

文章编号:1007-2780(2026)03-0344-09

柔性液晶调光膜的低温垂直取向工艺 优化及基板匹配

陈锐思, 郭新涛, 刘 滢*

(中国航空制造技术研究院 非金属材料技术研究所, 北京 100024)

摘要:针对柔性反式液晶调光膜制备中,传统垂直取向层高温固化与柔性透明导电基板耐温性不匹配的问题,开展低温垂直取向工艺优化与基板适配性筛选研究。在玻璃基板上以 120~140 °C、5 °C 步长研究低温垂直取向剂固化温度对液晶预倾角及其均匀性的影响,并分析取向层固化前后基板透过率与雾度变化;在最优固化温度下引入摩擦处理改善取向质量;进一步通过 V-T 曲线测试验证取向层的电场响应,并开展室温存放与电压循环以评价取向层稳定性;最后在统一工艺条件下对 5 种商用柔性透明导电基板进行方阻热稳定性及取向层固化前后的透过率/雾度变化对比,筛选适配基板。当固化温度由 120 °C 升至 140 °C 时,预倾角均值由 0.69° 降至 0.38° 且标准差由 0.30° 降至 0.04°;在 140 °C 基础上摩擦处理可将预倾角进一步降低至约 0.19°,并同时降低雾度。液晶盒 V-T 曲线呈现明确的电场驱动响应($V_{th} \approx 8.69$ V, $V_{on} \approx 14.06$ V),室温存放 30 天后预倾角变化约 0.02° 且电压循环前后参数稳定。基板筛选结果表明, f3 型聚对苯二甲酸乙二醇酯/氧化铟锡 (Poly(ethylene terephthalate)/Indium Tin Oxide, PET/ITO) 膜在 140 °C 热处理后方阻基本稳定,且取向层固化后透过率维持在约 90%,雾度变化较小,综合表现优于其他样品。本研究确定了适用于柔性调光膜的低温垂直取向工艺温度,并在统一工艺条件下筛选获得与取向层兼容性较好的柔性透明导电基板,为柔性反式液晶调光膜的工艺迁移与材料选型提供实验依据。

关键词:反式液晶调光器件;柔性透明导电膜;低温垂直取向;预倾角

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2026-0004 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2026-0004

Optimization of low-temperature vertical alignment process and substrate compatibility for flexible liquid crystal dimming films

CHEN Ruishi, GUO Xintao, LIU Ying*

(Institute of Nonmetallic Materials Technology, China Academy of Aviation Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: To address the mismatch between the high-temperature curing required by conventional vertical alignment layers and the limited thermal tolerance of flexible transparent conductive substrates in flexible reverse-mode liquid-crystal (LC) dimming films, a low-temperature vertical alignment process and substrate compatibility screening were investigated. On glass substrates, a low-temperature vertical alignment agent was cured at 120~140 °C with a 5 °C step to evaluate the effects of curing temperature on LC pretilt angle and its uniformity, together with the variations in transmittance and haze before/after curing. A rubbing treatment was further introduced at the optimal curing temperature to improve alignment quality. The

收稿日期:2026-01-09;修订日期:2026-02-10.

*通信联系人, E-mail: liuy535@avic.com

electro-optical response of the aligned LC cell was verified by voltage-transmittance (V - T) characterization, and stability was assessed via room-temperature storage and voltage cycling. Finally, under the same processing conditions, five commercial flexible transparent conductive substrates were compared in terms of sheet-resistance thermal stability and the changes in transmittance/haze after alignment-layer curing, aiming to identify compatible substrates. As the curing temperature increased from 120 °C to 140 °C, the mean pretilt angle decreased from 0.69° to 0.38° and the standard deviation decreased from 0.30° to 0.04°. With rubbing at 140 °C, the pretilt angle was further reduced to 0.19°, accompanied by a decrease in haze. The LC cell exhibited a clear threshold behavior in the V - T curve ($V_{th} \approx 8.69$ V; $V_{on} \approx 14.06$ V). After 30-day storage at room temperature, the pretilt change was $\sim 0.02^\circ$, and electro-optical parameters remained stable after voltage cycling. Among the tested substrates, the f3-type PET/ITO showed the most stable sheet resistance after thermal treatment at 140 °C and maintained a high transmittance ($\sim 90\%$) with limited haze variation after curing, outperforming the other candidates. A low-temperature vertical alignment processing window suitable for flexible LC dimming films was established, and a compatible flexible transparent conductive substrate was identified under unified conditions, providing practical guidance for process transfer and substrate selection of flexible reverse-mode LC dimming films.

