文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-08

含氟CPI在柔性显示应用中的黄化问题研究

曹双迎[1,2],王　麒[2],张　雯[2],周　炜[2],刘学清[1],尤庆亮[1],刘继延[1*]
(1.江汉大学 光电材料与技术学院,湖北 武汉 430056;
2.上海天马微电子有限公司,上海 浦东新区 201201)

摘要:无色聚酰亚胺(CPI)是透明柔性有机发光二极管显示器(OLED)制作过程中至关重要的柔性衬底材料。为明确含氟CPI在玻璃基板上固化后黄化的成因并实现其光学性能的改善,本研究对其机理进行了系统探究,并寻求有效的解决途径。采用UV-Vis透过率光谱、扫描电子显微镜(SEM)及飞行时间二次离子质谱(ToF-SIMS)对含氟CPI样品进行综合分析;同时,通过在玻璃基板表面溅射或气相沉积ITO、SiOx、SiNx等无机膜层,评估其对黄化现象的抑制效果。研究发现,含氟CPI的黄化源于玻璃中碱土金属离子向CPI层迁移,并与氟元素结合生成电荷转移络合物(CTC),导致CPI中氟含量显著下降,进而促进CPI黄化;且空气侧与玻璃侧的CPI黄度存在差异。引入无机膜层后,含氟CPI的黄化被有效抑制,成功制备出截止波长为403 nm的厚度为9 um的透明CPI薄膜。玻璃基板中的碱土金属离子迁移是含氟CPI黄化的主要诱因,而沉积无机阻隔层可显著改善其光学透明性,为高性能透明柔性OLED衬底材料的制备提供了可行路径。

关　键　词:透明柔性显示;有机发光二极管显示器;无色聚酰亚胺;黄化
中图分类号:TP394.1;TH691.9　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3724/CJLCD.2026-0161　　**CSTR**:32172.14.CJLCD.2026-0161

Study on yellowing of fluorinated CPI in flexible display applications

CAO Shuangying[1,2], WANG Qi[2], ZHANG Wen[2], ZHOU Wei[2], LIU Xueqing[1], YOU Qingliang[1], LIU Jiyan[1*]

(1. *School of Optoelectronic Materials and Technology, Jianghan University, Wuhan* 430056, *China*;
2. *Shanghai Tianma Microelectronics Co. Ltd.*, *Shanghai* 201201, *China*)

Abstract: Colorless polyimide (CPI) is a critical flexible substrate material in the fabrication of transparent flexible organic light-emitting diode(OLED) displays. To identify the cause of yellowing in fluorinated CPI on glass substrates and to improve its optical properties, this work systematically examines the mechanism and explores effective countermeasures. First, we comprehensively analyzed the fluorinated CPI samples using UV-Vis transmittance spectroscopy, scanning electron microscopy(SEM), and time-of-flight secondary ion mass spectrometry(ToF-SIMS). Meanwhile, inorganic barrier layers such as ITO,

收稿日期:2026-08-21;**修订日期**:2026-11-06.
基金项目:科技部国家重点研发计划项目(No.2022YFB3603702);湖北省科学技术创新计划(No.2025BAB032);武汉市国际科技合作项目(No.2025071204030387)
Supported by National Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (No.2022YFB3603702); Hubei Provincial Science and Technology Innovation Program (No.2025BAB032) & Wuhan International Science and Technology Cooperation Project (No.2025071204030387)

*通信联系人,E-mail:liujiyan918@163.com

SiOx, and SiNx were deposited on glass surfaces by sputtering or chemical vapor deposition to evaluate their suppression effect on the yellowing phenomenon. The results reveal that the yellowing of fluorinated CPI arises from the migration of alkaline earth metal ions from the glass into the CPI layer, where they combine with fluorine to form charge-transfer complexes(CTCs). This complexation significantly reduces the fluorine content in CPI, thereby promoting the yellowing of the material. In addition, the degree of yellowing differs between the air side and the glass side of the CPI film. With the introduction of inorganic barrier layers, the yellowing of fluorinated CPI was effectively suppressed, and fluorinated 9-μm-thick CPI films with a cutoff wavelength of 403 nm were successfully obtained. The migration of alkaline earth metal ions from the glass substrate is the primary cause of yellowing in fluorinated CPI, and the deposition of inorganic barrier layers can significantly improve its optical transparency, offering a viable pathway for the preparation of high-performance transparent flexible OLED substrate materials.

