

DOI:10.16136/j.joel.2022.05.0722

微纳光栅结构提高 OLED 器件性能的研究

朱忠昶^{1,2}, 王 帅^{1,2}, 石超君^{1,2}, 李淑红^{1,2}, 王文军^{1,2*}, 刘云龙^{1,2}

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 聊城大学 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

摘要:有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)具有重量轻、功耗低、响应时间快及具有柔性等特点,在平板显示及固态照明等方面均显现出巨大的优势。为进一步提高 OLED 器件性能,本文利用 ExpertOLED 仿真软件对具有不同光栅结构的实际 OLED 器件进行仿真模拟,分析不同结构的微纳光栅对双金属电极 OLED 器件电致发光(electroluminescent, EL)光谱、发光视角及器件内部电场强度分布的影响。通过优化,得到增强器件发光强度和拓宽发光视角的微纳光栅结构。在不同的光栅周期下,改变光栅高度对器件的发光性能有不同的影响。调节发光层中分子偶极取向,优化器件内部电场强度分布,可进一步对器件的发光性能进行优化,从而为实验上利用周期性微纳光栅结构提高 OLED 器件性能提供了具有价值的参考。

关键词:微纳光栅; ExpertOLED 仿真软件; 电致发光(electroluminescent, EL); 发光视角

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)05-0471-08

Micro/nano grating structures for improving the performance of organic light emitting diode

ZHU Zhongchang^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}, SHI Chaojun^{1,2}, LI Shuhong^{1,2}, WANG Wenjun^{1,2*}, LIU Yunlong^{1,2}

(1. School of Physical Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract: Organic light emitting diode (OLED) devices possess the characteristics of light weight, low power consumption, high response speed and flexibility. They have shown the great superiority in the flat panel display and solid-state lighting. In order to enhance the performance of OLED devices, the Expert OLED software was used to simulate the actual OLED devices with different grating structures. The electroluminescent (EL) spectrum, the luminous angle and the electric field distribution were analyzed in the OLED devices with bimetal electrodes. The optimized micro/nano grating structures was obtained. And for OLEDs with different grating periods, the varied grating height has different effects on the luminescence performance. We can also improve the luminescence performance by adjusting the molecular dipole orientation of emitting layer and optimizing the electric field distribution in the OLEDs. This work provides a valuable reference on improving the performance of OLEDs by using the optimized periodic micro/nano grating structures.

Key words: micro/nano grating; ExpertOLED software; electroluminescent (EL); luminous angle

1 引言

有机发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)作为新一代平面显示器件,具有自发光、视

角宽、对比度高、柔性显示等优势^[1-5]。自1987年邓青云报道了首例 OLED 器件以来,如何提高 OLED 器件性能便成为国内外重点研究课题之一。外量子效率(external quantum efficiency,

* E-mail: phywwang@163.com

收稿日期: 2021-10-22 修订日期: 2022-01-01

基金项目: 国家自然科学基金(61775089)、山东省自然科学基金(ZR2017BF009)和聊城大学项目(318011904, 318051650)资助项目

EQE)的提高有利于降低 OLED 器件的能量损耗,因此提高 OLED 器件的 EQE 成为优化 OLED 器件性能的一个重要课题。

EQE 可以表示为内量子效率(internal quantum efficiency, IQE)和光输出耦合效率 η_{out} 的乘积, IQE 可以由载流子平衡因子 γ 、单重态-三重态因子 $\eta_{\text{S/T}}$ 和有效量子产率 q_{eff} 相乘得到。采用磷光或热激活延迟荧光材料,可以实现单线态和三线态激子发光,通过优化器件结构,使得 $\eta_{\text{S/T}}$ 和 q_{eff} 几乎达到 100%^[6-8]。但是,平板 OLED 器件存在波导模式(透明电极的折射率高于基底折射率,由于光的全反射,会有一部分光在透明电极与衬底界面以波导模式的形式被损耗掉)、衬底模式(玻璃折射率高于空气,由于全反射,部分光将局域于玻璃基底中)、传导表面等离子激元(surface plasmon polariton, SPP)模式有机层与金属界面,表面等离子激元模式使得部分光子产生非辐射跃迁等损耗,限制了器件的光提取能力,从而降低了器件 EQE。在传统的基底/透明电极/有机发光层/金属电极等这些底部发射 OLED 器件中,主要的光损耗模式包含衬底模式损耗(30%),波导模式损耗(20%)以及表面等离子体模式损耗(20%),因此只有部分(20%)的光能从基底正面发射到空气中。那么如果以高导电性的透明金属电极替代透明电极,如传统的氧化铟锡(indium tin oxide, ITO),可以降低高折射率的 ITO 薄膜导致的波导模式损耗,但是双金属电极会导致 SPP 损耗占比增加。所以对于双金属电极的 OLED 器件, SPP 模式光损耗成为影响出光效率的主要因素^[9]。

