

文章编号:1007-2780(2018)10-0823-08

锥状微结构阵列提高 OLED 出光效率的研究

钟可君*, 伏燕军, 江光裕

(南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要:为提高 OLED 出光效率,在 OLED 基底上设计锥状微结构阵列,通过几何光学和光线追迹方法分析了锥状微结构对 OLED 出光效率的影响。结果表明:锥状微结构阵列最大可以提高 60% 的出光效率;锥状微结构阵列的占空比、材料折射率和坡度角对出光效率有较大影响;锥状微结构阵列不会改变 OLED 的辐射角,且有一定的聚光作用。结果为提高 OLED 出光效率提供一种新的参考和方法。

关键词: OLED; 出光效率; 锥体微结构阵列; 光线追迹

中图分类号: TN383+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183310.0823

Improvement of OLED luminous efficiency by cone-shaped microstructure array

ZHONG Ke-jun*, FU Yan-jun, JIANG Guang-yu

(*Key laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education),
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

Abstract: A cone-shaped microstructure array was designed on the OLED substrate in order to improve the luminous efficiency of OLED. By means of geometrical optics and ray tracing method, the influence of the surface structure on the luminous efficiency is analyzed. Analysis shows that the maximum luminous efficiency is increased to 60%. Parameters of cone-shaped microstructure array such as duty ratio, the refractive index of the cone microstructure and the slope angle have great effect on the light efficiency. The cone microstructure arrays do not change the radiation angle of OLED, and has concentration function. Results provide a new reference and method for improving the luminous efficiency of OLED.

Key words: OLED; luminous efficiency; cone-shaped microstructure array; ray tracing

收稿日期:2018-04-07; 修订日期:2018-08-11.

基金项目:国家自然科学基金(No.61661034); 江西省重点研发计划(No.20171BBE50012); 南昌航空大学博士基金(EA201708389)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61661034); Jiangxi Province Key Research and Development Programs (No.20171BBE50012); Doctor Foundation of Nanchang Hangkong University (No.EA201708389)

* 通信联系人, E-mail: kjzhong@126.com

1 引言

有机电致发光二极管 (Organic light-emitting diode, OLED) 具有节能环保、轻薄、视角广并可以实现全色彩显示等特点,被认为是最理性和最有发展潜力的下一代显示和照明技术^[1-2]。然而 OLED 的发展应用并非一帆风顺,其最大的发展瓶颈是外量子效率低^[3]。随着各种有机材料的应用, OLED 的内量子效率几乎接近 100% 极限,然而由于各介质层的折射率不匹配等原因,使得大部分光子不能出射到空气中,外量子效率只有约 20%,这很大程度上制约了 OLED 的发展。如何有效地提高 OLED 的外量子效率成了目前研究的热点之一^[4-5]。

为了提高 OLED 的出光效率,研究者提出了许多方法,比如利用光子晶体的布拉格散射提取限制在 ITO/有机层模式中的光子从而提高出光效率^[6];在 OLED 中加入设计合理的微共振腔结构^[7]、应用表面等离子激元^[8-9]、粗化基底表面^[10-11]、使用高反射层或半反射层^[12-13]、插入低反射网格层^[14]、插入电极控制层^[15],在基底表面形成有纹理或 V 型槽结构^[16-17],利用微透镜阵列等^[18-19]。文献[20]在 OLED 基底表面添加正菱锥体作为导光器,通过耦合更多的基底光波导,可以提高 80% 的出光效率,而且这种方法不需要改变 OLED 的内部结构,不会改变 OLED 的辐射光谱角度分布。但是该菱锥体体积较大(必须大于 OLED 的基底,高 1.2 cm,宽 7.1 cm),成本高,不容易大规模制作。

本文在 OLED 基底表面设计锥状微结构阵列代替单个的锥体结构,提高其出光效率,分析微结构参数对提高出光效率的影响。锥状微结构阵列可以代替单个大菱锥体的功能,而且体积较小,易于大规模制作。

2 锥状微结构提高 OLED 基底出光效率的几何分析

OLED 的基本结构一般采用“三明治”结构方式,在阴极(一般为铝)和阳极(一般为氧化铟锡,ITO)之间夹有电子传输层(ETL)、发光层(有机材料)、空穴传输层(HTL),并以玻璃为基底。