Key words: reverse-mode liquid crystal dimming device; flexible transparent conductive films; low-temperature vertical alignment; pretilt angle

1 引 言

随着节能建筑与智能交通系统的发展,电控调光技术在智能窗^[1-3]、轨道交通^[4]及航空光学防护^[5]等领域获得广泛关注。近年来,围绕智能窗与调光膜器件的工程化应用,国内外多个研究团队从材料体系、器件结构等方面取得了显著进展^[1-4,6-8]。其中,液晶调光器件因其响应速度快、驱动电压低及光学调控能力强等优势,成为智能调光材料体系中的重要组成部分^[6-7]。

现有液晶调光模式中,反式结构因具备“断电透明、通电着色”的常白特性,在断电安全性与系统能效方面具有明显优势^[8]。然而,反式调光模式对液晶初始垂直取向质量提出更高要求。液晶分子的垂直排列状态直接影响透明态透过率及雾度。因此,获得预倾角小且分布均匀的垂直取向层,是实现高性能反式调光膜的关键基础。

目前,基于聚酰亚胺(Polyimide, PI)的机械摩擦垂直取向技术仍是液晶器件中应用最成熟的取向方式^[9]。已有研究表明,聚酰亚胺分子结构设计、添加剂调控及固化条件优化均可显著影响液晶预倾角及锚定能^[10-12]。然而,传统PI垂直取向膜通常需在200 °C以上完成亚胺化固化过程^[13],

该高温工艺与柔性透明基板的耐温能力存在明显不匹配。

柔性液晶调光膜的工艺温度窗口主要受柔性透明基板及其导电层热稳定性的限制。以常规聚对苯二甲酸乙二醇酯(Poly(ethylene terephthalate), PET)为例,其玻璃化转变温度通常约在70~80 °C,超过该温度后材料模量下降,易产生热收缩与尺寸稳定性降低问题。同时,PET透明导电膜在较高温度下可能出现导电层微裂纹扩展或方阻漂移等电学性能劣化风险。因此,在保证取向层锚定能力的前提下,构建低于传统高温固化条件的取向工艺窗口,是实现柔性调光膜工艺迁移的关键。

为突破高温固化限制,近年来研究者尝试发展光致取向体系^[14-15]或无机取向技术^[16]等替代方案。光致取向材料基于偶氮苯或光敏聚合物体系,可在偏振光作用下诱导液晶分子定向排列,在液晶光学器件中展现出优异的图案化能力。然而,其光热稳定性、锚定强度与长期可靠性仍存在一定局限^[17]。无机取向技术具有优异的耐热与环境稳定性,但通常依赖真空沉积或斜蒸镀工艺,设备成本与工艺复杂度较高,在柔性基板上的适配性仍面临挑战^[16]。因此,在保持垂直取向稳

定性的前提下,实现兼容柔性基板的低温工艺仍是亟待解决的关键问题。

除取向层固化温度外,柔性液晶调光膜的器件性能还与柔性透明导电基板在热处理过程中的电学稳定性及其与取向层之间的界面光学耦合密切相关。不同导电膜体系在热处理后的方阻变化程度及界面折射率匹配情况可能存在显著差异,从而影响器件的透过率与光学均一性。然而,目前关于低温取向工艺条件下柔性导电基板“热-电-光”综合匹配性的系统研究仍相对有限。

基于上述背景,本文围绕柔性反式液晶调光膜的制备需求,研究低温条件下垂直取向工艺对液晶预倾角、透过率及雾度的影响,并在统一工艺条件下对多种柔性透明导电基板进行热稳定性及光学性能变化的对比分析,以期为柔性液晶调光膜的工艺设计与材料选型提供实验依据。

2 实 验

2.1 原料及仪器

实验所用主要材料包括:PET/ITO膜(北京奔向未来技术有限公司、广州金仕塑料制品有限公司、深圳钛翼新材料技术有限公司);聚对苯二甲酸乙二醇酯/银(Polyethylene Terephthalate/Silver, PET/Ag)膜(北京奔向未来技术有限公司);聚酰亚胺/氧化铟锡(Polyimide/Indium Tin Oxide, PI/ITO)膜(昆山汉科化工科技有限公司);透明导电玻璃基板(华南湘城科技有限公司);垂直取向剂(深圳市道尔顿电子材料股份有限公司,型号DL-4027);负性液晶材料(江苏和成显示科技有限公司,型号30900-100,介电各向异性 $\Delta\epsilon\approx-1.6$,双折射率 $\Delta n\approx 0.09$,工作温区 $-40\sim 108\text{ }^\circ\text{C}$);摩擦布(深圳市拓川电子有限公司);封框胶(戴马斯化工(上海)有限公司);间隔珠(苏州知益微球科技有限公司,直径 $7\text{ }\mu\text{m}$)。

