

文章编号: 1007-2780(2024)06-0781-09

## OLED 显示器封装技术在车载应用中的可靠性

苗 洋\*, 邱寿发, 陈志新, 王亚雄, 朱云龙

(比亚迪汽车工业有限公司 汽车工程研究院, 广东 深圳 518118)

**摘要:** 有机发光二极管 (Organic Light-Emitting Diode, OLED) 显示器作为新一代显示技术, 相比于液晶显示器 (Liquid Crystal Display, LCD) 具有诸多优势, 包括广色域、高对比度、低功耗和轻薄等, 在智能手机、平板电脑、显示器、电视等消费电子领域对 LCD 已有取代之势。随着新能源汽车智能化需求的提升, 显示器作为智能座舱中电子系统人机界面的最终输出单元, 越来越向大屏化和多屏化方向发展。考虑到座舱内空间的限制, 轻薄的自发光 OLED 具有明显的优势, 特别是其能在柔性基材上制备的特性, 使 OLED 显示器更加适用多形态的柔性显示方案。目前 OLED 显示器的车载应用较少, 主要是受限于 OLED 器件环境可靠性较差。本文从提升薄膜封装阻隔能力、改善薄膜封装稳定性和提升薄膜封装散热能力 3 个方面分析了通过改进薄膜封装提升 OLED 显示器环境可靠性的方法, 为后续 OLED 显示器在汽车智能座舱中的应用提供参考。

**关键词:** OLED 显示器; 薄膜封装; 可靠性; 智能座舱

**中图分类号:** O482.31; TN383+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0071

### Reliability of OLED display encapsulation technology in automotive applications

MIAO Yang\*, QIU Shoufa, CHEN Zhixin, WANG Yaxiong, ZHU Yunlong

(Automotive Engineering Research Institute, BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518118, China)

**Abstract:** Organic light emitting diode (OLED) as a new generation of display technology, compared to the liquid crystal display (LCD) has many advantages, including wide color gamut, high contrast, low power consumption and lightweight, etc. There is a replacing trend of LCD in the field of consumer electronics such as smart phones, tablets, monitors, televisions. With the increasing intelligent demand of new energy vehicles, and the display, as the final output unit of the human-machine interface of the electronic system in the intelligent cabin, has the trend of large screen and multi-screen. Considering the limitation of space in the cabin, the light and thin self-emitting OLED has obvious advantages, especially its characteristics of fabricating on flexible substrates, which makes OLED displays more suitable for multi-form flexible display schemes. At present, OLED displays are rarely used in vehicle applications, which is mainly limited by the poor environmental reliability of OLED devices. This paper analyzes the methods of improving the environmental reliability of OLED display by improving the thin film encapsulation in three aspects: improving the barrier ability, improving the stability and improving the heat dissipation ability, which provides reference for the subsequent application of OLED display in automotive intelligent cabin.

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-04-09.

\*通信联系人, E-mail: 13596192889@163.com

**Key words:** OLED displays; thin film encapsulation; environmental reliability; intelligent cabin

## 1 引言

随着气候变化和全球变暖愈加严峻,人们对绿色环保的需求加速了燃油汽车到混合动力汽车,再到电动汽车的转换<sup>[1]</sup>。通过与信息和通信技术相结合,电动化和智能化成为汽车未来发展的趋势。显示器作为电子系统人机界面的最终输出单元,必将成为汽车智能化进程中的重要元素。通过先进显示技术的应用,乘客能够在智能座舱中或近车空间获得安全、便利和个性化的服务。目前,主流的显示技术分为两类,包括自发射显示技术和非自发射光显示技术。在自发光显示技术中,每个像素单独发射自己的光,能够直接在显示面板上创建所需的图像,例如,使用微型LED芯片作为自发射显示单元的Mini-LED(MLED)显示器、Micro-LED( $\mu$ LED)显示器<sup>[2]</sup>和有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)显示器<sup>[3]</sup>。而非自发射显示器则需使用背光源,通过对光的吸收、反射、折射和散射实现光学调制,进而产生颜色和图像。液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)和近来流行的投影显示都属于这一类。LCD显示器发明于20世纪60年代末和70年代初。自2000年以来,LCD逐渐取代笨重的阴极射线显像管(Cathode Ray Tube, CRT),成为主流的显示技术<sup>[4]</sup>。LCD显示器作为一种非自发射显示技术,结构中带有背光单元(Backlight Unit, BLU),因此,该类面板的厚度较大,外形受限,无法实现柔性折叠和卷曲,需要占用较大的空间。但其技术成熟,可靠性好,依然是车载显示技术的中流砥柱,此处可靠性代指显示器在设计寿命内,保有正常显示功能的特性。然而,随着车载显示器在智能座舱中的大面积应用,车载显示器越来越向大屏化、多屏化方向发展,应用方向不再受限在中控屏,逐渐向副驾屏、后排乘客娱乐屏方向扩展。考虑到座舱内空间的限制,轻薄的自发光显示器在未来的智能座舱中具有明显的优势。

