

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-08

基于湿气发电机的自供电聚合物分散液晶光栅

雷志锴[#], 丁巍[#], 程昊, 李世龙, 邢红玉, 叶文江^{*}
(河北工业大学理学院, 天津 300401)

摘要:液晶器件光电调控中存在用电安全隐患、便携性差的问题,传统供电器件功耗高且依赖外部电源,难以满足其轻量化、自供电需求,亟需安全便携、低功耗且利用可再生能源的供电器件。本研究旨在解决该痛点,探索新型自供电驱动方式,创新性地将湿气发电机(MEGs)与聚合物分散液晶(PDLC)光栅集成,构建自供电PDLC光栅系统。选用2×2 cm湿气发电机为供能核心,测试其单片输出性能,通过串并联优化电能输出,实现对PDLC光栅的稳定供电,并以商用信号源为对照测试驱动及衍射性能。单片2×2 cm湿气发电机开路电压0.76 V、短路电流0.492 mA,串并联可提升电能输出以满足驱动需求;其驱动稳定性、响应速度与信号源高度等效,且在不同供电电压下,PDLC光栅的衍射效率调控规律与商用信号源驱动几乎一致,衍射效率的波动误差控制在5%以内,验证了其供电可靠性。本研究成功提出并实现了以湿气发电机为核心的液晶器件新型供电方式,不仅为PDLC光栅提供了一种绿色、便携的自供电方案,更为各类液晶器件的自供电驱动研究提供了全新的思路与技术参考,对推动液晶器件在柔性电子、便携式光电器件等领域的应用具有重要意义。

关键词:聚合物分散液晶光栅;湿气发电机;自供电;便携性

中图分类号:O753⁺.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2026-0073 CSTR:32172.14.CJLCD.2026-0073

Self-powered polymer dispersed liquid crystal grating based on moisture generator

LEI Zhikai[#], DING Wei[#], CHENG Hao, LI Shilong, XING Hongyu, YE Wenjiang^{*}

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

Abstract: Liquid crystal optoelectronic devices face issues such as electrical safety hazards and poor portability. Conventional power supply devices feature high power consumption and reliance on external power sources, making it difficult to meet the demand for lightweight and self-powered operation. There is an urgent need for power supply devices that are safe, portable, low-power, and capable of utilizing renewable energy. This study aims to address these pain points by exploring novel self-powered driving strategies. Innovatively, moisture-enabled electric generators (MEGs) are integrated with polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) gratings to construct a self-powered PDLC grating system. A 2×2 cm MEG is employed as the core energy supply component; its output performance of a single unit is tested, and series-parallel connection optimization is conducted to enhance power output for stable power supply to

收稿日期:2026-04-28;修订日期:2026-05-23.

基金项目:河北省自然科学基金(No.A2023202014)的支持。

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

[#]共同第一作者

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

PDLC gratings. Driving and diffraction performance are evaluated using a conventional signal source as a control. A single 2×2 cm MEG yields an open-circuit voltage of 0.76 V and a short-circuit current of 0.492 mA, and series-parallel configurations can boost power output to meet driving requirements. Its driving stability and response speed are highly comparable to those of the signal source. Moreover, under different supply voltages, the regulation law of diffraction efficiency of PDLC gratings driven by MEGs is completely consistent with that driven by signal sources, with the fluctuation error of diffraction efficiency controlled within 5%, verifying the reliability of the power supply. This study successfully proposes and implements a novel power supply scheme for liquid crystal devices centered on MEGs. It not only provides a green and portable self-powered solution for PDLC gratings, but also offers new ideas and technical references for the research on self-powered driving of various liquid crystal devices, which is of great significance for promoting the application of liquid crystal devices in flexible electronics, portable optoelectronic devices, and other fields.

