

文章编号:1007-2780(2019)08-0725-08

基于微结构阵列基板的高效顶发射 OLED 器件

王江南,丁磊,倪婷,宁舒雅,张方辉*

(陕西科技大学电气与控制工程学院,陕西西安 710021)

摘要:为了提高顶发射 OLED 的效率,降低电压,基于纳秒激光刻蚀技术制备了一种用于顶发射 OLED 的低成本可重复的方形微结构阵列基板,在此基础上制备了顶发射 OLED 器件。实验发现,利用这种基板可以有效提高器件的出光效率,降低器件的驱动电压。其中,使用 $20\ \mu\text{m}$ 的方格微结构阵列基板的器件的最高效率达到 $66.7\ \text{cd/A}$, $40\ \text{mA/cm}^2$ 下亮度达到 $20\ 103\ \text{cd/m}^2$,相比于未经刻蚀的无结构器件分别提高 9.8% 和 6.9% ;而使用 $40\ \mu\text{m}$ 的方格微结构阵列基板的器件驱动电压最低,在 $40\ \text{mA/cm}^2$ 下为 $9.58\ \text{V}$,相较未经刻蚀的无结构器件降低了 $0.26\ \text{V}$ 。分析表明,器件光效的提升和驱动电压的降低主要有两点原因:首先由于基于微结构阵列基板制备的器件中存在褶皱结构,可以破坏器件的光波导,并且增大了器件面积而降低驱动电压;其次纳秒激光刻蚀产生的光栅条纹可以提高光提取效率,同时增强局部电场以提高电极的载流子注入能力。

关键词:顶发射 OLED 器件;微结构阵列;纳秒激光刻蚀

中图分类号: TN383⁺.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193408.0725

High-efficiency top-emitting OLEDs based on microstructure array substrate

WANG Jiang-nan, DING Lei, NI Ting, NING Shu-ya, ZHANG Fang-hui*

(School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the top emitting OLED and reduce the driving voltage, a low-cost reproducible square microstructure array substrate for top-emitting OLEDs was fabricated based on nanosecond laser etching technology. Based on this substrate, the green top-emitting OLED devices were fabricated. It is found that the microstructure array substrate can effectively improve the light extraction efficiency and reduce the driving voltage of the device. Among them, the maximum efficiency of the device using the $20\ \mu\text{m}$ square microstructure substrate is $66.7\ \text{cd/A}$ and the brightness is $20\ 103\ \text{cd/m}^2$ at $40\ \text{mA/cm}^2$, which is 9.8% and 6.9% higher than that of the normal device, re-

收稿日期: 2019-03-18; **修订日期:** 2019-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61605105);陕西省科技统筹创新工程计划项目(No. 2011KTCQ01-09);陕西科技大学科研启动资金(No.2016BJ-01);陕西省教育厅服务地方专项计划项目(No.17JF006)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61605105); Innovation Project of Science and Technology Plan Projects of Shaanxi Province (No. 2011KTCQ01-09); Research Start-up Funds of Shaanxi University of Science and Technology(No.2016BJ-01); Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Education Department(No.17JF006)

* 通信联系人, E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn

spectively. The device based on the $40\ \mu\text{m}$ square microstructure array substrate has the lowest driving voltage of $9.58\ \text{V}$ at $40\ \text{mA}/\text{cm}^2$, which is $0.26\ \text{V}$ lower than that of the normal device. The analysis shows that the improvement of the light efficiency of the device and the reduction of the driving voltage are mainly caused by two reasons. Firstly, due to the presence of the wrinkle structure in the device, the optical wave-guide mode of the device can be destroyed, and the device active area is increased to reduce the driving voltage. Secondly, the grating fringes made by the second nanosecond laser etching can improve the light extraction efficiency while enhancing the local electric field to improve the carrier injection capability of the electrode.

