

文章编号: 0253-2239(2009)10-2885-07

可弯曲式有机电致发光器件的出光率

熊志勇¹ 李宏建^{1,2} 王俊西¹ 袁 明¹ 周子游¹ 李雪勇^{1,2}

(¹ 中南大学物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083; ² 中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要 基于几何光学模型及其原理, 推导出在不同弯曲情况下可弯曲式有机电致发光器件的出光率表达式, 分析了器件出光率受基板曲率、厚度及有机层折射率的影响, 并与平整有机电致发光器件的出光情况作了比较。结果表明: 当器件向外弯曲时, 出光率随着基板曲率与基板厚度的增大而增大, 随着有机层折射率的增大而减小; 当器件向内弯曲时, 出光率随着基板曲率与基板厚度的增大而减小, 随着有机层折射率的增大而减小。对于平整器件, 其出光率随有机层折射率的增大而减小。

关键词 几何光学; 出光率; 有机电致发光器件; 柔性基板; 曲率; 全反射

中图分类号 O435.1; TN383.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2885

Light Out-Coupling Efficiency in Flexible Organic Light-Emitting Devices

Xiong Zhiyong¹ Li Hongjian^{1,2} Wang Junxi¹ Yuan Ming¹ Zhou Ziyou¹ Li Xueyong^{1,2}

(¹ College of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)
(² College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract Based on the geometrical optics model, the expression of flexible organic light emitting devices (FOLED)'s out-coupling efficiency was presented. The influence of substrate curvature and its thickness, and organic layer's refractive index on the performance of the FOLED's out-coupling efficiency was studied, and the variation of out-coupling efficiency between FOLED and plane organic light emitting display (OLED) are contrasted as well. The result shows that: the out-coupling efficiency is enhanced with increased substrate curvature and its thickness, but is reduced with increased organic layer's refractive index for outcurved substrate. The out-coupling efficiency is reduced with increased substrate curvature and thickness, and is also reduced with increased organic layer's refractive index for incurvated substrate. The out-coupling efficiency of OLED is reduced with increased organic layer's refractive index.

Key words geometric optics; light out-coupling efficiency; organic light emitting devices (OLED); flexible substrate; curvature; total reflection

1 引 言

由于可将发光器件制作在柔性基板上, 可弯曲式有机电致发光器件(FOLED)成为下一代显示技术发展的重要方向。Gustafsson 等^[1]利用铟锡氧化物/聚对苯二甲酸乙二醇酯(ITO/PET)当作柔性基

板, 制作出第一个高分子为主体的 FOLED; Wu 等^[2]制作了以铬金属为柔性基板的 FOLED; Xie 等^[3]使用涂有 SOG 薄膜的钢箔当作柔性基板, 制作出上发光型 FOLED; Charton 等^[4]发表了在柔性基板上分别溅射了 Al₂O₃ 层和有机/无机交替多层

收稿日期: 2008-11-28; **收到修改稿日期**: 2009-02-10

基金项目: 湖南省杰出青年科学基金(03JJY1008)、中国博士后科学基金(2004035083)、湖南省自然科学基金(05JJ20034)和中南大学科学基金(0601059)资助项目。

作者简介: 熊志勇(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事有机发光器件方面的研究。E-mail: xzy0201@126.com

导师简介: 李宏建(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事有机及无机半导体材料与器件方面的研究。

E-mail: lihj398@yahoo.com.cn

膜,得到了亮度与玻璃基板器件十分接近的 FOLED;Templier 等^[5]制作了涂有多晶硅(Poly silicon)的金属箔为柔性基板的主动式 FOLED 显示器。

