

文章编号:1007-2780(2025)10-1440-10

液晶器件无机取向技术的发展及应用

苑留涛¹, 孙嘉盈¹, 黄悦蓁¹, 刘嘉乐¹, 姚丽双^{1,2*}, 沈奕², 张汉焱^{2*}

(1. 汕头大学理学院, 广东 汕头 515063;

2. 汕头超声显示器技术有限公司 广东省车载显示触控技术企业重点实验室,
广东 汕头 515041)

摘要: 与传统摩擦聚酰亚胺取向技术相比, 液晶无机取向技术具有耐高温、抗紫外线、高稳定性等优点。目前, 该技术已成为液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)行业的重要发展方向, 并在激光显示及硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)等高端显示领域展现出广阔的应用前景。本文主要综述了液晶无机取向技术的发展、核心技术及其应用。首先, 简要介绍了液晶显示技术的研究背景及工作原理; 其次, 重点介绍了无机取向膜的制备工艺与材料选择; 随后, 进一步探讨了无机取向技术在显示与非显示领域的应用, 包括高分辨率硅基液晶器件和投影机; 最后, 总结了液晶无机取向技术的发展现状与应用前景, 并展望了未来有待提升的技术手段。

关键词: 液晶显示; 无机取向膜; 显示技术; 硅基液晶; 高分辨率

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0153 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0153

Development and applications of inorganic alignment technology for liquid crystal devices

YUAN Liutao¹, SUN Jiaying¹, HUANG Yuezhen¹, LIU Jiale¹,
YAO Lishuang^{1,2*}, SHEN Yi², ZHANG Hanyan^{2*}

(1. College of Science, South Shantou University, Shantou 515063, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Automotive Display and Touch Technologies,
Shantou Goworld Display Technology Co. Ltd., Shantou 515041, China)

Abstract: Compared with the traditional rubbed polyimide alignment technology, inorganic alignment technology (IAT) offers advantages such as high-temperature resistance, ultraviolet stability, and long-term reliability. At present, IAT has become an important development trend in the liquid crystal display (LCD) industry, and it shows broad application prospects in high-end display fields including laser displays and liquid crystal on silicon (LCoS) devices. This paper reviews the development, core technologies, and

收稿日期: 2025-08-05; **修订日期:** 2025-09-09.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2021YFB3600300); 广东省自然科学基金(No.2023A1515011826); 广东省平台基地及科技基础条件建设项目(No.20231202)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB3600300); National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2023A1515011826); Guangdong Provincial Platform Base and Technology Infrastructure Construction Project (No.20231202)

*通信联系人, E-mail: lsyao@stu.edu.cn; hyzhang@goworld-lcd.com

applications of inorganic alignment technology for liquid crystals. First, the background and working principles of liquid crystal display technology are briefly introduced. Second, the preparation processes and material selection of inorganic alignment films are discussed in detail. Then, the applications of IAT in both display and non-display fields are further explored, with emphasis on high-resolution LCoS devices and projectors. Finally, the current development status and application prospects of IAT are summarized, and future technical improvements are also presented.

Key words: liquid crystal display; inorganic alignment film; display technology; liquid crystal on silicon; high resolution

1 引言

液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)因其技术成熟、成本低、产能充足而适合大规模生产,尤其在大尺寸显示领域(如电视和商用显示器)中具有明显优势。目前,该技术在全球显示市场中仍占据主导地位,尤其在电视、显示器、笔记本电脑和平板电脑等应用领域。根据市场研究机构的数据, LCD 的市场份额大约仍在 60%~70% 之间。在液晶显示器件的制备流程中,取向技术是至关重要的一环,取向效果的好坏直接影响液晶显示器的显示性能。目前液晶器件的工业化生产多采用摩擦聚酰亚胺法进行取向处理,而摩擦过程易产生的沟痕、静电和尘埃会严重损害精细显示的质量,造成器件良品率降低;同时由于聚酰亚胺材料是有机物,其所制备的显示器件用于高能激光显示、紫外光调制等应用场景时,有机取向层的使用寿命会大打折扣,直接限制了器件的使用寿命。

液晶无机取向技术作为传统有机取向技术的替代方案,近年来在显示领域备受关注。相比有机取向技术,无机取向技术具有耐强光、抗紫外光、耐高温、高清晰度、高亮度和完美适配激光显示等特性,兼备取向高可靠性和兼容性。无机取向技术在稳定性、透过率和环保性方面具有显著优势,特别适合高性能显示器和高端应用场景,有望在高端显示领域(如车载、VR、8K 电视)逐步替代传统有机取向技术。

从性能比较来看,有机取向层的耐高温上限一般为 200~250 °C,超过该上限易失效;而无机取向层可在 400 °C 以上保持稳定。在抗紫外性能方面,有机取向层的抗辐照剂量低于 10^2 J/cm²,长期照射易降解;而无机取向层可承受超过 10^3 J/cm²