经过30年材料和设备的密集开发以及对先进制造技术的大量投资,OLED显示技术日渐成熟,并逐步获得认可和应用<sup>[5]</sup>。OLED显示器相

对于LCD显示器具有诸多优势,例如轻薄、高对比度和广色域,在智能手机、平板电脑、显示器、电视等消费电子领域对LCD有取代的趋势。OLED器件由夹在电极、电荷注入层和调节层之间的有机发光层响应电流来发光,每个显示像素都是独立的OLED器件,通过薄膜晶体管(TFT)控制开关,因此OLED显示器能够获得低功耗和“绝对黑色”<sup>[6]</sup>。并且OLED器件能够在柔性基材上制备柔性显示器,可以与弯曲的汽车部件集成,非常适合汽车上应用<sup>[7]</sup>。然而,与消费电子类应用相比,汽车应用对驾驶安全方面有额外的要求,驾驶信息的失真和外部环境的影响可能会导致安全事故的发生<sup>[8]</sup>。因此,为推进OLED显示器的车载应用,首先要保证OLED显示器具有较好的可靠性和寿命,此处寿命代指OLED显示器保有正常显示功能的时间。但OLED器件多采用有机材料和金属电极,该类材料的特性使OLED器件容易出现劣化失效。

## 2 OLED器件失效机理分析

根据OLED器件的劣化表现,将OLED器件的失效分类为内部降解失效和外部因素诱发失效。内部降解包括载流子诱导的降解,部分有机材料在电荷注入时,产生不稳定形式如自由基阳离子或自由基阴离子,并通过键断裂或者同周围分子反应而产生降解缺陷<sup>[9]</sup>;激发态分子的降解和双分子猝灭也是内部降解缺陷形成的原因<sup>[10]</sup>。该类缺陷主要表现为OLED器件亮度的降低和由于热量积累导致的局部黑斑。解决内部降解缺陷的主要方式是OLED材料性能的提升和器件结构的优化,降低载流子、激子、非辐射复合中心的积累,提升OLED器件效率,抑制焦耳热的生成。因此,通过新材料的研发,例如热活化延迟荧光(Thermally Activated Delayed Fluorescence, TADF)材料的引入和更高效的电荷传输材料的使用<sup>[11]</sup>,以及器件结构的优化,使OLED器件变得更高效率,载流子传输更加平衡,焦耳热被抑制,能有效解决OLED器件的内部降解失效问题。

材料方面,影响器件可靠性的本质因素是材料化学键的稳定性,当材料激子与激子或激子与极子间的湮灭能量高于材料本身的化学键稳定性时,材料就会发生降解。因此,提高激子利用率,降低激子间湮灭和选用稳定性好的化学基团来构筑功能层材料均能有效减弱 OLED 器件内部降解。TADF 材料是一类通过反向系间窜越将三线态激子转换为单线态激子,从而有效利用单线态和三线态激子的发光功能材料。TADF 材料的引入能够有效提升载流子的利用效率,提升 OLED 器件的内量子效率。同时,改善 TADF 材料的性能能够进一步提高 OLED 器件的可靠性。例如,在分子结构中引入 S、Se 类重原子,增强单线态激子和三线态激子之间的轨道耦合,以及减小单线态和三线态之间能级差,加快三线态激子的反向隙间穿越速率,能够减小激子或激子与极子间的湮灭,提高 OLED 器件效率和寿命。从器件角度分析,使用最高占据分子轨道(Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO)能级和最低未占据分子轨道(Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO)能级更匹配以及载流子传输能力更平衡的传输层材料,可以有效减小载流子的注入势垒,增加载流子的复合效率,降低激子与极子的湮灭概率,提高激子的利用效率,从而抑制焦耳热的产生。此外,用主客体掺杂的 TADF 敏化型或磷光敏化型器件,也可以用来增加激子利用通道,减弱激子湮灭,从而降低 OLED 器件的内部降解。

相比于内部降解失效,外部因素诱发失效的表现更加严重。如图 1 所示,外部的水汽、氧气以及高温会导致低功函数的阴极在电流作用下出现鼓包和剥离,从而诱发 OLED 显示器出现大面积黑斑或者整体失效。因此为提升 OLED 显示器的可靠性和寿命,需要通过对 OLED 器件进行有效的封装来隔绝外界的水汽和氧气,从而抑制外部因素诱发的失效<sup>[12]</sup>。通常,消费电子类产品对显示器的最低需求寿命为 10 000 h,如图 2 所示,为达成该需求, OLED 器件对封装层的水汽透过率(WVTR)要求最高,其上限为  $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,远高于 LCD 显示器( $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )和 TFT 器件( $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )对封装层的要求。同时,车载 OLED 显示器因其使用温度更高,对可靠性和

