

文章编号: 1000-7032(2010) 04-0493-05

微腔有机电致发光器件的谐振腔反射镜性能

张春玉^{1,2}, 陆景彬^{1*}, 郭树旭¹, 郜峰利¹, 王洪杰², 曹军胜³

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130021; 2. 吉林建筑工程学院 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130021;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 根据微腔原理运用传输矩阵法对构成微腔有机电致发光器件(MOLED)谐振腔的两个反射镜进行模拟计算并比较,可观察到:随金属反射镜的反射率增大,微腔器件的电致发光(PL)谱的半峰全宽(FWHM)逐渐窄化;峰值逐渐蓝移至设计的谐振峰值520 nm处;峰值强度和光谱积分强度逐渐增强。结果表明:金属反射镜反射率越大越好。随DBR反射镜的周期数从1增加到9,EL的峰值均为520 nm,半峰全宽逐渐窄化,积分强度逐渐减弱;峰值强度由弱增强再减弱,4个周期时峰值强度最大,所以设计微腔器件时,DBR的周期是一项很重要的参数。DBR反射率太大不利于出光,太小微腔效应小。需要根据制作目的和需要进行合理选择。

关键词: 有机电致发光器件; 微腔; 反射镜

中图分类号: TN383.1

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

文献标识码: A

1 引言

有机电致发光显示器件具有重量轻、成本低、视角宽、响应速度快、主动发光、发光亮度和发光效率高、能实现全色显示等优点,备受科学界和产业界的广泛重视^[1,2]。但一般有机发光材料的发射带比较宽,光谱半峰全宽(FWHM)大约在100 nm左右^[3,4],这对于实现全色显示所要求的饱和色有一定的差距。为解决这一问题,人们尝试采用不同的方法:(1)使用滤色镜;(2)采用窄带发光材料;(3)采用微腔结构。和前两种相比,在器件中引入光学微腔结构的第三种方法被证明是一种很好的方法^[5~10]。与普通的有机发光器件相比,具有微腔结构的有机发光器件可以获得单色性较好的发光,实现窄带发射,发射强度增强,并对发射波长有选择性作用。

平面微腔或称Fabry-Perot微腔是在理论上和实验上研究得比较详细的光学微腔。Fabry-Perot微腔通常是采用分子束外延,电子束蒸发或金属有机气相沉积技术生长而成。它的结构就是由两个反射镜及其间所夹的工作物质所组成。

在两个反射镜面的法线方向特定波长光的运动受到调制,谐振腔镜可以用金属膜或布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)构成。微腔的两个反射镜的反射率不相同,反射率高的称为“全反射镜”,而反射率低的称为“半反射镜”。两个反射镜的组合也分三种形式:一种是两个反射镜都采用DBR反射镜,这是一种利用各占1/4波长光学厚度的高低折射率介质材料交替沉积而成的干涉反射镜,依靠控制每层介质的厚度可以确定它的反射波长,而控制沉积的层数可以决定反射率的高低,在特定波长处可以达到99.9%以上的反射率;第二种是利用真空镀膜的方法获得的高反射率的金属镜作全反射镜,相对金属镜反射率低的DBR反射镜作为出光镜;第三种就是两个反射镜全是金属镜,都利用真空镀膜方法获得,一个厚作为高反射率的全反射镜,另一个较薄作为半透明的低反射镜,即出光镜。由于第一种制作工艺较复杂,第三种腔效应不明显,人们常常采用第二种微腔结构。我们的模拟计算设计就是采用金属镜和DBR镜作为器件的两个反射镜。下面对微腔有机电致发光器件(MOLED)分别进行

收稿日期: 2009-12-25; 修订日期: 2010-03-24

基金项目: 集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(IOSKL-KF200908)资助项目

作者简介: 张春玉(1968-),女,吉林长春人,博士,主要从事有机发光、激光及微腔物理方面的研究。

E-mail: zhangcy68@163.com

*: 通讯联系人; E-mail: ljb@jlu.edu.cn

具体的模拟计算。

2 理论计算公式

平面有机微腔的谐振模式满足 Fabry-Perot 方程^[11]:

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

其中 φ_d 和 φ_m 分别为 DBR 和金属的反射相移 λ 是谐振波长 n_i 为腔内各层薄膜的折射率和厚度 θ 是外部探测角 m 是模式级数。

理论上垂直表面的有机微腔的发射光谱可以通过下面的方程计算而得^[12]:

$$\begin{aligned} &|E_c(\lambda)|^2 = \\ &\frac{(1 - R_d) \left[1 + R_m + 2\sqrt{R_m} \cos \left(\frac{4\pi L_1}{\lambda} \right) \right]}{1 + R_m R_d - 2\sqrt{R_m R_d} \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda} \right)} |E_n(\lambda)|^2, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 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。这里实际设计器件采用发光材料 Alq₃ 的光致发光光谱。

下面根据公式运用传输矩阵法分别对两个反射镜进行模拟计算并进行比较分析。

3 模拟计算结果分析

3.1 金属反射镜反射率变化的微腔有机电致发光器件发光性能模拟

运用上面的计算公式,使 MOLED 的 DBR 出射镜固定不变,有机发光层厚度不变,激子的位置不变,只是改变金属反射镜铝的反射率,比较模拟计算的 MOLED 的电致发光(EL)谱的变化。

MOLED 结构: G/DBR/ITO(65 nm)/NPB(70 nm)/Alq₃(62 nm)/Al($R = x\%$)

DBR 结构: 3(HL) 3 个周期的 DBR,中心波长 $\lambda = 520$ nm。H = Ta₂O₅; 折射率 = 2.05,厚度为 63.4 nm; L = SiO₂ 折射率为 1.46,厚度为 89 nm; ITO 折射率为 2.0,厚度为 65 nm。

图 1 是模拟计算的 MOLED 的 EL 半峰全宽(FWHM)随金属反射镜的反射率变化关系曲线。结果表明,随着反射率由小变大,FWHM 由大急剧

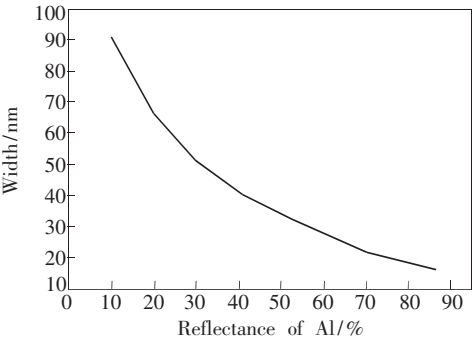


图 1 微腔器件 EL 的半峰全宽与金属镜反射率的关系
Fig.1 Relationship between FWHM and metal mirror's reflectivity of MOLED

变小,由 $R = 10\%$ 的 91 nm 最终变小至 $R = 87\%$ 时的 16 nm。说明不出光一侧的金属反射镜反射率越大,越能够使微腔器件的发光谱线窄化,从而提高器件色纯度。

图 2 是 MOLED 的 EL 谱峰值随金属反射镜反射率变化曲线。随着金属反射镜反射率的加大,EL 的峰值蓝移,由 $R = 10\%$ 的 551 nm 最终移至 $R = 87\%$ 时的 520 nm。反射率越大,EL 的峰值

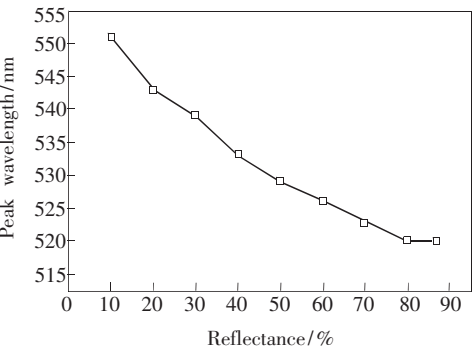


图 2 微腔器件 EL 谱峰值与金属镜反射率的关系
Fig. 2 Relationship between EL emission peak and metal mirror's reflectivity of MOLED