发光效率是表征有机电致发光器件(OLED)发光特性的重要参数^[6~8]。OLED 的发光效率通常是指器件的外量子效率 η_{ext} ,其主要由内量子效率 η_{int} 和出光率 η_c 决定($\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \times \eta_c$)。造成出光率 η_c 不高的最主要原因是光自折射率大的物质进入折射率小的物质会产生全反射,因此只有部分光能通过界面出射。Greenham 等^[9]利用双层介质模型分析计算了 OLED 的出光率;Lu 等^[10]以费米黄金定律等方法讨论了光存在于 OLED 内部的模式;Krummacker 等^[11]研究了光存在于微腔 OLED 内部的模式;Yamasaki 等^[12]通过对器件进行特殊的光学设计,采用涂布微球粒作为散射层的方法提高了 OLED 的出光率,Moller 等^[13]通过覆盖微透镜(半球状)阵列的方法提高了 OLED 的出光率。但是,从理论上对 FOLED 进行发光特性研究,特别是与常规的 OLED 的发光特性进行比较,目前报道很少。因此,对 FOLED 的出光率进行研究很有意义。

本文基于几何光学模型及其原理,研究了在不同弯曲情况下 FOLED 的出光率随基板曲率、厚度以及有机层折射率的影响,并与 OLED 的出光情况进行了比较。

2 模型与分析

本文设计了结构为“柔性基板/ITO/有机发光层/阴极”的 FOLED,如图 1 所示。当器件平整时,与常规的 OLED 发光一样,发光可存在于三种模式:1)外部模式: $\theta < \theta_{c1}$ 时,发射光可以透过介质出射;2)基板模式: $\theta_{c1} < \theta < \theta_{c2}$ 时,发射光可以透过 ITO 与基板的界面,但不能透过基板与空气的界面,被局限在基板中;3)ITO/有机层模式: $\theta > \theta_{c2}$ 时,发射光不能透过 ITO 与基板的界面,被局限在 ITO/有机层中。图中 θ 为出射光与中心线的夹角;

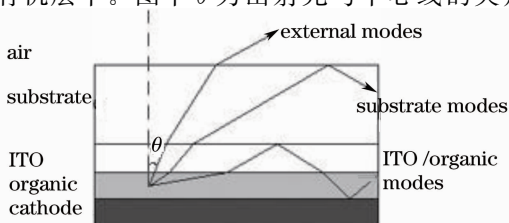


图 1 光存在于平整器件内部的模式

Fig. 1 Light modes in flat OLED

θ_{c1} 、 θ_{c2} 分别为当光线在基板与空气、ITO 与基板界面处刚好发生全反射时(临界状态),出射光与中心线的夹角。由 Snell 折射定律,有

$$\sin \theta_{c1} = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{org}}}, \quad (1)$$

$$\sin \theta_{c2} = \frac{n_{\text{sub}}}{n_{\text{org}}}, \quad (2)$$

其中 n_{air} 、 n_{sub} 、 n_{org} 分别为空气、基板、有机层的折射率(本文取 $n_{\text{air}} = 1$)。

在三种模式中,只有以外部模式出射的光才能到达器件外部,其余光都被限制在 OLED 内部。因此,器件的出光率 η_c 也就是外部模式在三种模式中所占的比率。由图 1 也可看出,基板、有机层折射率会影响器件的出光效率,当基板、有机层折射率过大时,部分光会因为全反射效应而被局限在介质层内,而不能出射。

可用经典光学可计算三种模式所占的比率^[9]:

$$\eta_c = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (3)$$

$$\eta_{\text{sub}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}}^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{ITO/org}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}}^{\pi} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (5)$$

其中 η_c 、 η_{sub} 、 $\eta_{\text{ITO/org}}$ 分别为外部模式、基板模式、ITO/有机层模式所占的比率; $T(\theta)$ 、 $I(\theta)$ 分别为能量发射系数、发射偶极子的辐射率[本文取 $T(\theta) = 1$ 、 $I(\theta) = 1$]。

当器件弯曲时(如图 2 所示),存在两种情况:基板向外弯曲和基板向内弯曲。不考虑弯曲对器件内部挤压带来的影响,器件的各层薄膜的光学常数都不变。但是光线在基板与空气、ITO 与基板界面处刚好发生全反射时(临界状态),出射光与中心线的夹角却发生了变化,即 θ 为 θ_{c1} 、 θ_{c2} 时不再是三种模式之间的临界情况。由图 3 知,当基板向外弯曲时,外部模式与基板模式的临界角 $\theta = \theta_{c1} + \varphi_1$,基板