的辐照,且抗老化性能优异。在寿命方面,有机取向层通常为 1~3 年,而无机取向层可稳定使用超过 5 年。在缺陷方面,有机取向工艺依赖摩擦,易产生沟痕、静电与颗粒污染;无机取向工艺则无需摩擦处理,取向均匀性更佳。

综上所述,无机取向技术在耐热性、抗紫外性、寿命和缺陷控制方面具有显著优势。随着新型显示技术的快速发展,无机取向技术有望在高端显示领域中获得更为广泛的应用,其发展趋势和应用拓展值得进一步深入研究。

2 液晶无机取向技术

1888 年,奥地利植物学家弗里德里希·莱尼泽首次观察到液晶现象。几十年后,德国物理学家奥托·勒曼提出“液晶”概念并研究其光学特性^[1]。而关于液晶的取向技术是 1936 年由查尔斯·马奥恩提出通过表面摩擦控制实现了对液晶的取向^[2]。直到 19 世纪 60 年代,美国 RCA 公司的乔治·海尔迈耶团队发现液晶在外加电场下可改变光透过率,这一重大发现奠定了液晶显示技术的研究基础^[3]。由此,液晶显示技术逐渐兴起,光控取向法和无机材料表面处理法也相继被提出。随着材料科学和纳米技术的进步,非接触式的取向技术进一步成为研究热点。

无机取向技术是 LCD 显示行业中的一项重要创新。作为一种较为新兴的非接触式液晶取向技术,它的核心原理是将传统的有机聚合物使用无机材料来代替,并在无机材料上进行各向异性处理,从而诱导液晶分子排列,进而解决传统取向有机材料(如聚酰亚胺)在取向时存在的若干问题^[4]。因制备方式不同,相比有机材料,无机材料更具有耐用性、光热稳定性以及更好的抗老化

能力。无机取向技术可以显著提高液晶显示器的显示性能和可靠性,因此被广泛应用于各个高端液晶显示设备的制造中^[5-7]。

3 液晶无机取向技术的发展

3.1 无机取向膜制备工艺

3.1.1 物理取向方式

(1) 倾斜蒸镀法

倾斜蒸镀法是液晶取向的一项重要技术,该技术在 20 世纪 70 年代被首次提出,并主要用于液晶显示器件的制造。早在 1972 年, Janning 等人^[8]在理论层面上提出,采用真空沉积法制备一氧化硅取向薄膜,通过倾斜沉积的方式可以调控薄膜的定向生长,从而形成独特的表面形貌。这种表面特性赋予一氧化硅取向薄膜一定强度的表面各向异性,液晶分子于其上可以实现定向诱导排列。采用这种方法制备的取向膜具有优良的耐光热稳定性,并赋予光电器件较高的对比度和良好的均匀性。此后,研究者们对倾斜蒸镀取向方式展开了多角度的研究探索。图 1 为倾斜蒸镀设备图。

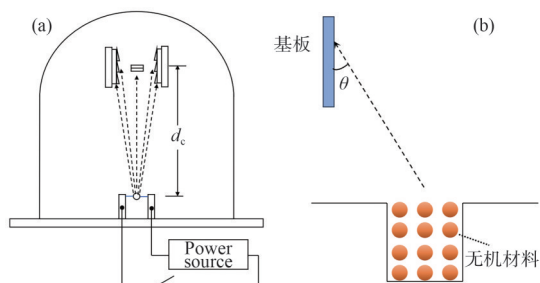


图 1 (a) 真空倾斜沉积装置示意图; (b) 倾斜蒸镀薄膜示意图。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of vacuum oblique deposition device; (b) Schematic diagram of oblique evaporation film.

众多研究发现,蒸镀过程中倾角的变化不仅会影响取向方式,还会对液晶分子最终排列的预倾角产生影响。当基板蒸镀倾角较小($5^{\circ} \sim 20^{\circ}$)时,液晶分子趋于平行取向排列;随着基板倾斜角度的增加,在蒸镀角度达到 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时,液晶分子更倾向于垂直取向排列。围绕这种取向方式如何引导液晶分子实现定向排列的机理,研究者

们进行了广泛讨论。

1972 年, Guyon 等人^[9]推测,这种取向效果来源于蒸镀薄膜表面形成的锯齿状结构,使得贴近基板表面的液晶分子沿锯齿状结构方向排列。同年, Dwight W. Berreman^[10]从理论层面探讨了沟槽表面对液晶分子取向的作用机制。他的研究表明,液晶分子会沿着弹性应变能最低的方向排列,以维持最低能量状态。研究者们将这一想法称为“沟槽理论”,可以用正弦波近似来描述这一表面形状,如图 2 所示。

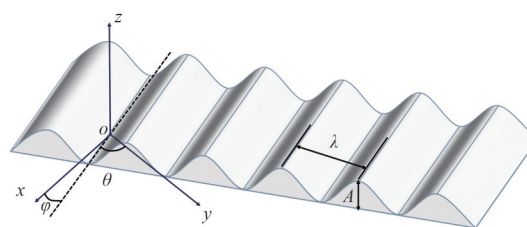


图 2 正弦型沟槽表面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sinusoidal groove surface