Key words: transparent flexible display; organic light-emitting diode display; colorless polyimide; yellowing

1 引　　言

近年来,柔性显示技术发展迅速。由于人们对柔性有机发光二极管(organic light emitting diode,OLED)显示技术和美学的终极追求,屏下摄像头和透明显示备受关注,提高作为柔性衬底的聚酰亚胺(polyimide,PI)薄膜在450 nm以下短波长的透光率尤为关键[1]。

传统PI呈现棕色或黄色,源于其分子链内二胺(给电子)与二酐(受电子)单元间形成的强电荷转移络合物(charge-transfer complexes,CTC)效应,导致分子链紧密堆积并在可见光区产生强吸收;给/受电子能力越强,CTC效应越显著,PI颜色越深[2-6]。为实现无色聚酰亚胺(colorless polyimide,CPI),可通过引入强吸电子基团、脂环结构、不对称非共面结构等破坏CTC的形成,从而提高薄膜的光学透过率[7,8]。其中,含氟聚酰亚胺[9,10]能较好地平衡光学性能、耐热性和力学性能等,且能显著降低介电常数[11,12]以满足5G市场需求,产业化程度较高。氟原子的强吸电子诱导效应与大体积侧基的空间位阻共同抑制CTC形成,使含氟CPI(F-CPI)被公认为替代棕色或黄色PI的理想材料。

然而,F-CPI在实际工程应用中仍面临未被充分认识的光学失效问题。本文作者发现,F-CPI的在显示面板用的玻璃基板上涂布固化后出现目视较黄的现象,这与含氟结构"应更透明"的普遍预期相悖,亦难以由传统CTC理论直接解释。现有关于PI在玻璃基板上固化行为的研究[13-16]多集中于传统PI(如PMDA-ODA)体系,主要关注玻璃表面硅羟基及Na^+对亚胺化过程的干扰及界面非均质层的形成;而F-CPI黄化研究多聚焦分子结构设计层面,对衬底诱导的黄化机制缺乏系统认识。

针对上述问题,本文通过对F-CPI膜不同深度处的吸光度,结合薄膜与玻璃界面元素及离子深度分布表征,揭示了F-CPI在玻璃基板上固化后黄化的原因;并通过在玻璃衬底上预先沉积无机阻隔层,有效解决了该黄化问题。本研究可为CPI的工程化应用提供工艺指导,并为新型CPI材料的界面设计指明方向。

2 实　　验

2.1 材料

实验所用的玻璃基板为铝硼硅酸盐玻璃,采购自AGC株式会社,专门为防止碱金属污染而设计,广泛应用于LTPS柔性显示领域OLED基板。氟化CPI(F-CPI)浆料购自国内知名厂商,其固含量为10 %。普通PI(N-PI)浆料为PMDA-ODA溶液,购自Sigma-Aldrich,固含量12.8 %。

2.2 PI膜的制备

为避免外部环境[17](如氧气、水蒸气、微量杂质、衬底上的杂质等)对F-CPI和N-PI成膜性能造成不良影响,我们采取以下预防措施:(1)玻璃基板在使用前对其进行清洗、干燥等处理;(2)整个固化及冷却过程中氧气控制在100 ppm以下。

热处理条件是影响PI膜性能的主要因素。通过狭缝涂布(slit coating)的PI前驱体聚酰胺酸(PAA)浆料在固化过程中将经历溶剂挥发、亚胺化反应和退火。我们采用三段式逐渐升温的模式固化PAA，然后缓慢冷却至室温，如图1所示。随后对玻璃上的PI膜进行观察和性能分析。

