

全息多波干涉的二维聚合物分散液晶光栅的仿真与制备^{*}

许海 蔡佳 鲁思宇 徐梦杰 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)

(2025 年 10 月 17 日收到; 2025 年 11 月 17 日收到修改稿)

聚合物分散液晶光栅具备成本低廉、可大面积制备和快速响应等优势, 在全息波导显示及光互联领域广泛用于分束与耦合器件等. 目前基于聚合物分散液晶材料体系制备的分光器件, 多数研究成果集中于构建产生 2×2 衍射阵列的二维光栅, 在需要多通道、多级次光场调控的场景中适用性受限. 本文通过全息干涉场强分布理论推导, 在有限元仿真软件 COMSOL Multiphysic 中构建对应折射率分布的体全息透射式光栅模型. 结合仿真优化实验中参考光/物光曝光光强比和光栅层厚度等制备参数. 在三波干涉曝光法成功制备具有对称衍射特性一维光栅基础之上, 使用五波干涉曝光法制备出符合设计指标的聚合物分散液晶二维光栅: 实现在 532 nm 波段正入射条件下, 产生 3×3 二维阵列衍射, 1 级衍射角为 18.4° , 单 1 级衍射光分光能量占比均在 10% 以上. 本文实现了多级次、高效的衍射分光目的.

关键词: 聚合物分散液晶, 多波干涉, 二维光栅, 分光器件

DOI: 10.7498/aps.75.20251418

CSTR: 32037.14.aps.75.20251418

1 引言

聚合物分散液晶 (polymer dispersed liquid crystal, PDLC) 材料是通过聚合诱导相分离法, 将液晶分子均匀分散在聚合物网络中的复合材料^[1,2]. 将预聚物溶液置于全息干涉光场中曝光时, 聚合单体和液晶分子根据明暗条纹的分布位置发生两相分离, 形成折射率周期性有序变化的光栅, 即全息聚合物分散液晶 (holographic PDLC, H-PDLC) 光栅^[3]. 目前 PDLC 材料已广泛应用于智能窗、波导显示器件等领域^[4-7]. 在光互联领域, 二维光栅被广泛用作作为光开关、分束和光耦合器件^[8-10]等, 得益于 PDLC 材料电场可调谐和快速响应等特性, 近年来基于该材料制备二维光栅动态调光器件获得广泛关注^[11]. 同时其可用于制备大面积衍射光学元

件, 在大量程二维光栅测量方面颇具研究价值^[12]. 此外, 因其可在薄膜衬底上集成, 亦可以满足柔性二维光栅器件方面的需求^[13].

在二维光栅制备方面, Wu 等^[14]利用掩膜版光刻结合聚合物诱导相分离技术, 在柔性基底上成功制备了二维 PDLC 光栅. 该光栅具备电控低电压驱动、快速响应等特性. 但该方法依赖于定制的物理掩膜版, 设计流程复杂, 同时受限于掩膜版的形貌与精度, 高阶衍射未被充分抑制, 衍射能量分散. Shi 等^[15]利用激光直写技术在碲酸盐玻璃中加工二维光栅, 该方法制备的二维光栅稳定性较好, 但加工成本较高, 难以批量生产, 且衍射效率有待提升. 而 H-PDLC 光栅兼具成本低廉、工艺简单, 可批量生产, 以及较高的衍射效率等优势, 因此在二维光栅的推广与应用方面具有广阔的前景. 但目前相关研究中制备的二维 H-PDLC 光栅所产生的

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 62475158) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

衍射级多为 2×2 衍射阵列, 其余衍射级次分光能量占比低, 在需要多通道、多级次光场调控的场景中适用性受限.

本文提供了一种全息五波干涉方法制备 3×3 阵列衍射的二维 H-PDLC 光栅. 通过全息干涉理论推导, 在有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 中构建对应体全息透射式光栅模型, 其折射率分布与全息干涉场场强分布相匹配. 借助该仿真模型探究制备过程中关键参数的影响规律, 着重分析光栅层厚度及参考光/物光的曝光光强比对不同衍射级次分光占比的调控作用. 并在特定光栅厚度和参考光/物光波曝光光强比下, 利用三波干涉曝光法成功制备具有对称衍射特性、高衍射效率的一维光栅. 在此基础之上, 使用五波干涉曝光方法制备出符合设计指标的 H-PDLC 二维光栅: 实现在 532 nm 波长正入射条件下, 产生 3×3 二维阵列衍射, 1 级衍射角为 18.4° , 单 1 级衍射光分光能量占比均在 10% 以上.