Key words: polymer dispersed liquid crystal; moisture-enabled electric generator; self-powered

1 引言

液晶具有优异的电光调制响应,通过施加电刺激可以改善视角或光学对比度^[1-6]。各种基于液晶的电光系统,包括显示器^[7-9]、光开关^[10-12]、光栅^[13-15]、智能窗口^[16-18]等,由于其功耗低、响应快等特点,得到了广泛应用。然而,电刺激必须由电源设备提供,导致液晶器件的便携性较差与用电安全问题。Wang et al.^[19]利用水分与功能化纳米材料的自发相互作用,设计了湿气发电机^[20](MEG)。湿气发电机可以将水分子状态转变释放的化学势能转化为电能。湿气发电机体积小、功耗低、便携性好,有利于液晶器件的集成化。湿气发电机可通过串并联实现低功耗高电压输出,因此利用湿气发电机不仅能驱动液晶器件,还可以避免以往电源驱动设备的安全隐患。然而,当前MEG与液晶器件结合的研究暂无相关报道。考虑到MEG的发电输出依赖环境湿度,室外极端干燥或高湿工况难以保证稳定供电,而室内环境湿度适中且稳定,可确保MEG持续正常输出,是本技术最适配的应用场景。

液晶光栅凭借低成本、轻量化、低功耗等显著优势,广泛应用于光波导、光谱扫描、三维显示等领域,成为光学研究热点。其中,PDLC光栅因轻质、小巧、制备工艺简单等特性,在波导显示等领域独具魅力,备受研究者关注。基于面内切换(IPS)电极结构的电控光栅可通过精

准调控电场有效控制液晶分子排列,实现对光束的精确操控,在三维显示等领域展现出良好应用前景。

因此,本文聚焦室内稳定湿度环境,创新性地使用湿气发电机为PDLC光栅供电,实现了湿气发电机与液晶光栅的结合,降低了驱动成本,保证了装置的便携性,为之后驱动器件与液晶器件集成化提供参考意义。

2 自供电液晶光栅构成及其工作原理

2.1 自供电液晶光栅构成

自供电液晶光栅装置图如图1(a)所示,主要由MEG、PDLC光栅组成。其中MEG由铝电极、银电极、水凝胶等构成如图1(c)所示;PDLC光栅由ITO玻璃、IPS电极、E7、NOA65等组成。图1(d)为自供电PDLC光栅实物连接图。

图1(b)为MEG发电原理图。由聚乙烯醇(PVA)和植酸(PA)建立的离子水凝胶网络与 Li^+ 共同减弱氢键作用,提升水凝胶的吸湿能力。一旦MEG暴露在空气中,植酸将吸收的水分子解离成 H^+ ,离子在其中输运,从而产生功率输出^[21-25]。

图1(e)为PDLC光栅实时调制系统原理图。使用波长为632.8 nm的红激光,激光依次通过 $\lambda/4$ 玻片和偏振片,之后通过PDLC光栅,其中MEG为PDLC提供电压,接着经过可调光阑进入光电探测器检测零级光强。

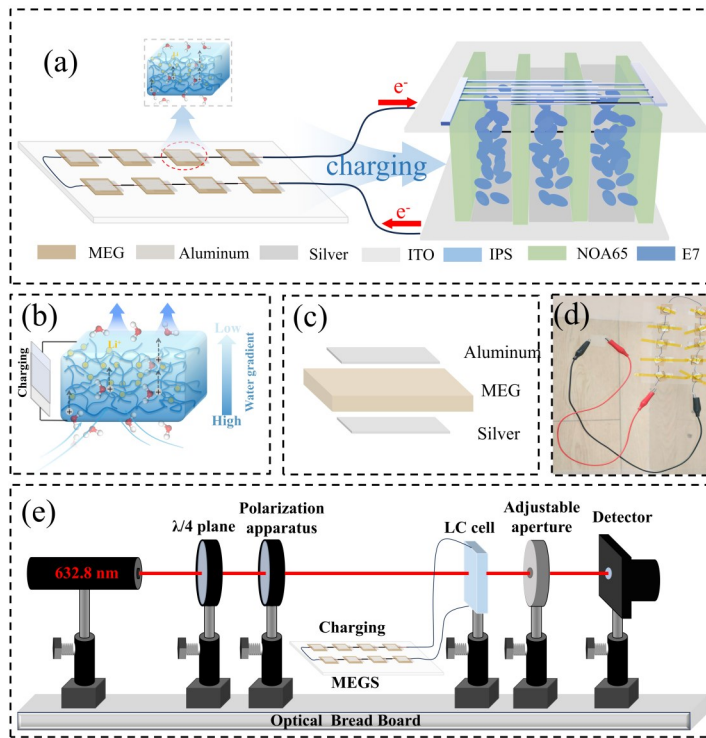


图1 (a) 湿气发电机驱动PDLC光栅示意图。(b) 湿气发电机发电原理图。(c) 湿气发电机结构图。(d) 湿气发电机驱动PDLC光栅测试光路图。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of PDLC grating driven by a moisture generator. (b) Working principle diagram of the moisture generator. (c) Structural diagram of the moisture generator. (d) Optical path diagram for testing the PDLC grating driven by the moisture generator.