Key words: top-emitting OLEDs; microstructure array; nanosecond laser etching

1 引言

有机电致发光二极管(OLED)自被发明以来,以其独有的自发光、广视角、高亮度、可柔性等诸多特点受到广泛的关注。由于在有源驱动 OLED 显示面板中需要使用不透明薄膜晶体管组成的像素电路来驱动 OLED,因此会遮挡常规底发射 OLED 器件发出的光,导致出光开口率低,同时对器件的效率和寿命产生严重影响。然而顶发射 OLED 器件是从半透明阴极出光,而不会透过基板,因此使用顶发射 OLED 可以提高 AMOLED 面板的开口,同时大幅度提升光效^[1]。因为顶发射 OLED 器件两侧电极均具有反射特性,顶发射 OLED 器件拥有较强的微腔效应。从发光层发出的光与经过电极反射的光会发生宽角干涉和多光束干涉,通过微腔结构设计可增强满足干涉条件的干涉光,削弱其它光,从而实现较高的色纯度^[2]。但同时微腔可加强器件的内部光强,加重了器件的光波导损失,而两侧金属电极同样加重了器件光损失^[3-4],因此,对顶发射 OLED 的光取出的研究至关重要。为此研究者们提出了很多方法,试图提高顶发射 OLED 器件的耦合效率。Pyo 等^[5]在顶发射 OLED 层之上增加了一层纳米空隙的聚合物薄膜作为光取出层,来提高出光效率,改善视角特性。Park 等^[6]利用等离子刻蚀,在 PMMA 上形成随机的起伏,制成褶皱器件,引起器件内部光散射,提高器件光取出效率。Qu 等^[7]在基板上制备金属网格,降低光损失。同时通过周期性腔长变化和网格散射减弱微腔效应,改善视角特性。Riel 等^[8]在阴极之上覆盖 ZnSe,将器件正面光强提高到 1.7 倍,并提高了色纯度。Zhu 等^[9]、Wu 等^[10]也利用覆盖层的方式

提高了顶发射 OLED 的效率。这些方法对于提升顶发射 OLED 效率均具有很好的效果,但是,在真正 OLED 量产工艺中,仍缺乏一种简单易于实现的办法提高顶发射 OLED 器件效率。

本文提出一种使用微结构阵列的方法来提高顶发射 OLED 的出光效率。微结构阵列可有多种方法制备,如本文所用的激光刻蚀法、光刻法、纳微压印法^[11-12]、喷墨打印法^[13]、自组装方法^[14]等,这些方法均可以用于制备良好的微结构阵列。然而纳微压印法由于模板昂贵且不易于大面积器件制备,仅适用于实验室,自组装方法同样由于无法制备大面积器件而不适合用于量产。而相比喷墨打印法和光刻法,激光刻蚀法由于图案可以灵活变换,且成本低廉,适合前期的验证以及后期小批量的量产。为此本文采用纳秒激光刻蚀镀有 ITO 的基板,形成微结构阵列。再通过化学气相沉积镀一层 SiN 薄膜起到平整化层的作用,从而避免了由于纳秒激光刻蚀 ITO 时产生的重铸层穿透有机层引起的短路。最后利用真空蒸镀的方法在其上制备 Al 层作为阳极,制备出具有微结构阵列结构的阳极基板。实验发现利用这种基板,可以有效地提高顶发射 OLED 器件的效率,降低驱动电压,同时不会对器件的发光光谱造成影响。

2 实验

2.1 微结构阵列阳极基底制备

首先使用磁控溅射设备溅镀 ITO,镀膜厚度的厚度为 $150\ \text{nm}$ 。镀膜时通入 $20\ \text{mL}/\text{min}$ 的 Ar 和 $1\ \text{mL}/\text{min}$ 的 O_2 ,以 $100\ \text{W}$ 的直流功率溅射 $400\ \text{s}$,厚度通过椭偏仪进行测量。

溅镀完成后,使用纳秒激光对 ITO 进行图形

化,刻蚀三种方格阵列,其中方格边长分别为 20, 40, 80 μm 。在刻蚀过程中,调节激光的开关频率为 1 MHz,使得激光在刻蚀路径上留下光栅结构的 ITO 残留。

刻蚀完成后,使用等离子增强气相沉积 (PECVD) 制备大约 1 μm 的 SiN 薄膜来作为平坦化的作用,避免由于激光刻蚀 ITO 产生的重铸层导致器件短路。PECVD 镀膜时通入 15 mL/min 的 SiH_4 、20 mL/min 的 NH_3 、20 mL/min 的 H_2 和 250 mL/min 的 N_2 ,镀膜时间为 1 200 s,通过椭圆仪测试膜厚为 1 μm 。最后使用真空热蒸镀加掩模版的方式蒸镀 100 nm 的图形化的 Al,作为顶发射 OLED 的阳极。制作过程如图 1 所示。