2 基本原理

2.1 H-PDLC 光栅形成机理

含有聚合单体、液晶和光引发剂等成分的预聚物溶液在双波干涉或多波干涉场中曝光时, 相干激光束在液晶盒内形成干涉条纹, 产生明暗相间的光强分布. 在相干亮区发生光聚合反应, 光引发剂吸

收光子后产生活性中心, 引发单体聚合, 形成聚合物网络结构, 由于存在浓度梯度差, 液晶分子被挤压到相干暗区; 相干暗区一般不发生光聚合反应, 暗区单体扩散至亮区继续光聚合反应, 最终形成富聚合物层与富液晶层交替排列、折射率高低变化的周期性光栅结构^[16].

2.2 三波干涉与五波干涉基本原理

采用传统全息双波干涉光路制备 H-PDLC 光栅, 当参考光以 Bragg 角度衍射再现时, 通常光栅的衍射效率达到最大且衍射级只有 0 和 ± 1 级^[17], 如图 1(a) 所示. 而当参考光正入射时, 尽管此时可观察到 0 级和 ± 1 级衍射, 但衍射效率显著降低, ± 1 级衍射分光能量往往低于中间 0 级. 为此可以考虑采用对称式三波干涉光路制备光栅, 此时当参考光正入射时, 会将原两侧物光衍射再现出来, 即出现 0 和 ± 1 级衍射光, 同时 ± 1 级衍射分光占比高于中间 0 级, 从而实现对称衍射特性、并且在能量分布上 ± 1 级衍射光得以有效利用.

采用对称入射三波干涉光路制备光栅和参考光衍射再现, 光束配置如图 1(b) 所示, 分别以物光波 1、参考光波和物光波 2 来标记三束平面波相干光. 设定三个平面波的波矢位于 x - z 平面, 参考光波和两束物光波与液晶盒所在平面的法线的交角分别为 θ_0 , θ_1 和 θ_2 , θ_{s0} , θ_{s1} 和 θ_{s2} 分别为参考光波和两束物光波在预聚物内的传播矢量与 z 轴的

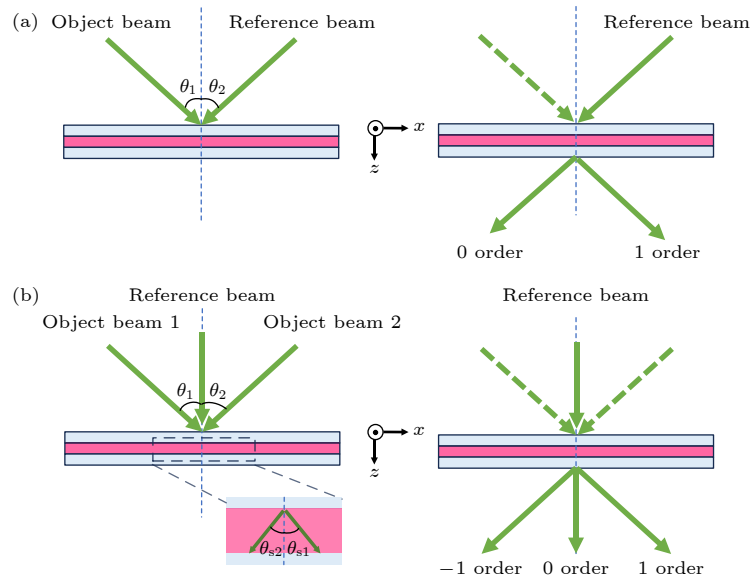


图 1 全息光栅干涉记录与衍射再现 (a) 双波干涉记录与衍射再现示意图; (b) 三波干涉记录与衍射再现示意图

Fig. 1. Holographic grating interference recording and diffraction reconstruction: (a) Schematic diagram of two-wave interference recording and diffraction reconstruction; (b) schematic diagram of three-wave interference recording and diffraction reconstruction.

夹角, 由斯涅耳定律有

$$\frac{\sin \theta_{s0}}{\sin \theta_0} = \frac{\sin \theta_{s1}}{\sin \theta_1} = \frac{\sin \theta_{s2}}{\sin \theta_2} = \frac{n_a}{n_g}, \quad (1)$$

其中 n_a 为空气折射率, n_g 为液晶盒折射率, 由于是完全对称三波干涉光路, 则会有 $\theta_{s1} = -\theta_{s2}$, $\theta_{s0} = 0$, 可设定物光波 1 和物光波 2 振幅 $\tilde{E}_{x+} = \tilde{E}_{x-} = \tilde{E}_1$, 中间参考光波振幅 $\tilde{E}_{x0} = \tilde{E}_0$, k_{x1} , k_{x0} , k_{x2} 为物光波 1、参考光波和物光波 2 在 x 方向波矢分量, k_{z1} , k_{z0} , k_{z2} 为物光波 1、参考光波和物光波 2 在 z 方向波矢分量, 总复振幅表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{\text{total}} = & \tilde{E}_{x+} \exp(ik_{x1}x + ik_{z1}z) + \tilde{E}_{x0} \exp(ik_{x0}x + ik_{z0}z) \\ & + \tilde{E}_{x-} \exp(ik_{x2}x + ik_{z2}z) = \tilde{E}_1 \exp(ik_x x + ik_z z) \\ & + \tilde{E}_0 \exp(ik_z z) + \tilde{E}_1 \exp(-ik_x x + ik_z z), \end{aligned} \quad (2)$$

其中数值上 $k_x = n_g k_0 \sin \theta_{s1} = n_g 2\pi/\lambda_0 \sin \theta_{s1}$, $k = n_g k_0 = n_g 2\pi/\lambda_0$, $k_z = n_g k_0 \cos \theta_{s1} = n_g 2\pi/\lambda_0 \cos \theta_{s1}$, λ_0 为干涉记录光源在真空中波长.

