

文章编号:1007-2780(2026)03-0353-10

## 基于 TFE 中 SiON 薄膜变化引起的 OLED 挖孔屏孔区彩虹纹现象

蔡汉坤, 杨金金\*, 李佐斌, 涂秋梅, 张国峰\*

1. 天马微电子股份有限公司 厦门天马显示科技有限公司, 福建 厦门 361105;
2. 天马微电子股份有限公司 武汉天马微电子有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**近年来随着手机薄型化趋势的发展以及对可靠性要求的提高,OLED(Organic Light-Emitting Diode)屏幕孔区出现彩虹纹现象的比例有一定的上升。本文定性、定量地分析了 OLED 屏幕孔区出现彩虹纹现象的原因,并基于此,建立了一套相对完备的可以相互交叉印证结果的多维度分析测试方法。对薄膜封装(Thin Film Encapsulation, TFE)膜层结构成分的进一步优化,可以最大限度地降低可靠性测试后出现与孔区彩虹纹相关的暗斑风险。通过裂片,分析了高温高湿实验条件下孔区发生彩虹纹的区域和位置;并以透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)、飞行时间二次离子质谱(Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry, TOF-SIMS)和 X 射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)系统分析了孔区产生现象的原因。实验结果表明,CVD1 (Chemical Vapor Deposition 1)中 SiON 在高温高湿条件下,会逐步向 SiO 膜层转化。TEM 和 TOF-SIMS 的结果表明,被氧化后膜层的含氮量小于 2%;XPS 分峰结果显示,CVD1-2 表面的 SiON 几乎全部转化为 SiO 膜层。通过将 TFE 中 CVD1-1 的 SiON 膜层折光率从 1.72 提升为 1.76,CVD1-1 的 SiON 膜层被氧化的深度下降了 70%。该分析方法的建立不仅解释了孔区 CVD 膜层被氧化后生成的 SiO 是造成出现彩虹纹现象的原因,而且提出了彩虹纹区域对 OLED 面板孔区可靠性的影响。该方案策略为 OLED 显示未来在车载、IT(Information Technology)、广告牌等具有更高可靠性要求领域的应用提供了相应的解决思路。

**关键词:**彩虹纹现象;OLED 挖孔屏;薄膜封装;氮氧化硅;氧化硅

**中图分类号:**TN27;TN383+.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2025-0240 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2025-0240

## Rainbow phenomenon in the punch-hole area of OLED displays caused by SiON thin films changes in TFE

CAI Hankun, YANG Jinjin\*, LI Zuobin, TU Qiumei, ZHANG Guofeng\*

1. Xiamen Tianma Display Technology Co. Ltd., Tianma Microelectronics Co. Ltd.,  
Xiamen 361105, China;
2. Wuhan Tianma Microelectronics Co. Ltd., Tianma Microelectronics Co. Ltd.,  
Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In recent years, with the development of tendency toward thinner smartphones and higher reliability

收稿日期:2025-11-27;修订日期:2026-02-10.

基金项目:国家重点研发计划(No.2023YFB3612002);厦门市科技计划(No.3502Z20231052)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB3612002); Xiamen Science and Technology Plan (No.3502Z20231052)

\*通信联系人, E-mail: jinjin\_yang@tianma.cn; guofeng\_zhang@tianma.cn

(RA) requirements, the proportion of OLED panels exhibiting rainbow phenomenon around the punch-hole area has increased. In response to this phenomenon, we established qualitative and quantitative analyses methods to identify the reasons of this phenomenon and conducted a comprehensive, mutually corroborative set of multi-dimensional analytical testing methods. Furthermore, with optimization of the TFE film-stack composition, the risk of dark spots could be minimized after RA tests, which is associated with rainbow-mura formation in OLED punch-hole displays. Through the cleavage of panel module, rainbow-mura around the punch-hole area was exactly located. Cross-sectional TEM, TOF-SIMS and XPS were then used to elucidate the formation mechanism. The data show that the SiON layer in CVD1 can be gradually converted to SiO under high temperature and high humidity conditions; TEM and TOF-SIMS results reveal that nitrogen content in SiON is below 2% after RA tests, while XPS peaks indicate that the SiON on the CVD1-2 surface has been almost completely transformed into SiO. By increasing the refractive index of the SiON layer from 1.72 to 1.76 in CVD1-1 of the TFE, the oxidation depth of the SiON film was reduced by 70%. The above-mentioned establishment of analytical method not only clarifies that the rainbow-mura phenomenon around the punch-hole is caused by the formation of SiO due to film oxidation, but also quantifies the influences of the punch-hole regions under long-term RA test. This strategic approach provides a viable solution path for OLED's future deployments in automotive, IT signage, and other applications with more stringent reliability requirements.

