

# 顶发射聚合物发光二极管的出光率分析

桂宇畅<sup>1</sup> 文尚胜<sup>1,2</sup> 张剑平<sup>1</sup> 王保争<sup>1</sup> 赵宝锋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华南理工大学高分子光电材料及器件研究所, 广东 广州 510640 )  
(<sup>2</sup> 华南理工大学特种功能材料教育部重点实验室, 广东 广州 510640 )

**摘要** 采用传输矩阵法及 Matlab 软件模拟以聚合物 MEH-PPV 为发光材料的顶发射聚合物发光二极管 (TEPLED) 出光率, 探讨了阳极材料、阴极材料、折射率匹配层以及发光角度等对器件出光率的影响。从仿真结果可知以传统分布布拉格反射器 (DBR) 为衬底的器件与以 Ag 膜为反射阳极的器件相比, 表现出更高的出光率, 达到 47.43%。针对半透明金属阴极对光线的吸收和反射问题, 设计了以透明材料为阴极的器件, 提高了 TEPLED 出光率, 达到 67.11%, 与以 Ag 膜为阴极的器件相比, 出光率高出 10%。分析了 DBR 对器件出光角度的影响, 结果表明, 器件在较小出光角度范围 (30°) 内 DBR 结构对整个 TEPLED 出光率影响较小; 当角度大于 30° 时, 器件出光率受 DBR 的反射特征影响较大。DBR 的应用为 TEPLED 出光率的优化设计提供了理论依据。

**关键词** 薄膜; 顶发射聚合物发光二极管; 出光率; 传输矩阵法; 分布布拉格反射器

**中图分类号** O435.1; TN383.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0631002

## Analysis of Light Out-Coupling Efficiency in Top-Emitting Polymer Light-Emitting Devices

Gui Yuchang<sup>1</sup> Wen Shangsheng<sup>1,2</sup> Zhang Jianping<sup>1</sup> Wang Baozheng<sup>1</sup> Zhao Baofeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Polymer Optoelectronic Material and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Special Functional Materials, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

**Abstract** The light out-coupling efficiency of top-emitting polymer light-emitting devices (TEPLED) based on poly [2-me-thoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-1, 4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) is simulated by applying the transfer matrix method and software Matlab. The influence of anode materials, cathode materials, capping layers and observing angle on the performance of the TEPLED's out-coupling efficiency is studied. When compared with Ag film anode device, the one based on distributed Bragg reflector (DBR) presents higher out-coupling efficiency, reaching 47.43%. To decrease the light absorption and reflection by sub-transparent metal, transparent materials cathode is designed so that the light-coupling efficiency raises about 10% compared with Ag anode devices, reaches 67.11%. The influence of DBR on the observing angles of total TEPLED is studied. The results show that it has little effect on light-coupling efficiency of TEPLED by DBR when the observing angle changes in a narrow range (30°). It has more effect on light-coupling efficiency when the observing angle is more than 30°. The application of DBR provides a theoretical basis for the optimization of out-coupling efficiency of TEPLED.

**Key words** films; top-emitting polymer light-emitting devices (TEPLED); out-coupling efficiency; transfer matrix method; distributed Bragg reflector (DBR)

**OCIS codes** 310.6860; 200.4860; 230.2090; 240.0310

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-02-21

基金项目: 广东省工业科技攻关计划项目 (B09B2071220) 和广东省国际科技合作计划项目 (B09B2051110) 资助课题。

作者简介: 桂宇畅 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事有机发光器件方面的研究。E-mail: gycscut@163.com

导师简介: 文尚胜 (1964—), 男, 博士, 副教授, 主要从事有机及无机半导体材料与器件等方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn

