

文章编号: 1002-1582(2026)02-0140-08

五波干涉全息聚合物分散液晶二维匀光膜研制

蔡佳, 许海, 鲁思宇, 厉怡辰, 郑继红*

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 二维衍射光栅在匀光显示及光场调控等领域应用广泛, 但其性能仍受限于光栅结构设计的合理性与制备工艺效率。文章基于五波干涉理论, 设计了一种四棱台棱镜分光器件, 采用单次性曝光工艺成功制备 50mm×50mm 尺寸大小的二维全息聚合物分散液晶光栅膜。在再现波长 532nm 时, 3 个不同干涉角条件下, 实现对 9 束衍射光强度分布的有效控制, 其一级衍射效率达 91%, 衍射比可达 3:1, 衍射角控制精度小于 $\pm 0.5^\circ$ 。此外, 在三醋酸纤维素 (Triacetate Cellulose, TAC) 膜上成功制得厚度可控的二维匀光光栅膜, 经实验验证其最优厚度为 40 μm , 该结构在 450~630 nm 波段内仍保持 86% 以上的高衍射效率, 展现出良好的宽谱匀光性能。方案光路结构简洁、制备工艺可控性高, 显著提升光栅制备的稳定性且匀光效果良好, 为宽谱匀光显示和高性能光学调控器件提供了高效可行的技术途径。

关 键 词: 光学材料; 聚合物分散液晶; 全息; 五波干涉; 二维光栅; 衍射效率; 匀光膜

中图分类号: O753⁺.2

文献标识码: A

Development of Two-dimensional uniform light film of holographic Polymer-dispersed liquid crystal based on Five-wave interference

CAI Jia, LU Siyu, XU Hai, LI Yichen, ZHENG Jihong*

(Shanghai Key Lab of Modern Optical System, School of Optical -electrical and Computer Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Two-dimensional diffraction gratings are widely used in applications such as uniform illumination and optical field modulation. However, their performance is largely constrained by the rationality of structural design and the efficiency of fabrication processes. Based on the five-beam interference theory, this study designs a pyramidal prism beam-splitting device and successfully fabricates a 50 mm×50 mm holographic polymer-dispersed liquid crystal (H-PDLC) two-dimensional grating film via a single-exposure process. At a reconstruction wavelength of 532 nm, effective control over the intensity distribution of nine diffracted beams is achieved under three different interference angles. The first-order diffraction efficiency reaches 91%, with a diffraction ratio of 3:1. The angular control precision of the gratings fabricated by the pyramidal prism method is within $\pm 0.5^\circ$. Furthermore, a thickness-controllable two-dimensional uniform illumination grating film is successfully prepared on a triacetate cellulose (TAC) substrate. Experimental results indicate that an optimal thickness of 40 μm maintains a high diffraction efficiency of over 86% across the 450~630nm wavelength range, demonstrating excellent broadband uniform illumination performance. The approach features a simple optical path structure and highly controllable fabrication processes, significantly enhancing the stability of grating preparation while achieving excellent light homogenization. It provides an efficient and feasible technical approach for broadband homogeneous illumination displays and high-performance optical modulation devices.

Keywords: optical materials; polymer dispersed liquid crystal; holography; five-wave interference; two-dimensional grating; diffraction efficiency; light-homogenizing film

收稿日期: 2025-11-16; 收到修改稿日期: 2025-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (62475158, 62405191), 国家重点研发计划 (2018YFA0701800)

作者简介: 蔡佳 (2001—), 女, 硕士研究生, 从事全息聚合物分散液晶光栅相关研究。1404201868@qq.com

郑继红 (1975—), 女, 教授, 博士, 从事聚合物分散液晶及信息光学等方面研究。

* 通讯作者: Ji-hongzheng@sina.com

0 引言

匀光器件是调控光束能量分布、实现均匀照明的光学关键元件,广泛应用于显示背光、光刻照明等领域,其中显示领域对其亮度均匀性与结构兼容性的核心需求尤为迫切^[1]。体全息光栅作为匀光元件的重要技术路径,兼具高衍射效率、优良波长选择性等优势^[2,3]。而聚合物分散液晶(Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC)作为液晶微滴均匀分散于聚合物基体的复合材料^[4],可通过曝光工艺实现相分离固化,兼具无偏振依赖性、快速响应及良好成膜性等特点,能完美适配全息光聚合工艺^[5]。在全息光场照射下,PDLC膜内会形成与干涉条纹对应的周期性折射率调制,进而构建出全息聚合物分散液晶(Holographic Polymer Dispersed Liquid Crystal, H-PDLC)光栅^[6]。其独特的周期性微纳结构赋予了精准且高效的二维光场匀化能力,同时结合PDLC的电光调控灵活性,可实现匀光效果的动态可调^[7],更适配大面积显示对均匀性与可调控性的双重要求,为高性能匀光显示器件研发提供了新路径。

