中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

表面锚定能对电控液晶波片调制性能的影响

刘璐璐 查正桃 刘子豪 勾正阳 宋白露

Effect of surface anchoring energy on the modulation performance of electrically controlled liquid crystal waveplate

LIU Lu-lu, ZHA Zheng-tao, LIU Zi-hao, GOU Zheng-yang, SONG Bai-lu

引用本文:
刘璐璐, 查正桃, 刘子豪, 等. 表面锚定能对电控液晶波片调制性能的影响[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0172
LIU Lu-lu, ZHA Zheng-tao, LIU Zi-hao, *et al*. Effect of surface anchoring energy on the modulation performance of electrically controlled liquid crystal waveplate[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0172

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026-0172

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双液晶偏振光栅系统的倾斜误差特性分析
Tilt error’s characteristic analysis of dual liquid crystal polarization grating system
中国光学（中英文）. 2024, 17(6): 1387 https://doi.org/10.37188/CO.2024-0041

基于掩模光刻的液晶波前校正器设计与制备
Design and fabrication of liquid crystal wavefront corrector based on mask lithography
中国光学（中英文）. 2024, 17(2): 324 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0137

基于液晶空间光调制器的全息再现像设计
Design of holographic reproduction images based on liquid crystal spatial light modulator
中国光学（中英文）. 2025, 18(4): 771 https://doi.org/10.37188/CO.2024-0224

基于变周期光栅法的液晶相控阵指向精度研究
Research on pointing accuracy of liquid crystal phase array based on the variable period grating method
中国光学（中英文）. 2025, 18(1): 29 https://doi.org/10.37188/CO.2024-0097

同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模
Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry
中国光学（中英文）. 2024, 17(3): 640 https://doi.org/10.37188/CO.2023-0152

基于Yb:CALGO晶体激光器的偏振复用
Polarization-multiplexing of a laser based on a bulk Yb:CALGO crystal
中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1475 https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0005

文章编号　2097-1842(xxxx)x-0001-10

表面锚定能对电控液晶波片调制性能的影响

刘璐璐[1*], 查正桃[2,3,4], 刘子豪[2,3,4], 勾正阳[2,3,4], 宋白露[1]
（1. 长春大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130033；
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033；
3. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049；
4. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033）

摘要: 本文针对电控液晶波片(liquid crystal waveplate, LCWP)在宽角域锥形入射下的偏振调控性能, 构建了涵盖有限表面锚定能下液晶指向矢的场致重新取向、透射场分布及圆偏振度(Degree of circular polarization, DoCP)演化过程的完整分析链路。首先, 基于 Freedericksz 转变推导了受外加电压和表面锚定能共同作用的液晶介电张量分布。继而结合 Berreman 法计算了 LCWP 在不同锚定作用强度下的 DoCP 分布, 并将其分解为振幅系数与相位系数阐释了相应的物理机制。数值结果揭示, 平面入射时 LCWP 表现为纯相位调控元件, 表面锚定能对 DoCP 几乎无影响。在锥形入射下, LCWP 呈现出振幅与相位均依赖外加电压的耦合调制, 其最小 DoCP 始终趋近于−1 且不受锚定能的影响。然而, 最大 DoCP 则强烈依赖于表面锚定能, 当锚定作用强度由 1×10^{-3} J/m^2 减弱至 1×10^{-5} J/m^2 时, LCWP 在±20°的宽角域锥形入射范围内的最大 DoCP 下限值由 0.9078 提升至 0.9823。最后, 制备了盒厚 5.4 μm 的电控 LCWP 器件, DoCP 的实测结果与仿真具有高度的一致性, 验证了理论分析的正确性。研究结果表明, 减弱表面锚定能可在几乎不牺牲相位调制系数的前提下降低工作电压以提升振幅系数, 从而有效改善 LCWP 在宽角域下的圆偏振维持性能, 为高性能电控液晶偏振器件的设计与制备提供了理论参考。

关　键　词: 液晶; 波片; 偏振调制; 锚定能
中图分类号: O436.1　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.3724/CO.2026-0172　　**CSTR:** 32171.14.CO.2026-0172

Effect of surface anchoring energy on the modulation performance of electrically controlled liquid crystal waveplate

LIU Lu-lu[1*], ZHA Zheng-tao[2,3,4], LIU Zi-hao[2,3,4], GOU Zheng-yang[2,3,4], SONG Bai-lu[1]
（1. *School of Materials Science and Engineering*, *Changchun University*, *Changchun*, 130033, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun*, 130033, *China*;
3. *Center of Material Science and Optoelectronics Engineering*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*, 100049, *China*;
4. *State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems*, *Changchun*, 130033, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *liull@ccu.edu.cn*

Abstract: This work investigates the polarization modulation performance of an electrically controlled liquid

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 国家自然科学基金(No. 12404492); 长春大学攀登计划项目(No. zkp202105)
This work was supported by the National Science Foundation of China (No. 12404492); Changchun University Climbing Plan Project (No. zkp202105)

crystal waveplate (LCWP) under wide-angle conical incidence. A complete analysis chain is established, encompassing the field-induced reorientation of liquid crystal directors under finite surface anchoring energy, the transmitted field distribution, and the evolution of the degree of circular polarization (DoCP). First, based on the Freedericksz transition, the dielectric tensor distribution of the liquid crystal under the combined effects of an applied voltage and surface anchoring energy is derived. Subsequently, the DoCP distributions of the LCWP under different anchoring strengths are calculated using the Berreman method and decomposed into amplitude and phase coefficients to elucidate the underlying physical mechanism. Numerical results reveal that the LCWP behaves as a pure phase-modulation element under planar incidence, and the DoCP is almost independent of the surface anchoring energy. The LCWP exhibits coupled modulation in which both amplitude and phase depend on the applied voltage under conical incidence, and its minimum DoCP always approaches −1 regardless of the anchoring energy. The maximum DoCP, however, strongly depends on the surface anchoring energy. When the anchoring strength is weakened from 1×10^{-3} J/m^2 to 1×10^{-5} J/m^2, the lower bound of the maximum DoCP of the LCWP over a wide-angle conical incidence range of ±20° increases from 0.907 8 to 0.982 3. Lastly, an electrically controlled LCWP device with a cell thickness of 5.4 μm was fabricated. The measured DoCP results agree well with the simulation predictions, thereby verifying the validity of the theoretical analysis. These results demonstrate that weakening the surface anchoring energy can reduce the operating voltage and thereby increase the amplitude coefficient with almost no sacrifice of the phase modulation, thus effectively improving the maintenance performance of circular polarization for the LCWP over a wide angular range. This work will provide a theoretical reference for the design and fabrication of high-performance electrically controlled liquid crystal polarization devices.

