器件的 100 nm 窄化到 20—40 nm, 最高电流效率 1.77 cd/A. 蓝光顶发射器件发光峰值从 464 nm 变化到 532 nm, 半高宽由传统器件的 65 nm 窄化到 17—21 nm, 并得到色坐标为 (0.141, 0.049) 的深蓝色顶发射有机发光器件.

关键词: 有机发光, 顶发射, 微腔效应

PACC: 7280L, 7860F

1. 引 言

有机电致发光是当今最具竞争力的平板显示技术, 其中小面积、被动驱动技术已日趋成熟^[1,2], 大面积、彩色、主动驱动技术已成为目前发展的主流. 大尺寸显示必须采用薄膜晶体管(TFT)驱动, 而传统底发射有机发光器件(OLED)与 TFT 结合时, 开口率低是关键的问题, 如果使用顶发射结构的有机发光器件, 则可以把发光面和 TFT 分开, 从而很好地解决开口率的问题; 这对于用 α -Si 或有机 TFT 驱动 OLED 时尤为重要. 因此, 顶发射有机发光器件已成为当今研究的热点^[3,4].

光学微腔是把发光区置于一个全反射膜和半反射膜构成的谐振腔内, 由于有机发光器件的厚度可与光波长相当, 半透明复合阴极可看成半反射膜, 再加上全反射阳极, 因而器件具有微腔效应. 通过设计不同的谐振波长, 可以得到不同颜色波长的发射^[5]. 光通过谐振腔发射出来, 使得光能得到加强, 光谱得到窄化, 因而得到很好的色饱和度. 由于该技术可以使用同一种发光层产生不同颜色的发光, 可避免实现全彩时在真空室内调整掩膜板所带来的困难, 因此近年来得到广大研究者的关注^[6-8].

本文以氧化铟锡(ITO)/Ag 作为全反射阳极, 用

Al/Ag 为半透明复合阴极, 制备了绿色以及蓝色两种顶发射结构器件, 研究了微腔效应对顶发射器件颜色的影响, 并通过调节光程, 实现了用同一种有机发光层制备出不同发射波长的顶发射器件.

2. 实 验

器件结构为 Ag/ITO/ELayer/LiF/Al/Ag/Alq, 其中 Ag(100 nm)/ITO(x nm)为反射阳极及光程调节层, LiF(1 nm)/Al(10 nm)/Ag(2 nm)为半透明复合阴极, 其透射光谱如图 1 所示, 在 400—750 nm 的可见光范围内透过率为 30% 左右, 具有一定的光反射率, 以保证器件具有一定的微腔效应. ELayer 为有机发光层, 绿光顶发射器件 EL 结构为 CuPc(12 nm)/NPB(40 nm)/Alq(40 nm). 蓝光顶发射器件 EL 结构为 CuPc(12 nm)/NPB(50 nm)/TBADN:TBPc(30 nm)/Alq(20 nm), 这里 CuPc(copper phthalocyanine)为缓冲层, NPB(a-naphthylphenylbiphenyl diamined)为空穴传输层(HTL); Alq(tris(8-quinolinolato)aluminium complex)为发光层(EML)和电子传输层(ETL); TBPc(2,5,8,11-tetra-butylperylene)为蓝光掺杂剂, TBADN(9,10-di(2-naphthyl)anthracene)为蓝光基质.

微腔结构顶发射器件结构如图 2 所示, 制备过程首先在干净的玻璃基片上以非磁控溅射沉积

* 国家自然科学基金(批准号: 90201034, 60477014, 60577041), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2002CB613400), 上海科委(批准号: D12261055)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xyjiang@mail.shu.edu.cn

