

前沿领域综述

有机发光二极管光取出技术研究进展*

杨洋 陈淑芬 谢军 陈春燕 邵茗 郭旭 黄维†

(南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院, 有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地, 南京 210046)

(2010年5月26日收到; 2010年8月5日收到修改稿)

有机发光二极管(OLED)在通信、信息、显示和照明等领域均显现出巨大的商业应用前景,十几年来一直是光电信息领域的研究热点之一.但是,OLED的外量子效率远低于内量子效率,极大程度地制约了其发展和应用.本文主要介绍了多种有效提高器件效率的光取出技术,对微透镜、光子晶体结构、纳米图案和纳米多孔膜以及微腔技术等多种OLED修饰方法进行了回顾和讨论.在此基础上,对一些光取出技术的研究做了展望.

关键词: 有机发光二极管, 光取出技术, 外量子效率

PACS: 78.66.Qn, 78.60.Fi, 78.20.Bh, 42.25.Gy

1. 引言

有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)因其重量轻、成本低、视角宽、响应速度快、主动发光和能实现全色显示等优点,备受科学界和产业界的重视.可以说,OLED具备了照明和信息显示器件制造所要求的几乎所有优异特征,被业界公认为是最理想和最具发展前景的下一代照明显示技术之一^[1-6].由于OLED潜在的巨大应用价值,如何制备高效率的器件越来越吸引人们的广泛关注,同时,人们对OLED的性能要求也随之提高^[7-12].但是,由于OLED的外量子效率与内量子效率之间存在巨大差距,这极大地制约了OLED的发展.因此如何提高OLED的光取出效率成为了研究的热点.

2. 光取出效率

OLED的发光原理是,当施加正向直流电压于两电极时,电子和空穴分别从阴极和阳极注入有机

薄膜,在电场作用下,载流子在有机半导体材料中相向迁移,相遇后产生激子,激子在发光区域复合发光.发出的光随机向各个方向射出,在传播过程由于全反射(total internal reflection, TIR)的作用,形成了外部模式(光从基底表面射出)、基底波导模式和ITO/有机层波导模式^[13-16].图1是典型的OLED器件以及光波导示意图.根据经典的射线光学理论,由于玻璃基底以及ITO/有机材料在折射率等方面的差异,导致产生的光只有少部分能从基底出射,而其余的大部分光或以波导模式陷于玻璃基底和器件中,或从OLED器件的边缘出射.据理论推导,从基底出射的、陷于基底中的及陷于ITO/有机层中的各部分光所占比例依次可由以下公式计算得到^[16]:

$$\eta_{\text{ep,ext}} \approx \frac{1}{2n_{\text{org}}^2}, \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ep,subs}} \approx \cos\theta_{\text{org,c1}} - \cos\theta_{\text{org,c2}}, \quad (2)$$

$$\eta_{\text{ep,org}} \approx \cos\theta_{\text{org,c2}}, \quad (3)$$

其中, n_{org} 为有机材料的折射率, $\theta_{\text{org,c1}}$, $\theta_{\text{org,c2}}$ 分别为有机层-空气界面及有机层-基底界面之间的临界角.根据经典射线光学理论计算^[16-18],传统经典OLED器

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB930600),国家自然科学基金(批准号:60907047, 20774043, 20704023, 60706017, 60977024, 60876010),教育部重点项目(批准号:104246, 208050, 707032),国家教育部高等学校骨干教师基金(批准号:20093223120003),江苏省自然科学基金(批准号:BK2009423, BK2008053)和江苏省高校自然科学基金基础研究项目(批准号:08KJB510013, SJ209003, 07KJB150082, TJ209035, TJ207035)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: iamwhuang@njupt.edu.cn

件中外模式、基底波导模式以及 ITO/有机层波导模式的比例分别为 20% ,30% 和 50% . 从基底表面发出的光(外部模式)仅有 20% ,这远远无法满足照明以及显示应用的需要. 从计算结果可以看出,激子复合产生的光大部分无法从基底出射成了限制 OLED 发光效率最主要的因素. 因此许多研究者将关注焦点转移到探索提高光取出效率的方法上来.

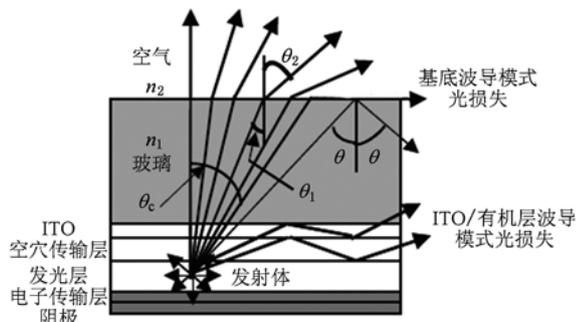


图1 波导模式光损失示意图

3. 提高光取出效率的方法

现已经有多种器件修饰技术可以提高光取

出效率,总结起来可以分为以下三种:提高基底光取出技术;抑制 ITO/有机层波导模式技术;微腔共振技术(OLED 器件光取出一侧设置一个半透明的金属膜). 接下来,本文从上述三个角度分别举例探讨提高光取出效率的方式及其产生的效果.

3.1. 提高基底光取出技术

提高光取出效率最简单的办法就是增加基底取光. 由于器件内部构造以及界面反射的原因,导致基底和外部模式得到的光最多只有 50% . 而外部模式只有 20% ,大部分被限制在基底模式中,因此要提高基底传播方式的光取出效率只能对基底-空气临界面进行加工.

3.1.1. 微透镜技术

在基底背面覆盖有序或无序的微透镜阵列可以提高光取出效率^[18-29]. 微透镜将原本入射角大于临界角的射线角度缩小,减少了产生全反射,使得之前陷于基底中的光便可以射出. 图 2 (a) 为器件采用有序微透镜阵列取出基底波导模式光示意图.