模式与 ITO/有机层模式的临界角 $\theta = \theta_{c1} + \varphi_2$ ；当基板向内弯曲时，外部模式与基板模式的临界角

$\theta = \theta_{c1} - \varphi_3$ ，基板模式与 ITO/有机层模式的临界角 $\theta = \theta_{c1} - \varphi_4$ 。

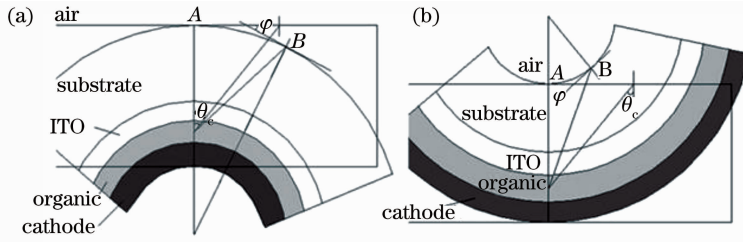


图 2 可弯曲式器件结构图。(a)基板向外弯曲；(b)基板向内弯曲

Fig. 2 Structure of FOLED. (a) Substrate is outcurved; (b) substrate is incurved

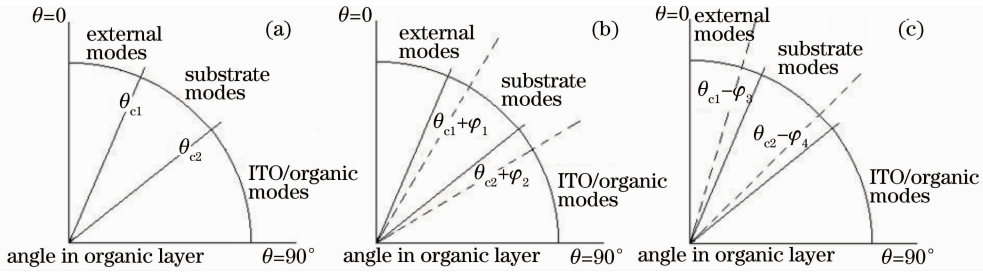


图 3 不同情况时光存在于器件内部的模式。(a)平整器件；(b)基板向外弯曲；(c)基板向内弯曲

Fig. 3 The light modes in different devices. (a) flat; (b) substrate was outcurved; (c) substrate was incurved

对于 FOLED,若器件的弯曲度(基板面曲率)为 k ,有

$$k = \frac{\varphi}{S}, \quad (6)$$

$$S = R\varphi, \quad (7)$$

式中 φ 为 A, B 两点切线的夹角,分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$; S 为 A, B 两点间的弧长; R 为曲率半径,分别为 R_1 (基板向外弯曲时)、 R_2 (基板向外弯曲时)。

当基板向外弯曲时,由图可知

$$\frac{R_1 - (l_{\text{sub}} + l_{\text{ITO}} + l_{\text{org}}/2)}{\sin \theta_{c1}} = \frac{R_1}{\sin(\theta_{c1} + \varphi_1)}, \quad (8)$$

$$\frac{R_1 - (l_{\text{sub}} + l_{\text{ITO}} + l_{\text{org}}/)}{\sin \theta_{c2}} = \frac{R_1 - l_{\text{sub}}}{\sin(\theta_{c2} + \varphi_2)}, \quad (9)$$

式中 $l_{\text{sub}}, l_{\text{ITO}}, l_{\text{org}}$ 分别为基板,ITO,有机层的厚度。发光中心位于机层的中间,即 $l_{\text{org}}/2$ 处。