为满足全息显示与光子器件领域对高性能光栅元件的需求,开发兼具高衍射效率与低光学损耗的H-PDLC光栅已成为热点。近些年来国内外研究者研究焦点集中于光栅微观形貌和制备工艺创新进行了深入探究^[8-11]。例如,中国科学院马骥等通过二次曝光方法,成功制备了具有电调谐特性功能的二维结构的光栅^[12];吕凤珍等通过四光束一次曝光技术制备出二维电调谐聚合物分散液晶光栅,其衍射效率可通过电场调节,在无外加电场时一级衍射效率为36.6%^[13]。宋静等采用系统优化二次曝光中光强等参数,有效改善了液晶微滴的相分离形态,其衍射效率最高可达50%^[14]。此外,上海理工大学李科等通过三光束干涉先构建一维光栅结构,再经二次叠加形成二维周期分布,该制备方案成功实现了90%的衍射效率,为二维光栅的高效制备提供了重要技术参考^[15]。然而,此类基于分布叠加的制备方案需经过多次干涉曝光、光路对准与调整参数,不仅工艺流程相对繁琐,还易因多次操作积累系统误差,这在一定程度上限制了制备效率与一致性的进一步提升。

针对上述问题,本文提出一种基于棱台结构的五光束单次曝光的技术。利用棱台对入射光的分束与相位调制功能,在干涉场中直接构建二维光栅结构,进而实现面积达50mm×50mm的H-PDLC匀光光栅制备。该方案无需分步叠加或多次光路

对准操作,显著简化了制备流程,在保持高衍射效率的同时提升了制备稳定性与可重复性。通过几何光学理论推导、参数联立求解及实验遮挡的修正,本文完成了四棱台棱镜倾角设计与入射光直径等核心参数的设计,制备出了高衍射效率的二维匀光光栅。在控制光栅厚度情况下,在532nm波长下达成7.7°、10.5°和14°这3个衍射角度的9束衍射光的光强分配调控,该光栅具有高达91%的一级衍射效率,衍射光强比可实现3:1。该方法为H-PDLC二维光栅的高效低成本制备提供了新途径,构建了兼具实用性与经济性的技术体系。

1 全息理论

1.1 五波干涉理论

本文采用对称式五波干涉系统构建二维光场,相干光束配置如图1中所示。将五束平面波相干光分别标记为物光波1、物光波2、参考光波3、物光波4和物光波5。规定四束物光和参考光(波矢均处于 $x-z$ 平面)与液晶盒平面法线的夹角为 θ_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$), $\theta_{s1}-\theta_{s5}$ 分别为 z 轴与参考光波和四束物光波在预聚物内的传播矢量的夹角,由斯涅尔定律

$$\frac{\sin \theta_{s3}}{\sin \theta_3} = \frac{\sin \theta_{si}}{\sin \theta_i} = \frac{n_a}{n_g} \quad (1)$$

式中, $i=1, 2, 4, 5$ 且 n_a 为空气折射率, n_g 为液晶盒折射率,由于是完全对称的五波干涉光路,则会有 $\theta_{s1}=-\theta_{s2}$, $\theta_{s4}=-\theta_{s5}$, $\theta_{s3}=0$ 。中间参考光波3沿 z 轴入射,物光波1、2在 $x-z$ 平面关于 z 轴对称入射,物光波4、5在 $y-z$ 平面关于 z 轴对称入射,物光波1、2、4、5在平面内与 z 轴夹角大小保持一致。设定中间参考光波的振幅为 E_0 ,物光波1、2、4、5的振幅均 E_1 ^[16]。

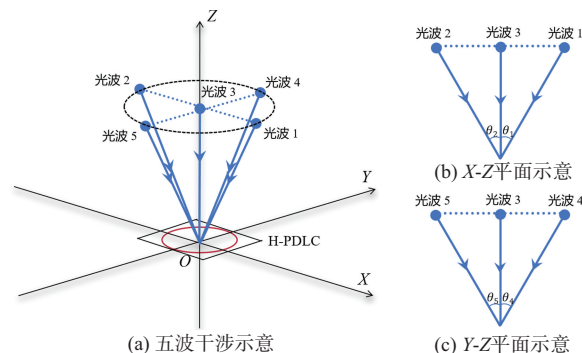


图1 五波干涉记录光束配置示意图

总复振幅表达式表示为

$$E_{\text{total}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = \tilde{E}_1 \exp(ik_x x + ik_z z) + \tilde{E}_2 \exp(-ik_x x + ik_z z) + \tilde{E}_3 \exp(ik_z z) + \tilde{E}_4 \exp(ik_y y + ik_z z) + \tilde{E}_5 \exp(-ik_y y + ik_z z) \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} k_x &= n_g k_0 \sin \theta_{s1} = n_g 2\pi/\lambda_0 \sin \theta_{s1} \\ k &= n_g k_0 = n_g 2\pi/\lambda_0 \\ k_z &= n_g k_0 \cos \theta_{s1} = n_g 2\pi/\lambda_0 \cos \theta_{s1} \end{aligned} \quad (3)$$

λ_0 为干涉记录光源在真空中波长。场强分布表达式表示为

$$I(x, y, z) = |E_{\text{total}}|^2 = E_0^2 + 4E_1^2 \left[\cos^2(k_x x) + \cos^2(k_y y) + 2\cos(k_x x) \cos(k_y y) \right] + 4E_0 E_1 \cos[kz - k_z z] [\cos(k_x x) + \cos(k_y y)] \quad (4)$$

式中 k_x 、 k 和 k_z 含义同式 (3) 中。

1.2 棱台结构设计

四棱台棱镜的核心功能是将入射光分为五个方向，通过棱台斜面与空气界面的折射作用，五光束在棱台后方合光，形成多光束干涉场，其设计原理图如图 2 所示。其中 D 为入射光束的直径， d 为曝光区域的宽度， θ 为曝光夹角。