## 1 引言

有机电致发光二极管(OLED)由于在显示和照明领域巨大的潜在应用价值,吸引了广泛的关注,被寄予希望成为下一代平板显示器以及照明光源。有机发光器件结构一般采用 Tang 等<sup>[1]</sup>提出的传统 OLED 结构,若将此结构应用于薄膜晶体管(TFT)有源驱动显示屏,则显示发光面积与像素的驱动电路之间存在重叠,驱动电路会遮挡 OLED 的一部分发光区域(约 30%~50%)。采用顶发射有机发光二极管(TEOLED)可弥补传统 OLED 开口率低的不足,大幅度提高出光效率。Gu 等<sup>[2]</sup>采用 Mg:Ag 合金薄层提高了 TEOLED 的电子注入,并蒸镀透明氧化铟锡(ITO)层以提高器件稳定性以及光出射度。Parthasarathy 等<sup>[3,4]</sup>报道了以酞菁铜(CuPc)或 2,9-二甲基-4,7-二苯基-9,10-菲咯啉(BCP)作为电子注入层及缓冲层,与 ITO 组成阴极以代替低功函数金属的顶发射器件。Hung 等<sup>[5]</sup>报道了阴极结构为 LiF/Al/Ag 的器件,并在 Ag 层之上蒸镀不同折射率的光耦合层,以提高器件光出射率。Deng 等<sup>[6]</sup>报道了以 poly[2-me-thoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylenevinylene](MEH-PPV)与聚乙二醇(PEG)共混作发光层,ITO 或 Au 作为反射阳极,Al/Ag 双层薄膜作为光出射层的顶发射聚合物发光二极管(TEPLED),并在出射层外旋涂一层高分子折射率匹配层。Qiu 等<sup>[7]</sup>报道了以多孔硅布拉格反射器(DBR)为衬底, LiF/Al/Ag 为阴极的新型器件,出光效率大大提高且具有很好的方向性。

本文基于 TEPLED 的光学模型及传输矩阵法原理,通过使用 Matlab 软件进行模拟计算,设计了以 MEH-PPV 为发光材料的多种 TEPLED 结构,探讨了阳极材料、阴极材料和折射率匹配层发光角度等对器件出光率的影响,为 TEPLED 优化设计以及在有机平板显示领域的应用提供理论参考。

## 2 理论模型

### 2.1 传输矩阵法

传输矩阵法是应用矩阵方法来研究光在分层介质中传播时的分光透射特性、分光反射特性、分光吸收特性以及光的偏振态和相位状态等特性。利用传输矩阵法,可以推导出分层介质的如下关系:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (2)$$

则

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \mathbf{M}_j \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $B, C$  为后面矩阵运算结果的两个矩阵元,可以通过它们求出膜系的组合导纳  $Y = B/C$ ;  $i$  为虚数单位,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\mathbf{M}_j, \eta_j, \delta_j$  分别为第  $j$  层膜的特征矩阵、光学导纳和相位厚度,只考虑正入射时

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_j + i \frac{a_j \lambda}{4\pi} \right) d_j, \quad (4)$$

式中  $n_j, a_j$  和  $d_j$  分别表示第  $j$  层膜的折射率、吸收系数和物理厚度,  $\lambda$  为发射光波长。那么该  $k$  层膜系的反射率  $R$ 、透射率  $T$  可表示为

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (5)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (6)$$

式中  $\eta_0$  和  $\eta_{k+1}$  为入射介质和出射介质的光学导纳。显然利用传输矩阵法可以准确地计算整个 TEPLED 结构膜层的出光效率。

### 2.2 分布布拉格反射器(DBR)衬底的聚合物发光二极管(PLED)器件结构

传统 DBR 是由与衬底晶格相匹配的高折射率和低折射率两种材料交替堆积的周期结构,其每层厚度  $d$  为

$$d_{1,h} = \frac{\lambda}{4n_{1,h} \cos \theta_{1,h}}, \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为 DBR 的中心反射波长,即为 MEH-PPV(分子结构式如图 1 所示)的发光峰值波长 580 nm。  $n_l$  与  $n_h$  分别表示 DBR 材料的低折射率和高折射率,  $\theta_{1,h}$  为光入射至 DBR 结构中某层材料的角度。在中心波长正入射情况下, DBR 周期数固定时,反射率随  $n_l$  与  $n_h$  的比值增大而增大;  $n_l$  与  $n_h$  的比值固定时,反射率随