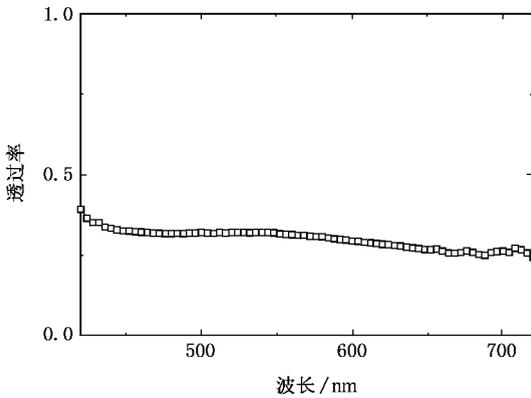


图1 半透明复合阴极 Al/Ag 的透光率

100 nm 的 Ag 作为反射层,然后在同一真空室内用磁控溅射沉积不同厚度的 ITO 层,作为阳极及微腔腔长调节层,再对 ITO 阳极表面进行紫外(UV)处理以提高阳极表面平整度及功函数,然后在真空室内依次蒸发沉积有机层及半透明金属复合阴极层。蒸发室真空度为 10^{-4} Pa 左右,有机层蒸发速度为 4 A/s,金属蒸发速度为 0.5 A/s,器件发光面积为 0.25 cm^2 。器件的场致发光光谱和色坐标用 PR-650 光谱扫描色度计测量,亮度-电压、电流-电压用 Keithley 2400 Source Meter 数字源表以及相关线路测量。透过率实验采用白光二极管阵列作为白光光源。所有器件均在室温空气中未密封测量。

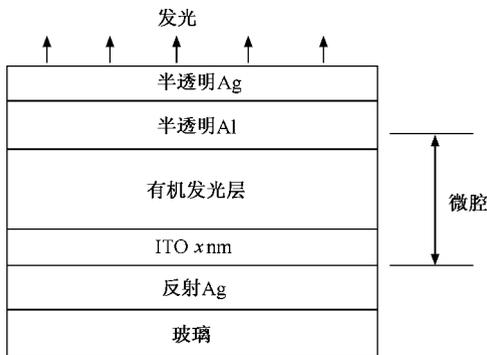


图2 顶发射有机发光器件结构

3. 结果与讨论

3.1. Alq 基的微腔结构顶发射器件

以 CuPc(12 nm)/NPB(40 nm)/Alq(40 nm)为发光层,制备了微腔结构顶发射有机发光器件,与相同发光层结构的传统底发射器件作为对比器件,结果如

图3所示。

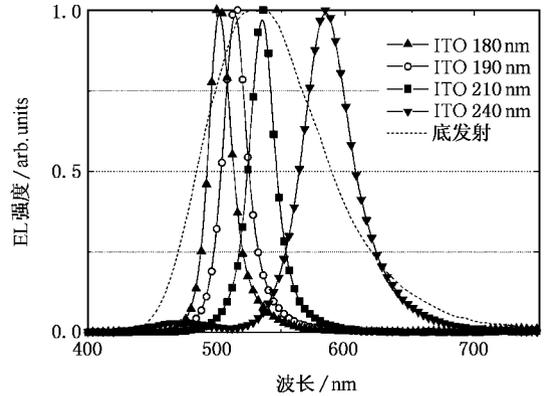


图3 不同 ITO 厚度时 Alq 基顶发射器件的光谱与相同发光层结构传统底发射器件(BELEDs)的光谱

通过增加光程调节层 ITO 的厚度从 180 nm, 190 nm, 210 nm 到 240 nm,我们分别得到了 500 nm, 516 nm, 536 nm 和 584 nm 不同发光峰值的发射波长。半高宽分别为 20 nm, 22 nm, 22 nm 和 40 nm。如图3中虚线所示,Alq 基传统器件的发光峰值为 535 nm,半高宽为 100 nm 左右。

这一现象可由微腔效应得到合理解释,由于半透明阴极 Al/Ag 具有一定的光反射率(如图1所示)因此,在它的全反射层 Ag 之间就形成了微腔结构(如图2所示),一定波长的光将在微腔内得到加强和窄化。根据文献[9],微腔器件总光学厚度以及微腔发光波长峰值满足以下关系式:

$$L = \frac{\phi_{ij}\lambda_m}{4\pi} + \sum_i n_i d_i = m \frac{\lambda_m}{2}, \quad (1)$$