2.2 MEG 制备

离子水凝胶层采用简便的一锅法合成。首先将 4.5 g 氯化锂(LiCl)加入 12.5 mL 去离子水(DI)中,搅拌至完全溶解;随后向上述溶液中加入 3 g 聚乙烯醇(PVA)和 7.5 mL 植酸(PA),在 95 °C 条件下溶解 3 h,形成均匀溶液。将混合液

超声脱气后,倒入不同厚度的模具中,并于 -10 °C 下静置过夜,制得 PVA-PA-LiCl 水凝胶。将铝电极、银电极分别贴附于水凝胶的相对两侧作为电极。最终制得 MEG。

2.3 MEG 性能分析

图 2 显示了 MEG 的性能及负载特性。MEG

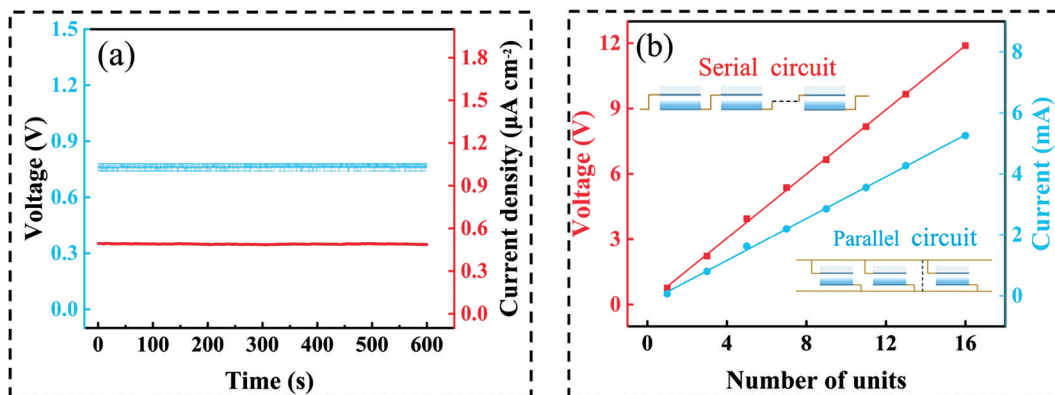


图 2 (a) 湿气发电机输出性能;(b) 对湿气发电机(4 cm²)串并联后输出的电压及电流。

Fig. 2 (a) Output performance of the moisture generator;(b) Output voltage and current of the moisture generator (4 cm²) in series and parallel connection.

输出的电压和电流分别为 0.76 V 和 0.492 mA, 图 2(a) 表明, 湿气发电机输出具有稳定性。本研究使用的 PDLC 的阈值电压为 3 V, 饱和电压为 10 V。单片 MEG 难以驱动液晶器件, 所以对多片 MEG 进行串并联可以得到合适的电压、电流。如图 2(b) 所示, 随着串联片数的增加, MEGs 的输出电压线性增加; 随着并联片数的增加, MEGs 的输出电流线性增加, 选择不同的串联片数对 PDLC 光栅驱动。

2.4 PDLC 一维/二维可光栅制备

首先 PDLC 一维/二维切换光栅^[26]由掩膜法^[27-28]制备, 其具体的制备流程如图 3 所示。在室温下选用周期为 120 μm 、其中透明部分和不透明部分的宽度分别为 40 μm 和 80 μm 的一维光掩模, 如图 3(a) 所示。选用摩擦取向为 x 方向的 IPS 液晶盒, 其中 IPS 电极的电极区和非电极区