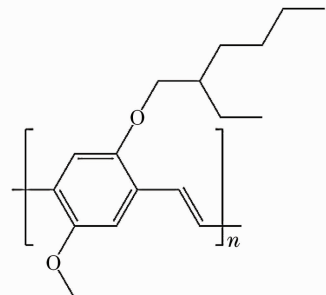


图 1 MEH-PPV 的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of MEH-PPV

DBR 周期数增大而增大<sup>[8]</sup>。

本文根据典型的以 DBR 衬底为基础的 PLED 器件结构(图 2,图 3)设计了 3 种以多孔硅 DBR 为衬底的 TEPLD,提高了器件出光率。器件结构分别为 Si/DBR/SiO<sub>2</sub>(100 nm)/ITO(130 nm)/PEDOT(40 nm)/MEH-PPV(80 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/capping layer(结构 1),Si/SiO<sub>2</sub>(100 nm)/Ag(130 nm)/AgO<sub>2</sub>(0.5 nm)/PEDOT(40 nm)/MEH-PPV(80 nm)/LiF(0.5nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/capping layer(结构 2)以及 Si/DBR/SiO<sub>2</sub>(100 nm)/ITO(130 nm)/PEDOT(40 nm)/MEH-PPV

(80 nm)/BCP(100 nm)/ITO(80 nm)/capping layer(结构 3),如图 4~6 所示,其中 capping layer 为阴极外镀折射率匹配层。将以 DBR 为阳极反射层、以 Ag 为透射阴极的结构 1 与以 Ag 为阳极反射层和透射阴极的结构 2 以及以 DBR 为阳极反射层、以 ITO 为透射阴极的结构 3 进行比较,并与传统 PLED 结构(图 3)作比较。利用传输矩阵法<sup>[9]</sup>以及 Matlab 软件模拟了传统 PLED 的出光效率,模拟计算的器件出光率为 17.17%,大部分的光在器件内被导波或吸收。计算中用到的其他各层光学参量如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 PLED 器件的光学参量(580 nm,25 °C)

Table 1 Optical parameters of PLED device(580 nm,25 °C)

Layer	Quartz glass	ITO	PEDOT	MEH-PPV	Al	Ag	SiO <sub>2</sub>	Si	BCP
Refractive index <i>n</i>	1.46	1.96	1.52	1.77	1.05	0.12	1.46	4	1.7
Extinction coefficient <i>k</i>	0.01	0.015	0.12	0.158	6.9	3.45	0	0.03	0

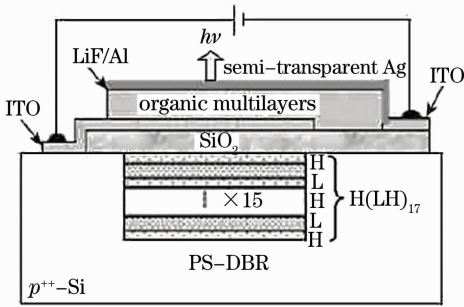


图 2 基于 DBR 的顶发射器件结构<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Structure of TOLED based on DBR<sup>[7]</sup>

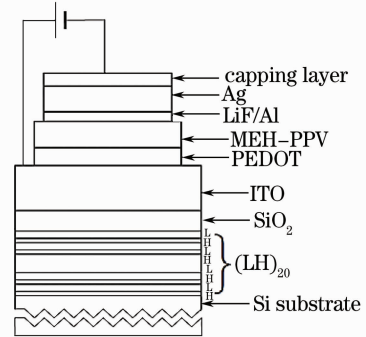


图 4 TEPLD 结构 1

Fig. 4 TEPLD structure 1

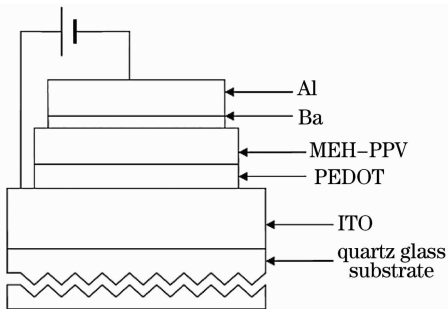


图 3 传统 PLED 结构

Fig. 3 Traditional PLED structure

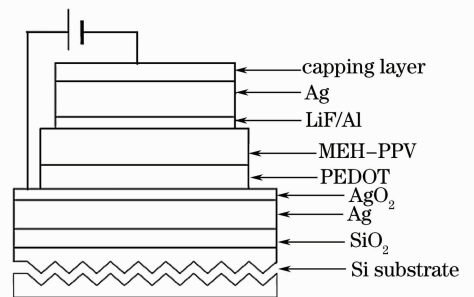


图 5 TEPLD 结构 2

Fig. 5 TEPLD structure 2

### 2.3 光输出模拟过程

发光效率是表征 OLED 发光特性的重要参量<sup>[11~14]</sup>。OLED 的发光效率通常指器件的外量子效率  $\eta_{ext}$ ,其主要由内量子效率  $\eta_{int}$ 和出光率  $\eta_c$  决定 ( $\eta_{ext} = \eta_{int} \eta_c$ )。器件出光率  $\eta_c$  为最终阴极的透射光与 MEH-PPV 发光总量的比值。假设发光界面为

