

有机发光器件的光学调控研究进展

欧清东, 唐建新

(苏州大学 功能纳米与软物质研究院 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215123)



唐建新

摘要: 有机发光器件已经在全彩显示屏、可穿戴设备以及环境友好的室内照明领域获得了越来越多的关注。近年来, 材料设计、器件结构以及制备工艺的革新, 推动 OLED 器件性能在大面积、高效率、长寿命和高显色指数方面取得了一系列突破性进展。光学耦合效率是影响 OLED 器件中光电转换过程的关键因素之一, 如何调控光学耦合、避免器件内部的光子流失、提高出光效率, 对于发展高效率、高稳定的 OLED 技术具有重要意义。本文将围绕光学调控技术在波长依赖性、出光角度敏感性以及制备工艺兼容性方面, 系统分析 OLED 器件中光学损耗机制, 综述近年来国内外在 OLED 微纳结构光学调控的研究进展, 并介绍最新发展的软纳米压印仿生微纳结构光学耦合调控方法。此光调控技术实现了绿光 OLED 器件效率达到 $366 \text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ 、白光 OLED 效率达到 $123.4 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 、柔性白光 OLED 效率达到 $106 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 为新型 OLED 的光学调控提供了新思路。

关键词: 有机发光器件; 光学调控; 光损耗模型; 光取出; 软纳米压印

中图分类号: TN383.1

文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2016)08-0606-07

Recent Advances in Light Manipulation for Organic Light-Emitting Diodes

OU Qingdong, TANG Jianxin

(Institute of Functional Nano & Soft Materials, Collaborative Innovation Center of
Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Organic light-emitting diodes (OLEDs) have gained increasing attention in applications of full-color display panels, wearable intelligent electronics and eco-friendly interior lighting. Recently, the innovations of material design, device structure and manufacturing technology have driven the performance of OLED device to reach a new stage in terms of large area, long lifetime, high efficiency and color rendering index. Light out-coupling plays a critical role on the efficiency of electron-photon conversion process, so it is of great importance in developing efficient and stable OLEDs to manipulate light out-coupling and avoid intrinsic loss of photon. In this review, we emphasize the strategies of light manipulation from the perspectives of wavelength dependency, angle sensitivity and compatibility with fabrication process. Various optical loss channels are analyzed, and recent developments of micro/nanostructure-stimulated light out-coupling for OLEDs are overviewed. At last, we introduce our newly developed technique of light manipulation with biomimetic moth-eye nanostructure via soft nanoimprint lithography. This technique obtains extremely high power efficiencies of $123.4 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ and $106 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ for glass and plastic based white OLEDs respectively, as well as current efficiency of $366 \text{ cd} \cdot \text{A}^{-1}$ for green OLED. This technique is expected to accelerate the commercialization of large-scale and low-cost OLED panels, and to inspire new design of advanced device architecture.

Key words: organic light-emitting diode; light manipulation; light out-coupling loss channels; light extraction; soft nanoimprint lithography

收稿日期: 2015-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91433116, 11474214);
科技部“973”计划项目(2014CB932600)

第一作者: 欧清东, 男, 1989 年生, 硕士

通信作者: 唐建新, 男, 1979 年生, 教授, 博士生导师,
Email: jxtang@suda.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.08.07

1 前言

21 世纪以来, 经济和社会快速发展, 对半导体器件的要求迅速提高, 传统单元功能的无机半导体器件已经很难满足社会需求。以有机发光器件(organic light-emitting diode, OLED)为代表的有机功能器件在新型平板显示、柔性显

示、固态照明以及可穿戴电子设备等领域显示出极为广阔的应用潜力,受到了科学界和工业界的广泛关注^[1-5]。

OLED 是有机电子器件中最早问世的器件之一,由于 OLED 技术具有低功耗、主动发光、全固态、发光亮度高、色彩丰富和易于实现柔性显示等诸多优点,被业界认为是最具有发展前景的下一代平板显示和照明技术之一。OLED 技术已在商业产品中应用并表现出了强劲的发展势头,在科学研究上已逐步向更高、更深的层次发展。然而, OLED 还存在许多问题尚待进一步的深入研究,诸如高效率、大面积、长寿命、低成本和柔性可弯折等,而这些问题的解决需要对 OLED 器件的材料、结构设计、器件机理等进行深入研究。