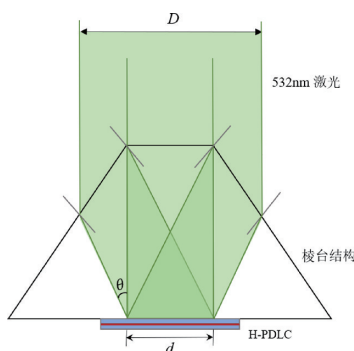


图 2 四棱台棱镜设计原理图

棱台设计以几何光学和五波干涉理论为支撑，围绕目标衍射角（以 7.7° 为例），结合合光区域（即光栅区域）为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的尺寸要求与 K9 玻璃（折射率 $n=1.516$ ）的材料参数，开展棱台斜面倾角及入射平行光参数的设计计算，具体设计流程如下：

(1) 棱台斜面倾角计算：

光线从空气垂直入射棱台顶面后，经斜面首次折射进入棱台内，再经棱台底部二次折射返回空气，斜面倾斜角 α 使得光线两次折射后，最终总偏转角为 7.7° 。由几何关系可知，棱台倾斜角与首次折射的入射角相等，据此结合斯涅尔定律建立折射方程组

$$\begin{aligned} n_{\text{air}} \sin(\alpha) &= n_{\text{K9}} \sin(\beta) \\ n_{\text{K9}} \sin(\alpha - \beta) &= n_{\text{air}} \sin(7.7^\circ) \end{aligned} \quad (5)$$

式中，空气折射率 $n_{\text{air}}=1$ ，K9 玻璃折射率 $n_{\text{K9}}=1.516$ ，求解得相关角度

$$\alpha \approx 14.69^\circ, \beta \approx 9.62^\circ$$

(2) 入射平行光直径与棱台高度设计：

为使分光后五束光在合光处尺寸达到 50mm ，入射光需覆盖棱台顶面及斜面折射区，因此入射平行光直径满足几何关系

$$D = 50\text{mm} + \frac{2h}{\tan \alpha} \quad (6)$$

式中 h 为棱台高度，同时结合正弦定理得

$$\frac{50}{\sin(90^\circ - \beta)} = \frac{h}{\sin \alpha} \quad (7)$$

联立两式可求解棱台高度 h 与入射光 D 的值。

(3) 实验遮挡的修正与最终尺寸：

上述计算为入射光恰好入射棱台边缘的极限情况，但实际中棱台置架会遮挡光线，导致光栅有效尺寸不足。因此，在保持斜面倾角不变的前提下，等比例增大棱台体积以补偿遮挡影响，保障合光区域的有效尺寸，最终棱台设计具体参数见图 3。

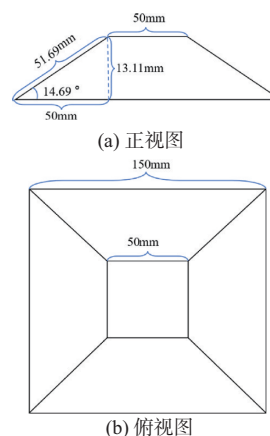


图 3 棱台设计参数

1.3 分光性能仿真验证

基于五波干涉的光场强度分布，本研究在 Rsoft 软件中采用严格耦合波分析算法构建二维周期折射率光栅模型^[17]，谐波数（傅里叶展开级数）设置 20。关键仿真参数如下：工作波长 532nm ，入射方位角/仰角均为 0° ，1 级衍射角 10.5° 。为保证计算结果收敛， x 、 y 方向划分网格精度为 $0.01\mu\text{m}$ ， z 方向为 $0.005\mu\text{m}$ ，材料折射率输入值为 $1.49 \sim 1.59$ ，其模型的单位光栅结构 x - y 截面折射率分布示意图如图 4 所示。在此模型中，设定光栅厚度为 $40\mu\text{m}$ ，在曝光光路中物光与参考光的光强配比为 $2:1$ 时，8 个一级衍射光的强度均高于中心 0 级光强度，满

足匀光器件的衍射强度分布要求。以 $40\mu\text{m}$ 厚且衍射角度设定为 10.5° 的二维光栅为例,其一级衍射效率的仿真结果如图5,图中8条曲线即该二维光栅($\pm 1, \pm 1$)级8个对称测点仿真结果,且各测点的效率曲线贴合度较高。结果表明,当曝光时物参光强比为2:1时,光栅的相分离结构具有更优的稳定性,且其一级衍射效率不仅达到更高水平,还具备更均匀的分布特征。因此基于上述仿真分析结果,最终选取曝光光强比2作为该二维光栅制备过程中的最优曝光条件。

