文章编号：1007-2780(2026)07-0952-10

基于复琼斯矩阵的扭曲染料液晶调光器件的机理与性能研究

李　双，雍佳丽，仇梓豪，马红梅，孙玉宝*
（河北工业大学 理学院，天津 300401）

摘要：液晶凭借独特的物理特性已发展成一类重要的光学调控器件，而染料掺杂液晶（Dye-Doped Liquid Crystal，DDLC）是实现电控光强调制的重要技术路线之一。针对扭曲向列相（Twisted Nematic，TN）染料液晶器件中旋光效应与染料各向异性吸收耦合作用间缺乏定量理论关联的问题，本文构建含吸收损耗的TN型液晶复琼斯矩阵理论模型，建立单层TN搭配偏振片（TN＋P）调光结构的暗态透过率解析公式，系统探究扭曲角、液晶盒厚、染料吸收系数以及双折射对器件光学性能的调控规律。以商用正性染料掺杂液晶为核心材料，结合Techwiz LCD 1D光学仿真与样品实验制备，完成理论、仿真、实验闭环验证。理论计算结果表明，液晶扭曲结构会改变光偏振沿光程的演化，破坏染料高效吸收匹配条件，造成暗态漏光；而高双折射材料会加强旋光效应，增强光吸收效率。软件模拟结果和对比度视角进一步印证扭曲角的引入会提高暗态透过率，降低器件性能。实验制备了盒厚分别为5 μm、8 μm、10 μm，扭曲角0°～360°的不同样品，实测结果显示，盒厚10 μm、扭曲角为0°时器件暗态透过率低至1.03%，遮光性能最优；8 μm器件的响应时间均在50 ms内，90°结构借助扭曲弹性复位，下降过程最慢。本文完善了扭曲染料液晶的光学定量分析体系，为高遮光、电控连续可调染料液晶智能窗、光阀器件的结构设计提供完整理论依据与实验支撑。

关　键　词：染料掺杂液晶；TN结构；复琼斯矩阵；透过率调控；光学仿真
中图分类号：O753.2　**文献标识码：**A　**doi：**10.37188/CJLCD.2026-0117　**CSTR：**32172.14.CJLCD.2026-0117

Mechanism and performance of twisted dye liquid crystal dimming devices based on complex Jones matrix

LI Shuang，YONG Jiali，QIU Zihao，MA Hongmei，SUN Yubao*
（*School of Sciences*，*Hebei University of Technology*，*Tianjin* 300401，*China*）

Abstract：Owing to their unique physical properties，liquid crystals have evolved into an important category of optical modulation devices，and Dye-Doped Liquid Crystal（DDLC）serves as a critical technical route to achieve electrically tunable light intensity modulation. To tackle the lack of quantitative theoretical correlation between optical rotation and the coupling effect of dye anisotropic absorption in Twisted Nematic（TN）DDLC devices，this work established a complex Jones matrix theoretical model for TN liquid crystals with absorption losses，derived an analytical formula of dark-state transmittance for the light-modulating structure of single-layer TN cells integrated with a polarizer（TN＋P），and systematically

收稿日期：2026-06-05；**修订日期：**2026-06-15.
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

investigated how twist angles, liquid crystal cell gaps, dye absorption coefficients and birefringence modulate devices' optical performance. A closed-loop verification integrating theoretical calculation, Techwiz LCD 1D optical simulation and sample fabrication was carried out using commercial positive DDLC mixtures as the core functional material. Theoretical calculations revealed that twisted liquid crystal structures alter polarization evolution along the optical path, break the matching conditions for efficient dye absorption and thus induce dark-state light leakage, while high-birefringence materials enhance optical rotation and boost light absorption efficiency. The software simulations and contrast ratio viewing angle distributions further confirmed that twist angles increase dark-state transmittance and degrade device performance. Samples with cell gaps of 5, 8, 10 μm and twist angles ranging from 0° to 360° were experimentally fabricated. The measured results demonstrated that the TN+P device with a 10 μm cell gap and a 0° twist angle achieves optimal light-shielding performance with a dark-state transmittance as low as 1.03%; all 8 μm devices exhibit millisecond-scale fall times, and the 90° twisted structure exhibited the slowest fall time dominated by the twist elastic torque. This study refines the quantitative optical analysis system for twisted DDLC, providing a complete theoretical basis and experimental support for the structural design of DDLC-based smart windows and optical shutters with excellent light-shielding performance and continuous electrical tunability.

Key words: dye-doped liquid crystal; twisted nematic; complex Jones matrix; transmittance modulation; optical simulation

1　引　　言

液晶作为兼具流体流动性与晶体各向异性的软物质,在电场、磁场、温度、光场作用下分子取向发生快速可逆重构,同步改变体系的双折射、介电常数与光学轴,为光波振幅、相位、偏振的多维度动态调控提供独特的物理基础[1-2]。基于这一特性,液晶光调控装置已发展成一类重要的主动式光学元件,其核心原理为电控液晶分子排布,以此精准调制入射光的透射、散射与吸收状态。当前主流技术路线包括聚合物分散液晶(PDLC)[3-4]、电致变色液晶[5-6]、染料掺杂液晶(Dye-Doped Liquid Crystal, DDLC)[7-8]及胆甾相液晶(Cholesteric Liquid Crystal, ChLC)[9-10]等方案,分别依靠光散射、电化学氧化还原、二向色染料取向吸收、螺旋结构选择性反射实现光强调控。