与此同时, OLED 器件在纳米尺度下表现出独特的现象和规律,使人们对物质世界的认识进入到了崭新的阶段。纳米科学技术已经成为当今科学领域的研究热点和重点,并已成为推动经济发展和科技进步的主要驱动力之一。而纳米科学技术的长足进步,为我们实现 OLED 器件的高效结构设计和优化提供了契机。

2 光损耗模式

OLED 器件的发光效率可以分为量子效率、电流效率和功率效率。其中,量子效率是器件向外发射的光子数与注入的电子空穴对数量之比。量子效率又分为内量子效率和外量子效率。内量子效率是在器件内部由复合产生辐射的光子数与注入的电子空穴对数之比。外量子效率是指在观测方向,由器件表面出射的光子数与注入电子数的比。外量子效率不但与所用材料的特性有关,还与器件的构筑结构等关系密切。由于 OLED 器件是多层结构,有机发光层发出的光经由波导效应或再吸收而损失,在界面处还有一部分光被反射。

随着新型高效磷光^[6-7]与热延迟荧光^[8]材料的研发, OLED 器件的内量子效率已经接近 100%。然而,由于器件内部界面层之间存在严重的波导效应, OLED 器件外量子效率通常只能达到 20% 左右^[9],这在很大程度上制约着 OLED 器件的实际应用。为此,如何提高 OLED 器件外量子效率成为该领域的热点,研究方向也从重点改进材料转向改进器件结构以提高外量子效率。

对于传统 OLED 器件,有机层($n \approx 1.7$)与 ITO 电极($n = 1.8 \sim 2.1$)、玻璃基底($n = 1.5$)和空气($n = 1.0$)之间的折射率差异,导致在有机/ITO-玻璃基底界面和玻璃-空气界面会发生内部全反射现象。折射率的差异造成只有少部分发光能从基底出射,而大部分光以基底模式陷于玻璃或塑料基板,或以波导模式陷于器件功能层,或从器件的边缘射出。

图 1 所示为薄层 OLED 器件结构中光学损耗模式的物理模型^[10]。根据理论计算,传统 OLED 器件中基底模式、波导模式、表面等离子体模式以及金属吸收损失的比例分别约为 23%、15%、40% 和 4%。这意味着只有 18% 的光可以从玻璃基底表面发射出来。

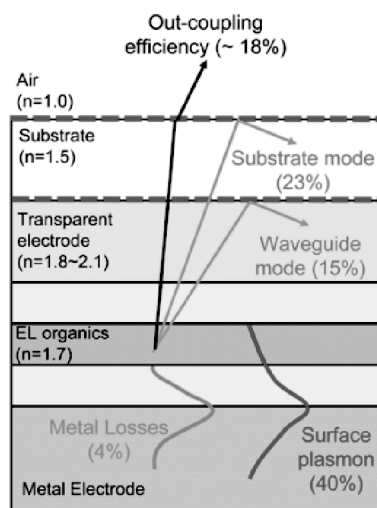


图 1 常规 OLED 器件中耦合出光损耗示意图^[10]

Fig. 1 Schematic of various light out-coupling loss channels in traditional OLEDs^[10]

3 光调控方法

基于光学理论模拟,通过优化结构参数,传统 OLED 器件可以实现近极限性能。然而,不可否认,器件的构筑方式依然为平面化三明治结构,因此终究存在严重的光学损耗,阻碍了传统器件向更高的光提取效率突破。为了更有效地抑制器件中不同模式的光损耗强度,研究人员提出了大量有针对性的光提取手段,以增强光提取效率,实现高性能 OLED 器件。

3.1 增强基底光取出

通常认为,最简易可行的光提取方法就是增强基底出光。据上所述,陷于玻璃基底中的光总量相当于发射到空气中的光,因此,诸如基底粗糙化、微透镜等技术,都被应用在玻璃基底的外侧,以改进基底-空气界面特性,削弱基底由全反射带来的陷光性。

2002 年,Forrest S 等^[11]首先提出使用有序微透镜阵列来提取 OLED 器件的基底模式。其实验结果证明外量子效率从 9.5% 提升到 14.5%,增长了 1.5 倍。而后 2010 年, Tang J X 课题组^[12]继续对微透镜光提取技术进行研究,如图 2a 所示。他们以纳米压印技术制作不同形貌微透镜阵列,通过改变微透镜的几何构型,调控其覆盖面的填充因子,实现了比传统半球形微透镜更高的光提取效