由 $e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} = 2 \cos \varphi$ 化简可得

$$\tilde{E}_{\text{total}} = \tilde{E}_0 \exp(ik_z z) + 2\tilde{E}_1 \exp(ik_z z) \times \cos(k_x x). \quad (3)$$

光强分布如下式所示:

$$\begin{aligned} I(x, z) = & \left| \tilde{E}_{\text{total}} \right|^2 = \tilde{E}_0^2 + 4\tilde{E}_1^2 \cos^2(k_x x) \\ & + 4\tilde{E}_0 \tilde{E}_1 \cos(k_x x) \times \cos(k_z z - k_z z). \end{aligned} \quad (4)$$

与三波干涉类似, 使用五波干涉光路制备光栅, 相干光束配置如图 2(a) 所示, 中间参考光波 1 沿 z 轴入射, 物光波 2 和 4 在 x - z 平面关于 z 轴对称入射, 物光波 3 和 5 在 y - z 平面关于 z 轴对称入射, 物光波 2—5 在平面内与 z 轴夹角大小保持一致. 当参考光正入射衍射再现时, 将会产生 3×3 二维阵列衍射, 如图 2(b) 所示. 设定中间参考光波的振幅为 E_0 , 物光波 2—5 的振幅均为 E_1 .

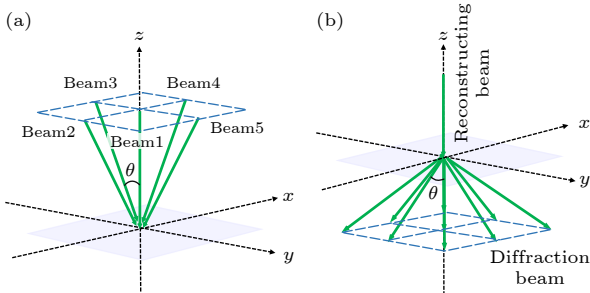


图 2 五波干涉光路制备二维光栅 (a) 相干光束配置; (b) 产生二维衍射阵列

Fig. 2. Five-wave interference optical path for the fabrication of two-dimensional grating: (a) Coherent beam configuration; (b) generating a two-dimensional diffraction array.

此时总复振幅表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{\text{total}} = & \tilde{E}_1 \exp(ik_x x + ik_z z) + \tilde{E}_1 \exp(-ik_x x \\ & + ik_z z) + \tilde{E}_0 \exp(ik_z z) + \tilde{E}_1 \exp(ik_y y + ik_z z) \\ & + \tilde{E}_1 \exp(-ik_y y + ik_z z). \end{aligned} \quad (5)$$

场强分布表达式为

$$\begin{aligned} I(x, y, z) = & \left| \tilde{E}_{\text{total}} \right|^2 = \tilde{E}_0^2 + 4\tilde{E}_1^2 [\cos^2(k_x x) \\ & + \cos^2(k_y y) + 2 \cos(k_x x) \cos(k_y y)] \\ & + 4\tilde{E}_0 \tilde{E}_1 \cos[(k_z - k_z z)] [\cos(k_x x) \\ & + \cos(k_y y)], \end{aligned} \quad (6)$$

式中, k_x , k 和 k_z 含义同 (2) 式.

光栅形成之后, 存在稳定状态, 聚合物区域折射率一定, 记为 n_p , 液晶区域的折射率记为 n_{LC} . 光栅内部随光场场强分布形成周期性折射率调制, 折射率分布式如下式所示:

$$\begin{cases} n(x, y, z) = n_p + \Delta n \times I(x, y, z), \\ \Delta n = n_{LC} - n_p. \end{cases} \quad (7)$$

3 建模与仿真

本文中所使用的仿真软件为 COMSOL Multiphysic 6.0, 其作为经典有限元仿真软件, 可利用波动光学模块, 通过“电磁波, 频域”接口, 设置 Floquet 周期性边界条件, 在一个单位光栅中计算 S 参数, 并进一步分析各个衍射级次的反射率和透射率. 模拟的光栅工作波长为 532 nm, ± 1 级衍射角度为 18.4° , 网格划分精度为单位波长内至少有 5 个网格划分单元, 以保证计算结果收敛. 二维光栅相关设计仿真指标如下表 1 所列.