Key words: liquid crystal; waveplate; polarization modulation; anchoring energy

1 引 言

光束偏转技术已成为激光雷达[1]、激光成像[2]、空间通信[3-4]、增强现实和虚拟现实[5-6]等领域的关键支撑技术之一，其性能直接影响相关应用系统的整体表现。传统机械式光束偏转系统主要依靠万向节[7]、转台等惯性部件，通常存在体积庞大、扫描速度受限、稳定性不足等固有缺陷，难以满足下一代光电系统对小型化、轻量化、宽角域、高精度和快速响应的迫切需求。在此背景下，非机械式光束偏转技术因具有尺寸紧凑、功耗低、鲁棒性强等优势而受到广泛关注[8-10]，其实现主要依赖于液晶偏振光栅[11-13]，偏振透镜[14]，偏振体光栅[15-16]等依托于几何相位的结构。由于这类几何相位元件的光束偏转具有圆偏振选择性，其能量效率强烈依赖于入射光波的偏振态。然而，主动式几何相位元件在大角度下存在严重的散射损耗[17]，致使研究人员主要诉诸于由液晶聚合物制成的无源器件。由此，宽角域级联系统必须依靠前置的可调液晶波片（liquid crystal waveplate, LCWP）来切换激光束的偏转方向，这意味着要使系统能在给定的宽角域应用需求范围内始终高效地实现光束偏转，LCWP 必须对入射光束具有优异的偏振调制性能。

近年来，关于电控 LCWP 偏振调控性能的研究被相继报道[18-19]。然而，这些研究结果大多基于液晶盒具有无限强锚定的假设，从而难以为 LCWP 的实际制备提供有效的指导。这是因为在实际制备液晶盒时，摩擦或光控取向所产生的表面锚定作用强度必定是有限的，其典型值位于 1×10^{-5} J/m^2（弱锚定）至 1×10^{-3} J/m^2（强锚定）量级[20-22]。此外，文献 [23] 的研究结果也指出，基于液晶盒的偏振旋转器件的电控性能会因表面锚定能的不同而存在显著差异。上述现象表明，电控 LCWP 在宽角域下的偏振调制性能很可能对表面锚定能的强度同样敏感。因此，有必要进一步研究 LCWP 的表面锚定能对其电控性能的影响，进而

为实际制备高性能的偏振转换器件提供更有价值的参考。

这项研究主要报道了液晶盒表面锚定能对电控 LCWP 的圆偏振转换性能的影响。在第 2 节中, 基于 Freedericksz 转变[20] 的液晶场致重取向, 推导了其在外加电压和表面锚定能共同作用下的介电张量分布。然后, 将其与 LCWP 透射电场的两正交偏振分量相结合, 旨在建立任意锥形入射下 LCWP 出射光的圆偏振度(Degree of circular polarization, DoCP)与外加电压以及锚定作用强度之间的定量关系。在第 3 节中, 通过特定器件参数下的数值分析, 详细讨论了液晶盒的表面锚定能对偏振调制能力指标(包括指向矢偏转角、有效双折射率、DoCP 以及出射光波的振幅系数和相位系数等)的影响。在第 4 节中, 通过设计简单的测量系统, 验证了这项工作计算的有效性和准确性。第 5 节为结论。

2　原理分析

本研究所涉及的电控 LCWP 结构如图 1(a)所示, 其厚度 h 通过置放间隔子来实现, 在上下氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)电极的内表面均涂覆有非常薄(约几十纳米[24])的取向层。两取向层具有相同的取向和锚定作用强度, 并使得所有液晶分子在不存在外加电压时沿 Y 轴方向排列。对于图 1(b) 所示的这种场致重新取向, 根据 Frank-Oseen 弹性连续体理论[20] 和 Euler-Lagrange 变分理论[25], 使液晶分子指向矢发生偏转的阈值电压 U_{th} 可由下式确定:

$$U_{\mathrm{th}}-2\sqrt{\frac{k_{11}}{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}}\arctan\left(\frac{h}{U_{\mathrm{th}}L}\sqrt{\frac{k_{11}}{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}}\right)=0 \quad . \quad (1)$$

这里, k_{11} 是 Frank 展曲弹性常数, ε_0 是真空介电常数, $\Delta\varepsilon$ 为液晶的无量纲介电各向异性, $L=k_{11}/W$ 为表面外推长度, W 表示取向层的表面锚定作用强度。

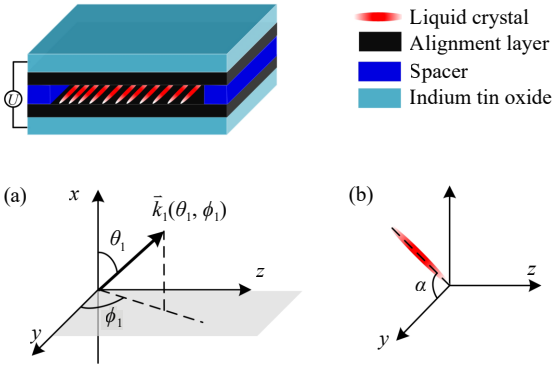


图 1　(a) 电控 LCWP 的锥形入射示意图; (b) 液晶分子偏转示意图

Fig. 1　(a) Schematic diagram of conical incidence for electrically controlled LCWP; (b) deflection of the liquid crystal molecular