**Key words:** rainbow phenomenon; punch-hole in OLED displays; thin-film encapsulation; silicon oxynitride; silicon oxide

## 1 引 言

OLED是一种自发光的显示技术,即夹在两个电极之间的薄层有机发光材料在有电流通过时,有机层会产生光子而直接发光<sup>[1-3]</sup>。与传统的液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)相比<sup>[4-8]</sup>, OLED具有高色域、高对比度、快响应速率、低功耗、更加轻薄、可弯曲、可折叠等特点,是目前最具竞争力的显示技术之一。依据市场调研机构Omida报告显示,2024年OLED手机的出货量首次超越LCD,市场占比51%,预计到2031年,市场占比将进一步扩大到68%<sup>[9]</sup>。OLED产品按照基底的差异可以分为玻璃基的刚性OLED面板和聚酰亚胺(Polyimide, PI)为基底的柔性OLED面板;依据封装方式的差异,可以分为Frit封装和薄膜封装(TFE)。相比于刚性的Frit封装(厚度约0.2 mm),柔性的TFE封装(厚度约0.012 mm)的厚度不足刚性封装的1/10,可以更加彰显OLED薄型化的技术特点。随着TFE封装技术的逐渐成熟,柔性OLED智能手机面板的市占率不断提高。

TFE通常有无机/有机/无机的类三明治结构构成,无机层一般可以由化学气相沉积(Chmical

Vapor Deposition, CVD)或等离子体化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)或原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)成膜工艺形成,薄膜成分通常是由SiO、SiON、SiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等构成<sup>[10]</sup>;有机层主要由亚克力墨水或环辛烯墨水等通过喷墨打印(Ink-Jet Printing, IJP)工艺后,光固化形成对应的聚合物平坦化膜层。TFE中的无机CVD膜层不仅可以阻隔外界水氧侵蚀,保护OLED器件,增强整体OLED面板可靠性,而且还可以提高OLED器件出光效率,降低面板的功耗<sup>[11-12]</sup>。此外,CVD成膜速度与膜质也影响着其与IJP膜层的黏附力,进而影响整体TFE膜层之间的黏附力。虽然已有关于TFE膜层的稳定性以及影响性的报道<sup>[13]</sup>,但针对CVD1的膜层设计对OLED屏幕孔区可靠性影响的相关报道较少,特别是针对长时间可靠性实验下,TFE稳定性的研究鲜有报道。本文聚焦于CVD1膜层在长期高温高湿实验条件下其膜层变化对OLED屏幕可靠性的影响,重点讨论分析了这种影响变化的原因,进一步提出了可以提升OLED屏幕可靠性的解决方案,以期未来OLED屏幕在具有更高可靠性要求的显示领域(如车载OLED、IT、广告牌、高性能OLED手表和高性能OLED手机等)

具有更高的市场份额。同时,高温高湿条件下CVD封装可靠性的研究也可以为其在电子封装领域其他方面的研究<sup>[14-17]</sup>和应用提供一定的结果参考。

## 2 TFE膜层在高温高湿条件下的稳定性及其变化的机理分析

### 2.1 高温高湿条件下的可靠性实验和彩虹纹现象

图1为典型的面板叠构示意图,其中TFE膜层位于OLED器件层和触控层(Touch Pattern on TFE, TPOT)之间,TPOT包含金属电极(Touch Metal 1(TM1)和Touch Metal 2(TM2))与介电层(Touch Passivation 1(TP1)和Touch Passivation 2(TP2)),其上还有偏光片层(Polarizer, POL)、光学透明胶(Optical Clear Adhesive, OCA)、盖板(Cover Glass, CG)。TFE的下方有OLED蒸镀层、阳极、像素定义层(Halftone Pixel definition layer, HP)和其他阵列层(Array)。阵列层下方为对应的背板支撑层(Backplate, BP)和复合缓冲泡棉(Super Clean Foam, SCF)。

验证85%环境湿度和85℃温度下(D85)OLED屏幕的可持续工作时间,是一种常用的可靠性实验。该实验不仅可以模拟验证OLED屏幕

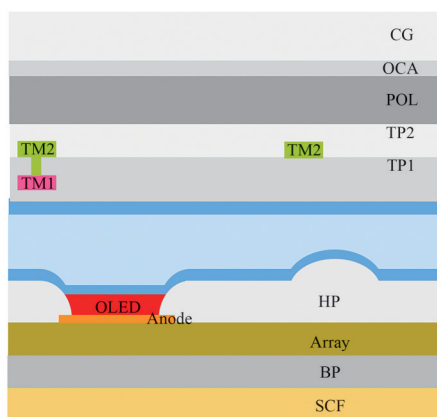


图1 面板膜层叠构示意图

Fig. 1 Typical diagram of panel stack structure

在极端工作条件下的封装可靠性,而且可以验证OLED屏幕在极端环境下的功能、结构和显示性能是否保持,排除因环境因素导致的早期失效。近期,在面板模组样品经过D85实验240 h后,进行显微镜(Optical Microscope(OM),基恩士VHX-700)镜检过程发现了挖孔屏孔附近出现彩虹纹现象(图2)。进一步延长D85实验时间至720 h,孔区概率性出现暗斑,暗斑位置与彩虹纹位置匹配。

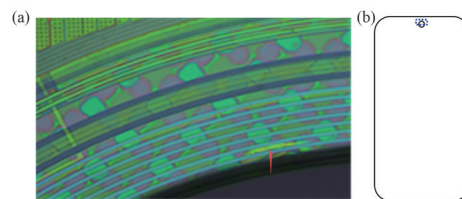


图2 孔区彩虹纹现象(a)和位置(b)

Fig. 2 Rainbow phenomenon (a) and its location (b) around the punch-hole area

### 2.2 孔区彩虹纹现象的机理分析

目前,市售OLED手机中RGB器件的厚度约为300~600 nm,而柔性OLED屏大部分是挖孔屏。为了实现孔区OLED器件的封装,孔区对应的隔断高度需大于OLED器件的厚度。目前采用较多的一种挖孔屏设计是利用屏内的金属膜层(Ti/Al/Ti,厚度大于700 nm),通过特异性的蚀刻工艺,实现孔区OLED材料层的隔断,之后进行TFE封装,实现对整体OLED屏幕的防护。孔区相应的截面如图3所示,堤坝内侧有1~4根金属隔断(内隔离柱),堤坝外侧有4~10根(外隔离柱),具体数量依据孔区边框的要求而有所变化,金属隔离柱的截面结构如图3所示。