如图 1(a)所示,基底结构为平面,光从基底出射至空气中时发生反射和折射,入射角和折射角符合折射定律: $n_s \sin \beta = n_1 \sin \beta_1$, 式中 n_s 为基底的折射率, β 为平面入射角, $n_1 = 1$ 为空气的折射率, β_1 为折射角。随着入射角的增大,折射角也增大,当折射角为 90° 时,入射角 $\beta = \arcsin(n_1/n_s)$, 这个角度称为临界角,用 θ_c 表示。当入射角 $0 < \beta < \theta_c$ 时,光线可以折射至空气中;当入射角 $\theta_c < \beta < \pi/2$ 时光线发生全反射,不能折射至空气中。即整个界面内,只有在角度为 $2\theta_c$ 范围内的光线才能出射到空气中,这个角度 $2\theta_c$ 称为“溢出锥”。

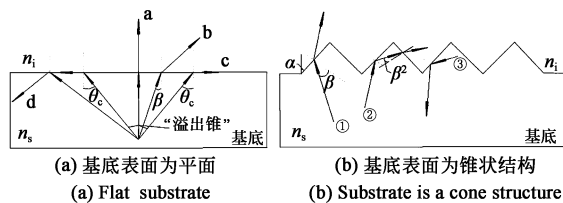


图 1 OLED 基底的出射光线示意图

Fig.1 Schematic diagram of the light emitted from the OLED substrate

当基底表面添加锥状结构时,设锥状体的坡度角为 α , 如图 1(b)所示,则从 OLED 内部发出的光通过基底表面时,分为 3 种情况:

(1) 入射角为 $0 < \beta < \theta_c$, 光线直接出射至空气中;

(2) 入射角为 $\theta_c < \beta < \pi/2$, 光线在坡面上反射,反射至另外一个相邻的坡面,设此时相对于坡面的入射角为 β_2 , 则 $\beta_2 = |(2\alpha - \beta)|$;

当 $(2\alpha - \theta_c) < \beta < 2\alpha$ 或 $2\alpha < \beta < (2\alpha + \theta_c)$ 时,光线可以直接出射至空气中;

(3) 光线在坡面上反射,反射至另外一个相邻的坡面,并入射至基底内。

从上面分析可以知道,当基底表面改为锥状结构时,即使是在平面基底的“溢出锥”外的部分光,也有可能出射到空气中,因此有更高的出光效率;另外,从上面第(2)种情况分析可以看出, β_2 与坡度角有关,即能出射至空气中光线的多少与锥体的坡度角有关。

通过光线追迹,可以直观观察光线通过平面基底和锥状基底时,出射光线数的变化情况。假设有一个面发光体为朗伯光源,发出 150 条光线,基底折射率为 1.5,如图 2(a)所示,当光源发出的

光线通过平面结构时,很大一部分光被限制在基底内部;如果把表面改为锥状结构,如图 2(b)所示,则可以看到,有更多的光线出射至空气中,即提高了基底的出光效率。

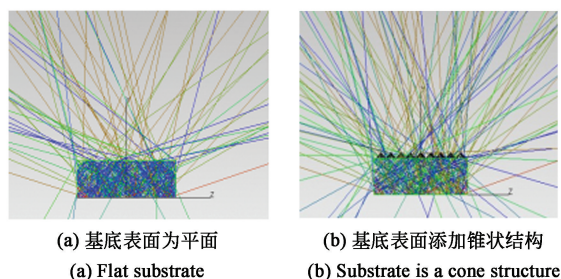
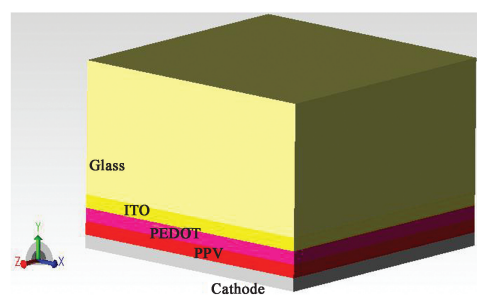


图 2 朗伯光源通过基底时的光线追迹

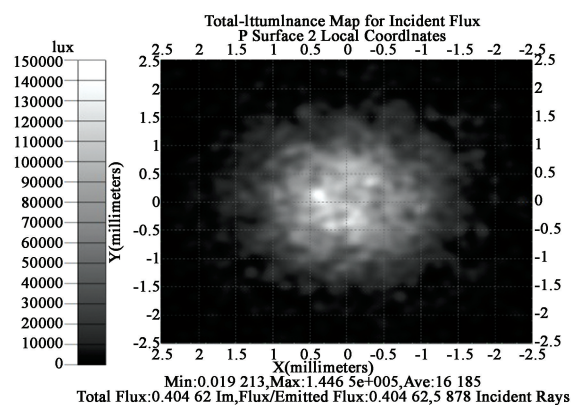
Fig.2 Ray tracing of Lambert light passing through the substrate

