

# 基于 MEMS 的波长可调谐微腔有机发光二极管的设计\*

沈伟东 王建浦 陈海星 李海峰 刘旭 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江, 杭州 310027)

**摘要** 利用 MEMS 空气腔在静电力作用下的变形, 设计了一种波长可调谐的微腔电致有机发光二极管. 通过外加电压, 可调制发光中心波长. 模拟计算了不同电压下的光谱特性, 结果表明可以获得半宽度为 2.14 nm, 可调谐范围为 150 nm 的发光光谱. 这在光互联的可调谐光源和彩色显示中有很好的应用前景.

**关键词** 有机发光二极管; 微腔; MEMS; 可调谐

**中图分类号** TN491 **文献标识码** A

## 0 引言

有机电致发光(OEL)器件由于其在平板显示中的良好应用前景而受到广泛关注. 特别是 80 年代 Tang, C. W.<sup>[1]</sup>报道了两层的纯化小分子薄膜高效率电致发光有机二极管以及 1990 年 Burroughes<sup>[2]</sup>报道了聚合物电致发光后, 有机薄膜电致发光器件的研究迅速发展. 但是, 一般的有机发光材料具有很宽的发光谱带, 谱线的半宽度约 100 nm, 难以获得高色纯度的发光. 要想获得饱和度较高的全色显示, 可以通过滤色镜, 也可以掺杂窄带发光材料并保证宽带发光材料辐射的能量有效地传递给它, 或者采用光学微腔器件. 引入光学微腔, 可以获得单色性很好的发光, 而且通过合理设计可以控制发射波长. 1992 年 Yokoyama<sup>[3]</sup>提出了用平面微腔结构来改变有机电致发光薄膜的发光光谱, 窄化光谱宽度, 自此有了很多微腔有机发光的研究.

近年来, 微腔有机电致发光二极管被广泛地用在平板显示和光互联上. 因此, 发光波长可调的微腔发光管无疑在这些应用中有诱人的应用前景. 谐振波长是由微腔的光学厚度决定的, 改变折射率<sup>[4,5]</sup>或者腔长<sup>[6]</sup>, 都可以实现发光波长调谐, 但是前者的调谐范围很小. 本文提出了一种新的基于 MEMS(Micro Electro Mechanical System)空气腔, 通过静电力改变其腔长, 而获得宽波段连续可调的微腔电致有机发光二极管, 对所设计的结构进行了模拟计算, 并作了分析和论证.

## 1 原理

微腔有机发光应用的是 Purcell 效应<sup>[7]</sup>, 激子放

在一个波长量级的谐振腔内时, 它的自发辐射效率就会改变, 满足微腔谐振条件波长的光, 就会得到增强, 而不在谐振波长处的辐射得到抑制, 这样使整个有机发光光谱得到改变, 半宽度减少, 在中心波长处的发光强度得到增强. 没有微腔的有机发光管的发光光强一般比较弱, 加上利用 Purcell 效应的微腔后, 光强得到显著的增强. 需要指出的是, 微腔效应不是简单的滤波器作用, 它能够把其他波长的辐射能量耦合到中心波长处. 我们设计的 MEMS 波长可调谐有机发光二极管是在有机发光层外面加上 MEMS 的空气腔, 通过静电力的驱动改变空气腔的厚度, 从而改变谐振波长, 这样就能实现单层发光材料的波长可调谐的发光二极管.

整个结构如图 1 所示. 在玻璃基板上先用电子束蒸发一层铝膜, 它既是底反射镜, 也是电子注入的阴极, 再用 spin coating 甩上一层发光材料 PFB5 + 9% PBD<sup>[8]</sup>, 接着镀 ITO, 作为空穴注入层和空气微腔的下电极, 接下来镀上  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为 MEMS 空气腔的支撑层, 再在上面镀高低折射率材料交替的  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  作为电介质布喇格反射镜 DBR 和 ITO, 通过光刻以及 RIBE 刻蚀等微加工工艺, 掏空形成空气腔, 就形成了一个可调谐微腔的有机发光二极管. 直流电压  $V_1$  作为 MEMS 空气腔的静电激励, 加在腔两端的 ITO 上, 由于正负电压的相互吸引, 悬空的 DBR 产生向下的变形, 空气腔厚度变化, 从而改

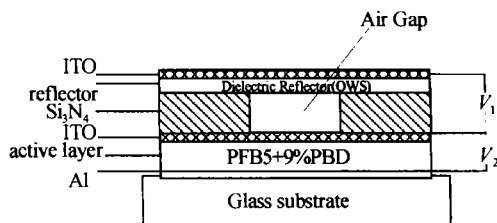


图 1 MEMS 波长可调谐微腔有机发光二极管  
Fig. 1 Schematic diagram of the MEMS based tunable microcavity organic light emitter

\*国家自然科学基金资助项目(69976026)

Tel: 0571-87951190 Email: adongzju@sohu.com

收稿日期: 2003-03-24

变了整个光学微腔的光学厚度,实现了对发射波长的调谐; $V_2$ 加在发光层两端ITO和铝膜上,作为有机发光材料PFB5的驱动电压.

