

文章编号:1007-2780(2026)09-1232-07

基于挠曲电效应的场致双模式液晶切换光栅

李世龙, 程 昊, 任雨婷, 付钰伟, 郝 微, 赵鑫颖, 邢红玉, 叶文江*
(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:传统液晶切换光栅普遍存在偏振敏感、光栅周期难以连续电控调谐、响应迟缓等问题。为解决上述问题,本文采用一种宽温域(0~65 °C)挠曲电液晶混合体系,结合图案化光取向工艺制备了一种可连续调谐光栅周期、衍射角和衍射效率的双模式液晶切换光栅,该光栅包含两种尺寸差异显著的周期性结构,能够在不同距离处分别产生两种截然不同的衍射信号。零电压下呈现基于光取向图案的小衍射角横向一维衍射;施加电压超过 14 V 后,基于挠曲电效应的大衍射角十字条纹形衍射被激发;14~26 V 电压范围内,光栅周期 6.65~1.87 μm 连续可调,全量程周期调谐耗时约 100 s,相较于传统的光响应胆甾相液晶光栅调控速度提升近 12 倍。同时,器件偏振依赖性弱,可同步实现光栅周期、衍射角和衍射效率的连续电控调节。该光栅制备工艺简便,无需复杂图案电极结构,在光谱扫描、自适应光束整形、增强现实显示等动态光学场景具备广阔应用潜力,为可调谐液晶光电器件的设计提供了新的技术路径。

关键词:挠曲电效应;宽温域;周期连续调节;模式切换光栅;图案化光取向

中图分类号:O753.2;O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3724/CJLCD.2026-0141 **CSTR:**32172.14.CJLCD.2026-0141

Field-induced dual-mode switchable liquid crystal grating based on flexoelectric effect

LI Shilong, CHENG Hao, REN Yuting, FU Yuwei, HAO Wei, ZHAO Xinying,
XING Hongyu, YE Wenjiang*

(School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Conventional switchable liquid crystal(LC) gratings generally suffer from polarization sensitivity, poor continuous electrical tunability of the grating period, and slow response, which cannot meet the requirements for multi-dimensional and high precision light manipulation in complex optical systems. To address these drawbacks, this work adopts a flexoelectric LC mixture with a broad operating temperature range (0~65 °C). Combined with patterned photoalignment, we fabricate a dual-mode switchable LC grating capable of continuous tuning of grating period, diffraction angle, and diffraction efficiency. The grating contains two periodic structures with markedly different feature sizes and can generate two distinct diffraction signals at different propagation distances. At zero applied voltage, transverse one-dimensional diffraction with small diffraction angles originating from the photo aligned pattern is observed. When the applied voltage exceeds 14 V, cross-stripe diffraction of large angles originating from the flexoelectric effect is activated. Within the voltage range of 14 V to 26 V, the grating period can be continuously tuned

收稿日期:2026-07-27;修订日期:2026-08-21.

基金项目:河北省自然科学基金(No.A2023202014)

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. A2023202014)

*通信联系人, E-mail:wenjiang_ye@hebut.edu.cn

from 6.65 μm to 1.87 μm . The tuning for full range of period takes approximately 100 s, and the tuning speed is nearly 12 times higher than that of conventional light-driven cholesteric LC gratings. Meanwhile, the device exhibits weak polarization dependence and supports simultaneous continuous electrical modulation of grating period, diffraction angle, and diffraction efficiency. It features a simple fabrication procedure without elaborate patterned electrode structures. It holds promising application prospects in dynamic optical scenarios such as spectral scanning, adaptive beam shaping, and augmented reality displays, and provides a new technical route for the design of tunable LC optoelectronic devices.

Key words: flexoelectric effect; broad temperature range; continuous period tuning; mode-switching grating; patterned photoalignment

1 引言

液晶作为一种优异的功能性材料,凭借外场可调的特性,成为光电领域的研究热点。液晶光栅是通过预取向、电场、光照等外部刺激调控液晶分子形成周期性排布,进而产生周期性折射率的一种光衍射器件。液晶光栅作为传统光栅的一种升级方案,凭借液晶分子取向可调性与电光效应的协同作用实现了更高的灵活性,这种优异的性能使其在3D显示^[1-3]、光通信^[4-5]、光谱扫描^[6]等领域具有广阔的应用潜力。在诸多液晶光栅中,图案化光取向光栅可按需自定义光栅微结构且能有效避免边缘场效应带来的不良衍射而备受关注^[7-9]。然而,目前已经报道的图案化光取向光栅在调控灵活性方面还存在局限性,大多仅能实现单一模式的输出,难以满足复杂光学系统对多维度、高精度光操控的多样化需求。