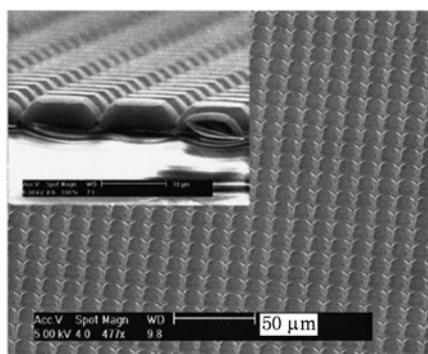
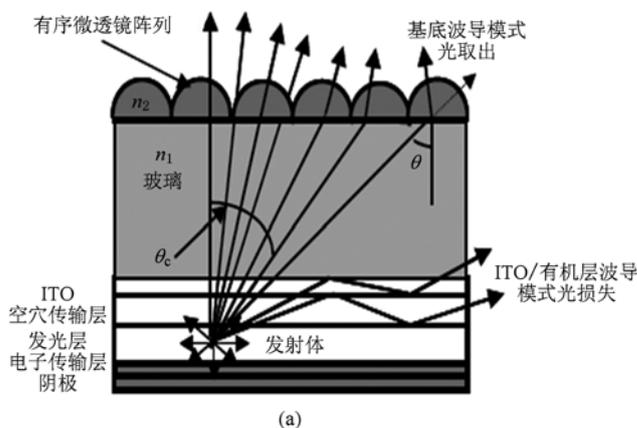


图2 (a) 采用微透镜取出基底波导模式光示意图;(b) PDMS 微透镜阵列原子力显微镜图

Moller 等人^[21] 利用直径为 10 μm 的聚二甲硅氧烷 (polymer dimethyl silicone, PDMS) 微透镜(如图 2(b) 所示), 实验结果证明外量子效率提高了 1.5 倍(由 9.5% 提高到 14.5%), 而且明显改善了视角. Forrest 等^[22] 在插入低折射率格子的器件中, 采用微透镜技术, 光取出效率提高了 3.4 ± 0.2 倍. Wei 等人^[23] 证明了一种简单有效的估算微透镜 OLED 流明效率的方法, 结果发现光取出效率增强

了 56% . 他们还研究了正方形微透镜的基长同流明效率增强之间的关系, 结果发现微透镜 OLED 的流明效率随着微透镜阵列长度的减少而呈线性增长. 随后, 他们证明了随着微透镜填充因子的增加, 器件的流明电流效率和流明功率效率呈线性增长, 但是同时器件的光谱半高宽和色坐标呈线性降低^[24].

Lim 等^[25,26] 证明了无序的微透镜可以提高光取出效率, 并发现在微腔 OLED 中, 不仅可以提高效

率,而且还可以保持宽视角范围内色稳定性. 采用优化后的微透镜,在不影响器件的电学特性下,器件光取出效率理论上可以提高 80%,并在实验中器件效率提高了 70%. 采用微透镜阵列后,基底模式中光波导损失得到有效的抑制. Wei 等人^[27,28]研究了微透镜阵列对 OLED 平板显示性能的影响,发现微透镜阵列不仅能大幅度提高取出效率,而且还可以在宽视角范围内保持器件色坐标和颜色的稳定. 随后 Lee 等^[29]采用中空微透镜,证明不仅可以大幅度提高光取出效率和功率效率,而且相对于传统微透镜,采用中空微透镜的器件光谱的红移更小.

若要将微透镜技术应用于显示领域,必须将透镜缩小且阵列化. 但此时与基底的对位变得相当重要,而且基底不能太厚 ($< 0.5\text{mm}$),否则相邻像素会相互干扰. 日本斯坦雷电气公司(Stanley Electric)在白色有机电致发光(EL)面板表面采用突起间距为 $20\ \mu\text{m}$ 、厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 的金字塔状透镜,开发出正面亮度高达 $5000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 白色有机 EL 面板,面板的正面亮度相对于该公司先前产品提高了 1.7 倍. 由于生产成本较高,该方法尚未应用于量产. 目前,Forrest 和美国通用显示技术(universal display corporation, UDC)公司利用该技术携手开发亮度更高的白光 OLED,以期降低生产成本.

3.1.2. 涂布散射层

该技术借助散射膜回收利用陷于基底波导模式中的光,通过改变光子随机轨道使得在基底-空气临界面发生全反射的光可以改变方向重新从基底射出,从而提高总的光取出效率^[30-35].

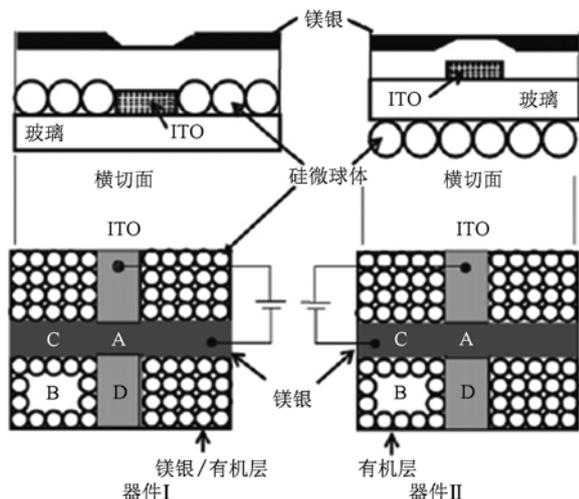


图 3 利用 Si 微球体作为散射介质 OLED 器件示意图

较完整的散射层设计理论由 Shiang 和 Duggal 等^[30]提出. Shiang 等^[31]将高折射率的 ZrO_2 小球 ($d = 0.6\ \mu\text{m}$),以不同的浓度比混入厚度为数毫米的 PDMS ($n = 1.42$) 薄膜中,最后实验结果表明取出效率增加了约 40%,相当于基底模式中的 70% 的光被取出. 随后,Paetzold 等^[33]证明了光取出效率的增加主要取决于区域中散射离子的绝对数目. 在散射层部分高浓度散射点掺杂能有效的提升整体出光率,并改善器件的视角特性. 相同的原理, Tsutsui 等^[34]用直径 550nm 的 Si 微球体有序混合单层做成散射层加到传统器件上. 由于散射层中六角 Si 微球体作为二维衍射格子,因此具有很强的散射作用. Si 微球体不仅贴附在玻璃基底背面而且包含在器件内部,如图 3 所示,有序 Si 微球体阵列作为强散射中心,使陷于基底与 ITO/有机层波导模式中的光可以较为容易地提取出来,因此光取出效率有了很大的提高,同样由于散射,会不可避免的造成发出的光波峰分裂等现象. Gong 等^[35]用稳定的纳米自聚合 2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-菲咯啉薄膜作为散射层,光取出效率最高可以提高 2.7 倍.