寿命的要求更高,对封装层的阻隔性能要求也会更高。因此,本文将讨论通过改进封装结构改善 OLED 器件可靠性、提高 OLED 显示器寿命的方法,并分析未来 OLED 显示器在智能汽车中大面积应用的可行性。

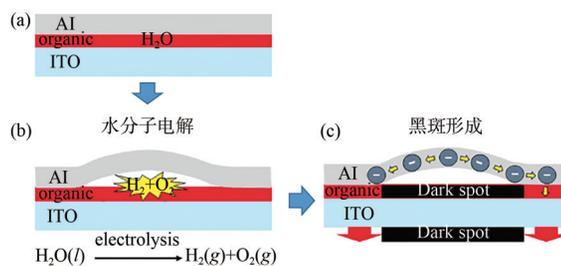


图 1 外部因素诱导 OLED 器件失效过程示意图。(a) 水汽侵入到器件内部;(b) 水汽电解产生气体致电极出现鼓包;(c) 没有电子流过鼓包区而形成黑斑。

Fig. 1 Schematic diagram of OLED devices failure process induced by external factors. (a) Water vapor intrudes into the interior of the device; (b) Electrolysis of water vapor produces gas, causing bulges of the electrodes; (c) No electrons can flow through the bulged area, resulting in black spots.

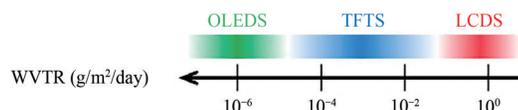


图 2 OLED 器件、TFT 器件和 LCD 器件对封装层 WVTR 的要求示意图。

Fig. 2 Schematic diagram of encapsulation layer WVTR requirements for OLED devices, TFT devices and LCD devices.

### 3 OLED 封装技术

一般来说, OLED 封装大致可分为两类:盖板封装和薄膜封装(Thin Film Encapsulation, TFT)。两种类型之间的一个明显区别是封装过程中是否使用粘合剂。根据粘合剂的种类,盖板封装还可分为两种:边框封装(图 3(a))和面贴合封装(图 3(b))。薄膜封装则不使用粘合剂,使用阻隔膜对 OLED 器件包裹以阻隔水/氧。薄膜封装通常指具有无机阻隔层-有机缓冲层-无机阻隔层的 3 层 Barix 封装结构(图 3(c))。传统盖板封装的 OLED 器件具有水/氧阻隔能力强和机械强度高的特点。如图 3(a, b)所示,盖板封装使用密

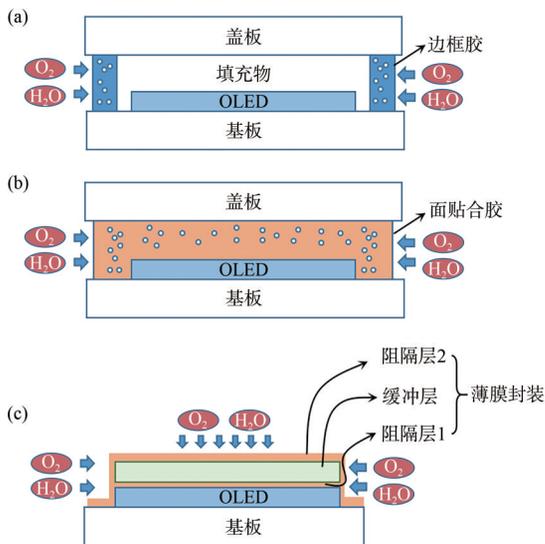


图3 (a) 边框封装结构示意图;(b) 面贴合封装结构示意图;(c) 薄膜封装结构示意图。

Fig. 3 Schematic diagram of (a) damseal encapsulation structure, (b) faceseal encapsulation structure and (c) thin film encapsulation structure.

密封胶以围边或者面贴合的方式粘接封装盖板(玻璃盖板或者金属盖板)实现对 OLED 器件的密封。玻璃和金属的阻隔能力强,水汽和氧气只能从器件边缘向内部逐渐渗透。增加密封胶的阻隔能力,如加宽边缘的密封胶宽度、改进密封胶或在密封胶内添加气体吸收材料,可提升 OLED 器件封装的可靠性<sup>[14]</sup>。然而,盖板封装的 OLED 显示器由于刚性盖板的使用,显示器厚度偏厚,灵活性也受到限制,显示器占用的空间较大,因此在车载应用的适用场景较少。

薄膜封装使用薄膜包裹 OLED 器件以阻隔外界水汽和氧气,具有重量轻、厚度薄等特点。因此,薄膜封装的 OLED 显示器具有较好的灵活性,能够实现如图 4 所示的弯折、卷曲等柔性形态。如图 3(c)所示,3层结构的 Barix 封装薄膜由第一无机阻隔层-有机缓冲层-第二无机阻隔层组成。其中,无机阻隔层的致密性好,主要起阻隔水/氧作用,且无机阻隔层的性质稳定,不会释放化学气体影响 OLED 器件。因此,无机阻隔层的致密性和稳定性对薄膜封装的稳定性具有很大影响,此处稳定性代指封装结构在设定寿命内不发生降解和下降的能力。等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)沉积的硅基薄膜( $\text{SiO}_x$ ,  $\text{SiON}$ ,



