

文章编号:1007-2780(2025)09-1251-07

单向遮光的聚合物稳定扭曲向列相液晶器件

闫云飞, 林若龙, 周子涵, 马红梅, 孙玉宝*

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:为有效防止某一方向的光线发射影响观看者,如汽车显示屏在前挡风玻璃上产生的反射,本文提出了一种防止特定方向光线发射的聚合物稳定液晶器件。这种单向遮光液晶器件基于扭曲向列相(TN)结构。通过施加电场,液晶层中液晶指向矢分布被适当控制。在这种状态下,使用紫外线固化分散在液晶中的聚合物单体,形成稳定的聚合物网络,从而固定液晶分子的取向方向。当移除电场并贴上偏光片时,实现了单向遮光效果,满足了所需功能。实验结果表明,所提出的单向遮光器件可以在特定角度阻止光线通过,在正常视角下的最大透光率为89%。双层结构在大角度下显著减少了光线泄漏,同时在正常视角下保持了70%的最大透光率,提供了更好的单向遮光效果。这项工作表明,聚合物稳定的扭曲向列液晶器件能够提供单向光阻挡特性,同时在正向保持高透光率,使其非常适用于个人电子产品、车辆显示器以及安全信息终端中的特殊应用,具有重要的实用价值。

关键词:液晶聚合物;单方向遮光;TN结构;车载显示器

中图分类号:O753⁺.2;TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2025-0117 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2025-0117

Polymer-stabilized twisted nematic liquid crystal devices with unidirectional light-blocking

YAN Yunfei, LIN Ruolong, ZHOU Zihan, MA Hongmei, SUN Yubao*

(School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China)

Abstract: To effectively prevent light emission in a certain direction from affecting viewers, such as the reflections produced by automotive display screens on the front windshield, this paper proposes a polymer-stabilized liquid crystal device that prevents light emission in a specific direction. This unidirectional light-blocking liquid crystal device is based on a twisted nematic (TN) structure. By applying an electric field, the liquid crystal director's profile in the liquid crystal layer is appropriately controlled. In this state, ultraviolet light is used to cure the polymer monomers dispersed in the liquid crystal, forming a stable polymer network that fixes the orientation of the liquid crystal molecules. When the electric field is removed and the polarizer is adhered to, a unidirectional light-blocking effect is achieved, fulfilling the desired requirement. Experimental results show that the proposed unidirectional light-blocking device can prevent light from passing through at specific angles, with a maximum transmittance of 89% at the normal viewing angle. The double-layer structure significantly reduces light leakage at large angles while maintaining a

收稿日期:2025-06-05;修订日期:2025-06-21.

基金项目:河北省自然科学基金(No.F2022202017)

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2022202017)

*通信联系人, E-mail:sun_yubao@163.com

maximum transmittance of 70% at the normal viewing angle, providing a better unidirectional light-blocking effect. This work demonstrates that polymer-stabilized twisted nematic liquid crystal devices can offer unidirectional light-blocking characteristics while maintaining high transmittance in the forward direction, making them highly suitable for special applications in personal electronic products, vehicle displays, and safety information terminals, thus possessing significant practical value.

Key words: polymer stabilized liquid crystal; unidirectional light-blocking; TN structure; vehicle display

1 引言

随着显示技术的不断发展,我们的生活中分布着越来越多的电子屏幕。在很多场景下,较大、较亮的屏幕能给我们更好的观看体验,但是这种屏幕也会在附近物体上产生较强的反射光,造成生活上的不便。例如,汽车的车载屏幕会在前挡风玻璃上产生反光的倒影,在周围环境较暗时,倒影会更为明显,从而影响驾驶安全。为便于游览者互动,各类展馆、展示厅等会使用斜面式的显示屏,也会在附近的窗户、玻璃墙上方产生反光。在高速收费站口,使用单方向遮光技术,只对进站车辆开放可视内容,可以增强指示的准确性。在很多场景中,使用单方向遮光技术,阻挡屏幕单方向射出的光线,以达到需要的显示效果是有必要的。