我们通过拆片观测正常模组和有彩虹纹区域的模组样品,确定模组材料膜层无明显的变化之后,重点对彩虹纹区域面板膜层进行了解析。如图4所示,利用透射电子显微镜(TEM,FEI Talos F200X)分析可靠性测试(RA)前后金属隔

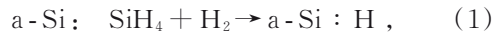


图3 挖孔屏孔区隔断示意图

Fig. 3 Schematic cross-section of the isolation structures in a punch-hole region

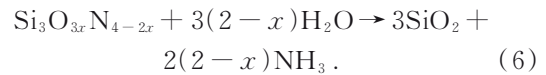
断区域的无机层和金属膜层的差异性。整体对比如图 4(a)(正常样)和图 4(f)(异常样)所示,异常区域 TFE 的 CVD 膜层中氧元素含量异常偏高,结合膜层厚度和成分,我们确定 CVD1 膜层的氧元素为主要异常(图 4(b)和图 4(g)),其中 EVA(Evaporation)为 OLED 蒸镀层,位于 CVD1 底部,靠近 EVA 侧的 SiON 无机层的氧含量约从 26% 上升至 58%,上升了 32%。这可能是由于孔区边缘 EVA 材料与 CVD 膜层之间出现部分空隙,水氧更容易渗透到 CVD1-1 膜层导致 CVD1-1 的氧化变化更为明显。相对应的 N 元素含量从 22% 下降至 2% 以下(图 4(c)和图 4(h)),下降了约 20%,元素线扫描结果如图 4(e)和图 4(j)所示。

OLED 器件中 TFE 中的 SiO、SiON 和 SiN 无机膜一般采用 PECVD 工艺形成,反应方程式见式(1)~式(4)<sup>[18-19]</sup>:



$$x_0 = \frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{N}_2\text{O} + \text{NH}_3}, \quad (5)$$

对于 SiON 膜层,其氧含量比例可以用  $x_0$ (式(5))表示,若  $x=0$ ,则表示该无机膜为纯 SiN 膜层;若  $x=1$ ,则表示该无机膜为 SiO 膜层。氧含量的差异决定了 SiN 或者 SiON 膜层的透水率和折光率性质的差异。基于此,我们在硅片上进行 CVD 镀膜重复以上 RA 实验,利用 TEM 和 TOF-SIMS(PHI, Nano TOF3)重点分析表面 CVD1-1(1 000 nm)和 CVD1-2(100 nm)膜层成分的变化(图 5)。经过 D85 RA 实验后(图 5(b)),CVD1-2 膜层中  $\text{Si}_2\text{N}$  被氧化而造成信号急剧下降(图 5(c),蓝色箭头所示),信号强度约为 RA 前的 1%。CVD1-2 和 CVD1-1 中部分膜层对应的 Si—O 的含量升高(黑色箭头)进一步说明表面的 SiON 膜层逐渐被氧化,且最终组成与 CVD1-2 的成分基本相同。图 5(a)和图 5(b)中的结果也与图 4 中 TEM 结果匹配,其反应方程如式(6)所示:



我们通过 XPS(Thermo Scientific, ESCALAB Xi+)分析了 CVD1 表面 SiON 膜层的成分变化。

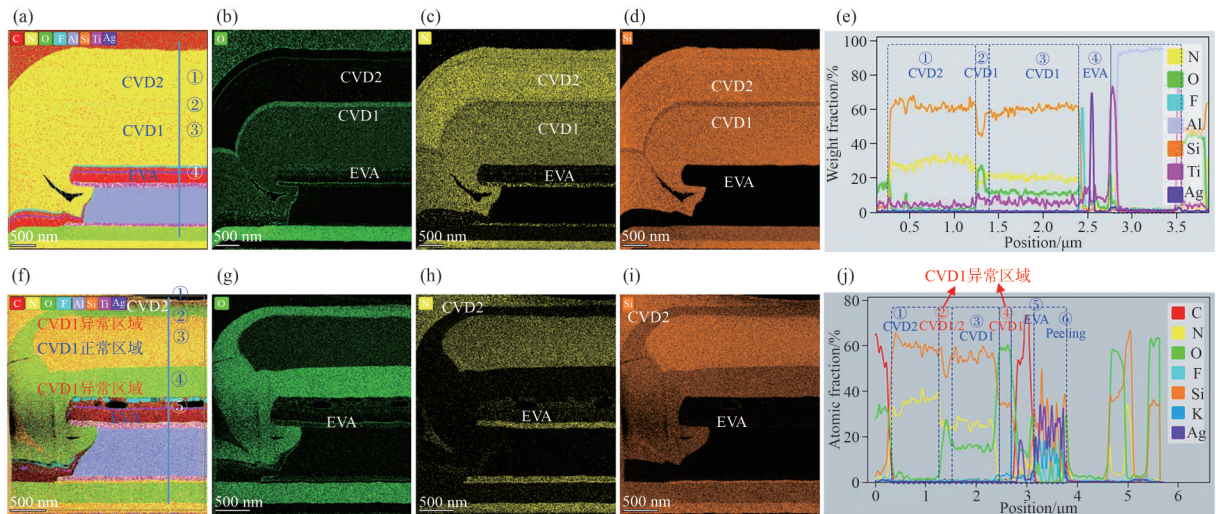


图 4 TEM 分析 RA 前后孔区 TFE 膜层成分变化。RA 前:(a) 不同元素对应的能量色散 X 射线光谱(EDS)mapping 图像;(b~d) O、N、Si 元素对应的能量色散 X 射线光谱;(e) 图(a)中蓝色线条对应的元素线扫描图。RA 后:(f) 不同元素对应的能量色散 X 射线光谱(EDS)mapping 图像;(g~i) O、N、Si 元素对应的能量色散 X 射线光谱;(j) 图(f)中蓝色线条对应的元素线扫描图。