Deppe et al.<sup>[9]</sup>给出了微腔有机电致发光在垂直于器件平面上的光谱理论公式

$$|E_m(\lambda)|^2 = \frac{(1-R_2)[1+R_1+2\sqrt{R_1}\cos(4\pi x/\lambda)]}{1+R_1R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos(4\pi L/\lambda)} |E_{nc}(\lambda)|^2 \quad (1)$$

式中  $x$  是发光偶极子到金属反射镜的有效长度,  $R_1$  和  $R_2$  分别是金属和介质反射镜的反射率,  $L$  是微腔的总光学厚度,  $|E_{nc}(\lambda)|^2$  是没有微腔时有机发光层的自由空间光谱. 考虑到光在两个反射镜上的反射位相,整个微腔的光学厚度可以表示为

$$L = \frac{\lambda}{2} \left( \frac{n_{\text{eff}}}{\Delta n} \right) + \sum_i n_i d_i + \left| \frac{\Phi_m}{4\pi} \lambda \right| \quad (2)$$

式中第一项是由介质反射镜的反射位相引起的光学厚度,  $n_{\text{eff}}$  和  $\Delta n$  分别是反射镜的有效折射率和高低折射率差,  $\Phi_m$  是金属反射镜的反射位相,  $n_i$  和  $d_i$  分别是腔内各层的物理厚度和折射率. 一般来说,光在金属表面引起的位相变化  $\Phi_m$  比较小,所以可以忽略不计.

从式(1)和(2)可以看出,微腔发光二极管的中心波长由  $L$  决定. 由于两个反射镜的相位变化基本是个常数,所以只有通过改变中间介质的折射率或者长度来实现波长调谐. 考虑到改变折射率的范围很小,我们用 MEMS 空气腔来实现连续的宽波段调节.

在静电力作用下,空气腔将产生三维变形,如图2所示. 为了使光学窗口不至于太小,空气腔的长宽取  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ,那么变形可以用薄板模型<sup>[10]</sup>计算

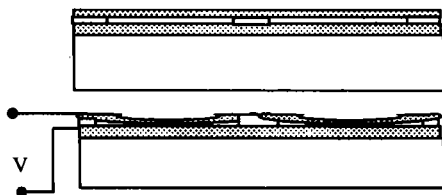


图2 平板在静电力驱动下的变形  
Fig. 2 Schematic diagram of the deformed plate by the electrostatic force

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (3)$$

$$F = \frac{\epsilon S u^2}{2d^2} \quad (4)$$

式中  $q$  为垂直薄板单位面积上的载荷大小,  $q = F/S = \epsilon u^2 / 2d^2$ ,  $D$  为薄板的抗弯刚度  $D = Eh^3 / [12(1-\mu)]$ . 其中  $u$  为施加的电压,  $d$  是空气腔高度,  $\mu$  为薄板材料的泊松比,  $E$  为杨氏模量,  $h$  是薄板宽度. 因式(3)没有数学上的解析解,只有用有限元方法来求解. 加上不同的电压后,空气腔产生变形,整个有机

发光二极管微腔的光学厚度也随之改变,使得发光光谱变化,通过设计合适的结构参数,在电压调制下,就可以得到不同光谱的发光.

## 2 设计与模拟结果

从式(1)可以看出,微腔发光二极管的光谱特性和 Fabry-Perot 相似,谐振波长可由下式决定

$$2L = 2 \sum_i n_i d_i \cos \theta_i = m\lambda \quad (5)$$

式中  $L$  为整个腔的光学厚度,  $n_i$ 、 $d_i$  是各层的折射率和物理厚度,  $\theta$  是观察的角度,  $m$  是任意的正整数,在满足微腔谐振条件下,为了不出现太多的模式,一般取  $m$  为 3 或 4.