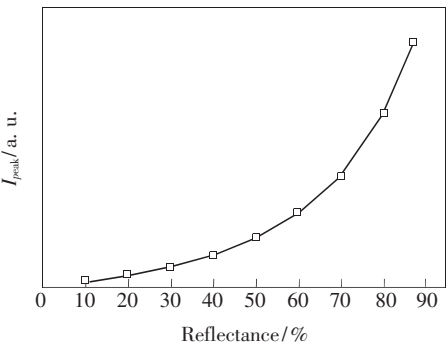


图 3 微腔器件 EL 谱峰值强度与金属镜反射率的关系
Fig.3 Relationship between EL emission peak intensity and metal mirror's reflectivity of MOLED

越接近设计的谐振峰值处,即 $\lambda = 520\text{ nm}$ 处。

图 3 是 MOLED 的 EL 峰值强度与金属反射镜反射率变化关系,峰值强度随着金属反射镜反射率增加而增强。图 4 是 EL 谱积分强度随金属反射镜反射率变化关系曲线。积分强度随金属反射镜反射率的增加而变强,说明对于微腔器件来说,金属反射镜反射率越大越好。

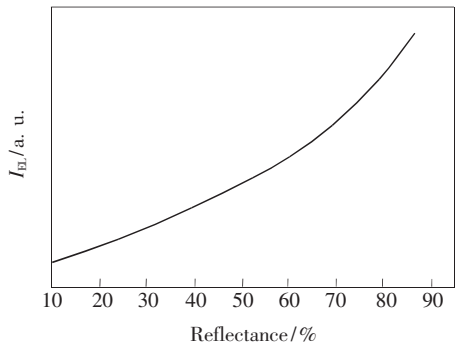


图 4 微腔器件 EL 光谱积分强度与金属镜反射率的关系
Fig. 4 Relationship between EL integral intensity and metal mirror's reflectivity of MOLED

3.2 不同周期 DBR 反射镜对 MOLED 的 EL 性能影响

现在使 MOLED 的底部金属反射镜固定不变,有机发光层厚度不变,激子的位置也不变,只是改变 DBR 出射镜的周期数,比较模拟计算的 MOLED 的 EL 谱发光性能的各项指标变化。器件结构如下:

MOLED: G/DBR (X (HL)) /ITO (65 nm) / NPB(70 nm) /Alq₃(62 nm) /Al(150 nm)

X 代表 DBR 的周期数,由 0 ~ 9。其中 0 周期 DBR 指只有 ITO 的普通无腔器件,以其为基准进行比较。图 5 是不同周期 DBR 反射镜组成的

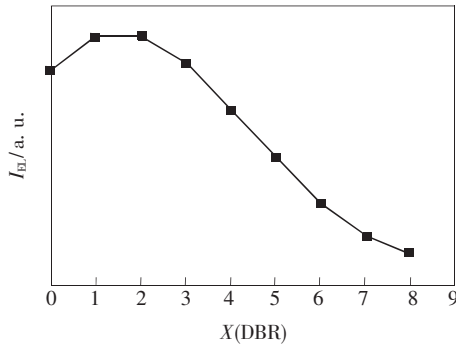


图 5 微腔器件 EL 光谱积分强度与 DBR 周期的关系
Fig. 5 Relationship between EL integral intensity and periodicity of DBR for MOLED

EL 积分强度随着 DBR 的周期数从 1 增加到 9,微腔器件的 EL 谱的积分强度总体上是由强逐渐变弱,1 ~ 3 个周期时都强于无腔器件,超过 3 个周期后均弱于无腔器件,设计器件时要注意这一点。

图 6 是不同周期 DBR 反射镜组成的 MOLED 的 EL 谱峰值位置曲线, $X=0$ 的普通器件与 Alq₃ 的 PL 谱峰值一样为 515 nm, $X=1 \sim 9$ 的微腔器件峰值均为所设计的微腔谐振中心波长 520 nm。说明虽然 DBR 周期不同,但对峰值位置没有影响。