表 1 二维光栅参数设计指标

Table 1. Design specifications of the two-dimensional grating parameters.

二维光栅各参数项	设计指标
光栅类型	透射式
工作波长	532 nm
入射方位角/仰角	$0^\circ / 0^\circ$
1级衍射角	18.4°
正交方向1级衍射分光占比	$\geq 10\%$
45° 方向1级衍射分光占比	$\geq 10\%$

3.1 三波干涉光栅建模与仿真

H-PDLC 光栅分为体光栅和面光栅两类, 通常使用 Q 因子来区分, 其表达式为

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 h}{n_{av} \Lambda^2}. \quad (8)$$

式中, h 为光栅厚度; n_{av} 为记录材料的平均折射率; Λ 为光栅周期. 当 $Q \gg 1$ 时, H-PDLC 光栅为体光栅, 本文研究对象均为该类光栅.

结合 (4) 式和 (6) 式可知, 光栅在 x 和 z 方向均出现周期性折射率调制. 若控制光栅厚度改变 z 方向光波与周期性结构相互作用的长度, 同时控制曝光时三束光光强比以改变式中余弦项系数, 进而改变折射率调制轮廓的具体波形, 都将影响衍射再现时能量在 0 级与 ± 1 级间的分配比例, 此时有望在一维方向上实现 ± 1 级高分光占比的衍射效果. 对此需要仿真予以验证, 同时这也是模拟符合设计指标二维光栅的基础. 由于三波干涉光场分布只涉及到 x, z 两个方向上的波矢, 我们在软件中构建 2D 模型: 模型两侧为液晶盒层, 折射率设为 n_g , 取值 1.50. 模型中间区域对应 H-PDLC 光栅折射率高低变化周期性结构. 同时根据 (4) 式可知 x 方向干涉条纹周期 $\Lambda_x = \lambda_0 / (n_g \sin 18.4^\circ) = 1.12 \mu\text{m}$, 则设置单位光栅宽度 $d = \Lambda_x$.

对于聚合单体选择的仿真对象为丙烯酸酯类单体 PDDA, 折射率为 1.490; 液晶分子选择的仿真对象为向列相液晶 TEB50, 折射率 n_o 为 1.519, n_e 为 1.711. 由于富聚合物区液晶的体积分数小于 5%^[18], 在形成光栅后计算聚合物区的折射率时, 可不考虑包裹在聚合物内的液晶分子的影响, 富聚合物区的折射率可近似认为与纯聚合物的折射率相等, 则设定 $n_p = 1.490$. 在未施加电场时, 光栅中液晶微滴内的液晶分子通常为轴向、径向与双极等多种构型的混合取向, 可认为液晶微滴内的液晶分子取向趋向无序性^[19], 此时液晶的有效折射率可以表示为

$$\bar{n}_{LC} = \sqrt{(2n_o^2 + n_e^2)/3}. \quad (9)$$

据相关文献可知, 在光栅的富液晶区域中聚合物的体积分数为 15%—20%^[20]. 富液晶区域液晶的折射率表示为

$$n_{LC} = \sqrt{\varphi_{LC} \bar{n}_{LC}^2 + \varphi_P n_p^2}, \quad (10)$$

式中, φ_{LC} 和 φ_P 分别为液晶和聚合物浓度, 此处 φ_{LC} 取值 0.85, φ_P 取值 0.15, 计算得到 $n_{LC} = 1.570$, 此处取值将影响 Δn 取值, 理论上折射率差 Δn 越大时, 光栅会具有更高的衍射效率. 后续仿真计算结果和实验结果将协同验证该取值是否合理. 对

(7) 式中光场场强分布式做归一化数学处理, 以约束折射率分布取值上下限为 n_{LC} 和 n_p :

$$\begin{cases} I_{\text{norm}}(x, y, z) = \frac{I(x, y, z) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \\ n_{\text{norm}}(x, y, z) = n_p + \Delta n \times I_{\text{norm}}(x, y, z), \end{cases} \quad (11)$$

式中, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为光场场强最大值和最小值, 提前由 MATLAB 编写三波干涉光场代码计算得出. 当 $I(x, y, z) = I_{\max}$ 时, $n_{\text{norm}}(x, y, z) = n_{LC}$; 当 $I(x, y, z) = I_{\min}$ 时, $n_{\text{norm}}(x, y, z) = n_p$. 在“电磁波, 频域”接口中, 对模型中间区域新建波动方程, 选择电位移场-折射率模型. 在自定义折射率中输入 (11) 式中折射率分布式, 可构建起一维 H-PDLC 光栅折射率分布简化模型. 两侧玻璃层分别设置入射和出射端口边界条件, 在仿真过程中添加并计算所有衍射级次, 端口会吸收对应级次波. 通过端口将入射光源设置为 532 nm, p 偏振垂直入射, 以模拟实验中参考光衍射再现过程中 532 nm 激光正入射下的衍射行为.