为了提取被限制在 SPP 模式中的光,研究人员做出了很多努力和尝试。利用高介电常数的介质和光子隧道效应,使金属与空气的另一个界面方向的光子波矢量分量在特定的入射角度与特定的波长满足波矢匹配,即可激发出限制在 SPP 模式中的光子。在金属表面制作光栅(grating)等类似的微结构(周期性或非周期性),利用衍射效应来改变波矢量,当波矢总和与表面等离子体振荡的波矢量相吻合时,也可激发出限制在 SPP 的光子^[10]。HUANG 等^[11]采用干涉光刻技术制作了大面积以可控方向角排列的周期性光栅,并在侧壁上制作 OLED 器件,极大的降低了金属电极对输出光子的吸收。QIAN 等^[12]利用软纳米压印工艺制作了波纹光栅反射银阴极 OLED 用来减少波导效应和 SPP 模式造成的光输出损失,发现即使在低电流密度下,相对于无微纳结构的对照器件电流效率仍然提高了 24%。

同时,国内外的课题组也在理论仿真模拟方面对在 OLED 器件中添加不同形式的微纳结构进行了许多探索和研究。钟可君等^[13]使用时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)理论模拟的方法对锥形微结构阵列提高 OLED 出光效率做了细致的研究,发现与传统的平板 OLED 器件相比,锥形微纳结构的加入使 OLED 器件的出光效率最高提升了 60%,并且获得了更宽的视角。QIAO 等^[14]利用有限元法(finite element method, FEM)和时域有限差分法模拟分析了 Ag 纳米光栅阳极对 OLED 顶发射器件性能的影响,与平板 Ag 阳极 OLED 顶发射器件相比, Ag 纳米光栅阳极得到的光效率提高了 60%,并且拥有良好的视角特性。在实际的 OLED 生产制作中,周期性光栅相较于锥形微结构制作工艺简单、易于推广,所以对在双金属电极添加周期性光栅进行一系列系统的仿真与分析具有重要的普遍意义。

研究表明,周期性光栅具有增加 OLED 器件光输出耦合的功能,其效果是由占空比、周期和刻蚀深度等参数决定的,通过调整参数可以设计出满足器件不同要求的周期光栅结构。本文通过利用 ExpertOLED 软件的 FDTD 仿真方法,模拟了双金属电极 OLED 器件中,玻璃基板上有无周期性光栅结构对 OLED 器件发光特性的影响,并且系统的研究了不同光栅参数对双金属电极 OLED 器件中的电场分布,电致发光(electroluminescent, EL)光谱强度及 EL 光谱的角度依赖关系,为实验上利用周期性微纳结构提高 OLED 器件性能提供有价值的参考。

2 ExpertOLED——一款基于 FDTD 仿真软件

ExpertOLED 仿真软件是一款基于 OLED 器件实际制造过程的仿真模拟软件,以电磁波 FDTD 作为理论基础进行的仿真模拟。为了近似于实际 OLED 器件的发光模式, ExpertOLED 使用偶极子发光来近似代替 OLED 器件的发光模式。按照偶极子发光的电磁理论,偶极子振荡发光的方向垂直于跃迁偶极子取向方向。OLED 器件中发光分子的偶极子取向示意图如图 1 所示,坐标系分别以 P_x 、 S_y 、 P_z 表示,其中 P_x 、 P_z 为横磁(transverse magnetic, TM)波且平行与器件的横截面,而 S_y 为 TE 波且平行于基底平面。

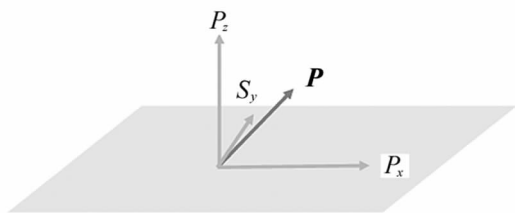
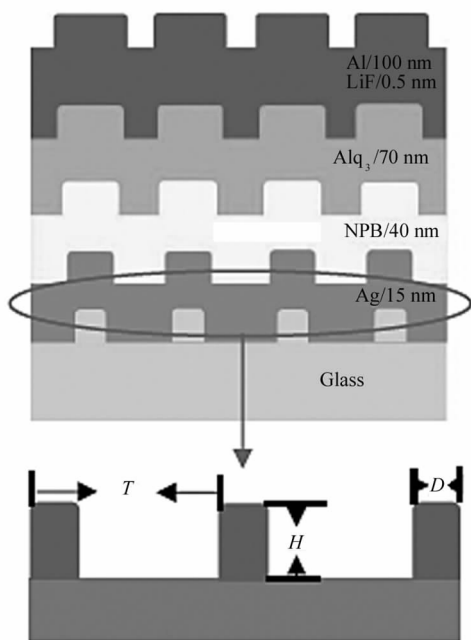


图1 OLED器件中发光分子的偶极子取向示意图

Fig. 1 Dipole orientation of light-emitting molecules in OLED devices

3 结果和讨论

采用的仿真模型为双金属电极底发射 OLED 器件,其器件结构为 Glass/ Grating/Ag(15 nm)/NPB(40 nm)/Alq₃(70 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(100 nm)。其中 Ag 作为金属阳极,NPB 为空穴传输层,Alq₃ 为发光层,LiF 作为阴极修饰层,Al 为阴极。仿真模型均为 2 维模型,模拟范围设置为 10 μm ,发光位置设置在发光层 Alq₃ 中,均使用单一点光源发光,顶部和两侧边界设置为完美匹配层(perfect match layer, PML),以避免边界上反射引起的偏差。模拟用到的 OLED 结构和光栅结构示意图如图 2 所示,其中 T 为光栅周期, H 为光栅高度, D 为光栅宽度,占空比为 Q ,定义为 $D/(T-D)$ 。