Fig. 4 TEM images of TFE film composition changes in the punch-hole region before and after RA. Before RA: (a) Overall EDS image of all elements mapping; (b~d) O, N, Si EDS mapping images, respectively; (e) Line-scan profile along the blue line in Fig. 4(a). After RA: (f) Overall EDS image of all elements mapping; (g~i) O, N, Si EDS mapping images, respectively; (j) Line-scan profile along the blue line in Fig. 4(f).

如图 6(a)和 6(e)所示:RA 前,我们可以明显观测到全谱峰中 Si、O、N 元素明显出峰;RA 后,全谱峰仅可见 Si、O 元素,N 元素无明显出峰。

我们进一步对比了 RA 前后 Si、O、N 窄谱数据。RA 前,对 Si 2p、O 1s 以及 N 1s 进行分峰拟合,均可见  $\text{NSi}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si-N-O}$  峰位,说明 RA 前

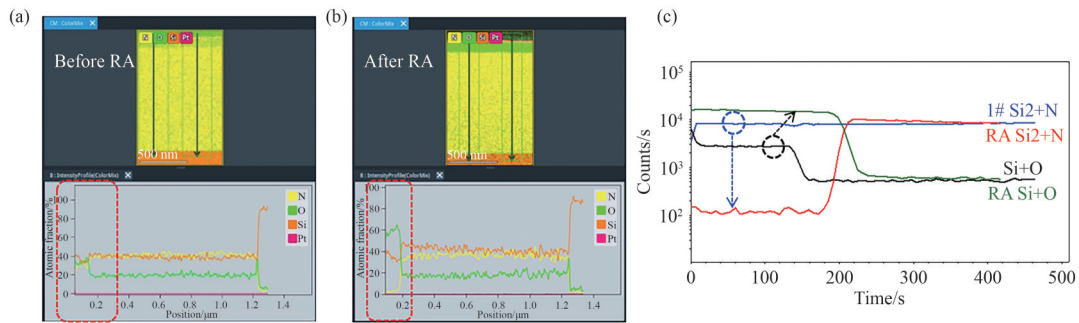


图 5 (a) RA 前 CVD1 的膜层成分; (b) RA 后 CVD1 的膜层成分; (c) CVD1 表面 RA 前后的 TOF-SIMS 结果分析。

Fig. 5 (a) Composition in CVD1 film before RA; (b) Composition changes in CVD1 film after RA; (c) TOF-SIMS analyses of CVD1 surface before and after RA.

