

综述与专论

TFT-LCD 用聚酰亚胺液晶取向层的研究与应用进展

职欣心 毕洪生 高艳爽 高垠悦 陈 津 齐 麟 刘金刚*

(中国地质大学(北京)材料科学与工程学院,北京 100083)

摘 要 综述了薄膜晶体管驱动液晶显示器(TFT-LCD)用聚酰亚胺(PI)取向层的研究应用进展以及未来发展趋势。从 TFT-LCD 对 PI 液晶取向层的性能需求、PI 液晶取向层的分子结构设计与研究开发现状以及 PI 液晶取向层在 TFT-LCD 中的实际应用等方面进行了阐述,重点介绍了摩擦型 PI 液晶取向层以及光控型 PI 液晶取向层的研究与应用进展。

关键词 聚酰亚胺,薄膜晶体管驱动液晶显示器,液晶取向层,摩擦取向,光控取向

Recent progress of research and applications of PI alignment layer for TFT-LCD device

Zhi Xinxin Bi Hongsheng Gao Yanshuang Gao Kaiyue Chen Jin Qi Lin Liu Jingang

(School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract Recent progress of research, applications and future developing trends of polyimides (PI) alignment layers for thin film transistor driven liquid crystal display (TFT-LCD) devices was reviewed. Several aspects, including the property requirements of TFT-LCD for PI alignments layers, molecular design, research and development (R&D) status for PI alignment layers, and the practical applications of PI alignment layers in TFT-LCD fabrications were mainly introduced. Particularly, the R&D of two types of PI alignment layers, including rubbing alignment layers and photoalignment layers were emphatically presented.

Key words polyimide, TFT-LCD, liquid crystal alignment layer, rubbing alignment, photoalignment

近年来,以薄膜晶体管驱动液晶显示器(TFT-LCD)为代表的液晶面板发展迅猛^[1-3],目前 TFT-LCD 液晶面板已经发展到了 10.5 或 11 代线(G10.5 或 G11;基板尺寸 3370mm×2940mm×0.5mm)。TFT-LCD 使用的材料包括玻璃基板、液晶、取向层、偏振片、彩色滤光片、光刻胶、各向异性导电胶、表面平坦化涂层、封口胶与边框胶以及各种光学膜(增亮膜、导光板、扩散片、反射片)等^[4],其中液晶取向层对液晶面板的显示质量(如残像、均一性等)具有重要影响^[5]。液晶分子取向技术是 TFT-LCD 制造中的核心技术之一,液晶分子初始取向的方式和程度将直接影响 TFT-LCD 的质量。

在 TFT-LCD 液晶面板中能诱导杂乱无章排列

的液晶分子进行有序取向排列的涂层称为取向层,而用于制备取向层的胶液称为取向剂。随着 TFT-LCD 的更新换代,在采用新的显示模式和新制造工艺的同时,对取向层材料的性能要求也不断提高,液晶分子取向层材料的性能已成为影响 TFT-LCD 质量的关键因素。目前,TFT-LCD 液晶面板主要采用聚酰亚胺(PI)作为取向层,PI 经摩擦或光辐照处理后在表面产生分子取向的各向异性,从而诱导液晶分子被“锚定”,进而在电场作用下发生定向排列^[6-8]。

摩擦取向法是利用绒布对 PI 取向层表面进行单向机械摩擦,从而在 PI 取向层表面形成密纹或诱发 PI 分子链的取向,进而使液晶分子沿密纹方向或

基金项目:北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”项目;中国地质大学(北京)基本科研业务费(2652017345)