图4 弯折和卷曲形态的车载 OLED 显示器示例  
Fig. 4 Examples of bent and curled OLED displays for automotive applications

$\text{SiN}_x$ )是目前量产 OLED 显示器中常用的无机阻隔膜层,但硅基薄膜多针孔且台阶覆盖性较差, OLED 器件表面的异物容易在薄膜上留下气体入侵的缺陷。增加无机膜的厚度可以提升其水/氧阻隔能力,但厚度的增加往往会导致无机薄膜应力的增加,因此硅基薄膜厚度通常控制在  $500 \sim 1500 \text{ nm}$ ,不会超过  $1500 \text{ nm}$ 。有机缓冲层主要起平坦化作用。如图 5 所示,通过覆盖第一无机阻隔层的针孔、缺陷和包裹器件表面的杂质能够有效减少第二无机阻隔膜的缺陷,并能延长封装层内的水/氧入侵路径,降低水/氧入侵速度。通常,硅基薄膜的 WVTR 在  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  范围内,使用硅基薄膜作为阻隔层的 3 层薄膜封装的 WVTR 则可以降低至  $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 。

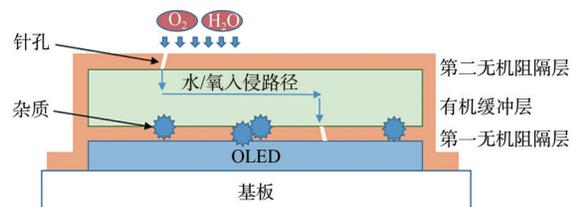


图5 3层薄膜封装的水/氧入侵路径示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of water/oxygen invasion path in a three-layer film encapsulation

#### 4 薄膜封装优化策略

由于汽车的内部空间有限,具有更加轻薄形态的薄膜封装 OLED 显示器显然更适用于未来汽车应用。但是以硅基薄膜作为阻隔膜的薄膜封装虽然基本可以满足消费电子类 OLED 显示器

的封装需求,但车载显示要求的寿命长且使用的环境温度更高。高温会加速OLED器件的劣化,这主要是因为过高的温度会影响OLED器件内有机膜层的晶态,同时还会加速水/氧入侵的进程,进而对OLED器件可靠性造成破坏<sup>[15]</sup>。因此车载OLED显示器若采用薄膜封装,则需要对现有的封装结构进行改进。如何改进薄膜封装结构,进而提升OLED器件环境可靠性也成为推进OLED显示器车载应用的关键。目前改进薄膜封装提升OLED器件环境可靠性的策略主要有3种:(1)无机薄膜气体阻隔能力提升;(2)封装结构稳定性提升;(3)封装层散热能力提升。

#### 4.1 ALD膜层和PECVD膜层的联合应用

原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物薄膜相比于PECVD沉积的硅基薄膜具有更好的致密性,且台阶覆盖能力优秀,使用ALD替代PECVD制备无机阻隔膜能显著提升薄膜封装的阻隔能力。表1列出了ALD沉积不同膜层的WVTR值,相比于PECVD沉积的硅基薄膜,ALD沉积薄膜的WVTR值明显更低<sup>[16-21]</sup>。Byoung-Hwa Kwon等人报道了使用PEALD沉积的30 nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为无机阻隔膜的3层薄膜封装,能够有效保护OLED显示器,使OLED显示器在持续点亮363天后,依然可以正常工作<sup>[22]</sup>。然而,ALD的自限制成膜方式使ALD沉积成膜的速率较慢,等离子增强原子层沉积(Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition, PEALD)的成膜速度相比于ALD成膜的速率有所提升,但其5 nm/min的成膜速率依然远低于PECVD的200 nm/min的成膜速率,限制了ALD在OLED显示器大规模量产中的应用。结合ALD和PECVD成膜的优点,是推进ALD膜层

在OLED显示器中量产应用的一种有效方式。ALD沉积的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等氧化物薄膜在10~20 nm厚度时具备了较好的气体阻隔特性,但该厚度的膜层与下面有机膜层的结合力较弱,膜层强度不足,容易出现膜层破裂的问题,进而影响封装层的阻隔性能。因此,ALD膜层单独使用时,膜层厚度通常要达到约40 nm才具有应用可行性。而氧化物膜层与同为无机化合物的硅基薄膜具有较强的作用力,因此在硅基薄膜上制备薄层ALD薄膜(10~20 nm)既可以高效获得高阻隔性能的无机膜层,又能保证无机膜层的膜层强度。如图6(a)所示,由于PECVD成膜的台阶覆盖性差,单独使用PECVD制备的硅基薄膜封装OLED器件时,OLED表面的异物会在封装层表面留下水/氧入侵的通道(红圈中黑色区域)。使用PECVD成膜和ALD成膜联合制备无机阻隔膜则能结合PECVD和ALD成膜的优势。如图6(b)所示,由于ALD制备的膜层较好的台阶覆盖特性和致密性,ALD膜层能够有效覆盖硅基薄膜表面的针孔、裂缝等水/氧入侵通道,结合PECVD和ALD制备无机膜层能够获得高阻隔性能阻隔膜。