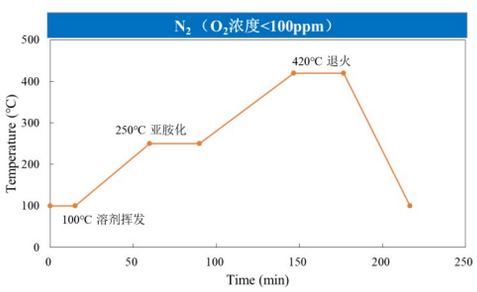


图1 PI热处理曲线示意图

Fig. 1 Thermal treatment profile of the PI films

2.3 PI膜的表征方法

PI薄膜的厚度通过配备有聚焦离子束(focused ion beam，FIB)模块的扫描电子显微镜(scanning electron microscopy，SEM)测得。PI薄膜的透过率光谱利用日立UH4150(光度准确性Accuracy为±0.3%，光度重复性Repeatability为±0.1%)在扣除相应衬底背景后进行测量，每个样品重复测试3次并选取居中的一组数据进行实验对比分析。

飞行时间二次离子质谱(Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry，ToF-SIMS)分析采用ToF-SIMS IV系统进行。为表征F-CPI与不同衬底接触界面的化学状态，需将薄膜与衬底分离后对其内表面(即原始接触面)进行测试。样品制备过程如下：将固化后的F-CPI/衬底样品沿边缘小心揭开，采用机械剥离方式使F-CPI薄膜与玻璃或无机层分离，随后取薄膜内侧朝上固定于样品台，确保所分析表面为原始接触界面后进行ToF-SIMS分析。

3 结果与讨论

3.1 不同衬底上的F-CPI的光学性能

图2为涂布在玻璃上的PI经过热固化之后的图片。F-CPI和N-PI的固化后膜厚均为9 um，该厚度是柔性OLED面板柔性PI衬底的常用厚度。出乎意料的是，经过亚胺化和退火处理后，F-CPI薄膜的外观黄度反而明显高于N-PI，这一现象与预期相悖。高温处理会促进聚合物分子链的紧密堆积，增强链间CTC效应，进而影响CPI薄膜的光学性能[18]。

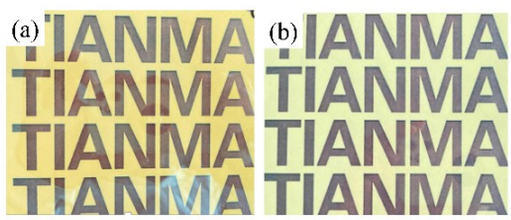


图2 在玻璃上固化的(a) F-CPI和(b) N-PI照片

Fig. 2 Photos of (a) F-CPI and (b) N-PI films cured on glass

为进一步探究该异常黄化现象的产生阶段，本研究对F-CPI和N-PI薄膜均进行了一次和两次的420 ℃高温后处理，结果发现一次和两次高温后处理后膜的透过率光谱未发生变化，如图3所示。此外，我们将F-CPI的退火温度降低至410 ℃，其透光率仍未改变。上述结果表明：第一，F-CPI的黄化主要发生在亚胺化过程中，即在该阶段生成的CTC络合物决定了薄膜的最终光学状态；第二，经初次热固化后，F-CPI薄膜的分子链堆积构象及CTC效应强度已趋于该温度下的热力学平衡态，后续热处理无法对其产生进一步调制。关于F-CPI在亚胺化过程中黄度异常高于N-PI的具体机制，仍需要进一步深入探讨。