单方向遮光膜层是一种具有定向光学控制能力的功能性膜材,它可以在特定方向上阻止光线的通过,从而实现防窥、防反光的效果。目前流行的技术多是基于百叶窗结构的防窥光栅^[1-4]和掺杂二向色性染料的膜层^[5-7],在限制特定视角透光的同时都会大幅降低正视角下的显示亮度。为了不影响观看效果,需要增加能耗来提高显示器的亮度。近年来,人们将液晶器件应用到视角可控领域,已经取得了比较好的效果^[8-17]。LCD 屏幕和目前绝大多数的 OLED 屏幕发出的都是线偏振光,利用液晶器件对线偏振光的调控作用,可以实现所需的遮光功能,同时光利用率也比较高,而使用双盒结构可以使遮光能力进一步提升^[13]。在有些研究中,还通过调整像素电极、改变驱动波形等方式实现视角控制效果^[14-15]。有必要指出的是,绝大多数液晶器件均需要持续施加电压来实现视角控制效果^[8-17],会造成能源浪费,且在使用中因为温度效应而带来驱动和视觉效果上的问题。

本文使用液晶和聚合物单体,制备了聚合物稳定扭曲向列相液晶遮光器件,在观看者一侧贴附一层偏光片,将其附着在显示面板上即可呈现很好的单向遮光效果,并且能够保证正视角下较高的透过率。双层结构的器件在大极角下的遮光效果更加优良,同时也能够保证正视角下有足够高的透过率。

2 聚合物稳定液晶遮光器件的结构及工作原理

扭曲向列相(TN)液晶结构示意图和施加电场后液晶分子指向矢和光传播偏振态变化的示意图如图1所示。

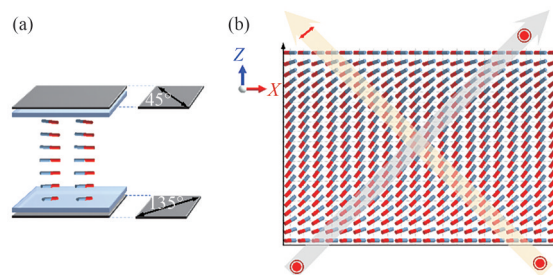


图1 (a) TN型遮光结构示意图;(b)施加电场后液晶分子指向矢和光传播偏振态变化的示意图。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of TN anti-glare structure; (b) Schematic diagram of the director's profile of liquid crystal molecules and the change of light polarization under the application of an electric field.

两玻璃基板的取向方向分别为45°、135°,并在两玻璃基板外侧分别贴附偏光片,上下偏光片的透光轴方向与TN盒邻近基板表面的液晶取向方向相同。不施加电场时,液晶层中液晶分子为均匀扭曲排布,如图1(a)所示。当在TN型液晶盒两侧施加电压后,受到基板表面的锚定作用,靠近基板表面的液晶分子不会产生较大的倾角变

化,而远离基板的液晶分子倾角逐渐增大,到中间处倾角达到最大,液晶分子指向矢排布情况如图1(b)所示。以沿玻璃基板垂直方向为 Z 轴,水平方向分别为 X 轴和 Y 轴,当线偏振光向左上方(X 轴负方向)传播时,会产生较大相位延迟量,偏振方向会由于波导效应旋转 90° ,从而正常通过第二片偏光片时呈现亮态;当线偏振光向右上方(X 轴正方向)传播时,液晶层的相位延迟量不充足,偏振态不会改变,因此呈现暗态。此时,对液晶盒施加一定的紫外光照射,让液晶中的聚合物单体发生聚合,形成稳定的聚合物网络,从而使制备的液晶盒保持右侧的遮光状态。

使用TechWiz LCD软件对扭曲向列相液晶结构进行模拟计算,所使用的液晶材料参数为:弹性常数 K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} 分别为11.7 pN、5.5 pN、14 pN,相对介电常数 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 分别为8.6和3.3,双折射率 Δn 为0.1(@589 nm),液晶盒厚为10 μm ,液晶层的扭曲角度设置为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ (为了获得右视角遮光),预倾角度为 2° 。图2(a)和图2(b)所示为液晶盒在2 V驱动电压下的透过率视角图和左右方向的透过率随极角的变化图。右视角方向显示为低透过率,且在正视角和偏左方向具有高透过率,满足右视角防强光出射的要求。正视角透过率为81%,在右视角方向的大极角有一定的漏光。