实验所用主要仪器包括:涂布平台;紫外固化灯;热台;烘箱;色彩雾度仪(彩谱科技有限公司,CS-700);预倾角测试仪(美国Axometrics公司,型号AxoStep);四探针方阻测试仪(苏州晶格电子有限公司,型号ST2253)。

2.2 液晶盒的制作

用于测试液晶预倾角的玻璃液晶盒制备如

下:将玻璃基板固定于涂布平台上,采用刮涂方式将垂直取向剂均匀涂覆于基板表面。样品首先在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下预烘 120 s 以去除溶剂,随后在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下保持 30 min 进行初步固化,之后在烘箱中分别进行 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 的阶段性热处理,每个温度保持 2 h 。部分样品进行取向层摩擦处理。

将混有 $7\text{ }\mu\text{m}$ 间隔珠的负性液晶滴加于取向层表面,与另一片基板对盒并采用紫外固化胶封装,制备得到液晶测试盒。

2.3 性能表征

为评价低温垂直取向工艺及柔性基板匹配性对反式液晶调光膜性能的影响,本研究选取液晶预倾角、透过率与雾度作为主要评价指标。对于反式调光模式而言,无电场状态为透明态,液晶分子应尽可能保持垂直排列。液晶预倾角反映取向层对液晶分子的初始锚定状态,其大小及分布均匀性直接决定液晶分子的垂直程度,从而影响亮态透过率及雾度水平。透过率用于表征器件光通量效率,雾度用于评价界面散射及排列规整性。因此,上述参数能够从取向质量与光学性能两个层面综合反映低温取向工艺与基板匹配性的合理性。

预倾角测试:预倾角定义为液晶分子主轴与基板法线方向之间的夹角。当液晶预倾角为 0° 时,表明液晶分子与基板法线平行,液晶分子完全垂直于基板排列。液晶预倾角采用晶体旋转法进行测量。每个样品随机选取3个不同位置进行测试,取平均值作为该液晶盒的预倾角。

透过率与雾度测试:基板及器件的透过率与雾度测试依据国家标准GB/T 2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》进行,采用积分球法测量,在室温条件下进行测试。每种样品测试3次,取平均值并计算标准差。

方阻测试:柔性导电基板的方阻采用四探针测试仪进行测量。每个样品在不同位置测试3次,取平均值作为最终结果。通过对热处理前后的方阻值进行对比,评估基板的热稳定性。

光电性能测试:液晶盒的光电响应通过测量透过率随电压变化关系(V - T 曲线)获得。驱动信号为 100 Hz 正弦交流电,电压步进为 0.1 V ,测试温度为 $(25\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 。阈值电压 V_{th} 定义为透过率下降至 $0.9T_0$ 时对应的电压,其中 T_0 为 0 V 时透过率。驱动电压 V_{on} 定义为透过率下降至 $T_{\text{min}}+0.1(T_0-$

T_{\min})时对应的电压,其中 T_{\min} 为高电压区最低透过率。

取向层稳定性测试:为评估低温垂直取向层的稳定性,对液晶盒进行了常温存放与电场循环测试。样品在室温条件下放置30天后再次测量预倾角变化情况。同时,对液晶盒进行电压循环扫描20次,记录 V - T 曲线变化情况,以评估界面在电场作用下的稳定性。

3 结果与讨论

为构建适用于柔性反式液晶调光膜的低温垂直取向工艺,本研究遵循如下技术路线:首先基于柔性透明基板的耐温边界与预实验观察,确定安全工艺温度上限;其次在该温度区间内优化垂直取向层固化条件,筛选最佳固化温度;最后在统一固化温度下,对不同柔性透明导电基板匹配性进行评价。

本实验选取商用耐温柔性导电膜,其耐温区间约为120~150℃。在预实验中,当固化温度进一步提高至145~150℃时,观察到基膜弯曲刚性降低并出现边缘卷曲趋势,其热机械稳定性存在潜在风险。为保证工程安全裕度与长期可靠性,本研究将低温取向工艺的优化区间限定在120~140℃范围内。

3.1 取向层固化温度对液晶预倾角的影响

首先在玻璃基板上制备取向层,比较取向层固化前后基板透过率与雾度的变化(固化温度140℃)。如表1、表2所示,玻璃基板原始平均透过率为92.82%,平均雾度为0.22%。取向层固化后,基板透过率与雾度变化幅度较小,表明取向层本身对基板本征光学性能影响较小。

随后,在120~140℃区间内以5℃为步长设

表1 取向层固化(140℃)前后的玻璃基板透过率

Tab.1 Transmittance of glass substrates before and after alignment layer curing at 140℃