由于 FOLED 在弯曲时为瓦片形状,以计算球冠面积的方法,对临界状态时出光区域作近似计算,则三种模式所占的比率为

$$\eta_c = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} + \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}}^{\theta_{c1} + \varphi_1} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (10)$$

$$\eta_{\text{sub}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}}^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} + \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}}^{\theta_{c2} + \varphi_2} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} - \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}}^{\theta_{c1} + \varphi_1} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (11)$$

$$\eta_{\text{ITO/org}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}}^{2\pi} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} - \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}}^{\theta_{c2} + \varphi_2} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (12)$$

最后,得

$$\eta_c = 1 - \frac{\cos \theta_{c1}}{2} - \frac{\cos(\theta_{c1} + \varphi_1)}{2}, \quad (13)$$

$$\eta_{\text{sub}} = \frac{\cos \theta_{c1}}{2} - \frac{\cos \theta_{c2}}{2} - \frac{\cos(\theta_{c2} + \varphi_2)}{2} + \frac{\cos(\theta_{c1} + \varphi_1)}{2}, \quad (14)$$

$$\eta_{\text{ITO/org}} = \frac{\cos \theta_{c2}}{2} + \frac{\cos(\theta_{c2} + \varphi_2)}{2}, \quad (15)$$

当基板向内弯曲时,由图可知

$$\frac{R_2 + (l_{\text{sub}} + l_{\text{ITO}} + l_{\text{org}}/2)}{\sin \theta_{c1}} = \frac{R_2}{\sin(\theta_{c1} - \varphi_3)}, \quad (16)$$

$$\frac{R_2 + (l_{\text{sub}} + l_{\text{ITO}} + l_{\text{org}}/2)}{\sin \theta_{c2}} = \frac{R_2 + l_{\text{sub}}}{\sin(\theta_{c2} - \varphi_4)}, \quad (17)$$

这时,三种模式所占的比率为

$$\eta_c = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} - \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}-\varphi_3}^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (18)$$

$$\eta_{\text{sub}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}}^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} + \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c1}-\varphi_3}^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c1}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} - \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}-\varphi_4}^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (19)$$

$$\eta_{\text{ITO/org}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}}^{2\pi/2} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta} + \frac{1}{2} \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\theta_{c2}-\varphi_4}^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{c2}} T(\theta) I(\theta) \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (20)$$

最后,得

$$\eta_c = 1 - \frac{\cos \theta_{c1}}{2} - \frac{\cos(\theta_{c1} - \varphi_1)}{2}, \quad (21)$$

$$\eta_{\text{sub}} = \frac{\cos \theta_{c1}}{2} - \frac{\cos \theta_{c2}}{2} + \frac{\cos(\theta_{c1} - \varphi_3)}{2} - \frac{\cos(\theta_{c2} - \varphi_4)}{2}, \quad (22)$$

$$\eta_{\text{ITO/org}} = \frac{\cos \theta_{c2}}{2} + \frac{\cos(\theta_{c2} - \varphi_4)}{2}. \quad (23)$$

3 结果与讨论

3.1 出光率随基板曲率的变化

当器件弯曲时,光存在于器件内部的模式会出现一定的变化。分析了有机发光层折射率为 1.9,厚度为 200 nm,基板厚度为 0.5 mm,ITO 厚度为 50 nm 的器件,基板面曲率从 100 m^{-1} 到 800 m^{-1} 的变化。图 4(a)给出了基板向外弯曲时的情况,可以看出:1)外部模式所占的比率(出光率)随着曲率的增大而增大,也就是说随着器件弯曲度的加强,出光率会增大;2)基板模式所占的比率随着曲率的增大而减小;3)ITO/有机层模式所占的比率随着曲率的

增大变化不明显。图 4(b)给出了基板向内弯曲时的情况,可以看出:1)外部模式所占的比率(出光率)随着曲率的增大而减小,也就是说随着器件弯曲度的加强,出光率会减小;2)基板模式所占的比率随着曲率的增大而增大;3)ITO/有机层模式所占的比率随着曲率的增大变化也不明显。