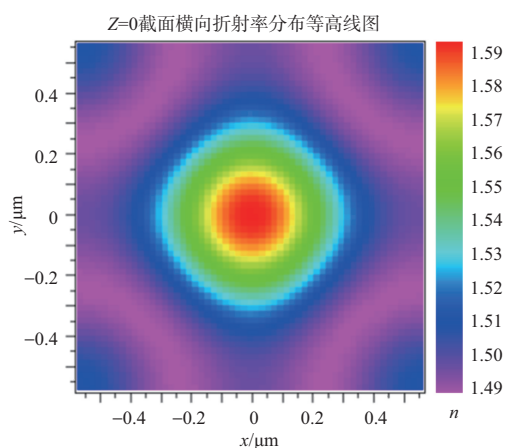


图4 全息五波干涉的单位二维H-PDLC光栅折射率模型

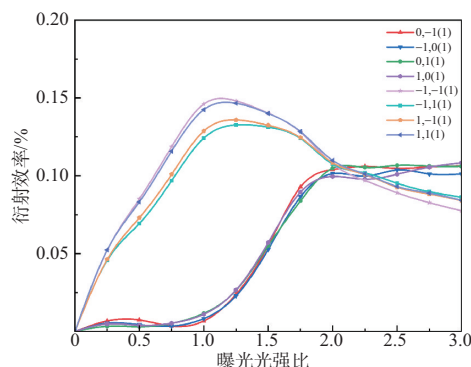


图5 仿真结果

2 聚合物分散液晶匀光膜制备

聚合物分散液晶是一种由聚合物基质、液晶分子及光引发剂按特定配比组成的复合材料体系,其微观结构通过相分离机制实现液晶在聚合物中的均匀分散^[18]。典型体系主要包含光聚合单体、液晶分子、光引发剂及微量纳米粒子,其中光聚合单体为主要成分。在全息PDLC光栅制备过程中,各组分通过均匀混合形成初始溶液。当采用光束干涉曝光时,相干激光在液晶盒内形成具有正弦分布特征的干涉条纹场。在亮区,光引发剂受激产生自由基活性粒子,这些粒子与协同引发剂共同引发单体的光聚合反应,形成聚合物网络;与此同时,聚合反应导致单体浓度梯度使液晶分子

向暗区迁移,最终,形成具有折射率调制的周期性相分离结构^[19]。完整相分离好的全息光栅形成需满足液晶扩散时间短于其成核时间,且成核时间又短于光聚合凝胶时间^[20]。

2.1 实验样品制备

本研究中PDLC材料体系具体包含:(1)液晶:TEB-50,作用为提供折射率差,折射率 $n_o=1.52/n_e=1.71$;(2)单体:邻苯二甲酸二乙二醇二丙烯酸酯(PDDA),该试剂为光聚合反应的主体,折射率 $n=1.417$;(3)光引发剂:孟加拉红 Rose Bengal (RB),光引发剂吸收光子,引发光聚合,折射率 $n=1.508$;(4)成膜树脂:环氧树脂(EPIKOTE 828),折射率 $n=1.47$;(5)交联剂:l-Vinyl-2Tpyrrolidinone (NVP),该材料可改善体系聚合速率,折射率 $n=1.512$;(6)协引发剂:N-phenylglycine (NPG),协引发剂作用为控制单体自由基固化速率,折射率 $n=1.445$ 。在避光暗室环境中,依据设定配比精准称取上述各类试剂,使用搅拌器充分混合,再将混合溶液置于超声振荡器中,以恒定频率(2000r/min)振荡180min,以确保各组分均匀分散。完成振荡后,将样品转移至低温环境静置24h后可供后续实验使用。

液晶盒制备所用主要材料包括: $75\text{mm} \times 75\text{mm}$ 透明玻璃、高平整度TAC膜、PO/PET双面UV解粘膜及 $20\mu\text{m}$ 间隔物微球。制备时先将TAC膜通过解粘膜无气泡贴合于玻璃基底,以确保光学均匀性。随后用喷粉机在覆膜基底表面均匀喷散 $20\mu\text{m}$ 的间隔子以确保盒厚均匀,最后滴注PDLC材料,再慢慢盖合另一玻璃基底,保证两块基底的TAC膜层均朝向材料侧并紧密贴合。最后沿玻璃边缘均匀施胶密封,完成封闭结构。图6为制作好的液晶盒结构示意图。

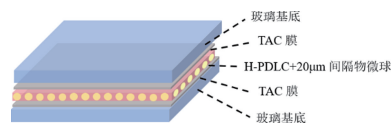


图6 液晶盒示意图

2.2 光路搭建

本文搭建了基于偏振全息透射式五光束干涉光路,其结构如图7所示。记录波长为532nm的固体激光器输出激光束,光束经光轴高度调节系统后依次经过半波片和偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter, PBS),随后进入由放大倍数为60倍的显微物镜($\text{NA}=0.85$)和 $15\mu\text{m}$ 的小孔组成的扩束系统,以获得均匀光场。扩束光经直径 $d=300\text{mm}$,焦距 $f=700\text{mm}$ 的双凸透镜准直平行后入射至K9材质棱台棱镜($n=1.516$),在棱台内被分为5束

方向不同的子光束，并在样品夹处合光形成干涉条纹。各光学元件间的距离为：快门至半波片 10cm、半波片至扩束系统 18cm、小孔至透镜 30cm、双凸透镜至棱台 20cm。采用大恒 GCI-73 多功能精密电子定时器对曝光时间进行精准控制。

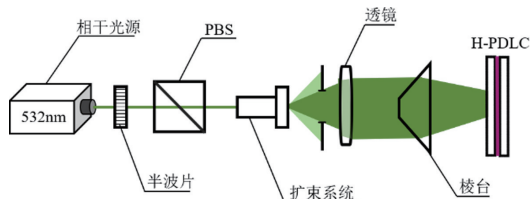
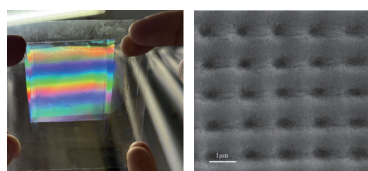