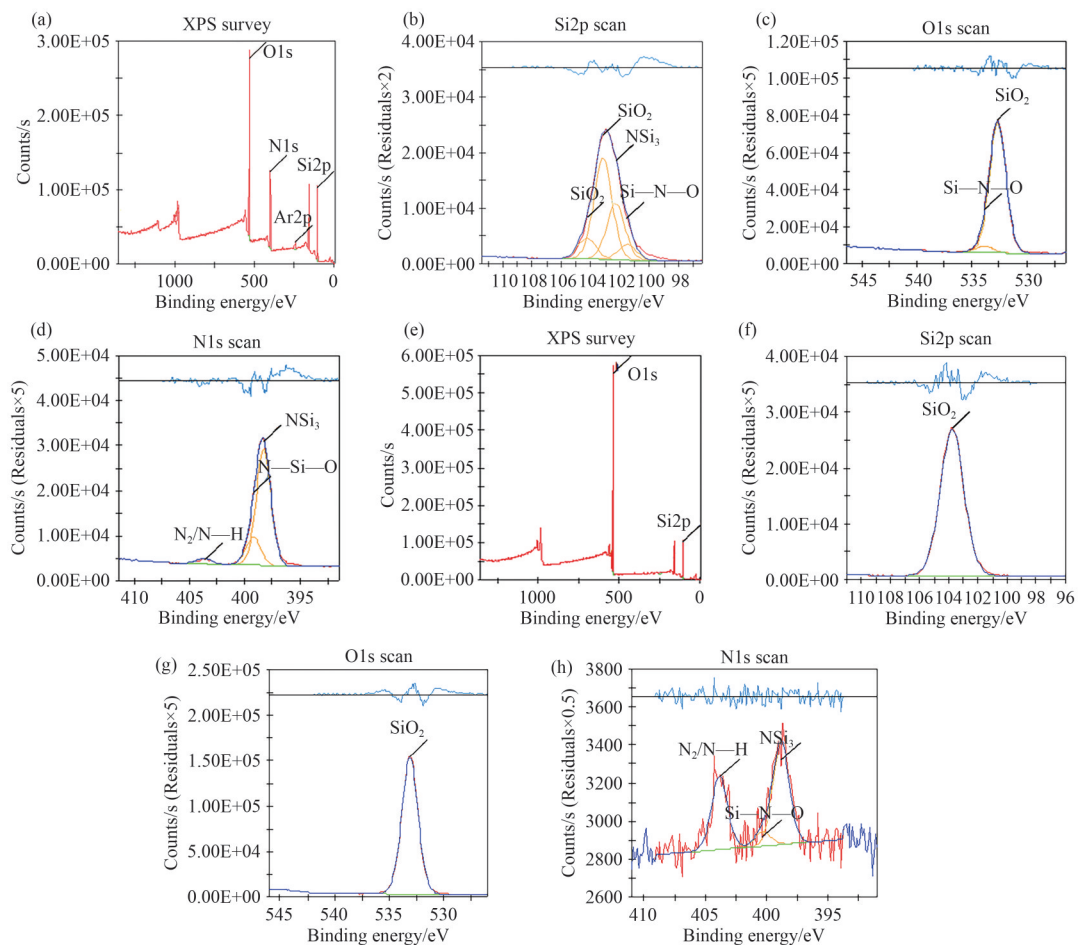


图 6 CVD1 表面 RA 前后的 XPS 结果分析。RA 前: (a) Si、O、N 元素的全谱峰; (b~d) Si 2p、O 1s、N 1s 元素所对应的峰位分峰拟合; RA 后: (e) Si、O、N 元素的全谱峰; (f~h) Si 2p、O 1s、N 1s 元素所对应的峰位分峰拟合。

Fig. 6 XPS analyses of CVD1 surface before and after RA. Before RA: (a) Survey spectrum of Si, O, and N; (b~d) Peak-fitted profiles of Si 2p, O 1s, and N 1s, respectively; After RA: (e) Survey spectrum of Si, O, and N; (f~h) Peak-fitted profiles of Si 2p, O 1s, and N 1s, respectively.

CVD1膜层主要成分为SiON(图6(b)和图6(c))。而RA氧化后,Si 2p和O 1s的主要存在形式均为SiO<sub>2</sub>(图6(f)和图6(g)),N 1s中仅NSi<sub>3</sub>微弱出峰(图6(h)),说明RA后CVD1表面SiON膜层已几乎全部被氧化成SiO<sub>2</sub><sup>[20-23]</sup>。这一结果与TEM、TOF-SIMS等结果可以相互印证,说明以上3种不同的分析实验或相互组合可以很好地表征TFE的CVD1膜层成分变化,相互组合叠加分析可以更好、更精确地表征相关膜层的成分变化信息。

### 3 实验设计与结果讨论分析

#### 3.1 折光率的调整

SiON膜层的折光率随着氮氧原子比例的不同而不同,通常范围为1.45~2.01<sup>[13]</sup>。由于OLED器件对于高温相对敏感,TFE的成膜温度一般位于80~90℃之间。相应地,该条件下的SiON膜层一般为无定形态的非化学计量的结构,其微观有序性主要由两种模式组成:随机混合模型(Random Mixture Model, RMM)和随机绑定模型(Random Bounding Model, RBM)<sup>[18]</sup>。Si—N的键能为5.2 eV, Si—O的键能为8.26 eV,因此从热力学角度考虑, Si—O的键能更高,稳定性更强<sup>[23]</sup>。然而SiN<sub>x</sub>膜层具有更好的阻隔水氧性能,其水蒸气透过率(Water Vapor Transmission Rate, WVTR)约是SiO<sub>2</sub>薄膜的1/100<sup>[24]</sup>。SiON中N元素含量的升高可以改善SiON膜层的水氧阻隔能力,基于此,我们调整CVD1-1中N的含量,即通过折光率的调整进一步研究了CVD薄膜的稳定性和阻隔水氧性能,对比示意如图7所示。

CVD1-2 SiON 100 nm 1.61	CVD1-2 SiON 100 nm 1.61
CVD1-1 SiON 0.9 um 1.72	CVD1-1 SiON 1.18 um 1.76
Wafer	Wafer
POR	T1

图7 不同CVD1膜层的对比(基准条件(POR)与改进方案T1)

Fig. 7 Comparison of different CVD1 film structures (POR and T1)

#### 3.2 可靠性实验结果

##### 3.2.1 TEM结果分析

高加速应力测试(Highly Accelerated Stress

Test, HAST)是一种通过在受控环境中施加高温、高湿度和压力,模拟电子产品在长期使用过程中可能遇到的恶劣条件,以预测其耐久性和可靠性,也常用于OLED模组的失效实验评估。OLED的HAST测试通常是在0.122 MPa的压力下、温度110℃、相对湿度为85%进行,是一种常用的代替D85实验,可以更快地评估水氧渗透和扩散对屏幕可靠性影响的实验。如图8所示,HAST(HIRAYAMA, PC-422R8)实验16 h后,基准条件(POR)样品CVD1膜层被氧化的总厚度为127.6 nm,说明CVD1-2膜层几乎被全部氧化,CVD1-1膜层(折光率为1.72)的表面27 nm左右被氧化(图8(a))。EDS图谱和线扫描(图8(b),图8(c))结果显示,样品中不同位置的结果趋势一致,氧化形成的SiO成分基本一致。