MEH-PPV 与阴极界面处,50%的发射光方向指向阴极,透过阴极及折射率匹配层而出射,50%的发射光方向指向阳极及衬底,由阳极反射层反射,再透过器件各层,从折射率匹配层处透射,进而模拟计算 TEPLD 的出光率  $\eta_c$ 。

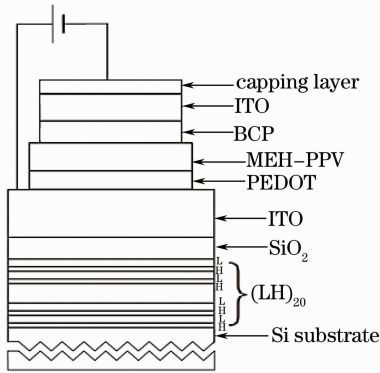


图 6 TEPLED 结构 3

Fig. 6 TEPLED structure 3

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 不同反射阳极对 TEPLED 出光率的影响

设计了结构为 Si/DBR/SiO<sub>2</sub> (100 nm)/ITO (130 nm)/PEDOT(40 nm)/MEH-PPV(80 nm)/LiF (0.5 nm)/Al(1 nm)/Ag(20 nm)/capping layer 的 TEPLED(图 4), 并与 Si/SiO<sub>2</sub> (100 nm)/Ag(130 nm)/AgO<sub>2</sub> (0.5 nm)/PEDOT (40 nm)/MEH-PPV (80 nm)/LiF (0.5 nm)/Al (1 nm)/Ag (20 nm)/capping layer 的 TEPLED(图 5) 进行比较, 其阴极金属外镀折射率匹配层以提高出光率。

器件结构 2 中, 采用 SiO<sub>2</sub> 绝缘层, 防止出射光被吸收<sup>[15]</sup>。在 TEPLED 中, 阳极的反射率对于器件的效率起到至关重要的作用, 而 Ag 在可见光范围内是反射率最高的金属, 在 Ag 表面通过处理形成一层极薄的 AgO<sub>2</sub> 薄膜, 可以极大提高空穴注入效率, 且保留了 Ag 金属的高反射率<sup>[16]</sup>。由于金属与空气折射率相差较大, 导致光不容易从阴极透射出, 因此在阴极 Ag(20 nm) 外镀折射率匹配层 ITO<sup>[17]</sup>。图 7 中虚线为器件出光效率随 ITO 厚度在 0~400 nm 范围内的变化情况。可以看出, 没有外镀 ITO 层时, 即 ITO 层厚度为 0, 器件出光率为 23.48%; 随着 ITO 厚度增加, 器件出光率逐步增大, 当 ITO 厚度为 45 nm 时, 出光率达到最大值 46.12%, 比没有折射率匹配层的器件出光率增加了近 1 倍。随着 ITO 层的继续增加, 出光率出现周期性变化, 与实际镀膜出光率相吻合。出光率峰值随着 ITO 厚度增大而减小是由于 ITO 厚度增大, 对发射光的吸收越大。可见, TEPLED 出光率比传统 PLED 约高 3 倍, 在器件实际制造中凸显出较大优势。