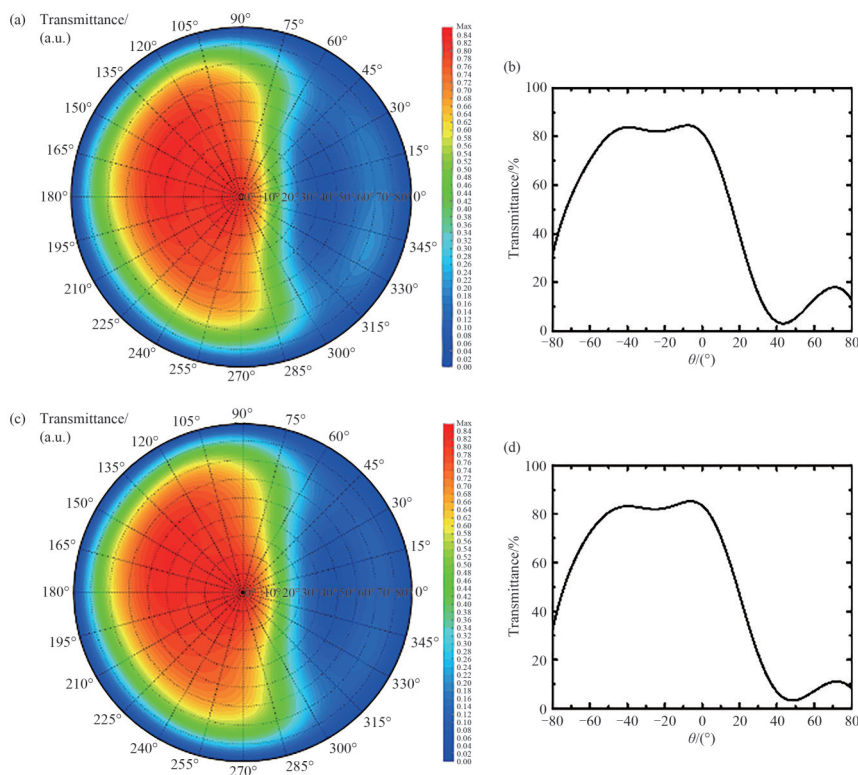


图2 (a) 10 μm TN结构器件的等透过率图;(b)10 μm TN器件左右方向的极角-透过率曲线;(c) 5 μm TN结构器件的等透过率图;(d) 5 μm TN器件左右方向的极角-透过率曲线。

Fig. 2 (a) Iso-transmittance plots of 10 μm TN structure device; (b) Polar angle-transmittance curve on left-right direction of 10 μm TN device; (c) Iso-transmittance plots of 5 μm TN structure device; (d) Polar angle-transmittance curve on left-right direction of 5 μm TN device.

为了进一步讨论液晶盒厚度对遮光效果的影响,我们使用5 μm 的液晶盒厚进行了模拟。将相对介电常数 $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 分别设置为17.2和5.3,双折射率 Δn 设置为0.2(@589 nm),其余条件不变。可以发现,施加1.4 V驱动电压可以实现较

好的单向遮光效果,其等透过率图和左右方向的极角-透过率曲线如图2(c)和2(d)所示。5 μm 的器件在右视角方向的大极角情况下的漏光有明显改善。因为汽车中控屏幕等在大极角的发射光强相比正视角小很多,所以其在大极角下能够

实现有效的遮光效果。如需要其他方向的防强光出射的要求,对液晶层的扭曲角度的起始和终止角度以及偏光片的角度进行调整即可获得。

3 制备方法

3.1 实验材料

实验中使用的液晶为江苏合成显示科技有限公司的 HAG-625255(双折射率为 0.1@589 nm)

和 E7(双折射率为 0.227@589 nm),聚合物液晶单体也是从该公司购买的 HCM-009 和 RM257。平行取向剂是深圳市道尔顿电子材料有限公司的 DL-2590 和对二甲基乙酰溶液,以 1:2 的比例混合制备。偏光片由深圳市三利谱光电科技有限公司提供。使用的聚合物单体材料和光引发剂分子结构如图 3(a)所示,薄膜的制备工艺如图 3(b)所示。除取向剂外,上述其他化学品均为商业来源,直接使用,未经过纯化或其他后续处理。