率。实验证明,随着微透镜填充因子增加,器件的发光效率也相应提高。事实上,文献报道中的微透镜结构涵盖正方形,椭圆形,圆柱状,棱锥形及中空型等各式微透镜,并且都在 OLED 器件中取得一定应用。图 2b 所示在玻璃基底构建宏观玻璃半球以充分抑制基底模式。2013 年, Li N 等人^[4]在单层石墨烯基底上构建宏观(毫米级)玻璃半球,从而大大减小基底模式损耗,所制备的白光 OLED 在 $10000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 EQE 超过 42%, 在 $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时功率效率提升达到 $90 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。此外,在基底外侧涂布散射层,贴合纳米图案和纳米多孔膜,构建粗糙表面(图 2c),或者引入微米级金字塔结构阵列(图 2d),均可以不同程度地改善 OLED 器件光提取性能。

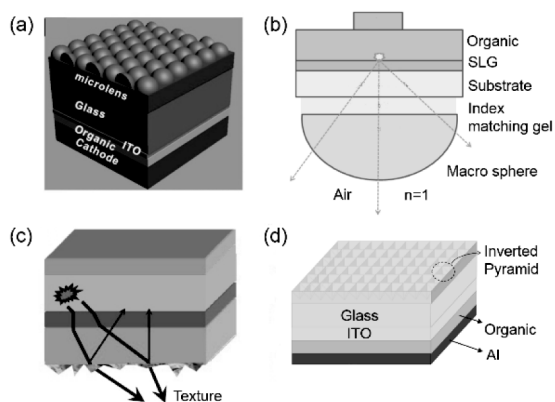


图 2 典型的 OLED 外部光调控结构示意图: (a) 微透镜阵列^[12], (b) 半球^[4], (c) 粗糙表面^[13], (d) 金字塔结构^[14]

Fig. 2 Schematic of external light manipulation structures for OLEDs: (a) micro-lens array^[12], (b) half sphere lens^[4], (c) textured surface^[13], (d) micro pyramid array^[14]

3.2 抑制 ITO 及有机层波导模式

为了提取 ITO 波导模式, Reineke S 等^[5]在 2009 年采用与 ITO 折射率相匹配的高折射率且具有光栅结构的玻璃基底制备白光 OLED 器件,并结合半球形光提取结构,极大地抑制了 ITO 波导模式和基底模式。实验所制作的白光器件超过了商业化荧光灯的性能(通常为 $90 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$),创下当时报道的效率记录。然而,一方面此高效率器件的光提取方法将带来生产成本的大幅提高。另一方面,考虑到光子晶体在 LED 领域的成功应用,那么它应该能提取被限制在 ITO 波导模式中的光,从而在 OLED 器件中发挥重要作用^[15]。图 3 所示为基于二维光子晶体结构的 OLED 器件结构示意图。在 ITO 与玻璃临界面采用高折射率材料 SiN_x 构建布拉格散射结构,利用光子晶体的表面光栅特性,或者晶格的多重散射特性,导出 ITO/有机层波导模式或者玻璃基底模式。显然,该方法使 ITO 电极和

玻璃基底之间基本不存在全反射,削弱了波导效应,甚至部分抑制了基底模式。

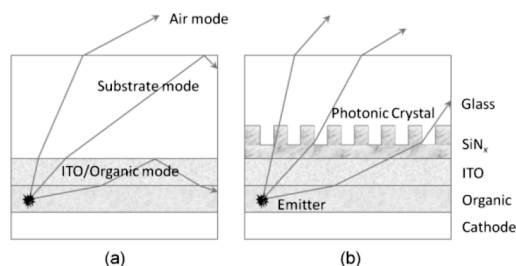


图 3 基于光子晶体提取波导模式的器件结构示意图^[5]

Fig. 3 OLED devices based on photonic crystals^[5]

为了提取有机层波导模式,在有机层与 ITO 电极界面引入图案化光学结构,可以有效调控其界面的光反射与全发射特性。2008 年, Forrest S 等^[9]在 ITO 和有机功能层之间引入低折射率网格,并理论计算出网格折射率和增强因子之间的关系,如图 4 所示。基于优化后的内置低折射率网格和外部微透镜阵列,所得到的白光 OLED 器件的外量子效率可达 55%,相比传统器件提升了约 2.3 倍。