3 OLED 和锥状微结构的模型

TracePro 是美国 Lambda Research 公司开发的一套以 ACISolid modeling kernel 为基础的光学软件,可以直接进行 3D 建模,并且能与 ProE、Zemax、CodeV 等软件建立的模型兼容,采用 Non-Sequential 或 Monte Carlo 法进行光线追迹,可以用于光学分析、辐射度分析和光度分析,分析功能强大,仿真数据精准,本文中的 OLED 模型和微结构模型及他们的光学性质均采用此软件进行仿真分析。利用 TracePro 建立 OLED 模型,如图 3(a)所示, OLED 大小为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$,金属阴极为 Al,有机发光层 PPV 厚度为 100 nm ,折射率 1.865, PPV 表面建立表面光源,设定为辐射功率为 1 W 的朗伯光源,光波长为 $0.564 \text{ } \mu\text{m}$,有机层 PEDOT 的折射率为 1.502,厚度为 100 nm ,ITO 阳极折射率为 1.8,厚度为 100 nm ,基底为玻璃,折射率 1.5,厚度 3 mm 。为了便于仿真,Al 表面和各介质层侧面的反射率设为 100% ,忽略各介质层对光能的吸收。通过软件光线追迹,得到 OLED 基底表面的照度图如图 3(b)所示,从图中可以看到,基底表面的总光通量为 $0.404 \text{ } 62 \text{ lm}$,即 OLED 的出光效率约为 40% ,大于文献[3]得到的理论值,原因是 OLED 模型采用了理想化情况,比如忽略了各介质层的吸收,Al 表面和各介质层侧面设置为全反射等。由于我们考虑的是在基底表面增加微结构后相对提高的出光效率,因此这种理想的简化模型不影响分析结果。



(a) OLED 模型



(b) OLED 表面照度分布

图 3 OLED 模型(a)和模型表面的光照度分布(b)

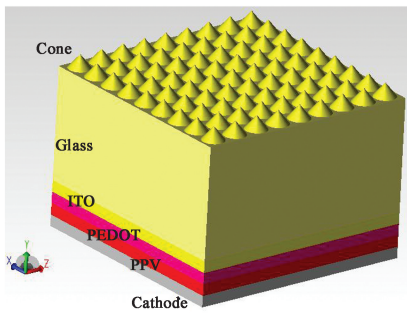
Fig.3 OLED model(a) and illumination distribution of the model surface(b)

假设在 OLED 基底表面添加了圆锥体结构,如图 4(a)所示,其中 OLED 的结构参数与图 3(a)的一致,表面添加的圆锥底边直径为 $60 \text{ } \mu\text{m}$,坡度角为 45° ,相邻圆锥之间间距为 $10 \text{ } \mu\text{m}$,则得到其表面的光通量大小约为 $0.628 \text{ } 44 \text{ lm}$ 。相对于没有增加微结构的情况,提高的出光效率可以利用下面式子计算:

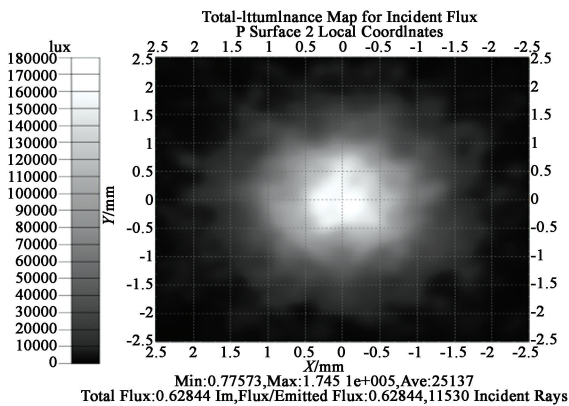
$$\eta = \frac{\varphi_{\text{mic-oled}} - \varphi_{\text{oled}}}{\varphi_{\text{oled}}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 φ_{oled} 代表 OLED 模型表面的总光通量, $\varphi_{\text{mic-oled}}$ 代表当在 OLED 表面添加了微结构时,其表面的总光通量。代入数据可得: $\eta = 55.3\%$,即可以提高 55.3% 的出光效率。