染料掺杂液晶是电控光强调制的重要技术方案,二向色染料通过分子间作用力自发沿液晶指向矢排布,对平行分子长轴的偏振光表现出强吸收,垂直方向偏振光则吸收较弱。外电场借助液晶介电各向异性驱动分子取向重构,带动染料同步旋转,改变体系有效光吸收截面,实现透明态与遮光态的快速电控切换[11-13]。依据朗伯-比尔定律,器件透过率由染料取向状态、吸收系数、液晶层厚及染料浓度共同决定[14-15]。但在扭曲向列相(TN)液晶体系中,入射光会随液晶扭曲结构发生旋光,偏振光与染料分子长轴的夹角沿光程连续变化,现有研究尚未建立统一的旋光效应与各向异性吸收解析模型,无法定量建立染料材料参数、器件结构与光学性能的对应关系。

本研究从无吸收扭曲向列相液晶的琼斯矩阵出发,推导引入吸收损耗、适配任意扭曲角的复琼斯矩阵;以单层液晶搭配偏振片(TN+P)结构构建理论模型,完成透过率公式推导。采用已知参数的染料液晶体系开展光学仿真与器件制备实验,系统探究扭曲角、液晶盒厚、染料吸收系数以及双折射对器件光学性能的调控机理,实现了理论-仿真-实验的完整闭环,为扭曲型染料液晶器件的后续优化与开发奠定理论基础。

2　理论基础与琼斯矩阵

2.1　无吸收TN液晶的琼斯矩阵

无吸收TN型液晶器件的琼斯矩阵为[16]:

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{TN}}=\exp(-\mathrm{i}\Phi)\boldsymbol{R}(\theta)\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}. \tag{1}$$

各项参数定义为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}(\theta)=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \\ \Phi=\dfrac{1}{2}\dfrac{2\pi}{\lambda}(n_{/\!/}+n_{\perp})d \\ \beta=\sqrt{(\dfrac{\Gamma}{2})^2+\theta^2} \\ \Gamma=\dfrac{2\pi}{\lambda}(n_{/\!/}-n_{\perp})d=\dfrac{2\pi\Delta n}{\lambda}d \end{cases}, \tag{2}$$

$$\begin{cases} A=\cos\beta-\mathrm{i}\dfrac{\Gamma}{2}\dfrac{\sin\beta}{\beta} \\ B=-C=\theta\dfrac{\sin\beta}{\beta} \\ D=\cos\beta+\mathrm{i}\dfrac{\Gamma}{2}\dfrac{\sin\beta}{\beta} \end{cases}, \tag{3}$$

其中：θ为液晶层的扭曲角度；$\boldsymbol{R}(\theta)$为旋转矩阵；$n_{/\!/}$、$n_{\perp}$为液晶的寻常光与非寻常光折射率，双折射$\Delta n=n_{/\!/}-n_{\perp}$；$d$为液晶层厚度；$\Gamma$为液晶层的相位延迟量；$\Phi$为平均绝对相位变化；指数项部分为整体相位因子，它只改变出射光的绝对相位，而不改变其偏振态。

自然光入射，器件的总透过率为两个正交偏振分量透过率的平均值：

$$T=\frac{1}{2}\left(\left|J\cdot\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}\right|^2+\left|J\cdot\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}\right|^2\right). \tag{4}$$

2.2 二向色染料的吸收特性与复折射率

二向色染料的光吸收特性由其分子结构的各向异性决定，其对不同偏振方向的入射光存在显著的吸收差异。光在介质中传播时，光强的衰减遵循朗伯-比尔定律：

$$T=T_0\exp(-Ad), \tag{5}$$

其中：T_0为入射光强，A为介质中对应偏振方向的吸收系数。

对于二向色染料分子，平行于分子长轴方向的吸收系数为$A_{/\!/}$，垂直于分子长轴方向的吸收系数为$A_{\perp}$，二者的比值定义为二向色比N，是表征染料各向异性吸收能力的核心参数：

$$N=A_{/\!/}/A_{\perp}. \tag{6}$$

当染料分子长轴与入射光偏振方向平行时，光吸收最强，器件呈现暗态；当染料分子长轴与入射光偏振方向垂直时，光吸收最弱，器件呈现亮态。通过外电场调控液晶分子的倾角，即可实现亮暗态之间的连续调光。

染料液晶兼具液晶的双折射与染料的各向异性吸收特性，相较于普通液晶，其光学特性可通过复折射率统一描述。平行/垂直于液晶分子长轴方向的复折射率为[17]：

$$\tilde{n}_{/\!/,\perp}=n_{/\!/,\perp}-\mathrm{i}\kappa_{/\!/,\perp}, \tag{7}$$

其中，$\kappa_{/\!/}$、$\kappa_{\perp}$为消光系数，与吸收系数满足定量关系：$A=4\pi\kappa/\lambda$。

2.3 具有吸收性质TN液晶的琼斯矩阵及透过率

对比发现，染料液晶相较于普通液晶只在双折射的虚部项有差异，完整考虑消光系数产生的复折射率后，染料液晶的TN型琼斯矩阵为：

$$\tilde{J}_{\mathrm{TN}}=\exp(-\mathrm{i}\tilde{\Phi})\boldsymbol{R}(\theta)\begin{bmatrix}\tilde{A} & \tilde{B}\\ \tilde{C} & \tilde{D}\end{bmatrix}. \tag{8}$$

对应的各项参数为：

$$\begin{cases} \tilde{\Phi}=\dfrac{\pi}{\lambda}(n_{/\!/}+n_{\perp})d-\mathrm{i}\dfrac{A_{/\!/}+A_{\perp}}{4}d \\ \tilde{\beta}=\sqrt{(\dfrac{\tilde{\Gamma}}{2})^2+\theta^2} \\ \tilde{\Gamma}=\dfrac{2\pi}{\lambda}\Delta nd-\mathrm{i}\dfrac{A_{/\!/}-A_{\perp}}{2}d \end{cases}, \tag{9}$$

$$\begin{cases} \tilde{A}=\cos\tilde{\beta}-\mathrm{i}\dfrac{\tilde{\Gamma}}{2}\dfrac{\sin\tilde{\beta}}{\tilde{\beta}} \\ \tilde{B}=-\tilde{C}=\theta\dfrac{\sin\tilde{\beta}}{\tilde{\beta}} \\ \tilde{D}=\cos\tilde{\beta}+\mathrm{i}\dfrac{\tilde{\Gamma}}{2}\dfrac{\sin\tilde{\beta}}{\tilde{\beta}} \end{cases}. \tag{10}$$