目前已报道的多模式可切换光栅主要是基于胆甾相液晶、蓝相液晶、聚合物分散液晶等体系制作。胆甾相液晶切换光栅利用胆甾相液晶螺旋畴的选择性反射特性^[10-11],采用光动力手性分子结合光掩模调控螺距实现不同光栅模式的切换^[12],但此类光栅通过重复曝光实现切换所需时间较长且偏振依赖性较强;蓝相液晶结合共面转换电极(In-Plane Switching, IPS)结构同样可实现快速响应的切换光栅^[13],但器件驱动电压较高、电极制备工艺复杂,带来的高能耗与高制作成本等问题,限制了其规模化应用;聚合物分散液晶结合IPS电极也可构建切换光栅^[14-15],此类光栅虽阈值电压较低,但其光栅周期固定。目前存在的模式切换光栅大多仅能实现切换的功能,无法进行光栅周期与衍射角的连续电控调谐,大

幅限制了此类器件在实际中的应用。

针对上述不足,本文利用液晶的挠曲电效应结合图案化光取向工艺,制备了一种场致双模式液晶切换光栅。该光栅可在不同距离处呈现两种截然不同的衍射模式,且可连续调节光栅周期和衍射角。实验结果表明,该切换光栅具有较快的全量程调谐速度且对入射光偏振依赖性较弱,为电控光开关、增强现实(Augmented Reality, AR)显示等动态光学领域^[16-17]的发展提供了新的研究思路。

2 光栅的制备流程及原理

2.1 挠曲电液晶混合体系的制备及原理

本文采取了一种具备宽温域稳定特性的挠曲电向列相液晶混合体系,该体系由二聚体液晶CB7CB($\Delta\epsilon=+2$)、负性棒状液晶SLC-128($\Delta\epsilon=-3.3$)与向列相液晶E7($\Delta\epsilon=+11.5$)混合而成,可在0~65 $^{\circ}\text{C}$ 稳定形成挠曲电光栅结构。

仅将SLC-128与CB7CB二元复配时,混合体系在低温环境下易出现结晶现象。E7与CB7CB分子均含有氰基联苯基团,同时E7和负性棒状液晶SLC-128同为棒状分子结构,根据相似相溶原理,向体系中掺入少量E7能够显著提升各组分间互溶性,有效抑制低温结晶行为,使混合液晶体系可在宽温区间内维持稳定的向列相。挠曲电液晶光栅的形成由挠曲电效应与介电效应的竞争耦合关系共同决定^[18-20]。挠曲电效应使液晶指向矢周期性分布,是光栅结构形成的有效驱动力;而介电效应倾向于驱使液晶指向矢沿同一方向排列,会抑制光栅畴的形成。两者与电场的依赖关系可由公式(1)和公式(2)表示:

$$f_{\text{flexoelectric}} = -E \cdot P_{\text{flexoelectric}} = -[e_s n(\nabla \cdot n) + e_b n \times (\nabla \times n)] E, \quad (1)$$

$$f_{\text{dielectric}} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon (E \cdot n)^2. \quad (2)$$

公式(1)描述体系的挠曲电自由能密度, e_s 、 e_b 分别代表展曲、弯曲挠曲电系数, n 为液晶指向矢。该公式表征挠曲极化与外电场之间的能量耦合关系: 当液晶分子发生展曲、弯曲形变时, 体系会产生挠曲电极化, 进而形成挠曲电力矩, 驱动液晶产生周期性条纹畴。本研究选用二聚体液晶 CB7CB (有效挠曲电系数 $|e_s - e_b| \approx 31 \text{ pC/m}$) 正是利用其较大挠曲电系数^[21], 为电控连续可调光栅提供形变驱动力。公式(2)描述向列相液晶的介电自由能密度, $\Delta \epsilon$ 为液晶介电各向异性, ϵ_0 为真空介电常数, $(E \cdot n)^2$ 表征液晶指向矢与外电场的耦合作用。介电自由能会产生介电转矩, 倾向于使液晶分子沿电场方向排布, 会破坏周期性挠曲电畴结构。为此本文引入负性棒状液晶 SLC-128, 将混合体系的介电各向异性调控至近零区间, 能大幅削弱介电自由能带来的竞争转矩。