在仿真过程中, 基于干涉场强表达式中参考光与物光的复振幅关系, 可将二者的振幅比转化为曝光光强比. 并研究 0 级和 ± 1 级衍射分光占比随参考光/物光曝光光强比变化趋势. 当光栅厚度在 10 μm 与 25 μm 条件下, 仿真计算结果如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 可以发现当调控曝光光强比至合适区间, 将出现 ± 1 级衍射效率超过 0 级情况. 其中当光栅厚度为 25 μm 、曝光光强比在 1.0 条件下, ± 1 级衍射分光占比达到峰值, 入射光几乎被完全衍射至 ± 1 级.

此时在该参数下 H-PDLC 光栅模型 x - z 截面的折射率分布如图 4(a) 所示. 计算得到的归一化电场如图 4(b) 所示, 再现参考光波经过体光栅周期性结构调制时, 光场经相干叠加产生强弱相间的场强分布, 在下侧玻璃层出射区域形成衍射. 双光束曝光制备体全息光栅时, 按照 Kogelnik 耦合波理论, 透射型光栅存在“最优厚度” h_0 , 理论上衍射效率 η 可达 100%. 光栅厚度第一次达到该数值 h_0 之前, 衍射效率随厚度增加而上升, 但从整体范围来看衍射效率 η 随光栅厚度呈现周期振荡变化^[21]. 而在三波干涉中存在多光束相位耦合问题, 光栅厚度对于衍射效率影响更加复杂, 存在多处极值, 可以借助有限元仿真软件进行分析. 若控制曝光光强比条件为 1.0, 仿真结果图 4(b) 表明光栅厚度在 10 和 25 μm 处时, 光栅衍射效应显著增强.

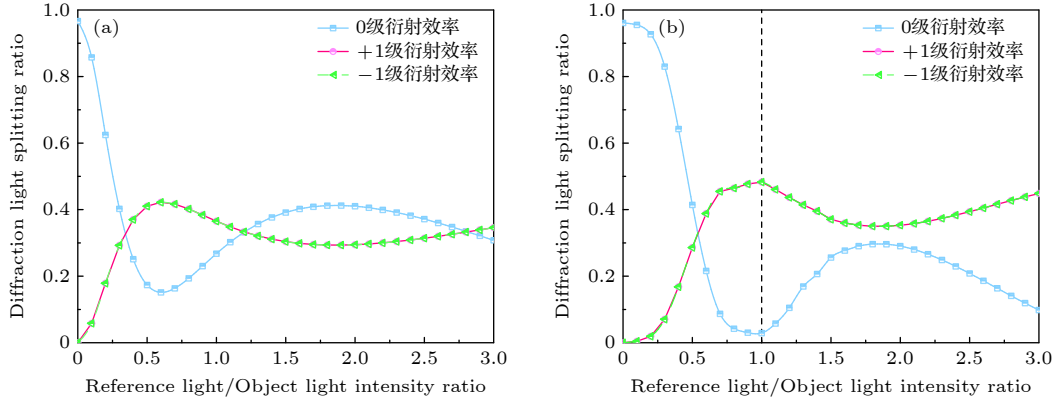


图 3 三波干涉一维光栅衍射分光占比随参考光/物光曝光光强比变化 (a) 厚度 $10\ \mu\text{m}$; (b) 厚度 $25\ \mu\text{m}$

Fig. 3. Diffraction beam splitting ratio versus the reference/object beam intensity ratio for three-wave interference two-dimensional grating: (a) $10\ \mu\text{m}$ thickness; (b) $25\ \mu\text{m}$ thickness.