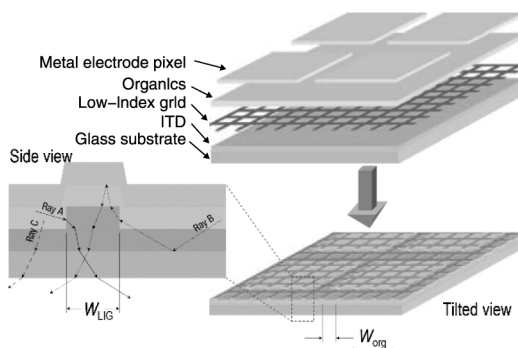


图 4 内置低折射率网格提取波导模式的器件结构示意图^[9]

Fig. 4 OLED devices with embedded low-index grids^[9]

3.3 减小表面等离子体损失

为了削弱表面等离子体损失,最显而易见的手段就是增加发光体和金属阴极之间的距离。因为表面等离子体耦合是通过光学近场发生的。然而有机层厚度的增加会带来更显著的波导作用。相比之下,由于非各向异性发射体分子存在平行于基板平面的过渡态占主导的时刻,使用这类发射体尤其可以减少表面等离子体的耦合。由于横向主导的偶极子仅分离出很小一部分能量转化为表面等离子体,因此光提取效率可以达到 1.5 倍。

图 5 所示为 Brutting W 等^[16]在模拟计算下,通过调控发光分子取向,控制 OLED 器件出光受各种光学

模式的影响程度。不难发现,分子取向的变化,对表面等离子体模式分布的影响最为显著。近几年,韩国 Kim J J 研究小组^[17-20]多次利用发光分子的偶极取向调控,在不采用额外光提取技术的前提下,开发出外量子效率超过 30% 理论极限的 OLED 器件。因此,分子的取向性调控将对提升 OLED 器件出光效率具有重要意义。

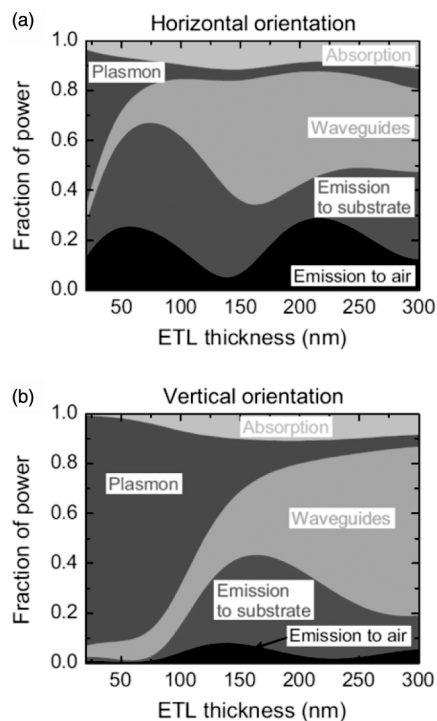


图5 分子取向对等离子体模式影响的理论计算^[16]

Fig. 5 Effect of molecular orientation on manipulating surface plasmon modes^[16]

尽管发射体分子取向研究显现出巨大优势,但现实表明目前应用于 OLED 器件中的众多发射体很少有优势取向。因此,依然有必要研究新方法将表面等离子体转化为可见光,从而较好地利用因表面等离子体而损失的光能。

重新利用表面等离子体的一个有前景的手段是引入周期性表面结构。其中一种方法是在 OLED 中引入一维或者二维布拉格光栅结构。这些光栅可以被复制到任何一层,比如 ITO 阳极、有机层或者聚合物层,还可以引入到光刻胶上,然后在图案化基底上制备 OLED 器件^[21-26]。2002 年, Gifford D K 等^[27]利用周期性布拉格光栅结构耦合金属电极表面等离子体基元,增强绿光 OLED 器件出光,如图 6 所示。

除此以外,近年来由贵金属纳米颗粒的光学近场增强,引起的局域表面等离子体增强效应有大量的研究报

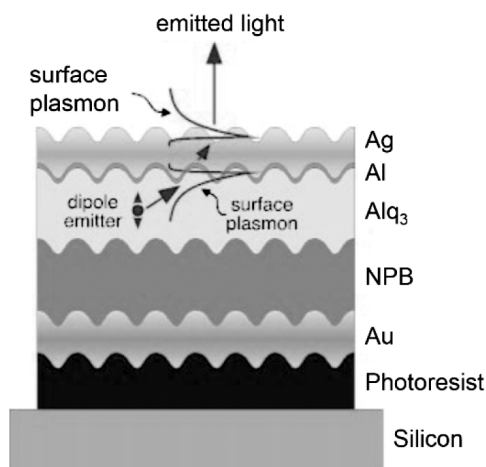


图6 基于周期性光栅结构提取金属电极表面等离子体基元模式^[27]