为进一步降低暗态透过率、提高对比度，增强器件的光学性能，考虑扭曲液晶盒搭配一层偏光片（TN+P），偏光片的透光轴与入射面内液晶分子的取向平行以实现最大吸收。以180°扭曲角为例，它的工作原理如图1所示。TN+P结构的透过率公式如式(11)所示，此处的1/2对应非偏振光通过理想偏光片的理论透过率上限：

$$T_{\mathrm{TN+P}}=\frac{1}{2}\cdot\exp\left(-\frac{(A_{/\!/}+A_{\perp})d}{2}\right)\cdot\left(\left|\tilde{A}\right|^2+\left|\tilde{C}\right|^2\right). \tag{11}$$

为表征偏振光在穿过扭曲液晶层时，其偏振面跟随液晶指向矢旋转的能力，引入Mauguin参数M：

$$M=\frac{\Gamma}{2\theta}=\frac{\pi\Delta nd}{\theta\lambda}. \tag{12}$$

当$M\gg1$时，满足Mauguin条件，表示入射光

偏振方向随液晶指向矢连续旋转；$M \ll 1$ 时，偏振面不随液晶扭曲，近似保持入射时的偏振方向。从公式(12)可以发现，双折射数值与偏振旋光能力呈正相关，扭曲角则会削弱偏振同步旋转效果。

在向列相液晶中掺入手性剂后，液晶分子呈现螺旋扭曲排列，其中螺距 p 与手性剂浓度 c(质量分数)及螺旋扭曲力(Helical Twisting Power，HTP)的关系见式(13)，自然扭曲角 θ_0、液晶盒厚 d 与螺距 p 满足式(14)：

$$p=\frac{1}{\mathrm{HTP}\cdot c}, \tag{13}$$

$$\theta_0=\frac{2\pi d}{p}. \tag{14}$$

在实际制作中，由于基板表面有摩擦方向，液晶实际扭曲角度 θ 会偏离手性剂导致的自然扭曲角度 θ_0，最终液晶层整体呈现摩擦边界约束下的扭曲角度 θ。

本文使用诚志永华公司提供的正性染料掺杂向列型液晶混合物(DYE-HGD001，染料为蒽醌型染料，染料浓度(质量分数)1.5%)，基础材料参数为：双折射为 0.08(589 nm，25 ℃)，介电各向异性为 5.0(1 kHz，25 ℃)，弹性常数分别为 K_{11}=13 pN、K_{22}=7 pN、K_{33}=16 pN。400～700 nm 范围内的吸收系数如图 2 所示，平行分子长轴的平均吸收系数为 $A_{/\!/}$=0.395 μm^{-1}，垂直于分子长轴的平均吸收系数 $A_{\perp}$=0.066 6 μm^{-1}，平均二向色比 N=6.35。液晶在基板表面的预倾角为 2°，饱和驱动电压设置为 15 V。偏光片为近似理想偏光片(偏光度为 99.95%)。

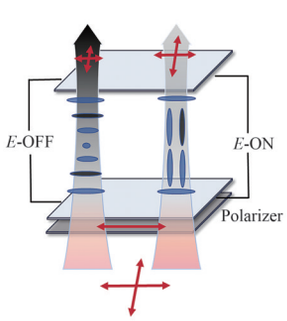


图 1　TN＋P 结构工作原理

Fig. 1　Working principle of TN＋P structure

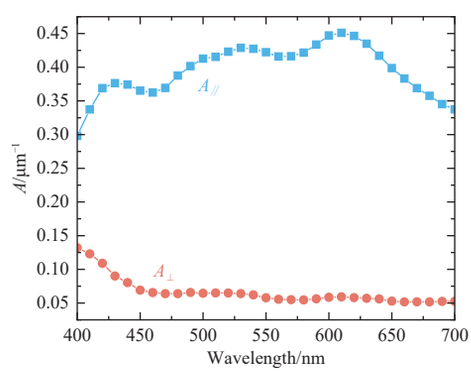


图 2　染料液晶吸收系数与波长的关系

Fig. 2　Relationship between the absorption coefficient and wavelength

2.4　理论公式计算结果

从透过率公式(11)中可以发现，影响器件透过率的因素有材料的吸收系数、双折射以及结构的盒厚、扭曲角。在固定盒厚为 5 μm、8 μm、10 μm 和双折射 0.08 的基础上改变材料的吸收系数和扭曲角。计算参数如下：固定 $A_{\perp}$=0.066 6 μm^{-1}，$A_{/\!/}$ 变换范围为 $A_{\perp}$～10$A_{\perp}$，当 $A_{/\!/}=A_{\perp}$ 时，器件处在亮态上限，进一步增大 $A_{/\!/}$，透过率逐渐降低；θ 取值为 0°～720°，透过率随平行吸收系数 $A_{/\!/}$ 和扭曲角 θ 的变化用等高图表示，计算结果如图 3 所示。