虽然会造成波峰分裂等不良现象,但是由于涂布散射层技术具有成本低,制作简单以及不破坏器件电学特性等优势,因此在照明市场具有很大的应用前景.

3.1.3. 形状化基底技术

形状化基底技术是一种简单有效的可以把基底波导模式光取出的技术. 这种技术在 1999 年由 Lu 等^[36]提出,目前已有多种形状化基底技术应用到器件中^[37-39].

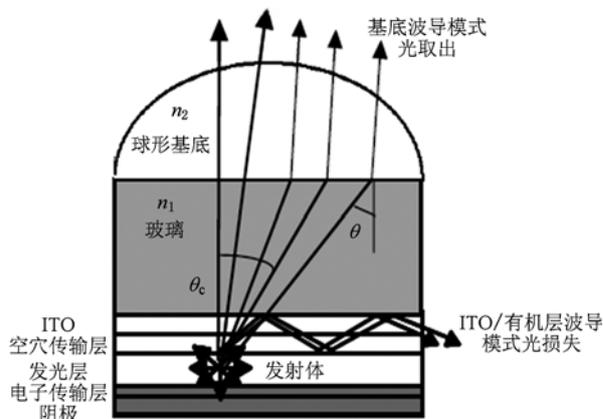


图 4 球形基底器件基底波导模式光取出示意图

Gu 等^[38]利用光波导原理设计了一个高为 2.2

mm, 顶部宽度为 3 mm, 边缘倾角为 34° 的圆锥型玻璃基底, 以此基底制作的器件的外量子效率比用平板玻璃为基底的器件增加了近 2 倍. 实验结果证明这种结构不仅能提高量子效率, 降低能耗, 而且还可以延长器件寿命. 在另一项技术中, 通过在玻璃基底的背面形成球形图案也可以提高光取出效率^[39]. 图 4 为采用球形背面基底后基底波导模式光取出示意图. 球形基底在这里既作为折射率匹配材料又作为透镜. 由于这些修饰, 陷于基底波导模式中的光从基底中被取出来. 据报道 OLED 的正面发射强度提高了 9.6 倍, 总的发光强度提高了 3 倍^[39].

3.1.4. 纳米图案和纳米多孔膜

Kwok 等^[40]采用简单的喷砂技术, 把玻璃基底背面制成无序纳米图案, 光取出效率提高了 20%. 而传统光刻、干涉光刻及电子束光刻等多种纳米图案技术也已被应用到 OLED 来提高光取出效率^[41-45]. Lee 等人^[41]利用两步全息光刻以及反应离子刻蚀技术制备二维 SiO_2 纳米孔, 并将其应用到传统典型 OLED 器件上, 取出效率有了很大提高. 周期性金纳米线阵列被证明也可以提高有效的提高光取出效率, 相对于传统器件提高了 2.2 倍^[44]. 在玻璃基底上刻蚀二维光子晶体, 同样可以提高效率^[45], 因为布拉格散射, 光取出效率增强了 50%.

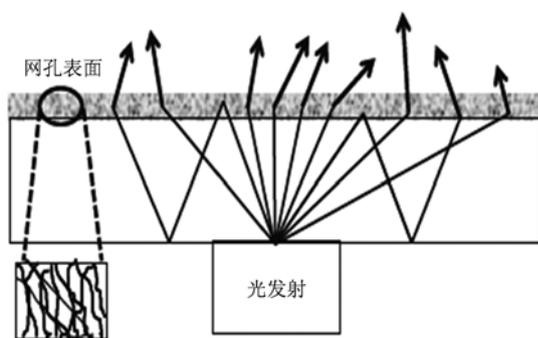


图 5 采用网孔表面器件光取出示意图

纳米多孔膜技术是利用散射原理, 由光进入散射层后经过多次散射后出光. Cheng 等人^[46]利用此技术以自组装多孔渗水膜为基底制作了一个表面网孔结构 PDMS 薄膜, 如图 5 所示. 在实验中为了测量实际器件效率, 设计了两个 OLED, 一个为传统 OLED, 另外一个通过折射率为 1.4 的环氧膜和网孔状 PDMS 膜结合在一起, 其中 OLED 直径 0.5 cm, 膜厚 1 mm. 通过实验对比, 光取出效率大约增强 $(46.09 \pm 8.85)\%$. 实验结果还表明, 光波长对取出

效率的影响比较小, 这样比较利于维持发光器件的颜色光谱. 此外, 由于散射的原因, 视角也得到明显改善.

虽然纳米多孔膜结构可以提高光取出效率, 但自身也存在一些不足. 例如, 由于以多孔有序阳极氧化铝膜 (anodic aluminium oxide, AAO) 为模板制作的纳米线只有 μm 量级, 在制作过程中很容易变成无序状态. 此外, 在器件表面进行网孔加工, 不可避免造成器件抗衰性较差, 影响器件稳定性.

3.2. 抑制 ITO/有机层波导模式技术

通过理论计算, 超过 50% 的光被限制在 ITO/有机层波导模式中, 是造成光取出效率低下的主要原因. 因此如何导出限制在 ITO/有机层波导模式中的光成为提高取出效率的有效手段.