(m 为整数),

这里 L 是微腔总光程, ϕ_{ij} 是光分别在阳极与阴极反射面的相移之和; n_i, d_i 分别是 ITO 和有机层的折射率、厚度。 m 是模的级数, λ_m 为级数为 m 的模的波长。由(1)式可知,如果改变腔的光学厚度 L ,则可以改变腔的模 m 的位置,从而改变微腔器件的发射波长 λ_m 。

由于 ITO 的折射率为 2.2,较有机层的 1.6—1.7 大,所以其对微腔光程的影响也较为明显,因此我们用 ITO 作为光程调节层得到了较为明显的效果。随着 ITO 厚度改变,相当于微腔总光程改变,由(1)式可知,此时发光峰值波长也会相应改变,因此,虽然 Alq 本身的发光峰值为 535 nm,我们得到了 500 nm 到 584 nm 不同峰值的发光。

微腔效应的强弱常通过半高宽(FWHM)来衡量,半高宽可大致满足^[9]

$$\text{FWHM} = \frac{\lambda_{\max}^2}{2L} \times \frac{1 - \sqrt{R_1 R_2}}{\pi \sqrt[4]{R_1 R_2}}, \quad (2)$$

R_1, R_2 分别为两个反射面的反射率, λ_{\max} 为峰值波长, L 为总光程. 由(2)式可知, 在反射率 R_1, R_2 不变

的情况下, 半高宽将随着峰值波长 λ_{\max} 的增大而增加. 因此如图 3 所示, 随着光程调节层 ITO 的厚度从 180 nm 增加到 240 nm, 半高宽从 20 nm 增加到 40 nm. 器件的发光性能如表 1 所示.

表 1 不同厚度 ITO 时 Alq 为发光层顶发射器件的发光性能

ITO 厚度/nm	电流效率/(cd/A)	色坐标 CIE _x	色坐标 CIE _y	峰值波长/nm	半高宽/nm
180	0.7	0.073	0.573	500	20
190	1.2	0.110	0.719	516	22
210	1.77	0.229	0.729	536	22
240	0.3	0.524	0.453	584	40

由表 1 可知, 随着 ITO 的厚度变化, 器件的电流效率发生较大的变化, 这是由于发光峰值的不同而引起. 当发光峰值为 536 nm 时, 由于 Alq 本身的发光在 535 nm 附近最强, 因此经过微腔谐振后顶发射器件效率较高, 而离 Alq 本身的发光峰值 535 nm 较远时, 由于 Alq 本身的发光较弱, 因此经过微腔谐振后顶发射器件的效率也较低. 对 ITO 厚度为 210 nm 时微腔结构顶发射器件与传统器件的发光性能进行了比较, 电流密度-电压曲线以及电流效率-电流密度曲线分别如图 4、5 所示.

由图 4 可知, 顶发射器件的电流密度-电压曲线较传统底发射器件更为平缓, 趋向于高能; 由图 5 可知, 顶发射器件的发光效率随电流密度的变化也较传统底发射器件更为平缓, 低电流时发光效率较低, 随着电流密度增加, 发光效率逐渐增大, 至 120 mA/cm² 时, 达到最高电流效率 1.77 cd/A, 接近相同发光层结构传统底发射器件的最大电流效率 1.8 cd/A.

3.2. 蓝光发光层的微腔结构顶发射器件

为了验证以上结论, 我们又以 CuPc(12 nm)/NPh(50 nm)/TBADN:TBP(30 nm)/Alq(20 nm) 为发光层, 制备了微腔结构的顶发射有机发光器件, 又制备了相同发光层结构的传统底发射器件作为对比器件. 结果如图 6 所示.