图2 器件结构和光栅结构示意图
(周期 T 、光栅高度 H 、光栅宽度 D)Fig. 2 Schematic diagram of device structure and grating structure (period T , grating height H , grating width D)

调整光栅参数,分别对 P_x 、 S_y 、 P_z 3 种偶极子取向的 EL 光谱、视角依赖关系以及器件内部电场强度分布进行理论模拟,假设每种偶极子取向各占三分之一,将 3 种偶极子取向模拟出的结果进行合成,得到偶极子随机取向时的结果。将不加光栅结构的 OLED 器件仿真模型作为参考对照组器件,分析研究添加不同光栅参数的光栅对 OLED 器件性能的影响。

在利用周期性微纳结构提高 OLED 器件性能的实验及理论研究中,人们常将占空比 Q 设置为 $1:1$ ^[15],所以本文在模拟中也采用相同的设置,随后改变光栅高度 H 与光栅周期 T ,研究 H 与 T 的变化对双金属 OLED 器件发光特性的影响。研究中,设置光栅高度 H 分别为 3 nm、5 nm、10 nm、15 nm、20 nm 和 25 nm,每一种光栅高度 H 下,设置对应的光栅周期 T 分别为 100 nm、300 nm、500 nm、700 nm 和 900 nm。

当发光层中分子随机取向时,即 P_x 、 S_y 和 P_z 各占 $1/3$,器件得到的 EL 光谱如图 3 所示。可以得出,加入光栅结构后,除了 $H=3$ nm 的情况,器件的 EL 光谱强度明显增强,但光谱的峰位改变不大,只是随着 H 的增大,光谱出现很小幅度的蓝移。当光栅高度 H 为 5 nm、10 nm、15 nm 时,光栅的加入,使器件的 EL 光谱强度均得到不同程度的提高,并且 EL 光谱的形状没有发生变化。而当光栅高度继续增大,即大于 15 nm 后,在某些光栅周期下,EL 光谱出现了多峰位的现象,这表明在此光栅参数下由于光栅散射和 SPP 模式共振增强了除 Alq₃ 发光峰(520 nm)外的其他特定波长的光,因此产生了附加峰^[15]。在光栅周期为 $T=100$ nm 的器件,当光栅高度 $H=5$ nm 时,其 EL 光谱强度最大,当 H 增大到 10 nm、15 nm 时,器件的 EL 光谱强度减小,即相对于参考器件的增幅下降。但是当 H 增大到 20 nm 以上时,器件的 EL 光谱强度相对于参考器件明显有所下降,并且当 $H=25$ nm,周期 T 分别为 100 nm 和 300 nm 时,不仅器件的 EL 光谱强度减小,并且出现附加峰。而对于 $T=900$ nm 的器件,其 EL 光谱强度一直保持着较高增幅并且在较大 H 值下并没有明显减弱。这表明光栅高度 H 的变化对较小周期($T=100$ nm)器件的影响较大,当周期较大时,器件的性能比较稳定。

在优化 OLED 器件性能的研究中,加入周期性光栅后,双金电极 OLED 器件发光强度的增加具有一定的角度选择性,从而造成光面光强分布不均匀,所以有必要进一步进行 OLED 器件视角依赖特性的