为了方便比较, 模拟了折射率匹配层 ITO 厚度及 DBR 周期数变化对器件结构 1 出光率的影响, 如

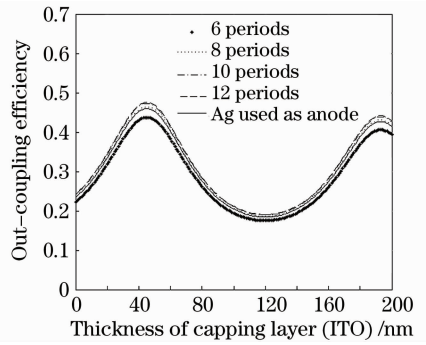


图 7 不同 DBR 周期下折射率匹配层厚度对出光率的影响

Fig. 7 Influence of capping layer thickness and different

DBR periods on out-coupling efficiency

图 7 所示。周期数为 10 且无折射率匹配层时, 器件出光率为 24.17%; ITO 厚度为 45 nm 时, 出光率达到最大值 47.43%。可以看出: 1) DBR 周期数越多, 出光率越大, 达到 10 个周期, DBR 反射率达到极限值, 此后再增加周期数, 出光率无明显增大; 2) 周期为 8 的 DBR 衬底 TEPLED 出光率相当于以 Ag 作为阳极反射层的器件出光率, 因此 DBR 结构对于 Ag 阳极具有可代替性; 3) Ag 对可见光范围内任何波长都具有良好的反射性, 而 TEPLED 中的 DBR 结构, 周期数越大, 对反射的波长越具有选择性, 如图 8 所示, 因此 DBR 结构应用于 TEPLED 时, 能得到高效率的窄光谱波长。

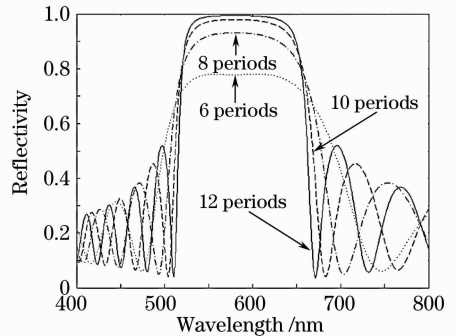


图 8 TEPLED 中的不同 DBR 周期反射光谱

Fig. 8 Reflection spectra of different DBR periods

in TEPLED

#### 3.2 阴极材料对 TEPLED 出光率的影响

分析器件结构 1 的出光率随 Ag 阴极厚度的变化情况, 如图 9 所示。显然, 随着 Ag 阴极厚度增加, 出光率迅速降低, 厚度超过 30 nm 后出光率小于 10%。比较了不同 Ag 阴极厚度下, 外镀 ITO 折射率匹配层时的出光率变化情况, 如图 10 所示, 器件出光率随着 Ag 阴极厚度的增加而降低。Ag 阴极厚度为 10 nm 时, 器件出光率可达 65.62%, 最小出光率为 36.72%; Ag 阴极厚度为 20 nm 时, 器件

出光率可达 47.43%，最小出光率为 19.13%；Ag 阴极厚度为 30 nm 时，器件最大出光率为 27.89%，最小出光率为 9.29%。可以看出：1) 由于 Ag 阴极具有较大的消光系数以及较高的反射率，其厚度对器件出光率的影响极大；2) 不同 Ag 阴极厚度下 ITO 折射率匹配层厚度最优值有所偏移，此偏移应是由 Ag 厚度的变化引起的；3) Ag 阴极厚度 10 nm 时一定匹配层厚度范围内的出光率低于 Ag 阴极厚度为 20 nm 时的最高出光率，可见，Ag 阴极厚度不是越薄越好，还需与外镀的折射率匹配层相配合，才能最大程度地提高器件出光率。

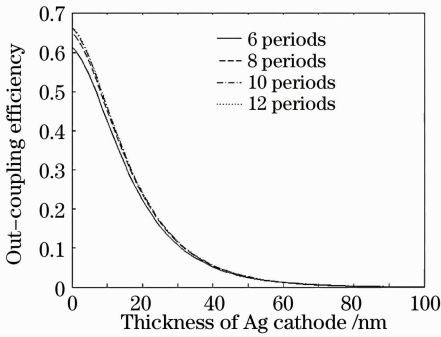


图 9 Ag 阴极厚度对不同 DBR 周期 TEPLD 出光率的影响

Fig. 9 Influence of Ag cathode thickness on different DBR periods TEPLD

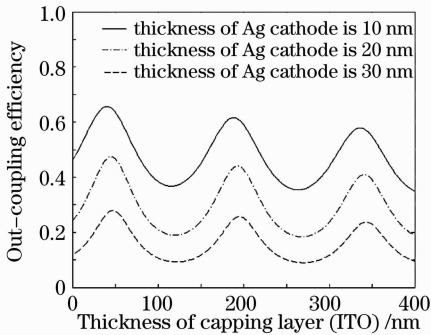


图 10 不同 Ag 阴极厚度下器件出光率与匹配层厚度的关系

Fig. 10 Influence of capping layer thickness and Ag cathode thickness on out-coupling efficiency