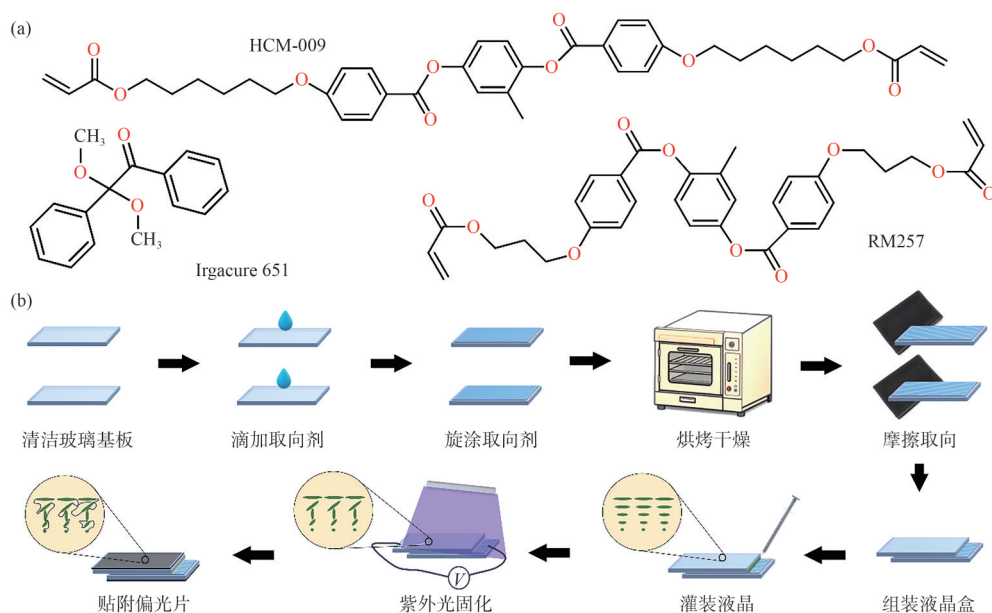


图 3 (a)所用聚合物单体和光引发剂的化学结构;(b)制备工艺示意图。

Fig. 3 (a) Chemical structure of the used polymer monomer and photoinitiator; (b) Schematic diagram of the fabrication process.

3.2 TN 盒的制备

TN 盒所用玻璃基板尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 。首先,使用去离子水、酒精对玻璃基板进行初步清理,并使用超声波再次清洗,干燥备用。在玻璃基板上涂覆平行取向剂,并使用旋涂机以 $1\ 800\text{ r/min}$ 的速度旋涂 40 s 。旋涂完成后放入烘箱干燥处理,在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 30 min ,随后在 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 120 min 。下一步,使用丝绒布对取向层进行 45° 方位角方向摩擦,在两玻璃基板之间分别加入 $5\text{ }\mu\text{m}$ 或 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的间隔子控制盒厚,并在玻璃板两侧涂覆紫外胶,固化 30 min ,即得到所需的空盒。

3.3 聚合物稳定液晶器件的制备

实验所用的试剂由质量分数为 93% 的 HAG-

625255 液晶、2% 的 RM257 和 4% 的 HCM-009 以及 1% 的光引发剂 651 组成。将上述材料放在配液瓶中,加入搅拌子,使用磁力搅拌器在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下搅拌 2 h 进行充分混合。随后,在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热台上,将处于各向同性相的液晶混合物灌注到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的液晶盒中。然后使液晶盒降至常温,在液晶盒两端施加 2.1 V 的电压,在强度为 20 mW/cm^2 的紫外光下照射 3 min ,使其中的聚合物单体充分聚合,形成聚合物网络。最后,在其中一侧按照角度需求贴附偏光片,完成制备。

同时,我们对 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的器件进行了制备。考虑到使用的液晶不同,不同聚合物单体的相对含量会影响液晶的相位延迟量,影响最大透过率,我们改变两种单体的比例,最终确定质量分数为