同时,氧化物薄膜和硅基薄膜的叠层使用也能提升薄膜封装结构的稳定性。Kwon等人报道了在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜层上覆盖含 $\text{SiO}_2$ 的聚合物膜层提升膜层稳定性的方法<sup>[23]</sup>。如图7(a)所示,聚合物中

表1 ALD沉积膜层与PECVD沉积膜层阻隔性能对比

Tab.1 Contrast of the barrier properties between ALD deposition film and PECVD deposition films

膜层	沉积方式	WVTR/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )	参考文献
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	ALD	$4.2\times 10^{-5}$	[16]
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$	ALD	$4.7\times 10^{-5}$	[17]
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$	ALD	$4.6\times 10^{-6}$	[18]
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$	ALD	$7.87\times 10^{-6}$	[19]
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$	ALD	$9.94\times 10^{-6}$	[20]
$\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$	PECVD	$1.0\times 10^{-2}$	[21]

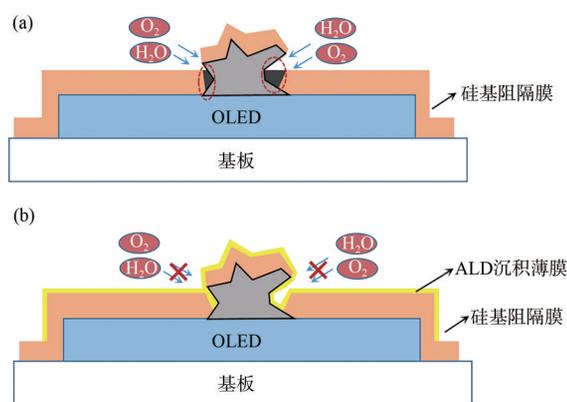


图6 (a) OLED表面异物在PECVD制备的硅基阻隔膜内产生的裂缝示意图;(b) ALD制备的氧化物薄膜覆盖硅基阻隔膜的内裂缝示意图。

Fig. 6 (a) Schematic diagram of cracks generated by OLED surface foreign matter in the silicon barrier film prepared by PECVD; (b) Schematic diagram of the cracks in the silicon-based barrier film covered by the oxide film prepared by ALD.

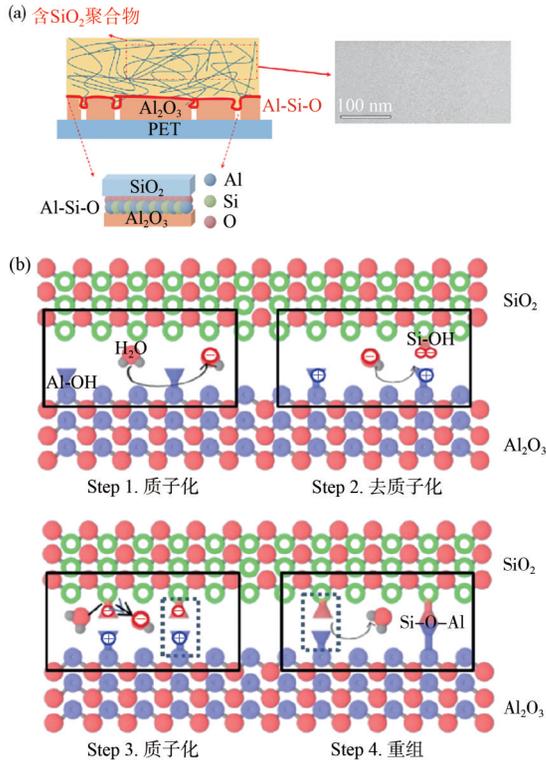


图7 (a) 含 SiO<sub>2</sub> 聚合物和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面处形成铝酸盐相示意图; (b) 界面处硅化反应示意图。

Fig. 7 (a) Schematic diagram of aluminate phase formed at the interface of SiO<sub>2</sub> polymer and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) Schematic diagram of the silicification reaction at the interface.