分别为 20 μm 和 40 μm , 使 IPS 电极与光掩模相互正交, 如图 3(b) 所示。PDLC 光栅制备原理图如图 3(c) 所示。将液晶器件置于 25 $^{\circ}$ 热台上加热, 同时使用 0.7 mW/cm^2 的平行紫外光曝光 90 min。在紫外光照射下, NOA65 聚合物在透光部分发生交联聚合, 与此同时液晶分子扩散到不透光部分, 最终聚合物和液晶通过光掩模的图案化照明形成交替的条形层, 构成如图 3(d) 所示的光栅结构。由于液晶具有介电各向异性, 其折射率会随外加电场变化而改变。在不加电的情况下, 液晶分子排列无序, 呈现出一维 PDLC 光栅结构; 定义 α 为入射偏振光方向与垂直于 IPS 光栅条纹方向之间的夹角, $\alpha=0^{\circ}$ 时, 入射光偏振方向平行于 x 轴, 如图 3(e) 所示, 当给 IPS 电极通电, 随着外加电场的增大, 液晶分子沿电场方向周期性排列。所以电极上方液晶的有效折射率接近寻常

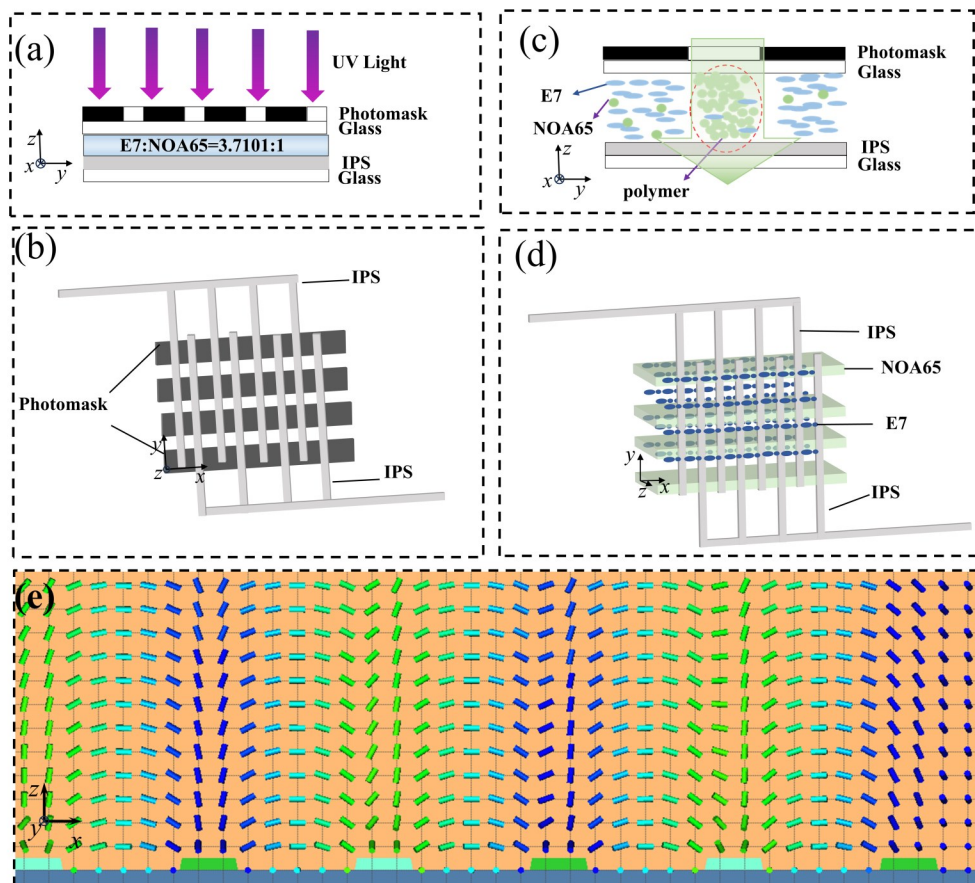


图 3 (a) 掩膜法制备 PDLC 光栅。(b) IPS 电极与光掩模相互正交。(c) NAO65 在透光部分聚合。(d) 未施加电场下液晶分子分布。(e) 施加电场后液晶分子分布。

Fig. 3 (a) Fabrication of PDLC grating by mask method. (b) IPS electrodes and photomask are orthogonal to each other. (c) NAO65 polymerizes in the light-transmitting regions. (d) Liquid crystal molecular distribution without applied electric field. (e) Liquid crystal molecular distribution after applying electric field.