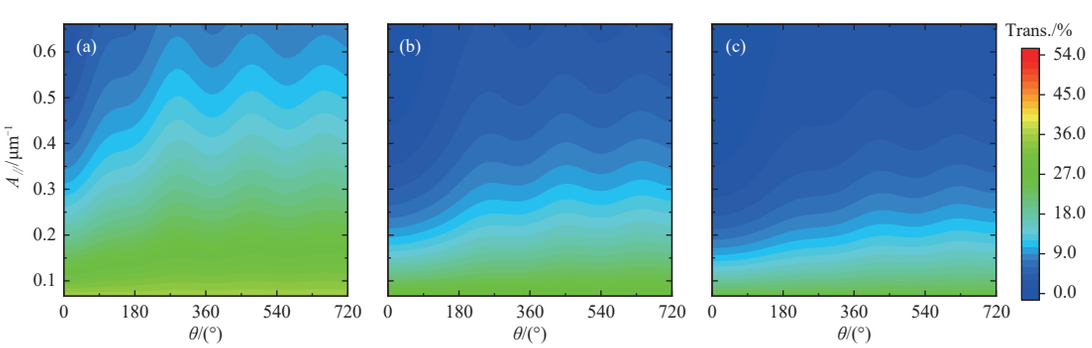


图 3　TN＋P 结构透过率随 $A_{/\!/}$ 与 θ 变化的等高图。(a)5 μm；(b)8 μm；(c)10 μm。

Fig. 3　Calculated transmittance contour maps of TN＋P structures as functions of $A_{/\!/}$ and θ. (a) 5 μm; (b) 8 μm; (c) 10 μm.

由图 3 计算结果可见，扭曲结构的引入会提升器件暗态透过率，加剧暗态漏光现象。无外加电场时液晶分子呈连续扭曲排布，对于 TN＋P 结构，入射偏振光随液晶层发生旋光，偏振方向与染料分子吸收轴的夹角沿光程持续改变，扭曲角 θ 的增大使得参数 M 减小，偏振跟随能力减弱，光偏振方向与染料吸收轴沿光程持续失配，染料吸收效率降低。扭曲角的增加也改变了偏振光与染料分子之间夹角的变化率，从而影响透过率的振荡变化。

对影响透过率和偏振跟随的另一因素——双折射 Δn 展开理论计算，固定 $n_{\perp}=1.5$，$n_{/\!/}$ 变换范围为 1.5～2，液晶层厚度为 5 μm、8 μm、10 μm，计算结果如图 4 所示。随着双折射增大，TN＋P 的透过率逐步降低，这是因为高双折射会增大 M，强化旋光效应，使偏振面重新跟随液晶指向矢，在高扭曲角时恢复偏振方向与染料吸收轴的匹配，提升其吸收作用，透过率逐步趋近小扭曲角水平。

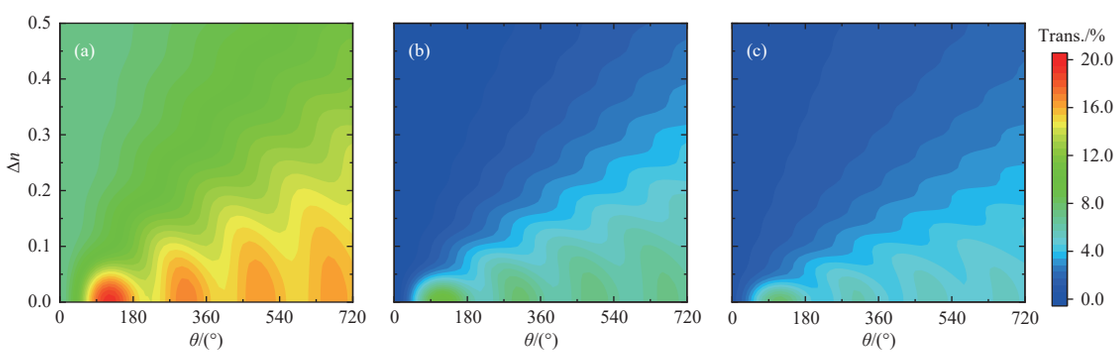


图 4 TN＋P 结构透过率随 Δn 与 θ 变化的等高图。(a)5 μm；(b)8 μm；(c)10 μm。

Fig. 4 Calculated transmittance contour maps of TN＋P structure as functions of Δn and θ. (a) 5 μm; (b) 8 μm; (c) 10 μm.

3 软件仿真

3.1 不同扭曲角的性能对比

将图 2 材料参数代入 Techwiz LCD 1D 光学仿真软件计算 400～700 nm（10 nm 步长）波长范围内的平均透过率，在 3～20 μm 盒厚时模拟 TN＋P 结构在 0°、90°、180°、270°、360°五个扭曲角的最小透过率 T_{min}、最大透过率 T_{max}、透过率调制范围 ΔT 以及对比度 CR，仿真结果如图 5 所示，图中星号表示实验实测值。仿真结果表明，液晶盒厚