其中,该正弦波的振幅为 A ,波矢 $q = 2\pi/\lambda$, λ 为表面沟槽形貌的空间周期。5 年之后, Goodman 等人在前人的研究基础上对取向技术的机理进行了进一步探究,通过电子显微镜观察,证实了倾斜蒸镀薄膜的表面是由倾斜的柱状结构组成,并由此提出了“蒸发柱状取向模型”。此外,他们还通过测量发现,当蒸镀倾角为 7° 时,液晶分子的预倾角约为 40° ^[11]。

1978 年,清华大学研究团队首次提出了旋转倾斜蒸镀 SiO 的方法,用于液晶显示器件的取向^[12]。两年之后,日本的 Uchida Tatsuo 等人^[13]在 Goodman 研究基础上进一步探究了蒸发条件对表面形貌及取向的影响。他们将倾斜蒸镀 SiO 薄膜的表面用垂直表面偶联剂处理,基于垂直取向效果实现了具有小预倾角的液晶取向。在对比经过和没有经过垂直取向处理的表面薄膜后,研究结果表明,在任何沉积角度下, SiO+DMOAP 表面上预倾角 β 值比 SiO 表面上大 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。在柱状结构和液晶分子取向的膜厚依赖性问题上,当薄膜很薄时,表面 D 取向占主导地位,液晶分子倾角接近 90° ;当膜厚逐渐增加时,表面 B 取向效应强于 D,在表面 B 的作用下,倾角逐渐增大;膜厚进一步增加时,表面 C 覆盖了表面 D 的影响,预倾

角的增加达到饱和。这说明 Goodman 提出的斜蒸发膜柱状结构模型可以很好地解释蒸镀条件、表面形貌和液晶取向之间的作用关系。

倾斜蒸镀法可通过调控沉积角度和薄膜结构实现液晶分子预倾角的灵活控制。此法为液晶物理取向研究提供了实验基础,也为后续的离子束轰击、纳米压印等非接触取向工艺提供了重要借鉴。

(2) 离子束轰击法

随着 1972 年 Janning 等人提出使用倾斜沉积方式制备的薄膜可用于液晶分子的取向,更多研究者认为在基板表面沉积无机材料薄膜的表面形貌是诱导液晶分子取向的关键所在。基于这一取向机理,越来越多的无机材料也被尝试用于制备液晶取向层。

1979 年,Michael 等人提出了一种新无机取向膜的制备方式,其用离子束对无机材料薄膜表面进行处理,使其表面获得了液晶分子取向效果,该法被称为“离子束轰击法”,如图 3 所示。此方法可以用于液晶显示、光学相控阵等领域,以代替传统的摩擦取向技术,从而提供更精确、更稳定的取向效果。

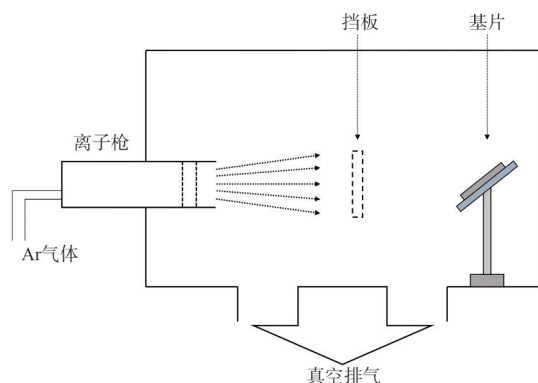


图 3 离子束倾斜轰击无机薄膜示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ion beam oblique bombardment of inorganic thin films

Yaroshchuk 等人^[14]在 2004 年成功使用离子束轰击法,在不同的有机和无机材料基底上实现了向列相液晶的平行取向与倾斜取向效果。无机材料轰击时,随着离子束能量的不同,其上排列的液晶分子的取向方向会发生变化。当使用低能量的离子束(50~150 eV)对薄膜材料进行轰击时,液晶分子更倾向于平行薄膜平面排列,即获得了平

行取向;随着离子束能量的增加(150~800 eV),液晶分子开始相对于薄膜平面有一定的倾斜角度,若离子束能量足够大(>800 eV),液晶分子则更倾向于与薄膜平面垂直,即获得了垂直取向。可以通过改变离子束参数(如入射角度、电流密度、粒子能量),实现两种取向方向的转变。

2007 年,Phil Kook Son 等人^[15]基于离子束轰击技术在非晶态 SiO₂ 薄膜上成功实现液晶分子的取向效果。该团队使用射频磁控溅射技术在 ITO 玻璃基板上沉积 50~100 nm 厚度范围的 SiO₂ 薄膜,通过改变离子束入射角度(25°~80°)和轰击时间(1~4 s),实现了液晶分子预倾角 8°~89° 的控制范围。2015 年,Hae-Chang Jeong 等人^[16]提出了一种利用褶皱壁结构实现液晶分子取向的新方法,该方法通过对聚二甲基硅氧烷(PDMS)表面进行局部离子束轰击,形成褶皱壁结构。通过调控离子束轰击的功率和掩模图案的宽度,可以进一步控制褶皱壁的形成,从而实现液晶的稳定取向。该方法在使用了离子束轰击技术的同时,还加入了褶皱壁结构的构思,为柔性显示技术的制备提供了新的思路。