上面的仿真结果表明,在 OLED 平面基底添加锥状微结构阵列,确实能有效地提高出光效率。根据第 1 节的分析,提高的出射光线数量即提高的出光效率大小与锥状体的坡度角等参数有关,因此分别选用不同坡度角的圆锥体、三角锥体和四菱锥体,其模型如图 5 所示,添加到平面基底表面,并用 TracePro 软件分析锥体结构对出光光线的影响。



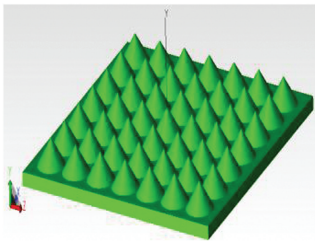
(a) 表面添加微结构的 OLED 模型



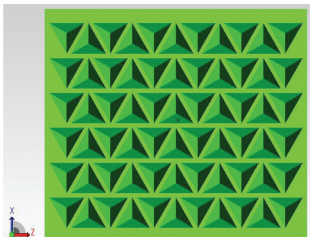
(b) 模型表面照度分布

图 4 表面添加微结构的 OLED 模型(a)和模型表面的光照度分布(b)

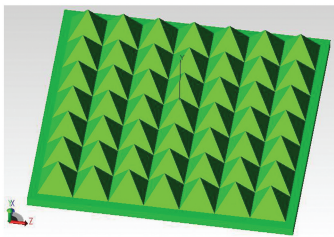
Fig.4 OLED model with surface attach microstructure (a) and illumination distribution on model surface (b)



(a) 圆锥体
(a) Cone



(b) 三角锥体
(b) Pyramid



(c) 四菱锥体
(c) Rectangular pyramid

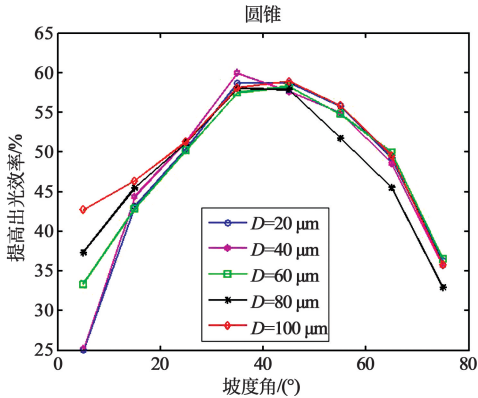
图 5 基底表面的锥体结构模型

Fig.5 Cone structure model of the substrate surface

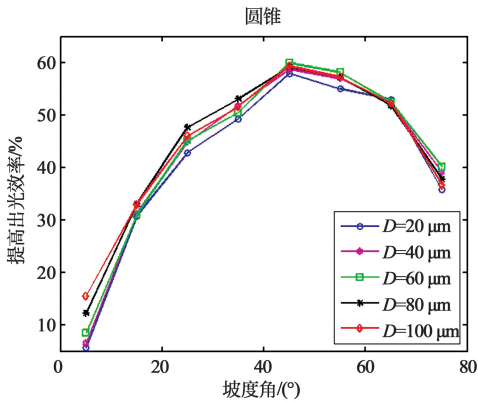
4 锥状微结构的参数对出光效率的影响

4.1 锥体坡度角对提高基底出光效率的影响

根据前面建立的模型,分别在 OLED 平面基底表面添加圆锥体、三角锥和四菱锥,与 OLED 基底为平面时相比较,分析它们的坡度角变化时基底表面提高的出光效率,结果如图 6 所示。