3.2.1. 插入低折射率层

在 ITO 层和玻璃基底之间插入一低折射率层, 由于低折射率物质-ITO 表面折射率改变, 使得原本陷于 ITO/有机层中的光可以发射出去^[22, 47-50].

Tsutsui 等人^[48]在 ITO 和玻璃基底之间插入一层 $10 \mu\text{m}$ 的低折射率硅气凝胶 ($N \sim 1.01-1.10$), 如图 6(a) 所示. 实验结果发现在硅气凝胶层中没有波导效应, 而且由于硅气凝胶-ITO 表面折射率改变, 光由低折射率的硅气凝胶层射入高折射率的玻璃基底时, 也不会存在全反射, 这样原本陷于 ITO/有机层波导模式的光可以发射出去, 从而光取出效率增加了 1.8 倍. Forrest 等人^[22]在 ITO 和玻璃基底之间插入低折射率方格, 并得出了方格折射率和增强因子之间的关系, 如图 6(b) 所示. 随后他们采用优化后的低折射率格子, 外量子效率可达 55% (假设内量子效率为 100%), 但是会造成一定的电致光谱变化^[47].

除了硅气凝胶外, Peng 等人^[50]利用阳极氧化技术在玻璃基底上长出周期性管状的氧化铝. 由于氧化铝和空气的混合造成低折射率的多孔性 AAO 膜, 与硅气凝胶相似, 具有低折射率的性质, 总光取出效率增加约 50%. 除此之外, 因为多孔性 AAO 膜具备散射性质, 故器件的视角也明显改善. 采用多孔性 AAO 膜可以保持器件外表平滑, 有利于器件稳定性. 但由于 AAO 膜上的直孔很容易恶化而变得无序, 故其光取出效率增强效果不如硅气凝胶.

3.2.2. 波纹加工器件层

该技术主要是通过光刻等技术等把器件 ITO/

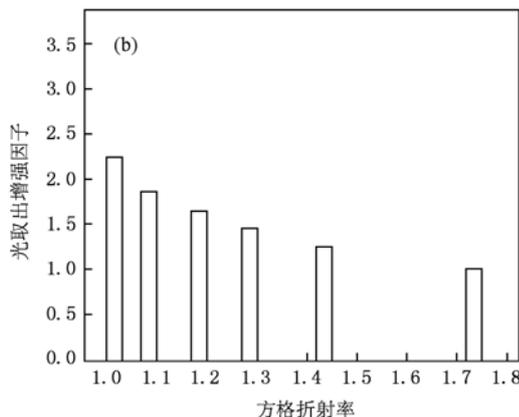
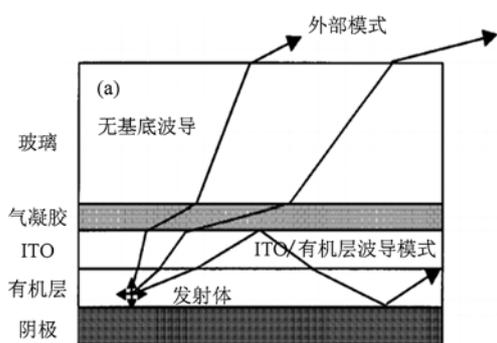


图6 (a)插入气凝胶器件光取出示意图;(b)方格折射率对光取出增强因子的影响

有机区域制成波纹形状,如图7所示.通过分布式反馈格子,也就是改变布拉格散射改变波导模式,来提高光取出效率^[51-57].

Matterson 等人^[53]利用波纹加工技术把光取出效率提高了一倍.同理, Giannattasio 等人^[54]验证了此方法确实可以提高发光效率,并得出了采用不等角临界面结构可以提高光取出效率的结论.2010年 Takezoe 等人^[55]在前人基础上通过波纹加工技术,器件正面发光强度提高了近3倍.

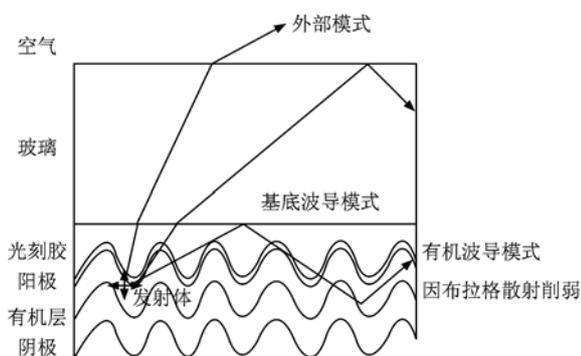


图7 波纹加工器件光取出示意图

波纹加工技术除了可以提高发光效率外,还可以通过改变波纹加工分布式反馈格子的长度对发射光谱进行修饰,可以对宽光谱范围传播的光进行取出增强^[51].此外该技术还有另一优势:柔韧性.采用石墨烯等透明电极的柔性器件已经引起了专家学者们的广泛兴趣^[56].但是波纹加工技术会造成图像模糊,因而不适宜应用到显示器件中^[57].而且相对来说波纹加工技术加工成本较高,并在一定程度上会影响器件的稳定性.

3.2.3. 光子晶体

光子晶体是一种微型光学器件,利用光子晶体已成功增强了LED的效率^[58,59].同理,光子晶体也可以应用到OLED器件中^[60-70].光子晶体器件提取出限制在ITO/有机层模式中的光的示意图如图8所示.利用光子晶体的布拉格散射来提高OLED的光取出效率^[61-71].该技术主要包括以下两种机理:其一,由于光子晶体晶格的多重散射产生光子禁带,光子禁带的存在限制了频率落在其中的横向模式在半导体中的传播,致使出射光只能沿纵向辐射出来;其二,将光子晶体作为表面光栅使用,将波导光提取出来.