93%的E7、3%的RM257、3%的HCM-009以及1%的光引发剂的比例具有最好的效果,进行固化的电压调整为1.4 V,其他实验条件不变,将其灌入5 μm 的TN盒。

4 结果与讨论

4.1 10 μm 聚合物稳定液晶遮光器件

对于使用10 μm 的TN盒制备的液晶遮光器件,在左右方向上,对其不同视角下的透过率进行了测量,得到550 nm波长光的透过率-极角曲线,如图4(a)所示。可以发现,该遮光膜在 -15° 极角下的透过率最高,可以达到89%。随着极角的不断增大,其透过率明显降低。在 $-60^\circ \sim +10^\circ$ 范围内,透过率大于40%,该角度范围为可视角度范围。当极角大于 20° 后,膜层的透过率下降到20%以下,呈现为暗态。随着极角继续增大到 35° ,整体透过率达到最低,为1%。随后透过率逐渐增大,在 50° 以上的极角下会呈现出一定的漏光现象,与模拟计算结果相符。

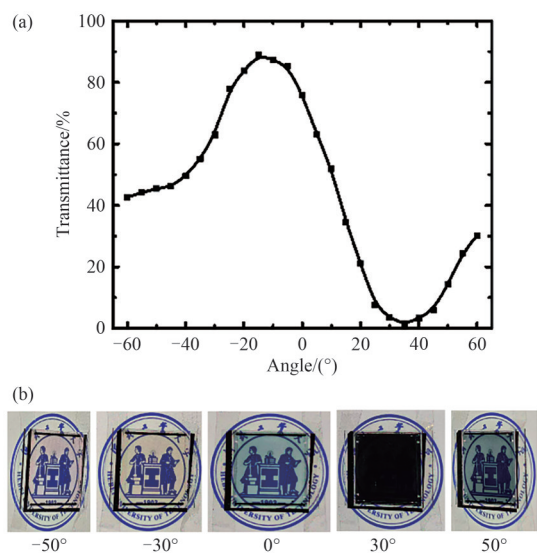


图4 10 μm 聚合物稳定的液晶器件。(a)极角-透过率曲线;(b)不同极角下的照片。

Fig.4 10 μm polymer-stabilized liquid crystal device. (a) Transmittance vs. polar angle curve; (b) Photos under different polar angles.

进一步,我们将该膜层放置在显示面板前测试其实际显示效果,如图4(b)所示。正视角下,可以较清晰地看到背景图像,随着极角的减小,

背景图像先变得更清晰,随后稍微变差,但始终保持着较好的显示效果。随着极角的增大,可以看到在 30° 时,背景图案已经完全不可见;增大到 50° 极角时,由于漏光现象,可以看到较暗的图案。

4.2 5 μm 聚合物稳定液晶遮光器件

使用5 μm 的TN盒进行了对比研究,测量了透过率-极角曲线并拍摄了不同极角下的显示图,如图5(a)和图5(b)所示。通过透过率-极角曲线可以看出,其整体波形与10 μm 的TN盒相似,但正视角下的透过率稍有提高,而且在小极角下,透过率变化较为平缓,显示效果稍有提升,在大极角下的漏光效果比10 μm 的TN盒略低。进一步观看实际显示效果图,可以看出其正面显示效果较10 μm 的遮光膜更为清晰,在 50° 极角下的透射图案很暗。

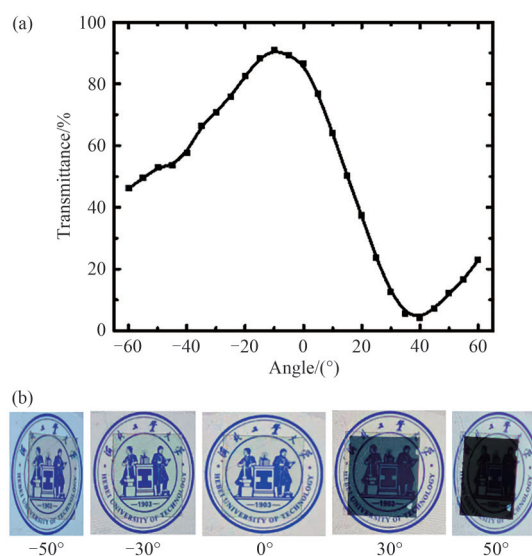


图5 5 μm 聚合物稳定的液晶器件。(a)透过率-极角曲线;(b)不同极角下的照片。

Fig.5 5 μm polymer-stabilized liquid crystal device. (a) Transmittance vs. polar angle curve; (b) Photos under different polar angles.