(a) 圆锥体
(a) Cone



(b) 三角锥
(b) Pyramid

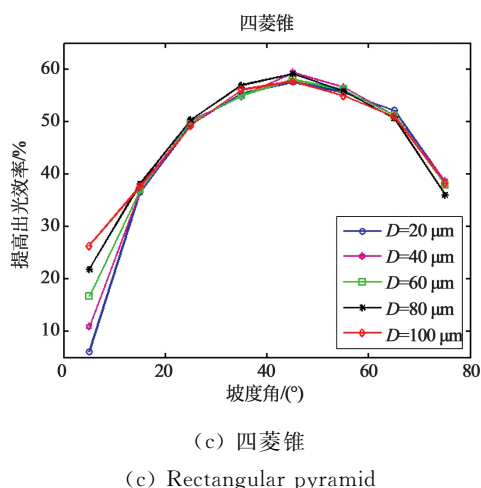


图 6 不同直径(底边)锥体坡度角对出光效率的影响

Fig. 6 Effect of slope angle of different diameter (bottom) on light efficiency

其中锥体底边直径(边长)用 D 表示,取 D 的大小分别为 20, 40, 60, 80, 100 μm , 相邻锥体之间的间距 $d = 0$, 坡度角 α 分别取 $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ 。从图 6 中可以看到,当坡度角大于 15° 时,相同坡度角、不同直径(底边)的锥体提高出的光效率并不完全相同,但是相差不大,可见此时直径(底边)大小并不是影响出光效率的主要因素;当坡度角较小(小于 15°)

时,直径(底边)大小对出光效率影响较大,直径(底边)越小,则提高相对出光效率越大。当直径(底边)大小相同时,坡度角不同,提高出的光效率也不同。其中圆锥体的坡度角在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 时,提高出的光效率最大,底边直径为 40 μm 的圆锥体在坡度角为 35° 时,提高出的光效率最大,达到 60%,其它底边直径的圆锥体在坡度角为 35° 和 45° 时提高出的光效率基本相同,约为 58%。当添加微结构为三角锥和四菱锥时,不同底边大小的锥体均在坡度角为 45° 时,提高出光效率达到最大值。其中,三角锥底边大小为 60 μm 时,提高出的光效率为 60%;四菱锥底边大小为 40 μm 时,提高出的光效率约为 58%。

4.2 锥体结构占空比对提高基底出光效率的影响

占空比,也称为填充因子,是微结构阵列性能参数的重要指标,指单位面积内有效微结构面积所占的比例。底边大小相同的微结构,由于底边形状或相邻微结构的间距不同,其占空比大小也会不相同。设微结构底边直径/边长为 D , 任意两个相邻微结构底边之间的距离为 d , 当底边形状分别为圆、等边三角形和方形时,如图 7(a)~(c)所示。

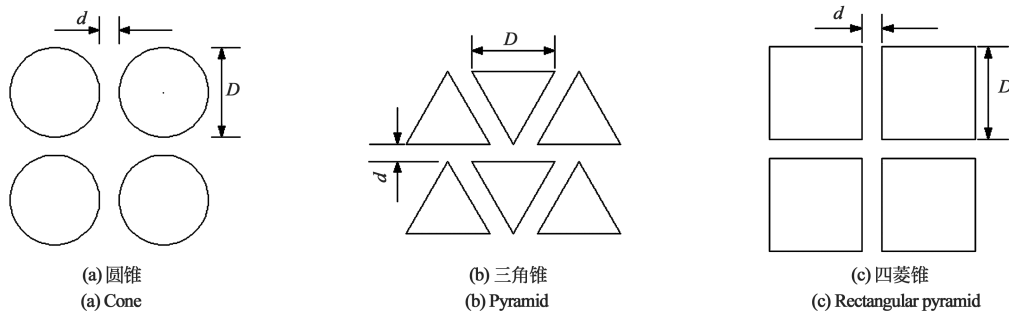


图 7 锥体的基底形状

Fig.7 Base shape of the cone

其占空比分别为:

$$f_c = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{D+d} \right)^2, \quad (2)$$

$$f_p = \frac{(\sqrt{3}/4)D^2}{(\sqrt{3}/4)D^2 + (3/2)Dd + (2/\sqrt{3})d^2}, \quad (3)$$

$$f_r = \left(\frac{D}{D+d} \right)^2, \quad (4)$$

从上面公式可知,相邻微结构底边之间的距

离越小,则占空比越大,当相邻间距为 0 时,圆锥的占空比达到最大值为 0.79,三角锥和四菱锥的占空比则可以达到 1。设有底边直径为 60 μm 、坡度角为 45° 的锥体结构阵列,设定 d 分别为 0, 10, 20, 30, 40 μm , 则圆锥阵列的占空比分别为 0.79, 0.58, 0.44, 0.35, 0.28, 三角锥结构阵列的占空比分别为 1, 0.61, 0.41, 0.29, 0.22, 四菱锥阵列的占空比分别为 1, 0.73, 0.56, 0.44, 0.36。在 OLED 基底表面分别添加以上微结构阵列,利用

