

文章编号:1007-2780(2012)02-0198-06

有机电致发光器件薄膜封装研究进展

高淑雅¹, 孔祥朝¹, 张方辉², 吕 磊¹

(1. 陕西科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710021, E-mail: gaosy@sust.edu.cn;

2. 陕西科技大学 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 有机电致发光器件(OLEDs)对水汽和氧气非常敏感, 渗入 OLEDs 内的水汽和氧气会腐蚀有机功能层及电极材料, 严重影响器件寿命。文中根据 OLEDs 对封装材料的要求, 分析了目前最有前景的 OLEDs 封装技术——薄膜封装, 重点介绍了薄膜封装的分类和研究现状。

关 键 词: 有机电致发光器件; 薄膜封装; 老化机制

中图分类号: TN383⁺.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122702.0198

Research Progress of Thin Film Encapsulation of Organic Light-Emitting Devices

GAO Shu-ya¹, KONG Xiang-zhao¹, ZHANG Fang-hui², LV Lei¹

(1. School of Material Science & Engineering, Shaanxi University of Science & Technology,

Xi'an 710021, China, E-mail: gaosy@sust.edu.cn;

2. School of Electrical & Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Organic light-emitting devices (OLEDs) are extremely sensitive to vapor and oxygen. The influence of inleakage of vapor and oxygen which can corrode organic functional layer and the electrode material on device's lifetime was serious. Based on the requirements of encapsulation materials, this paper analyzes the most promising OLEDs encapsulation technology — thin film encapsulation, which mainly focuses on the classification and research status.

Key words: OLEDs; thin film encapsulation; aging mechanisms

1 引 言

有机电致发光器件(Organic Light-Emitting Devices, OLEDs)是一种将电能转化成光能的显示器件, 具有如下特点^[1-3]: 材料采用有机小分子/高分子聚合物, 可实现从红光到蓝光的任何颜色的显示; 驱动电压低, 只需 3~12 V 的直流电压; 发光亮度和发光效率高, 发光视角广, 响应速度快; 超薄、质量轻, 全固化的主动发光; 可制作在柔

性衬底上, 器件可弯曲等等。因此 OLEDs 是一种很有前途的、新型的平板显示器(Flat Panel Display, FPD), 一些企业不断推出商业化的样品, 逐渐掀起了对 OLEDs 投资和开发的热潮, 当前从事电子终端产品生产的主要跨国企业几乎都参与其中^[4]。

早在 1987 年美国 Eastman Kodak 公司的 C. W. Tang^[5]等人成功制备了低电压驱动(<10 V)的多层结构小分子 OLEDs, 使得有机发光现象引

收稿日期: 2011-10-11; 修订日期: 2011-11-13

基金项目: 陕西省专利产业化项目(No. 2005ZZ-04); 陕西省教育厅产业化项目(No. 06JC23)

作者简介: 高淑雅(1962—), 女, 陕西西安人, 副教授, 研究方向: 功能玻璃。

起广泛的关注。随后,在1990年,英国剑桥大学Cavendish实验室的R. H. Friend^[6]等人以聚对苯撑乙烯(PPV)为发光材料,制成了聚合物电致发光器件,开辟了发光器件的全新领域——聚合物薄膜电致发光器件。但是早期有机发光材料与器件稳定性差,使人们对其应用前景产生了怀疑,直接影响了OLEDs商品化的实现,限制了OLEDs的推广和应用。近年来虽然在材料合成方面取得了突破性进展,并且已制成全彩显示的OLEDs样品。但OLEDs的稳定性和寿命问题没有得到根本解决,因此OLEDs的封装技术也是提高OLEDs性能的关键制程,而研究与开发有效的封装技术,阻隔水汽和氧气也就极为紧迫和重要。

2 OLEDs的老化机制以及传统封装方法

2.1 OLEDs的老化机制

OLEDs发光层的多数有机物质对于大气中的污染物、O₂以及潮气都十分敏感^[7],一方面因为氧气直接就是三线态淬灭剂,使发光量子效率显著下降;另一方面,氧气与发光层发生氧化作用所生成的羰基化合物也是有效的淬灭剂^[8];再加上有机层厚度一般很小,一旦发光材料变质就会形成黑点^[9],造成不发光区域,并且随着发光效率下降禁带宽度增加。而水汽会使有机层化合物发生水解并严重影响导电性能,从而使稳定性大大降低^[10]。