Fig. 6 Periodic gratings for extracting surface plasmon modes^[27]

道^[28-32]。Tang J X 课题组^[30]通过化学方法合成 Au 纳米颗粒,并将其与 PEDOT: PSS 水溶液共混,作为 OLED 器件的空穴传输层(如图 7 所示)。通过控制颗粒尺寸、掺杂浓度,优化器件结构。器件的电学性质以及光谱并未发生改变,但 Au 纳米颗粒的器件电流效率提高了 25%。实验结果表明,器件效率的提高是由于 Au 纳米颗粒的表面等离子体局域增强效应,使得激子辐射发光的速率加快,从而引起发光强度增强。而后,又利用溶液制程获得 MoO₃ 与 Au 纳米颗粒的混合物作为器件阳极界面修饰层^[33]。将该修饰层引入混合界面层,由于空穴注入改善,器件的驱动电压明显降低;纳米颗粒散射和表面等离子体增强效应提升了光耦合输出,从而器件发光效率增强了近 100%。进一步研究发现^[31],将纳米合金颗粒(如 Pt₃Co)引入到 ITO 电极表面,优化退火工艺,有效增强了合金颗粒局域场的光散射和表面等离子体效应,器件的发光效率获得了近两倍的提升。

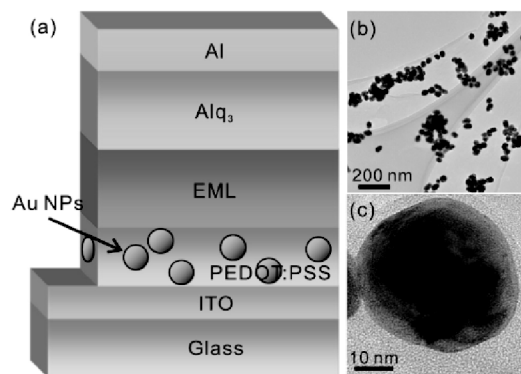


图7 基于 Au 纳米颗粒引起的表面等离子体增强电致发光^[30]

Fig. 7 Surface plasmon-enhanced electroluminescence caused by Au nanoparticles^[30]

3.4 微腔技术

研究表明,设计合理的谐振腔结构可以增强 OLED 器件的光提取效率^[34-36]。在 OLED 器件中,微腔共振单元就是在 ITO 与基底间引入多层介质膜构成的布拉格反射镜(DBR)结构,如图 8 所示。典型的微腔器件通常为反射镜/发光层/反射镜结构。一般引入 DBR 单元可以有效改善金属反射镜透射率不足的缺陷。目前已证明,微腔结构可重新分布光场,改变激子量子效率,并能够窄化光谱,增强正向发光。

1997 年, Jordan R H 等人^[37]证实基于微腔结构的 OLED 器件在特定角度的增强高达 4 倍。2006 年, Wu C C 等^[38]制作出基于双重微腔单元的叠层 OLED 器件,使发光亮度提升了 5 倍。进一步的优化,实现了 65% 的电流效率提升和 35% 的光提取效率增强,而且在 140° 观测角度下无明显色散。2010 年, Zhang H Z 等^[39]研究了不同金属材料作为反射镜对微腔效能的影响,为后续高效微腔单元的设计奠定了良好基础。