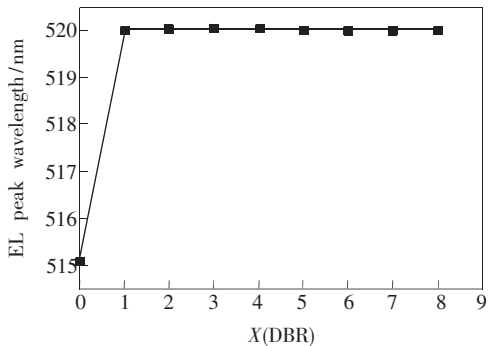


图 6 微腔器件 EL 谱峰值与 DBR 周期的关系
Fig. 6 Relationship between EL spectrum peak-periodicity and DBR for MOLED

图 7 是不同周期 DBR 反射镜组成的 MOLED 的 EL 的半峰全宽变化曲线,随着 DBR 周期的增加,FWHM 逐渐窄化(色纯度进一步提高),由 0 周期普通器件时的 74 nm 窄化至 8 个周期时的 4 nm(0.05 倍)。

图 8 是不同周期 DBR 反射镜器件 EL 谱的峰值强度与 DBR 周期数的关系曲线,1 ~ 9 个周期 DBR 的器件峰值强度均强于普通器件,变化是逐

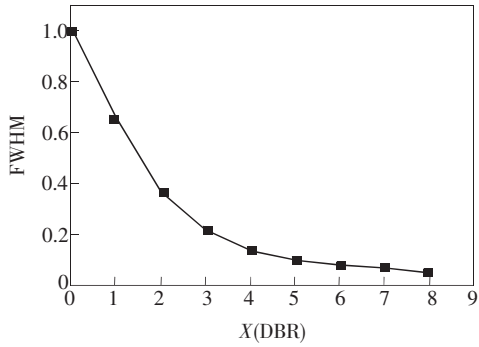


图 7 微腔器件 EL 谱 FWHM 与 DBR 周期的关系
Fig. 7 Relationship between EL spectrum FWHM and periodicity of DBR for MOLED

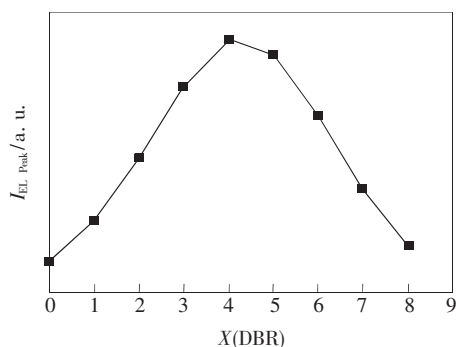


图 8 微腔器件 EL 谱峰值强度与 DBR 周期的关系

Fig. 8 Relationship between EL spectrum peak intensity and periodicity of DBR for MOLED

渐由弱变强再变弱, 4 个周期时峰值强度最大。所以设计微腔器件时, DBR 反射镜的周期是一项很重要的参数。

4 结 论

通过模拟计算对 MOLED 的两个反射镜变化

的器件 EL 性能比较, 结果说明: 金属反射镜反射率越大, 越能够使微腔器件的发光谱窄化, 从而提高器件色纯度; 随着金属反射镜反射率的增加, MOLED 的峰值蓝移, 由 551 nm 逐渐移至 520 nm; 反射率越大, MOLED 的峰值越接近设计的谐振峰值 520 nm 处。峰值强度和 EL 谱积分强度都随着金属反射镜反射率增加而增强。总之, 金属反射镜反射率越大越好。

对不同周期 DBR 反射镜组成的 MOLED 电致发光性能模拟计算并比较发现, 随着 DBR 的周期数从 1 增加到 9, 微腔器件的 EL 谱的积分强度总体上是由强逐渐变弱, 峰值位置没有变化, 都是 520 nm, 半峰全宽逐渐窄化, 由一个周期时的 49 nm 窄化至 8 个周期时的 4 nm, 峰值强度变化是逐渐由弱变强再变弱, 4 个周期时有最大值。所以设计微腔器件时, DBR 的周期是一项很重要的参数, 要具体根据制作目的和需要进行调整。