图 7 曝光光路图

2.3 二维光栅匀光膜样品制备

制得的液晶盒于加热台加热至 47℃ 后移至曝光光路的样品夹，使五光束干涉形成的全息光场精准作用于 PDLC 材料。棱台结构下五束入射光包含中间 1 束与四周对称分布且光强均等的 4 束，四周单束光强与中间光束光强比为 2:1，合光处曝光强度为 10mW/cm²，曝光时间为 120s。曝光完成后，膜片样品经 UV 固化处理 15min，使预聚物完全交联固化并促使液晶分子相分离，从而固定光栅的周期性结构，增强材料的稳定性。成品光栅膜及其光栅形貌如图 8 所示。



(a) 光栅膜样品 (b) 光栅形貌图

图 8 光栅膜片及其光栅形貌图

实验需在暗室或红光安全灯下进行，以防止材料在曝光前发生非预期预聚合。同时应严格控制环境洁净度，保持实验区无尘，避免微粒影响光敏材料的均匀性及成膜质量，并且尽量减少气流、振动与噪声干扰，确保光聚合过程不受外界因素影响。

3 实验结果分析

本文系统探究了曝光参数对大尺寸 (50mm×50mm) 全息聚合物分散液晶光栅全息特性的影响，旨在优化其衍射效率。样品曝光、固化完成后置于图 9 所示的测试光路中对其衍射效率进行测量。

二维光栅的某一级次衍射效率为该级次的衍射光强与入射总光强的比值^[21]。其中 (±1, ±1) 级衍射效率定义为

$$\eta_{(\pm 1, \pm 1)} = \frac{I_{(\pm 1, \pm 1)}}{I_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中， $I_{(\pm 1, \pm 1)}$ 对应 8 个对称分布的 (±1, ±1) 级衍射光强之和， I_0 为垂直入射至光栅表面的总入射光强^[22]。

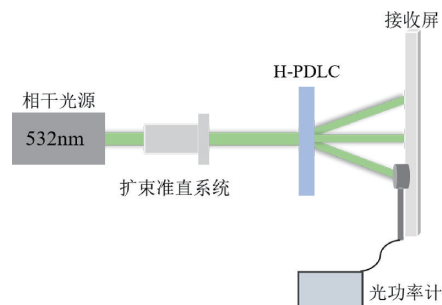
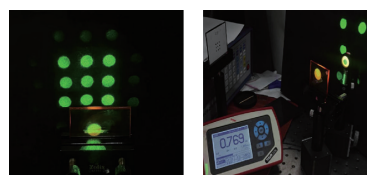


图 9 测试衍射效率光路搭建示意

实验以 532nm 激光作为探测光，垂直入射光栅平面，零级与一级衍射光的光强由光功率计测量。二维光栅的衍射实物如图 10 (a) 所示，入射光经光栅样品后被衍射为 9 束光，其中 4 束沿 x 、 y 方向分布，另 4 束分布于 ±45° 方向。因此该二维光栅的一级衍射光包括 x 、 y 及斜 45° 方向的 8 束光。本文中一级衍射效率的计算方式为八个一级衍射光光强之和与入射总光强之比。使用光功率计测试衍射光束光强的实测装置如图 10 (b)。



(a) 光栅衍射示意 (b) 衍射效率测试示意

图 10 二维光栅衍射及测试示意

3.1 二维 H-PDLC 光栅全息特性

曝光光强在全息干涉实验中是影响光栅特性的一个重要因素。光强过高时，单体的聚合速率远远慢于光引发的速率，导致单体无法聚合形成稳定的高维网状结构，实现单体与液晶的两相分离。曝光光强过低时，光引发剂吸收光子的数量，产生的自由基数量不足以支撑单体全部聚合，导致单体的并未聚合完全体系就已经凝胶化，进而影响光栅衍射效率^[23]。分别用光功率为 6mW/cm²、8mW/cm²、10mW/cm²、12mW/cm²、14mW/cm² 进行实验来研究曝光光强对光栅衍射效率的影响。如图 11 所示，衍射效率随曝光功率的增强呈先上升后下降趋势，当曝光时间为 210s，光功率 10mW/cm² 时，衍射效率约为 91%。

使用 532nm 激光入射固定在样品夹上的二维 H-PDLC 光栅，通过微调样品夹角度并观察光束反射情况，确保激光垂直入射。该二维光栅产生的 9 个衍射角由干涉曝光系统的光束夹角所决定，该夹角可由光路中的反射镜进行精确控制。

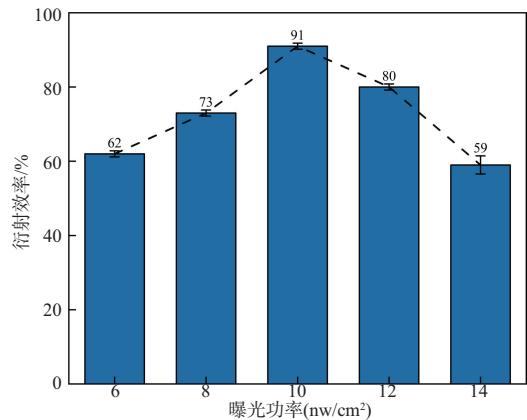


图 11 不同曝光功率下衍射效率变化图

如图 12 所示的示意与测量方法，测量时激光垂直入射，在其后距离 D 处的接收屏上记录 9 个衍射光斑分布。通过测量各 ± 1 级光斑（正交与 45° 方向）与 0 级光斑的中心距离 L ，可得该光栅的衍射角