的 SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在界面处形成铝酸盐相使薄膜封装具有耐水腐蚀的性能,使用该方法制备的薄膜封装层在水中浸泡 7 天依然具有较好的气体阻隔性能。Jeong 等人进一步解释了基于 SiO<sub>2</sub> 的聚合物与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面上铝酸盐相的形成机理<sup>[24]</sup>。如图 7(b) 所示,在高 SiO<sub>2</sub> 含量聚合物与 ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面的界面上,一次或多次硅化反应导致 Al-O-Si 化学键合,从而阻止了无机膜层的降解相变。此外,减少膜层中的悬空键也是一种提升膜层稳定性的有效方式,例如在成膜过程中引入 H<sub>2</sub> 作为成膜气体,能够有效减少硅基膜层中的缺陷,从而提升膜层的致密性和稳定性<sup>[25]</sup>。无机膜层的稳定性往往同膜层的致密性密切相关。膜层优化和多膜层叠层使用不仅能提升膜层气体阻隔能力,也能够使薄膜的稳定性得到有效提升。但在改进膜层结构的同时还要考虑到量产应用的可行性。例如, H<sub>2</sub> 的引入往往会导致成膜过程中产生过多的高能 H 等离子,可能对 OLED 器件的性

能造成影响。多膜层结构的应用则会导致薄膜封装效率的降低,影响量产的可行性。

#### 4.2 散热膜层的引入

提升 OLED 显示器环境可靠性的另一个方式是提高 OLED 器件的散热能力。由于高温会加速 OLED 器件的劣化,而累积的热量会导致 OLED 器件内部温度升高,进而导致器件性能的下降。因此,提升封装薄膜的散热能力也是一种提高 OLED 显示器环境可靠性的有效途径。特别是在 OLED 显示器车载应用时, OLED 器件的运行环境温度更高,散热更难,器件内部的热量更容易积累,因此改进薄膜封装的散热能力对提高 OLED 器件环境可靠性和推进 OLED 显示器车载应用非常重要。通常薄膜封装由低导热系数的无机层/有机层/无机层组成,因此封装层的散热效果不理想。Kwon 等人尝试在薄膜封装结构中添加散热片来提升 OLED 散热能力<sup>[26-27]</sup>。由于 Ag 薄膜具有高导热性和良好的柔韧性,他们尝试在无机层中间添加 Ag 膜层制备如图 8(a) 所示的无机/金属/无机(Dielectric/Metal/Dielectric, DMD)结构作为薄膜封装中的第一无机阻隔层,厚度优化后,使用的 Ag 散热膜厚度为 15 nm。此时, DMD-TFE 的光透过率超过 60%, WVTR 也低至  $8.7 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 。然而,如图 8(b) 所示, 15 nm 厚 Ag 薄膜的散热效果非常弱,相比之下 100 nm 厚 Ag 膜则具有更好的散热效果。长期以来,石墨烯因其优异的导热性、导电性以及机械耐久性而备受关注。相比金属银,石墨烯的导热性更好,因此除了插入金属,石墨烯也可以用来制备更导热的 TFE。石墨烯具有碳原子构成的二维蜂窝晶格纳米结构,通常被认为具有较好的气体阻隔性能,因此也被尝试应用在薄膜封装结构中<sup>[28]</sup>。但石墨烯膜层有很多缺陷,不适合单独使用,需要与其他薄膜组成多膜层结构来提高薄膜的阻隔能力。然而目前报道的石墨烯基 TFE 的 WVTR 小于  $1 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ,并没有达到适用于 OLED 封装的水平,因此目前没有将石墨烯作为散热层引入 OLED 封装膜中的成功案例。目前,在保证 TFE 光透过率和气体阻隔性能前提下,提升 TFE 的散热能力依然没有完美的解决办法,但上述方法不失为一种提升 OLED 器件可靠性,特别是车载 OLED 显示器环境可靠