同样,由于OLEDs的阴极材料的功函数必须很低才能有效进行电子传输,因此OLEDs阴极材料几乎全是碱金属或碱土金属元素,这些活泼金属极易在空气中或其他含有氧的气氛中受到侵蚀^[11],尤其是在含有水汽的环境中,更容易发生电化学腐蚀^[12]。而且制作OLEDs阴极材料,一般采用物理气相沉积法,微小的灰尘颗粒粘附在有机层上,都极易使阴极材料产生针孔,从而成为水汽、O₂与有机功能层接触的通道。另外OLEDs工作时产生的热量会进一步加剧OLEDs器件中的发光材料、辅助材料、电极等在空气中的老化,进而影响器件的使用寿命。为了使OLEDs的寿命达到实用要求,通常要求器件封装水汽渗透率小于 10^{-6} g/m²/d,氧气渗透率小于 10^{-3} g/m²/d。

2.2 OLEDs的传统封装方法

国内外研究学者尝试不同的方法对OLEDs进行封装,以阻隔水、氧对OLEDs的侵蚀,减缓衰退速率,提高OLEDs的寿命。传统的OLEDs封装技术^[13]是对刚性基板(玻璃、金属)上的OLEDs进行的封装。这种封装方式一般是给器件加一个盖板,并在盖板内侧贴附干燥剂,再通过环氧树脂等密封胶将基板和盖板相结合。这种封装方式见图1所示。

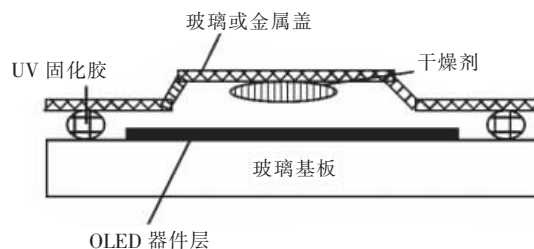


图1 传统 OLEDs 的封装

Fig. 1 Traditional encapsulation of OLEDs

传统的封装方法虽然大大提高了 OLEDs 的寿命,但由于封装盖多为脆性材料,易产生裂纹,而且由于UV固化胶的水氧阻隔性不是很理想,再加上封装后器件厚重,不能满足现代对 OLEDs 的轻巧、可曲折性的要求,因此目前的研究热点是对 OLEDs 采用薄膜封装(Thin Film Encapsulation, TFE)。本文主要介绍不同种类的薄膜封装技术。

3 OLEDs的薄膜封装

薄膜封装可以对刚性基板或柔性基板(塑料基板,例如PEN、PES、PC、PET)的OLEDs进行封装,尤其是对柔性基板的OLEDs,可以实现柔性OLEDs的可曲折性、可卷绕性,为柔性显示技术带来突破性的进展。采用薄膜封装还可以将显示器的重量和厚度可减至一半,降低封装材料的成本。如果薄膜封装材料为透明材料,OLEDs制造商完全可以撇弃光被TFT晶体管阻挡的底部发光方式,而采用顶部发光方式,从而有效地提高发光效率和分辨率。

薄膜封装按封装材料不同可以分为无机薄膜封装、有机薄膜封装、无机/有机复合薄膜封装等。

3.1 无机薄膜封装

目前,无机薄膜封装采用的主要封装材料是SiO_x、SiN_x、CF_x、Al₂O₃、ZrO₂、MgF₂等无机材

料,但由于部分无机材料在高温下会结晶,因此目前用于封装的无机材料必须在较低温度下制备。无机材料封装时,可以采用两种以上无机材料交替封装,以达到互补的作用,减少无机薄膜的缺陷。