作者简介:职欣心(1996-),女,硕士研究生,主要从事聚酰亚胺液晶取向剂研究工作。

联系人:刘金刚(1973-),男,博士,教授,从事微电子与光电子器件用聚酰亚胺功能材料研究工作。

分子链取向方向发生定向排列。该方法具有工艺简单、液晶分子取向稳定等优点,因而成为目前 TFT-LCD 面板制造中研究最为充分、应用最成熟的液晶分子取向控制技术。但近年来,摩擦取向法易产生灰尘、静电以及机械损伤等问题引起业界重视^[9-11]。这些问题直接影响 TFT-LCD 的显示质量,造成显示器件成品率低,产品成本相对较高。此外,随着 TFT-LCD 面板制造向更大尺寸发展,采用摩擦取向法导致的取向膜表面取向状态不均匀成为影响 TFT-LCD 质量的主要因素之一。因此,寻求新的液晶分子取向技术及其配套的液晶取向层材料,解决其研制与应用过程中的关键问题,实现大尺寸、高品质液晶显示成为研究热点。

近年来,一种新的液晶分子取向控制技术——光控取向技术受到广泛关注^[12-14]。该技术是利用线性偏振紫外光源(LPUV)辐照,使 PI 取向层分子链节在与偏振光平行方向上发生光异构化、光加成或光分解反应,从而产生表面的各向异性,进而使得液晶分子形成各向异性排列的一种取向控制技术。光控取向技术具有改善画面质量、预倾角小、环境友好、产品良品率高、成本低以及适用于柔性和可穿戴显示技术等优势。2009 年,日本夏普公司在 10 代 TFT-LCD 液晶面板制造中应用了垂直模式光控取向技术^[15];2016 年该公司又在 8 代 TFT-LCD 液晶面板制造中成功应用了边缘场开关型(FFS)光控取向技术^[16]。TFT-LCD 技术的发展为 PI 液晶取向材料的发展提供了良好的契机,PI 液晶取向材料的研究与开发涉及众多学科,因此具有很高的技术含量。

1 TFT-LCD 对 PI 液晶取向层的性能要求

根据显示模式,TFT-LCD 可分为扭曲向列型(TN)、垂直取向型(VA)、面内开关型(IPS)、FFS 等^[17]。每种显示模式对 PI 液晶取向层的性能要求也不相同。此外,从液晶分子取向工艺角度考虑,摩擦取向和光控取向对 PI 液晶取向层的性能要求也有差异。因此,实际应用中要综合考虑 TFT-LCD 显示模式对 PI 液晶取向层的性能需求。

液晶分子取向技术可分为接触式与非接触式两类。摩擦取向法属于前者。非接触式液晶分子取向技术主要包括 LPUV 取向技术、光敏聚合物取向层的光刻取向技术、非晶无机取向层的低能离子束直写取向技术等^[18-19]。

TFT-LCD 对摩擦型 PI 液晶取向层的性能要

求主要体现在成膜性、机械特性、取向特性、电气特性及其他特性方面^[20]。TFT-LCD 对光控型 PI 液晶取向层的性能要求,除机械特性方面外,其他要求与摩擦型 PI 液晶取向层要求相同,即成膜性方面要求膜厚均匀;在取向特性方面,能够稳定控制液晶分子预倾角,具有优异的热处理取向稳定性;在电气特性方面,不产生残像,电压保持率(VHR)高、残余直流电压(RDC)低,频率特性良好且不产生静电;与边框胶等组分不发生化学反应,与玻璃有良好的结合力,对水不敏感,具有较低的固化温度、较高的玻璃化转变温度和良好的透明性。

光控取向技术要求 PI 液晶取向层对 LPUV 波长具有高敏感度以及对液晶分子具有稳定的取向作用^[21]。实际应用中考虑到生产效率等因素,PI 液晶取向层要在低于 1000~2000 mJ/cm² 辐照剂量下完成光取向工序,而且不产生光解物,或者产生的光解物易于去除。与摩擦取向法相比,光控取向技术最大的缺陷在于对液晶分子的取向稳定性相对较差。取向稳定性差会导致液晶初始取向方向发生波动,出现残像缺陷。尤其是对于 IPS 型 TFT-LCD 而言更是如此。因此上述具体要求都需要通过 PI 液晶取向层的结构与分子设计来实现。