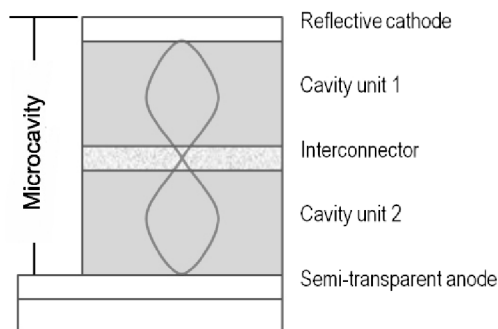


图 8 基于双重微腔单元的 OLED 器件结构示意图

Fig. 8 Resonant structure of typical microcavity for OLED devices

3.5 仿生微纳结构光调控技术

随着微纳加工技术的发展,在微纳结构材料中发现的新颖奇特的光电效应给有机光电器件研究带来了新一轮热潮,微纳结构也越来越多地被应用到 OLED 器件的光学调控中。近年来,蛾眼纳米结构独特的光学增透减反特性,引起了研究人员的广泛关注^[40-46]。而其具备的三个基本特征——宽波段减反、全视角减反及偏振不敏感特性,均契合 OLED 高效光调控结构的需要。凭借蛾眼纳米结构的特效, Tang J X 课题组^[47-51]开发了与 OLED 制备工艺兼容的软纳米压印技术,实现了高性能单色和白光器件,并阐释了光调控机制,为构筑新颖的器件结构提供了新方法。

基于蛾眼纳米光调控结构,通过模板转移压印的方法将纳米图案复制到器件的功能界面上。采用商业化的 ITO 玻璃基板,在其上下表面各引入纳米结构,并以此

作为衬底,构筑 OLED 器件。图 9a 所示为本课题组设计并提出的一种基于仿生纳米光调控结构的新颖图案化 OLED 器件结构。为了实现如图 9a 所示的纳米图案化器件结构,我们采取热辅助软纳米压印技术,在 ITO 表面上制作 PEDOT:PSS 倒置纳米蛾眼阵列(图 9b);采取紫外辅助软纳米压印技术,在玻璃表面上制作紫外树脂正置纳米蛾眼阵列结构(图 9c)。

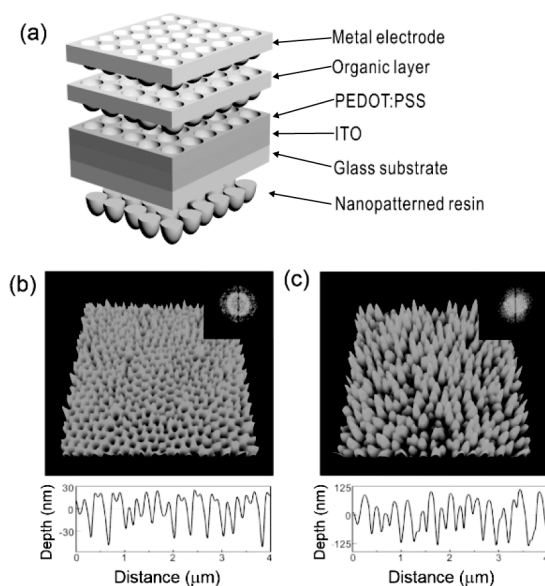


图 9 (a) 仿生纳米结构 OLED 器件结构示意图, (b) 倒置与 (c) 正置蛾眼结构形貌图^[47,51]

Fig. 9 Light manipulation with biomimetic moth-eye nanostructures:

(a) device architecture, (b) concave structures,

(c) convex structures^[47,51]

仿生纳米蛾眼结构的成功引入,实现了光子在纳米尺度的高效操控,所制备的磷光绿光叠层 OLED 器件^[47]外量子效率由 54.3% 提高到 119.7%,提升因子达 2.20,在 1000 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 下电流效率高达 366 $\text{cd} \cdot \text{A}^{-1}$,是目前文献报道中绿光 OLED 效率的最高纪录。区别于传统周期性光栅结构,该技术对光波长具有普适性,而且不具有出光角度依赖性,适用于大尺寸半导体照明器件的制备工艺^[52-53]。与此同时,结合该纳米压印技术,设计了全磷光白光 OLED 器件结构^[51],成功实现了高性能白光 OLED 器件的技术攻关。器件具体性能指标如下:在 1 000 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的亮度下,其发光效率达到 123.4 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$,外量子效率达到 54.6%;而且该 OLED 器件具有较好的稳定性,在高亮度 5000 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 下,其发光效率依旧能够保值在 106.5 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$,是目前文献报道中白光 OLED 的最高效率之一。后续研究发现,正置与倒置蛾眼结构的光提取效率相当,但是倒置蛾眼结构的耐刮擦性能明显增强,可以为特定的需要提供一种替代选择^[48]。