参 考 文 献:

- [1] Khan M A, Xu Wei, Cao Jin, *et al.* Spectral studies of white organic light-emitting devices based on multi-emitting layers [J]. *Displays*, 2007, **28**(1): 26-30.
- [2] Cai Hua, Si Yujuan, Lang Liuqi, *et al.* Pixel simulation and peripheral driving circuit design on the color AMOLED [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2006, **27**(4): 618-623 (in Chinese).
- [3] Li Chun, Peng Junbiao, Zeng Wenjin, *et al.* Organic red light-emitting diodes with a soluble luminescent compound and a novel TPBI/Ag cathode [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2009, **58**(3): 1992-1996 (in Chinese).
- [4] Liu Yingliang, Di Cong-an, Xin Yuanrong, *et al.* Organic light-emitting diode based on a carbazole compound [J]. *Synthetic Metals*, 2006, **156**(11-13): 824-827.
- [5] Xie Zefeng, Yuan Yongbo, Chen Shuming, *et al.* Study on metal microcavity OLEDs with improved efficiency [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1): 37-40 (in Chinese).
- [6] Xiong Zhiyong, Li Hongjian, Wang Junxi, *et al.* Optical characteristics of flexible microcavity organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(3): 337-343 (in Chinese).
- [7] Zhang Chunyu, Lu Jingbin, Qin Li, *et al.* Design and fabrication of organic light-emitting white-color microcavity device [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(5): 596-600 (in Chinese).
- [8] Zhang Chunyu, Lu Jingbin, Sun Chenglin, *et al.* Angle dependence of microcavity organic light emitting devices [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(6): 734-737 (in Chinese).
- [9] Shizuo Tokito, Tetsuo Tsutsui, Yasunori Taga. Microcavity organic light-emitting diodes for strongly directed pure red, green, and blue emissions [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(51): 2407-2411.
- [10] Zhang Chunyu, Xiao Liguang, Qin Li, *et al.* Blue color microcavity organic light emitting device [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2009, **29**(7): 1967-1972 (in Chinese).
- [11] Jung Boo Young, Kim Nam Young, Lee Changhee. 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.
- [12] Deppe D G, Leel C, Lin C C, *et al.* Spontaneous emission from planar microstructures [J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(2): 325-344.

Performance of Resonant Cavity Mirrors of Microcavity Organic Light-emitting Device

ZHANG Chun-yu^{1,2}, LU Jing-bin¹, GUO Shu-xu¹,
GAO Feng-li¹, WANG Hong-jie², CAO Jun-sheng³

(1. Jilin University, Changchun 130021, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China;

3. Key Laboratory of Excited State Process, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: According to the related calculation formula of microcavity device, we use transfer matrix method to simulate and compare with two mirrors which form the resonant cavity of microcavity organic light-emitting device (MOLED). We observed that as metal mirror's reflectivity increases, electroluminescence (EL) and full wavelength of half maximum (FWHM) of microcavity device become narrow, peak position moves to the designed resonant peak of 520 nm, peak intensity and EL integral intensity increases gradually. The result shows that the bigger the metal mirror's reflectivity is, the better the result is.

As the periodicity of DBR mirror increases in 1 ~ 9, peaks of EL are all 520 nm, FWHM narrows gradually, integral intensity decreases gradually, peak intensity increases at first then it decreases, and at 4 periodicities it is the biggest. So, when we design MOLED, the periodicity of DBR is an important parameter. It isn't good for light emitting if the reflectivity of DBR is bigger and the effect of microcavity is smaller if the reflectivity is smaller. We must make a reasonable choice according to the purpose and need.

Key words: organic light emitting device; microcavity; mirror

CLC number: TN383.1

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

Document code: A