2 PI 液晶取向层的结构与分子设计

PI 液晶取向层按照取向工艺可分为摩擦取向型和光控取向型;按照涂覆方式可分为转鼓型^[22]和喷墨打印型^[23];按照应用类型可分为 TN 型、VA 型、IPS 型等。不同分类方法对 PI 取向剂结构和分子设计的侧重点也不相同。实际应用中,出于 TFT-LCD 显示质量考虑,往往更侧重 PI 取向膜的光电性能,同时兼顾取向剂的性能。

为满足 TFT-LCD 的应用需求,需要对 PI 液晶取向层进行缜密的组成结构设计和分子结构设计。组成结构设计主要是将具有不同结构特征的 PI 及其前驱体——聚酰胺酸(PAA)或聚酰胺酸酯(PAE)进行组合,赋予取向层高 VHR、低 RDC 特性。分子结构设计则是通过在 PI 取向层分子结构中引入某些特定基团,赋予其优异的综合性能。

在分子结构设计方面,随着高世代、大尺寸 TFT-LCD 的发展,PI 液晶取向层的化学结构也逐渐由芳香族体系发展为半脂环结构体系^[24]。半脂环结构一方面降低了传统全芳香族 PI 分子链间及分子内强烈的相互作用,进而降低了其固化温度($\leq 230^{\circ}\text{C}$);另一方面,半脂环结构还可有效切断 PI

分子链内或分子链间的电荷转移作用,从而赋予 PI 液晶取向层良好的光电特性。目前商业化的 PI 液晶取向剂主要由脂环二酐单体[1,2,3,4-环丁烷四酸二酐(CBDA)、2,3,5-三羧基环戊烷基乙酸二酐(TCA-AH)]、主链含烷基的芳香族二胺单体(如 4,4'-二氨基二苯甲烷等)以及侧链含长烷基链的芳香族二胺单体(如 2,4-二氨基十二烷基苯、2,4-二氨基十六烷基苯)等共聚而成。脂环单元可赋予 PI 液晶取向层高 VHR,芳香族二胺可赋予 PI 液晶取向层良好的耐热性能和耐摩擦性能。

目前针对 PI 液晶取向层的结构设计大都是建立在对液晶分子取向机理研究的基础上。液晶分子在 PI 取向层表面的取向行为涉及范德华力、双偶极相互作用、静电作用、氢键等化学键作用以及表面形貌等多种作用机理。液晶分子的取向与 PI 取向层分子的相互作用以及其他动力学因素、分子各向异性、电-光效应、锚定能等密切相关。以光分解型光控取向为例,PI 取向层在受到 254nm LPUV 辐照时,其主链分子会沿着平行于偏振光方向发生分解,造成取向层表面出现各向异性。液晶分子沿着未分解断链的 PI 分子链发生取向,但当主链长度太短(相对分子质量低)时,取向层中的各向异性降低,取向层分子与液晶分子的相互作用变弱,取向劣化,易造成残像。因此,为了提高取向层的各向异性以及取向稳定性,有必要增加取向层的相对分子质量(更长的分子主链)。解决该问题的有效手段之一是采用 PAE 作为光取向层。PAE 在高温亚胺化过程中可以保持较大的相对分子质量,而 PAA 在高温亚胺化过程中往往伴随着分解反应(生成酸酐和胺),因此亚胺化后相对分子质量较小,主链分子较短,不利于获得稳定的取向效果。另外,PAE 分子结构中不含羧基,因此其 VHR 值较 PAA 高。但 PAE 的电阻率较 PAA 高,当施加直流电压驱动液晶分子时,一旦撤去电压,RDC 消除的时间会较长,易出现残像等问题。因此,需要开发兼具低 RDC 以及高取向稳定性和取向可靠性的光控型 PI 液晶取向层结构,以适应 TFT-LCD 面板制造技术的发展^[7]。

目前已出现用 2 层材料制备的光控取向层^[25],这种光控取向层下层采用电阻率相对较低的 PAA,上层则采用 PAE。当 TFT-LCD 工作时,取向层会一直暴露在背光源发出的光中。光控取向层下层的低电阻率 PAA 可以使液晶层中积累的电荷迅速释放,从而消除 RDC 残像。日本日产化学工业株式会社将 PAA 型取向剂与 PAE 型取向剂混合制备出