TracrPro 软件分析在基底表面出射的光通量与没有添加微结构时的相对光通量与占空比(填充因子)的关系,结果如图 8 所示。

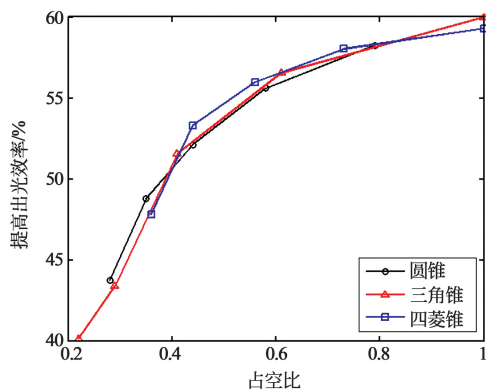


图 8 锥体阵列填充因子对出光效率的影响

Fig.8 Effect of cone array filling factor on light efficiency

从图中可以看到,不管是哪种锥体结构,随着占空比的增大,其相对提高出光效率也增大。圆锥的占空比最大(0.79)时,提高出的光效率分别约为 58%,占空比等于最小(0.28)时,提高出光效率约为 44%;三角锥、四菱锥的占空比最大(1)时,提高出的光效率分别为 60%和 59%,三角锥在占空比最小(等于 0.22)时,提高出光效率只有约 40%,可见占空比是影响基底出光效率的关键因素之一。当占空比相等时,三种锥体提高出的光效率相差不大。

4.3 锥体材料折射率对出光效率的影响

在前面的分析中,都是假设锥体结构阵列的材料折射率与基底折射率是相同的,即折射率 $n=1.5$,此时基底和微结构可以视为一个整体。当基底与锥体结构阵列的折射率不相同,通过基底表面与锥体结构阵列连接表面的光会发生反射或折射,从而影响光的传播方向,对出射至空气中的光线数量产生影响。同样假设锥体结构为底边直径/边长为 $D=60\text{ }\mu\text{m}$,圆锥的坡度角等于 35° ,三角锥和四菱锥的坡度角为 45° ,锥体间距为零的锥状阵列,改变微结构材料的折射率,分别为 $n=1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9$,得到不同锥体结构的相对出光效率与折射率的关系如图 9 所示。从图中可以看到,不管添加哪种面型的锥体结构,其相对提高出的光效率都随着锥体材料折射率的变而发生变化。当锥体材料折射率较小

时,随着折射率的增大,提高出的光效率也增大,当圆锥结构的折射为 1.6、1.7 时,提高出光效率达最大值,接近等于 64%,三角锥和四菱锥的折射率为 1.6 时,提高出光效率最大,约为 62%。此后,随着折射率的增大,提高出的光效率又逐渐减小。可见锥体材料的折射率应该选择在 1.6 左右,即略大于基底的折射率。

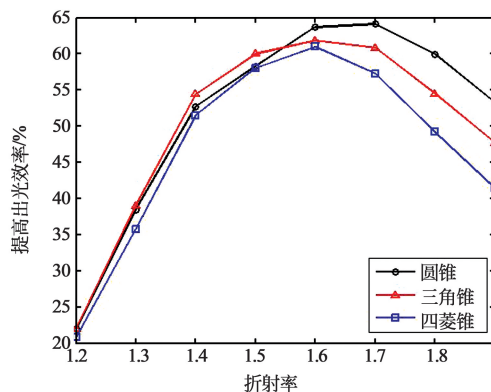
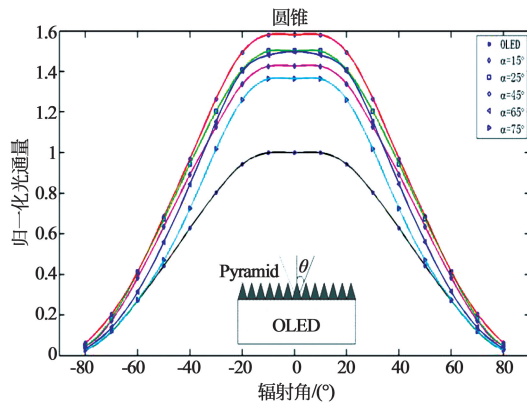


图 9 锥体材料折射率与出光效率的关系

Fig.9 Relationship between materials refractive index and light efficiency of cone