综合式(1)与式(2), 器件内部液晶的最终形变结构由挠曲电自由能与介电自由能的相对大小共同决定。若体系 $\Delta \epsilon$ 绝对值较大, 介电转矩占优, 外电场只会使液晶整体偏转, 无法形成周期性光栅; 而通过组分配比调控使体系实现近零介电各向异性后, 挠曲电自由能占据主导, 在外加直流电压下可稳定生成连续可调的挠曲电液晶光栅。挠曲电光栅周期随电压连续变化的物理过程可参考挠曲电光栅非线性数值模拟结果进行解释^[18]: 电压超过阈值后, 挠曲电力矩驱动液晶发生周期性展曲-弯曲形变, 形成挠曲电液晶光栅; 随着直流电压的升高, 挠曲极化与外电场耦合作用增强, 液晶内部完整展曲-弯曲形变单元的空间尺度被压缩, 宏观上光栅周期随电压

升高不断减小。

经反复实验优化, 最终确定挠曲电液晶混合体系的最优效果质量配比为: 77% SLC-128、15% CB7CB、8% E7。该体系介电各向异性接近中性, 同时具备优异的挠曲电响应与宽温域稳定性。

2.2 图案化光取向液晶盒制备

为实现液晶分子的图案化光取向, 使用磺酸偶氮染料(SD1)作为光取向材料并将其以 0.3% 的浓度(质量分数)溶解于二甲基甲酰胺(DMF)中。在紫外线偏振光照射下, SD1 分子长轴趋向于与入射光偏振方向垂直排列, 从而为液晶分子提供精准、稳定的取向控制, 同时该取向方式具备可重复擦写、均匀性好、无机械损伤等优点^[22-23]。利用 SD1 分子的可重写特性结合光栅光掩模^[24-26]对液晶分子进行图案化光取向, 液晶盒的上下基板需要同时被紫外线偏振光照射以形成均匀的取向, 具体制备过程如图 1 所示。在室温下将带有电极材料的玻璃片上下基板内侧都旋涂 SD1 取向层并胶装成盒(液晶盒间隙为 $4 \mu\text{m}$), 然后将空盒在紫外线偏振光($\lambda = 405 \text{ nm}$, 功率密度为 4 mW/cm^2)下照射 20 min 进行第一次取向, 这样既避免了长时间紫外辐照造成 SD1 染料光降解, 同时还保留了 SD1 分子重取向能力。随后对液晶盒覆盖一维条形图案的光栅光掩模(光掩模的遮光区域与透光区域宽度之比为 $50 \mu\text{m} : 50 \mu\text{m}$)并将紫外线偏振光偏振方向旋转 90° 对 SD1 分子进行第二次取向, 照射时长为 60 min。二次曝光时 SD1 分子需要克服初次曝光形成的固有取向力矩实现偏转, 若曝光时长不足, 分子无法完成 90° 旋转; 曝光过久则会破坏初次取向结构, 因此折中选用 60 min 曝光时长, 使掩模透光区与遮光区形成近正交取向条纹。最后灌入预配制的挠曲电液晶混合体系, 完成器件制备。

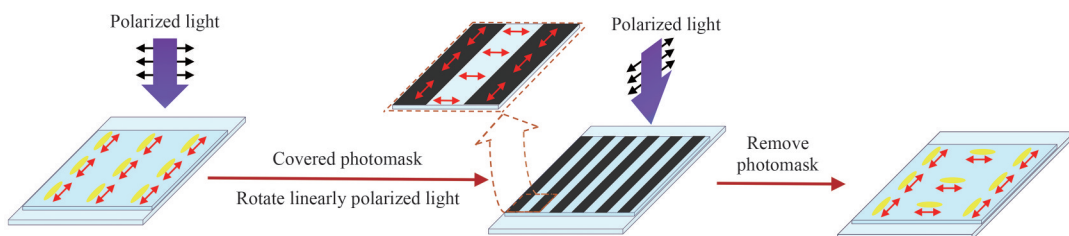


图 1 场致双模式液晶切换光栅器件制备流程

Fig. 1 Fabrication process of field-induced dual-mode switchable liquid crystal grating device