具有光导特征的取向层材料 SE-6414。SE-6414 受到光照时会发生明显的相分离,从而变成双层结构。高相对分子质量的 PAE 位于上层,对液晶分子具有优良的取向稳定性;而低相对分子质量、低电阻率的 PAA 固化膜位于下层,可有效降低取向层的残像。这种多层结构是未来高性能 PI 液晶取向层的重要发展趋势。

3 摩擦型 PI 液晶取向层研究进展

摩擦可以诱发液晶分子在 PI 取向层表面的定向排列。关于液晶分子的取向机理目前有 2 种理论:液晶分子与 PI 分子链之间的化学作用;液晶分子沿着摩擦在 PI 取向层表面产生的密纹发生取向。前者是基于液晶分子在摩擦的 PI 表面存在分子取向各向异性的事实。通过近边缘 X 射线吸收精细结构(NEXAFS)以及掠入射 X 射线散射等一系列测试证明了该理论。采用原子力显微镜(AFM)以及 X 射线反射技术分析平行于以及垂直于摩擦方向上的取向层的表面粗糙度也证明了液晶分子取向的化学机理。

Kim 等^[26]研究了 42 英寸 IPS 型 TFT-LCD 制造过程中液晶分子的取向机理。AFM 分析表明,摩擦处理后在 PI 取向层表面未发现密纹结构,而且平行于以及垂直于摩擦方向的表面粗糙度没有明显差异。但 NEXAFS 测试结果显示,生产过程中可观察到 PI 取向层分子链在平行于以及垂直于摩擦方向上存在显著的取向各向异性。原因主要是工业生产中,为了克服摩擦工艺在 PI 取向层表面产生划痕等缺陷,需要对 PI 取向层的表面硬度以及摩擦工艺条件进行反复优化,结果造成 PI 分子取向的各向异性,从而诱发了液晶分子的取向。

对于 TN 型 TFT-LCD,除了要求液晶分子取向均匀外,还要求液晶分子具有一定的预倾角,以防止施加外部电场时,液晶分子发生反向偏转。研究表明,液晶分子的预倾角与 PI 取向层表面的极性密切相关。摩擦可促使取向层分子结构中的极性基团沿着取向层平面外取向,而非极性脂肪链则向着取向层内部发生取向。随着摩擦强度的加剧,液晶分子的预倾角逐渐增大。此外,还可以通过在 PI 取向层分子结构中引入长烷基侧链或其他非极性基团来增大液晶分子预倾角。另一方面,对 PI 取向层表面进行紫外辐照或者等离子体辐照可增强其表面极性,进而增大液晶分子的预倾角。