4.4 锥体面型对基底出光方向的影响

在 OLED 模型中,发光表面设置为朗伯光源,当在基底表面添加微结构后,光出射方向发生改变,而且不同微结构面型对光的出射方向改变不同。前面的分析中都是分析垂直于基底表面出射的光辐射通量,通过软件可以设置不同方向的探测面,分析不同辐射角度的光通量,探测的角度 θ 如图 10 所示,探测垂直于基底表面辐射光时探测角大小为 0。当底边直径(边长)固定时,坡度角改变,即锥体的面型发生改变,假设微结构底边



(a) 圆锥结构

(a) Cone

直径(边长)大小为 $D = 60 \mu\text{m}$, 间距为零, 坡度角分别为 $15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 65^\circ, 75^\circ$, 得到结果如图 10 所示, 其中 10(a) 为表面为圆锥体阵列的结果, 10(b) 为基底表面为三角锥体的结果, 10(c) 为基底

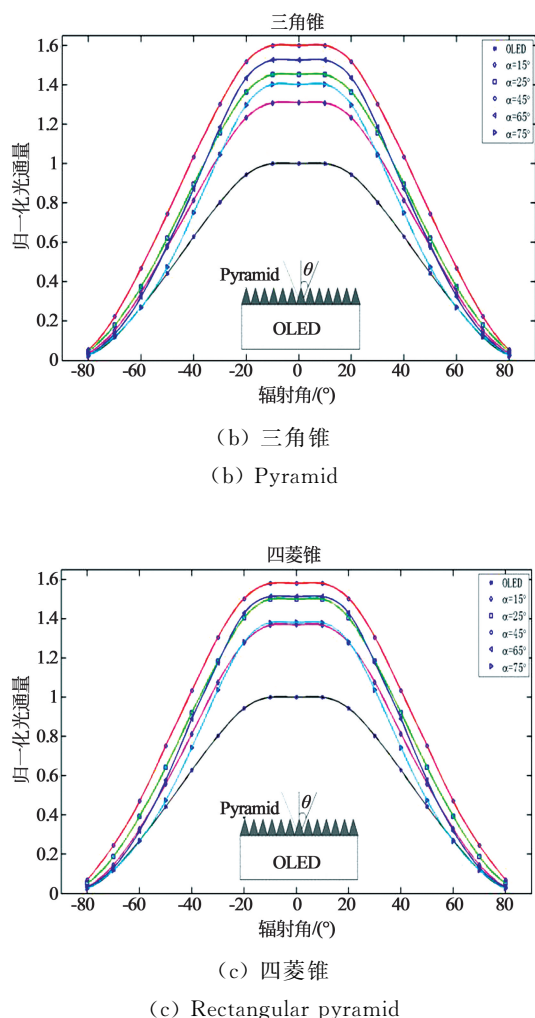


图 10 锥体形状对基底出光方向的影响

Fig.10 Effect of cone shape on the direction of light

表面为四菱锥体的结果。从图中可以看到, OLED 模型基底的出射光近似呈朗伯分布, 与发光表面设置光源一致。当在基底表面添加锥体结构后, 基底表面的出射光依然近似呈朗伯分布, 即锥体结构并没有改变 OLED 的辐射角。但是在各个辐射角上出射的光强度并不一致, 锥体结构具有一定的聚光作用, 且锥体坡度角越大, 聚光能力越强。在同一个辐射角上, 由于坡度角的不同, 其辐射强度不尽相同, 当辐射角为零时, 所有坡度角的锥体的辐射强度最大。

5 结 论

通过几何分析和光线追迹表明, 在 OLED 基底表面添加锥状微结构阵列可以扩大“溢出锥”, 提高出光效率。锥状微结构阵列的参数: 坡度角、占空比、材料折射率等对提高的出光效率均有影响。其中圆锥微结构在底边直径为 $40 \mu\text{m}$, 坡度角为 35° 时, 提高的出光效率最大, 达到 60%; 三角锥和四菱锥在坡度角为 45° 时, 提高出光效率达到最大值, 其中, 三角锥底边大小为 $60 \mu\text{m}$ 时, 提高的出光效率为 60%; 四菱锥底边大小为 $40 \mu\text{m}$ 时, 提高的出光效率约为 58%; 各种锥体微结构中, 占空比越大, 提高的出光效率越多; 当锥体微结构的材料折射率为 1.6 即略大于 OLED 基底折射率时, 提高的出光效果最佳。各种面型的锥状微结构并不会改变 OLED 的辐射角, 但是在各个辐射角上提高的出光效率不完全相同, 在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 角度范围内提高的出光效率较大, 即锥体微结构具有一定的聚光作用, 且锥体坡度角越大, 聚光能力越强。