3 结果与讨论

为表征器件的电光调谐特性,开展电光性能测试,不同直流电压下光栅的偏光显微形貌如图2所示。零电压下,相邻光栅条纹区域液晶分子呈近垂直取向,形成仅由图案化光取向决定的大周期一维光栅;缓慢施加直流电压,当电压超过14 V阈值后,挠曲电效应在器件内部诱导产生两组方向近正交的小周期一维条纹畴,两组小周期条纹叠加形成新的光栅结构;随驱动电压升高,光栅周期 W 连续减小,实现光栅周期的连续电控调谐。

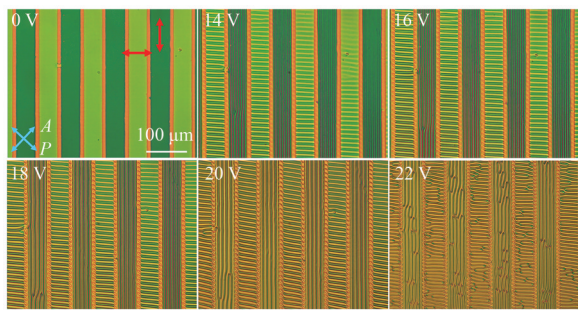


图2 直流电压0 V、14 V、16 V、18 V、20 V、22 V下光栅的偏光显微镜形貌。图中红色箭头代表该区域内液晶分子初始取向方向,蓝色箭头分别为偏光显微镜起偏器、检偏器透光轴方向。

Fig. 2 POM textures of the grating under DC voltages of 0 V, 14 V, 16 V, 18 V, 20 V and 22 V. The red arrows denote the initial alignment direction of liquid crystal molecules in corresponding regions, and the blue arrows represent the transmission axes of the polarizer and analyzer of the polarized optical microscope, respectively.

由光栅方程:

$$W \sin \theta_m = m\lambda, \quad (3)$$

可知,当入射光波长 λ 固定时,随着光栅周期 W 的减小, m 级次的衍射角 $\sin \theta_m$ 会随之增大。为进一步表征光栅光学性能,搭建如图3(a)所示的双屏衍射测试光路。实验中采用 $\lambda=532$ nm的绿色激光垂直入射,光束依次穿过 $1/4$ 波片与偏振片后照射光栅样品(入射线偏振光方向与液晶分子的第二次取向方向平行),并在光栅样品后方10 cm与100 cm处放置两个接收屏分别用来接收衍射信号。两块接收屏接收到的图样均属于夫琅禾费

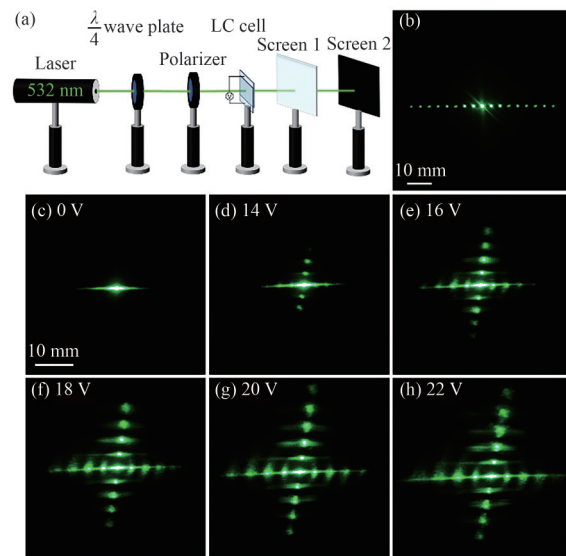


图3 (a)双屏衍射测试光路示意图;(b)零电压下远距离接收屏采集的大周期横向一维衍射图样;(c~h) 0 V~22 V直流电压下近距离接收屏采集的十字条纹形挠曲电光栅衍射图样。

Fig. 3 (a) Schematic of dual-screen diffraction test optical path; (b) Large period transverse one-dimensional diffraction pattern captured by the far field receiving screen at zero voltage; (c~h) Electrically tunable cross-stripe diffraction patterns of the flexoelectric grating recorded by the near field receiving screen under DC voltages from 0 V to 22 V.