样品	透过率1/ %	透过率2/ %	透过率3/ %	平均 透过率/%
玻璃基板	92.73	92.88	92.86	92.82
取向后基板1	92.22	92.27	92.35	92.28
取向后基板2	92.37	92.30	92.26	92.31
取向后基板3	91.83	91.85	92.22	91.97

表2 取向层固化(140℃)前后的玻璃基板雾度

Tab.2 Haze values of glass substrates before and after alignment layer curing at 140℃

样品	雾度1/ %	雾度2/ %	雾度3/ %	平均 雾度/%
玻璃基板	0.23	0.15	0.29	0.22
取向后基板1	0.26	0.19	0.32	0.26
取向后基板2	0.28	0.20	0.25	0.24
取向后基板3	0.25	0.24	0.20	0.23

置5个固化温度点:120℃、125℃、130℃、135℃和140℃,系统研究固化温度对液晶预倾角的影响。不同温度下制备液晶盒的预倾角数据如表3及图1所示。样品1、2、3对应固化温度为120℃,样品4、5、6对应固化温度为125℃,样品7、8、9对应固化温度为130℃,样品10、11、12对应固化温度为135℃,样品13、14、15对应固化温度为140℃。结果表明,在120~130℃范围内,预倾角呈现一定波动:120℃、125℃、130℃的均值分别为0.69°、0.89°和0.83°,且标准差相对较大,分别

表3 不同固化温度下的液晶预倾角

Tab.3 Pretilt angles of liquid crystals at different curing temperatures

样品 序号	制备 条件	预倾角 1/(°)	预倾角 2/(°)	预倾角 3/(°)	平均预 倾角/(°)	标准差/ (°)
1	120℃	0.96	0.68	0.35	0.66	0.31
2		0.38	0.77	0.44	0.53	0.21
3		0.73	1.28	0.6	0.87	0.36
4	125℃	1.16	0.77	0.97	0.96	0.2
5		1.01	0.83	0.65	0.83	0.18
6		0.85	0.64	1.09	0.86	0.23
7	130℃	0.83	0.96	0.74	0.84	0.11
8		1.06	0.8	0.9	0.92	0.13
9		0.76	0.61	0.85	0.74	0.12
10	135℃	0.66	0.5	0.44	0.53	0.11
11		0.59	0.43	0.46	0.49	0.08
12		0.63	0.42	0.48	0.51	0.11
13	140℃	0.33	0.4	0.41	0.38	0.04
14		0.29	0.37	0.4	0.35	0.06
15		0.42	0.42	0.39	0.41	0.01
16	140℃ 摩擦	0.29	0.14	0.24	0.22	0.08
17		0.17	0.16	0.15	0.16	0.01
18		0.26	0.17	0.17	0.2	0.05

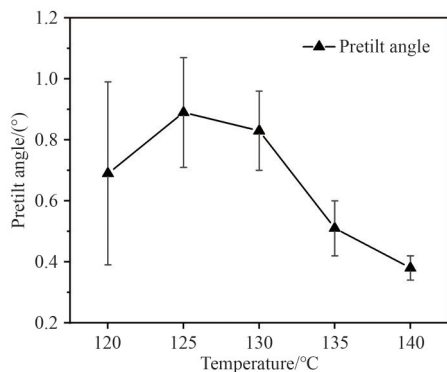


图 1 不同固化温度下的液晶预倾角,误差棒表示预倾角标准差。

Fig. 1 Liquid crystal pretilt angles under different curing temperatures. Error bars represent the standard deviation of the pretilt angle.

为 0.30° 、 0.19° 和 0.13° 。在较低温度区间内,取向剂固化及界面分子重排可能不充分,导致不同样品及不同测试点间的锚定状态存在差异,表现为预倾角均值波动且离散度偏高。当固化温度提高至 135°C 及以上时,预倾角出现显著降低且分布更集中: 135°C 和 140°C 的均值分别降至 0.51° 和 0.38° ,标准差进一步降低至 0.09° 和 0.04° ,说明较高温度有利于形成更稳定、均匀的垂直取向界面,使液晶分子更趋近于理想垂直排列。

综合预倾角均值、标准差以及柔性基板热稳定性因素,在安全工艺温度 $120\sim 140^\circ\text{C}$ 内, 140°C 条件下预倾角最小且分布最均匀,因此确定其为最优固化温度,为取向工艺向柔性基板迁移提供了可行的工艺参数。