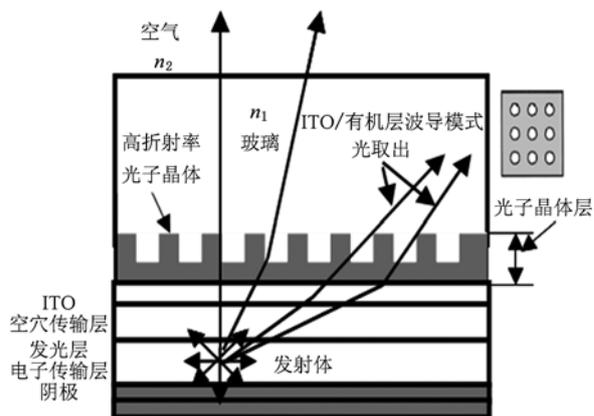


图8 利用二维光子晶体取出ITO/有机波导模式光示意图

Do 等人^[65]利用 SiO_2 ($n = 1.48$) 与 SiN_x ($n = 1.95$) 在基底和ITO之间制作二维的光子晶体,光取出效率提高了38%,而且驱动电压降低(作者解释由于 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 造成表面粗糙,故接触面积大,电荷更容易注入造成光电性能的改善).接着2005年

Do^[66]采用 $n = 1.45$ 的 SiO_2 和 $n = 1.95$ 的 Si_xN_y 材料制作光子晶体,在晶格常数为 350 nm,直径为 133 nm,深度为 350 nm 的情况下,光取出效率提高了 60%. 2006 年,Go 等^[67]在 ITO 和光子晶体之间插入一 SiN_x 膜,由于微腔效应,相对于传统器件,光取出效率提高了 85%. 2009 年 Li 等人^[69]采用一维光子晶体作为顶发射器件阳极,相对传统底发射器件提高了 2 倍. 2010 年 Pate 等人^[70]证明了通过调整光子晶体的位置可以更好的提高光取出效率.

光子晶体的制作方法较多,遗憾的是目前由于实验条件难以控制和成本高等还无法做到量产. 由于刻蚀深度和占空比也会影响器件的取出效率,故光子晶体在提高光取出效率上仍有很大的发展空间. 2009 年 Philips Lumileds 的科学家宣布制造出号称至今光取出效率最高的光子晶体发光二极管,其光提取率高达 73%,相信在不久将来光子晶体技术在增强 OLED 效率上会有更大的突破.

3.3. 微腔共振技术

已有很多研究小组证明了在 OLED 器件中加入合理设计的微腔可以提高光取出效率^[71-95]. 事实上,微腔类似于激光器的谐振腔,相对于 OLED,就是在玻璃基底和 ITO 之间多了一个由多层介质膜构成的布拉格反射镜(DBR).

一个典型的微腔器件一般为反射镜/发光物质/反射镜,由于金属镜的透射率普遍不高(最高不过 96%),因此光学微腔一般采用 DBR 结构(其反射率可达 99.9%). 存在微腔时,由于场的重新分布以及腔对分子激发态传输的影响,改变了激子的寿命以及量子效率,导致了正面发光的增强. 目前已证明微腔可以窄化光谱,提高发光强度^[78-84]. 在顶发射器件中,由于光不是从基底侧射出,因此没有基底波导效应,而且顶发射器件中微腔效应比较明显,所以微腔共振技术目前大部分应用在顶发射器件中.

Jordan 等人^[85]采用微腔结构,证明微共振腔器件在单一角度的增强可以达到 4 倍,积分所有角度后的净增强接近 2 倍. Zhang 等人^[86]讨论了采用不同金属材料作为电极对微腔效应的影响,为后续微腔设计提供了很大的帮助. Leo 等^[87]按照 P-I-N 掺杂概念设计微腔器件,效率提高了 2.3 倍. Cho 等人^[88]设计了两微腔串联器件(如图 9 所示),器件亮度提高了 5 倍. 对微腔优化后,电流效率提高了

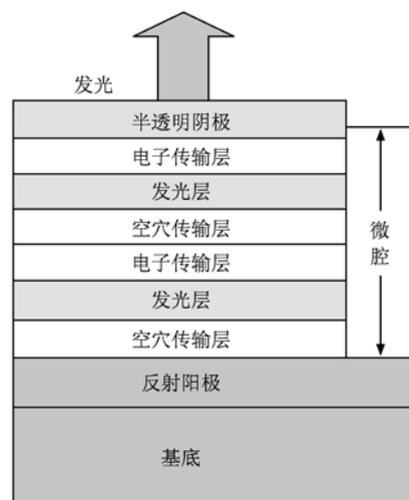


图9 两微腔单元串联的 OLED 示意图

65%,取出效率提高了 35%,在 140° 视角内无颜色失真. 本课题组 Chen 等人^[90]分别使用金属 Sm/Ag 和有机层 2, 9-二甲基-4, 7-二苯基-9, 10-菲咯啉(BCP)作为半透明阴极和光输出耦合层制作了顶发射器件,通过调整微腔效应,光取出效率提高了 1.6 倍,并证明解释了器件的最佳亮度、效率等性能并非在阴极获得最高透射率处实现,而是位于最高和最低透射率之间的某个位置处. 2009 年 Wu 等^[91]在以 ZnS 作为输出耦合层的基础上,添加一扩散层,相对传统底发射器件效率调高了 2.1 倍. Lim 等人^[95]把微腔共振和微透镜技术结合起来,不仅光取出效率提高了 1.8 倍,而且电学特性有了很大提高,为后续多种光取出技术兼容到一个器件中打下了基础.

微腔效应可以使 OLED 的光强峰值得到很大的提高,并能使其光谱宽度得到较大程度的窄化,从而使整个器件的外量子效率得到较大程度的提高,并可以得到单色性很好的发光. 这正是微腔 OLED 器件得到业界广泛关注的原因所在. 2007 年 12 月份上市的索尼(Sony)公司的 11 英寸 OLED“XEL-1”电视即采用顶发射 + 彩色滤光片 + 微腔结构. 这款产品的上市也开启了 OLED 电视的新纪元,成为有机半导体工业发展的强大推动力,迈出了在提出概念 20 年之后走向产业化的坚实的第一步.