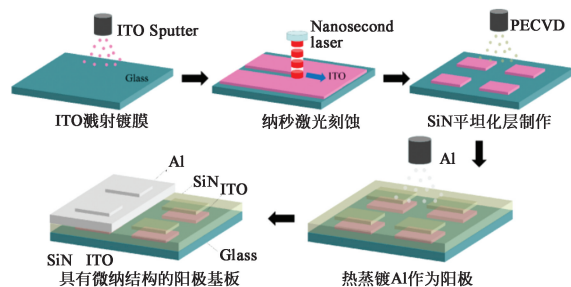


图1 微结构阵列基板制备流程

Fig.1 Microstructure array substrate preparation process

2.2 OLED 器件制备

在无微结构阵列结构基底及 20 μm 、40 μm 和 80 μm 方格微结构阵列基底上以相同的器件结构同时制备 4 个绿色磷光顶发射 OLED 器件,下文中简称为普通器件、20 μm 器件、40 μm 器件和 80 μm 器件。

器件结构为 Al(100 nm)/2,3,6,7,10,11-六氰基-1,4,5,8,9,12-六氮杂苯并菲 (HAT-CN) (10 nm)/4,4'-环己基二[N,N-二(4-甲基苯基)苯胺](TAPC) (170 nm)/4,4'-二(9-咔唑)联苯(CBP):Ir(ppy)₃ (5 nm, 10%)/4,4'-二(9-咔唑)联苯(CBP):Ir(ppy)₃ (5 nm, 15%)/1,3,5-三(4-吡啶-3-基)苯(TpPyPB) (45 nm)/8-羟基喹啉-锂(Liq) (20 nm)/Ag:Mg(20 nm, 10%, 质量分数)/CBP(75 nm)。器件结构如图 2 所示。

其中 Al 作为顶发射 OLED 器件的阳极,同时作为发射电极;HAT-CN 作为空穴注入层,其

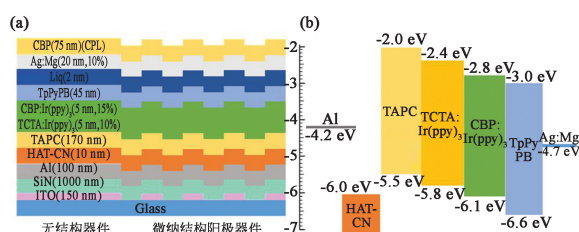


图2 顶发射 OLED 器件的结构示意图(a)与能级图(b)

Fig.2 Schematic diagram(a) and energy level diagram (b) of a top-emitting OLEDs

LUMO 能级为 6.0 eV^[15];TAPC 作为空穴传输层,其 HOMO 与 LUMO 能级分别为 5.5 eV 和 2.0 eV^[16];TCTA: Ir(ppy)₃/CBP: Ir(ppy)₃ 作为双磷光发光层,其中 TCTA 的 HOMO 为 5.8 eV, LUMO 为 2.4 eV^[17],CBP 的 HOMO 为 6.1 eV, LUMO 为 2.8 eV, ET 为 2.6 eV^[18], Ir(ppy)₃ 的 ET 为 2.55 eV^[19];TpPyPB 作为电子传输层,其 HOMO 为 6.61 eV, LUMO 为 3.04 eV^[19];Liq 作为电子注入材料,Ag:Mg 透明电极作为器件的阳极,其功函数引自文献[20];CBP 作为覆盖层,用于提高半透明阴极透过率,提高顶发射 OLED 的耦合出光。

所有的金属电极和有机材料均是在 6×10^{-4} Pa 的真空度下以热蒸镀的方式沉积在基底上,并使用晶体振荡器在线监控膜厚及速率,其中, HAT-CN 与 Liq 以 0.02 nm/s 速率蒸镀,其他有机层以 0.2 ~ 0.4 nm/s 速率蒸镀,Al 以 0.6 nm/s 速率蒸镀,Ag:Mg 的蒸镀速率为 0.1 nm/s。

器件的 EL 光谱、效率曲线等光电特性采用 CS2000A 分光辐射亮度计和 Keithley-2400 高精度数字源表测得。

3 实验结果

蒸镀 Al 之前基板的显微图如图 3 所示。

从图 3 可见,通过激光刻蚀,基板上 ITO 被图形化为方格状,其中方格大小分别为 18.8, 40.2, 79.8 μm ,这是由于激光误差导致的刻蚀的方格大小与设计值有些差距,20 μm 方格呈现长方形。图中的绿色区域是由于 SiN 膜层光干涉导致的。由于激光周期性开启,刻蚀路径上会留下具有光栅结构的 ITO 残留,ITO 残留的线间隔宽度约为 5.6 μm ,这一间隔宽度可以通过激光