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L}{D} \tag{9}$$

为确保测量准确性，二维光栅样品的衍射角取 x 、 y 方向和 45° 方向测量值的均值。对各角度下的 15 个样品重复测量后取平均值，实测结果（表 1）表明，本方法可实现衍射角精确控制，其误差不超过 $\pm 0.5^\circ$ 。

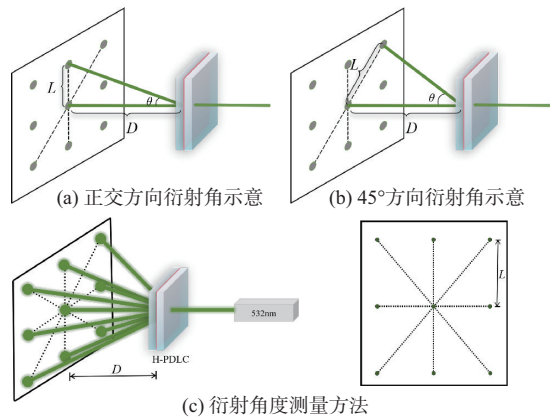


图 12 光栅衍射角示意与测量方式

表 1 实测不同衍射角度结果

方向	目标角度/(°)	实测角度/(°)	误差/(°)
正交方向	7.7	7.82	0.12
45°方向	10.9	10.45	0.45
正交方向	10.5	10.24	0.26
45°方向	14.9	15.31	0.41

3.2 厚度控制与均匀性分析

光栅膜层厚度是影响 H-PDLC 二维光栅衍射效率与光学均匀性的关键参数之一，其与衍射效率的关系为

$$\eta \propto \sin^2 \left(\frac{\Delta n d}{\lambda} \right) \tag{10}$$

式中， Δn 为折射率调制度， d 为光栅的厚度， λ 为记录波长。理论上增大厚度会增加折射率调制度，但当膜层厚度超出最优区间（即过厚条件）时，瑞利散射与米氏散射加剧光能损耗，使实际衍射效率偏离理论值。因此，最优厚度区间需通过实验确定。

实验采用高交联聚合物组成的单分散性间隔物微球（粒径为 10、20、40、60、100 μm ，粒径分布 CV 在 1.0~3.5%，折射率 1.59）精确控制光栅膜层厚度。具体流程如下：取质量分数 0.1wt% 的间隔微球加入 H-PDLC 预聚物溶液，在 25°C 下经超声振荡 10min 以避免热致聚合。接着将混合均匀的溶液注入贴有 TAC 膜的玻璃基底，再覆盖另一块同规格玻璃基底，顶部放置 1kg 压块压合 5min 以排出气泡并固定厚度。制得的液晶盒随后放置于棱台曝光光路中，按照前述最优曝光条件（曝光时间 210s、强度为 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ ）进行干涉曝光，不同厚度样品的衍射效率测试结果见图 13。

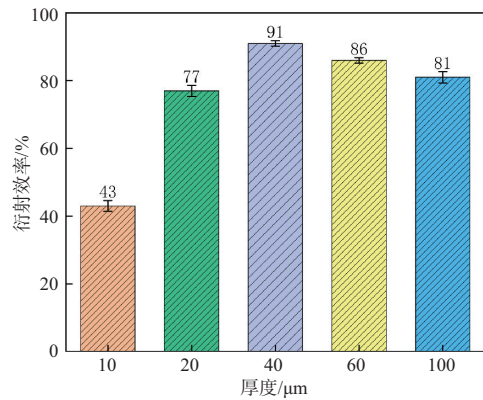


图 13 不同厚度光栅样品衍射效率变化图

本实验表明，光栅厚度为 $40\mu\text{m}$ 时衍射效率可实现较大值，故后续分析基于 $40\mu\text{m}$ 厚度的光栅展开。曝光完成后，使用 UV 照射分离玻璃基底与 TAC 膜。使用千分尺测量二维 H-PDLC 光栅膜片厚度，测试点选取膜片样品中心及周围共 9 个点（呈 3×3 矩阵分布），以 $40\mu\text{m}$ 间隔物微球制备的光栅样品膜测试为例，其测试结果见图 14。

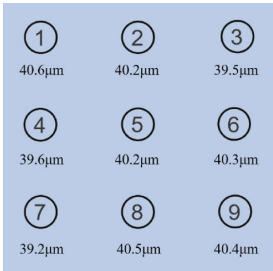


图 14 厚度测量示意图及测量结果

根据测量结果，光栅膜片的平均厚度为

$$\overline{d} = \frac{\sum d_i}{n} = 40.6\mu\text{m} \tag{11}$$

式中, $n=9$ 为同一膜片上测量点数; d_i 为各测点厚度。标准差

$$s = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} = 0.5 \mu\text{m} \quad (12)$$

标准差值反应厚度围绕平均值的平均波动幅度, 即标准差越小, 膜层厚度均匀性越好。结合布拉格衍射理论, 厚度波动 (Δd) 引起衍射效率变化可表述为

$$\Delta\eta \approx \frac{\pi\Delta n\Delta d}{\lambda} \cos\left(\frac{\pi\Delta n\bar{d}}{\lambda}\right) \quad (13)$$

本实验中, 代入实验参数计算得衍射效率波动 $\Delta\eta \approx 0.3\%$, 表明棱台法制作的二维光栅膜层厚度均匀性良好, 可满足衍射性能的稳定性需求。