(3) 纳米压印技术

2000 年前后,纳米压印技术(Nanoimprint Lithography, NIL)开始发展。NIL 技术是一种高分辨率、低成本的微纳加工技术,该技术主要应用在半导体和光刻领域。2001 年开始,研究人员逐渐使用纳米压印技术在液晶取向领域进行探索,结合前文提到的 Berreman 的“沟槽理论”,部分研究人员开始利用纳米压印技术在无机薄膜基板上直接压印纳米沟槽,并以此作为液晶分子取向的基础结构。

2021 年,Chia-Rong Sheu 等人^[17]利用纳米压印光刻技术制造了周期为 1 μm、高度为 328 nm 的单向纳米楔形结构(Nano-wedges),一维纳米结构的具体制备流程如图 4 所示。

这些结构的斜面可以给液晶分子提供一定的预倾角,实现了均匀的液晶垂直取向。单向斜面明显提高了液晶的取向质量,同时减少了向错线的数量。这项技术为探索结构形状对液晶分子取向性能的影响提供了新思路。2023 年,Dong-Hyun Kim 等人^[18]为液晶无机取向技术提供了一个新的方案,他们通过溶胶-凝胶法将 SnO 溶

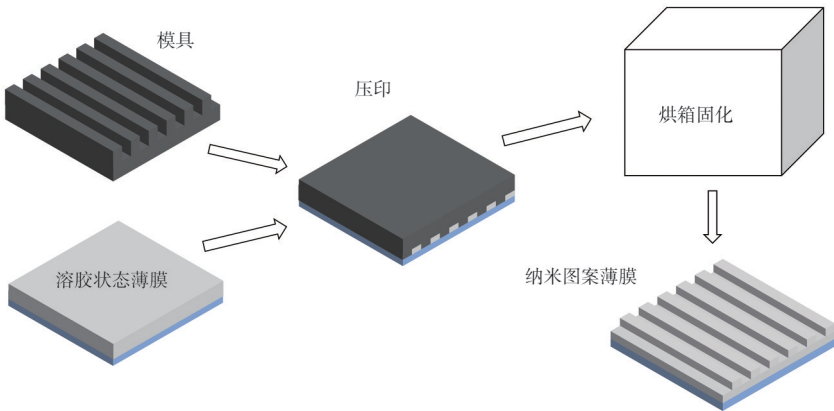


图 4 一维纳米结构制备流程图
Fig. 4 Flow chart of the fabrication process of one-dimensional nanostructures

液掺杂到 InO 溶液中,首先制备了不同掺杂比例 (10:0、3:7、2:8、0:10) 的薄膜;随后基于纳米压印光刻技术在硅片上制备了具有周期性的纳米级图案,使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)模具将该纳米图案转印到 InO/SnO 薄膜上。使用图案化薄膜基板制成的液晶器件可获得良好的液晶取

向,并可以通过调整掺杂比例实现液晶分子从平行取向到垂直取向的转换,这为开发新型 LCD 模式提供了新的参考思路。
由表 1 可见,不同取向工艺在应用目标和工艺条件上各有侧重,因此在实际应用中需要根据器件性能需求与工艺条件进行合理选择。

表 1 3 种典型无机取向工艺特点的差异
Tab. 1 Characteristic differences of three typical inorganic alignment techniques

工艺方法	优点	缺点	应用场景
倾斜蒸镀法	工艺成熟,取向均匀性好;耐光、耐热稳定性佳;对比度高	工艺复杂,膜厚和蒸镀角度控制难;大面积均匀性有限	早期 LCD、科研探索型显示器件
离子束轰击法	非接触式工艺;预倾角可控范围广;适合高分辨率、大视角液晶器件	工艺设备昂贵;大面积处理效率较低;能量控制要求高	高端 LCD、LCoS 芯片、光学相控阵等精密应用
纳米压印技术	分辨率高;结构可设计性强;低成本大面积制备潜力	模具制作难度大;重复压印易导致缺陷;柔性基板适配性有待提升	新型 LCD 模式开发、柔性显示、可调控光学器件

3.1.2 化学取向方式

(1) 光诱导取向法

光诱导取向法(Photoalignment)是一种通过紫外光(UV)、偏振光或特定波长光照改变取向层表面性质,从而实现液晶分子有序排列的方法。相比传统的摩擦取向法,光诱导取向法是一种非接触式、无污染、高精度可控的液晶取向技术。在液晶无机取向领域,光诱导取向法与无机材料(如 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、ZnO、ITO)相结合,可以提升液晶分子取向的稳定性、耐久性和可调控性。
早在 1980 年,研究人员最早采用偶氮苯(Azobenzene)衍生物作为光敏材料,发现其在偏振紫外光照射下,会发生顺反异构化(Trans-cis