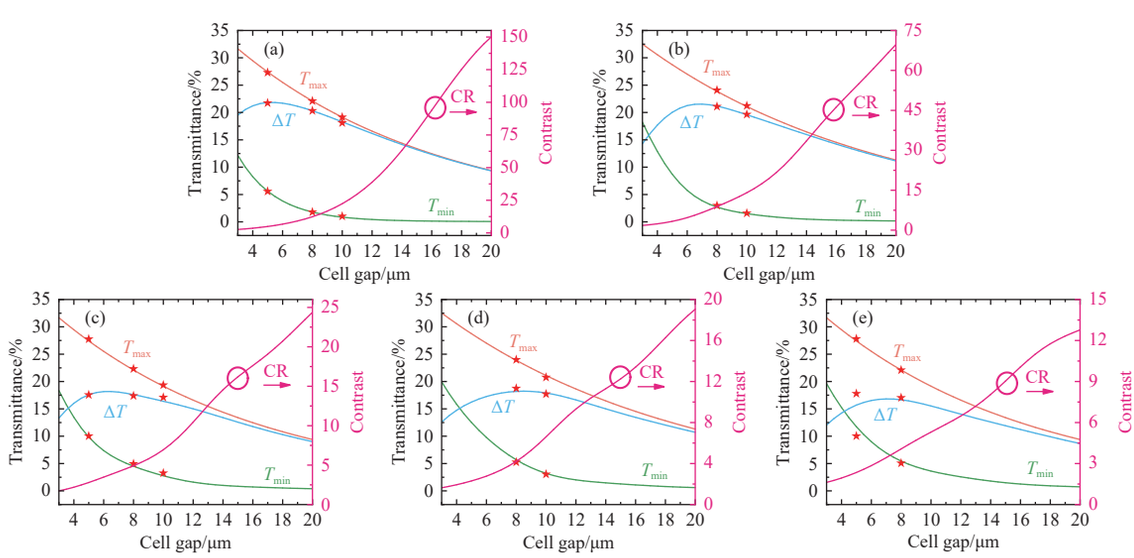


图 5 TN＋P 结构的光学仿真结果。(a)0°；(b)90°；(c)180°；(d)270°；(e)360°。

Fig. 5 Simulation results of optical properties of TN＋P structures. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°; (e) 360°.

是调控器件遮光性能的关键参数,对于同一液晶层厚,不同扭曲角的亮态透过率差别较小,而扭曲角的增加使得暗态透过率高于0°,对比度也大幅降低。

3.2　不同扭曲角的视角特性

为了系统地对比不同扭曲角的视角差异,进一步模拟了盒厚8 μm,扭曲角分别为0°、90°、180°、270°、360°液晶盒的透过率和对比度视角,结果分别如图6、图7所示。可以发现:90°和270°在中心区域拥有较高的亮态透过率,但与其他3种扭曲结构相比差值较小。0°扭曲时,对比度最强但视角对称性较差;90°扭曲时对比度视角均

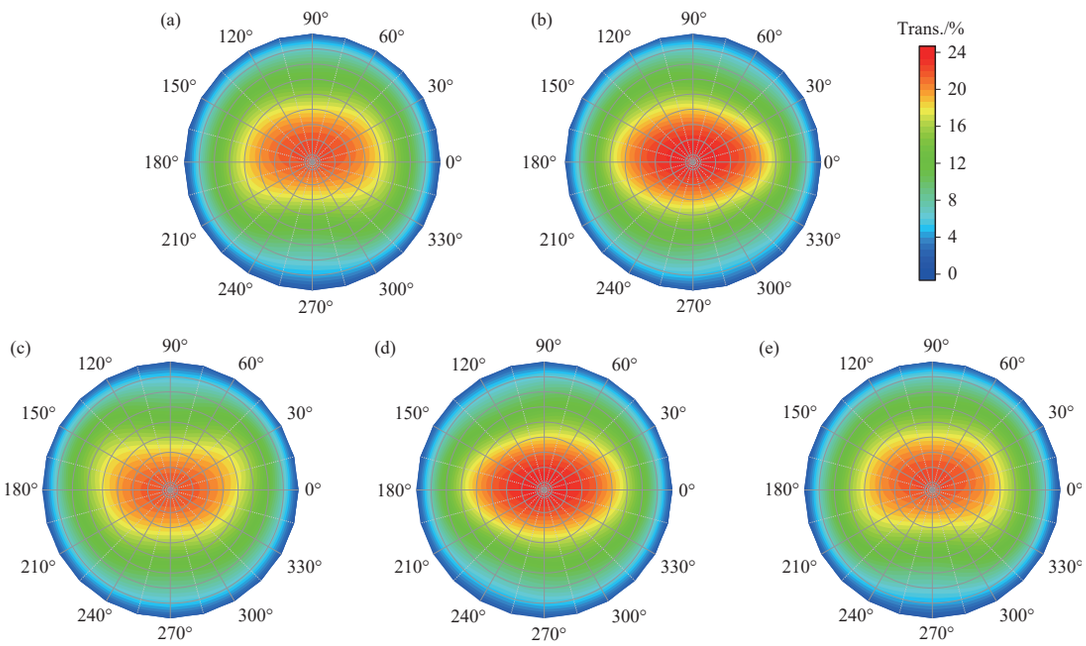


图6　8 μm盒厚TN+P结构的透过率视角。(a)0°;(b)90°;(c)180°;(d)270°;(e)360°。

Fig. 6　Transmittance viewing angle of TN+P structure with 8 μm cell gap. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°; (e) 360°.