由式(1)可知, LCWP 的阈值电压依赖于取向层的表面锚定能。同时, 液晶盒顶部以及底部边界上的指向矢偏转角度 α_1 为[23]

$$\alpha_1=\arcsin\left[\sin\alpha_{\mathrm{m}}\sqrt{\frac{2}{\sqrt{\chi^2+4(k_{33}/k_{11}-\xi^2/L^2-1)\sin^2\alpha_{\mathrm{m}}}+\chi}}\right] , \quad (2)$$

式中, $\xi=h\sqrt{k_{11}/(\varepsilon_0\Delta\varepsilon)}/U$表示 LCWP 的驱动电场的相干长度, U 为两个 ITO 透明电极之间所施加的外加电压。$\chi=\xi^2/L^2+1+(1-k_{33}/k_{11})\sin^2\alpha_{\mathrm{m}}$, k_{33} 是 Frank 弯曲弹性常数, α_{m} 表示液晶指向矢的最大偏转角(即液晶盒中间平面处的偏转角度)。从式(2)可以看到, LCWP 上下边界处的指向矢偏转角不仅受表面锚定能的影响, 而且还与外加电压有关。值得注意的是, 除外加电压低于阈值的情形外, 当液晶分子满足 α_{m}=90°且 $Wh\leqslant U\sqrt{k_{33}\varepsilon_0\Delta\varepsilon}$时, 也可达到 $\alpha_1=\alpha_{\mathrm{m}}$ 的效果。这表明, 从理论上而言, 当表面锚定能弱到一定程度时, 只要施加合适的外加电压, LCWP 可再次实现绝对均匀的排列。对于其余一般情形, 液晶指向矢的偏转角可通过式(3)计算:

$$x=\frac{h}{U}\sqrt{\frac{k_{11}}{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}}\int_{\alpha_1}^{\alpha(x)}\sqrt{\frac{\cos^2\alpha+(k_{33}/k_{11})\sin^2\alpha}{\sin^2\alpha_{\mathrm{m}}-\sin^2\alpha}}\mathrm{d}\alpha \quad . \quad (3)$$

进一步地, 根据旋转矩阵易得在 LCWP 坐标系中介电张量可表达为

$$\boldsymbol{\varepsilon}(x)=\varepsilon_0\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx}(x) & \varepsilon_{xy}(x) & 0\\ \varepsilon_{yx}(x) & \varepsilon_{yy}(x) & 0\\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz}\end{bmatrix} , \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases}\varepsilon_{xx}(x)=n_{\mathrm{e}}^2\sin^2\alpha(x)+\mathrm{n}_{\mathrm{o}}^2\cos^2\alpha(x),\\ \varepsilon_{yy}(x)=n_{\mathrm{e}}^2\cos^2\alpha(x)+n_{\mathrm{o}}^2\sin^2\alpha(x),\\ \varepsilon_{yx}(x)=\varepsilon_{xy}(x)=(n_{\mathrm{e}}^2-n_{\mathrm{o}}^2)\cos\alpha(x)\sin\alpha(x)\\ \varepsilon_{zz}=n_{\mathrm{o}}^2,\end{cases}. \tag{5}$$

这里，n_{e} 和 n_{o} 分别为平行和垂直于液晶指向矢的两个主轴折射率。这样，当在空气中的波矢方向为

$$\vec{k}_{\mathrm{i}}=\frac{2\pi}{\lambda_0}\begin{pmatrix}\cos\theta_1 & \sin\theta_1\cos\phi_1 & \sin\theta_1\sin\phi_1\end{pmatrix}. \tag{6}$$

的圆偏振平面波锥形入射通过 LCWP 后，其出射光波的偏振态可由外加电压调控，并依赖于表面锚定能的强度。式中，λ_0 表示真空波长，θ_1 表示入射波矢与 x 轴（即器件厚度方向）之间的极角，ϕ_1 表示入射波矢在 yoz 平面内的分量与 y 轴所形成的方位角。进一步地，为量化 LCWP 对其出射光波的偏振调控性能，这里引入 DoCP，其定义为[26]

$$\mathrm{DoCP}=\mathrm{j}\frac{E_{\mathrm{p}}E_{\mathrm{s}}^*-E_{\mathrm{s}}E_{\mathrm{p}}^*}{E_{\mathrm{p}}E_{\mathrm{p}}^*+E_{\mathrm{s}}E_{\mathrm{s}}^*}, \tag{7}$$

式中，E_{s}和E_{p}表示 LCWP 透射电场的两个正交偏振分量，由式 (8) 计算：

$$\begin{cases}E_{\mathrm{s}}=\cos\phi_1E_z-\sin\phi_1E_y\\ E_{\mathrm{p}}=\cos\theta_1\cos\phi_1E_y+\cos\theta_1\sin\phi_1E_z-\sin\theta_1E_x\end{cases}. \tag{8}$$

这里E_x，E_y以及E_z表示 LCWP 出射光波在器件坐标系下的电场分量，可通过有限元法[27]、有限差分时域法[28] 或 Berreman 法[29-30] 获得。综合上述，联立以上所有方程即可计算出 LCWP 在任意锚定作用强度以及外加电压下的 DoCP 分布。

3 仿真结果

在这项研究中，除特别说明外，光波长 λ_0 固定为 0.66 μm，并选择右旋圆偏振光（Right-hand circular polarization, RCP）入射作为代表性示例。液晶材料在该波长下的两个主轴折射率分别为 n_{e}=1.649 1 和 n_{o}=1.498 5，液晶的介电各向异性 $\Delta\varepsilon$ 为 2.4，室温下的弹性常数为 k_{11}=14.3 pN，k_{33}=15 pN。液晶盒的厚度 h=5.23 μm（约为 1.2 个波长的相位调制量），以确保满足宽角域下的全波相位延迟需求。此外，由于取向层极薄，其折射率和厚度对器件光学性能的影响通常可以忽略[24]，因此模拟过程中并未考虑取向层的厚度信息。LCWP 中指向矢在不同外加电压下的偏转角分布对表面锚定作用强度的依赖情况如图 2 所示。