对比POR,改进方案T1膜层中CVD1-2的膜层成分与POR一致(折光率为1.61),CVD1-1膜层的折光率从1.72提升至1.76。RA后,T1的SiON膜层被氧化总深度约为108 nm(图8(d)),说明CVD1-1中的SiON膜层约8 nm被氧化为SiO,其深度低于POR条件下的SiON膜层的被氧化深度,降低比例约为70%。EDS图谱和线扫描(图8(c)和图8(f))结果显示,样品中不同位置的结果趋势一致,氧化形成的SiO成分基本一致。这说明随着折光率的提升,即SiON中N成分比例的提高,有助于改善CVD膜层的耐水氧侵蚀性能,从而提高膜层的封装可靠性。

##### 3.2.2 TOF-SIMS结果分析

进一步我们通过TOF-SIMS实验分析了HAST 16 h实验前后,POR和T1实验的结果差异。如图9所示,经过RA后,POR条件中CVD1膜层中Si<sub>2</sub>N信号急剧下降,碎片强度约为RA前的3.5%,整体CVD的被氧化深度约为130 nm,说明CVD1-1的被氧化深度约为30 nm。相应的SiN强度比例也下降了约30%,而对应的SiO和SiO<sub>2</sub>成分强度经过RA后分别上升了约9倍和2倍,以上相关的变化位置均位于横轴的200 s附近,说明相应的膜层成分变化基本为同步发生。RA之后T1膜层中Si<sub>2</sub>N、SiN、SiO<sub>2</sub>趋势与POR表现一致,但其氧化深度低于POR条件,说明更高的含N量可以降低CVD1-1膜层的水氧透过率,减缓膜层的被氧化深度。这一结果也与图8中的TEM结果一致。

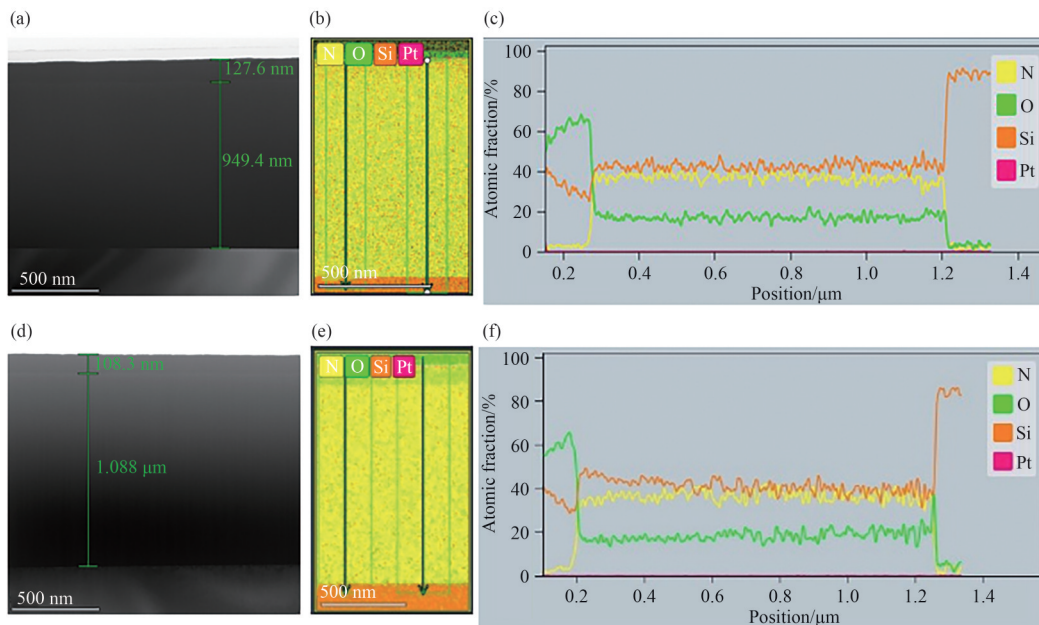


图 8 RA 后,TEM 分析 POR 与 T1 膜层的成分变化。(a)POR 膜层的 TEM 分析图;(b) POR 膜层不同元素对应的能量色散 X 射线光谱 mapping 图像;(c) 图(b)中蓝色线条对应的元素线扫描图;(d) T1 膜层的 TEM 分析图;(e) T1 膜层不同元素对应的能量色散 X 射线光谱 mapping 图像;(f) 图(e)中蓝色线条对应的元素线扫描图。

Fig. 8 TEM analyses of composition changes in POR and T1 films after RA. (a) TEM image of the thickness of POR film; (b) EDS elemental maps of the POR film; (c) Line-scan profile along the blue line in Fig. 8(b); (d) TEM image of the thickness of T1 film; (e) EDS elemental maps of the T1 film; (f) Line-scan profile along the blue line in Fig. 8(e).

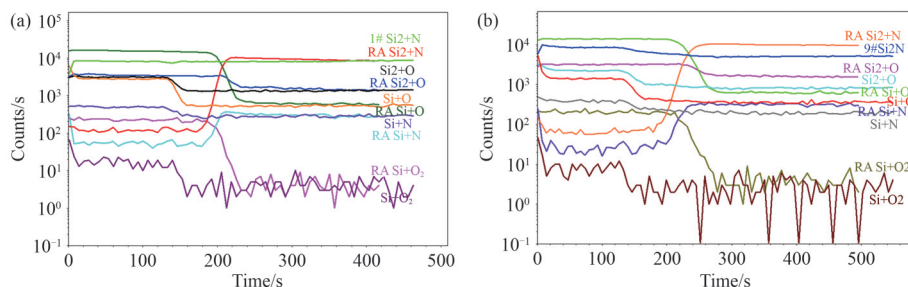


图 9 RA 后,TOF-SIMS 分析的 POR 与 T1 膜层成分变化。(a)POR;(b)T1。

Fig. 9 TOF-SIMS analyses of composition changes in POR and T1 films after RA. (a) POR; (b) T1.