由于微腔的作用,光谱的半宽度(FWHM)必然变窄,假定  $|E_{nc}(\lambda)| = 1$ ,由式(1)可以近似地推导出

$$\frac{1}{2} \frac{(1-R_2)[1+R_1+2\sqrt{R_1}\cos(4\pi x/\lambda)]}{1+R_1R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos(\theta_0+\Delta\theta)} = \frac{(1-R_2)[1+R_1+2\sqrt{R_1}\cos(4\pi x/\lambda)]}{1+R_1R_2-2\sqrt{R_1R_2}\cos(\theta_0+\Delta\theta)} \quad (6)$$

$$FWHM = 2\Delta\lambda = \frac{\lambda_0}{2\pi m} \Delta\theta =$$

$$\frac{\lambda_0}{2\pi m} \arccos \left( \frac{4\sqrt{R_1R_2}-1-R_1-R_2}{2\sqrt{R_1R_2}} \right) \quad (7)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别是金属和介质反射镜的反射率,由式(7)可以看出,FWHM 由反射镜的反射率决定,反射率越高,半宽度越窄.

从式(5)看出,可以通过改变腔的光学厚度来调谐发光二极管的中心波长. 用有限元计算软件 Ansys 可以算得电压和 MEMS 空气腔变形的关系,空气腔的初始高度为 900 nm,上反射镜的结构是 ITO|HLHLHLH, H、L 分别是四分之一波长的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ . 图 3(a)是平板在不同电压下的变形曲线,

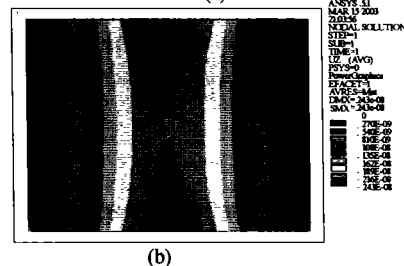
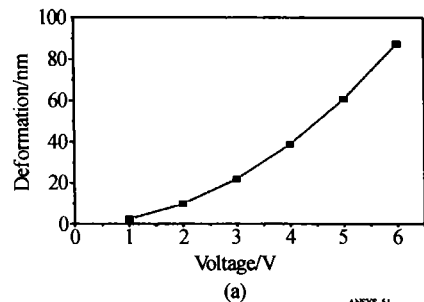


图3 MEMS 平板不同电压下变形  
Fig. 3 The deformation of the MEMS plate

图 3(b) 是电压 3 V 时整个平板的变形情况, 当电压加到 6 V 时, 平板的变形就达到 87.5 nm, 从理论上来说它的变形最大可以到三分之一的空气腔高度<sup>[11]</sup>, 即 300 nm.

整个微腔的光学厚度包括发光材料层、ITO 以及 MEMS 的空气腔. 这里取 PFB5 的厚度 80 nm, 折射率 1.75, ITO 厚度为 50 nm, 折射率 2.0, 空气腔的初始高度 900 nm, 则  $L_0$  为 1140 nm. 设 Al 在可见光处的反射率为 0.9, 介质反射镜的反射率为 0.92. 由以上参数以及式(1), 对器件进行了模拟计算.

模拟计算的结果如图 4 所示. 图(a) 是 PFB5 + 9% PBD 没有微腔时的发光光谱图, 可以看出它有较大的半带宽. 图(b) 是加上微腔后, 用不同电压调谐获得的光谱图. 比较两者可以明显看出, 无微腔时的光谱很宽, 加上微腔后, 光谱发光的强度得到很大的增强(在中心波长处约 26 倍)而且使半宽度变窄, 由式(7)可得 2.14 nm. 随着加在 MEMS 空气腔上电压的增加, 有机发光二极管的中心波长向短波方向移动, 实际应用时可以通过加不同的电压, 对中心波长进行调制. 加上一定的电压, 空气腔的高度, 最多可以调到初始高度的三分之一, 即  $\Delta l = l_0/3$ , 则可得波长调谐范围

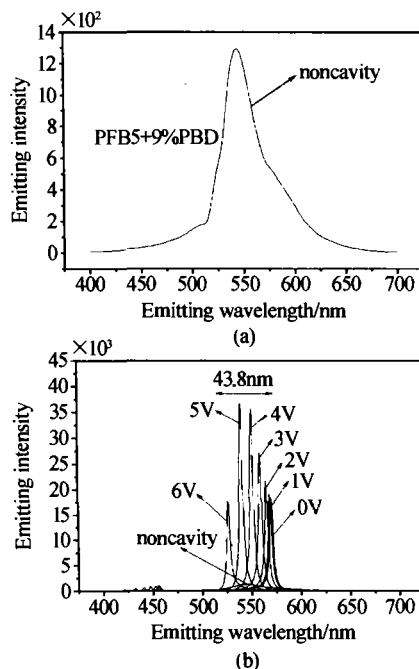


图 4 PFB5 的发光光谱和不同电压下微腔发光光谱  
Fig. 4 Electroluminescence spectrum of the PFB5 based oled (the left is noncavity, and the right is cavity with various voltage)

$$\Delta\lambda = 2\Delta l/m \quad (8)$$

$m$  是干涉级数,  $m = 4$ , 所以  $\Delta\lambda = 150$  nm. 但是, 当  $\Delta l$  调整到一定的值后, 在可见光区就会出现多个峰值, 这将使整个有机发光二极管的单色性变差, 不过这在合成白色或者单个 LED 难以实现的颜色方面

有很好的应用<sup>[12]</sup>. 因此设计时也可以把整个微腔的 FSR (Free Spectral Range) 值定为可调谐范围  $\Delta\lambda$  的最大值.