Isomerization),从而导致表面分子重排,引导液晶分子沿光偏振方向取向^[19]。随后,研究人员们逐渐开始尝试使用无机材料对液晶分子进行取向。1995 年,日本的研究团队首次在 SiO₂ 表面实现了光诱导液晶取向,并应用于液晶显示器。2023 年,龙震^[20]在对基于无机取向技术的高分辨率硅基液晶(LCoS)器件的制备研究中,使用氧化锌(ZnO)作为无机取向薄膜材料,通过磁控溅射技术将 ZnO 薄膜沉积在基板上,再利用偏振紫外光处理薄膜基板,实现了液晶分子的垂直取向,制成的液晶器件展现了更低的阈值电压、更高的对比度和更好的取向效果,为高性能 LCoS 器件的制备奠定了基础。

2024年,Jose等人^[21]提出了一种基于聚合物结合氧化锌纳米棒(ZnO)和染料掺杂液晶微透镜阵列的方法。该方法通过高光强激光束照射进而诱导染料掺杂的液晶分子的非线性光学响应,使液晶分子沿着偏振光的方向重新取向,最终实现了液晶分子的定向排列。此外,该团队利用聚合物结合的纳米棒进一步增强了取向的稳定性,实现了分子定向的永久记忆效应。因为可以通过控制激光偏振方向来实现可编程的光学图案,此种利用光诱导取向且具有偏振依赖性的微透镜阵列在光学防伪和安全印刷领域具有潜在应用价值。

(2) 自组装取向法

自组装取向法是一种基于分子自发有序排列行为来实现液晶分子初始取向控制的非接触式取向方法。该技术利用分子间相互作用(如范德华力、氢键、 π - π 作用、静电力等),在液晶取向层表面构建具有各向异性和有序结构的自组装界面,从而引导液晶分子沿特定方向排列。该方法依赖于化学键合、表面能调控、偶极相互作用等工作机制,无需机械摩擦或光照处理即可实现液晶的取向效果。自组装取向技术的核心在于分子或纳米材料的自组织行为,通常包括自组装单分子层(SAMs)、纳米结构诱导取向、多层自组装(Layer-by-Layer, LbL)等3种主要构建方式。

2000年代初期,研究人员利用十八烷基三氯硅烷(OTS)在二氧化硅(SiO_2)基底上自组装,成功实现了液晶沿面平行排列的取向效果。2003年,Yuliang Wang等人^[22]通过控制生长溶液的干燥程度和浸泡时间,实现了对OTS薄膜生长过程的调控,将OTS分子逐个吸附在清洁的 SiO_2 表面,形成超光滑单分子层,从而实现了对液晶分子沿面平行排列的取向效果。2010年前后,研究者们通过在组装过程中引入纳米阵列、金属氧化物的方式,逐渐提升了液晶的取向精度。随着技术手段的提升与材料科学的发展,近些年来,科学人员已开始研究可重构取向层(Reconfigurable Alignment),结合光、电、磁调控,实现液晶动态超表面控制。

2022年,邹凤萍等人^[23]通过自组装的方法将ZnO纳米粒子沉积在ITO玻璃基底上,通过调整ZnO的煅烧温度来调控其纳米结构,最后结合摩擦法实现了对液晶分子预倾角在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内

的调控。2023年,桑景新^[24]使用多元醇还原法合成的长度约为 $5.8\text{ }\mu\text{m}$ 、直径约为 86.5 nm 的银纳米线,将其分散在液晶E7中,再结合偏振蓝光照取向层(偶氮苯SD1)。光取向层的偶氮苯染料SD1分子可以在不同偏振方向的线性偏振蓝光下发生再取向,使液晶分子的指向矢与银纳米线的长轴发生偏转,即通过改变偏振光方向实现了银纳米线的动态取向调控。其利用光取向技术成功实现了大尺寸银纳米线在液晶中的多畴自组装,为制备高性能光电器件提供了新的思路。

3.2 无机取向膜材料

在无机取向技术中,材料的选择对取向效果、器件性能及稳定性具有重要影响。无机取向膜材料主要有无机氧化物、金属氧化物、纳米材料、复合无机材料以及其他功能材料。

3.2.1 氧化物类

无机氧化物是无机取向技术中最常用的材料之一,主要包括二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)等。这些材料具有优异的化学稳定性、耐热性和机械强度,适合用于高性能显示器件。2006年,Phil Kook Son等人^[25]通过X射线衍射和X射线光电子能谱分析发现,当 a-SiO_x 薄膜表面的 x 接近1.5时,可实现液晶的垂面排列取向;进一步通过改变离子束参数(如离子束能量、入射角和曝光时间),他们实现了预倾角的控制。2008年,Hong-Gyu Park等人^[7]研究了 Al_2O_3 取向膜在离子束照射后的取向特性,并成功制备出具有垂面排列取向的液晶器件。通过XPS分析,他们认为离子束辐射改变了 Al_2O_3 表面的化学结构,使 Al-O 结合能发生转移,并影响了 Al-O 键的强度,从而促进了垂面排列取向的形成。