张方辉^[14]等在高真空条件下(3×10^{-4} Pa),利用硫系玻璃(Se, Te, Sb)对 OLEDs 进行薄膜封装,有效避免了传统封装方法难以避免的水、氧危害,以达到延长器件寿命的目的。研究发现 Se、Te、Sb 薄膜封装层分别可以使器件的寿命延长 1.4 倍,2 倍,1.3 倍以上;采用封装层对器件的电流-电压特性、色坐标等光电性能几乎不产生影响,但影响了器件散热,薄膜封装层使器件的击穿电压、最高亮度等参数稍有下降。Hiroshi Nakayama^[15]等通过有机催化 CVD 法(O-Cat-CVD)在 PEN 基板上(甲基硅烷 MMS、 NH_3 、 H_2)生长 100 nm 厚的单层 SiNG 薄膜,有效地简化了封装材料的结构,并发现随着钨丝温度从 1 100 °C 增加到 1 200 °C,水蒸汽透过率(WVTR)由 5×10^{-1} g/m²/day 变化为 1×10^{-3} g/m²/day。

J. Meyer^[16]等通过原子层沉积(ALD)于 80 °C 的低温下在 OLEDs 上交替沉积 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 纳米层,对比实验得出起始亮度为 1 000 cd/m² 时,纯 Al_2O_3 薄膜封装寿命为 8 700 h,而 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 纳米层封装寿命则超过了 10 000 h。H. Y. Sun^[17]等通过在真空下等离子聚合 CHF_3 气体在 ITO 玻璃基板上沉积了 360 nm 厚的 CF_x 阴极保护层,起始亮度为 100 cd/m² 时,沉积了 CF_x 层 OLEDs 寿命为 10 000 h,大约是未沉积 CF_x 层的 OLEDs 寿命的 3 倍。Han-Ki Kim^[18]等通过催化剂增强 CVD(钨为催化剂),在 PC 基板上沉积了 150 nm 厚的 SiN_x 薄膜,其 WVTR 为 $(2 \sim 6) \times 10^2$ g/m²/day,

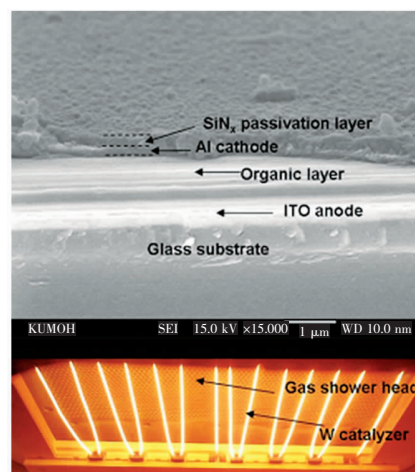


图 2 以钨为催化剂的 CECVD 沉积 OLEDs SiN_x 钝化层的 SEM 图

Fig. 2 SEM image of an OLEDs passivated with a SiN_x layer grown by the tungsten catalyst in CECVD system

并且透明度高达 87%。图 2 为以钨为催化剂的 CECVD 沉积的 OLEDs 钝化层的 SEM 图。

D. S. Wu^[19]等通过等离子增强 CVD 在 PES 基板上沉积 SiO_x 阻隔层。WVTR 在 150 °C 时下降到 0.3 g/m²/day。氧化层厚度从 50 nm 增加到 500 nm 时,表面粗糙度从 2.71 nm 增加到 5.84 nm。在 PES 基板两侧沉积 100 nm 厚的 SiO_x 薄膜时可获得最小的 WVTR 为 0.1 g/m²/day。他们^[20]还通过 PECVD 在 PES 基板上沉积了 SiN_x 薄膜,其中 NH_3/SiN_4 的气体流量比以及反应室的压力影响了 SiN_x 的化学键接、透明度、折射率、沉积速率、粘附力和表面粗糙度。基板温度为 150 °C 时,100 nm 厚的 SiN_x 薄膜的 WVTR 和 OTR 分别为 0.01g/m²/day,0.01 cm³/m²/day。