为研究图 4(a)、图 4(b)中 ITO/有机层模式所占的比率随着曲率具体的变化关系,图 4(c)给出了 ITO/有机层模式所占的比率在两种弯曲情况下放大后(横坐标不变,纵坐标放大)的情况。从图 4(c)可以看出:当基板向外弯曲时,比率会随着曲率的增大而减小;当基板向内弯曲时,比率会随着曲率的增大而

增大。但是,两种情况的变化幅度都不大(0.01%的变化幅度)。图 4(d)则定量讨论了基板面曲率分别为 250 m^{-1} , 450 m^{-1} , 650 m^{-1} 时,存在于器件内部各种模式具体所占的比率及其变化情况。可以看出,当器件向外弯曲时,出光率从 17.54%(曲率为 250 m^{-1})

增加到 26.19%,而以基板模式存在的光则相应的减少;当器件向内弯曲时,出光率从 13.29%(曲率为 250 m^{-1})减少到 11.60%,基板模式存在的光则相应的增多。两种情况时,以 ITO/有机层模式存在的光的变化量不明显。

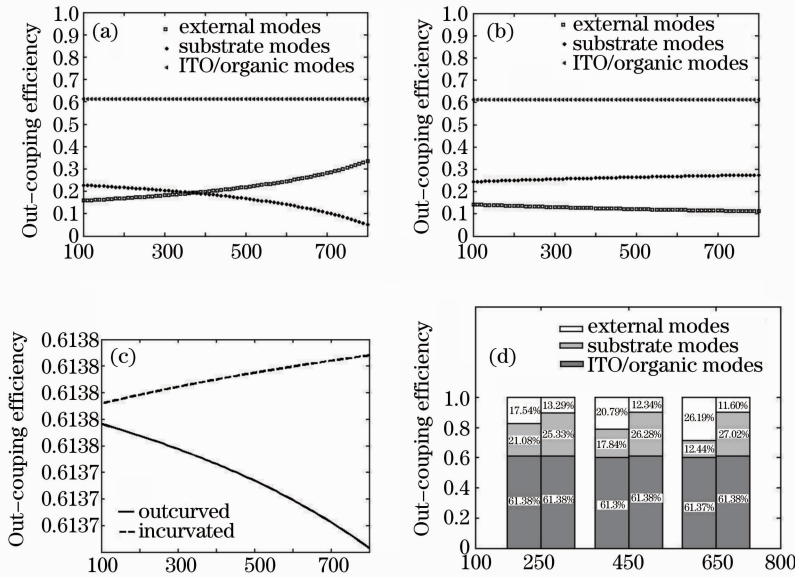


图 4 出光率随曲率的变化。(a)基板向外弯曲;(b)基板向内弯曲;(c)图 4(a)(b)中 ITO/有机层模式变化;(d)各模式比率

Fig. 4 Influence of outcurved (a) and incurvated (b) and incurvated (b) substrate curvature on out-coupling efficiency; (c) ITO/organic mode in (a) and (b); (d) rates of three modes

光存在于器件内部各种模式所占的比率最基本的影响因素是界面处的全反射效应,如图 2 所示。当器件弯曲时,虽然各个界面处的折射临界角并没有变化,但出射光到达界面处的位置却发生了变化,这样就造成了临界状态的变化,即图 3 中的出射光与中心线的夹角 θ 的临界值发生改变。在基板向外弯曲时, θ 增大;向内弯曲时, θ 减小。从图 4 也可以知道,对于这种临界状态的变化而言,外部模式与基板模式的临界角 $\theta = \theta_{c1} + \varphi_1$ (基板向外弯曲), $\theta = \theta_{c1} - \varphi_3$ (基板向内弯曲) 变化比较大,也就是 φ_1, φ_3 的值比较大;而基板模式与 ITO/有机层模式的临界角 $\theta = \theta_{c1} + \varphi_2$ (基板向外弯曲), $\theta = \theta_{c1} - \varphi_4$ (基板向内弯曲) 变化不明显,也就是 φ_2, φ_4 的值很小。这主要是因为,相对于 ITO/有机层厚度(有效厚度为 $l_{\text{ITO}} + l_{\text{org}}/2$) 而言,基板的厚度(l_{sub}) 要大的多,所以影响也会大得多。