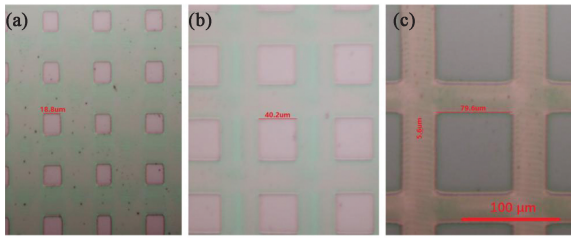


图 3 20 μm 方格(a)、40 μm 方格(b)和 80 μm 方格(c)微结构阵列基板的显微照片。

Fig.3 Photomicrograph of 20 μm square (a), 40 μm square (b) and 80 μm square (c) microstructure array substrate.

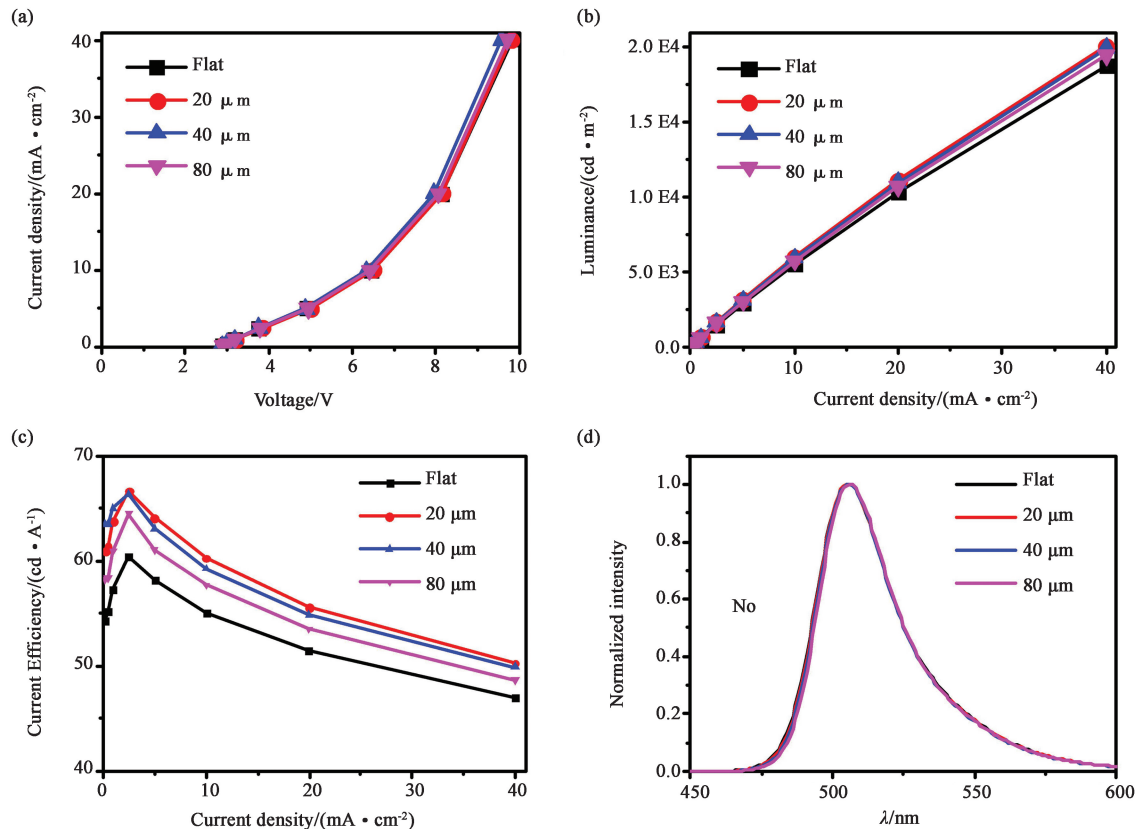


图 4 (a)器件的电流密度-电压曲线;(b)器件的亮度-电流密度曲线;(c)器件的电流效率-电流密度曲线;(d)器件在 3.5 V 下的归一化光谱

Fig.4 (a) Current density-voltage curve of OLEDs; (b) Luminance-current density curve OLEDs; (c) Current efficiency- current density curve of OLEDs; (d) Normalized spectra of OLEDs at 3.5 V.