Jin-A. Jeong^[21]等在 125 μm 厚的 PET 基板

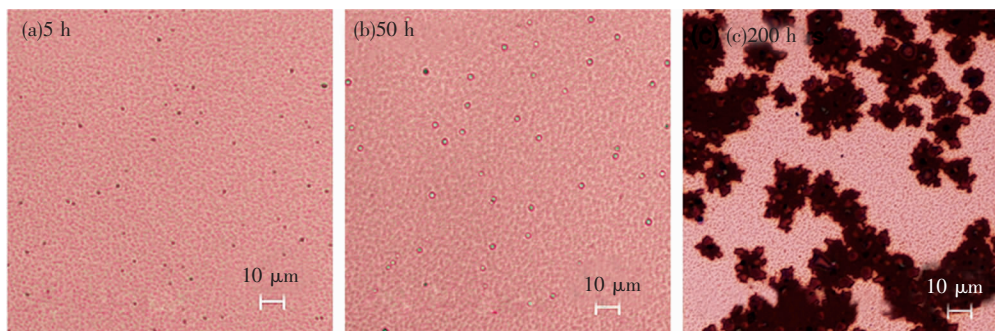


图 3 钙膜测试 MgF_2/ZnS 双层封装 OLEDs 工作 5, 50, 200 h 后的光学图像。

Fig. 3 Optical images of calcium film encapsulated with MgF_2/ZnS bilayer observed after 5, 50 h, and 200 h of operation.

上沉积 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 封装层,其中 Al_2O_3 为 70 nm,Ag 为 10 nm。沉积条件为:Ar/ O_2 流量比 8/2 mL/min,脉冲直流电功率为 500 W,压强为 133 mPa。其中 Ag 为 10 nm 时 WVTR 为 0.024 g/m²/day,20 nm 时为 0.011 g/m²/day。F. L. Wong^[22] 等通过真空连接 CVD 法在玻璃基板的 OLED 上沉积了 $\text{CF}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 双封装层但由于在薄膜沉积过程中反应物对器件的伤害,使得 OLED 寿命大大降低,因此加入 CuPc 作为有机保护层,有效地降低了黑点的产生。使用 CuPc/($\text{CF}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$) $\times 5$ 结构封装层的 OLED 寿命超过了 8 000 h。Yingjie Liao^[23] 等通过热蒸镀法得到结构为 3 对 MgF_2/ZnS 交替的封装层,当起始亮度为 2 000 cd/m² 时,OLED 寿命为 245 h。图 3 为钙膜测试 MgF_2/ZnS 双层封装 OLEDs 工作 5,50,200 h 后的光学图像。

3.2 有机薄膜封装

使用有机薄膜进行封装,虽然其易加工、成本低,但是作为封装层,有机薄膜的水氧阻隔性能较差,单一的有机薄膜封装效果还不能达到 OLED 器件的封装要求。

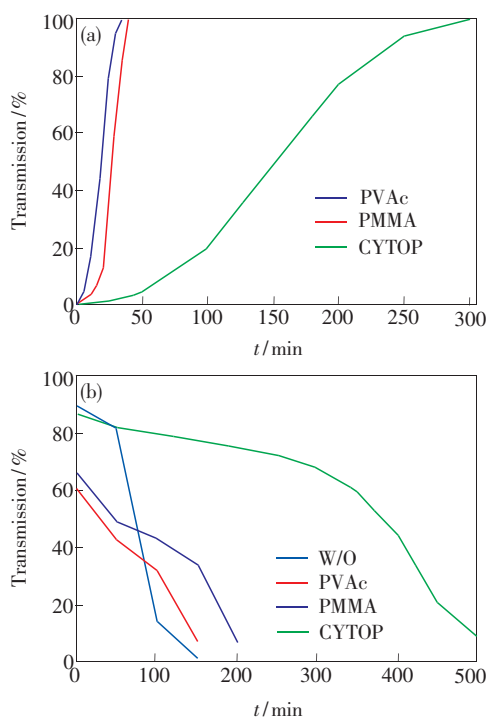


图4 Cytop、PAVc、PMMA 封装层透明度和寿命的不同。

Fig. 4 Difference of optical transmission and lifetime test for single polymer barrier films of PVAc, PMMA, and CYTOP.