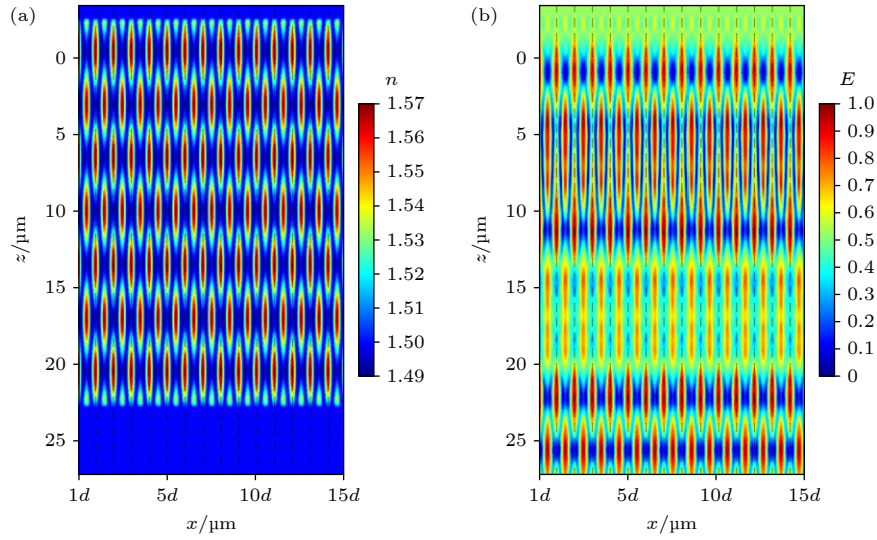


图 4 光栅厚度 $25\ \mu\text{m}$ 、曝光光强比 1.0 条件下一维光栅仿真 (a) 光栅折射率分布图; (b) 衍射再现归一化电场图

Fig. 4. Simulation of one-dimensional grating with thickness of $25\ \mu\text{m}$ and beam intensity ratio of 1.0: (a) Grating refractive index distribution structure diagram; (b) normalized electric field diagram of diffraction reconstruction.

3.2 五波干涉光栅建模与仿真

理论上可以考虑利用对称五波干涉的方法, 通过一次性曝光获得符合设计要求的二维 H-PDLC 光栅. 对此, 仍然需要仿真来验证该方法是否可行. 此时干涉光场分布同时涉及到 x , y 和 z 三个方向上的波矢, 因此需要构建对应 3D 单位光栅模型, x 和 y 方向均设置 Floquet 周期性边界条件. 并按照前述新建波动方程的方法, 结合五波干涉理论中折射率分布式构建二维光栅模型. 将入射光源仍设置为 $532\ \text{nm}$ 下的 p 偏振垂直入射. 在 $25\ \mu\text{m}$ 光栅厚度条件下, 各级衍射效率随曝光光强比变化的仿真结果如图 5 所示.

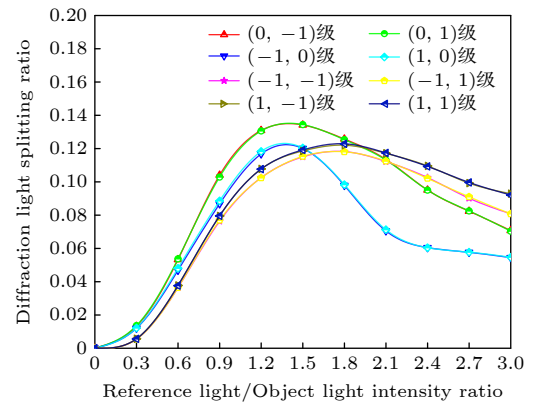


图 5 五波干涉二维光栅衍射分光占比随参考光/物光曝光光强比变化

Fig. 5. Diffraction beam splitting ratio versus the reference/object beam intensity ratio for five-wave interference two-dimensional grating.

可以发现,当参考光/物光曝光光强比为 1.0—1.8 时,模拟的衍射效果达成二维光栅设计指标.特别地,当曝光光强比为 1.5 时,对称衍射级 $(-1, 0)$ 级和 $(1, 0)$ 级与 45° 方向 4 个 1 级衍射分光占比基本一致,而另外一组对称衍射级 $(0, -1)$ 级和 $(0, 1)$ 级衍射分光占比数值略高于其他衍射级,预测实验中将出现“整体均匀分光、正交方向一组衍射级稍亮”的二维衍射效果.

当光栅厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、曝光光强比为 1.5,此时 x - y 平面折射率分布如图 6(a) 所示.由于干涉时存在两组不共平面相干光,光栅内将形成类似光子晶体的结构, x 和 y 方向周期 $\Lambda_x = \Lambda_y = d = \lambda_0 / (n_g \sin 18.4^\circ)$.再现参考光波同时经过 x 和 y 方向周期性结构调制时,将会形成二维衍射,在出射层 x - y 平面归一化衍射电场图如图 6(b) 所示.

4 实验制备

4.1 三波干涉光栅实验

我们搭建三波干涉光路制备 H-PDLC 光栅样品来验证一维光栅模型构建是否可靠,制备光路设计图和实物图如图 7 所示.考虑到光栅厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 时,光栅 ± 1 级峰值衍射效率较高,且实验制备过程中厚度误差较 $10\text{ }\mu\text{m}$ 影响也较小,因此我们选择在 $25\text{ }\mu\text{m}$ 厚度下进行实验验证.