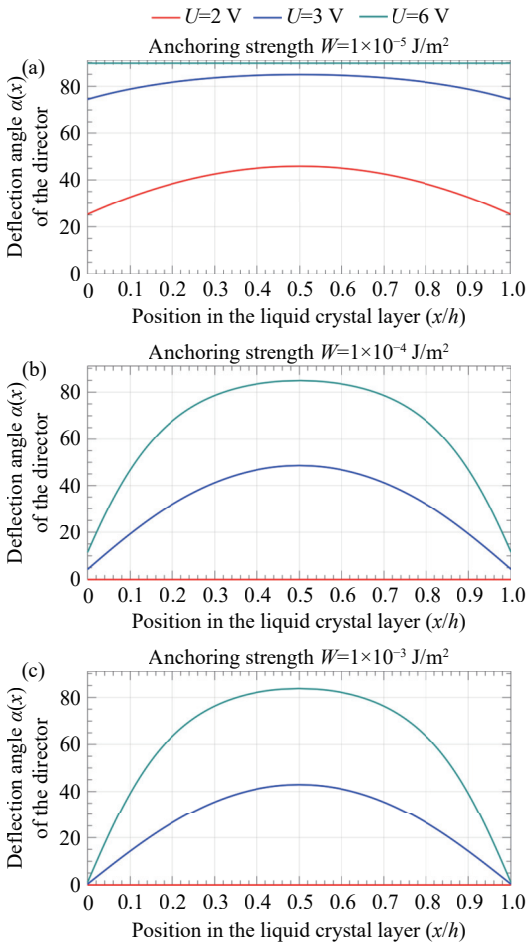


图 2 LCWP 中指向矢的偏转角分布对锚定作用强度的依赖特性。(a) W=1×10⁻⁵ J/m²; (b) W=1×10⁻⁴ J/m²; (c) W=1×10⁻³ J/m²。

Fig. 2 Dependence of the deflection angle distribution of the director in LCWP on the anchoring strength. (a) W=1×10⁻⁵ J/m²; (b) W=1×10⁻⁴ J/m²; (c) W=1×10⁻³ J/m²

从图 2(a) 可以看到，对于 W=1×10⁻⁵ J/m² 的弱锚定 LCWP 而言，U=2 V 的外加电压足以使液晶分子产生明显的渐变偏转，但由图 2(b) 和图 2(c) 可知，当锚定作用强度 $W\geqslant$1×10⁻⁴ J/m² 时，该电压并不能驱动液晶分子发生有效偏转。这是因为由式(1)可知，更强的表面锚定能导致了更高的阈值电压。更为关键的是，从图 2 中还可以发现，LCWP 边界上的指向矢偏转角 α_1 被外加电压改变的幅度对表面锚定作用强度非常敏感。例如，对于

U=3 V 的外加电压而言，当锚定作用强度为 1×10^{-3} J/m^2(即强锚定)时，LCWP 在边界上的偏转角 α_1 仅约为 0.4°。然而，当锚定作用强度 W 降低至 1×10^{-5} J/m^2 的弱锚定时，LCWP 在边界上的指向矢偏转角 α_1 高达 74.5°左右。这意味着随着表面锚定作用的大幅减弱，LCWP 的场致重新取向过程所受到的阻碍也将急剧减小。因此，可以预估表面锚定作用强度能显著影响 LCWP 的相位调制性能。具体而言，以垂直入射为例，LCWP 的平均有效双折射率可表示为：

$$\Delta n_{\mathrm{eff}}=\frac{1}{h}\int_0^h\frac{n_{\mathrm{o}}n_{\mathrm{e}}}{\sqrt{n_{\mathrm{e}}^2\sin^2\alpha(x)+n_{\mathrm{o}}^2\cos^2\alpha(x)}}\mathrm{d}x-n_{\mathrm{o}}\quad. \tag{9}$$

图 3 展示了表面锚定作用强度对平均有效双折射率的电控特性分布的影响。

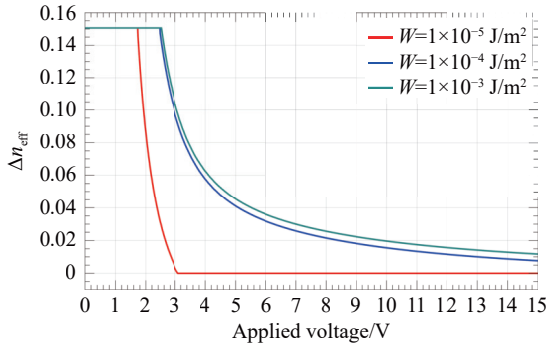


图 3　基于垂直入射，表面锚定作用强度对平均有效双折射率的电控特性分布所造成的影响

Fig. 3　Influence of surface anchoring strength on the electrically controlled characteristic distribution of the average effective birefringence under normal incidence

根据图 3 可知，对于任意表面锚定能的 LCWP 而言，都存在一段有效双折射率恒定为 0.150 6(即 n_{e}-n_{o})的低电压区域，这是因为此时液晶分子尚未发生偏转。一旦外加电压超过阈值，LCWP 在同一电压下的有效双折射率会随表面锚定作用强度的减弱而降低。这一现象归因于更弱的锚定作用强度使边界上的液晶指向矢更容易偏离基板，如图 2 所示。此外，从图 3 中还可以发现，当锚定作用强度 W 减弱至 1×10^{-5} J/m^2 时，施加约 3 个伏特的电压即可使有效双折射率降为 0，整个器件中的液晶分子均匀地垂直排列。这是因为此时的 LCWP 已满足第 2 节中所述的指向矢均匀排列条件。

进一步地，这里采用 Berreman 法[29] 来计算基于上述指向矢分布的电控 LCWP 在锥形入射下所能实现的 DoCP，以表征表面锚定能对器件偏振调制效果的影响，结果如图 4 所示。

从图 4(a)、(c) 以及 (e) 可见，当 RCP 以平面方位(即 0°或 180°)入射时，只要施加相应的全波电压，具有不同表面锚定作用强度的 LCWP 均能在 0°至 20°的倾斜入射范围内始终实现优异的圆偏振维持能力(即 DoCP 接近于 1)；同时，根据图 4(b)、(d) 以及 (f)，通过施加各自所对应的半波电压，LCWP 也能在同一倾斜入射范围内始终保持优异的圆偏振切换能力(即 DoCP 接近于−1)，且该偏振调制效果同样不受表面锚定能的影响。这是因为此时 RCP 的两个正交偏振分量折射进入 LCWP 时，各自分别激励液晶中的寻常光波和非寻常光波这两个本征模，彼此之间并不存在任何耦合调制现象，即 LCWP 在平面方位入射下可视为纯相位调控元件。