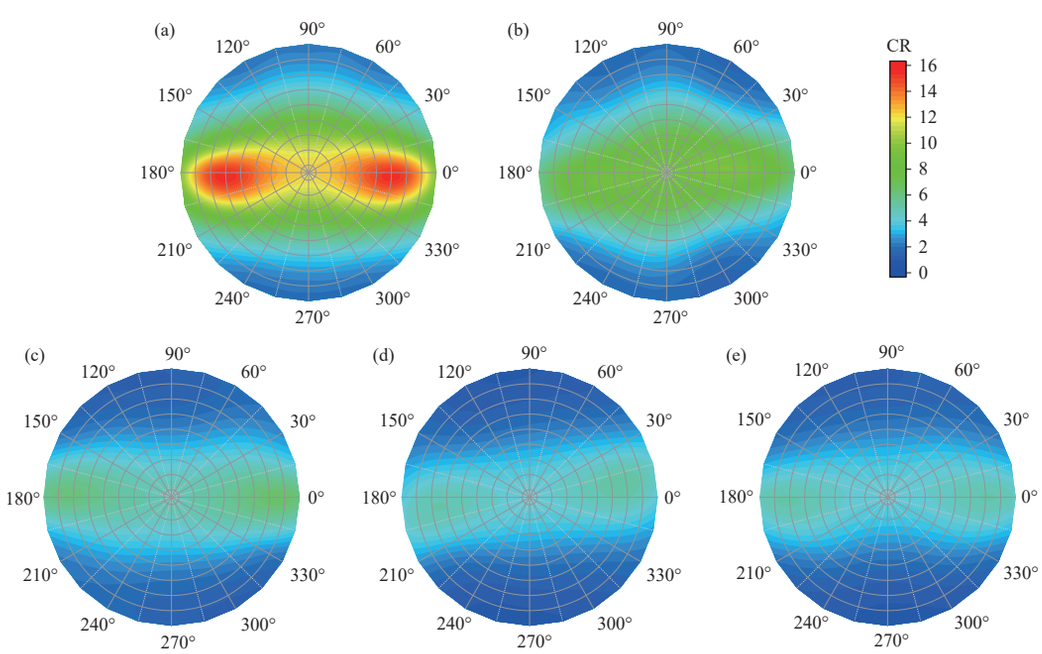


图7　8 μm盒厚TN+P结构的对比度视角。(a)0°;(b)90°;(c)180°;(d)270°;(e)360°。

Fig. 7　Contrast ratio viewing angle of TN+P structure with 8 μm cell gap. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°; (e) 360°.

匀性较好，随着扭曲角增大整体对比度显著降低，进一步印证了理论计算结果。

4 实验测量

4.1 实验材料与测试系统

为了使染料液晶具备扭曲特性，所用手性剂为S811(4-(4-己氧基苯甲酰氧基)苯甲酸-S-(+)-2-辛酯，江苏和成新材料有限公司)，其在向列相液晶中的HTP约为11.3 μm^{-1}。由式(13)、(14)计算扭曲角θ、螺距p、染料液晶和手性剂浓度，以8 μm盒厚为例，相应结果展示在表1中，液晶盒的M值均不满足$M \gg 1$或$M \ll 1$。后续制备不同厚度、不同扭曲角的液晶盒，并进行偏光片贴附。

表1 8 μm盒厚下不同扭曲角的组份浓度(质量分数)

Tab. 1 Component concentrations for 8 μm cells at different twist angles (Mass Fraction)

θ/(°)	p/μm	DDLC/%	S811/%	M(550 nm)
90	32	99.723	0.277	4.65
180	16	99.447	0.553	2.33
270	10.67	99.171	0.829	1.55
360	8	98.894	1.106	1.16

器件性能测试系统主要包括：波长范围350～1 100 nm的卤素灯光源、FX200L-RO型光纤光谱仪，用于测试器件的透过率-波长光谱；Rigol DG4062型波形发生器与Tegam 2350型电压放大器，用于产生1 kHz方波驱动电压；高精度旋转台，用于控制偏光片与液晶盒的取向角度；THORLABS DET36A光电探测器和RIGOL DS2202A示波器，用于测试样品的响应时间。所有测试均在常温常湿的暗室环境中进行。测试系统光路如图8所示。

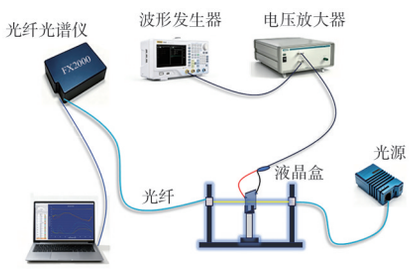


图8 测试系统光路图

Fig. 8 Optical schematic of measurement system

4.2 电光特性曲线

对5 μm、8 μm、10 μm盒厚，0°～360°扭曲角的TN+P样品进行实验测量，以400～700 nm(步长10 nm)波长范围内的算术平均为最终透过率结果，电压-透过率曲线如图9所示。5 μm盒厚、360°扭曲时测量的暗态透过率与模拟值相差较大，原因在于液晶分子在盒内没有按照完美的扭曲角度和结构排列。从图9可以看出，0°扭曲角的暗态透过率最低，10 μm时暗态透过率低至1.03%；随着盒厚和扭曲角的增大，驱动电压进一步升高。由图9(b)和图9(c)可知，90°扭曲拥有更高的亮态透过率，与模拟结果一致。8 μm盒厚时的具体透过率数据见表2。

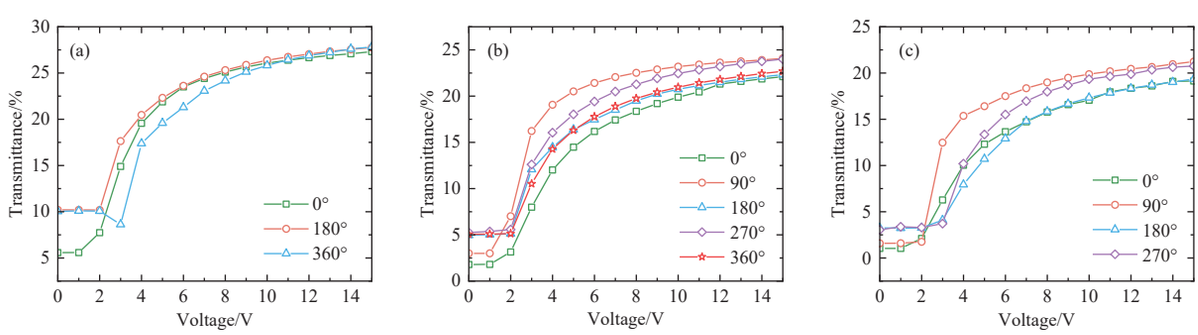


图9 TN+P结构的电压-透过率曲线。(a)5 μm；(b)8 μm；(c)10 μm。

Fig. 9 Experimental voltage-dependent transmittance curves of TN+P structure. (a) 5 μm; (b) 8 μm; (c) 10 μm.