为探究厚度波动对衍射效率的影响, 实验测试了光栅膜片 9 个位置 (与厚度测试点对应) 在 532 nm 激光垂直入射下的衍射效率。采用光功率计接收并记录衍射光强, 测试结果如图 15 示。

① 80.2%	② 84.9%	③ 78.3%
④ 85.6%	⑤ 87.7%	⑥ 84.2%
⑦ 76.4%	⑧ 83.3%	⑨ 75.5%

图 15 衍射效率测量结果

实验测得该光栅膜片平均衍射效率为 81.79%, 标准差为 4.34%, 其波动幅度显著大于理论值 ($\Delta\eta \approx 0.3\%$)。空间分布上, 光栅中心厚区 (膜厚 $\geq 40.2 \mu\text{m}$) 的衍射效率较高 ($\geq 83.3\%$), 边缘薄区 (膜厚 $\leq 39.5 \mu\text{m}$) 的效率较低 ($\leq 78.3\%$), 表明厚度与衍射效率存在强关联。偏差的核心原因是模型假设过于简化, 实际成膜过程中厚度、折射率和微观结构会协同变化, 且测量本身有局限、存在系统误差。后续将针对成膜均匀性与衍射性能稳定性进行优化, 以提升器件综合性能。

3.3 光栅膜在 RGB 三色光照射下的衍射特性

为探究二维 H-PDLC 光栅在 RGB (450nm 蓝光、532nm 绿光、630nm 红光) 三色下的衍射特性, 及其在可见光范围内的宽光谱稳定性, 本节选取以 RGB 波长为测试核心、覆盖可见光区域的 9 个波长点 (包括 400、500、550、600、650 及 700nm) 进行衍射效率测量。

所有光栅样品均采用 532nm 激光器单次曝光工艺制备, 测试平台与前述绿光实验部分一致。实验采用超连续谱激光光源, 配合可调滤波装置

选取特定波长, 入射光经偏振片调整偏振方向后垂直入射光栅样品, 使用光功率计记录零级与一级衍射光强, 每个波长点均进行五次重复测量, 取其均值作为最终衍射效率值。

图 16 为该 H-PDLC 光栅在 9 个测试波长下的一级衍射效率曲线。结果显示, 在 RGB 核心波段, 光栅表现出优异的衍射性能: 450nm 处衍射效率为 87%; 630nm 处为 89%, 其余可见光波段测试点均高于 80%。整体来看, 该光栅在 450~630nm 范围内保持 86% 以上的高衍射效率, 可见光波段效率均超过 80%, 且各波长效率偏差不超过 2%, 显著优于传统光栅因色散效应导致的效率波动 (通常 $>5\%$)。该特性源于 H-PDLC 材料的周期性介电常数调制在可见光范围内的稳定性。液晶微区与聚合物基质折射率差的波长依赖性较小, 使布拉格衍射条件在不同波长下均能得到有效满足, 从而确保其优异的宽谱一致性。

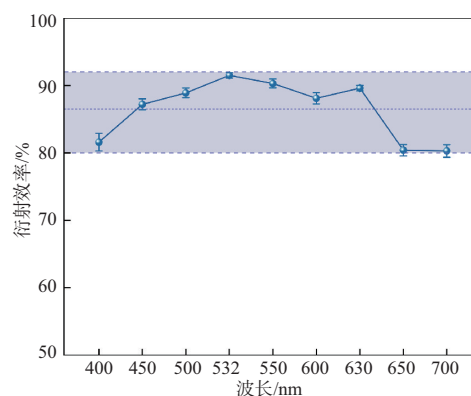


图 16 三色光衍射效率对比图

上述结果表明, 本文采用 532nm 曝光制备的二维 H-PDLC 光栅不仅在制备波长下性能优异, 在红、蓝光波段也具备高衍射效率良好一致性, 可同时满足 RGB 三色光的布拉格相位匹配, 实现宽谱高衍射特性, 为该光栅在彩色全息显示与多通道光通信等领域的应用奠定关键基础, 也为宽波段高性能光栅的设计提供了新的思路。

4 结 论

为解决 H-PDLC 二维光栅在衍射效率受限与制备工艺复杂等问题, 本文提出并实现一种基于棱台结构的五波干涉单次曝光方法。基于五波干涉理论, 结合 Rsoft 软件模拟优化与实验验证, 成功实现大面积、高衍射效率、厚度可控的全息聚合物分散液晶二维光栅制备。结果表明: 本研究所制光栅衍射角的控制精度达 $\pm 0.5^\circ$, 优化曝光条件后一级衍射效率提升至 91%; 在三醋酸纤维素 (TAC) 膜上制备出厚度可控的二维光栅膜片, 且

在红绿蓝三波段均表现出良好的一致性与宽谱高衍射特性。该方法有效简化制程、提高光栅稳定性和重复性,为高性能匀光器件应用提供了一种行之有效的技术思路。

参考文献:

- [1] 田黎东. 采用高亮度LED背光源的液晶显示模块[J]. 山西电子技术, 2013, (01): 24—25+28.
Tian Lidong. Liquid crystal display module using high-brightness LED backlight[J]. Shanxi Electronic Technology, 2013, (1): 24—25+28.
- [2] 何天博. 变折射率体全息光栅衍射特性分析方法与制作工艺研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.
He Tianbo. Study on analysis method of diffraction characteristics and fabrication process of variable refractive index volume holographic grating[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014.
- [3] 冯奇斌, 徐立业, 张乐, 等. 用于平面波导的体全息光栅设计和制备[J]. 光电子技术, 2022, 42(02): 119—122+137.
Feng Qibin, Xu Liye, Zhang Le, et al. Design and fabrication of volume holographic grating for planar waveguide[J]. Optoelectronic Technology, 2022, 42(2): 119—122+137.
- [4] Mucha M, Nastal E. Complex study of reorientational dynamics of the liquid crystal in PDLC films[J]. Liquid Crystals, 1997, 23(5): 749—758.
- [5] Wu R, Shi R X, Wu X, et al. Random lasing in dye-doped polymer dispersed liquid crystal film[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 094209.
- [6] Gang L, Dukho L, Youngmo J, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2486—9.
- [7] J. Y L, W. X S. Holographic polymer-dispersed liquid crystals: materials, formation, and applications[J]. Advances in Optoelectronics, 2009, 2008: 1—52.
- [8] Wu S, Fuh A Y. Two-dimensional diffraction grating based on Polymer-dispersed liquid crystals[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(10): 7077—7082.
- [9] Guo B, Wang M, Zhang D, et al. High refractive index monomers for improving the holographic recording performance of Two-stage photopolymers[J]. ACS Applied Materials And Interfaces, 2023, 15(20): 24827—24835.
- [10] D L, Y L, W X X, et al. Lasing from organic quasicrystal fabricated by seven-beam and nine-beam interference[J]. Optics express, 2016, 24(11): 12330—5.
- [11] 徐梦晴, 杨修凡, 宁湘文, 等. 二维光栅表面缺陷对衍射效率影响的研究[J/OL]. 光学学报, 1—22[2025-11-14].
Xu Mengqing, Yang Xiufan, Ning Xiangwen, et al. Study on the influence of surface defects of two-dimensional gratings on diffraction efficiency[J/OL]. Acta Optica Sinica, 1—22[2025-08-24]
- [12] 马骥, 刘永刚, 于涛, 等. 全息法制备二维电调谐聚合物/液晶光栅[J]. 液晶与显示, 2005, (02): 115—118.
Ma Ji, Liu Yonggang, Yu Tao, et al. Preparation of Two-dimensional electrically tunable polymer/liquid crystal gratings by holographic method[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, (02): 115—118.
- [13] 吕凤珍, 郑致刚, 彭增辉, 等. 一次曝光法制备二维电调谐聚合物液晶光栅[J]. 光子学报, 2009, 38(10): 2506—2511.
Lv Fengzhen, Zheng Zhigang, Peng Zenghui, et al. Two-dimensional electrically tunable polymer liquid crystal grating prepared by single-step exposure method[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(10): 2506—2511.
- [14] 宋静, 周晓宸, 栗洪亮. 二维聚合物分散液晶光栅的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(01): 20—23.
Song Jing, Zhou Xiaochen, Li Hongliang. Study on Two-dimensional polymer dispersed liquid crystal gratings[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(01): 20—23.
- [15] 李科, 蔡佳, 鲁思宇, 等. 基于三波干涉的叠加式聚合物分散液晶体全息匀光膜研制[J]. 光子学报, 2025, 54(06): 195—206.
Li Ke, Cai Jia, Lu Siyu, et al. Fabrication of superposed polymer dispersed liquid crystal holographic light homogenizing film based on three-wave interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(06): 195—206.
- [16] 王刚, 李中梁, 袁春晓, 等. 光刻机照明系统匀光单元光学设计与仿真[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 139—149.
Wang Gang, Li Zhongliang, Yuan Chunxiao, et al. Optical design and simulation of light homogenizing unit in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(13): 139—149.
- [17] 梁庆九, 周金运. 基于365nm LED的数字光刻照明系统匀光设计[J]. 量子电子学报, 2018, 35(02): 225—229.
Liang Qingjiu, Zhou Jinyun. Light homogenization design of digital lithography illumination system based on 365nm LED[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(02): 225—229.
- [18] Mohesh M, Izabela N, Vincent T. Study of the shrinkage caused by holographic grating formation in acrylamide based photopolymer film[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13395—404.
- [19] 朱宁, 郑继红, 申桐, 等. 采用丙烯酸酯双单体的高空间频率透射式体全息H-PDLC光栅的研制[J]. 液晶与显示, 2024, 39(06): 752—760.
Zhu Ning, Zheng Jihong, Shen Tong, et al. Fabrication of high spatial frequency transmission volume holographic H-PDLC gratings using diacrylate double monomers[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2024, 39(06): 752—760.
- [20] Zhao K, Zhang D, Guo J, et al. Controllable two-dimensional asymmetric diffraction grating via vortex light in semiconductor double quantum wells system[J]. IOP Publishing Ltd, 2025, 77(8): 085102—085102.
- [21] Zou Huitian, Piao Mingxu, Zhang Xian, et al. Design of computational single-layer diffractive optical elements in visible light band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(08): 330—341.
- [22] 邹慧田, 朴明旭, 张贤, 等. 可见光波段计算单层衍射光学元件设计[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(08): 330—341.
Zou Huitian, Piao Mingxu, Zhang Xian et al. Design of single-layer diffractive optical elements at visible wavelengths[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(08): 330—341.
- [23] You Y, Chen Z, Nagalingam G, et al. Energy transfer from the liquid crystal bulk to the surface enables dynamic topographies via anisotropic plasticized networks[J]. Advanced Materials Interfaces, 2025, 12(9).