进一步分析器件结构 1 中不同折射率匹配层厚度及折射率对器件出光率的影响，如图 11 所示。可以看出：1) 折射率匹配层厚度一定的条件下，该结构的器件出光率随一定范围内的匹配层折射率增大而增大，折射率匹配层厚度为 20 nm，折射率为 3 时，器件最大出光率可达 57.35%；2) 在匹配层折射率为一定值的情况下，该结构的器件出光率随匹配层厚度呈周期变化，匹配层折射率越大，器件出光率起

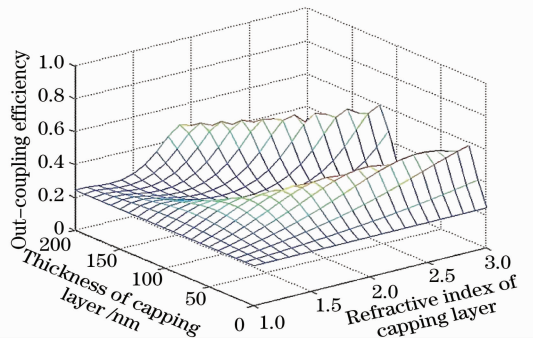


图 11 器件结构 1 中折射率匹配层的折射率、厚度对器件出光率的影响

Fig. 11 Influence of capping layer thickness and refractive index on out-coupling efficiency in structure 1

伏波动越大。

由于 Ag 相对来说在可见光范围内吸收大，反射率高，因此以 Ag 做器件阴极，其出光率会受到很大影响。因此，设计了结构为 Si/DBR/SiO<sub>2</sub> (100 nm)/ITO(130 nm)/PEDOT(40 nm)/MEH-PPV(80 nm)/BCP(100 nm)/ITO(80 nm)/capping layer 的器件(图 6)。分析该结构中不同折射率匹配层厚度及折射率对器件出光率的影响，如图 12 所示。可以看出：1) 以 BCP/ITO 为透明阴极的器件出光率比以半透明金属为阴极的器件出光率高，匹配层折射率 1.5，厚度 90 nm 时，器件出光率达到最大，达 67.11%；2) 匹配层厚度一定时，出光率随折射率增大而产生起伏波动变化；同样，折射率一定时，出光率随匹配层厚度变化具有相同的变化趋势；3) 折射率匹配层的厚度与折射率需相互配合，才能达到器件优化的目的。

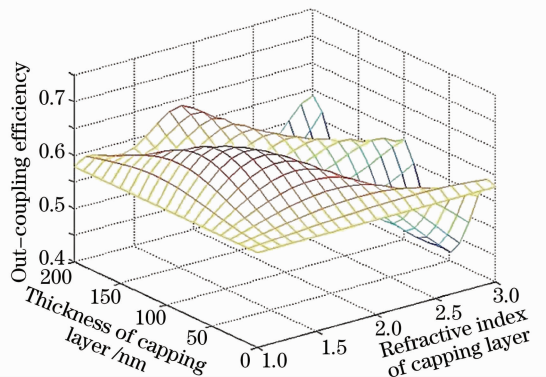


图 12 器件结构 3 中折射率匹配层的折射率、厚度对器件出光率的影响

Fig. 12 Influence of capping layer thickness and refractive index on out-coupling efficiency in structure 3

### 3.3 出光角度对 TEPLD 出光率的影响

由于 DBR 结构的反射光谱受入射角的影响较

大<sup>[18~20]</sup>,分析不同周期 DBR 在器件中的反射率随入射角的变化关系,如图 13 所示。当入射角小于 30°时,12 周期、10 周期以及 8 周期 DBR 的反射率都在 90%以上,6 周期 DBR 反射率为 77.65%;当入射角大于 30°时,反射率很低,介于 10%~40%之间。可见,传统 DBR 结构仅对有源区发光中的近垂直入射部分有较高的反射率,在入射角大于一定值后,反射率很低。这是因为斜入射光,在 DBR 每层

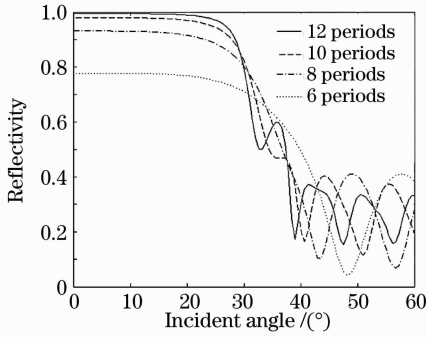


图 13 模拟的器件中 DBR 反射率随入射角变化  
Fig. 13 Simulated reflectivity of DBR in TEPLED as function of incident angle