研究。对于一个理想的 OLED 器件,不仅要有较宽的视角,而且器件发光强度随角度变化的关系要符合朗伯发射规律。图 4 为不同光栅条件下模拟出的

OLED 器件发光的视角依赖关系图。可以得出,对照组的视角依赖曲线基本符合朗伯发射规律,加入周期性光栅结构后,在某些特定的角度上发光

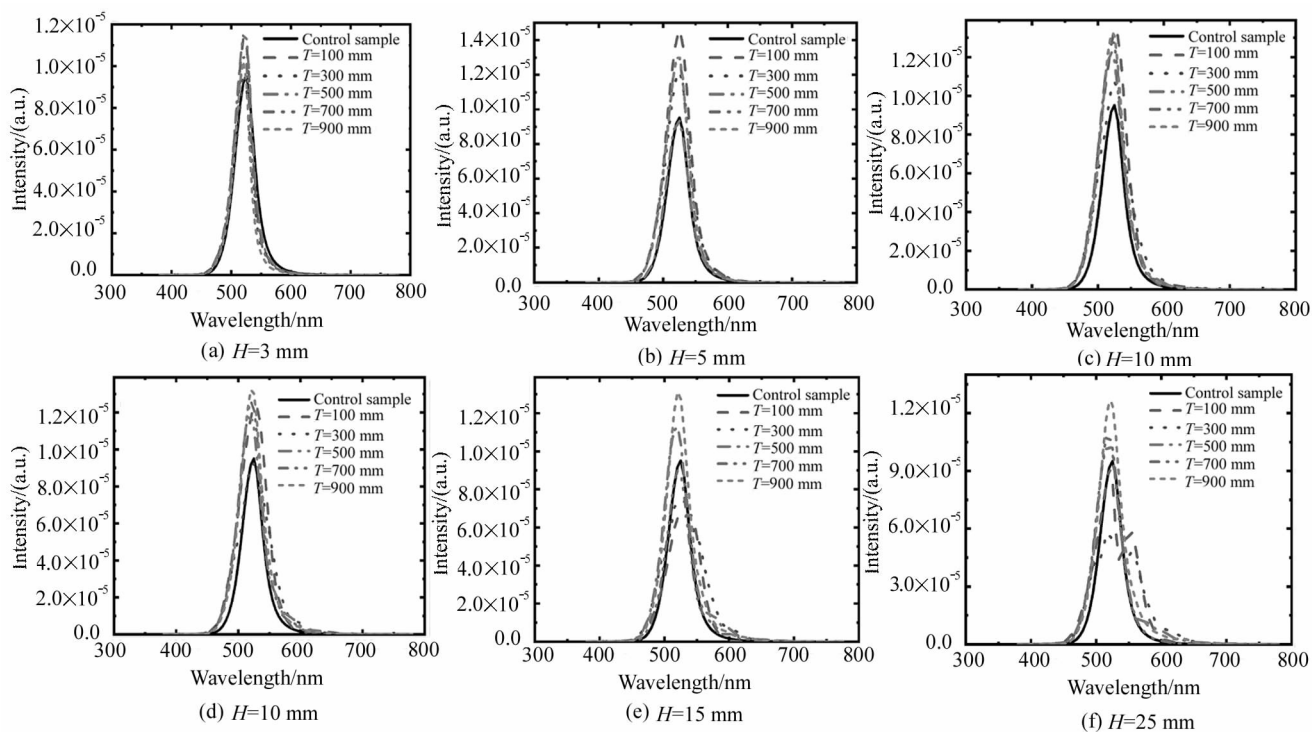


图 3 偶极子随机取向时 OLED 器件的 EL 光谱

Fig. 3 EL spectra of OLED with random dipole orientations

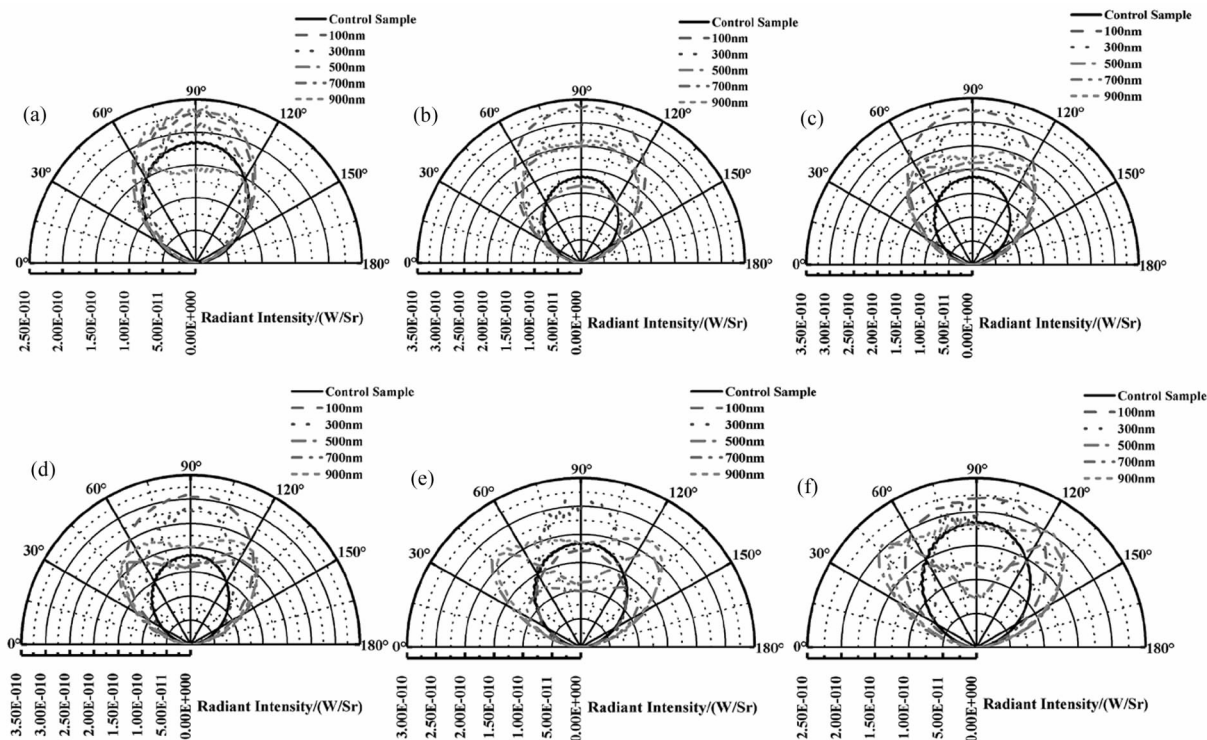


图 4 P_x, P_z, S_y 偶极子取向结果合成后的角度依赖图: (a) $H=3 \text{ nm}$; (b) $H=5 \text{ nm}$;