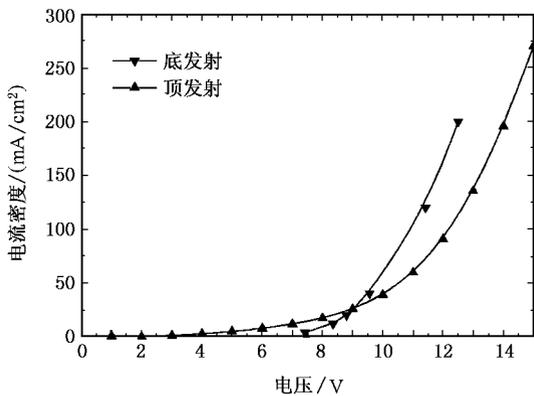


图 4 顶发射器件与传统器件电流密度-电压特性

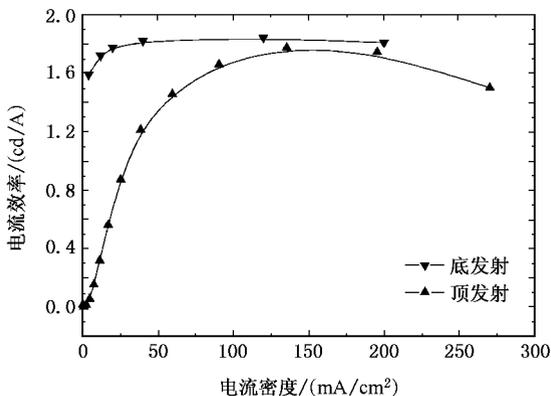


图 5 顶发射器件与传统器件电流效率-电流密度特性

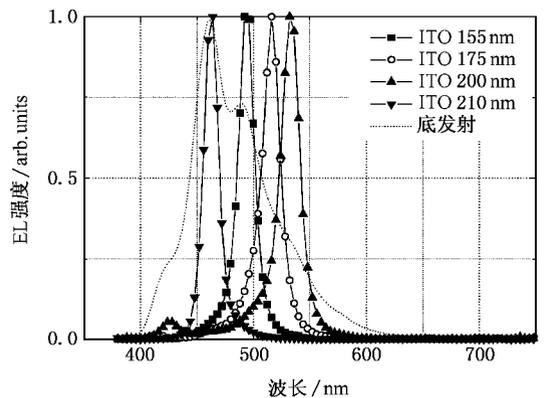


图 6 不同 ITO 厚度时 TBADN:TBP 基顶发射器件的光谱与相同发光层结构传统底发射器件 (BEOLEDs) 的光谱

由图 6 可知, 用蓝光顶发射器件我们得到了与 Alq 基顶发射器件相似的结果, 由于器件具有微腔结构, 因此器件半高宽明显减小; 当改变调节层 ITO 的厚度, 总腔长改变时, 可得到了不同发光峰值的器

件. ITO 厚度从 155 nm 到增加到 210 nm, 发光峰值分别从 464 nm 变化到 532 nm. 器件的半高宽随着峰值波长的增加而呈增大趋势, 从 17 nm 到增加到 21 nm. 如图虚线所示, 传统器件的发光峰值为 464 nm, 半高宽为 65 nm 左右, 因此证明用微腔结构

可实现同一发光层制备出不同发射波长的顶发射有机发光器件, 发光光谱得到窄化, 器件色度得到提高. 当 ITO 厚度为 155 nm 时, 可得到发光峰值为 464 nm, 色坐标为 $x = 0.141$, $y = 0.049$ 的深蓝色顶发射器件. 器件的发光性能如表 2 所示.

表 2 不同厚度 ITO 时 TBADN:TBPe 为发光层顶发射器件的发光性能

ITO 厚度/nm	电流效率(cd/A)	色坐标 CIE _x	色坐标 CIE _y	峰值波长/nm	半高宽/nm
155	0.32	0.141	0.049	464	17
175	0.79	0.069	0.321	492	18
200	0.858	0.092	0.668	516	20
210	0.832	0.175	0.682	532	21