中的光程大于 1/4 波长,DBR 对此不敏感。

从图中可以看出,DBR 的周期数由 6 增加到 12,对近垂直入射光反射率,由 77.24%增加到 99.13%,对斜入射光(大于 30°角)的反射率没有改善。由于周期数为 10 的 DBR 反射率达到 98.35%,因此增加周期数来提高反射率的空间不大。

进一步分析了 DBR 结构对器件结构 3 的出光角度的变化关系,如图 14 所示。可以看出:1)在无 DBR 反射结构时[图 14(a)],器件 s 偏振光的出光率随出光角变大而增大,p 偏振光的出光率随出光角增大而变小,但总出光率不受出光角度影响,保持恒定值,可见不同角度的出光率的变化是由器件中的 DBR 结构引起的;2)在 6 周期 DBR 衬底的器件中,当出光角大于 30°时,出光率有微弱下降,总体出光率较图 14(a)有所提高;3)随 DBR 周期数增大,宽角度出光率受 DBR 影响越大,具有 DBR 周期结构的反射特征,且特征较明显;4)随 DBR 周期数增大,器件总体出光率的提高是由 DBR 反射率增大引起的,而 30°内的出光率变化较平稳,因此在较小的出光角度范围内 DBR 对器件出光率影响较小。

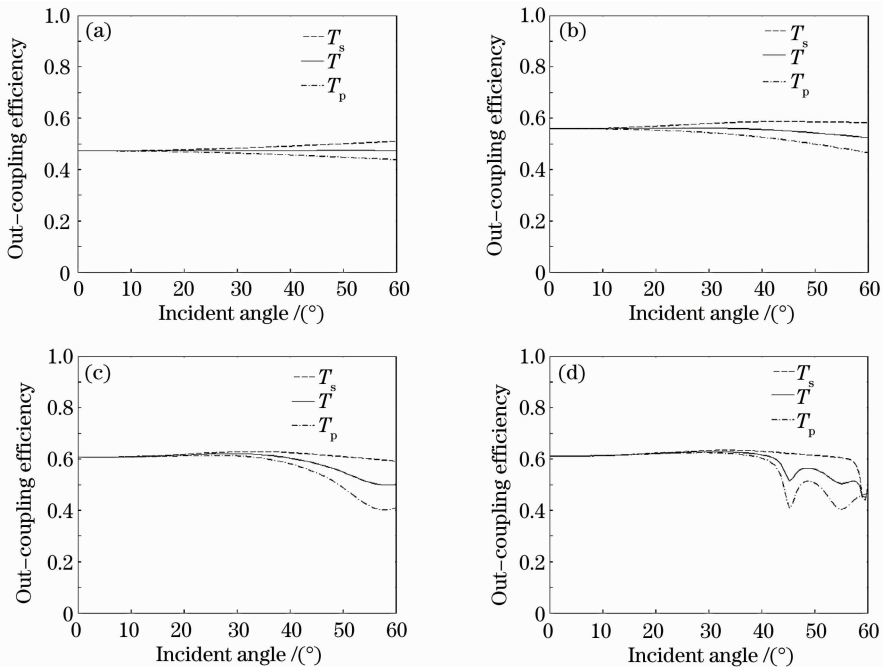


图 14 s 和 p 偏振光的出光率与入射角关系。(a)无 DBR 周期结构,(b)DBR 周期数为 6,  
(c) DBR 周期数为 10,(d) DBR 周期数为 20

Fig. 14 Out-coupling efficiency of incident s-polarized and p-polarized plane waves versus incident angle.  
(a) No DBR period, (b) 6 DBR periods, (c) 10 DBR periods, (d) 20 DBR periods