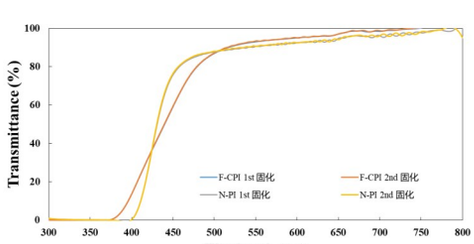


图3 9 um厚的PI薄膜的透过率光谱特性

Fig. 3 Transmittance spectra of 9-um-thick PI films

Xu[13]发现，PI在玻璃上固化时会发生副反应从而导致CPI黄化。若在PI与玻璃之间通过离子增强化学气相沉积制备一层100 nm厚的

SiN_xO_y:H层，可抑制PI与玻璃上活性基团之间的副反应，从而获得无色PI，但该文未探讨其机理。我们参考该文，采用100 nm氧化铟锡（ITO）、100 nm氧化硅（SiO_x）和100 nm氮化硅（SiN_x）作为中间阻隔层，以获得无色CPI薄膜。不同衬底上固化的F-PI薄膜照片如图4a-d所示。可以明显观察到，添加了中间阻隔层的样品b、c、d中的F-CPI薄膜呈现浅黄色（这与玻璃基板上的无机薄膜有关），但相比直接在玻璃上固化的F-CPI，其黄化现象明显减轻。图4e为不同衬底上固化的F-CPI薄膜与玻璃上N-PI薄膜的透过率光谱对比。可以发现，有中间阻隔层的F-CPI薄膜透过率光谱几乎完全相同，其截止波长（定义为单位为最大透过率一半对应的波长）为403 nm，而直接涂覆在玻璃上的F-CPI截止波长为440 nm，甚至大于N-PI的截止波长430 nm。这表明中间阻隔层的引入有效抑制了F-CPI与玻璃之间的某种副反应，且F-CPI在玻璃上的黄化现象与玻璃有关，而非固化过程中的其他环境因素。

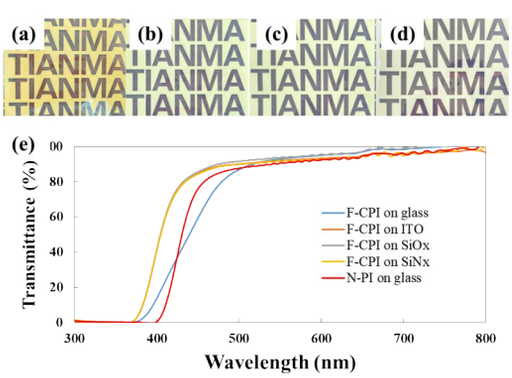


图4 不同衬底上固化的PI薄膜照片及透过率光谱特性。(a)玻璃/F-CPI；(b) ITO/F-CPI；(c) SiO_x/F-CPI；(d) SiN_x/F-CPI；(e) 不同衬底上F-CPI的透过率。

Fig. 4 Photography and Transmittance characteristic of PI films cured on different carrier substrates. (a) F-CPI on glass; (b) F-CPI on ITO; (c) F-CPI on SiOx; (d) F-CPI on SiNx; (e) transmittance of F-CPI cured on different substrates.

3.2 玻璃上F-CPI的黄化机理分析

虽然已经找到了解决F-CPI在玻璃上黄化的方法，但原因仍需探究，以便提供其他解决方案。

已有研究表明[14]，当PI直接涂覆在钠钙玻璃上时，固化过程中玻璃中的Na^+与环境中的水分子作用生成NaOH，进而对靠近玻璃侧的聚酰亚胺分子链发起亲核攻击，引发水解反应并生成聚酰胺酸盐，最终导致界面区域黄化。本研究中，为规避该失效路径以获得无色PI，我们选用了Na^+含量极低的铝硼硅酸盐玻璃为衬底基板，但F-CPI仍出现了黄化现象。这表明，本研究中F-CPI在玻璃上的黄化机制有所不同。

此外，有文献[15]报道，当PI直接在某些金属基材上固化时，在靠近接触面的PI特定区域可观察到颗粒状金属氧化物沉淀。这种颗粒物的形成是由于聚酰胺酸首先与金属氧化物反应生成聚酰胺酸络合物，在随后的热固化过程中，络合物分解生成金属氧化物，并在亚胺化过程中聚集形成颗粒。M. Zuo等人[16]也发现，当PI直接在玻璃上固化时，玻璃表面的硅羟基（Si—OH）会影响PI的亚胺化过程，导致靠近玻璃侧的膜质与靠近空气侧的膜质不同。然而，这些研究均基于传统PI（PMDA-ODA）体系。这些关于非均质层的结论依赖于透射电子显微镜（TEM）、能量色散X射线探测器（EDX）、单液法接触角测量等测试设备，这些设备昂贵且测试条件苛刻。本文提供了一种更简单、直观且经济的测试分析方法，即紫外-可见光透过率光谱及其换算出的吸光度光谱，并证明F-CPI在硼硅酸盐玻璃上固化时也存在玻璃接触面的膜质与本体膜质不一致现象。