(c) $H=10 \text{ nm}$; (d) $H=15 \text{ nm}$; (e) $H=20 \text{ nm}$; (f) $H=25 \text{ nm}$

Fig. 4 Angle dependent diagram of P_x, P_z and S_y dipole orientations: (a) $H=3 \text{ nm}$; (b) $H=5 \text{ nm}$;

(c) $H=10 \text{ nm}$; (d) $H=15 \text{ nm}$; (e) $H=20 \text{ nm}$; (f) $H=25 \text{ nm}$

强度增强,表明周期性微纳结构一方面可以增强 OLED 器件特定角度的发光强度,另一方面,也会因此导致器件的视角依赖曲线偏离朗伯发射。

由图 4 可以得出,仅当较小周期, $T=100\text{ nm}$ 时,器件在不同的光栅高度下,其发光强度均基本符合朗伯发射规律。在其他周期下,例如当 $T=300\text{ nm}$, $H=20\text{ nm}$ 时,发射强度只在 90° 方向附近有特定增强。当 $T=900\text{ nm}$, $H=25\text{ nm}$ 时,发射强度在 30° 到 60° 及与之对称的方向上有明显的增强,但在 90° 方向并没有增强。

为了解释加入周期性光栅结构后,双金属电极 OLED 器件的发光强度及视角都发生变化的原因,分别对具有单个偶极取向时器件发光视角的依赖情况进行了模拟。考虑到在金属微纳结构与介质界面处会发生 TM 极化的局域表面等离子体模态,文中分别模拟了偶极子取向为 P_x 、 P_z 时 OLED 器件的发光视角依赖关系如图 5 和 6 所示。

当偶极子取向为 P_x 时,如图 5 所示,在不同周期 T 下,随着 H 的减小,器件在 90° 度方向附近发光明显增强,在其余角度的发光虽有增强,但增幅相对较小。表明当偶极子取向为 P_x 时,光栅高度的变化对器件在 90° 度方向附近的发光强度影响较大,对其他角度影响较小。在不同的周期下,当光栅高度改

变时,较小周期的器件的发光强度变化较大。当偶极子取向为 P_z 时,如图 6 所示,在不同的周期下,随着 H 的增大,发光强度主要在 30° 到 75° 和与之对称的方向上发生增强,而在 90° 附近方向发光强度基本不发生改变。可以得出,图 4 中加入周期性光栅结构后器件的发光视角依赖关系的变化与偶极子取向有很大关系,不同的偶极子取向导致 OLED 器件的发光强度具有不同的视角依赖关系。

为了便于对不同参数的光栅对 OLED 器件发光视角依赖关系的影响进行研究,选择图 4 中 2 个典型的情况进行分析研究。例如当光栅参数为 $H=5\text{ nm}$, $T=100\text{ nm}$ 时,器件的发光增强较大并且基本符合朗伯发射。当光栅参数为 $H=25\text{ nm}$, $T=900\text{ nm}$ 时,器件发光主要在 30° 到 60° 方向增强。

如图 5 和图 6,当 $H=5\text{ nm}$ 、 $T=100\text{ nm}$ 时,相比 P_z 偶极子取向,器件发光的视角依赖关系受 P_x 偶极子取向影响更大。由于 $T=100\text{ nm}$ 周期较小,在偶极子取向为 P_x 时,不仅器件在各个角度下发光强度的增幅均较大,而且视角变宽。当 $H=25\text{ nm}$ 、 $T=900\text{ nm}$ 时,相比 P_x 偶极子取向,器件发光的视角依赖关系受 P_z 方向偶极子影响更大,视角在 30° 到 60° 和与之对称的方向有明显增强,这与图 4(e) 中, $H=25\text{ nm}$ 、 $T=900\text{ nm}$ 的情况的视角依赖图在