3.2 取向层摩擦处理对液晶预倾角的影响

在 140°C 固化温度基础上,进一步探究摩擦工艺对液晶预倾角的影响。样品 16、17、18 为取向层 140°C 固化后进行摩擦处理的样品。测试结果如图 2 所示。未经摩擦处理的样品液晶预倾角约为 0.38° ;经摩擦处理后,预倾角进一步减小至约 0.19° ,显示出更优异的垂直取向效果。

进一步研究摩擦处理对样品光学性能的影响,如图 3 所示。摩擦处理未明显影响器件透过率,但降低了雾度值,详细数据见表 4。分析原因为摩擦产生的微观沟槽提供了更强取向作用,使液晶分子排列更规整,有效减少了光散射,降低了雾度值,改善了器件的光学性能。

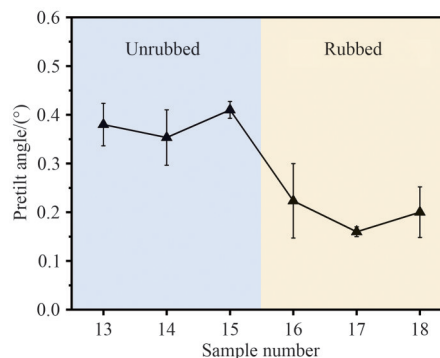


图 2 未摩擦处理样品 13、14、15 与摩擦处理样品 16、17、18 的液晶预倾角图,误差棒表示预倾角标准差。取向层固化温度为 140°C 。

Fig. 2 Liquid crystal pretilt angle for rubbing-treated samples 13, 14, and 15 versus non-rubbing samples 16, 17, and 18. Error bars represent the standard deviation of the pretilt angle. The alignment layer was cured at 140°C .

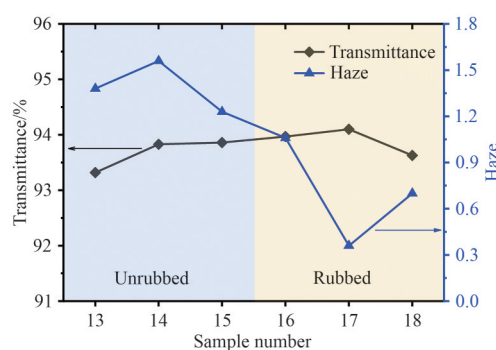


图 3 未摩擦处理样品 13、14、15 与摩擦处理样品 16、17、18 的光学性能图,取向层固化温度为 140°C 。黑色代表透过率,蓝色代表雾度。

Fig. 3 Transmittance and haze values of liquid crystal cells with the alignment layer cured at 140°C for non-rubbing samples 13, 14, and 15, and rubbing-treated samples 16, 17, and 18. Black represents transmittance, blue represents haze.

表 4 未摩擦与摩擦处理样品的液晶预倾角

Tab. 4 Pretilt angles of unrubbed and rubbed liquid crystal samples

样品序号	制备条件	预倾角 1/(°)	预倾角 2/(°)	预倾角 3/(°)	平均预倾角/(°)	标准差/(°)
13	140°C	0.33	0.4	0.41	0.38	0.04
14		0.29	0.37	0.4	0.35	0.06
15		0.42	0.42	0.39	0.41	0.01
16	140°C 摩擦	0.29	0.14	0.24	0.22	0.08
17		0.17	0.16	0.15	0.16	0.01
18		0.26	0.17	0.17	0.2	0.05

3.3 低温垂直取向界面的光电响应特性

为验证 140 °C 固化低温垂直取向层的电场响应能力,对液晶盒进行了电压扫描测试,得到相对透过率随电压变化的 V - T 曲线(图 4)。结果显示,在低电压区透过率基本保持稳定,当电压升高至约 8~9 V 后开始明显下降,呈现典型的电场驱动取向转变行为。根据测试定义计算得到阈值电压 $V_{th} \approx 8.69$ V, $V_{on} \approx 14.06$ V。该结果表明,在 140 °C 固化条件下形成的取向界面能够提供稳定的液晶锚定边界,使液晶分子在外加电场作用下发生取向转变,具备构建反式液晶调光结构的基础光电响应能力。

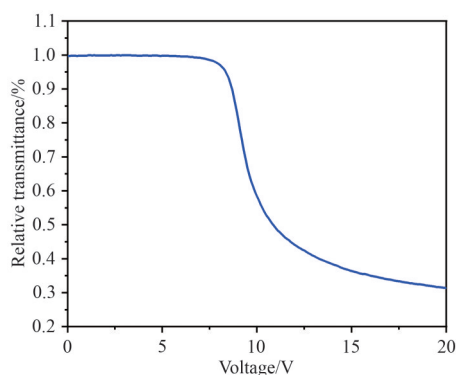


图 4 140 °C 固化低温垂直取向层液晶盒的电压-相对透过率(V - T)曲线

Fig. 4 Voltage-dependent relative transmittance (V - T) curve of the liquid crystal cell prepared with the alignment layer cured at 140 °C