IPS 型 TFT-LCD 具有更宽广的视角,因此在

电视、笔记本电脑显示器以及高分辨率显示器中得到广泛应用。对 IPS-LCD 而言,液晶分子首先通过摩擦进行取向,然后在交变电压驱动下,液晶分子被再次取向,使得来自背光源的线性偏振光得以通过。液晶分子再取向过程中的扭曲方向由摩擦方向以及电极构型决定。目前影响 IPS-LCD 显示质量最大的问题是残像。残像的产生主要是同时使用直流电与交流电驱动的缘故。直流型残像主要是液晶层中的杂质离子引发 RDC 造成的。当施加外部直流补偿电压时,杂质离子吸附在 PI 取向层表面,即使在直流电压撤去时,这些杂质离子也难以立即解吸附,从而造成直流残像。通过纯化液晶和 PI 取向层材料,提高这些材料的纯度可以消除直流残像。关于交流残像的机理目前尚不清楚。Momo 等^[9]认为 IPS-LCD 中 PI 液晶分子取向层表面的流变特性对于交流残像以及对比度的降低具有重要的影响。将 PI 取向剂 SE-7492 涂覆在氧化铟锡(ITO)玻璃上,固化后施以弱摩擦,装配液晶盒。用环氧密封胶 XS-21S 封边,灌注液晶 ZLI4792,然后以紫外光固化环氧胶封口。将液晶盒在 110℃ 进行处理使得液晶分子沿着摩擦方向取向,用 60Hz 交流方波电压持续驱动液晶盒 1 个月。测试结果表明,交流驱动期间,液晶分子变形偏差角($\Delta\theta$)随着驱动时间的延长而逐渐增大,而增大的幅度与电场强度密切相关。在电场强度 $2\text{V}/\mu\text{m}$ 、交流驱动 700h 条件下, $\Delta\theta$ 约为 0.7° 。这造成了上下层 ITO 电极区域间的亮度明显不同,因此产生了交流残像。造成液晶分子取向偏差的原因主要是 PI 液晶取向层表面流变特性的变化。通过测试 PI 取向层表面内剪切模量与应变的关系发现,摩擦后 PI 取向层表面的面内剪切模量远低于 PI 自身的面内剪切模量。原因主要是摩擦处理后,PI 取向层表面分子链发生取向,在摩擦界面形成过量的自由体积,从而使 PI 膜表面变软。液晶盒可以看作是一个“湿”环境,其中液晶分子可作为一种溶剂进入 PI 表面,引起 PI 膜表面膨胀,从而降低了 PI 分子链间的相互作用。这种流变学的变化造成交流残像以及 IPS-LCD 对比度的降低。

针对摩擦取向法存在的缺陷,国内外众多研究机构开展了非摩擦法液晶取向研究。Chiou 等^[27]采用软模压印工艺代替传统的摩擦取向法,在 PI 取向层表面形成周期性的密纹结构,然后装配成液晶盒。测试结果显示,液晶分子沿着密纹方向均匀取向,即使是密纹宽度达到 $3\mu\text{m}$ 时仍然如此。液晶分子在密纹化 PI 取向层表面的锚定能高于摩擦取向法得

到的锚定能。液晶分子的预倾角可通过调节 PI 取向层的表面极性进行调整,而调整 PI 取向层的表面极性可通过将亲水型和疏水型 PI 取向剂进行简单的物理混合实现。研究表明,液晶分子预倾角受取向层表面形貌和表面极性的双重影响。当 PI 取向层表面形貌一定时,液晶分子的预倾角随着 PI 取向层表面水接触角的增加而增大。作为一种非摩擦法工艺,软模压印工艺可在很大程度上避免摩擦取向法的缺陷。

4 光控型 PI 液晶取向层研究进展

光控取向材料最初的研究集中在聚烯烃、聚乙烯醇、聚硅氧烷和纤维素聚合物等材料上。由于上述材料的结构较为柔软,取向后有序结构的热稳定性差,容易发生松弛,导致制备的器件可靠性差。鉴于 PI 取向层材料在液晶显示器面板中的成功应用,人们将目光转向了具有刚性分子骨架的 PI 材料上。1995 年,Hasegawa 等^[28]首次报道了 LPUV 光控取向 PI 材料,随后大量的研究工作如雨后春笋般展开。按照光化学反应机理,光控取向技术可以分为光异构化、光加成或交联以及光分解 3 类^[29]。光异构化型 PI 液晶取向层通常采用波长 365nm 的 LPUV;光加成型 PI 液晶取向层采用波长 313nm 的 LPUV;而光分解型 PI 液晶取向层则采用波长 254nm 的 LPUV。

光异构化取向技术是在宾主型液晶材料中加入偶氮分子或在 PI 取向层分子结构中引入偶氮苯等结构,在 365nm 波长作用下发生光异构化反应来诱发液晶分子取向。辐照前,偶氮分子的顺式结构与反式结构在 PI 取向材料中随机分布,而紫外辐照后,顺式结构转变为反式结构,使得分子结构变得有序,从而实现对液晶分子的取向。该类材料的优点是在较低辐照剂量($<50\text{mJ}/\text{cm}^2$)下就能赋予液晶分子很好的取向,但是该取向结构不稳定,在一定波长的光照或加热条件下,偶氮结构发生相反的光化学反应,反式结构又转变为顺式结构,已取向的液晶分子会发生解取向,从而限制了其实际应用^[30]。光加成取向技术主要是利用某些基团,如香豆素或肉桂酸等在 LPUV 作用下发生 $[2+2]$ 加成反应而交联,使得光照区域与非光照区域出现各向异性的机制而实施的。但随后的研究发现,肉桂酸酯二聚形成的四元环在热力学上是不稳定的,因而对液晶分子的取向作用不稳定^[31]。光分解取向技术主要是使用波长 254nm 的 LPUV 对 PI 取向层进行辐照,