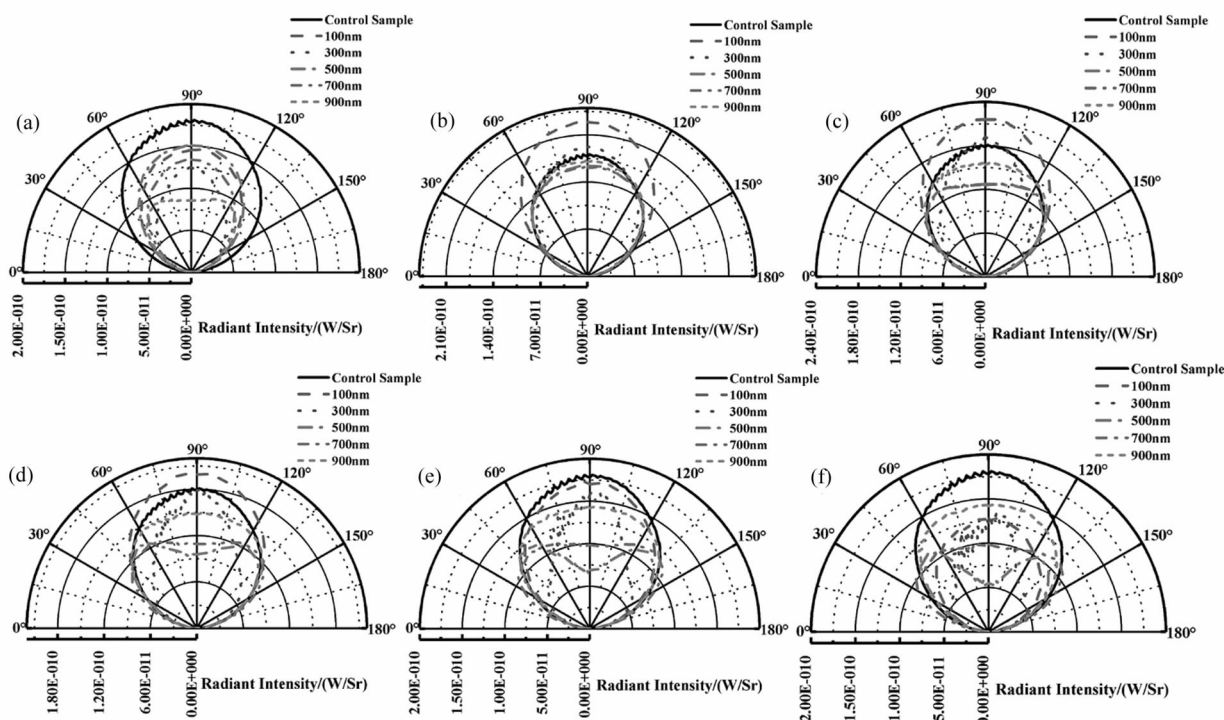


图 5 P_x 偶极子取向获得的发光视角依赖图: (a) $H=3\text{ nm}$; (b) $H=5\text{ nm}$; (c) $H=10\text{ nm}$; (d) $H=15\text{ nm}$; (e) $H=20\text{ nm}$; (f) $H=25\text{ nm}$

Fig. 5 Angle dependent diagram of P_x dipole orientations: (a) $H=3\text{ nm}$; (b) $H=5\text{ nm}$; (c) $H=10\text{ nm}$; (d) $H=15\text{ nm}$; (e) $H=20\text{ nm}$; (f) $H=25\text{ nm}$

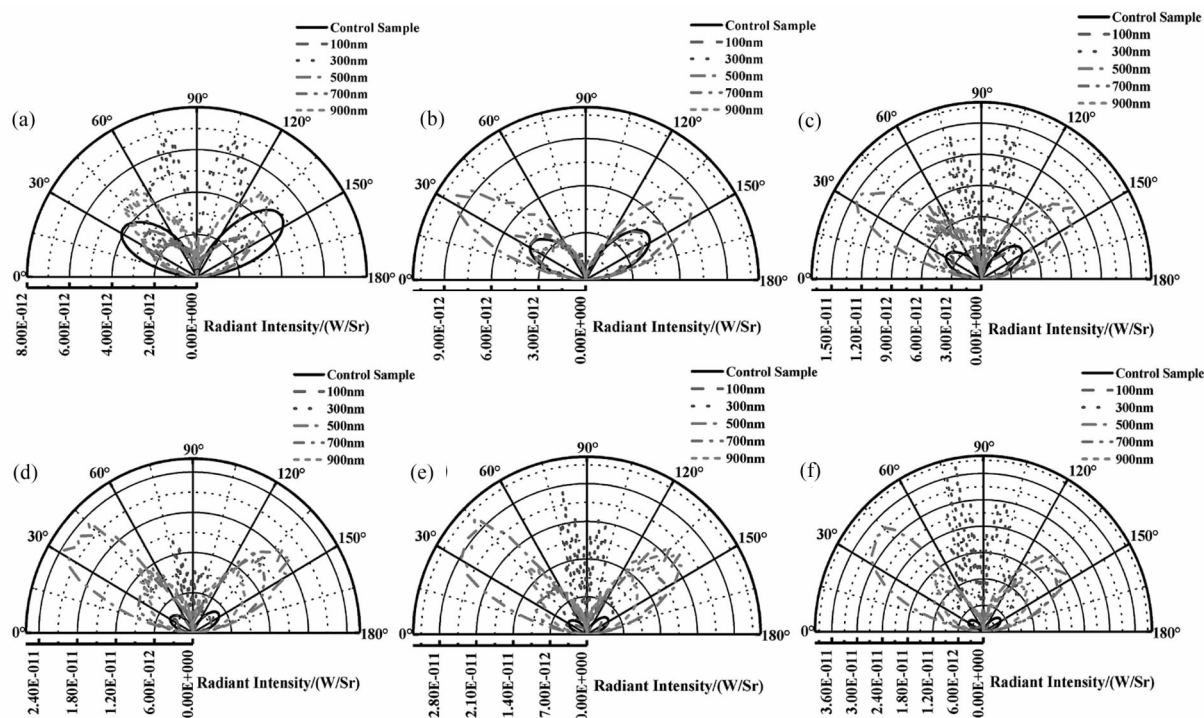


图6 P_z 偶极子取向获得的发光视角依赖图:(a) $H=3$ nm; (b) $H=5$ nm;