Gi Heon Kim^[24] 等将 PETIA 和 HSP188(光引发剂)旋转涂覆到 OLED 上,再通过光催化聚合为聚丙烯酸酯钝化层,在 40 ℃、湿度 60% 的条件下,具有 29 μm 厚的钝化层的 OLED 寿命为 9.6 h。Chen-Ming^[25] 等人利用热化学气相沉积聚合成膜(TCVDPF)技术在室温条件下将聚对二甲苯(PPX)和聚 2-氯对二甲苯(PCPX)沉淀在 OLED 的阴极表面形成封装层,结果发现 TCVDPF 封装过程并不影响 OLED 的发光性能和电流-电压特性,而且封装后的 OLED 使用寿命较未封装的寿命提高了 4 倍。叶丹琴^[26] 则采用自制的一套最大面积为 5 cm $\times$ 5 cm 的真空化学气相沉积装置,研究了聚对二甲苯和聚一氯对二甲苯薄膜的沉积及 OLED 封装性能,其 WVTR 分别达到 0.022 8 g/m²/day 和 0.004 1 g/m²/day。同样单一的有机薄膜封装效果也还不能达到 OLED 器件的封装要求。

J. Granstrom^[27] 等通过旋转涂覆法涂覆透明的全氟聚合物 Cytop 封装层,并且对比了有机聚合物 PAVc、PMMA 与 Cytop 的透明度和器件封装寿命,Cytop 封装的效果最好。图 4 为 Cytop、PAVc、PMMA 封装层透明度和寿命的不同。

3.3 有机/无机复合薄膜封装

无机薄膜封装时由于材料固有的脆性和缺陷容易产生裂纹,层与层之间的黏着力也不够好,易产生分层现象;而有机薄膜封装时,有机材料本身水氧渗透率就较大,并且聚合物分子量较大,封装时不易形成均匀的薄膜。因此无机/有机复合薄膜封装弥补了靠单一无机物或有机物封装带来的缺陷,被认为是最具发展前景的一类封装技术。

目前,有机/无机复合薄膜封装中效果最好的应属 Vitex Systems 公司开发的一种独特的薄膜隔离层^[28],它对湿气和氧气渗透性相当于一块玻璃的效果。该保护层称为 Barix,是由聚合物膜和陶瓷膜在真空中迭加而成,总厚度仅为 3 μm。该隔离层能直接加在 OLED 显示器的上面,而不再需要使用机械封装元件就可实现对 OLED 的湿气和氧气隔离保护。Vitex 技术的独特之处在于聚合物层的形成方法:先将一种母液(liquid precursor)快速蒸发到一种气体中,然后气体流入一个真空室,在真空室中以液体形式凝聚在基板上。在 Vitex 工艺中,基板上形成的液体母液实际上是气体至液体的凝聚而不是沉积。母液气体分子

运动到基板上并在基板的所有表面上凝聚为液体,从而使整个结构完全密封和平整化。图 5 为将 Barix 封装应用到 OLED 显示器的示意图。

A. P. Ghosh^[29] 等使用 TMA、O₃ 为反应气体, N₂ 为清除气体, 通过 ALD 沉积了 Al₂O₃/Parylene 薄膜, 其单体循环时间为 750 ms 和 1 000 ms, 生长速率为 0.08 nm/s。在 85 °C、湿度为 85% 条件下, OLED 寿命大于 1 000 h。其中, 涂覆聚对二甲苯层(Parylene)是为了防止水在 Al₂O₃ 层上的凝结, 同时 Parylene 也是良好的化学阻碍层。该结构不需要加入干燥剂。M. S. Weaver^[30] 等在 175 μm 厚的 PET 基板上通过真空闪蒸和热蒸镀沉积了聚丙烯酸酯/ Al₂O₃ 多层封装结构, 其 WVRT 为 2×10^{-6} g/m²/day。驱动电流密度为 2.5 mA/cm² 时, 起始亮度 425 cd/m² 的 OLED 寿命为 3 800 h。Young Gu Lee^[31] 等通过磁控溅射沉积 Al₂O₃ 层、蒸汽缩合合成聚脲层, 组成 5 对聚脲(20 nm)/Al₂O₃(50 nm) 结构封装 TEOLED。起始亮度为 1 000 cd/m² 时, 其寿