4.3 双层5 μm 聚合物稳定液晶遮光器件

为了进一步提高单方向透光效果,同时避免大角度下产生的漏光问题,可以使用双层TN盒结构来实现。其结构如图6(a)所示。

图6(a)中棕色部分为两个完全一样的5 μm 的TN液晶盒和3个偏光片组成,偏光片的偏振方向在图中右侧用黑色箭头标出。在两个液晶盒的两侧放置两个偏振方向彼此平行的偏光片,

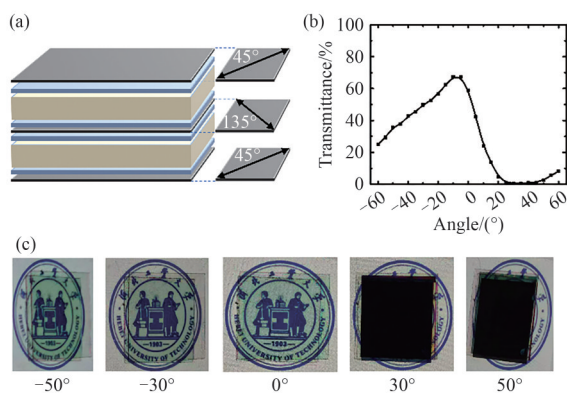


图6 双层5 μm 聚合物稳定的液晶器件。(a)结构示意图;(b)透过率-极角曲线;(c)不同极角下的照片。

Fig. 6 Double-layers 5 μm polymer-stabilized liquid crystal device. (a) Structural schematic diagram; (b) Transmittance vs. polar angle curve; (c) Photos under different polar angles.

在两液晶盒中间放置一个偏振方向与另外两偏光片相垂直的偏光片。在实际使用时,贴附屏幕一侧的偏光片为显示器的偏光片,另一侧偏光片的偏振方向与屏幕发出的偏振光偏振方向平行。

对双层器件的透过率-极角曲线进行测量,结果如图6(b)所示。可以看出,整体的透过率稍有下降,但在正视角下仍能保持50%以上的透过率,最大透过率约为70%,且在大极角下的漏光现象大幅降低。实验效果如图6(c)所示,可以看到,在 -50° 、 -30° 和 0° 下的观看效果偏绿,这是偏光片在蓝光部分有较多的吸收而导致的,可以通过改变显示器的发光光谱或者调整液晶层的

相位延迟量来改善。在上述视角下的图案能够被清晰看到,而在 30° 和 50° 视角下则呈现完全黑色,无法看到背景图案。

5 结 论

本文提出了一种基于TN结构的聚合物稳定液晶遮光器件,具有单方向遮光的性能。通过在遮光状态下进行聚合物固化,形成聚合物网络稳定的液晶分子取向,从而实现无需外加电场的遮光效果。在实际显示效果测试中,单层的TN结构遮光器件在正视角下的透过率均能够在70%以上,在 50° 以上的大极角下会伴随较小漏光现象。但在各类使用场景中,该漏光现象可以忽视,不会产生较明显效果。使用双层TN结构可以很好地消除大角度漏光,在 60° 视角下的透过率不足10%,同时在正视角下也能保持50%以上的较高透过率,可以呈现更好的观看效果。