(c) $H=10$ nm; (d) $H=15$ nm; (e) $H=20$ nm; (f) $H=25$ nm

Fig. 6 Angle dependent diagram of P_z dipole orientations: (a) $H=3$ nm; (b) $H=5$ nm;

(c) $H=10$ nm; (d) $H=15$ nm; (e) $H=20$ nm; (f) $H=25$ nm

30°到60°和与之对称的方向有2个凸起相吻合。

为进一步直观的解释加入微纳光栅结构后器件发光强度及发光视角的变化,对 OLED 器件内的电场强度分别进行了模拟。选择2个典型的结构, $H=$

5 nm、 $T=100$ nm 和 $H=25$ nm、 $T=900$ nm。图7中 (a_1) 、 (b_1) 、 (c_1) 和 (a_2) 、 (b_2) 、 (c_2) 分别表示偶极子沿 P_x 和 P_z 取向时,参考器件及 $H=5$ nm、 $T=100$ nm 和 $H=25$ nm、 $T=900$ nm 这2种结构器件内电场

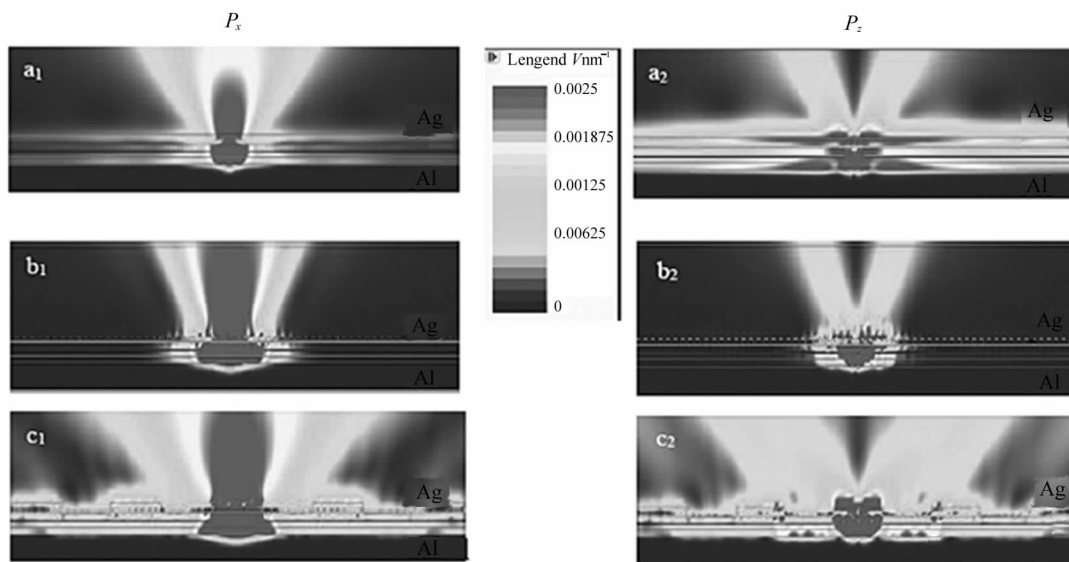


图7 (a)、(b)、(c)分别为对照组 $H=5$ nm、 $T=100$ nm 和 $H=25$ nm、 $T=900$ nm 的器件内部电场强度分布图:

(a_1) 、 (b_1) 、 (c_1) 偶极子取向为 P_x ; (a_2) 、 (b_2) 、 (c_2) 偶极子取向为 P_z

Fig. 7 The internal electric field intensity distribution of the devices in the control group with (a), (b) $H=5$ nm, $T=100$ nm and (c) $H=25$ nm, $T=900$ nm;

(a_1) 、 (b_1) and (c_1) with dipole orientations of P_x ; (a_2) 、 (b_2) and (c_2) with dipole orientations of P_z

强度分布情况。当 $H=5\text{ nm}$ 、 $T=100\text{ nm}$ 时,如图 7 中(a₁)、(a₂)所示。可以明显得出,由于银膜的存在,在 Ag/NPB、Ag/Glass 和 Al/Alq₃ 界面处产生了 SPP 模式损耗。在加入光栅结构($H=5\text{ nm}$ 、 $T=100\text{ nm}$)后的器件中,如图 7(b₁)、(b₂)所示,器件在 Ag/NPB、Ag/Glass 和 Al/Alq₃ 界面的电场强度明显减弱,说明在加入光栅结构后,SPP 模式中限制的光子部分被提取出来,从而减弱了该模式损耗。当偶极子取向为 P_x 时,相对于参考器件,器件在 90° 附近方向的发光强度有明显增强。而偶极子取向为 P_z 时,虽然 SPP 模式损耗被明显减弱,但出射光的电场强度并没有增强,即这部分光并没有被耦合出来。相比于参考器件,图 7(c₁)、(c₂)中光栅结构为 $H=25\text{ nm}$ 、 $T=900\text{ nm}$,对于器件内部电场强度,偶极子取向为 P_z 时器件内部的电场增强情况比 P_x 时更明显,增强效果主要发生在在 30° 到 60° 方向。这也印证了上面的分析,当 $H=25\text{ nm}$ 、 $T=900\text{ nm}$ 时, P_z 偶极子取向相较 P_x 对 OLED 器件视角依赖关系增强效果更大,并且在 30° 到 60° 方向增强较为明显。