折射率 n_o , 而无电极上方的有效折射率接近非寻常折射率 n_e , 因而形成了液晶分子的扇形排布, 如图 3(e) 所示。该结构与聚合物形成光栅结构相匹配, 最终呈现出明显的二维结构。

3 结果与讨论

在通过图 1(e) 光路进行实验后, 实验结果如图 4 和 5 所示。为定量对比不同驱动源下器件的电光调控特性, 在 $\alpha=0^\circ$ 的测试条件下, 分别采用商用交流电源与本文所提出的湿气发电机对 PDLC 一维/二维切换光栅进行驱动, 获得的衍

射光斑图像如图 4(a)~(d) 所示, 信号源驱动得到的衍射图像如图 4(e)~(h) 所示。

从衍射现象的演化规律可以直观看出, 两种驱动方式下器件的电光响应行为具有高度一致性: 当驱动电压为 1 V 时, 样品仅表现出一维 PDLC 光栅的典型衍射特征, 该电压水平尚未达到液晶分子取向偏转的工作阈值; 随着电压升高至 4 V, 样品开始出现二维光栅对应的衍射图样, 标志着 PDLC 光栅已达到电光调控的阈值电压, 液晶分子在电场作用下发生初步定向排列; 若继续提升驱动电压, 二维衍射光斑的轮廓愈发清晰、衍射级次更为分明, 二维光栅的特征表现得愈加显著。

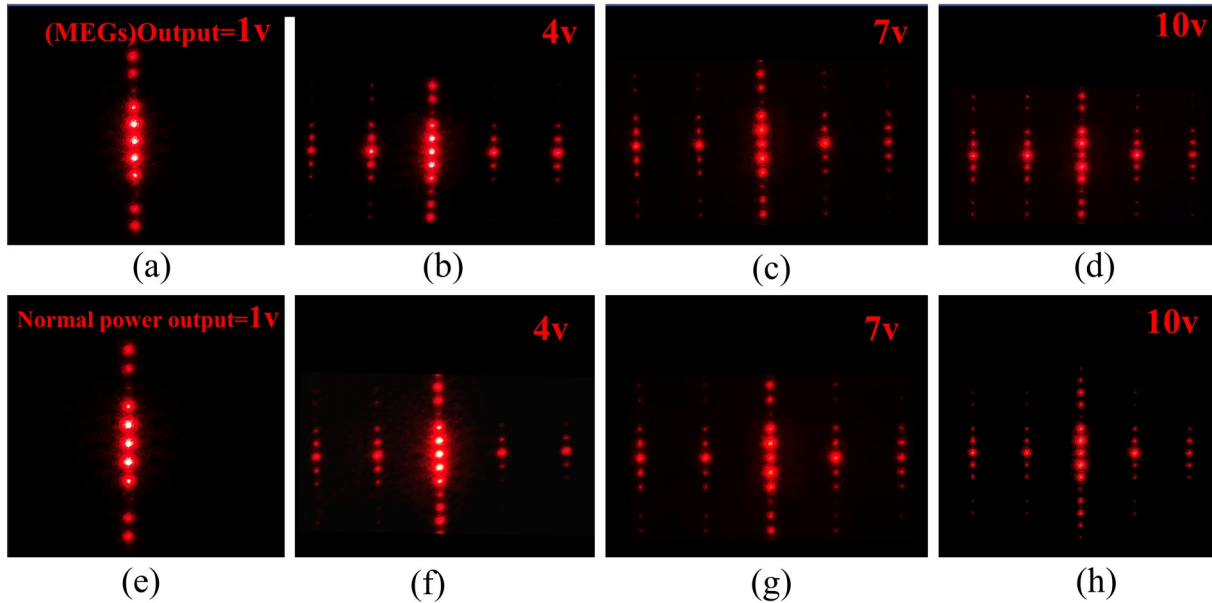


图 4 不同供电系统下 PDLC 光栅在 1 V、4 V、7 V 和 10 V 驱动电压下的衍射图样。(a)~(d) 为湿气发电机供电, (e)~(h) 为商用信号源供电。

Fig. 4 Diffraction patterns of the PDLC grating powered by the moisture generator at (a) 1 V, (b) 4 V, (c) 7 V, (d) 10 V and by the signal source at (e) 1 V, (f) 4 V, (g) 7 V, (h) 10 V.