3.2.1 吸光度

我们在玻璃和ITO上分别制备了两种不同厚度的F-CPI薄膜，测量了各薄膜的透过率，并计算了相应的吸光度$A(\lambda)$见公式（1）：

$$A(\lambda) = -logT(\lambda)/t \ , \tag{1}$$

其中$T(\lambda)$为波长λ处的透过率，t代表薄膜的相应厚度。

从图5a所示结果可以看出，在波长大于550 nm时，膜厚对吸收强度影响很小，但对蓝光吸收影响显著。图5b结果表明，ITO上F-CPI薄膜的吸光度几乎不随膜厚变化，这也表明ITO上的F-CPI沿深度方向具有均一的膜质结构。而对于玻璃上CPI薄膜，其吸光度表现出膜厚依赖性，膜厚越小，蓝光吸光度越大，这一厚度-吸光度的

负相关关系表明黄化层主要集中于薄膜靠近玻璃侧的界面区域，而非深度方向均匀分布于整个膜层。

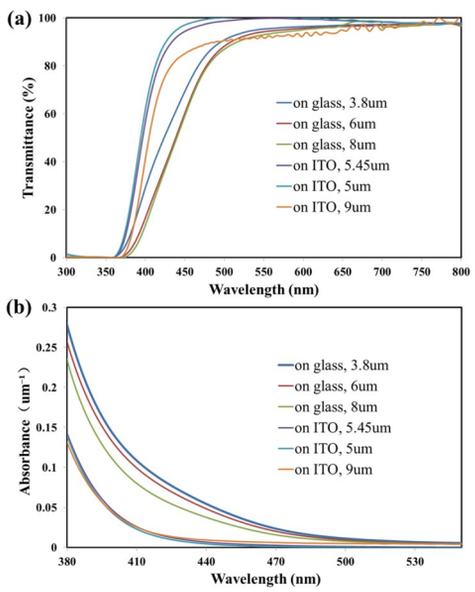


图5 不同厚度F-CPI的(a)透过率光谱；(b)吸光度光谱。

Fig. 5 Optical spectra of F-CPI with different thicknesses. (a) Transmittance spectra; (b) Absorbance spectra.

3.2.2 ToF-SIMS

为进一步确定不同衬底上固化后F-CPI的差异，对F-CPI薄膜内侧进行了表面和深度ToF-SIMS分析，表面部分离子归一化强度如图6所示，ToF-SIMS深度剖面如图7所示。虽然多篇文献认为玻璃侧Na^+向PI侧迁移导致PI黄化，但本文ToF-SIMS结果表明，直接与玻璃接触的PI中Na^+含量少得多，而ITO、SiO_x和SiN_x上的Na^+含量在数量级层面上的显著上升。经溯源，Na^+应来源于PAA浆料合成过程中未完全去除的碱金属盐。上述Na^+分布的反常现象，可归因于玻璃与PI之间的离子交换作用。玻璃表面富含硅羟基(Si—OH)，在高温固化过程中，玻璃表面的硅羟基解离出的H^+，与PAA浆料中游离的Na^+在界面处发生了H^+/Na^+离子交换。由于玻璃网络结构对Na^+具有一定的容纳能力，PAA中的Na^+被交换进入玻璃表层，而H^+进入PI膜内。这就导致了测试时玻璃侧PI表面的Na^+含量显著降低(如图7a中Na曲线所示)。ITO、SiOx和SiNx等PVD/CVD沉积层非常致密，且表面缺乏可供交换的质子源(Si—OH极少)，可阻挡Na^+向玻璃侧反向逃逸，导致Na^+被锁在PI膜内，在表面测试时呈现出极高的浓度(如图7b、c、d中Na曲线)。