图 4 (b)为器件的亮度-电流密度曲线。可以发现,在不同电流密度下,基于微结构阵列基板的器件的亮度始终高于普通器件,在 40 mA/cm^2 下,普通器件、20 μm 器件、40 μm 器件和 80 μm 器件的亮度分别达到 18 805, 20 103, 19 955, 19 469 cd/m^2 。其中 20 μm 阵列阳极器件的发光

开启频率来控制。在这样的基板上制备 OLED 器件会使器件各层同样呈现方格阵列状,从而形成如图 2 (a)所示的周期性褶皱结构。

器件的光电特性曲线如图 4 所示。

由图 4 (a)可见,所有器件的启亮电压均为 2.8 V 左右,这是因为器件的驱动电压主要与各层材料间能级势垒有关,基板的微结构不足以对启亮电压产生影响。但随着驱动电流的增大,微结构阵列基板对器件的电压影响变大,40 mA/cm^2 下,40 μm 器件的电压最低,为 9.58 V,与普通器件的 9.84 V 相比低了 0.26 V;20 μm 器件和 80 μm 器件电压处于两者之间,分别为 9.80 V 和 9.72 V。

强度比普通器件提升 7%。

图 4 (c)为器件的电流效率-电流密度曲线。在不同电流密度下,基于微结构阵列基板的器件的电流效率始终高于普通器件,在 2.5 mA/cm^2 下,普通器件、20 μm 器件、40 μm 器件和 80 μm 器件均取得最大电流效率,分别为 60.4, 66.7,

66.3, 64.4 cd/A。20 μm 阵列结构器件比普通器件提升 10%。随着电流密度的提高,各个器件均出现效率滚降。在 40 mA/cm² 时,20 μm 阵列结构器件比普通器件仍有 7% 的提升。

图 4(d) 为器件归一化光谱曲线,由于微腔的存在会使光谱本峰宽变窄,或者发生位移,然而,

由图 4(d) 可见器件在使用方格阵列基板代替平坦基板后,器件的归一化光谱形状几乎没有变化,峰位仅偏移 1 nm。也就是说,方格阵列基板不会影响器件原有的微腔结构,因而在实际应用中不需要更改器件结构,直接替换即可。具体参数如表 1 所示。

表 1 器件的性能参数

Tab.1 Performance parameters of OLEDs

器件	启亮 电压/V ^(a)	驱动 电压/V ^(b)	亮度/ (cd · m ⁻²) ^(b)	电流效率/ (cd · A ⁻¹) ^(c)	光谱峰 位/nm ^(c)	CIE1931 ^(c)
普通	2.87	9.84	18 805	60.4	518	(0.22, 0.70)
20 μm	2.88	9.80	20 103	66.7	518	(0.22, 0.70)
40 μm	2.88	9.58	19 955	66.3	517	(0.21, 0.70)
80 μm	2.88	9.72	19 469	64.4	517	(0.21, 0.70)

^(a) 启亮电压在 0.25 mA/cm² 下测得; ^(b) 驱动电压、亮度在 40 mA/cm² 下测得; ^(c) 电流效率、峰位和色坐标均是器件最高效率时的值。

4 分析与讨论

方格状阵列结构对顶发射 OLED 器件性能的提升主要有两点。一是由于阵列状的阳极图形使器件每一层呈现褶皱状,其实际器件面积会高于平坦的对比器件,由于电流与电流密度之间的关系为 $I = JS$, 其中 S 为器件实际面积,由于褶皱器件的实际面积更大,在施加相同的电流条件下,20, 40, 80 μm 器件实际电流密度要小于对比器件。由于 OLED 具有二极管特性,器件电压正比于器件电流密度,因此具有微结构阵列的器件有较低的电压。

二是减少光波导损失,光波导不仅存在于底发射 OLED 的 ITO/衬底中,同样存在于顶发射 OLED 有机层中,由于 OLED 各层的折射率不同,会存在一部分入射角大的光由于全发射而被局限在某一层中无法出射,最后变为热能消散。但由于方块阵列的存在,会在方块边缘形成局部断面,断面处折射率不同,局限在有机层内部的光到达断面时会发射折射,从而破坏内部光的光波导,提高光取出效率。对于实验所用的方格阵列基板,刻蚀部分与未刻蚀部分的边界越大,其器件