4. 总结和展望

关于多种 OLED 光取出技术的对比研究如表 1 所示. 从表 1 中可以看出每种技术都有自己的优点

和缺点.在实际应用中,我们可以根据具体情况,对 OLED 器件结构选择不同的修饰技术.例如,想制作小面积显示器件,在器件内部采用光子晶体,外部采用微透镜技术会是一个很好的选择.在另一方面,在大面积显示及通用照明应用中,玻璃基底采用纳米多孔膜技术并在内部插入低折射率物质是一种有效且成本较低的技术,而且这些技术中光波长对取出效率的影响比较小,有利于保持彩色光谱的稳定性.为了使 OLED 器件能达到最大光取出效

率,器件内部及外部修饰技术需一起应用来取出陷于基底及 ITO/有机层波导模式中的光.更进一步讲,光取出技术必须高效率,低成本且要具有商业可行性.

本文就目前提高光取出效率的方法进行了归纳,并对光的损失机理进行了较详细的解释.文中提到的方法目前大部分都处在实验室研究阶段,且不断有新的实验结果出现.笔者看来,今后的主要研究方向可能集中在以下几个方面:

表1 多种 OLED 光取出技术对比研究

序号	应用的光取出技术	外量子效率增强效果	评论	参考文献
1	微透镜技术	1.5—1.7 倍	一种有效的方法,但是成本很高	[18—29]
2	涂布散射层(周期 Si 微球体)	显著增强	由于散射粒子,在不同角度观察,光谱会发生变化	[31,34]
3	形状化基底	2 倍	非常有效的方法,大规模制造成本很高	[38]
4	球形基底	9.6 倍	大规模制造成本很高且具挑战性	[39]
5	周期金纳米线阵列	2.2 倍	高制造成本,可能会造成光谱变化	[44]
6	纳米多孔膜技术	增强 46%	有效且低成本技术,光谱较稳定	[46]
7	插入低折射率硅气凝胶	1.8 倍	有效且低成本技术	[47]
8	插入低折射率方格	2.3 倍	非常有效的技术,具有商业可实施性	[22]
9	多孔性 AAO 膜	增强 50%	网孔易恶化	[48]
10	波纹加工器件层	3 倍	可以修饰光谱,宽光谱范围增强,成本高	[53—55]
11	光子晶体	2 倍	成本高,实验条件难以控制	[15—70]
12	微腔共振技术	1.8—5 倍	非常有效的技术,产业前景较好	[71—95]

1)理论模型的建立.众多器件的研究提供了大量的数据,以此为依据,归纳出合理的理论的模型,对器件的设计加以指导,将有利于光取出技术的发展.

2)对现有器件的结构加以适当的改进,如在保证器件稳定性前提下,通过结合增加基底取出技术和减少内部波导方式技术,结合微腔技术和微透镜技术等方法来进一步提高器件光取出效率.

3)软件仿真模拟.在局部设计环节,仿真技术可以为设计者提供有效的分析平台,在研发阶段就能预知其最终的显示效果,可降低风险、节约时间

和资金.通过仿真有利于更好理解器件的工作机理,对优化器件结构有所帮助.在设计器件时根据需要预先对所设计的器件进行光输出的仿真,从而验证器件结构的合理性.这样不仅使设计的器件更加精确,而且还节约了材料,避免了不必要的浪费.

在 OLED 的研制和生产过程中,几乎每 10 年其性能就有一个大的飞跃.这需要一代代人不断的努力,对现存的方法进行总结和进一步的研究,同时推出新的方法.相信在不久的将来,光取出效率会有大幅度的提高,从而推动 OLED 在照明、显示等领域的广泛应用.

[1] Tang C W, Van Slyke S A 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 913
 [2] Gu G, Forrest S R 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **4** 83
 [3] Cao G H, Qin D S, Guan M, Cao J S, Zeng Y P, Li J M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1911
 [4] Tian R Y, Yang R Q, Peng J B, Cao Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 1032

[5] Nalwa H S, Rohwer L S 2003 *ASP Press* **1** 213
 [6] Nie H, Zhang B, Tang X Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 730
 [7] Wei F X, Cao J, Zhang X B, Liu X, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q, Xu S H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2008 (in Chinese) [委福祥、曹进、张晓波、刘向、蒋雪茵、张志林、许少鸿 2006 物理学报 **55** 2008]