为更直观对比理论、模拟与实验三者的差异，将8 μm盒厚条件下理论和模拟的暗态透过率列于表3，以软件模拟值为真值，通过理论-模拟比值$\frac{T_{theo.}}{T_{sim.}}$和实验-模拟比值$\frac{T_{exp.}}{T_{sim.}}$，定量评估理论模型与实验测量相对于仿真结果的偏离程度。计

表 2　8 μm 盒厚 TN+P 结构的光学性能实验值

Tab. 2　Measured optical performances of TN+P structure with 8 μm cell gap

θ/(°)	T_{min}/%	T_{max}/%	ΔT/%	CR
0	1.79	22.11	20.32	12.35
90	2.99	24.08	21.09	8.05
180	4.94	22.32	17.38	4.52
270	5.25	23.99	18.74	4.57
360	5.06	22.09	17.03	4.37

表 3　8 μm 盒厚 TN+P 结构暗态的理论、模拟和实验值对比

Tab. 3　Comparison of theoretical, simulated and experimental values of dark-state transmittance for TN+P structure with 8 μm cell gap

θ/(°)	$T_{theo.}$/%	$T_{sim.}$/%	$T_{exp.}$/%	$\frac{T_{theo.}}{T_{sim.}}$	$\frac{T_{exp.}}{T_{sim.}}$
0	2.12	1.79	1.79	1.18	1.00
90	3.13	2.70	2.99	1.16	1.11
180	5.29	4.50	4.94	1.18	1.10
270	6.59	5.68	5.25	1.16	0.92
360	6.41	5.44	5.06	1.18	0.93

算发现，理论值普遍高于模拟值，且比值非常接近，这是由于理论模型未纳入基板、界面反射等附加损耗，因此透过率整体偏高。而实验过程中盒厚不均匀、偏光片对准误差、环境杂散光这些因素都会造成数值偏差。但整体而言，理论、模拟与实验三者贴合度较高。但理论模型在亮态时，将所有液晶分子处理为垂直排列，未充分考虑基板表面处真实分子排列的情况，使得理论亮态透过率偏高，后续可对模型进一步优化。

4.3　响应时间特性

随后对 8 μm 盒厚的 5 个样品进行响应时间测试，驱动电压为 15 V，测试结果显示在图 10 中。它们的上升响应时间（透过率 10%～90%）非常接近，这是因为上升过程由高电压（15 V）驱动，该电压远高于阈值电压（～2 V），介电扭矩远大于展曲弹性力矩。撤电压后，不同结构的下降响应时间存在差别，原因在于响应时间与扭曲角度相关，其中 90°扭曲结构的下降时间最长，在高电压驱动后的撤电压过程中存在背流效应（Backflow Effect）。所有器件的响应时间都在 50 ms 以内，符合快速明暗切换场景的需求。

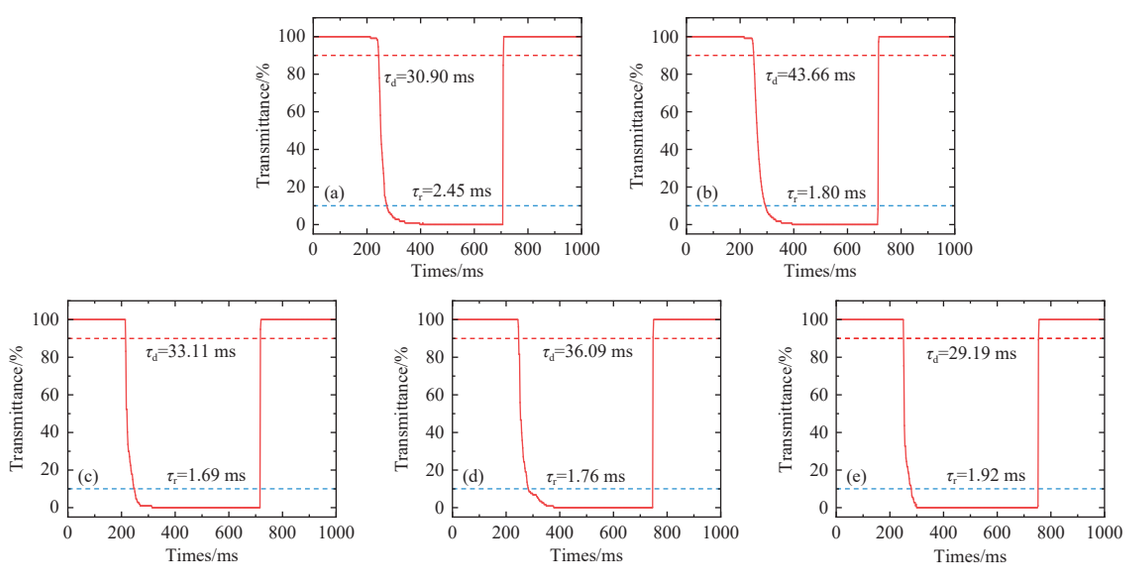


图 10　8 μm 盒厚 TN+P 结构的动态响应时间特性。(a)0°；(b)90°；(c)180°；(d)270°；(e)360°。

Fig. 10　Dynamic response time of TN+P structure with 8 μm cell gap. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°; (e) 360°.

4.4　实物样品表征

图 11 为 8 μm 盒厚的 5 个样品的实物照片，液晶盒尺寸为 2 cm×2 cm，只在中间位置有相对的电极，尺寸为 1 cm×1 cm，即：中心方形区域为施加电压的区域（亮态），周围暗区为无驱动电压状态（暗态）。0°扭曲时，暗态透过率最小，文字信息不可辨认；90°扭曲时透过率有所升高，但仍识别困难；180°～360°扭曲时透过率进一步增加，暗

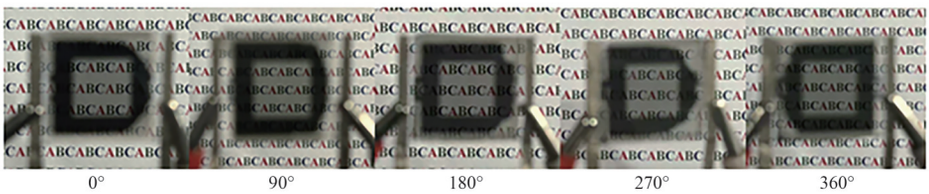


图 11 8 μm盒厚 TN+P结构的亮态与暗态实物照片

Fig. 11 Physical photos of devices based on TN+P structure with 8 μm cell gap in bright and dark states