然而，对于非 0°或 180°的锥形入射方位来讲，LCWP 中非寻常光波和寻常光波所对应的两个本征模会被 RCP 入射光波的两个正交分量同时激励。换言之，无论是 LCWP 出射光的垂直偏振分量还是平行偏振分量，均会由入射 RCP 的垂直偏振分量和平行偏振分量共同决定。基于这种耦合作用，LCWP 出射光的两个正交分量之间的振幅比也会受到外加电压的调制。这意味着此时器件不再是纯相位调制元件，反映为锥形入射下 LCWP 的透射偏振态在庞加莱球上的电控演化路径与平面入射情形存在显著区别。此时，对于任意的表面锚定作用强度而言，LCWP 总能在 0°~20°的倾斜入射范围内全方位地实现≤−0.998 7 的最小 DoCP。然而，LCWP 在该宽角域范围内所能达到的圆偏振维持效果却强烈依赖于表面锚定作用强度。具体而言，在 W=1×10^{-3} J/m^2 的强锚定下，LCWP 在 0°~20°的整个锥形入射角域内的最大 DoCP 的下限值低至 0.907 8。若仅将锚定作用强度 W 减弱至 1×10^{-5} J/m^2，该最大 DoCP 的下限将有效提高至 0.982 3。这一结果表明，表面锚定能对宽角域 LCWP 的偏振调控性能具有不容忽视的影响。为进一步阐释产生这种差异的原因，将式 (7) 改写为：

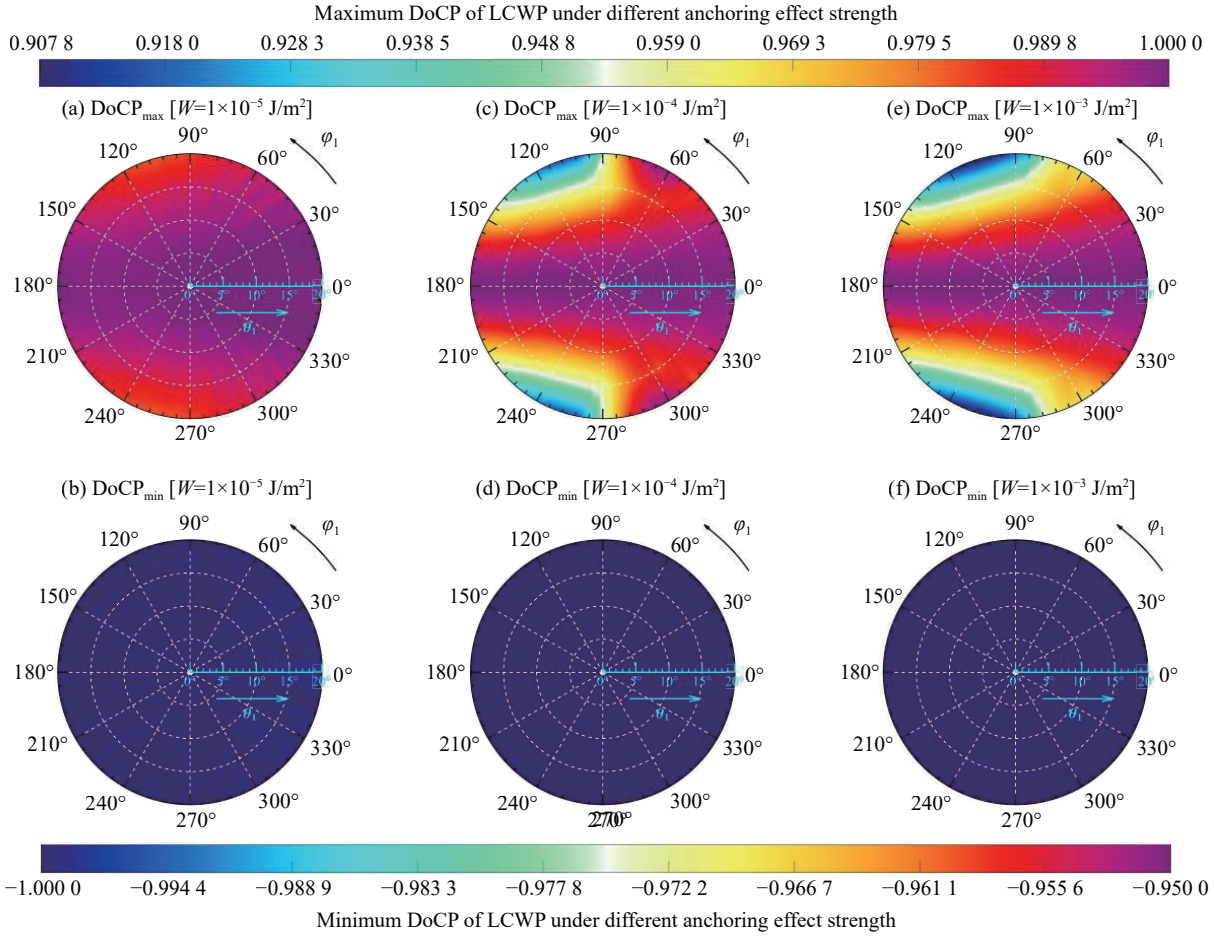


图 4 基于不同的锚定作用强度，LCWP 在锥形入射下所能实现的最大和最小 DoCP 分布。(a)-(b)W=1×10^{-5} J/m^2; (c)-(d)W=1×10^{-4} J/m^2; (e)-(f) W=1×10^{-3} J/m^2。