使用半导体激光光源,记录波长为 532 nm ,光束经小孔与显微物镜滤波扩束后,由透镜准直为平行光束,通过偏振分光棱镜 1 和偏振分光棱镜 2 分为三束光,调控反光镜 1、反光镜 2 和反光镜 3 控

制三束光干涉角度,调控半波片 1 和半波片 2 控制三束干涉光强度,调控半波片 3 使三束光为 p-p-p 线偏振光干涉.制备相应厚度液晶盒后,灌入已经配好的预聚物溶液(由聚合单体 PDPA、液晶 TEB50、交联稀释剂 NVP、光引发剂 RB 以及协引发剂 NPG 按照质量比 52.9%:33.8%:10.0%:0.8%:2.5% 混合而成),再置于全息光路中曝光.根据此前课题组内有关工作,该预聚物配方在曝光总光强为 $15\text{ mW}/\text{cm}^2$ 和曝光时间为 180 s 时,制备得到的光栅形貌良好且相分离结构清晰,光栅衍射效率高且趋于稳定^[22].为避免总光强差异对实验结果产生影响,控制在合光处曝光总光强和曝光时间固定为上述数值.由相同预聚物溶液制备同一批光栅样品,调控参考光与物光波曝光光强比例从 0.5:1 变化至 3:1,进行 6 组实验.随后测试其衍射分光占比,数据如图 8(a) 所示,可以发现各级衍射分光占比变化趋势与仿真基本一致.其中在曝光光强比为 1.0 时所制备的一维光栅样品分光实验结果如图 8(b) 所示.

在不同曝光光强比例条件下,经归一化处理后的各级衍射分光占比仿真结果和样品实测数值(均值)对比如表 2 所列.各组实测 ± 1 级衍射分光占比数值略低于仿真结果,但在合理范围之内.分析原因可能是由于在制备的光栅中,富液晶区域中聚合物的体积分数大于 15%,甚至可能超过 20%,因此折射率差 Δn 小于仿真设定数值,光栅实际衍射效率有所下降.同时,测试了该 6 组实验样品的 1 级衍射角实际值,均在 $18.4^\circ \pm 0.5^\circ$ 之间,与目标设计值 18.4° 具有较高一致性.

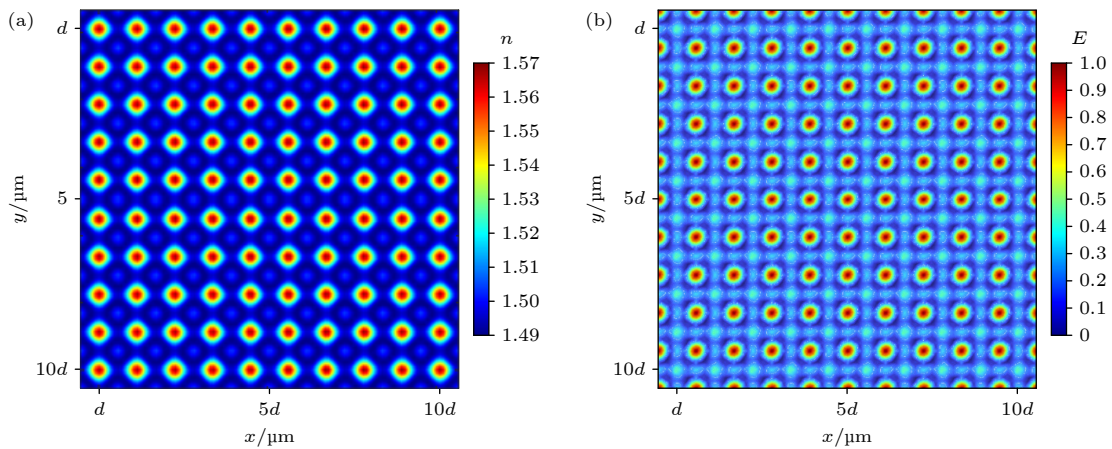


图 6 光栅厚度 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、曝光光强比 1.5 条件下二维光栅仿真 (a) 光栅折射率分布图; (b) 衍射再现归一化电场图

Fig. 6. Simulation of two-dimensional grating with thickness of $25\text{ }\mu\text{m}$ and beam intensity ratio of 1.5: (a) Grating refractive index distribution diagram; (b) normalized electric field diagram of diffraction reconstruction.