为了克服传统ITO/PET光提取效率低与弯折性差的固有缺陷,本课题组综合运用光刻、纳米压印技术和刮涂技术制备了微纳图形化嵌入式Ag网栅电极,并以此为阳极制备了非ITO柔性OLED器件^[54-55]。在此基础上,进一步引入微纳界面光调控技术,在OLED器件内部引入仿生纳米蛾眼结构,外部采用微透镜阵列,获得了高性能绿光和白光OLED器件。在 $1000\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 下,绿光柔性OLED的效率达到 $120\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$,电流效率达 $140\text{ cd}\cdot\text{A}^{-1}$;白光柔性OLED器件功效达到 $106\text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$,外量子效率超过49%,是目前为止柔性非ITO的OLED器件最高效率,并且表现出了良好的抗弯折性能。

4 结 语

OLED器件的光提取效率显然取决于多种光损耗机制的影响程度。当前,只有一小部分研究成果能有效地抑制损耗,并且具有实用性。例如,基底模式陷光可以在很大程度上通过外部光调控结构补偿。对于其他损耗途径,更多的是概念验证,尚需要与大规模生产全面兼容的策略,以实现低成本、高产出的目标。另外,大多数光提取方法存在窄波段响应或角度敏感性等缺陷,例如一维光栅结构能够耦合表面等离子体模式,但是往往只是针对特定波长有效,不具有普适性。光调控机理研究依然需要深入。未来应该要加深理解表面等离子体模式耦合,以探寻高效途径消除其影响。此外,还应深化对分子取向效应的研究,以期通过调控发光分子取向来实现高效光取出。目前,众多光调控技术并存,但是多数方法都需要过于精妙的设计和复杂的制程,而不能以附加的方式(如贴膜技术)实现光调控。因此,考虑到器件结构设计的自由度,我们需要探寻一种不影响器件稳定性和色彩品质,还能与柔性基板兼容的光调控技术,以实现尽可能高的光提取效率。其中,纳米压印技术构筑图案化器件,无疑成为一种具有竞争力的手段。

参考文献 References

- [1] Kido J, Kimura M, Nagai K. *Science*[J], 1995, 267: 1332.
- [2] Shen Z. *Science*[J], 1997, 276: 2009.
- [3] D'Andrade B W, Forrest S R. *Advanced Materials*[J], 2004, 16: 1585.
- [4] Li N, Oida S, Tulevski G S, et al. *Nature Communications*[J], 2013, 4: 2294.
- [5] Reineke S, Lindner F, Schwartz G, et al. *Nature*[J], 2009, 459: 234.
- [6] Baldo M A, O'Brien D F, You Y, et al. *Nature*[J], 1998, 395: 151.
- [7] Adachi C, Baldo M A, Thompson M E, et al. *Journal of Applied Physics*[J], 2001, 90: 5048.
- [8] Uoyama H, Goushi K, Shizu K, et al. *Nature*[J], 2012, 492: 234.
- [9] Sun Y, Forrest S R. *Nature Photonics*[J], 2008, 2: 483.
- [10] Hong K, Lee J L. *Electronic Materials Letters*[J], 2011, 7: 77.
- [11] Möller S, Forrest S. *Journal of Applied Physics*[J], 2002, 91: 3324.
- [12] Yang J P, Bao Q Y, Xu Z Q, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2010, 97: 223303.
- [13] Moon S, Takezoe H. *Effect of Photonic Structures in Organic Light-Emitting Diodes-Light Extraction and Polarization Characteristics*[M]. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [14] Sun L, Zhu W, Tang M, et al. *Physica Status Solidi A*[J], 2015, 212: 646.
- [15] Do Y, Kim Y C, Song Y W, et al. *Advanced Materials*[J], 2003, 15: 1214.
- [16] Brütting W, Frischeisen J, Schmidt T D, et al. *Physica Status Solidi A*[J], 2013, 210: 44.
- [17] Kim S Y, Jeong W I, Mayr C, et al. *Advanced Functional Materials*[J], 2013, 23: 3896.
- [18] Kim K H, Moon C K, Lee J H, et al. *Advanced Materials*[J], 2014, 26: 3844.
- [19] Shin H, Lee S, Kim K H, et al. *Advanced Materials*[J], 2014, 26: 4730.
- [20] Kim K H, Lee S, Moon C K, et al. *Nature Communications*[J], 2014, 5: 4769.
- [21] Ziebarth J M, Saafir A K, Fan S, et al. *Advanced Functional Materials*[J], 2004, 14: 451.
- [22] Hobson P A, Wedge S, Wasey J A, et al. *Advanced Materials*[J], 2002, 14: 1393.
- [23] Bai Y, Feng J, Liu Y F, et al. *Organic Electronics*[J], 2011, 12: 1927.
- [24] Jin Y, Feng J, Zhang X L, et al. *Advanced Materials*[J], 2012, 24: 1187.
- [25] Bi Y G, Feng J, Li Y F, et al. *Advanced Materials*[J], 2013, 25: 6969.
- [26] Koo W H, Jeong S M, Araoka F, et al. *Nature Photonics*[J], 2010, 4: 222.
- [27] Gifford D K, Hall D G. *Applied Physics Letters*[J], 2002, 81: 4315.
- [28] Lozano G, Louwers D J, Rodríguez S R, et al. *Light: Science & Applications*[J], 2013, 2: e66.
- [29] Cheng P P, Ma G F, Li J, et al. *Journal of Materials Chemistry*[J], 2012, 22: 22781.
- [30] Xiao Y, Yang J P, Cheng P P, et al. *Applied Physics Letters*[J], 2012, 100: 013308.
- [31] Gu Y, Zhang D D, Ou Q D, et al. *Journal of Materials Chemistry C*[J], 2013, 1: 4319.