文献[14]研究了设计为半球状阵列基板的 OLED,实验结果显示器件的出光率提高到 2 倍(玻璃基板)和 3 倍(塑料基板);文献[15]研究了设计为涂布椭球状微透镜阵列基板的 OLED,结果显示器

件的出光率提高到 1.85 倍(理论结果)和 1.7 倍(实验结果)。这些平整器件出光率的研究与本文分析 FOLED 的研究有相似的地方,即都是由于出光区域的增大,使得由全反射效应引起的光的损失减小,因此出光率增大。但是,FOLED 弯曲时为瓦片形状,而非半球形状,所以计算较为复杂,相应的变化幅度与这些特殊光学设计的 OLED 也不同。

3.2 出光率随基板厚度的变化

我们分析了有机发光层折射率为 1.9、厚度为 200 nm,ITO 厚度为 50 nm、基板面曲率为 500 m^{-1} 的器件在基板厚度从 0.1 mm 到 0.6 mm 的变化。图 5(a)给出了基板向外弯曲时的情况,可以看出:1)出光率随着基板厚度的增大而增大;2)基板模式所占的比率随着基板厚度的增大而减小;3)ITO/有机层模式所占的比率随着基板厚度的增大变化不明显。图 5(b)给出了基板向内弯曲时的情况,可以看出:1)出光率随着基板厚度的增大而减小;2)基板模式所占的比率随着基板厚度的增大而增大;3)ITO/有机层模式所占的比率随着基板厚度的增大变化不明显。

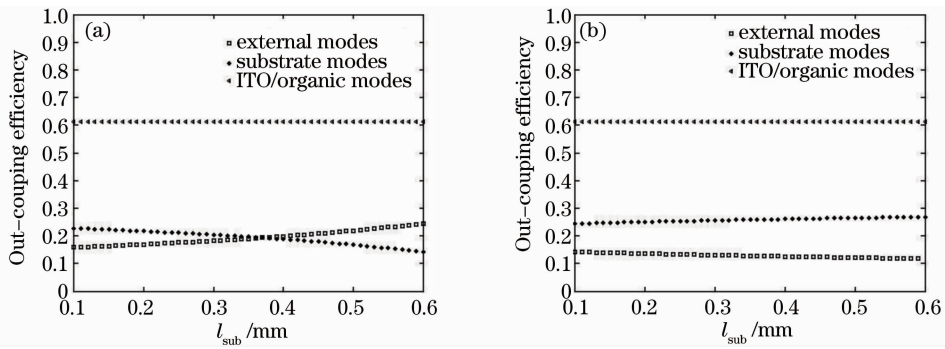


图 5 出光率随基板厚度的变化。(a) 基板向外弯曲; (b) 基板向内弯曲

Fig. 5 Influence of outcurved (a) and incurvated (b) substrate thickness on out-coupling efficiency

结合图 3 分析可知, 基板厚度的变化主要造成了出射光到达空气/基板界面处的位置发生了变化, 外部模式与基板模式的临界角 $\theta_{c1} + \varphi_1$ (基板向外弯曲)、 $\theta_{c1} - \varphi_3$ (基板向内弯曲) 相对发生变化, 即 φ_1 、 φ_3 的值发生变化。所以, 在器件基板厚度变化而其他光学常数不变的情况下, 当基板向外弯曲时, 随着基板厚度增大, 会有更多的以基板模式存在的光, 脱离基板的束缚出射到基板外部; 当基板向内弯曲时, 随着基板厚度增大, 会有更多的以外部模式存在的光, 因为在界面处的全反射效应而被局限在基板内。相对基板来说, ITO 的厚度非常小, 根据图 2 知, ITO 的厚度对于器件的出光效率的影响很小。