## 4 结 论

运用传输矩阵法模拟计算了以 MEH-PPV 为

发光材料的 TEPLED 的出光率。计算表明以 DBR 为衬底的器件出光率高于以 Ag 膜为反射阳极的出

光率,可以替代以金属为反射阳极的 TEPLED。针对以半透明金属阴极对发射光的吸收和反射问题,设计了以透明材料为阴极的器件结构 3,相对于结构 1 和 2,较大程度地提高了 TEPLED 的出光率。分析了折射率匹配层对器件出光率的影响,通过调整匹配层的厚度和折射率对器件进行优化,最大程度地提高器件出光率。最后分析了 DBR 对器件出光角度的影响,其对整个 TEPLED 在  $30^\circ$  范围内的出光率影响微小, $30^\circ$  以上角度范围内的出光率受 DBR 的反射特征影响较大。

### 参 考 文 献

- C. W. Tang, S. A. VanSlyke. Organic electroluminescent diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(12): 913~915
- G. Gu, V. Bulovic, P. E. Burrows *et al.*. Transparent organic light emitting devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(19): 2606~2608
- G. Parthasarathy, P. E. Burrows, V. Khalfin *et al.*. A metal-free cathode for organic semiconductor devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(17): 2138~2140
- G. Parthasarathy, C. Adachi, P. E. Burrows *et al.*. High-efficiency transparent organic light-emitting devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(15): 2128~2130
- L. S. Hung, C. W. Tang, M. G. Mason *et al.*. Application of an ultrathin LiF/Al bilayer in organic surface-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(4): 544~546
- X. Y. Deng, M. K. Ho, K. Y. Wong. Top-emitting polymer light-emitting diodes with environmentally stable cathodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(1): 016103
- X. J. Qiu, X. W. Tan, Z. Wang *et al.*. Tunable, narrow, and enhanced electroluminescent emission from porous-silicon-reflector-based organic microcavities[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(7): 074503
- Hou Shidong, Yan Gaoshi. Design of distributed Bragg reflectors for GaN-based light-emitting diodes [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2010, **27**(2): 145~150  
侯仕东, 严高师. GaN 基蓝光发光二极管分布布拉格反射器的设计[J]. *量子电子学报*, 2010, **27**(2): 145~150
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics[M]. Oxford: Pergaman Press, 1980. 67~90
- Wang Xiaoyang, Xu Yanmei, Zhang Chunping *et al.*. Calculation of optical parameter of MEH-PPV film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 746~749  
王晓阳, 徐艳梅, 张春平等. MEH-PPV 薄膜的光学参数计算[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 746~749
- Xiong Zhiyong, Li Jianhong, Wang Junxi *et al.*. Light out-coupling efficiency in flexible organic light-emitting devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2885~2891
- 熊志勇, 李建宏, 王俊西等. 可弯曲式有机电致发光器件的出光率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2885~2891
- 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
- 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
- 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
- Liu Tswen-Hsin, Iou Chung-Yeh, Wen Shih-Wen *et al.*. 4-(Dicyanomethylene)-2-t-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran doped red emitters in organic light-emitting devices[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **441**(1-2): 223~227
- Yang Huishan, Chen Shufen, Wu Zhijun *et al.*. Top-emitting organic light-emitting devices based on silicon substrate [J]. *Chinese J. Lumin.*, 2005, **26**(2): 242~245  
杨惠山, 陈淑芬, 吴志军等. 硅片上顶发射的有机电致发光器件[J]. *发光学报*, 2005, **26**(2): 242~245
- Cao Jin, Liu Xiang, Zhang Xiaobo *et al.*. Top-emitting organic light-emitting devices with cavity effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 1088~1091  
曹进, 刘向, 张晓波等. 微腔结构顶发射有机发光器件[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 1088~1091
- Zheng Shuwen, Fan Guanghan, Li Shutu *et al.*. Research on reflection spectrum of  $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ -AlAs distributed Bragg reflector at different incidence angles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 752~756  
郑树文, 范广涵, 李述体等. 入射角对  $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ -AlAs 分布布拉格反射器反射光谱的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 752~756
- Zheng Shuwen, Fan Guanghan, Li Shutu *et al.*. Influence of different incident medium on reflectance spectra of the GaN-based distributed Bragg reflector [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2007, **24**(4): 514~518  
郑树文, 范广涵, 李述体等. 入射介质对 GaN 基分布布拉格反射器的反射谱影响[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(4): 514~518
- Han Jun, Li Jianjun, Deng Jun *et al.*. Wide reflected angle DBR red light LED [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(4): 456~458  
韩军, 李建军, 邓军等. 宽反射角 DBR 红光发光二极管[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(4): 456~458