衍射,不同距离处的接收屏仅用来分离两种不同特征尺寸的光栅产生的衍射信号。两种衍射模式分别源自器件内部两种不同尺寸的光栅结构。在零场状态下,器件内部仅存在由图案化光取向所形成的大周期($50 \mu\text{m}:50 \mu\text{m}$)的光栅,光通过时会产生由取向所导致的折射率差异,从而在远场(100 cm)处的接收屏上形成如图3(b)所示的小衍射角的横向一维衍射,该衍射模式在施加外电场后仍能稳定存在;随后对器件施加直流电压至14 V,液晶内部由于挠曲电效应的作用在近场处(10 cm)呈现大衍射角的十字条纹形的挠曲电液晶光栅衍射。由光栅方程(3)可知,小周期的光栅条纹对应较大的衍射角;如图3(c~h)所示,随着电压的持续增加,更多的衍射级次显现,除零级外各衍射级次的衍射角也随着电压的增加而增大。

为表征本文制备的双模式切换光栅动态调谐性能,我们在偏光显微镜下测试光栅周期全量程电压调谐时长,测试结果如图4所示。实验结果

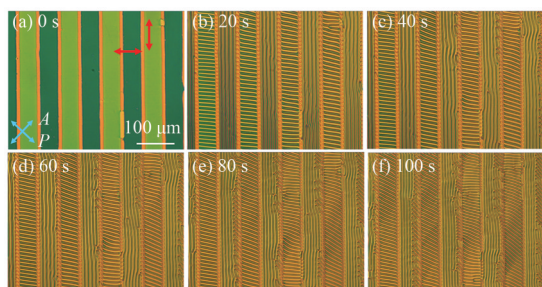


图4 场致双模式液晶切换光栅在全量程电压调控下的调谐时间测试。(a) 0 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 60 s; (e) 80 s; (f) 100 s。图中红色箭头代表该区域内液晶分子初始取向方向,蓝色箭头分别为偏光显微镜起偏器、检偏器透光轴方向。

Fig. 4 Tuning time test of field-induced dual-mode switchable liquid crystal grating under full range voltage tuning. (a) 0 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 60 s; (e) 80 s; (f) 100 s. The red arrows denote the initial alignment direction of liquid crystal molecules in corresponding regions, and the blue arrows represent the transmission axes of the polarizer and analyzer of the polarized optical microscope, respectively.

表明,在 14~26 V 连续电压驱动下,该光栅可在 100 s 内完成最大周期至最小周期的完整且稳定的光栅调谐。传统光响应型胆甾相液晶光栅完成全量程调谐通常需要 20 min (1 200 s) 以上^[27],本器件调谐速度提升约 12 倍,大幅缩短调谐耗时。该快速响应特性来源于挠曲电效应对外电场的瞬时响应:液晶指向矢在低电压下即可快速旋转重构,无需依靠胆甾相液晶缓慢变化的螺距实现调谐,可充分满足光谱扫描、实时光场调控等动态光学应用场景。

最后,测试了光栅的偏振依赖特性与电压调谐性能。图 5(a) 为不同入射偏振角下零级衍射效率测试结果,定义衍射效率 $\eta_0 = 1 - I_0/I_m$, 式中 I_0 为 0 级衍射光强, I_m 为入射总光强。如图 5(a) 所示,施加约 12 V 直流电压后零级光强开始逐渐变化且随着电压的增加零级光强逐渐减弱,对应衍射效率逐渐升高。当电压增加至 20 V 左右时,零级光强最小,衍射效率达到顶峰。此外,我们还分别对比了入射光偏振方向与第二次取向方向夹角