- [32] Choi H, Ko S J, Choi Y, *et al.* *Nature Photonics*[J], 2013, 7: 732.
- [33] Zhang D D, Wang R, Ma Y Y, *et al.* *Organic Electronics*[J], 2014, 15: 961.
- [34] Xiang C, Koo W, So F, *et al.* *Light: Science & Applications* [J], 2013, 2: e74.
- [35] Kang H, Jung S, Jeong S, *et al.* *Nature Communications*[J], 2015, 6: 6503.
- [36] Bulovic V, Khalfin V B, Gu G, *et al.* *Physical Review B*[J], 1998, 58: 3730.
- [37] Jordan R, Dodabalapur A, Slusher R. *Applied Physics Letters* [J], 1996, 69: 1997.
- [38] Cho T Y, Lin C L, Wu C C. *Applied Physics Letters*[J], 2006, 88: 111106.
- [39] Ji W, Zhang L, Tianyu Z, *et al.* *Organic Electronics*[J], 2010, 11: 202.
- [40] Vukusic P, Sambles J R. *Nature*[J], 2003, 424: 852.
- [41] Huang Y F, Chattopadhyay S, Jen Y J, *et al.* *Nature Nanotechnology* [J], 2007, 2: 770.
- [42] Parker A R, Townley H E. *Nature Nanotechnology*[J], 2007, 2: 347.
- [43] Raut H K, Ganesh V A, Nair A S, *et al.* *Energy & Environmental Science*[J], 2011, 4: 3779.
- [44] Raut H K, Dinachali S S, He A Y, *et al.* *Energy & Environmental Science*[J], 2013, 6: 1929.
- [45] Ko D H, Tumbleston J R, Henderson K J, *et al.* *Soft Matter*[J], 2011, 7: 6404.
- [46] Chen J D, Zhou L, Ou Q D, *et al.* *Advanced Energy Materials* [J], 2014, 4, 1301777.
- [47] Zhou L, Ou Q D, Chen J D, *et al.* *Scientific Reports*[J], 2014, 4: 4040.
- [48] Zhou L, Ou Q D, Li Y Q, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2015, 25: 2660.
- [49] Chen J D, Cui C, Li Y Q, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2015, 27: 1035.
- [50] Zhou L, Jiang X, Li Y, *et al.* *ACS Applied Materials&Interfaces* [J], 2014, 6: 18139.
- [51] Ou Q D, Zhou L, Li Y Q, *et al.* *Advanced Functional Materials* [J], 2014, 24: 7249.
- [52] Wang R, Xu L H, Li Y Q, *et al.* *Advanced Optical Materials*[J], 2015, 3: 203.
- [53] Ou Q D, Zhou L, Li Y Q, *et al.* *Advanced Optical Materials*[J], 2015, 3: 87.
- [54] Zhou L, Xiang H Y, Shen S, *et al.* *ACS Nano* [J], 2014, 8: 12796.
- [55] Xiang H Y, Li Y Q, Zhou L, *et al.* *ACS Nano* [J], 2015, 9: 7553.

(本文为本刊约稿, 编辑 吴琛)