3.4 取向层稳定性分析

为进一步验证该低温取向层的稳定性,后续对样品进行了常温保持及电场循环测试。室温存放 30 天后,液晶盒预倾角变化 0.02°,未观察到明显的预倾角变化,如图 5 所示。电压循环测试中,多次扫描所得 V - T 曲线基本重合,未出现阈值电压漂移现象,如表 5 所示。上述结果表明,在 140 °C 固化条件下形成的低温垂直取向层能够提供稳定的液晶边界约束,使液晶分子在常温及电场作用条件下保持稳定取向状态。

3.5 透明柔性导电基板优选

在确定 140 °C 为低温垂直取向的最佳固化温度后,本节在该统一工艺条件下对不同柔性透明导电基板开展材料适配性筛选。本研究所采用的柔性透明导电膜材均为市售成品材料。由于实

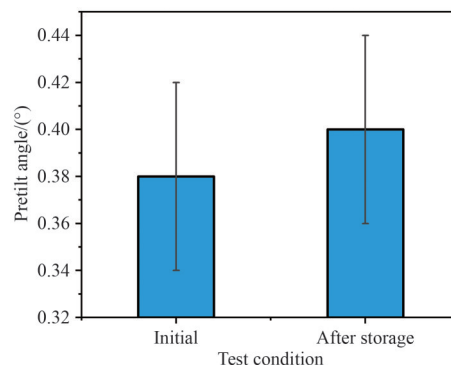


图 5 低温垂直取向层液晶盒的预倾角在室温存放前后的对比,误差棒表示预倾角标准差。

Fig. 5 Pretilt angle stability of the liquid crystal cell with low-temperature vertical alignment before and after storage at room temperature. Error bars represent the standard deviation of the pretilt angle.

表 5 140 °C 固化低温垂直取向液晶盒的电压循环前后稳定性参数对比

Tab. 5 Comparison of electro-optical parameters of the liquid crystal cell with low-temperature vertical alignment cured at 140 °C before and after voltage cycling

测试条件	V_{th}/V	V_{on}/V
第 1 次电压扫描	8.69	14.06
第 20 次电压扫描	8.71	14.10

际工程应用中基膜材料透过率、方阻等级、导电层体系及厚度参数通常以集成形式存在,难以进行单变量独立控制,因此本研究定位为面向工程应用场景的材料匹配性筛选。在保证基板初始透过率高于 80% 的基础上,最终选取 5 种具有代表性的商业样品(f1~f5),覆盖 PET/ITO、PET/Ag 及 PI/ITO 体系,方阻范围为 10~100 Ω/\square ,以反映典型柔性导电膜的工程参数区间,详细参数如表 6 所示。

透明柔性导电膜作为调光器件的基板材料,其热稳定性与光学匹配性需同时满足要求。首先考察 5 种基板在 140 °C 热处理前后的方阻变化(图 6)。结果表明,不同导电膜体系在热处理过程中的电学响应存在显著差异。

在 140 °C 固化条件下,样品 f3 的方阻由 28.24 Ω/\square 变化至 27.55 Ω/\square ,变化率约 2.4%,表现出良好的电学稳定性。f4 样品方阻由 12.18 Ω/\square 变化至 12.3 Ω/\square ,变化率约 1%,基本处于测试误差范围内,亦未表现出明显电学漂移。相比之下,

表 6 透明导电柔性基板的性能参数

Tab. 6 Physical parameters of transparent conductive flexible films

基板	柔性膜/ 导电层	厚度/ μm	方阻/ $(\Omega \cdot \square^{-1})$	透过率/ %	雾度/ %
f1	PET/ITO	188	100	82.28	2.31
f2	PET/ITO	50	30	86.35	0.58
f3	PET/ITO	127	27	84.36	0.38
f4	PET/Ag	125	15	86.86	1.37
f5	PI/ITO	125	10	86.88	0.56

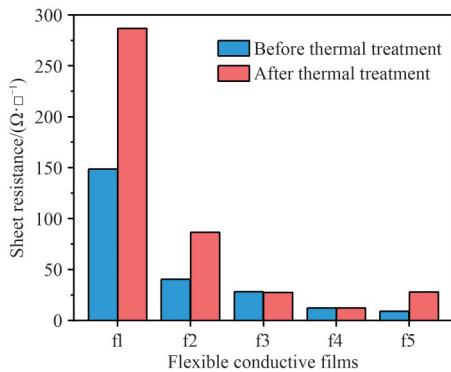


图 6 柔性导电基板在 140 °C 热处理前后的方阻变化,蓝色代表加热前方阻值,红色代表加热后方阻值。

Fig. 6 Variation in the sheet resistance of the flexible conductive substrates before and after heat treatment at 140 °C. The blue bars represent the sheet resistance before thermal treatment, and the red bars represent the values after thermal treatment.