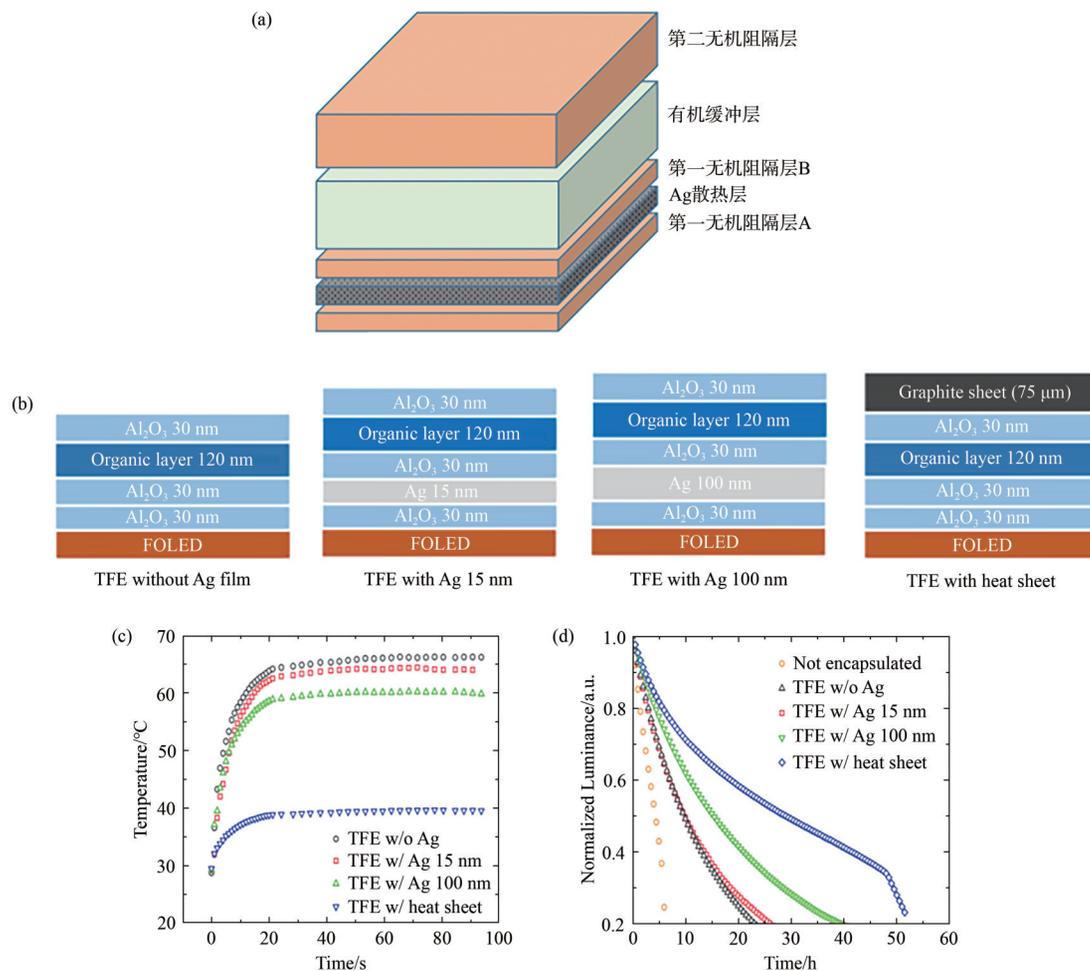


图 8 (a) 第一无机阻隔层中 DMD 结构示意图; (b) 用于对比的不同 DMD 结构图; (c) 不同 DMD 结构的散热能力对比图; (d) 不同 DMD 结构的阻隔性能对比图。

Fig.8 (a) Structure diagram of DMD in the first inorganic barrier layer; (b) Diagram of different DMD structures for comparison; (c) Comparison chart of heat dissipation capabilities of different DMD structures; (d) Comparison chart of barrier performance of different DMD structures.

性的有效办法。通过新材料的不断研发和应用,相信 OLED 器件对环境敏感的问题将会得到有效解决。

## 5 结 论

OLED 显示器作为新一代的显示技术,相比于 LCD 显示器具备诸多优势,包括广色域、高对比度、低功耗和轻薄等方面,特别是 OLED 器件能在柔性基材上制备的特性,使其适用于多形态的柔性显示方案。灵活的显示形态能够与弯曲的汽车部件集成,因此 OLED 显示器非常适合汽车上应用。但 OLED 显示器的可靠性问题是其在汽车应用中面临的一大挑战。经过多年来材

料的不断研发和器件工艺的精进,OLED 器件的内部原因降解失效已经得到了有效解决,OLED 器件的可靠性获得了稳步的提升。而车载 OLED 显示器的使用温度高,寿命要求也高,外部环境诱发的可靠性问题更加严峻。本文主要论述了在提升薄膜气体阻隔能力、提升薄膜封装稳定性和提升薄膜封装层散热能力 3 个方面改进薄膜封装,进而提升 OLED 器件可靠性的方法。其中,使用 ALD 沉积金属氧化物薄膜替代 PECVD 制备的硅基薄膜能够显著提升薄膜封装的阻隔能力,而将 ALD 成膜和 PECVD 成膜结合的方式则可以解决 ALD 成膜效率低的问题。另外,硅基薄膜和氧化物薄膜联合使用的方式还可以用于提升无机阻隔膜的膜层稳定性,Al-O-Si 的化学

键合能够有效地阻止无机膜层的降解相变。在无机膜层中插入散热膜层,可以提升薄膜封装的散热能力。虽然目前尚没有在保证光透过率和气体阻隔性能前提下,显著提升薄膜封装散热能力的完美方案,但相信通过研究者的不断努力,

OLED器件在车载环境下的可靠性问题将会有效解决。而不久的将来OLED显示器将不止在汽车的中控、仪表、副驾、后排娱乐屏中大面积应用,也将在内饰、玻璃等车身部分与汽车表面集成,从而大幅提升汽车座舱的智能化体验和便利性。