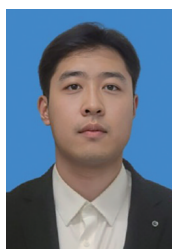
综上所述,这种基于TN结构的聚合物稳定液晶器件具有单方向遮光能力,除上述用途外,通过控制固化电压控制遮光角度,在激光、望远镜、干涉仪等高精度光学实验或测量设备中,应用于光路入口或透镜处,只允许预定入射角范围内的光线通过,阻挡其他方向的散射光,这样可以显著降低仪器中的杂散光和反射干扰,提高信噪比和测量精度等。本文提出的遮光器件在光学显示、实验研究等各类防反射、遮光场景中有着重要的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 钟德镇,刘瑞,姜丽梅. 微结构用于视角可控的液晶显示技术[J]. 液晶与显示, 2021, 36(5): 687-693.
ZHONG D Z, LIU R, JIANG L M. Viewing angle controllable liquid crystal display technology with micro structure [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 687-693. (in Chinese)
- [2] 李德华,胡亮,于宪书. 用于大尺寸显示器的防窥膜表面微结构设计[J]. 光电子技术, 2024, 44(4): 334-337.
LI D H, HU L, YU X S. Surface microstructure design of privacy film for large-sized displays [J]. *Optoelectronic Technology*, 2024, 44(4): 334-337. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] HAN C, ZHOU L E, MA H P, *et al.* Fabrication of a controllable anti-peeping device with a laminated structure of microlouver and polymer dispersed liquid crystals film [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(15): 2235-2244.
- [5] ADACHI M. Controllable-viewing-angle display using a hybrid aligned nematic liquid-crystal cell [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(10R): 7920.
- [6] BAEK J I, KIM K H, KIM J C, *et al.* Viewing angle control of a hybrid-aligned liquid crystal display [J].

- Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, 498(1): 103-109.
- [7] GUO D K, CHEN S, CONG X Y, *et al.* Hybrid-aligned liquid crystal polymers adhered to the polarizing film or doped with dichroic dye for display privacy protection [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(1): 967-976.
- [8] HE Z M, SHEN W B, YU P, *et al.* Viewing-angle-switching film based on polymer dispersed liquid crystals for smart anti-peeping liquid crystal display [J]. *Liquid Crystals*, 2022, 49(1): 59-65.
- [9] XU J, WENG J, HU C. *Anti-peeping component for mobile phone*, has cholesteric liquid crystal layer that is arranged on one side of base Layer: CN, 22649655 [P]. 2023-08-29.
- [10] 郭德康,沈玄哲,陈硕,等. 具有视角控制特性的液晶光学器件研究进展[J]. 液晶与显示,2024,39(12):1592-1611. GUO D K, SHEN X Z, CHEN S, *et al.* Research progress on liquid crystal optical devices with viewing angle control characteristics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(12): 1592-1611. (in Chinese)
- [11] WANG X. Anti-peep touch screen for mobile phone, has liquid crystal layer through alignment film connected with electrode layer, where electrode layer is connected with polarizer through color light filtration film: CN, 20046296 [P]. 2023-05-23.
- [12] LEE J H, OH S W. Innovative stacked liquid crystal panel for automotive display: driver-oriented privacy and passenger accessibility [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(22): 6023-6026.
- [13] ZHOU Z H, LU W X, NIU R, *et al.* Viewing angle controller using two parallel alignment liquid crystal cells for automotive systems [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(22): 6545-6548.
- [14] 钟德镇,刘显贺,姜丽梅. 四向宽窄视角可切换的液晶显示技术[J]. 液晶与显示,2020,35(12):1278-1283. ZHONG D Z, LIU X H, JIANG L M. Four-ways viewing angle switchable liquid crystal display technology [J]. *Chinese journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(12): 1278-1283. (in Chinese)
- [15] 朱梦青,陆建钢. 基于FFS架构实现宽窄视角切换[J]. 液晶与显示,2018,33(3):182-187. ZHU M Q, LU J G. New viewing angle controllable with FFS-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(3): 182-187. (in Chinese)
- [16] KANG M, SHIN H S, BAEK J M, *et al.* Optimization of retarder parameters for switchable privacy mode automotive displays under asymmetric viewing conditions [J]. *Journal of Information Display*, 2025, 26(1): 33-44.
- [17] CHOI T H, LEE H W, UK HA J, *et al.* Viewing direction-tunable light control using liquid crystal film for simultaneous implementation of automotive display visibility and safety [J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2024, 2(4): 632-641.

作者简介:



闫云飞,男,硕士研究生,2022年于河北工业大学获得学士学位,主要从事液晶器件物理的研究。E-mail: 1528838000@qq.com



孙玉宝,男,博士,教授,2010年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶器件物理的研究。E-mail: sun_yubao@163.com