4. 结 论

以 ITO/Ag 作为全反射阳极, 用 Al/Ag 为半透明复合阴极, 分别制备了 Al_q 基以及 TBADN:TBPe 基的微腔结构顶发射器件. 实现了用同一发光层制备出不同波长的发射光, 并实现了窄化发光光谱, 提高器件色纯度的目的. 通过调节腔长, 用 Al_q 基顶发射

器件分别得到了 500 nm 到 584 nm 不同峰值的发光, 器件半高宽由传统底发射器件的 100 nm 左右窄化到 20—40 nm; 顶发射器件的最高电流效率 1.77cd/A. TBADN:TBPe 基顶发射器件分别得到了 464 nm 到 532 nm 不同峰值的发光, 器件半高宽由传统器件的 65 nm 左右窄化到 17—21 nm 左右, 并得到色坐标为(0.141, 0.049)的深蓝色顶发射有机发光器件.

- [1] Zhang X B, Cao J, Wei F X, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q, Xu S H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 119 (in Chinese) [张晓波、曹进、委福祥、蒋雪茵、张志林、朱文清、许少鸿 2006 物理学报 **55** 119]
- [2] Wei F X, Cao J, Zhang X B, Liu X, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q, Xu S H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2008 (in Chinese) [委福祥、曹进、张晓波、刘向、蒋雪茵、张志林、朱文清、许少鸿 2006 物理学报 **55** 2008]
- [3] Hsu S F, Lee C C, Hu A T, Chen C H 2004 *Current Applied Physics* **4** 663
- [4] Hung L S, Tang C W, Mason M G, Raychaudhuri P, Madathil J 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 544

- [5] Lu M H, Weaver M S, Zhou T X, Rothman M, Kwong R C, Hack M, Brown J J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3921
- [6] Chen C W, Hsieh P Y, Chiang H H, Lin C L, Wu H M, Wu C C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5127
- [7] Dai G Z, Li H J, Pan Y Z, Dai X Y, Ma Q Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2590
- [8] Dodabalapur A, Rothberg L J, Miller T M, Kwock E W 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2486
- [9] Kashiwabara M, Hanawa K, Asaki P, Kobori I, Matsuura R, Yamada H, Yamamoto T, Ozawa A, Sato Y, Terada S, Yamada J, Sasaoka T, Tamura S, Urabe T 2004 *SID Digest* 1017

Top-emitting organic light-emitting devices with cavity effect^{*}

Cao Jin Liu Xiang Zhang Xiao-Bo Wei Fu-Xiang Zhu Wen-Qing Jiang Xue-Yin[†] Zhang Zhi-Lin Xu Shao-Hong

(*Key Laboratory of Advanced Display and System Application Ministry Education, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

(Received 27 December 2005; revised manuscript received 28 July 2006)

Abstract

Top-emitting organic light-emitting devices (TOLEDs) have been constructed with Ag/ITO reflective anode and LiF/Al/Ag semi-transparent cathode. The cavity effect has been researched by using Alq and TBADN:TBPe as emitting layers respectively. Different colors from the same emitting layer have been realized by changing the thickness of ITO. For Alq-based TOLEDs, the full width at half maximum (FWHM) was narrowed to 20–40 nm from the 100 nm of bottom-emitting organic light-emitting devices (BEOLEDs). The EL peak was shifted from 500 nm to 584 nm by changing the thickness of ITO. The maximum current efficiency of the TOLEDs is 1.77 cd/A, which approaches to the 1.8 cd/A of traditional devices. For TBADN:TBPe-based devices, the FWHM was narrowed to 20 nm from BEOLEDs' 65 nm. The EL peak was shifted from 464 nm to 532 nm by changing the thickness of ITO, and navy blue with CIE coordinates $x = 0.141$, $y = 0.049$ have been obtained by TBADN:TBPe-based TOLEDs with cavity effect.

Keywords : organic light-emitting devices, top-emitting, cavity effect

PACC : 7280L, 7860F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90201034, 60477014, 60577041), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2002CB613400) and Shanghai Science and Technology Committee (Grant No. 012261055).

[†] Corresponding author. E-mail: xyjiang@mail.shu.edu.cn