内部的局部断面也越多,因而破坏波导的程度也越高。这器件的局部断面的多少可以用单位面积内方格的边长来描述。对于 20 μm 基板,其边界边长与面积为 0.022 $\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$; 对于 40 μm 基板,其边界边长与面积为 0.025 $\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$; 对于 80 μm 基板,其边界边长与面积为 0.022 $\mu\text{m}/\mu\text{m}^2$ 。因此,40 μm 基板在降低光波导损失上具有一定优势。

由纳秒激光刻蚀产生的光栅结构也对器件性能有一定提升。为了研究这种光栅结构对器件性能的影响,本文使用 FDTD 对具有光栅结构和无光栅结构的器件进行了光学仿真,为简化模型,光栅采用 3 μm 宽的 Al 长条构成,间隔 3 μm ,使用波长为 517 nm 平面波作为光源模拟整面的 OLED 发光。通过计算得到器件的光强分布分别如图 5(a) 和 5(b) 所示。

可以发现这种光栅结构可以改变器件内部光强分布,使其呈现周期性分布,并且器件内部光强有所降低,而外部光强增大,出光强度提高。基于仿真可以证明刻蚀产生的光栅结构可以有效提高器件的耦合出光。由于 20 μm 基板的激光刻蚀区域更大,产生的光栅结构面积更大,因此基于此制备的 20 μm 器件具有较好的光提取效率。

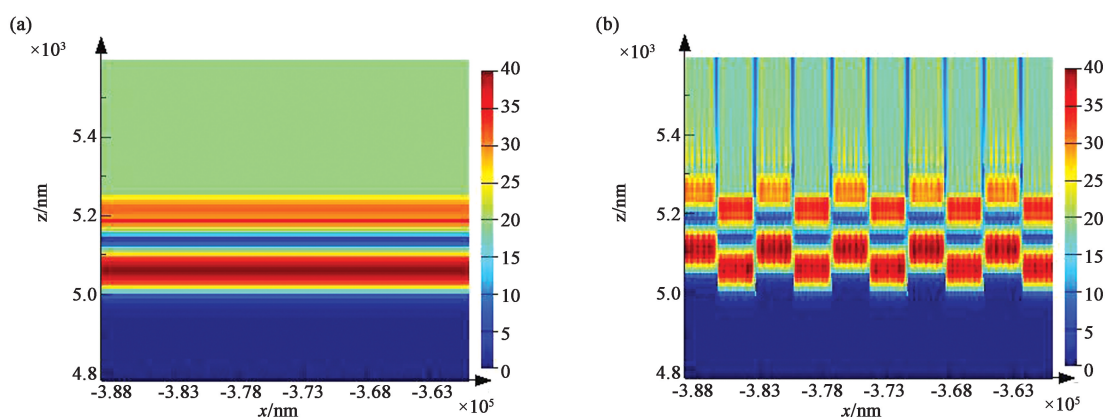


图 5 无光栅结构顶发射 OLED 器件(a)与光栅结构顶发射 OLED 器件(b)的光学模拟结果

Fig.5 Optical simulation results of TEOLEDs without grating structure (a) and TEOLEDs with a grating structure(b)