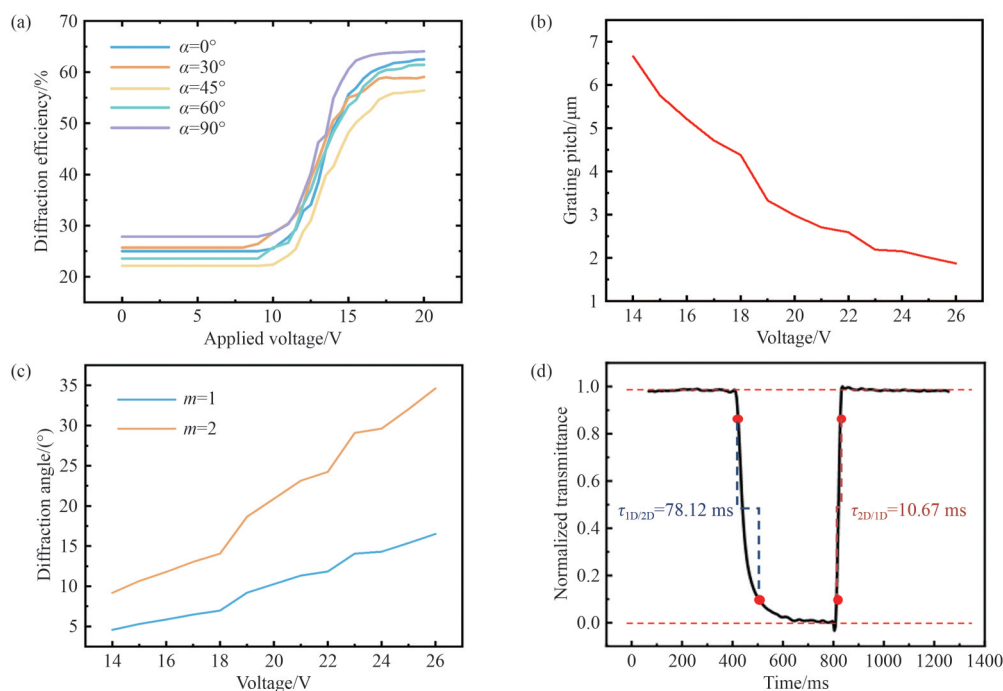


图5 场致双模式液晶切换光栅性能测试。(a) 不同入射偏振角条件下,零级衍射效率随外加电压的变化曲线;(b) 光栅周期随外加电压的变化规律曲线;(c) 一级和二级衍射角随外加电压的变化曲线;(d) 场致双模式切换光栅的开关响应时间测试曲线。

Fig. 5 Performance measurement of field-induced dual-mode switchable liquid crystal grating. (a) Zero order diffraction efficiency versus applied voltage under different incident polarization angles; (b) Variation of grating period with applied voltage; (c) First order and second order diffraction angles versus applied voltage; (d) Switching response time curve of the field-induced dual-mode switchable grating.

$\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时光栅的衍射效率。实验结果表明,该光栅衍射效率随入射光偏振角度变化幅度较小,偏振依赖性弱、衍射强度均匀。这是因为施加阈值以上电压后,光栅内部受挠曲电效应作用形成周期性展曲、弯曲形变结构,此时液晶指向矢不再局限于单一平面内转动,而是在三维空间连续旋转^[18],使该光栅衍射效率对入射线偏振光敏感度低,衍射光强度分布均匀。图5(b)、(c)为光栅周期、衍射角随外加电压的变化曲线。由实验结果可知,电压升高时光栅周期减小,衍射角同步增大,在14~26 V电压范围内光栅周期可由6.65 μm 连续调节至1.87 μm ,一级衍射斑衍射角由4.58°连续调节至16.51°,二级衍射斑衍射角由9.19°连续调节至34.63°。最后,对光栅进行了脉冲响应分析,如图5(d)结果显示,光栅的开启时间为78.12 ms,关闭时间为10.67 ms。需要注意,该毫秒级开关响应时间区别于电压由14 V

连续升至26 V时约100 s的全量程调谐总时长,二者对应不同的物理过程。

4 结 论

本文针对现有液晶切换光栅偏振敏感、调谐速度慢、光栅周期固定等缺陷,设计了一种基于挠曲电效应的场致双模式液晶切换光栅,该器件内部具备多尺度周期性结构,不同外场条件下可以呈现两种截然不同的衍射图样。挠曲电向列相液晶光栅周期可在6.65~1.87 μm 区间连续调谐,光栅周期全量程调谐时长仅约100 s,调谐速度显著优于传统光响应型液晶光栅。器件偏振依赖性弱、周期调节速度较快且制备工艺简单,为高性能可调液晶光学器件的设计与集成提供了新思路,在光谱扫描、多维光场调控、三维显示、动态光学系统等领域具备良好的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] LUO Y C, ZHAO K Y, DING X, *et al.* Fast-switching 2D/3D display based on a liquid crystal planar lenticular lens array [J]. *Optics Express*, 2026, 34(3): 5292-5306.
- [2] TIAN L L, LI Y, YIN Z, *et al.* Fast response electrically controlled liquid crystal lens array for high resolution 2D/3D switchable display [J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37946-37956.
- [3] WANG D, LI Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [4] XUE X Y, LIEVENS E, BERTELOOT B, *et al.* Vertical coupling between waveguides and optical fibers utilizing polarization gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(5): 309-312.
- [5] ZHANG G X, SCHREIER A, WANG X Z, *et al.* Free-space optical communication link with liquid crystal beam-steering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(22): 1199-1202.
- [6] JAU H C, LI Y N, LI C C, *et al.* Light-driven wide-range nonmechanical beam steering and spectrum scanning based on a self-organized liquid crystal grating enabled by a chiral molecular switch [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(2): 166-170.
- [7] LIN X W, HU W, HU X K, *et al.* Fast response dual-frequency liquid crystal switch with photo-patterned alignments [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3627-3629.
- [8] SUN J, SRIVASTAVA A K, WANG L, *et al.* Optically tunable and rewritable diffraction grating with photoaligned liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2342-2344.
- [9] HU W, SRIVASTAVA A, XU F, *et al.* Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.
- [10] LIU B H, YUAN C L, HU H L, *et al.* Dynamically actuated soft heliconical architecture via frequency of electric fields [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2712.
- [11] YUAN C L, CHEN J J, LIU B H, *et al.* Hyper-stable field-stimulated soft cholesteric heliconical architectures [J]. *Matter*, 2023, 6(10): 3555-3573.
- [12] YUAN C L, HUANG W B, ZHENG Z G, *et al.* Stimulated transformation of soft helix among helicoidal, heliconical, and their inverse helices [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax9501.