此外，如图6所示，当F-CPI直接于玻璃基板上固化时，在薄膜侧可明显观察到Mg、Al、Ca等碱土金属及其络合物，而引入ITO、SiO_x或SiN_x作为中间阻隔层后，对应F-CPI薄膜内侧未检测到碱土金属。该现象可归因于碱土金属易失电子，而氟易得电子，二者在直接接触时易于发生相互作用并形成络合物。因此，插入ITO、SiO_x、SiN_x等无机阻隔层，能有效抑制玻璃中的碱土金属与F-CPI中的氟基团结合。

上述界面反应可进一步由图6与图7a的ToF-SIMS结果联动佐证。图6中，直接在玻璃上固化的F-CPI样品，其内侧表面CF^-信号较ITO、SiO_x及SiN_x衬底上的样品显著降低；而与之直接对应的是，图7a中该样品的Ca^{2+}、Mg^{2+}信号呈现出由玻璃侧向PI侧逐渐衰减的梯度分布。

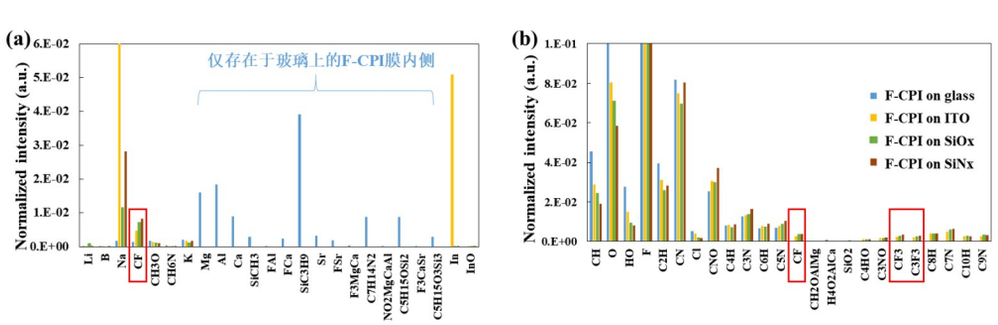


图6 不同衬底上的F-CPI内表面的飞行时间二次离子质谱(ToF-SIMS)归一化离子强度。(a)阳离子和(b)阴离子。

Fig. 6 Normalized ion intensities of the inner surfaces of F-CPI on different substrates by time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS). (a) cations and (b) anions.

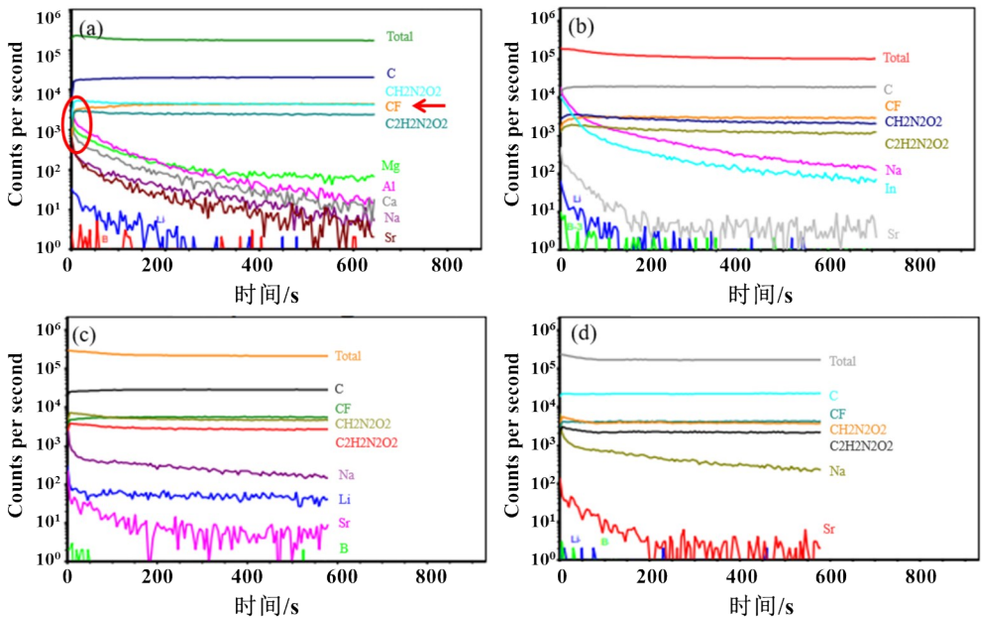


图7 不同基板上F-CPI内表面的ToF-SIMS深度剖面。(a) 玻璃上的F-CPI;(b) ITO上的F-CPI;(c) SiOx上的F-CPI;(d) SiNx上的F-CPI。