对于微腔的有机发光二极管, 不同角度发射光的强度是不一样的, 从式(5)可以看出, 不同角度的光学厚度  $L$  是不同的, 随着角度的增加, 中心波长有明显的蓝移特性. 加了微腔后, 有机发光二极管有很好的方向性, 发射光集中在一个很小范围的立体角内, 这对于光互联来说, 是一个非常好的特性. 对于要求有较大视场角的显示应用, 则可以在整个二极管的后面加透明的散射物质来增加发光角度.

### 3 结论

应用 MEMS 空气腔在静电力作用下的变形, 设计了一种新的波长可调谐有机发光二极管. 模拟了加上不同电压后腔的变形, 以及调谐后有机发光二极管的发光光谱特性. 通过计算可以获得宽波段连续 150 nm 的调谐范围, 半宽度为 2.14 nm, 发光方向性好. 可调谐的微腔电致发光二极管具有体积小、发光强度大和色饱和度好等优点, 在光互联和彩色显示中有广泛的应用前景.

#### 参考文献

- 1 Tang C W, Vanslyke S A. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett*, 1987, **51**(12): 913 ~ 915
- 2 Burroughes J H, Bradley D D C, et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 1990, **347**(11): 539 ~ 541
- 3 Yokoyama H. Physics and device applications of optical microcavities. *Science*, 1992, **256**(3): 66 ~ 70
- 4 Gmachl C, et al. Frequency tuning of a double-heterojunction AlGaAs/GaAs-vertical-cavity surface-emitting laser by a serial integrated in-cavity modulator diode. *Appl Phys Lett*, 1993, **62**(3): 219 ~ 221
- 5 Chang-Hasnain C J, et al. Continuous wavelength tuning of two-electrode vertical cavity surface emitting lasers. *Electronics Letters*, 1991, **27**(11): 1002 ~ 1003
- 6 Larson M C, et al. Broadly tunable resonant-cavity light emission. *Appl Phys Lett*, 1995, **67**(5): 590 ~ 592
- 7 Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Phys Rev*, 1946, **69**: 681
- 8 Wang Jianpu, Liu Xu, et al. Narrow emission from polyimide light-emitting diodes. *SPIE*, 2002, **4918**: 39 ~ 43
- 9 Deppe D G, Lei C, et al. Spontaneous emission from planar microstructures. *J Mod Opt*, 1994, **41**(2): 325 ~ 344
- 10 刘鸿文. 板壳理论. 杭州: 浙江大学出版社, 1987. 27 ~ 33
- Liu H W. Theory of plates and shells. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987. 27 ~ 33

- 11 Mateus F R, Chang Chih-Hao, *et al.* Widely tunable torsional optical filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(6): 819 ~ 821
- 12 Dodabalapur A, Rothberg L J, Miller T M. Color variation with electroluminescent organic semiconductors in multimode resonant cavities. *Appl Phys Lett*, 1994, **65**(18): 2308 ~ 2310

## Design of the Wavelength Tunable Microcavity Organic Light Emitting Diode Based on MEMS

Shen Weidong, Wang Jianpu, Chen Haixing, Li Haifeng, Liu Xu, Gu Peifu

State Key labs of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, China 310027

Received date: 2003-03-24

**Abstract** Using the deformation of MEMS (micro-electro-mechanic-system) air gap by electrostatic actuation, one design for tunable wavelength microcavity electroluminescent organic light emitting diode is presented. The emitting central wavelength can be tuned by applying various voltages. The simulated spectra shows full width half maximum (FWHM) is 2.13 nm and the tuning range reaches 150 nm. It is useful in colorful display and optical interconnect as an optical source.

**Keywords** Organic light emitting diode; Microcavity; MEMS; Wavelength tunable



**Shen Weidong** was born in 1977. He received the bachelor degree at Optical Engineering Department of Zhejiang University, in 2001. Currently he is pursuing the Ph. D. degree at Zhejiang University. His research is mainly focused on MOEMS technology as well as optical and optoelectronic films.