导致辐照区域内与 LPUV 平行方向上的 PI 分子的主链断裂,生成多种小分子物质。主要通过高温氧化去除小分子物质,使液晶分子沿着垂直于 LPUV 方向的 PI 分子链发生定向排列。该工艺简便易行,对液晶分子的取向性能稳定,因此逐渐成为最具工业应用前景的液晶分子光控取向技术^[32]。

目前光分解取向技术所用 PI 取向层材料主要是 CBDA 单体及其衍生物,如 1,3-二甲基-1,2,3,4-环丁烷四酸二酐(DMCBDA)、1,2,3,4-四甲基-1,2,3,4-环丁烷四酸二酐(TMCBDA)。光分解型 PI 取向层具有对液晶分子锚定能大、预倾角小、均匀性好、稳定性高以及高 VHR 低 RDC 的特点。但是,实际应用中仍存在以下缺陷:(1)对波长 254nm 的 LPUV 光敏感度低,工艺窗口窄。(2)光降解残余物不易去除。为了实现辐照区域与 LPUV 平行方向上 PI 分子链的完全降解,往往需要高辐照剂量($\geq 500\text{mJ}/\text{cm}^2$)以及长辐照时间。研究表明,对于 LPUV 诱发的液晶分子有序排列,在光辐照初期,液晶分子的取向有序度会随着光照剂量的增加而增加,但光照剂量过大时,液晶分子的取向有序度反而会降低^[31]。因此,光分解型 PI 取向层光敏感度较低会造成液晶分子取向有序度降低,使得工艺窗口变窄。

如前所述,目前高世代、大尺寸 TFT-LCD 面板使用的光控型 PI 液晶取向材料具有半脂环结构,这样可以有效减少 PI 分子链内或分子链间的电荷转移,从而有利于保持 TFT-LCD 的高光电特性。这种减少电荷转移作用的特性对摩擦取向法没有影响,但对于 LPUV 诱发的光控型 PI 液晶取向材料而言,电荷转移作用的减弱对其光降解反应不利。Shin 课题组^[33-34]利用 CBDA 及含敏感基团的单体合成了光控型 PI 取向层材料。研究表明,该材料经 LPUV 辐照后,对液晶分子显示出良好的光控取向特性。采用该材料作为取向层装配的液晶盒的二色性比率测试值明显高于采用 CBDA-4,4'-二氨基二苯甲烷(DDM)制备的液晶盒,表明制备的 PI 取向层经过 LPUV 辐照后,在 2 个不同方向产生的各向异性物质对光吸收程度之比更高,即对 LPUV 更敏感。Li 等^[35]合成了含光敏基团的全芳香族聚(六氟异丙基双邻苯二甲酸酐-4,4'-二氨基二苯醚)(6FDA-ODA)型 PI 取向层材料。该材料具有高 LPUV 敏感度、高光控取向稳定性的特点。研究表明,光敏基团的引入可显著提高 6FDA-ODA 型 PI 取向层材料的光敏感度。未取代的 6FDA-ODA 体