区文字遮挡效果变弱,5个器件的亮态区域显示效果相近,背景文字清晰可见,进一步印证了理论和模拟结果。

5 结 论

本文基于复折射率修正的琼斯矩阵理论,推导得到包含液晶双折射与染料各向异性吸收的扭曲排列液晶层的透过率公式,通过模拟和实验进一步探究了扭曲结构对 TN+P 调光性能的影响。研究结果表明,液晶扭曲排列结构产生的旋光效应是器件暗态漏光的核心诱因:扭曲角度增大,偏振跟随能力减弱,光偏振方向与染料吸收轴沿光程持续失配,光吸收效率大幅降低;而高双折射材料会强化旋光效应,从而在高扭曲角下提升染料的有效吸收效率,使暗态透过率趋近于低扭曲角水平。TN+P结构的视角模拟结果表明,扭曲结构不仅带来对比度的降低,还降低了视角特性。

此外,液晶盒厚是调控遮光性能的关键参数。针对 400~700 nm 可见光波段,选用平行、垂直分子长轴平均吸收系数分别为 0.395 μm^{-1}、0.066 6 μm^{-1}的染料液晶进行实验,随盒厚增加,透过率显著降低,10 μm 平行盒的暗态透过率低至 1.03%,扭曲角为 90°时的亮态透过率最高。所有器件的响应时间均低于 50 ms,可满足一般隐私保护和调光应用需求。本文建立的计算理论和研究结果,可为染料扭曲液晶器件的材料选型与结构优化提供标准化定量分析方案,在智能调光窗、光阀领域具备重要应用价值。

参 考 文 献:

[1] 张梦梦,刘梦,杨丽丽,等. 液晶材料在智能光学器件中的应用研究进展[J]. 材料导报,2022,36(18):21040006.
ZHANG M M, LIU M, YANG L L, *et al*. Research progress of liquid crystal materials' applications in smart optical devices [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(18): 21040006. (in Chinese)

[2] SHEN W B, LI G Q. Recent progress in liquid crystal-based smart windows: materials, structures, and design [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(1): 2200207.

[3] 吴菁,李佳,黄金华,等. 聚合物分散液晶器件概述、发展趋势及应用研究进展[J]. 材料导报,2024,38(21):23010078.
WU J, LI J, HUANG J H, *et al*. Overview, development trend and application research progress of polymer dispersed liquid crystal devices [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(21): 23010078. (in Chinese)

[4] SHIVARAJA S J, SAHAI M, GUPTA R K, *et al*. Superior electro-optical switching properties in polymer dispersed liquid crystals prepared with functionalized carbon nanotube nanocomposites of LC for switchable window applications [J]. *Optical Materials*, 2023, 137: 113546.

[5] PHAM H H, RIM M, WI Y, *et al*. π-extended viologen-based lyotropic chromonic liquid crystal reactive mesogen: uniaxial orientation and photopolymerization for transmittance and color controllable electrochromic smart glass (Adv. Mater. 40/2025) [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(40): e70708.

[6] ZHAO S Q, CHEN L S, HUANG W B, *et al*. Transparent multicolor electrochromic displays with ingenious hues adjustment by integrating cholesteric liquid crystal with viologen gel [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(19): 2300503.

[7] OH S W, JI S M, HAN C H, *et al*. A cholesteric liquid crystal smart window with a low operating voltage [J].

Dyes and Pigments, 2022, 197: 109843.

[8] PATHINTI R S, GOLLAPELLI B, PRADHAN S R, *et al*. Energy saving, transparency changing thermochromism in dye-doped cholesteric liquid crystals for smart windows [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2023, 444: 114981.

[9] MIN K L, MARSH Z M, CRENSHAW E P, *et al*. Recent advances in electro-optic response of polymer-stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Materials*, 2023, 16(6): 2248.

[10] HE Z M, ZENG J T, ZHU S T, *et al*. A bistable light shutter based on polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Optical Materials*, 2023, 136: 113426.

[11] 赵海燕,王玲,杨槐. 智能调光技术研究进展及产业化情况分析[J]. 液晶与显示,2025,40(10):1423-1439.
ZHAO H Y, WANG L, YANG H. Research progress and industrialization analysis of smart dimming technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1423-1439. (in Chinese)

[12] DOGRA A R, SHARMA V, MALIK P, *et al*. In-situ homeotropic alignment of dye doped liquid crystal molecules on multilayered self assembled nanoparticles in confined cells for next generation display devices [J]. *Optical Materials*, 2024, 154: 115731.

[13] WANG Y, SUN J J, ZHANG X B, *et al*. A new dimming technology and applications based on dye-doped liquid crystal [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2025, 56(1): 2154-2155.

[14] NAM S M, OH S W, KIM S H, *et al*. Parameter space design of a guest-host liquid crystal device for transmittance control [J]. *Crystals*, 2019, 9(2): 63.

[15] WU W H, CHEN Y Y, CHANG L M, *et al*. Bistable photochromic guest–host liquid crystals for rewritable and switchable photonic devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(8): e17413.

[16] GOOCH C H, TARRY H A. The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles ≤ 90 degrees [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1975, 8(13): 1575-1584.

[17] YANG C S, LIN C J, PAN R P, *et al*. The complex refractive indices of the liquid crystal mixture E7 in the terahertz frequency range [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(9): 1866-1873.

作者简介:



李　双,女,硕士研究生,2023年于河北工业大学获得学士学位,主要从事染料液晶器件物理与动态调光技术方面的研究。E-mail:1721937980@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方面的研究。E-mail:sun_yubao@163.com