对于平整器件而言, 不考虑其它因素的干扰, 由图 1 和式 3 分析知光在各界面处发生全反射的位置

与临界角都没有发生变化, 所以出光率与基板厚度无关。

3.3 出光率随有机层折射率的变化

当器件有机层折射率变化时, 光存在于器件内部的模式变化比较大。我们分析了基板厚度为 0.5 mm、基板面曲率 500 m^{-1} , 有机发光层厚度为 200 nm, ITO 厚度为 50 nm 的器件, 在有机层折射率从 1.5 到 2.3 的变化。从图 6 可以看出器件在两种弯曲情况下: 1) 出光率随着有机层折射率的增大而减小; 2) 基板模式所占的比率随着有机层折射率的增大而减小; 3) ITO/有机层模式所占的比率随着有机层折射率的增大而增大。但是, 具体外部模式和基板模式所占的比率在两种弯曲情况下不同。

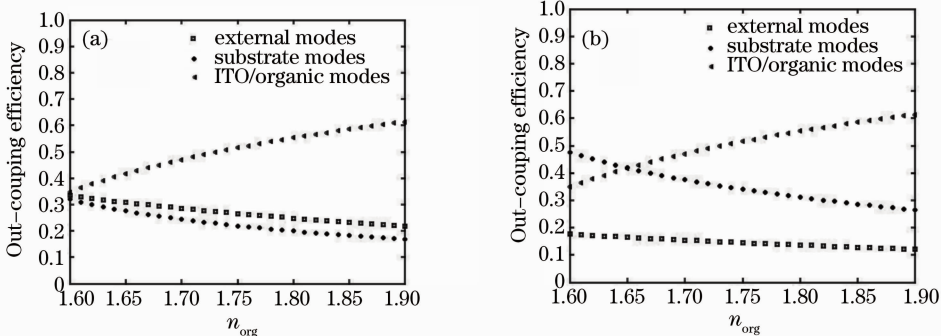


图 6 出光率随有机层折射率的变化。(a) 基板向外弯曲; (b) 基板向内弯曲

Fig. 6 Influence of organic layer's refractive index on out-coupling efficiency.

(a) substrate outcurved; (b) substrate incurvate

全反射是光在具有不同折射率介质层界面处, 只产生反射不产生折射的现象, 因此折射率是影响光存在于器件内部各种模式所占的比率重要的因素。当有机层折射率增大时, 全反射效应增强, 因全反射效应而损失的光增多。

由(3)式可以得到平整器件中出光率与有机层折射率的关系 $\eta_c = 1 - \sqrt{1 - (1/n_{\text{org}})^2}$ 。可以看出,

平整器件中出光率同样会随着有机层折射率的增大而减小。这与 FOLED 中的变化趋势相同, 但具体外部模式和基板模式所占的比率不同。

结合图 3 来分析, 有机层折射率的变化直接影响了 θ_{c1} 、 θ_{c2} 的大小, 因此, 外部模式与基板模式的临界角 $\theta_{c1} + \varphi_1$ (基板向外弯曲)、 $\theta_{c1} - \varphi_3$ (基板向内弯曲), 以及基板模式与 ITO/有机层模式的临界角

$\theta = \theta_{c1} + \varphi_2$ (基板向外弯曲), $\theta = \theta_{c1} - \varphi_1$ (基板向内弯曲) 相对也会发生变化。而在分析基板曲率、基板厚度对 FOLED 出光率的影响时, θ_{c1} , θ_{c2} 的大小并没有变化。

这些分析既可以为 FOLED 的实验研究提供解释, 同时可以为制作更高出光率器件提供参考。从提高出光率的角度来考虑, 在 FOLED 设计时: 当器件向外弯曲时, 在可承受的弯曲程度内可以尽量弯曲不会减少出光效率, 基板厚度变大也不会减少出光效率; 而当器件向内弯曲时, 应尽量减少弯曲度, 且应尽量使器件薄化。同时, FOLED 的有机层折射率不宜过大。