系经 LPUV 辐照 30min 后仍未引发液晶分子取向,而含光敏基团的 6FDA-ODA 体系, LPUV 辐照 3min 后就引发了 PI 主链的光降解,在其表面产生各向异性,进而诱发了液晶分子的取向。红外光谱测试结果显示,随着 LPUV 辐照时间的延长,PI 分子结构中光敏基团的 C—H 伸缩振动吸收峰(2950cm^{-1})的强度显著下降,表明其对 LPUV 十分敏感。酰亚胺环吸收带(1729cm^{-1} 、 1380cm^{-1})、苯环吸收带(1510cm^{-1} 、 720cm^{-1})以及醚键吸收带(1250cm^{-1})强度逐渐降低,表明 PI 发生了分解。同时,随着辐照时间的延长,谱图中逐渐出现酞化合物羰基吸收峰(1760cm^{-1})和胺化合物 N—H 键吸收峰(3300cm^{-1}),表明 PI 分解生成了小分子化合物。进一步测试显示液晶分子的光控取向状态可在 85°C 环境中保持 14d 以上。该项研究成果为高敏感度光控型 PI 取向层材料的研制与开发提供了新的思路。

5 结语

PI 液晶取向层的研究与开发涉及化学、液晶物理学、电学、光学、材料学等众多学科,无论是摩擦取向型还是光控取向型 PI 液晶取向层,其基础研究方面尚有众多问题有待解决。作为我国重点支持的高技术产业之一,以 TFT-LCD 为代表的平板显示产业近年来发展迅猛,但 TFT-LCD 使用的 PI 液晶取向层全部依赖进口。随着全球液晶面板行业竞争的日益激烈,迫切要实现 PI 液晶取向层的国产化。由于我国在 PI 液晶取向层基础与产业化研究领域的积累较为薄弱,因此造成目前 PI 液晶取向层长期依赖进口的局面。

综上所述,无论是从基础研究还是应用研究角度来看,深入开展液晶分子用高性能 PI 取向层的结构与液晶分子取向控制技术研究对于推动我国 TFT-LCD 工业的发展以及提高国际竞争力都具有重要的意义。

参考文献

- [1] Katayama M. TFT-LCD technology[J]. Thin Solid Films, 1999, 341(1/2): 140-147.
- [2] Liu C T. Revolution of the TFT LCD technology[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(4): 342-350.
- [3] Chiu P H, Li W Y, Chen Z H, et al. Roll TFT-LCD with 20R curvature using optically compensated colorless polyimide substrate[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016: 47(1): 15-17.
- [4] Tyagi A, Chatterjee D S. Liquid crystal display; environment &