Fig. 4 Maximum and minimum DoCP distributions achievable by LCWP under conical incidence for different anchoring strengths. (a)-(b) W=1×10^{-5} J/m^2; (c)-(d) W=1×10^{-4} J/m^2; (e)-(f) W=1×10^{-3} J/m^2

$$\mathrm{DoCP} = f_\mathrm{A} \cdot f_\mathrm{P} \quad , \tag{10}$$

式中，f_A 和 f_P 分别代表 LCWP 透射光的振幅系数和相位系数，其表达式为：

$$\begin{cases} f_\mathrm{A} = \sin 2\gamma, \gamma = \arctan\left(|E_s|/|E_\mathrm{p}|\right) \\ f_\mathrm{P} = \sin\left[\varphi(E_\mathrm{s}) - \varphi\left(E_\mathrm{p}\right)\right] \end{cases} . \tag{11}$$

以图 4 中极角为 20°、方位角为 90°的锥形入射为例，基于不同的表面锚定作用强度，计算 LCWP 的振幅系数、相位系数以及 DoCP 的电控特性如图 5 所示。

从图 5(a) 可以看到，对于任意的锚定作用强度而言，只要 RCP 锥形入射至 LCWP，其出射光的两个正交分量之间的振幅比必定会受到外加电压的调制。最为关键的是，LCWP 在锥形入射下所表现出的这种固有特性，使得在相位系数为 1 的外加电压下，振幅系数并不为 1，如图 5(a) 和图 5(b) 所示。由于 DoCP 由振幅系数和相位系数共同决定，则在 LCWP 的这种振幅和相位耦合调制作用下，其最大 DoCP 通常产生于相位系数和振幅系数均不为 1 的全波电压下，对应二者折衷后的效果。具体而言，当表面锚定作用强度 W=1×10^{-3} J/m^2 时，LCWP 所能实现的最大 DoCP 以及施加的全波电压分别为 0.919 6 和 2.75 V，此时所对应的相位系数和振幅系数分别为 0.992 3 以及 0.926 8。然而，如前所述，表面锚定能的减弱会令液晶分子更易发生场致重新取向，并在盒边界上偏离更大角度，进而减小同一电压下的有效双折射率，最终引起相位系数的电控特性曲线左移，如图 5(b) 所示。因此，当表面锚定作用强度 W 减弱至 1×10^{-4} J/m^2 时，LCWP 的全波电压减小到 2.67 V，所对应的相位系数和振幅系数分别调整为 0.990 2 和 0.937 1，最大 DoCP 提高至 0.927 9。若继续降低锚定作用强度 W 至 1×10^{-5} J/m^2 时，LCWP 的全波电压可减小到 1.82 V，对应的相位

系数和振幅系数分别为 0.9954 和 0.9884, 最大 DoCP 提高至 0.9838。这些结果表明, 通过减弱表面锚定能, 可以在几乎不牺牲相位系数的前提下左移 LCWP 的工作电压, 从而获得更接近于 1 的振幅系数, 最终改善其圆偏振态维持性能。这正是在极角为 20°且方位角为 90°的锥形入射下, 可通过调整表面锚定能来有效提高 LCWP 最大 DoCP 的根本原因。关于图 4 中其余锥形入射角域的分析与之类似, 不再赘述。

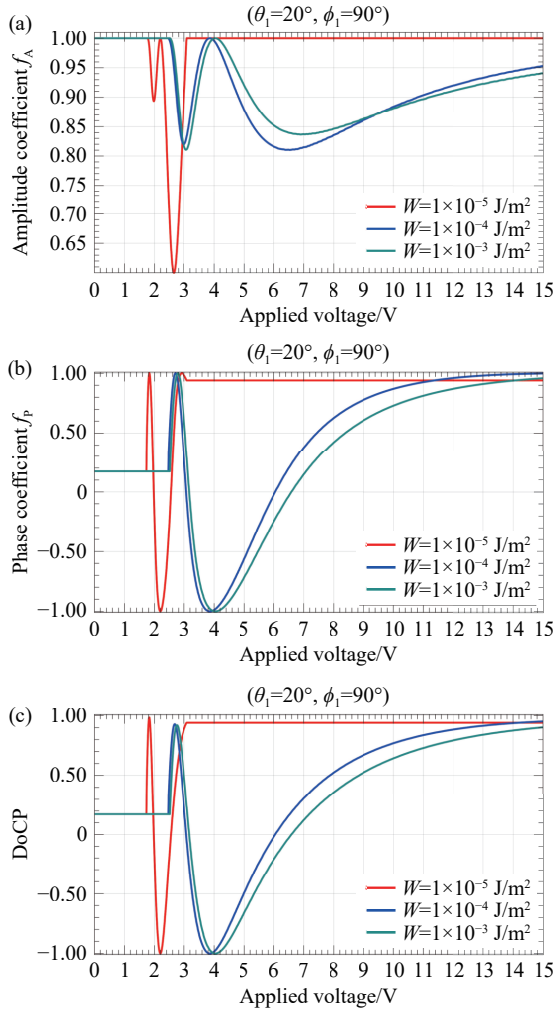


图 5　基于不同的锚定作用强度, 电控 LCWP 在锥形入射下的偏振调制特性。(a) 振幅系数; (b) 相位系数; (c) DoCP

Fig. 5　Polarization modulation characteristics of electrically controlled LCWP under conical incidence for different anchoring strengths. (a) Amplitude coefficient; (b) Phase coefficient; (c) DoCP

此外, 根据图 5(a) 和图 5(b), 尽管 LCWP 在锥形入射下存在振幅和相位均随外加电压变化的耦合调制特性, 但其相位系数为−1 的工作电压始终与振幅系数为 1 的外加电压同步。这一特性使得 LCWP 能在宽角域范围内全方位地实现接近于−1 的最小 DoCP, 并且不受表面锚定能的影响(见图 4)。

4　实验与讨论

为验证 LCWP 在大锥形入射下的最大 DoCP 严重依赖于入射光的方位角以及表面锚定能, 而最小 DoCP 几乎与方位无关的这一固有特性, 本文制备了电控 LCWP 器件(通光口径为 56 mm×60 mm), 液晶盒厚度 h 为 5.4 μm, 其在正交偏振片下的实物如图 6(a) 所示。图 6(b) 展示了电控 LCWP 在锥形入射下的偏振调制性能测量装置。