2012年,Phil Kook Son等人^[26]基于扫描探针显微镜(SPM)和XPS技术研究了离子束辐照对 SiO_x 表面的影响。研究结果表明,具有高或低预倾角的液晶排列不受表面形态的影响,而是取决于离子束处理的 SiO_x 表面的电势粗糙度。使用低能离子束照射 SiO_x 表面可以引起 SiO_x 表面的偶极矩变化,从而导致电势粗糙度的增加,液晶分子可以在具有高电势粗糙度值的 SiO_x 表面上垂直排列。这为离子束调控无机取向膜特性提供了新的理解和实验依据。以上研究表明,无机

氧化物的化学稳定性和可调控性使其成为液晶取向材料的重要选择。

金属氧化物在无机取向技术中主要用于增强材料的导电性或磁性,适用于特殊功能液晶器件。其中氧化铟锡(ITO)和铁酸镍(NiFe_2O_4)为主要代表,ITO具有高导电性和高透明度,主要作为透明电极材料,通过溅射法形成取向膜。 NiFe_2O_4 因为具有磁性,主要用于聚合物纳米复合材料中,其纳米颗粒具有磁响应特性。当这些磁性纳米颗粒分散在液晶材料中时,可以作为磁性填料,使复合材料在外部磁场作用下产生响应。在外部磁场作用下, NiFe_2O_4 纳米颗粒会沿着磁场方向排列。由于液晶分子与磁性纳米颗粒之间存在相互作用,这种排列可能会带动液晶分子的取向发生变化,从而实现液晶取向方向的调控^[27]。2023年,高亮的一项发明专利表明,在构筑磁性无机填料与有机聚合物复合的流动态或熔融态体系时,通过施加磁场,可使磁性填料内部的磁偶极子发生磁化。磁化后的偶极子产生磁力矩,进而驱动填料发生定向排列,从而实现对液晶取向的有效调控。

3.2.2 非氧化物类

在液晶无机取向技术中,非氧化物无机材料和纳米材料因其独特的物理化学特性,逐渐成为液晶取向技术中的重要研究方向。这些材料与传统氧化物材料相比,展现出了更加优异的性能,特别是在液晶分子的排列精度、稳定性以及功能性调控方面。

非氧化物无机材料如类金刚石碳(DLC)、氮化硅(Si_3N_4)、氮化铝(AlN)和硫化锌(ZnS)等,因其优异的热稳定性、机械强度及抗腐蚀性,在液晶无机取向膜的应用中得到了广泛关注。其中氮化硅(Si_3N_4)作为一种常见的非氧化物材料,因其高温稳定性和良好的机械强度,广泛应用于高性能液晶显示器件中。通过化学气相沉积(CVD)或物理气相沉积(PVD)等方法,氮化硅薄膜可以在液晶显示器中提供平滑、稳定的表面,帮助液晶分子精确地定向排列。2005年,Han-Jin Ahn等人^[28]使用考夫曼离子源对氟化类金刚石(FDLC)薄膜进行100~200 eV的照射,并调整入射角度为 80° ,获得了液晶分子预倾角为 89.9° 的垂直取向效果。2011年,Byoung-Yong Kim等人^[29]使用等离

子束从不同入射角度轰击由等离子体增强化学气相沉积设备(PECVD)制备的氮化硅物(SiN_x)薄膜,离子束处理后的取向膜表面化学键发生变化,部分Si—N键转化为Si—O键, SiO_2 含量从14%增至41.2%,降低了取向膜的表面能,从而实现了液晶分子的垂直取向。

纳米材料因其独特的量子尺寸效应和表面效应,在无机取向技术中展现出巨大潜力。其中,纳米 SiO_2 尤为突出,凭借其高比表面积和优异的分散性,在液晶显示器中主要作为取向膜使用。通过溶胶-凝胶法或模板法,可构建纳米级沟槽结构,从而进一步提升液晶分子的排列精度^[30]。

此外,复合无机材料结合了多种材料的优势,赋予其多重优异特性,使其能够实现更精细的取向调控和功能优化。在高性能显示和柔性电子领域,纳米材料与复合无机材料均展现出广阔的应用前景。随着新材料和新工艺的不断发展,无机取向技术有望在更多领域取得突破性进展。