### 参 考 文 献:

- [1] SANGUESA J A, TORRES-SANZ V, GARRIDO P, *et al.* A review on electric vehicles: technologies and challenges [J]. *Smart Cities*, 2021, 4(1): 372-404.
- [2] HUANG Y G, TAN G J, GOU F W, *et al.* Prospects and challenges of mini-LED and micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(7): 387-401.
- [3] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(12): 913-915.
- [4] YEH P, GU C. *Optics of Liquid Crystal Displays* [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] LEE J H, CHEN C H, LEE P H, *et al.* Blue organic light-emitting diodes: current status, challenges, and future outlook [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(20): 5874-5888.
- [6] IJEAKU A M, CHIDUBEM M H, EMEROLE K, *et al.* Organic light emitting diode (OLED) [J]. *American Journal of Engineering Research*, 2015, 4(9): 153-159.
- [7] ZHU H H, SHIN E S, LIU A, *et al.* Printable semiconductors for backplane TFTs of flexible OLED displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(20): 1904588.
- [8] BLANKENBACH K. Advanced automotive display measurements: selected challenges and solutions [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(9): 517-525.
- [9] JOU J H, LIN Y T, SU Y T, *et al.* Plausible degradation mechanisms in organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2019, 67: 222-231.
- [10] DE MORAES I R, SCHOLZ S, LÜSSEM B, *et al.* Analysis of chemical degradation mechanism within sky blue phosphorescent organic light emitting diodes by laser-desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry [J]. *Organic Electronics*, 2011, 12(2): 341-347.
- [11] JOU J H, KUMAR S, AGRAWAL A, *et al.* Approaches for fabricating high efficiency organic light emitting diodes [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(13): 2974-3002.
- [12] PAETZOLD R, WINNACKER A, HENSELER D, *et al.* Permeation rate measurements by electrical analysis of calcium corrosion [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(12): 5147-5150.
- [13] LOGOTHETIDIS S. Flexible organic electronic devices: materials, process and applications [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2008, 152(1/3): 96-104.
- [14] XU X B, LIU Z H, ZUO Z X, *et al.* Hole selective NiO contact for efficient perovskite solar cells with carbon electrode [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(4): 2402-2408.
- [15] GÄRDITZ C, WINNACKER A, SCHINDLER F, *et al.* Impact of Joule heating on the brightness homogeneity of organic light emitting devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(10): 103506.
- [16] DAMERON A A, DAVIDSON S D, BURTON B B, *et al.* Gas diffusion barriers on polymers using multilayers fabricated by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and rapid SiO<sub>2</sub> atomic layer deposition [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2008, 112(12): 4573-4580.
- [17] MEYER J, GÖRRN P, BERTRAM F, *et al.* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> nanolaminates as ultrahigh gas-diffusion barriers—a strategy for reliable encapsulation of organic electronics [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(18): 1845-1849.
- [18] LI M, XU M, ZOU J H, *et al.* Realization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO laminated structure at low temperature for thin film encapsulation in organic light-emitting diodes [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(49): 494003.
- [19] JEONG E G, KWON S, HAN J H, *et al.* A mechanically enhanced hybrid Nano-stratified barrier with a defect

- suppression mechanism for highly reliable flexible OLEDs [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(19): 6370-6379.
- [20] JEONG S Y, SHIM H R, NA Y, *et al.* Foldable and washable textile-based OLEDs with a multi-functional near-room-temperature encapsulation layer for smart e-textiles [J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2021, 5(1): 15.
- [21] LIFKA H, VAN ESCH H A, ROSINK J J W M. Thin film encapsulation of OLED displays with a NONON stack [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2004, 35(1): 1384-1387.
- [22] KWON B H, JOO C W, CHO H, *et al.* Organic/inorganic hybrid thin-film encapsulation using inkjet printing and PEALD for industrial large-area process suitability and flexible OLED application [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(46): 55391-55402.
- [23] KWON J H, JEONG E G, JEON Y, *et al.* Design of highly water resistant, impermeable, and flexible thin-film encapsulation based on inorganic/organic hybrid layers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(3): 3251-3261.
- [24] JEONG E G, JEON Y, CHO S H, *et al.* Textile-based washable polymer solar cells for optoelectronic modules: toward self-powered smart clothing [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12(6): 1878-1889.
- [25] PARK K W, LEE S, LEE H, *et al.* High-performance thin H: SiON OLED encapsulation layer deposited by PECVD at low temperature [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(1): 58-64.
- [26] KWON J H, KIM E, IM H G, *et al.* Metal-containing thin-film encapsulation with flexibility and heat transfer [J]. *Journal of Information Display*, 2015, 16(2): 123-128.
- [27] KWON J H, CHOI S, JEON Y, *et al.* Functional design of dielectric-metal-dielectric-based thin-film encapsulation with heat transfer and flexibility for flexible displays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(32): 27062-27072.
- [28] LEE J, HAN T H, PARK M H, *et al.* Synergetic electrode architecture for efficient graphene-based flexible organic light-emitting diodes [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 11791.

#### 作者简介:



苗洋,男,博士,工程师,2018年于吉林大学获得博士学位,主要从事OLED显示器可靠性方面的研究。  
E-mail:13596192889@163.com