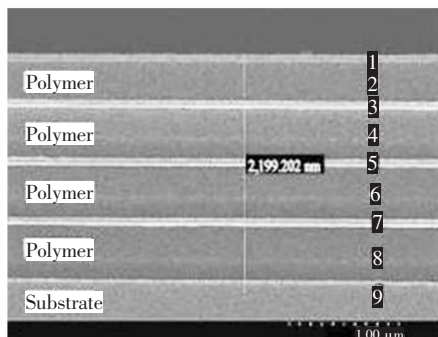


图 5 Barix 封装 OLEDs 的 SEM 图

Fig. 5 SEM image of Barix encapsulation on OLEDs

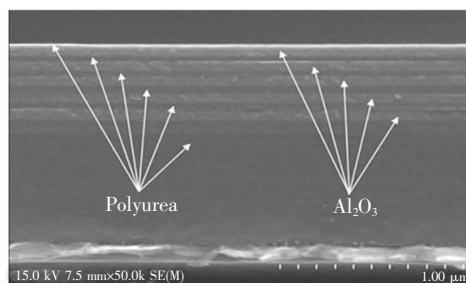


图 6 0.8 μm 厚的聚脲层上 5 对氧化铝/聚脲封装层横截面的 SEM 图

Fig. 6 Cross-sectional SEM image of 5 pairs of Al₂O₃/polyurea layers on top of a 0.8-μm-thick polyurea layer

命为玻璃封装时的 86%, 约为 2 570 h, 而且 WVTR 为 5×10^{-4} g/m²/day。图 6 为 0.8 μm 厚的聚脲层上 5 对氧化铝/聚脲封装层横截面的 SEM 图。

4 结 论

OLEDs 的诸多优点将使其在各个方面得到越来越广泛的应用, 而如何延长它的使用寿命也越来越引起人们的重视。目前尚未解决的问题主要集中于: 大屏化的非玻璃刚性封装、实现柔性显示和相应的全方位柔性封装材料、封装材料与 OLED 控制电路设计及控制模式的配合和封装集成过程。获得高阻隔性是研究封装材料的中心问题, 也是未来研究取得突破的方向。随着科学技术的发展, 新的技术会不断应用到 OLEDs 的封装上, 从而使 OLEDs 封装技术日趋完善, OLEDs 的工作寿命也将不断延长。

参 考 文 献:

- [1] 刘彭义, 唐振方, 孙汪典. 有机电致发光器件的研究进展及应用前景 [J]. 暨南大学学报, 2002, 23(2): 66-43.
- [2] 尹盛, 刘陈, 钟志有. 有机电致发光材料的研究现状 [J]. 化工新型材料, 2003, 31(1): 1-4.
- [3] 邹德春, 程忠英. 新一代超薄显示技术-OLED [J]. 今日电子, 2003, (3): 15-18.
- [4] 黄春辉, 李富友, 黄维. 有机电致发光材料与器件导论 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005: 65.
- [5] Tang C W, Van Slyke S A, Chen C H. Organic electroluminescent devices with improved stability [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(15): 2160-2162.
- [6] Burroughes J H, Bradley D D C, Brown A R, et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers [J]. *Nature*, 1990, 347(11): 539-541.
- [7] 王宏智, 王津生, 陈君, 等. 有机电致发光器件封装技术的研究进展 [J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(3): 45-48.
- [8] Ullrich M, Peter B. The electroluminescence of organic materials [J]. *J. Materials Chem.*, 2000, 10: 1471-1507.
- [9] Sutherland D G J, Carlisle J A, Elliker P, et al. Photo-oxidation of electroluminescent polymers studied by core-level