OLED 中 TFE 膜层的 SiO、SiON 或 SiN 等膜层是通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)形成<sup>[24]</sup>。即腔体内反应气体在等离子体作用下,在被加热衬底表面发生化学反应形成薄膜的一个过程。因此,PECVD 由于等离子独特的作用使得薄膜在较低温度下也可以沉积,低温生长避免了温度对 OLED 材料的破坏,同时薄膜具有良好的覆盖性能。依据成膜组分的差异,SiO、SiON 或者 SiN 薄膜可具备不同的厚度、折射率与均匀性。半导体工业中,不同厚度的 SiO、SiN 膜层表

现出不同的颜色差异<sup>[13]</sup>。孔区的 TFE 膜层中的 CVD1-2 和部分 CVD1-1 膜层经过 RA 实验后,膜层成分由 SiON 转变为 SiO,该变化的宏观表现为被氧化区域出现了特异性的彩虹状现象。该区域 SiON 的膜质变化可能导致可靠性减弱,进而导致在水氧进一步侵蚀下而出现暗斑的风险,彩虹纹的位置和区域在一定程度上反应了 TFE 膜层被氧化的程度。

TFE 结构中 CVD1 不仅具有保护 OLED 器件、调节 OLED 器件的出光效率的作用,还可以

调节上下相邻膜层的黏附性,防止膜层间剥离而出现可靠性不良。特别是CVD1-2顶部膜层的调整可以促进IJP流平,进而防止IJP Mura的产生。结合TEM和TOF-SIMS的分析结果,我们发现将CVD1-1的SiON的折光率提高之后,有助于改善其整体面板的封装可靠性。然而由于孔区位置CVD本身成膜覆盖性的差异,孔区金属隔离柱的侧面处CVD1-1的膜层厚度只有正常区域的厚度的10%~20%,厚度约为100~250 nm。在不改变厚度的前提下,提高CVD1-1的折光率可以一定程度改善孔区域的封装可靠性,进而

改善长时间RA后,可能出现的暗斑状况。对比POR条件,HAST实验23 h之后,彩虹纹位于第五隔离柱(图10(a)),41 h之后位于第六隔离柱(图10(b));改善后的T1对应的模组可靠性效果如图10所示:经过HAST 23 h实验之后,彩虹纹位于距离切割边的第二金属隔离柱而没有引起对应的暗斑(图10(c));进一步延长至41 h后,彩虹纹基本止步于第三根金属隔离柱位置(图10(d)),说明该TFE膜层性能的改善可以对应于具有更高可靠性要求的OLED产品,具有良好的量产可行性。

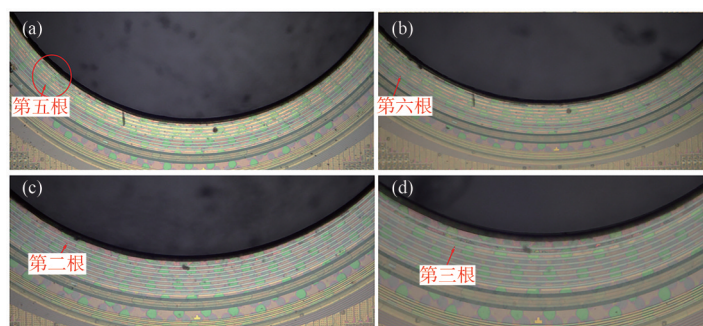


图10 POR条件彩虹纹的位置:(a) HAST实验23 h后,彩虹纹位于第五根隔离柱;(b) HAST实验41 h后,彩虹纹位于第六根隔离柱。T1条件彩虹纹的位置:(c) HAST实验23 h后,彩虹纹位于第二根隔离柱;(d) HAST实验41 h后,彩虹纹位于第三根隔离柱。

Fig. 10 Positions of the rainbow patterns under POR conditions: (a) After 23 h of HAST, the pattern appears at the 5th spacer rib; (b) After 41 h of HAST, it moves to the 6th spacer rib. Positions of the rainbow patterns under T1 conditions: (c) After 23 h of HAST, the pattern appears at the 2nd spacer rib; (d) After 41 h of HAST, it moves to the 3rd spacer rib.

## 4 结 论

本文系统分析了RA实验前后OLED模组屏孔区出现彩虹纹现象的原因,结合TEM、TOF-SIMS、XPS等仪器分析的结果,提出了高温高湿下CVD1中SiON膜层几乎全部转化为SiO膜层并伴随着折射率的变化是产生这种彩虹纹现象的本质原因。3种仪器测试分析结果相互自洽,为OLED屏幕相关现象的研究分析提供了较好的分析模式。通过进一步将CVD1-1膜层折

光率从1.72调整为1.76之后,SiON膜层的致密性提升,进而改善了整体OLED模组的封装可靠性,D85 RA 480 h乃至RA 720 h结果展示出OLED屏幕显示良好。该方案为OLED挖孔显示屏在车载、IT、广告牌等具有更高可靠性要求或者多样性需求领域的应用与普及奠定了良好基础。高温高湿条件下CVD膜层封装可靠性的研究也为其在电子封装领域其他方面的研究和应用提供了一定的结果参考与相应的解决思路。

## 参 考 文 献:

[1] 于军胜,黄维. OLED显示技术[M]. 北京:电子工业出版社,2021.