- [8] Chen F P, Xu B, Zhao Z J, Tian W J, Lu P, Im Chan 2010 *Chin. Phys. B* **19** 037801
- [9] Cao J S, Guan M, Cao G H, Zeng Y P, Li J M, Qin D S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2725
- [10] Wei B, Liao Y J, Liu J Z, Lu L, Cao J, Wang J, Zhang J H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 037105
- [11] Kiran T K, Andrew P M, Martin R B 2010 *Adv. Mater.* **22** 572
- [12] Chang C H, Chen C C, Wua C C, Chang S Y, Hung J Y, Chi Y 2010 *Org. Electron.* **11** 266
- [13] Zhang L J, Hua Y L, Wu X M, Wang Y, Yin S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3097
- [14] Lu M H, Sturm J C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 1927
- [15] Peng Y Q, Zhang F J, Tai X S, He X Y, Zhang X 2002 *Chin. Phys. B* **11** 1076
- [16] Madigan C F, Lu M H, Sturm J C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1650
- [17] Patel N K, Cinà S, Burroughes J H 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **8** 346
- [18] Kim J S, Ho P K H, Greenham N C, Friend R H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 1073
- [19] Yang C J, Liu S H, Hsieh H H, Cho T Y, Wu C C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 253508
- [20] Peng H J, Ho Y L, Qiu C F, Wong M, Kwok H S 2004 *SID 04 Digest Seattle America* May 23—28 2004 p158
- [21] Meller S, Forrest S R 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 3324
- [22] Sun Y, Forrest S R 2008 *Nature* **2** 483
- [23] Wei M K, Su I L 2004 *Opt. Exp.* **12** 5777
- [24] Wei M K, Lee J H, Lin H Y, Ho Y H, Chen K Y, Lin C C, Wu C F, Lin H Y, Tsai J H, Wu T C 2008 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 055302
- [25] Peng H, Ho Y L, Yu X J, Wong M, Kwok H S 2005 *J. Disp. Tech.* **1** 278
- [26] Chen K Y, Chang Y T, Ho Y H, Lin H Y, Lee J H, Wei M K 2010 *Opt. Exp.* **18** 3238
- [27] We M K, Su I L, Chen Y J, Chang M, Lin H Y, Wu T C 2006 *J. Micromech. Microeng.* **16** 368
- [28] Lee J H, Ho Y H, Chen K Y, Lin H Y, Fang J H, Hsu S H, Lin J R, Wei M K 2008 *Opt. Exp.* **16** 21184
- [29] Lin H Y, Ho Y H, Lee J H, Chen K Y, Fang H J, Hsu S C, Wei M K, Lin H Y, Tsai J H, Wu T C 2008 *Opt. Exp.* **16** 11044
- [30] Shiang J J, Duggal A R 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2880
- [31] Shiang J J, Faircloth T J, Duggal A R 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2889
- [32] Riedel B, Hauss J L, Aichholz M, Gall A, Gerken M 2010 *Org. Electron.* **11** 1172
- [33] Bathelt R, Buchhauser D, Garditz C, Paetzold R, Wellmann P 2007 *Org. Electron.* **8** 293
- [34] Yamasaki T, Sumioka T, Tsutsui T 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1243
- [35] Wang Z Y, Chen Z J, Xiao L X, Gong Q H 2009 *Org. Electron.* **10** 341
- [36] Lu M H, Sturm J C 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 595
- [37] Krams, Holcomb O, Höfler G E, Coman C C, Chen E I, Grillot P, Gardner N F, Chui H C, Huang J W 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2365
- [38] Gu G, Garbuzov D Z, Burrows P E, Vendakesh S, Forrest S R, Thompson M E 1997 *Opt. Lett.* **22** 396
- [39] Wu C C, Wu C I, Sturm J C, Kahn A 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1348
- [40] Chen S M, Kwok H S 2010 *Opt. Exp.* **18** 37
- [41] Lee Y J, Kim S H, Huh J, Kim G H, Lee Y H, Cho S H, Kim Y C, Do Y R 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3779
- [42] Kitamura M, Iwamoto S, Arakawa Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 151119
- [43] Jeong 2008 *J. Appl. Phys.* **47** 4566
- [44] Hsu S Y, Lee M C, Lee K L, Wei P K 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 013303
- [45] Jeon S, Kang J W, Park H D, Kim J J, Youn J R, Shim J, Jeong J H, Choi D G, Kim K D, Altun A O, Kim S H, Lee Y H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 223307
- [46] Cheng Y H, Wu J L, Cheng C H, Syao K C, Lee C M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 091102
- [47] Slightsky M, Forrest S R 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 163302
- [48] Tsutsui T, Yahiro M, Yokogawa H, Kawano K, Yokoyama M 2001 *Adv. Mater.* **13** 1149
- [49] Köhnen A, Gather M C, Riegel N, Zacharias P, Meerholz K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 113501
- [50] Peng H J, Ho Y L, Yu X J, Kwok H S 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 1649
- [51] Gruhlke R W, Holl, W R, Hall D G 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 2838
- [52] Wedge S, Barnes W L 2004 *Opt. Exp.* **12** 3673
- [53] Matterson B, Lupton J F, Safonov A F, Salt M G 2001 *Adv. Mater.* **13** 123
- [54] Giannattasio A, Wedge S, Barnes W L 2003 *J. Mod. Optic.* **53** 10
- [55] Koo W H, Jeong S M, Araoka F, Ishikawa K, Nishimura S, Toyooka T, Takezoe H 2010 *Nature Photon.* **6** 222
- [56] Kim K S, Zhao Y, Jang H, Lee S Y, Kim J M, Kim K S, Ahn J H, Kim P, Choi J Y, Hong B H 2009 *Nature* **45** 7706
- [57] Wei M K, Lin C W, Yang C C, Kiang Y W, Lee J H, Lin H Y 2010 *Int. J. Mol. Sci.* **11** 1527
- [58] Boroditsky M, Krauss T F, Coccioli R, Vrijen R, Bhat R, Yablonovitch E 1999 *Appl. Phys. Lett.* **5** 1036
- [59] Lin H, Liu S, Zhang X S, Liu B L, Ren X C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 959 (in Chinese) [林瀚, 刘守, 张向苏, 刘宝林, 任雪畅 2009 物理学报 **58** 959]
- [60] Zhang B, Wang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1404 (in Chinese) [张波, 王智 2007 物理学报 **56** 1404]
- [61] Jeong S M, Ha N Y, Takezoe H, Nishimura S, Suzuki G 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 113101
- [62] Fujita M, Ueno T, Noda S, Noda S, Ohhata H A, Tsuji T 2003 *Electron. Lett.* **39** 212