- technology[J]. International Journal of Environmental Engineering Science and Technology Research, 2013, 1(7): 110-123.
- [5] Takatoh K, Sakamoto M, Hasegawa R, et al. Alignment technology and applications of liquid crystal devices [M]. New York: Taylor & Francis, 2005.
- [6] Toney M F, Ressel T P, Logan J A, et al. Near-surface alignment of polymers in rubbed films[J]. Nature, 1995, 374: 709-711.
- [7] Lee T R, Kim J H, Lee S H, et al. Investigation on newly designed low resistivity polyimide-type alignment layer for reducing DC image sticking of in-plane switching liquid crystal display[J]. Liquid Crystals, 2017, 44(4): 738-747.
- [8] Yeung F S Y, Ho Y L J, Li Y W, et al. Liquid crystal alignment layer with controllable anchoring energies[J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(1): 24-27.
- [9] Momoi Y, Sato U, Koda T, et al. Surface rheology of rubbed polyimide film in liquid crystal display[J]. Optical Mater Express, 2014, 4(5): 1057-1066.
- [10] Aerle N A J M, Tol A J W. Molecular orientation in rubbed polyimide alignment layers used for liquid-crystal displays[J]. Macromolecules, 1994, 27(22): 6520-6526.
- [11] Kim J H, Rosenblatt C. Temperature effect on a rubbed polyimide layer[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(1): 155-158.
- [12] Chigrinov V G, Kozenkov V M, Kwok H S. Photoalignment of liquid crystalline materials: physics and applications [M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Chrzanowski M M, Zielinski J, Olifierczuk, et al. Photoalignment-an alternative aligning technique for liquid crystal displays[J]. Journal of Achievements in Materials Manufacturing Engineering, 2011, 48(1): 7-13.
- [14] Ibn-Elhaj M, Chappellet S, Lincker F, Rolic LCMO photo alignment technology: mechanism and applications to large LCD panels[J]. Solid State Phenomena, 2012, 181-182: 3-13.
- [15] Miyachi K, Kobayashi K. The world's first photo alignment LCD technology applied to generation ten factory [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2010, 41(1): 579-582.
- [16] Miyake I, Asagi H, Shimizu M. Photo-alignment and n-FFS LCD technologies with IGZO-TFT applied to generation eight factory[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 592-595.
- [17] Kim D H, Lim Y J, Kim D E, et al. Past, present, and future of fringe-field switching-liquid crystal display[J]. Journal of Information Display, 2014, 15(2): 99-106.
- [18] Melik H, Emek M, Yilmaz S. Molecular alignment on polyimide film for liquid crystal by the application of photolithography[J]. Cankaya University Journal of Science and Engineering, 2011, 8(1): 99-109.
- [19] Atkuri H M, Leong E S P, Hwang G, et al. Developing novel liquid crystal technologies for display and photonic applications[J]. Displays, 2015, 36: 21-29.
- [20] Nishikawa M. Design of polyimides for liquid crystal alignment films[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2000, 11(8-12): 404-412.
- [21] Nishikawa M, West J L, Reznikov Y, et al. Effect of chemical structures of polyimides on photosensitivity of liquid crystal alignment using a polarized UV exposure[J]. Liquid Crystals, 1999, 26(4): 575-580.
- [22] Lin C S, Shih S J, Lu A T, et al. The quality improvement of PI coating process of TFT-LCD panels with taguchi methods [J]. Optik, 2012, 123(8): 703-710.
- [23] Jaw J H, Li H A, Liu S F, et al. Study of polyimide film alignment via ink-jet printing and ion-beam processing [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 776-779.
- [24] Usami K, Sakamoto K, Ushioda S. Cyclobutane ring cleavage of CBDA-ODA polyimide molecules induced by linearly polarized UV light[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2001, 368(1): 453-460.
- [25] Matsui C, Kunitatsu N, Sonoda H. Liquid crystal display device; US, 8497002[P]. 2013-06-30.
- [26] Kim D G, Lee W Q K, Ahn H J, et al. Effect of surface anisotropy of a rubbed polyimide film on liquid crystal alignment properties[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2009, 40(1): 1641-1643.
- [27] Chiou D R, Chen L J, Lee C D. Pretilt angle of liquid crystals and liquid-crystal alignment on microgrooved polyimide surfaces fabricated by soft embossing method[J]. Chemistry of Materials, 2006, 22(22): 9403-9408.
- [28] Hasegawa M, Taira Y. Nematic homogeneous photoalignment by polyimide exposure to linearly polarized UV[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 1995, 8(2): 241-248.
- [29] Chigrinov V G, Kwok H S, Takada H, et al. Liquid crystal photoalignment: history and future[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6487: 64870.
- [30] Sakamoto K, Usami K, Kikegawa M, et al. Alignment of polyamic acid molecules containing azobenzene in the backbone structure; effects of polarized ultraviolet light irradiation and subsequent thermal imidization [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(2): 1039-1043.
- [31] Koide N, Mihara T. Photocrosslinked film of polymers having chalconyl moiety and their alignment capability for liquid crystal materials[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5003: 63-72.
- [32] Kim H J, Yi M H, Shin D M. Photo-alignment using a photodecomposition polyimide and effect of reactive monomers[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2012, 567(1): 110-116.
- [33] Yang B N, Shin D M. Photo-alignment using benzophenone sensitized photodecomposition of the polyimide[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2014, 599(1): 118-124.
- [34] Lee S W, Park S Y, Shin D M. Synthesis and photo-alignment properties of novel polyimides with cyclobutane-1,2,3,4-tetracarboxylic dianhydride (CBDA)[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2015, 620(1): 159-165.
- [35] Li X, Zhong Z, Lee S H, et al. New photoalignment polymeric materials with excellent photosensitivity and stability[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2004, 35(1): 1213-1215.

收稿日期: 2018-05-01

修稿日期: 2019-06-09