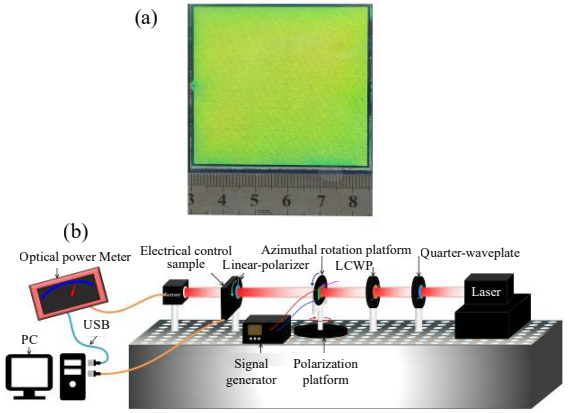


图 6　(a) LCWP 实物; (b)电控 LCWP 在锥形入射下的偏振调制能力测量装置

Fig. 6　(a) Photograph of the LCWP; (b) Measurement device for the polarization modulation capability of the electrically controlled LCWP under conical incidence

首先, 激光器(MIL-III-660, CNI, China)的出射光波依次通过起偏器和四分之一波片, 转换为圆偏振光。内嵌有待测 LCWP 的竖直旋转台和水平旋转台分别为入射光波提供方位角和极角。随后, 用导线将 LCWP 的 ITO 电极连接至产生可调交流电压(频率为 1 kHz)的信号发生器输出接口, 从而实现器件的电驱动重新取向。待测可调 LCWP 的后端置有固定在电控旋转平台上的检偏器。当可调 LCWP 的透射光束通过检偏器时, 利用 PC 端操作电控旋转平台使检偏器的透光轴在 0°~360°内旋转(分辨率优于 1°)。同时, 通过检偏器的透射光强被光电探测器(S120C, Thorlabs)接收, 并由光功率计(PM400D, Thorlabs)记录。这

样，可调 LCWP 透射光波的偏振椭圆长轴和短轴所对应的光强信息均被 PC 端记录，用以计算其 DoCP。通过调整信号发生器的输出电压，并重复上述操作步骤，即可获得待测可调 LCWP 样品在当前锥形入射角度下的最佳偏振调制能力，测量结果如图 7 所示。

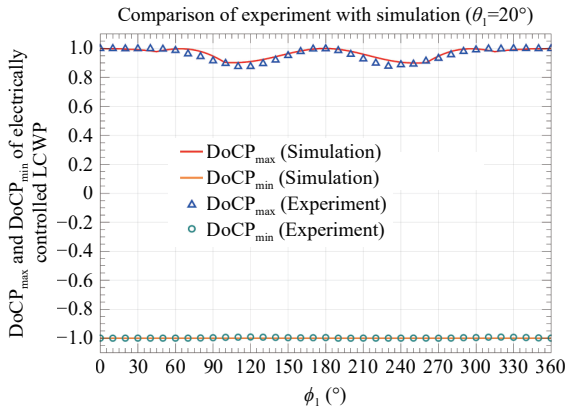


图 7 LCWP 在锥形入射下的 DoCP 实测值与仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of measurement and simulation for DoCP of the LCWP under conical incidence

从图 7 可见，锥形入射下的实测结果与仿真预估的 DoCP 变化趋势具有良好一致性。应当补充说明的是，这里仿真所采用的极角锚定作用强度 W 为 2×10^{-4} J/m^2。根据文献 [31] 中所报道的测量结果，这里所制备的电控 LCWP 的极角表面锚定作用强度也位于~10^{-4} J/m^2 量级。这些结果充分证实，对于平行排列的 LCWP 而言，其在任意锥形入射下的最大 DoCP 严重依赖于入射光波的方位角以及表面锚定能，而最小 DoCP 几乎与方位无关。特别地，在 0°或 180°这样的平面入射方位下，即使入射极角达 20°，LCWP 也能实现接近于 1 的最大 DoCP；但在锥形入射方位下，其圆偏振维持能力将有所劣化。此外，实验数据与仿真计算结果之间所存在的微小偏差主要来源于该器件中的增透膜所致。当然，若能将该 LCWP 的表面锚定能减弱一个量级，其圆偏振调制性能将得到明显的改善。针对这一点，实验上已经证实可通过减小光致取向层的厚度[32] 或者缩短曝光时长[33] 来降低液晶盒的表面锚定能。这意味着光控取向技术可实现表面锚定作用强度的精确控制。此外，光控取向技术利用紫外光照辐射，从而其取向均匀性通常远优于摩擦取向技术[34]。

5 结 论

这项工作针对电控 LCWP 在锥形入射下的偏振调控性能，系统研究了表面锚定能对其指向矢偏转角、有效双折射率以及 DoCP 等偏振调制指标的影响。结果表明，表面锚定能会显著影响 LCWP 的场致重新取向过程。锚定作用强度越弱，边界处的液晶指向矢越易偏离基板，致使同一外加电压下的平均有效双折射率也越低。进一步地，当圆偏振光以 0°或 180°这样的平面方位入射时，LCWP 表现为纯相位调控元件，在宽角度范围内具有优异的圆偏振维持和切换性能。然而，当圆偏振光以非 0°和 180°的锥形方位入射时，LCWP 中两个本征模会被入射圆偏振光的两个正交分量同时激励，产生振幅和相位均依赖外加电压的耦合调制。此时最大 DoCP 强烈依赖于表面锚定能，其物理机制在于，减弱表面锚定能可使相位系数的电控曲线左移，从而在几乎不牺牲相位系数的前提下获得更接近于 1 的振幅系数，最终提高最大 DoCP。同时，尽管 LCWP 在锥形入射下存在振幅和相位耦合调制，但其相位系数为−1 的工作电压始终与振幅系数为 1 的工作电压同步，使 LCWP 能在宽角域范围内全方位实现接近于 −1 的最小 DoCP，且不受表面锚定能影响。LCWP 的最大 DoCP 依赖于方位角，而最小 DoCP 几乎与方位无关的这种固有特性也通过实验证实。综上所述，表面锚定能对电控 LCWP 在锥形入射下的圆偏振维持性能具有不容忽视的影响。实际器件制备中，可通过采用弱锚定取向层或双边对称弱锚定预处理，在确保液晶取向质量和相位调制能力的同时，有效提升宽角域下的偏振调控性能。

参考文献：

[1] LI Y N Q, LUO ZH Y, WU S T. High-precision beam angle expander based on polymeric liquid crystal polarization lenses for LiDAR applications[J]. *Crystals*, 2022, 12(3): 349.