YU J S, HUANG W. *OLED Display Technology* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.

- (in Chinese)
- [2] TANG C W, VANSLYKE S A. Organic electroluminescent diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(12): 913-915.
- [3] GONG J Y, BIABANIFARD M, YOSHIDA K, *et al.* OLED illuminated metasurfaces for holographic image projection [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 294.
- [4] 马群刚. TFT-LCD原理与设计[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2020.  
MA Q G. *Principle and Design of TFT-LCD* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020. (in Chinese)
- [5] 李继军,聂晓梦,甄威,等. 显示技术比较及新进展[J]. 液晶与显示,2018,33(1):74-84.  
LI J J, NIE X M, ZHEN W, *et al.* New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [6] 刘迪莹,钟锦耀,唐彪,等. 柔性印刷OLED研究进展[J]. 液晶与显示,2021,36(2):217-228.  
LIU D X, ZHONG J Y, TANG B, *et al.* Research progress of flexible and printed OLED [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 217-228. (in Chinese)
- [7] WANG D, LI Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [8] WANG Z Y, ZHOU Z, ZHANG H, *et al.* Vectorial liquid-crystal holography [J]. *eLight*, 2024, 4(1): 5.
- [9] SHAO J, KANG J. OLED & flexible display technology tracker [EB/OL]. (2026-02-24). <https://omdia.tech.informa.com/collections/afccd061/oled--flexible-display-technology-tracker>.
- [10] LEE S, HAN J H, LEE S H, *et al.* Review of organic/inorganic thin film encapsulation by atomic layer deposition for a flexible OLED display [J]. *JOM*, 2019, 71(1): 197-211.
- [11] YANG H I, MUDE N N, KIM J Y, *et al.* High light extraction performance using evanescent waves for top emission OLED applications with thin film encapsulation [J]. *Optics Express*, 2023, 31(11): 18407-18419.
- [12] JUNG E, HUH M S, KEY S H, *et al.* Formation of silicon-based thin-film encapsulation for fabrication of highly flexible OLED devices [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 305-308.
- [13] LEE H I, PARK J B, XIANYU W X, *et al.* Degradation by water vapor of hydrogenated amorphous silicon oxynitride films grown at low temperature [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14146.
- [14] 薛正群. 光通信用高速半导体激光器的研制及可靠性研究[D]. 福州:中国科学院福建物质结构研究所,2017.  
XUE Z Q. Fabrication of InP high speed laser and the study on reliability of the laser devices [D]. Fuzhou: Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [15] 陈伟强. InAs/GaSb超晶格红外探测器工艺与性能研究[D]. 北京:中国科学院半导体研究所,2023.  
CHEN W Q. Process and performance study of InAs/GaSb superlattice infrared detectors [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
- [16] QUIRK M, SERDA J. 半导体制造技术[M]. 韩邦生,译. 北京:电子工业出版社,2015.  
QUIRK M, SERDA J. *Semiconductor Manufacturing Technology* [M]. HAN Z S, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [17] 狄佳钰,崔艳,吴瑞祥,等. 高性能零维非铅钙钛矿薄膜光电探测器[J]. 中国光学(中英文),2025,18(4): 748-755.  
DI J Y, CUI Y, WU R X, *et al.* High-performance photodetectors based on zero-dimensional lead-free perovskite thin films [J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 748-755. (in Chinese)
- [18] DUPUIS J, FOURMOND E, LELIÈVRE J F, *et al.* Impact of PECVD SiON stoichiometry and post-annealing on the silicon surface passivation [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(20): 6954-6958.
- [19] DUPUIS J, FOURMOND E, BALLUTAUD D, *et al.* Optical and structural properties of silicon oxynitride deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 519(4): 1325-1333.
- [20] 邬洋,衣立新,王申伟,等. 磁控溅射法沉积SiN<sub>x</sub>非晶薄膜的生长机制及结构分析[J]. 光谱学与光谱分析,2009, 29(5):1260-1263.  
WU Y, YI L X, WANG S W, *et al.* Deposition and structures analysis of amorphous SiN<sub>x</sub> films prepared by

- magnetron sputtering [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(5): 1260-1263. (in Chinese)
- [21] 王陈文, 张海宝, 陈强. 螺旋波等离子体研究进展[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(8): 710-720.  
WANG C W, ZHANG H B, CHEN Q. Recent progress on helicon plasma [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(8): 710-720. (in Chinese)
- [22] COVA P, POULIN S, GRENIER O, *et al.* A method for the analysis of multiphase bonding structures in amorphous SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073518.
- [23] VOGT M, HAUPTMANN R. Plasma-deposited passivation layers for moisture and water protection [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995, 74-75: 676-681.
- [24] SHIN S M, YOON H W, JANG Y S, *et al.* Stoichiometric silicon nitride thin films for gas barrier, with applications to flexible and stretchable OLED encapsulation [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(18): 181901.

作者简介:



蔡汉坤,男,学士,工程师,2008年于龙岩学院获得学士学位,主要从事新型显示技术、工艺开发与量产等方面的研究。E-mail:hankun\_cai@tianma.cn



张国峰,男,博士,高级工程师,2015年于华中科技大学获得博士学位,主要从事新型显示和模组技术的开发与量产等方面的研究。E-mail:guofeng\_zhang@tianma.cn



杨金金,男,学士,工程师,2009年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事新型显示技术的开发与量产、薄膜晶体管、模组技术开发与量产等方面的研究。E-mail:jinjin\_yang@tianma.cn