为进一步量化对比两种驱动源的调控效果, 在 $\alpha=0^\circ$ 的测试条件下, 选用波长 632.8 nm 的激光器, 激光经 1/4 波片、偏振片后入射至液晶盒, 再通过可调光阑, 最终由光电探测器检测零级光强。以 0 V 条件下透过液晶盒的总光强为归一化基准, 测试并分析了信号源与自供电系统驱动下 PDLC 一维/二维切换光栅的零级光强随外加电压的变化, 结果如图 5 所示。

实测数据表明, 随着外加电压升高, 偏振光在液晶区的有效折射率差逐渐增大最大, 零级衍射效

率逐渐增大, 因此零级光强逐渐降低。两种驱动条件下零级衍射效率随电压的演变趋势几乎完全重合, 呈现出典型的三段式变化规律: 在 0~3 V 低压区间内, 零级衍射效率基本稳定在 21%~23% 的较高水平; 当电压处于 3~6 V 范围时, 零级衍射效率快速下降并趋近于 6% 左右; 而在 6~10 V 区间内, 零级衍射效率逐步回升 7%~11%。上述定量结果充分验证了, 基于湿气发电机的自供电系统能够在电学输出特性上等效替代商用交流电源, 实现对 PDLC 光栅电光行为的精准、可调控。

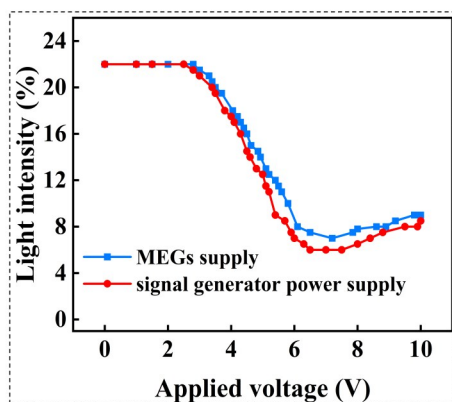


图5 不同电压下PDLC光栅零级衍射效率对比

Fig. 5 Comparison of diffraction efficiency under different voltages

本研究设计了基于湿气发电机的自供电PDLC光栅系统,搭建了一体化无源光电驱动方案,实现了对一维/二维可切换PDLC光栅的精准电光调控。本技术以室内环境为核心适用场景:室内湿度稳定可控,既能保障湿气发电机持续获取水汽、稳定输出电能,规避极端湿度对发电性能的影响,

又能满足PDLC光栅稳定驱动的需求;该湿气发电机以环境中水相态转变所释放的化学能为能量来源,无需外接电源,从供能层面为液晶器件的轻量化与便携化提供支撑,拓宽了自供电PDLC光栅的室内应用范围。通过对MEG串并联,可灵活调节输出电压与电流,精准匹配PDLC光栅及多种低功耗液晶器件的驱动阈值与工作电压,为液晶光电器件的绿色无源供能提供了新路径。性能对比测试表明,湿气发电机驱动下PDLC光栅的电光响应规律、衍射效率等关键性能指标与商用交流电源高度吻合,其中衍射效率波动误差控制在5%以内。充分验证了该自供电方案在室内环境下具备良好的供电可靠性与实用价值。本研究首次实现湿气发电机与PDLC光栅的高效集成,为湿气发电机与液晶光电器件的深度集成提供了关键技术支撑,为智能光电领域便携式、无源化、绿色化自供电系统设计提供新思路,有力推动自供电液晶器件在室内三维显示、柔性光电子、便携式光波导调控等方向的实用化与规模化发展。

参 考 文 献:

- [1] GUO Q, YAN K, CHIGRIONOV V, *et al.* Ferroelectric Liquid Crystals: Physics and Applications [J]. *Crystals*, 2019, 9(9): 470.
- [2] WANG S, ZHANG X D, CHEN X, *et al.* Dual-Layer Polymer-Dispersed Liquid Crystals Doped with Thermochromic Microcapsules for Information Encryption and Visible Light Camouflage [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(15): 23003-23017.
- [3] KUMAR P, SHARMA V, CHINKY J D, *et al.* Impact of dye on the switching responses of polymer dispersed ferroelectric liquid crystal [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2017, 647(1): 385-394.
- [4] MENG F J, LI M H, GUO T, *et al.* A high-capacity and self-healable electrochromic system based on I0/CuI conversion reaction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 1385-8947(500), 157375.
- [5] DI W, Li Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle[J]. *Light Sci Appl* 2024, 13(1): 16.
- [6] Wang, Z Y., Zhou Z., Zhang H. *et al.* Vectorial liquid-crystal holography[J]. *eLight* 2024, 4: 5.
- [7] BAHADUR B. Liquid crystal displays [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1984, 109(1): 3-93.
- [8] SCHADT M. Liquid crystal materials and liquid crystal displays [J]. *Annual review of materials science*, 1997, 27(1): 305-379.
- [9] 雷俊阁, 孙国斌, 张锦, 等. 基于液晶空间光调制器的全息再现像设计[J]. *中国光学*, 2025, 18(4): 771-783.
- LEI J G, SUN G B, ZHANG J, *et al.* Design of holographic reproduction images based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 771-783.
- [10] IKEDA T, TSUTSUMI O. Optical switching and image storage by means of azobenzene liquid-crystal films [J].

- Science*, 1995, 268(5219): 1873-1875.
- [11] SATO M, YOSHIZAWA A. Electro-optical switching in a blue phase III exhibited by a chiral liquid crystal oligomer [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(23): 4145-4148.
- [12] Al-Hamdani U J, HASSAN Q M A, ZAIDIAN A M, *et al.* Optical nonlinear properties and all optical switching in a synthesized liquid crystal [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 361: 119676.
- [13] ZOLA R S, BISOYA H K, WANG H, *et al.* Dynamic control of light direction enabled by stimuli-responsive liquid crystal gratings [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(7): 1806172.
- [14] 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.
- [15] LI Y L, LI N N, WANG D, *et al.* Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [16] 严静, 范相文, 屈科, 等. 基于聚合物分散液晶的图案化柔性智能窗户[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(1): 7-13.
YAN J, FAN X W, QU K, *et al.* Patterned flexible polymer dispersed liquid crystal smart windows [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 7-13.
- [17] 王萌, 祝伊飞. 智能窗用液晶/高分子复合材料研究进展[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(10): 1243-1262.
WANG M, Zhu Yi F. Research progress of liquid crystal/polymer composites for smart windows [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(10): 1243-1262.
- [18] 王凯宇, 白龙飞, 谢丽娟, 等. 负性液晶材料光电参数对聚合物稳定液晶器件响应特性的影响[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(8): 1095-1103.
WANG K Y, BAI L F, XIE L J, *et al.* Effect of photoelectric parameters of negative liquid crystal on photoelectric characteristics of polymer stabilized liquid crystal devices [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(8): 1095-1103.
- [19] WANG P, XU J, WANG R, *et al.* Pathways for continuous electricity generation from ambient moisture [J]. *Matter*, 2023, 6(1): 19-22.
- [20] TAN J, WANG X, CHU W C, *et al.* Harvesting Energy from Atmospheric Water: Grand Challenges in Continuous Electricity Generation [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(12): 2211165.
- [21] GUO C Y, Tang H J, Wang P F, *et al.* Radiative cooling assisted self-sustaining and highly efficient moisture energy harvesting [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6100.
- [22] WANG H Y, HE T C, HAO X Z, *et al.* Moisture adsorption-desorption full cycle power generation [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2524.
- [23] KIM D H, AKBAR Z A, MALIK L Y T, *et al.* Self-healable polymer complex with a giant ionic thermoelectric effect [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3246.
- [24] WANG C, LIU Y, QU X C, *et al.* Ultra-Stretchable and Fast Self-Healing Ionic Hydrogel in Cryogenic Environments for Artificial Nerve Fiber [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(16): 2105416.
- [25] WU S W, HUA M T, ALSAID Y, *et al.* Poly (vinyl alcohol) Hydrogels with Broad-Range Tunable Mechanical Properties via the Hofmeister Effect [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(11): 2007829.
- [26] 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.
- [27] 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*, 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.

- [28] 王俊辉, 刘璇, 段霞, 等. 基于图案化宾主液晶的光刻掩模板制备[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.

作者简介:



雷志锴, 男, 本科, 主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。
E-mail: 340563213@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



丁巍, 男, 本科, 主要从事液晶物理及液晶器件物理方面的研究。E-mail:
2019068689@qq.com