4 结 论

本文利用 ExpertOLED 仿真软件通过对具有不同光栅结构的实际 OLED 器件进行模拟,在双金属电极 OLED 器件中添加周期性光栅结构,当选择占空比 $Q=1:1$,光栅高度 $H=5\text{ nm}$,光栅周期 $T=100\text{ nm}$ 时,既可以增强器件的发光强度,又可以拓宽发光的视角。同时经过系统的分析发现:当光栅周期较大时,光栅高度 H 的改变对器件性能影响较小;反之,当光栅周期较小时, H 的改变对器件性能影响较大。而且 H 不能过小,不然会导致光栅起到的影响减小,对发光增强的效果减弱。偶极子取向对器件发光强度及发光视角有一定的影响,在双金属电极 OLED 器件中,减少偶极子取向 P_x 、 P_z 的分子占比,可以减少 SPP 损耗,增大出光效率,提高发光强度。调整偶极子取向 P_x 、 P_z 的分子占比,还可以调节 OLED 器件在不同视角方向的发光强度,如单纯增加偶极子取向 P_x 的分子占比,不仅可以增大器件的发光视角,而且发光强度随视角的变化近似保持朗伯发射。因此可以通过物理的或化学的手段调控分子的偶极取向,从而优化 OLED 器件的发光强度及发光视角,为实验上利用周期性微纳光栅结构提高 OLED 器件性能提供具有价值的参考。

参考文献:

[1] TANG C W, VANSLYKE S A, CHEN C H. Electrolumines-

cence of doped organic thin films[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 65(9): 3610-3616.

- [2] FUKAGAWA H, SASAKI T, TSUZUKI T, et al. Long-lived flexible displays employing efficient and stable inverted organic light-emitting diodes [J]. Advanced Materials, 2018, 30(28): 1706768.
- [3] AMIN S, CHEN D, DONG-HUN S, et al. Realization of high-efficiency fluorescent organic light-emitting diodes with low driving voltage [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-9.
- [4] SHEN J, LI F, CAO Z, et al. Light scattering in nanoparticle doped transparent polyimide substrates [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(17): 14990-14997.
- [5] MIAO Y, WANG K, ZHAO B, et al. High-efficiency/CRI/color stability warm white organic light-emitting diodes by incorporating ultrathin phosphorescence layers in a blue fluorescence layer [J]. Nanophotonics, 2018, 7(1): 295-304.
- [6] KIM K H, KIM J J. Origin and control of Orientation of phosphorescent and TADF Dyes for High-Efficiency OLEDs [J]. Advanced Materials, 2018, 30(42): 1705600.
- [7] KIM S Y, JEONG W I, MAYR C, et al. Organic light-emitting diodes with 30% external quantum efficiency based on a horizontally oriented emitter [J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(31): 3896-3900.
- [8] TANG X, PAN R, ZHU H, et al. The origin of interlayer-induced significant enhancement of EQE in CzDBA-based OLEDs studied by magneto-electroluminescence [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(1): 013503.
- [9] LAN L H, TAO H, LI M L, et al. Progress of light extraction technology for organic light-emitting diodes [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2017, 33(8): 1548-1572.
蓝露华, 陶洪, 李美灵, 等. 有机发光二极管光提取技术进展 [J]. 物理化学学报, 2017, 33(8): 1548-1572.
- [10] QIAN M. Study on the light extraction technology of OLED based on surface plasmon polaritons/micro-cavity effect [D]. Suzhou: Suzhou University, 2016: 41-54.
钱敏. 基于表面等离子体激元/微腔效应的 OLED 光提取技术研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2016: 41-54.
- [11] HUANG C Y, ZHANG Y W, ZHANG X P. End-emitting nano organic light emitting diodes (OLEDs) with directional output [J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2905-2913.
- [12] QIAN M, LIU Q, LI W S, et al. Study on the light extraction

mechanism of organic light-emitting diodes with corrugated Ag cathode made by soft nanoimprint[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8): 080306.

- [13] ZHONG K J, FU Y J, JIAN G Y. Improvement of OLED luminous efficiency by cone shaped microstructure array [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2018, 33(10): 824-830.

钟可君, 伏燕军, 江光裕. 锥状微结构阵列提高 OLED 出光效率的研究[J]. 液晶与显示, 2018, 33(10): 824-830.

- [14] QIAO D, LI K, COPNER N, et al. The enhanced light extraction top-emitting organic light-emitting diode based on metallic grating anode[C]//2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), August 4-8, 2019, Zhen-

jiang, China. New York: IEEE, 2019: 49-52.

- [15] ZHONG K J, FU Y J, JIAN G Y. Design of subwavelength grating for improving efficiency of OLED substrat [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 701-706.

钟可君, 伏燕军, 江光裕. 一种提高 OLED 基底出光效率的亚波长光栅设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 701-706.

作者简介:

王文军 (1962—), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事有机光电材料与器件/激光技术及非线性光学等方面的研究.