Fig. 7 ToF-SIMS depth profile of F-CPI inner surfaces on different substrates. (a) F-CPI on glass; (b) F-CPI on ITO; (c) F-CPI on SiOx; (d) F-CPI on SiNx.

二者的对应关系表明:碱土金属离子自玻璃侧向PI侧迁移,其迁移前沿所至之处正是氟被消耗之处——Ca^{2+}、Mg^{2+}的梯度衰减与CF^-的显著降低在空间上相互吻合,共同指示碱土金属与氟基团在界面区域发生了结合反应,导致薄膜中有效氟含量减少。

众所周知,氟化技术的核心机制在于其三氟甲基(CF_3)基团兼具强吸电子效应和空间位阻效应,可有效抑制分子链间CTC络合物的形成。因此,CF^-信号的降低意味着薄膜中有效氟含量减少,这将削弱其对CTC的抑制作用[19],从而导致薄膜黄度上升。由此形成完整的逻辑链:玻璃中碱土金属向PI侧迁移(图7a的Ca^{2+}、Mg^{2+}梯度)→界面处氟被消耗(图6中CF^-显著降低)→有效氟含量下降、CTC抑制减弱→薄膜黄化。而在引入ITO、SiO_x或SiN_x阻隔层后,Ca^{2+}、Mg^{2+}无法到达PI侧,CF^-信号得以保持,黄化随之被抑制,从反面进一步支持了上述逻辑链。本论文提出的在玻璃基板预先成膜无机阻隔层的解决PI黄化的方法已申请相关专利并获授权[20]。

需要指出的是,本文关于碱土金属与氟基团形成氟化物络合物(如Ca—F、Mg—F)的推断,主要基于ToF-SIMS界面元素与离子深度分布特征,尚缺乏直接的化学状态证据。XPS对F 1s、Ca 2p、Mg 1s等核心能级的精细扫描可提供结合能位移及新物种峰位等决定性判据,但受测试条件限制,本研究未能开展该分析,后续工作将借助XPS(必要时结合掠角或深度剖析)对界面化学状态进行系统表征,以进一步验证该机制。

4 结 论

本文通过实验验证,揭示了含氟无色聚酰亚胺(F-CPI)直接在玻璃上固化后发生黄化的内在机制。当F-CPI直接在玻璃上固化时,玻璃衬底中的Ca、Mg等碱金属因具有较低的电离能而易失电子,易与F-CPI中三氟甲基基团的氟元素发生给受体相互作用,生成氟化物络合物。F-CPI薄膜中三氟甲基基团含量降低,削弱了其原本的位阻效应与吸电子效应,使得分子链间堆积更加紧密,自由体积减小,从而诱发电荷转移络合物(CTC)的形成,表现为薄膜黄化。值得注意的是,F-CPI薄膜的黄化程度具有显著的深度差异,

黄化现象仅发生在靠近玻璃的特定深度范围内,表明其受界面扩散过程控制。通过在涂覆F-CPI前预先在玻璃衬底上沉积ITO、SiO_x、SiN_x等无机阻隔层,有效抑制了碱金属向薄膜侧迁移及其与氟基团的结合,从而避免黄化现象发生。最终,制备出的厚度为9 um的F-CPI薄膜截止波长降至403 nm,展现出良好的光学透明性和视觉效果。上述结果为CPI在柔性光电显示器件中的工业应用提供了工艺指导,也为新型CPI材料的结构设计与界面工程指明了方向。

参 考 文 献:

[1] GAO X, LIN L, LIU Y, *et al*. LTPS TFT process on polyimide substrate for flexible AMOLED [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(8): 666-669.