- [13] ZHU J L, LU J G, QIANG J, *et al.* 1D/2D switchable grating based on field-induced polymer stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(3): 033101.
- [14] CHENG H, LIN R L, AN R, *et al.* Field-induced 1D/2D switchable grating based on a polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(13): 4218-4221.
- [15] 雷志锴, 丁巍, 程昊, 等. 基于湿气发电机的自供电聚合物分散液晶光栅[J]. 液晶与显示, 2026, 41(6): 793-799.
LEI Z K, DING W, CHENG H, *et al.* Self-powered polymer dispersed liquid crystal grating based on moisture generator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2026, 41(6): 793-799. (in Chinese)
- [16] WU N F, SUN Y X, HU J T, *et al.* Intelligent nanophotonics: when machine learning sheds light [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 5.
- [17] DONG Y B, BAI Y C, ZHANG Q M, *et al.* High-throughput optical neuromorphic graphic processing at millions of images per second [J]. *eLight*, 2025, 5(1): 29.
- [18] HAN Q H, ELSTON S J, KAMAL W, *et al.* A nonlinear model of flexoelectric liquid crystal diffraction gratings [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180: 111502.
- [19] SHIN Y, ZHOU Z Y, HALDER S, *et al.* Reconfigurable liquid crystal diffraction grating based on flexoelectric effect [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 357: 119150.
- [20] CHENG H, LI Y T, WANG J X, *et al.* Tunable broad-temperature-range grating based on the liquid crystal flexoelectric effect and its spectral scanning: forming one-dimensional, two-dimensional, and annular diffraction patterns at different orientations [J]. *Physical Review Applied*, 2025, 24(5): 054020.
- [21] VARANYTSIA A, CHIEN L C. Giant flexoelectro-optic effect with liquid crystal dimer CB7CB [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 41333.
- [22] LIU X, DUAN X, LI B Y, *et al.* Liquid crystal on metasurfaces toward dynamic photonic control [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36(40): e29188.
- [23] HU W, SRIVASTAVA A K, LIN X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.
- [24] 王俊辉, 刘璇, 段霞, 等. 基于图案化宾主液晶的光刻掩膜板制备[J]. 液晶与显示, 2025, 40(6): 846-853.
WANG J H, LIU X, DUAN X, *et al.* Fabrication of photomask based on patterned guest-host liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(6): 846-853. (in Chinese)
- [25] 杜莹, 陈梅蕊, 刘禹彤, 等. 基于掩模光刻的液晶波前校正器设计与制备[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(2): 324-333.
DU Y, CHEN M R, LIU Y T, *et al.* Design and fabrication of liquid crystal wavefront corrector based on mask lithography [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 324-333. (in Chinese)
- [26] CHEN H F, TAO X Y, ZHU B H, *et al.* Reconfigurable nonlinear Pancharatnam-Berry diffractive optics with photopatterned ferroelectric nematics [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 314.
- [27] WU Y H, WU S B, LIU C, *et al.* Light-driven pitch tuning of self-assembled hierarchical gratings [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 326.

作者简介:



李世龙,男,硕士研究生,2024年于河北科技大学理工学院获得学士学位,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:1258393697@qq.com



叶文江,男,博士,教授,2011年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:wenjiang_ye@hebut.edu.cn