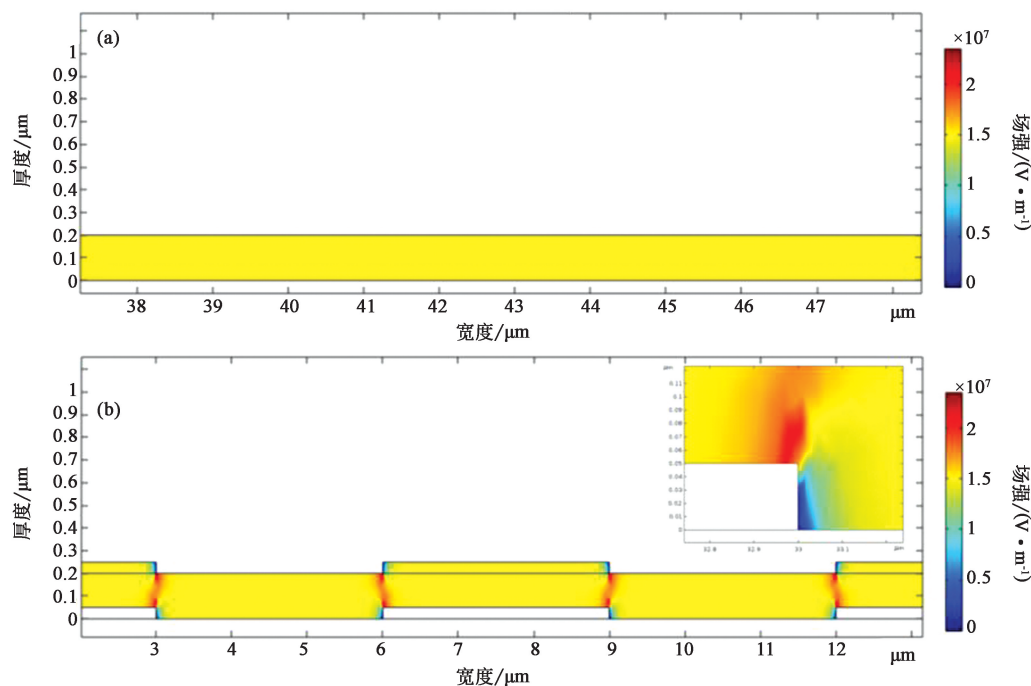


图 6 无光栅结构顶发射 OLED 器件(a)与光栅结构顶发射 OLED 器件(b)的电场模拟结果

Fig.6 Electric field simulation results of TEOLED without grating structure (a) and TEOLED device with a grating structure (b)

本文也模拟了通电时器件内部电场在稳态下的分布。图 6 为无光栅结构器件和有光栅结构器件在加直流偏压时的电场分布模拟图,为了简化模型,使用方形金属条代替更为粗糙的光栅条纹,直流偏压为 3 V。可以发现,无光栅结构器件电场是均匀分布的为 1.5×10^7 V/m,而光栅结构会在电极处引入尖端,将电极附近的局部电场强度提高到 2.4×10^7 V/m,提升约 60%,因此可以有

效减少空间电荷积累,提高载流子注入能力,一定程度上降低器件的驱动电压。

综合而言,20 μm 器件与 40 μm 器件的电流效率相近,但要高于平坦的对比器件和 80 μm 阵列结构器件。而 40 μm 器件褶皱程度较大,因此其驱动电压最低。根据理论分析,在激光线宽在 40 μm 时,40 μm 的方格具有最大的边界长度,因此为最优条件。对于使用其他刻蚀方法(如光刻

法),同样可以在方格大小为 $40\ \mu\text{m}$ 时,即是刻蚀宽度与方格边长一致时取得最优值。但是相较于其他刻蚀方法不同的是,纳秒激光会在刻蚀路径上留下光栅状结构,这种光栅结构会对器件的电压以及效率起到进一步的优化效果,而这种光栅结构的周期和高度可以通过调节纳秒激光的开关频率以及刻蚀速度和功率调节,实现对器件效率进行进一步的优化。

5 结 论

本文通过对 ITO 进行纳秒激光刻蚀,制备了一种具有方格阵列微结构的基板。用于顶发射

OLED 器件时,由于阵列状微结构的存在,可以提高光提取效率, $20\ \mu\text{m}$ 方格阵列结构器件的最高效率达到 $66.7\ \text{cd/A}$, $40\ \text{mA/cm}^2$ 下亮度达到 $20\ 103\ \text{cd/m}^2$,相比于普通器件分别提高了 9.8% 和 6.9% 。通过引入褶皱和增强局部电场减低了器件的驱动电压。 $40\ \mu\text{m}$ 的方格阵列结构器件驱动电压最低,在 $40\ \text{mA/cm}^2$ 下为 $9.58\ \text{V}$,相较于普通器件降低了 $0.26\ \text{V}$ 。纳秒激光刻蚀法相比于气体刻蚀、自组装或是纳米压印的方法具有速度快、图形更改方便以及可以进行卷对卷生产的特点,同时不会对器件的微腔结构产生影响,可用于像素点稍大的 OLED 显示器件中,提高显示器件的效率。

参 考 文 献:

- [1] HSU S F, LEE C C, HWANG S W, *et al.* Color-saturated and highly efficient top-emitting organic light-emitting devices [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 478(1/2): 271-274.
- [2] SCHUBERT E F, HUNT N E J, MICOVIC M, *et al.* Highly efficient light-emitting diodes with microcavities [J]. *Science*, 1994, 265(5174): 943-945.
- [3] CAO J, LIU X, KHAN M A, *et al.* RGB tricolor produced by white-based top-emitting organic light-emitting diodes with microcavity structure [J]. *Current Applied Physics*, 2007, 7(3): 300-304.
- [4] SAXENA K, JAIN V K, MEHTA D S. A review on the light extraction techniques in organic electroluminescent devices [J]. *Optical Materials*, 2009, 32(1): 221-233.
- [5] PYO B, JOO C W, KIM H S, *et al.* A nanoporous polymer film as a diffuser as well as a light extraction component for top emitting organic light emitting diodes with a strong microcavity structure [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(16): 8575-8582.
- [6] PARK W Y, KWON Y, CHEONG H W, *et al.* Increased light extraction efficiency from top-emitting organic light-emitting diodes employing a mask-free plasma-etched stochastic polymer surface [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(9): 095502.
- [7] QU Y, COBURN C, FAN D J, *et al.* Elimination of plasmon losses and enhanced light extraction of top-emitting organic light-emitting devices using a reflective subelectrode grid [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(2): 363-368.
- [8] RIEL H, KARG S, BEIERLEIN T, *et al.* Tuning the emission characteristics of top-emitting organic light-emitting devices by means of a dielectric capping layer: an experimental and theoretical study [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(8): 5290-5296.
- [9] ZHU X L, SUN J X, YU X M, *et al.* High-performance top-emitting white organic light-emitting devices [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(7A): 4054-4058.
- [10] WU Z J, ZHAI Y, GUO R X, *et al.* Red top-emitting organic light-emitting device with improved efficiency and saturated color [J]. *Journal of Luminescence*, 2011, 131(10): 2042-2045.
- [11] SHIN T K, HO J R, CHENG J W J. A new approach to polymeric microlens array fabrication using soft replica molding [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(9): 2078-2080.
- [12] SENN T, KUTZ O, WENIGER C, *et al.* Integration of moth-eye structures into a poly(dimethylsiloxane) stamp for the replication of functionalized microlenses using UV-nanoimprint lithography [J]. *Pflügers Archiv Für Die Gesamte Physiologie Des Menschen Und Der Tiere*, 1960, 270(6): 628.
- [13] PERICET-CAMARA R, BEST A, NETT S K, *et al.* Arrays of microlenses with variable focal lengths fabricated by restructuring polymer surfaces with an ink-jet device [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9877-9882.

- [14] SHI X B, QIAN M, ZHOU D Y, *et al.* Origin of light manipulation in Nano-honeycomb structured organic light-emitting diodes [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(8): 1666-1671.
- [15] JEON Y P, CHOI Y H, KIM T W. Efficiency enhancement of organic light-emitting devices fabricated using a 1, 4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene hexacarbonitrile silver electrode [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(10): 7791-7794.
- [16] YANG S Y, JIANG M X. White light generation combining emissions from exciplex, excimer and electromer in TAPC-based organic light-emitting diodes [J]. *Chemical Physics Letters*, 2009, 484(1/3): 54-58.
- [17] SEINO Y, SASABE H, PU Y J, *et al.* High-performance blue phosphorescent OLEDs using energy transfer from Exciplex [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1612-1616.
- [18] ADAMOVICH V I, CORDERO S R, DJUROVICH P I, *et al.* New charge-carrier blocking materials for high efficiency OLEDs [J]. *Organic Electronics*, 2003, 4(2/3): 77-87.
- [19] SU S J, CHIBA T, TAKEDA T, *et al.* Pyridine-containing triphenylbenzene derivatives with high electron mobility for highly efficient phosphorescent OLEDs [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(11): 2125-2130.
- [20] KWON S, LEE E H, KIM K S, *et al.* Efficient micro-cavity top emission OLED with optimized Mg:Ag ratio cathode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 29906-29915.

作者简介:



王江南(1994—),男,浙江宁波人,硕士研究生,2016年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事于 OLED 器件方面的研究。E-mail: 271889516@qq.com



张方辉(1966—),男,山西曲沃人,博士,教授,2008年于陕西科技大学获得博士学位,主要从事于 OLED、LED 等的研究。E-mail: zhangfanghui@sust.edu.cn