参 考 文 献:

- [1] 李继军, 聂晓梦, 甄威, 等. 显示技术比较及新进展 [J]. 液晶与显示, 2018, 33(1): 74-84.
LI J J, NIE X M, ZHEN W, et al. New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [2] 马东阁. 显示与照明——从基础研究到未来的应用 [J]. 液晶与显示, 2016, 31(3): 229-241.
MA D G. OLED display and lighting—from basic research to future applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 229-241. (in Chinese)
- [3] SCHMIDT T D, SCHOLZ B J, MAYR C, et al. Efficiency analysis of organic light-emitting diodes based on optical simulations [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(5): 7800412.
- [4] 陈俊, 王青松. 基于 OLED 显示单元的红外上转换器件研究进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(1): 17-27.
CHEN J, WANG Q S. Recent progress of infrared upconversion device based on the integration of OLED [J]. *Chi-*

- nese Optics, 2015, 8(1): 17-27. (in Chinese)
- [5] 杨洋, 陈淑芬, 谢军, 等. 有机发光二极管光取出技术研究进展 [J]. 物理学报, 2011, 60(4): 047809.
YANG Y, CHEN S F, XIE J, et al. Comprehensive survey for the frontier disciplines [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 047809. (in Chinese)
- [6] LEE Y J, KIM S H, HUH J, et al. A high-extraction-efficiency nanopatterned organic light-emitting diode [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(21): 3779-3781.
- [7] KIM H K, CHO S H, OH J R, et al. Deep blue, efficient, moderate microcavity organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(1): 137-145.
- [8] KUMAR A, SRIVASTAVA R, TYAGI P, et al. Efficiency enhancement of organic light emitting diode via surface energy transfer between exciton and surface plasmon [J]. *Organic Electronics*, 2012, 13(1): 159-165.
- [9] XIAO Y, YANG J P, CHENG P P, et al. Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating Au nanoparticles [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 013308.
- [10] ZHOU J H, AI N, WANG L, et al. Roughening the white OLED substrate's surface through sandblasting to improve the external quantum efficiency [J]. *Organic Electronics*, 2011, 12(4): 648-653.
- [11] CHEN S M, KWOK H S. Light extraction from organic light-emitting diodes for lighting applications by sandblasting substrates [J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 37-42.
- [12] MLADENOVSKI S, NEYTS K, PAVICIC D, et al. Exceptionally efficient organic light emitting devices using high refractive index substrates [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7562-7570.
- [13] LEE I, PARK J Y, GIM S, et al. Optical enhancement in optoelectronic devices using refractive index grading layers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(5): 3326-3332.
- [14] SLOOTSKY M, FORREST S R. Full-wave simulation of enhanced outcoupling of organic light-emitting devices with an embedded low-index grid [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(16): 163302.
- [15] BAI J J, WU X M, HUA Y L, et al. Efficiency of a blue organic light-emitting diode enhanced by inserting charge control layers into the emission region [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(4): 047806.
- [16] CHEN C P, LI H J, ZHANG Y, et al. Thin-film encapsulation for top-emitting organic light-emitting diode with inverted structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(2): 022301.
- [17] HYUN W J, IM S H, PARK O O, et al. Corrugated structure through a spin-coating process for enhanced light extraction from organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2012, 13(4): 579-585.
- [18] KIM H S, MOON S II, HWANG D E, et al. Novel fabrication method of microlens arrays with High OLED out-coupling efficiency [J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 77: 104-110.
- [19] 钟可君, 高益庆. 微透镜阵列在提高 OLED 取光效率中的应用 [J]. 半导体光电, 2014, 35(1): 1-4.
ZHONG K J, GAO Y Q. Applications of microlens arrays for light extraction enhancement in OLED [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(1): 1-4. (in Chinese)
- [20] D'ANDRADE B, BROWN J J. Organic light-emitting device luminaire for illumination applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(19): 192908.

作者简介: 钟可君(1978—), 男, 江西于都县人, 博士, 讲师, 2005 年于华南师范大学获硕士学位, 2016 年于南京航空航天大学获博士学位, 主要研究方向为半导体光电子器件和光学检测。E-mail: kjzhong@126.com