[2] ZHANG SH Y, CHEN W, YU Y, *et al*.. Twisting structures in liquid crystal polarization gratings and lenses[J].

Crystals, 2021, 11(3): 243.

[3] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, *et al*.. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review[J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 361.

[4] WINKER B, MAHAJAN M, HUNWARDSEN M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, IEEE, 2004: 1709.

[5] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al*.. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.

[6] HUANG Y G, LU L, DIORIO N, *et al*.. 60 - 3: *Invited paper*: Liquid crystal optics for AR/VR/MR near eye displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2023, 54(1): 857-860.

[7] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, *et al*.. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: design optimization and demonstration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 2068-2077.

[8] HE Z Q, GOU F W, CHEN R, *et al*.. Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances, and future developments[J]. *Crystals*, 2019, 9(6): 292.

[9] MCMANAMON P F, BOS P J, ESCUTI M J, *et al*.. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.

[10] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications[J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.

[11] 袁方, 谭庆贵, 王光耀, 等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1411-1419.
YUAN F, TAN Q G, WANG G Y, *et al*.. Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419. (in Chinese).

[12] SEARCY P, MATSUMORI B A. MOCA technology and product update with analytical results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 11993: 1199303.

[13] CHEN W, YU Y, MU Q Q, *et al*.. Super-broadband geometric phase devices based on circular polarization converter with mirror symmetry[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(10): 101103.

[14] PICCIRILLO B, PICARDI M F, MARRUCCI L, *et al*.. Flat polarization-controlled cylindrical lens based on the Pancharatnam-Berry geometric phase[J]. *European Journal of Physics*, 2017, 38(3): 034007.

[15] FENG X Y. Liquid crystal polarization volume hologram for augmented reality applications[D]. Kent: Kent State University, 2021.

[16] ZHANG X Y, WANG J R, HAN ZH Y, *et al*.. 83-4: *Invited paper*: development of polarization volume hologram waveguide for augmented reality smart glasses[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, 55(1): 1163-1166.

[17] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, *et al*.. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8052: 80520T.

[18] HSIEH C F, PAN R P, TANG T T, *et al*.. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1112-1114.

[19] ZHA ZH T, GOU ZH Y, PENG Z H, *et al*.. Research on energy compensation characteristics of beam deflection structure based on liquid crystal polarization grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 127(20): 201102.

[20] 杨登科, 吴诗聪. 液晶器件基础[M]. 郭太良, 周雄图, 等, 译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2016.
YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*[M]. GUO T L, ZHOU X T, *et al*. ., trans. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese) **(查阅网上资料, 未找到第三译者信息, 标黄格式不确定, 请确认)**.

[21] CHIGRINOV V G, KWOK H S, HASEBE H, *et al*.. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes (*invited paper*)[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(9): 897-904.

[22] PERIVOLARI E, D'ALESSANDRO G, APOSTOLOPOULOS V, *et al*.. Two-dimensional snapshot measurement of surface variation of anchoring in liquid crystal cells[J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(15): 2086-2096.

[23] ZHA ZH T. Effect of surface anchoring energy on a liquid crystal optical waveguide-based polarization rotator[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2024, 41(5): 830-837.

[24] HAMEED M F O, HUSSAIN F F K, OBAYYA S S A. Ultracompact polarization rotator based on liquid crystal channel on silicon[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2190-2199.

[25] 查正桃, 张谦述. 基于液晶光波导的电控偏振旋转器[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 552-561.

ZHA ZH T, ZHANG Q SH. Electrically controlled polarization rotator based on liquid crystal optical waveguide[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 552-561. (in Chinese).

[26] HOLE M J, ROBINSON P A, CAIRNS I H. Statistics of polarization and stokes parameters: multiple orthonormal wave populations[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(1): 012101.

[27] ZHA ZH T, GOU ZH Y, PENG Z H, *et al*.. Research on energy transfer characteristics for liquid crystal polarization gratings under conical incidence[J]. *Optics Express*, 2025, 33(15): 32479-32489.

[28] MISKIEWICZ M N, BOWEN P T, ESCUTI M J. Efficient 3D FDTD analysis of arbitrary birefringent and dichroic media with obliquely incident sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8255: 82550W.

[29] WÖHLER H, HAAS G, FRITSCH M, *et al*.. Faster 4×4 matrix method for uniaxial inhomogeneous media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, 5(9): 1554-1557.

[30] GNAWALI R, BANERJEE P. Berreman approach to electromagnetic wave and beam propagation in anisotropic metamaterials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9918: 99181Y.

[31] TACHIBANA K, GODA K, KANEKO Y, *et al*.. Evaluation of polar anchoring energy based on symmetric oblique incident transmission ellipsometry method: the voltage diminution by alignment films[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1S2): 01BA01.

[32] CHIGRINOV V G, KWOK H S, HASEBE H, *et al*. . Liquid-crystal photoaligning by azo dyes (*invited paper*)[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(9): 897-904. **(查阅网上资料, 本条文献与第 21 条文献重复, 请核对)**.

[33] MIKULICH V S, MURAWSKI A A, MURAVSKY A A, *et al*.. Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2016, 83(1): 115-120.

[34] RUSHNOVA I I, KABANOVA O S, MELNIKOVA E A, *et al*.. Integrated-optical nematic liquid crystal switches: designing and operation features[J]. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2018, 21(3): 206-219.

作者简介：



刘璐璐(1989—)，女，黑龙江安达市人，2019 年于吉林大学获材料物理与化学工学博士学位，副教授，主要从事纳米材料制备和改性、光学材料与器件等方面的研究。E-mail: liull@ccu.edu.cn