f1、f2 与 f5 在热处理后方阻显著增加,其中 f5 增幅超过 200%,说明其导电层或界面结构在该温度区间存在明显热敏感性。综合比较可以发现,在所选样品范围内,f3 和 f4 在方阻绝对变化幅度与稳定性一致性方面表现较好。

在完成电学热稳定性评估后,进一步考察不同柔性透明导电基板在取向层固化前后的光学性能变化,分析其光学匹配性。图 7 给出了 5 种基板在 140 °C 取向层固化前后的透过率与雾度变化情况。对于 f1、f2 与 f3 基板,固化后透过率分别升高至约 90.5%、89.6% 和 90.0%,相较于固化前均出现一定程度的提升。与此同时,其雾度变化幅度较小,f2 基本保持稳定,f1 略有波动,表明取向层与基板之间形成了较为良好的界面光学耦合关系。相比之下,f4 与 f5 基板在固化后透过率显著下降,其中 f5 由约 86.9% 降至约 72.9%;

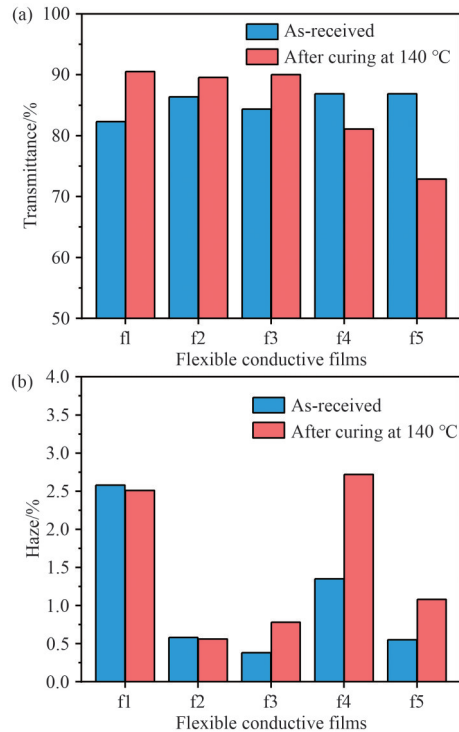


图 7 柔性基板在取向层制备前后的(a)透过率及(b)雾度变化,蓝色代表取向层制备前,红色代表取向层制备后。

Fig. 7 Transmittance (a) and haze (b) of flexible conductive substrates before and after alignment layer preparation. Blue represents films without alignment layer preparation, and red represents after alignment layer curing.

f4 下降至约 81%。同时,两者雾度明显升高。透过率变化反映了基板-取向层界面的光学耦合状态,其本质受界面折射率匹配程度调控。当基板与取向层折射率接近时,界面反射损耗降低,透过率趋于保持或略有提升;当两者折射率差异增大时,界面反射与散射增强,导致透过率下降并伴随雾度增加。

柔性液晶调光膜的器件可靠性受导电层热稳定性、界面光学匹配性及取向性能的耦合影响。从综合热处理后的方阻变化与取向层制备后的光学性能可以发现:f1 与 f2 存在明显方阻增加;f5 方阻增幅最为显著,同时光学性能下降明显;f4 虽电学稳定,但光学性能下降明显;f3 在电学稳定性与光学保持能力两方面均表现出较低波动。

因此,在本研究所选样品范围及 140 °C 低温取向工艺条件下,f3 基板表现出较优的热-电-光综合匹配性,可作为柔性液晶调光器件的优选基板。

4 结 论

(1)在120~140℃安全工艺温度范围内,固化温度升高可显著降低预倾角并提高分布均匀性。其中140℃样品预倾角最小且标准差最低(0.38°,标准差0.04°),可作为本体系优选固化温度。

(2)在140℃固化基础上加入表面摩擦处理,预倾角进一步降低至约0.19°,同时雾度降低,表明通过固化+摩擦处理可实现更高质量的垂直取向。

(3)140℃固化样品具有明确的电场驱动响应,V-T曲线阈值电压与驱动电压分别约为8.69V和14.06V。室温存放30天后,预倾角变化约为0.02°且电压循环前后参数稳定,表明取向层具有一定的时间稳定性与电场循环稳定性。