- [63] Do Y R, Kim Y C, Song Y W, Lee Y H 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 7629
- [64] Liu C, Kamaev V, Vardeny Z V 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 143501
- [65] Do Y R, Kim Y C, Song Y W, Cho C O, Jeon H, Lee Y J, Kim S H, Lee Y H 2003 *Adv. Mater.* **15** 1214
- [66] Lee Y J, Kim S H, Huh J, Kim G H, Lee Y H, Cho S H, Kim Y C, Do Y R 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3779
- [67] Kim Y C, Cho S H, Lee Y J, Lee H Y, Do Y R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 173502
- [68] Ishihara K, Fujita M, Matsubara I, Asano T, Noda S, Ohata H, Hirasawa A, Nakada H, Shimoji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 111114
- [69] Ji W Y, Zhang L T, Zhang T Y, Liu G Q, Xie W F, Liu S Y, Zhang H Y, Zhang L Y, Li B 2009 *Opt. Lett.* **34** 2703
- [70] Martin D B, Charlton, Lidzey D G, Chalcraft A, Noutsos K, Smith E, Pate N 2010 *Opt. Photon.* (SPIE), 2nd August, SanDiego USA
- [71] Takada N, Tsutsui T, Saito S 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2032
- [72] Bulovic V, Khalfin V B, Garbuzov D Z Burrows P E, Forrest S R 1998 *Phys. Rev. B* **58** 3730
- [73] Xiong Z H, Shi H Z, Fan Y L, Zhang S T, Zhan Y Q, He J, Zhong G Y, Xu S H, Liu Y, Wang X J, Wang Z J, Ding X M, Huang W, Hou X Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1222 (in Chinese) [熊祖洪、史华忠、樊永良、张松涛、詹义强、何钧、钟高余、徐少辉、柳毅、王晓军、王子君、丁训民、黄维、侯晓远 2003 物理学报 **52** 1222]
- [74] Zhang X B, Cao J, Wei F X, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q, Xu S H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 119 (in Chinese) [张晓波、曹进、委福祥、蒋雪茵、张志林、朱文清、许少鸿 2006 物理学报 **55** 119]
- [75] Cao J, Liu X, Zhang X B, Wei F X, Zhu W Q, Jiang X Y, Zhang Z L, Xu S H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1088 (in Chinese) [曹进、刘向、张晓波、委福祥、朱文清、蒋雪茵、张志林、许少鸿 2007 物理学报 **56** 1088]
- [76] Cao J, Jiang X Y, Zhang Z L, Zhu W Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3493 (in Chinese) [曹进、蒋雪茵、张志林 2006 物理学报 **56** 3493]
- [77] Ma S Y, Xiao Y, Chen H 2002 *Chin. Phys.* **11** 960
- [78] Dodabalapur A, Rothberg L J, Miller T, Kwock E W 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2486
- [79] Du P, Zhang X Q, Sun X B, Yao Z G, Wang Y S 2006 *Chin. Phys.* **15** 1370
- [80] Peng Y Q, Zhang F J, Song C A 2003 *Chin. Phys.* **12** 102
- [81] Dai G Z, Li H J, Pan Y Z, Dai X Y, Ma Q Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2590
- [82] Tsutsui T, Takada N, Saito S, Ogino E 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 1868
- [83] Kim H Y, Cho S H, Oh J R, Lee Y H, Lee J H, Lee J G, Kim S K, Park J W, Do Y R 2010 *Org. Electron.* **11** 137
- [84] Cho S H, Song Y W, Lee J G, Kim Y C, Lee J H, Ha J, Oh J S, Lee S Y, Hwang K H, Zang D S, Lee Y H 2008 *Opt. Exp.* **16** 12632
- [85] Jordan R H, Dodabalapur A, Slusher R E 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1997
- [86] Ji W Y, Zhang L T, Zhang T Y, Xie W F, Zhang H Z 2010 *Org. Electron.* **11** 202
- [87] Meerheim R, Nitsche R, Leo K 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 043310
- [88] Cho T Y, Lin C L, Wu C C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 111106
- [89] Wu Z J, Chen S F, Yang S H, Duan Y, Zhao Y, Hou J Y, Liu S Y 2005 *Opt. Quant. Electron.* **37** 371
- [90] Chen S F, Xie E F, Men Y L, Chen P, Zhao Y, Liu S Y 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 054506
- [91] Liu C C, Liu S H, Tien K C, Hsu M H, Chang H W, Chang C K, Yang C J, Wu C C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 103302
- [92] Chen S F, Zhao Y, Cheng G, Li J, Liu C L, Zhao Z Y, Jie Z H, Liu S Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 153517
- [93] Chen S F, Jie Z H, Zhao Z Y, Cheng G, Wu Z J, Zhao Y, Quan B F, Liu S Y, Li X, Xie W F 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 043505
- [94] Neyts K, Vissche 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 114
- [95] Lim J, Oh S S, Kim D Y, Cho S H, Kim I T, Han S H, Takezoe H, Choi E H, Cho G S, Seo Y H, Kang S O, Park B 2006 *Opt. Exp.* **14** 6564

Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

Light out-coupling progress in organic light emitting device^{*}

Yang Yang Chen Shu-Fen Xie Jun Chen Chun-Yan Shao Ming Guo Xu Huang Wei[†]

(Key Laboratory for Organic Electronics & Information Displays (KLOEID) and Institute of Advanced Materials (IAM),
Nanjing University of Posts & Telecommunications (NUPT), Nanjing 210046, China)

(Received 26 May 2010; revised manuscript received 5 August 2010)

Abstract

Organic light-emitting device (OLED) technology shows tremendous commercial applications in communication, information, display, and lighting. It has been one of the most attractive projects in optoelectronic information field over the last decade. However, the internal efficiency is quite different from the external efficiency, and to some extent, a low external efficiency restrictes the development and application of OLEDs. The light out-coupling has been improved by a number of different techniques through the modification of device architecture. In this paper we present various light out-coupling techniques that have been implemented to enhance the external efficiency of OLEDs. Various OLED device modification techniques, e. g. , micro-lens array, photonic crystal structure, nano-patterned and nanoporous films, and microcavity technique, have been reviewed and discussed. Finally, some perspectives on light out-coupling techniques are proposed.

Keywords: organic light emitting devices, light out-coupling techniques, external efficiency

PACS: 78.66. Qn, 78.60. Fi, 78.20. Bh, 42.25. Gy

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB930600), the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60907047, 20774043, 20704023, 60706017, 60977024, 60876010), the Key Project of Chinese Ministry of Education, China (Grants Nos. 104246, 208050, 707032), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China (Grant No. 20093223120003), the NSF of Jiangsu Province, China (Grants Nos. BK2009423, BK2008053), and the NSF of the Education Committee of Jiangsu Province, China (Grants Nos. 08KJB510013, SJ209003, TJ209035, TJ207035).

[†] Corresponding author. E-mail: iamwhuang@njupt.edu.cn