4 液晶无机取向技术的应用

无机取向技术在显示领域得到了广泛应用,该技术可通过调控液晶分子的预倾角和排列均匀性,有效提升液晶显示器的响应速度、视角范围和对对比度。例如,爱普生(EPSON)公司推出的高端工程投影机CB-2264U,采用无机液晶面板与垂直取向(VA)技术,实现了高达5 500 lm的色彩亮度和15 000:1的对比度。此外,无机取向技术还广泛应用于高清显示、AR/VR智能设备以及5G通信的LCoS芯片,显著增强了系统的光学性能与稳定性^[20]。相比于传统的摩擦取向工艺,无机取向常采用离子束轰击等非接触式技术,避免了静电损伤等问题,提高了高分辨率液晶面板在制造过程中的可靠性^[31]。

2019年,上海慧新辰实业有限公司成功研发并发布了国内首颗高性能无机取向LCoS芯片及配套光学模组。在智能汽车领域,基于LCoS方案的AR-HUD产品出货量持续快速增长。2024年,国内厂商芯鼎微公司推出的LCoS显示屏与芯片采用了VAN液晶,取向层选用无机 SiO_x 材料,并辅以模组级密封封装工艺。与有机取向方案相比,采用无机取向技术的LCoS芯片在耐高

温性与稳定性方面表现更优,功耗更低,在强光环境下(如阳光倒灌)也具备更强的应对能力。

5 总结与展望

近年来,液晶无机取向技术得到了显著发展,并在高端显示领域展现出广阔的应用前景。相比传统有机取向技术,无机取向技术凭借耐光、耐高温、抗老化和高稳定性等优势,正成为液晶显示的重要研究方向。本文介绍了液晶无机取向技术的发展、主要取向方法及材料选择。液晶无机取向技术的优化克服了传统摩擦取向的局限性,为高端显示器件的制备提供了新方案。

目前,液晶无机取向技术已在8K超高清显示、车载显示、VR/AR、高功率激光调制等领域展现出优越性能。无机取向层因高稳定性和低缺陷率,应用价值突出。离子束轰击技术的精细可控性、纳米压印的低成本拓展性、光诱导取向的高精度

非接触特性,为液晶显示行业的进一步发展提供了可能。然而,液晶无机取向技术的工业化应用仍面临挑战。首先,大面积均匀性控制仍需优化,以满足大尺寸液晶面板的批量生产需求。其次,无机材料虽具优异稳定性,但加工成本仍需降低,以提升商业化竞争力。此外,针对可穿戴设备、柔性显示等应用,需进一步优化材料选择和工艺设计,以适应更广泛的需求。

随着未来材料科学、纳米制造、光电集成等技术进步,液晶无机取向技术有望实现更高取向精度、更优材料兼容性及更低制造成本。结合人工智能优化取向工艺,将提升智能化水平,实现高效、高精度取向控制。此外,对新型无机材料(如二维材料、金属氧化物等)的探索,也有望推动新型显示技术的发展。

随着工艺和材料的持续优化,无机取向技术将在高端显示及新兴应用领域发挥重要作用,推动液晶显示产业迈向更高水平。

参 考 文 献:

- [1] 李巍,高志强,密保秀,等. 液晶取向技术[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2009,29(4):90-96.
LI W, GAO Z Q, MI B X, *et al.* Liquid crystal alignment technology [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2009, 29(4): 90-96. (in Chinese)
- [2] CHATELAIN P. On the orientation of liquid crystals by rubbed surfaces [J]. *Bulletin of the French Mineralogical Society*, 1943, 66(1): 105-130.
- [3] HEILMEIER G H, ZANONI L A, BARTON L A. Dynamic scattering: a new electrooptic effect in certain classes of nematic liquid crystals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1968, 56(7): 1162-1171.
- [4] 邹鹏飞,魏冰妍,杨淑蕾,等. 光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展[J]. 液晶与显示,2017,32(6):411-423.
ZOU P F, WEI B Y, YANG S L, *et al.* Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 411-423. (in Chinese)
- [5] YAN H J, CATANIA C, BAZAN G C. Membrane-intercalating conjugated oligoelectrolytes: impact on bioelectrochemical systems [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(19): 2958-2973.
- [6] BRODY T P, ASARS J A, DIXON G D. A 6×6 inch 20 lines-per-inch liquid-crystal display panel [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1973, 20(11): 995-1001.
- [7] PARK H G, KIM Y H, OH B Y, *et al.* Vertically aligned liquid crystals on a γ -Al₂O₃ alignment film using ion-beam irradiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(23): 233507.
- [8] JANNING J L. Thin film surface orientation for liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(4): 173-174.
- [9] PROUST J E, TER-MINASSIAN-SARAGA L, GUYON E. Orientation of a nematic liquid crystal by suitable boundary surfaces [J]. *Solid State Communications*, 1972, 11(9): 1227-1230.
- [10] BERREMAN D W. Solid surface shape and the alignment of an adjacent nematic liquid crystal [J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(26): 1683-1686.
- [11] GOODMAN L A, MCGINN J T, ANDERSON C H, *et al.* Topography of obliquely evaporated silicon oxide films and its effect on liquid-crystal orientation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, 24(7): 795-804.