4 结 论

当 FOLED 弯曲时, 其出光率会产生一定的变化。当器件向外弯曲时, FOLED 的出光率随着基板曲率的增大而增大, 随着基板厚度的增大而增大; 当器件向内弯曲时, FOLED 的出光率随着基板曲率的增大而减小, 随着基板厚度的增大而减小。这主要是由于出射光到达界面处的位置发生了变化, 这样就造成了临界状态的变化, 使得光存在与器件内部的各种模式所占的比率相应的发生变化。在两种弯曲情况下, FOLED 的出光率都随着有机层折射率的增大而减小, OLED 的出光率也随着有机层折射率的增大而减小, 但这几种情况变化的幅度不一样。折射率的增大直接引起了界面处的折射临界角的增大, 使得外部模式所占的比率减小。这些分析可为 FOLED 的实验研究提供解释和参考。

参 考 文 献

- 1 G. Gustafsson, Y. Cao, G. M. Treacy *et al.*. Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers [J]. *Nature*, 1992, **357**(6378): 477~479
- 2 C. C. Wu, S. D. Theiss, G. Gu *et al.*. Integration of organic LEDs and amorphous Si TFT's onto flexible and lightweight metal foil substrates[J]. *IEEE Elec. Dev. Lett.*, 1997, **18**(1): 609~611
- 3 Z. Xie, L. S. Hung, F. Zhu. A flexible top-emitting organic light-emitting diode on steel foil[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2003,

- 381(5-6): 691~696
- 4 C. Charton, N. Schiller, M. Fahland *et al.*. Development of high barrier films on flexible polymer substrates[J]. *Thin Solid Films*, 2006, **502**(1-2): 99~103
- 5 F. Templier, B. Aventureur, P. Demars *et al.*. Fabrication of high performance low temperature poly-silicon backplanes on metal foil for flexible active-matrix organic light emission diode displays[J]. *Thin Solid Films*, 2007, **515**(19): 7428~7432
- 6 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
- 7 Lou Shuangling, Yu Junsheng, Li Weizhi *et al.*. Organic light-emitting devices based on novel hole transport layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1455~1459
娄双玲, 于军胜, 黎威志 等. 基于新型空穴传输材料的有机电致发光器件的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1455~1459
- 8 Suo Fan, Yu Junsheng, Deng Jing *et al.*. Study on high-brightness green organic light-emitting devices using PS-TPD as hole transporting layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2021~2026
锁 钊, 于军胜, 邓 静 等. PS-TPD 空穴传输层的高亮度绿光有机电致发光器件的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2021~2026
- 9 N. C. Greenham, R. H. Friend, D. D. C. Bradley. Angular dependence of the emission from a conjugated polymer light-emitting diode: Implications for efficiency calculations[J]. *Adv. Mater.*, 1994, **6**(6): 491~494
- 10 M. H. Lu, J. C. Sturm. Optimization of external coupling and light emission in organic light-emitting devices: modeling and experiment[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **91**(2): 595~604
- 11 B. Krummacher, M. K. Mathai, V. E. Choong *et al.*. Influence of charge balance and microcavity effects on resultant efficiency of organic-light emitting devices[J]. *Organic Electronics*, 2006, **7**: 313~318
- 12 T. Yamasaki, K. Sumioka, T. Tsutsui. Organic light-emitting device with an ordered monolayer of silica microspheres as a scattering medium[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(10): 1243~1245
- 13 S. Moller, S. R. Forrest. Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **91**(5): 3324~3327
- 14 C. F. Madigan, M. H. Lu, J. C. Sturm. Improvement of output coupling efficiency of organic light-emitting diodes by backside substrate modification[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(13): 1650~1652
- 15 H. J. Peng, Y. L. Ho, X. J. Yu *et al.*. Coupling efficiency enhancement in organic light-emitting devices using microlens array-theory and experiment[J]. *J. Display Technology*, 2005, **1**(2): 278~282