- photo-absorption spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68:2046-2048.
- [10] Lim S F, Ke L, Wang W, *et al.* Effects of Mg doping on photoelectrical properties of hydrogenated GaN films grown at 380°C [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78:2116-2168.
- [11] Sheats J R, Roitman D B. Failure modes in polymer-based light-emitting diodes [J]. *Synthetic Metal*, 1998, 95:79-85.
- [12] Lee-M D, Mitsuaki O, Amane K, *et al.* Morphological change in the degradation of Al electrode surfaces of electroluminescent devices by fluorescence microscopy and AFM [J]. *Thin Solid Films*, 1996, 273:209.
- [13] 李斌, 彭玲, 潘晓勇, 等. 有机电致发光器件(OLED)的封装技术研究 [J]. 元器件制造与材料, 2011, 13(4): 28-30.
- [14] 张方辉, 席俭飞, 王秀峰, 等. 硫系玻璃薄膜封装层对 OLED 寿命的影响 [J]. 光电器件, 2010, 31(1): 30-33.
- [15] Hiroshi Nakayama, Michihiro Ito. Super H₂O-barrier film using Cat-CVD (HWCVD)-grown SiCN for film-based electronics [J]. *Thin Solid Films*, 519, (2011): 4483-4486.
- [16] Meyer J, Schneidenbach D, Winkler T, *et al.* Reliable thin film encapsulation for organic light emitting diodes grown by low-temperature atomic layer deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94 (23):3305-3307.
- [17] Sun H Y, Lau K M, Lau K C, *et al.* Fluorocarbon film as cathode protective coating in organic light-emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88 (22):3503-3505.
- [18] Kim Han-Ki, Kim Myung Soo, Kang Jae-Wook, *et al.* High-quality thin-film passivation by catalyzer-enhanced chemical vapor deposition for organic light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90 (1):3502-3504.
- [19] Wuua D S, Loa W C, Chiang C C, *et al.* Plasma-deposited silicon oxide barrier films on polyethersulfone substrates: temperature and thickness effects [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 19 (7):253-259.
- [20] Wuua D S, Loa W C, Chianga C C, *et al.* Water and oxygen permeation of silicon nitride films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, 19 (8):114-117.
- [21] Jeong J A, Kim H K, Yi M S. Effect of Ag interlayer on the optical and passivation properties of flexible and transparent Al₂O₃/Ag/Al₂O₃ multilayer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93 (3):3301-3303.
- [22] Wong F L, Fung M K, Tao S L, *et al.* Long-lifetime thin-film encapsulated organic light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 104(1):4509-4512.
- [23] Liao Y J, Yu F F, Li L, *et al.* Low-cost and reliable thin film encapsulation for organic light emitting diodes using magnesium fluoride and zinc sulfide [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 11(36):2344-2348.
- [24] Kim Gi Heon, Oh Jiyoung, Yang Yong Suk, *et al.* Encapsulation of organic light-emitting devices by means of photo polymerized polyacrylate films [J]. *Polymer*, 2004, 45(6):1879-1883.
- [25] Chena C M, Chung M H, Hsieh T E, *et al.* High Electroluminescent properties of color/luminance tunable organic light emitting diodes and their lifetime enhancement with encapsulation [J]. *Materials Science and Engineering (B)*, 2008, 15(3):100-105.
- [26] 叶丹琴, 杨利营, 印寿根. 聚对二甲苯类薄膜用于有机电致发光器件的封装 [J]. 光电子·激光, 2009, 20(1): 24-27.
- [27] Granstrom J, Swensen J S, Moon J S, *et al.* Encapsulation of organic light-emitting devices using a perfluorinated polymer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(19):3304-3306.
- [28] McMahon John. Barix 技术带来 OLED 显示器的性能和应用突破[EB/OL]. [2003-11-30]. http://www.eet-china.com/ART_8800323781_480701_TA_5a7ed785.HTM.
- [29] Ghosh A P, Gerenser L J, Jarman C M, *et al.* Thin-film encapsulation of organic light-emitting devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(22):3503-3305.
- [30] Weaver M S, Michalski L A, Rajan K, *et al.* Organic light-emitting devices with extended operating lifetimes on plastic substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81 (16):2929-2931.
- [31] Lee Young Gu, Choi Yun-Hyuk, Kee In Seo, *et al.* Thin-film encapsulation of top-emission organic light-emitting devices with polyurea/Al₂O₃ hybrid multi-layers [J]. *Organic Electronics*, 2009, 7(15):1352-1355.