- [12] 王良御,蔡瑞年,何秀芳. 用于液晶显示器件的旋转倾斜蒸镀 SiO 法[J]. 清华大学学报(自然科学版),1978(3): 89-94.
WANG L Y, CAI R N, HE X F. The method of evaporation SiO thin film onto the rotation substrate for liquid crystal display devices [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1978(3): 89-94. (in Chinese)
- [13] UCHIDA T, OHGAWARA M, WADA M. Liquid crystal orientation on the surface of obliquely-evaporated silicon monoxide with homeotropic surface treatment [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19(11): 2127-2136.
- [14] YAROSHCHUK O, KRAVCHUK R, DOBROVOLSKYY A, *et al.* Planar and tilted uniform alignment of liquid crystals by plasma-treated substrates [J]. *Liquid Crystals*, 2004, 31(6): 859-869.
- [15] SON P K, SEO J H, KIM J C, *et al.* Ion beam alignment of liquid crystal on amorphous SiO_x film [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2007, 475(1): 65-72.
- [16] JEONG H C, PARK H G, LEE J H, *et al.* Homogeneous self-aligned liquid crystals on wrinkled-wall poly(dimethylsiloxane) via localised ion-beam irradiation [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8641.
- [17] SHEU C R, WANG T J, LIN C H. Homeotropic liquid crystal alignments through periodically unidirectional nano-wedges patterned by nanoimprint lithography [J]. *Micro and Nano Engineering*, 2021, 12: 100090.
- [18] KIM D H, OH J Y, WON J, *et al.* Rigid-flex stamped indium tin oxide film for convertible self-alignment [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 390: 122982.
- [19] NATANSOHN A, ROCHON P. Photoinduced motions in azo-containing polymers [J]. *Chemical Reviews*, 2002, 102(11): 4139-4175.
- [20] 龙震. 基于无机取向技术的高分辨率 LCoS 制备工艺研究[D]. 南京:东南大学,2023.
LONG Z. Research on high-resolution LCoS preparation process based on inorganic alignment technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)
- [21] MEJIA J C, HISANO K, AIZAWA M, *et al.* Inorganic nanorods enable the memorization of photoinduced microlens arrays in dye-doped liquid crystals [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(50): 69881-69890.
- [22] WANG Y L, LIEBERMAN M. Growth of ultrasmooth octadecyltrichlorosilane self-assembled monolayers on SiO₂ [J]. *Langmuir*, 2003, 19(4): 1159-1167.
- [23] 邹凤萍,毕伟华,段然,等. ZnO 纳米结构对液晶取向控制研究[J]. 液晶与显示,2022,37(1):1-6.
ZOU F P, BI W H, DUAN R, *et al.* Effects of ZnO nanostructures on the alignment control of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 1-6. (in Chinese)
- [24] 桑景新. 银纳米线在液晶中的自组装及其光电特性的研究[D]. 上海:东华大学,2023.
SANG J X. Study of self-assemblies of silver nanowires in liquid crystals and their electric-optic properties [D]. Shanghai: Donghua University, 2023. (in Chinese)
- [25] SON P K, PARK J H, CHA S S, *et al.* Vertical alignment of liquid crystal on a-SiO_x thin film using the ion beam exposure [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(26): 263512.
- [26] SON P K, CHOI S W. Investigation of ion-beam-treated SiO_x film surfaces for liquid crystal alignment [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2012, 44(6): 763-767.
- [27] 赵东方. NiFe₂O₄ 纳米颗粒及复合材料的制备与性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2013.
ZHAO D F. Synthesis and characterization of NiFe₂O₄ nanoparticles and composites based on NiFe₂O₄ [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [28] AHN H J, RHO S J, KIM K C, *et al.* Ion-beam induced liquid crystal alignment on diamond-like carbon and fluorinated diamond-like carbon thin films [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(6R): 4092.
- [29] KIM B Y, LEE W K, KIM Y H, *et al.* Vertically aligned liquid crystal molecules on a silicon nitride film treated by ion-beam irradiation [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(15): 5165-5168.
- [30] CHAE S S, HWANG B H, JANG W S, *et al.* Homogeneous liquid crystal alignment on inorganic-organic hybrid silica thin films derived by the sol-gel method [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(5): 1437-1442.

- [31] 曹梦军. 非摩擦液晶取向技术专利分析[J]. 河南科技, 2015(18):1-4.
CAO M J. Patent analysis of non-rubbing liquid crystal alignment technology [J]. *Journal of Henan Science and Technology*, 2015(18): 1-4. (in Chinese)

作者简介:



苑留涛,男,硕士研究生,2019年于厦门理工学院获得学士学位,主要从事液晶无机取向技术及应用的研究。E-mail: 23ltyuan@stu. edu. cn



姚丽双,女,博士,副教授,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶光调控技术的研究。E-mail: lsyao@stu. edu. cn



张汉焱,男,硕士,高级工程师,2009年于汕头大学获得硕士学位,主要从事真空薄膜制备技术的研究。E-mail:hyzhang@goworld-lcd. com