(4)在统一低温取向工艺下,对5种商用柔性透明导电基板进行取向层匹配性研究,f3型PET/ITO基板在140℃热处理后方阻基本稳定,且取向层固化后透过率约为90%,雾度变化较小,为本研究条件下的优选柔性基板。

参 考 文 献:

- [1] MA D X, CHEN L, FAN F, *et al.* Solar Light management enabled by dual-responsive smart window [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(50): 56065-56073.
- [2] ZHANG Z W, HE X, ZHANG L N, *et al.* A novel low-voltage fast-response electrically controlled dimming film based on fluorinated PDLC for smart window applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147668.
- [3] FENG Y, XU J J, YUAN B H, *et al.* The electrically controlled dimming film of thiol-vinyl ether system with low-voltage and high contrast ratio for smart windows [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 187: 108427.
- [4] ZHANG R C, SONG Z C, CAO W X, *et al.* Multispectral smart window: dynamic light modulation and electromagnetic microwave shielding [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 223.
- [5] ZHANG R C, ZHANG Z B, HAN J C, *et al.* Advanced liquid crystal-based switchable optical devices for light protection applications: principles and strategies [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 11.
- [6] ZHOU L, HE Z M, HAN C, *et al.* Switchable anti-peeping film for liquid crystal displays from polymer dispersed liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(5): 718-724.
- [7] ZHANG H M, GUO S M, MIAO Z C, *et al.* Functional dye-doped liquid crystal smart windows: from sunlight manipulation to sunlight utilization [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, 43: e01244.
- [8] 邹呈,高延子,于美娜,等. 液晶/高分子复合材料及其在反式电控调光膜中的应用研究进展[J]. *应用化学*, 2021, 38(10): 1213-1225.
ZOU C, GAO Y Z, YU M N, *et al.* Recent advances in liquid crystal/polymer composites and their applications in reverse-mode electrically switchable light-transmittance controllable films [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1213-1225. (in Chinese)
- [9] WEN P S, HE R, LI X D, *et al.* Soluble polyimide as liquid crystal perpendicular alignment layer [J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(1): 755-765.
- [10] 白星,王宇,汪映寒. 聚酰亚胺制备条件对液晶预倾角的影响[J]. *液晶与显示*, 2007, 22(3): 268-272.
BAI X, WANG Y, WANG Y H. Effect of polyimide manufacturing conditions on pretilt angle of liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(3): 268-272. (in Chinese)
- [11] 刘志杰,于奋飞,汪映寒. 聚酰亚胺液晶垂直取向膜的制备与性质[J]. *液晶与显示*, 2007, 22(5): 524-528.
LIU Z J, YU F F, WANG Y H. Preparation and properties of a novel polyimide liquid crystal vertical alignment layer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(5): 524-528. (in Chinese)
- [12] 丁紫君,汪映寒. 聚酰亚胺添加剂对液晶预倾角的影响[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(1): 22-25.
DING Z J, WANG Y H. Effect of polyimide additive on pretilt angle of liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1): 22-25. (in Chinese)
- [13] 文璞山,何瑞,赵光练,等. 聚酰亚胺液晶取向膜的制备及性能研究[J]. *塑料工业*, 2020, 48(8): 16-20.
WEN P S, HE R, ZHAO G L, *et al.* Preparation and properties of polyimides as liquid crystal alignment layer [J].

- China Plastics Industry*, 2020, 48(8): 16-20. (in Chinese)
- [14] 邹朋飞, 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)
- [15] 张翠红, 王华森, 李铭新. 光致液晶取向材料研究进展[J]. *精细与专用化学品*, 2020, 28(11): 16-20.
ZHANG C H, WANG H S, LI M X. Research progress on photo-induced alignment for liquid crystal molecules [J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2020, 28(11): 16-20. (in Chinese)
- [16] 苑留涛, 孙嘉盈, 黄悦蓁, 等. 液晶器件无机取向技术的发展及应用[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(10): 1440-1449.
YUAN L T, SUN J Y, HUANG Y Z, *et al.* Development and applications of inorganic alignment technology for liquid crystal devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1440-1449. (in Chinese)
- [17] 杨小东, 彭增辉, 穆全全, 等. 偶氮苯磺酸薄膜的光致取向可重复性[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 553-560.
YANG X D, PENG Z H, MU Q Q, *et al.* Photoalignment repeatability of azobenzene sulfonic films [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 553-560. (in Chinese)

作者简介:



陈锐思, 女, 博士, 工程师, 2022 年于北京化工大学获得博士学位, 主要从事非金属材料的研究。E-mail: chenrs_0225@163.com



刘 滢, 女, 博士, 高级工程师, 2016 年于北京航空航天大学获得博士学位, 主要从事非金属材料的研究。E-mail: liuy535@avic.com