[2] TAPASWI P K, HA C S. Recent trends on transparent colorless polyimides with balanced thermal and optical properties: Design and synthesis [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2019, 220(3): 1800313.

[3] HASEGAWA M. Development of solution-processable, optically transparent polyimides with ultra-low linear coefficients of thermal expansion [J]. *Polymers*, 2017, 9(10): 520.

[4] TSAI C L, YEN H J, LIOU G S. Highly transparent polyimide hybrids for optoelectronic applications [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2016, 108: 2-30.

[5] NI H, LIU J, WANG Z, *et al*. A review on colorless and optically transparent polyimide films: Chemistry, process and engineering applications [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 28: 16-27.

[6] WANG C, CAO S, CHEN W, *et al*. Synthesis and properties of fluorinated polyimides with multi-bulky pendant groups [J]. *RSC advances*, 2017, 7(42): 26420-26427.

[7] YI C, LI W, SHI S, *et al*. High-temperature-resistant and colorless polyimide: Preparations, properties, and applications [J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 340-354.

[8] LIU Y Y, WANG Y K, WU D Y. Synthetic strategies for highly transparent and colorless polyimide film [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(28): e52604.

[9] MI Z, LIU Z, TIAN C, *et al*. Soluble polyimides containing 1, 4: 3, 6-dianhydro-d-glucidol and fluorinated units: Preparation, characterization, optical, and dielectric properties [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2017, 55(19): 3253-3265.

[10] JEON H, KWAC L K, KIM H G, *et al*. Comparison of properties of colorless and transparent polyimide films using various diamine monomers [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2022, 61(1): 394-404.

[11] HE J J, YANG H X, ZHENG F, *et al*. Dielectric properties of fluorinated aromatic polyimide films with rigid polymer backbones [J]. *Polymers*, 2022, 14(3): 649.

[12] PARK S J, CHO K S, KIM S H. A study on dielectric characteristics of fluorinated polyimide thin film [J]. *Journal of colloid and interface science*, 2004, 272(2): 384-390.

[13] 许志平. 用于AMOLED显示的聚酰亚胺柔性衬底研究[D]. 华南理工大学, 2017.
XU Z P. Study on flexible polyimide substrate for active matrix organic light emitting diodes display [D]. South China University of Technology, 2017. (in Chinese)

[14] SON J H, LEE W E, BYUN D J, *et al*. Surface defect formation in polyimide film via ion migration from glass substrate [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 173: 109079.

[15] KIM Y H, KIM J, WALKER G F, *et al*. Adhesion and interface investigation of polyimide on metals [J]. *Journal of adhesion science and technology*, 1988, 2(1): 95-105.

[16] ZUO M, TAKEICHI T, Matsumoto A, *et al*. Surface characterization of polyimide films [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1998, 276: 555-564.

[17] CELLA J A. Degradation and stability of polyimides [J]. *Polymer degradation and stability*, 1992, 36(2): 99-110.

[18] BENFRIDJA I, DIAHAM S, LAFFIR F, *et al*. A universal study on the effect thermal imidization has on the physico-chemical, mechanical, thermal and electrical properties of polyimide for integrated electronics applications

[J]. *Polymers*, 2022, 14(9): 1713.

[19] PENG W F, LEI H Y, ZHANG X X, *et al*. Fluorine substitution effect on the material properties in transparent aromatic polyimides [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2022, 40(7): 781-788.

[20] 武汉天马微电子有限公司上海分公司. 一种阵列基板及其制备方法、显示装置: 202411874839.8[P]. 2025-12-26.

作者简介:



曹双迎,女,博士,工程师,2020年于中国科学院大学获得微电子与固体电子学博士学位,主要从事面板集成传感技术及相关材料和器件的开发。E-mail: shuangying_cao@tianma.cn



刘继延,男,博士,教授,博士生导师,2005年于武汉大学获得博士学位,主要从事柔性光电子材料与器件方面的研究。E-mail: liujiyan918@163.com