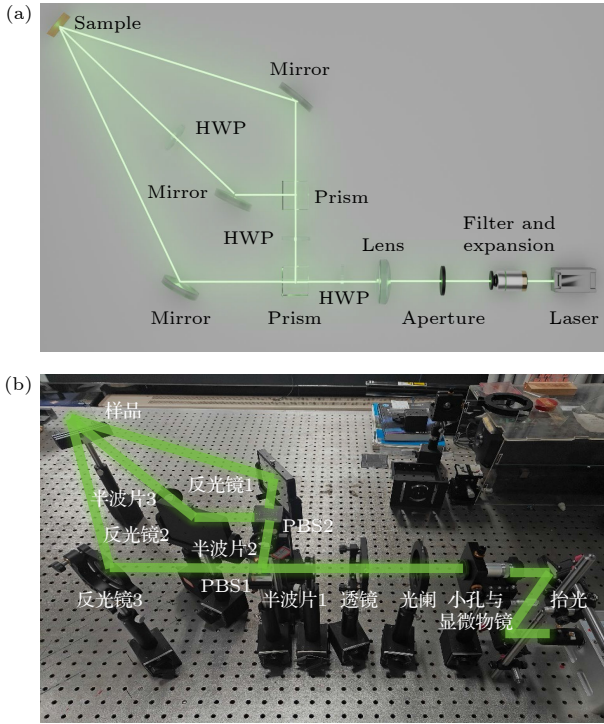


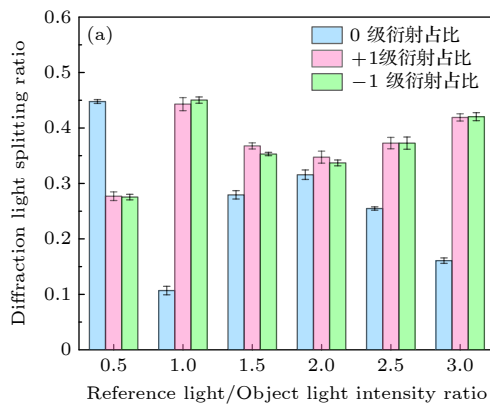
图 7 三波干涉光路图 (a) 设计图; (b) 实物图

Fig. 7. Three-wave interference optical path diagram: (a) Schematic design diagram; (b) physical prototype diagram.

表 2 仿真与制备样品测试数据对比

Table 2. Comparison between simulation results and fabricated sample test data.

曝光光强比	仿真数据/% (0级/+1级/-1级)	测试数据/% (0级/+1级/-1级)
0.5:1	42.0/29.0/29.0	44.8/27.7/27.5
1:1	2.8/48.6/48.6	10.7/44.3/45.0
1.5:1	25.8/37.1/37.1	27.9/36.8/35.3
2:1	29.2/35.4/35.4	32.6/34.7/33.7
2.5:1	21.0/39.5/39.5	25.4/37.2/37.4
3:1	9.8/45.1/45.1	16.1/41.9/42.0



4.2 五波干涉光栅实验

使用光学玻璃制备的四棱台分光棱镜, 进行五波干涉二维 H-PDLC 光栅制备实验. 整体光路示意图如图 9(a) 所示, 激光束通过偏振片调控为 p 偏振光, 经透镜准直后, 由四棱台分光棱镜实现干涉: 光束从空气中垂直入射棱台后, 中间部分光束 1 从棱台顶面经底面沿原光路 (z 轴方向) 直接透射. 在 $x-z$ 平面, 部分光束 2 和 4 经过对称分布的棱台斜面折射后进入棱台内, 再通过棱台底部二次折射后以设定角度出射. 在 $y-z$ 平面, 另外两部分光束 3 和 5 以相同方式出射. $x-z$ 平面和 $y-z$ 平面的棱台分光示意图如图 9(b) 和图 9(c) 所示. 棱台材料折射率、棱台斜面倾角与 1 级衍射角设计指标相匹配, 使得五束相干光在样品曝光处形成特定空间周期干涉场.

实验过程中调控激光光束从分光棱镜出射时的参考光/物光的光强比例为 1.5:1, 控制液晶盒厚度为 25 μm , 仍控制在合光处曝光总光强为 15 mW/ cm^2 , 曝光时间为 180 s. 样品制备完成后测试各级衍射分光占比, 衍射再现分光图如图 10 所示, 归一化处理后的各级衍射分光占比仿真结果和样品实测数值对比如表 3 所列. 测试结果表明: 实现了单 1 级衍射分光占比均超过 10% 的二维衍射效果, 符合设计指标, 并与仿真结果较一致.

在上述条件下制备样品的 $x-y$ 截面电子显微镜扫描图如图 11 所示. 由图 11 可以发现, 该二维光栅形貌良好, 在 x 和 y 方向均形成了较为清晰的周期性结构, 与为实现多级次、高效的二维阵列衍射效果提供了微观结构基础. 并且 x 和 y 方向实际周期均在 1.1—1.2 μm 之间, 与理论周期值 1.12 μm 偏差较小.

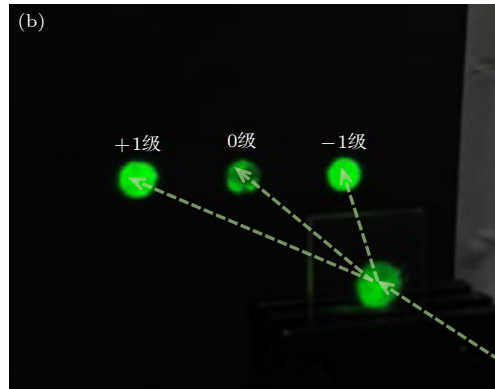


图 8 一维光栅实验结果 (a) 一维光栅样品测试数据; (b) 曝光光强比为 1.0 条件时分光图

Fig. 8. Experimental results of one-dimensional grating: (a) Sample test data; (b) beam splitting diagram under the condition of 1.0 reference/object beam intensity ratio.

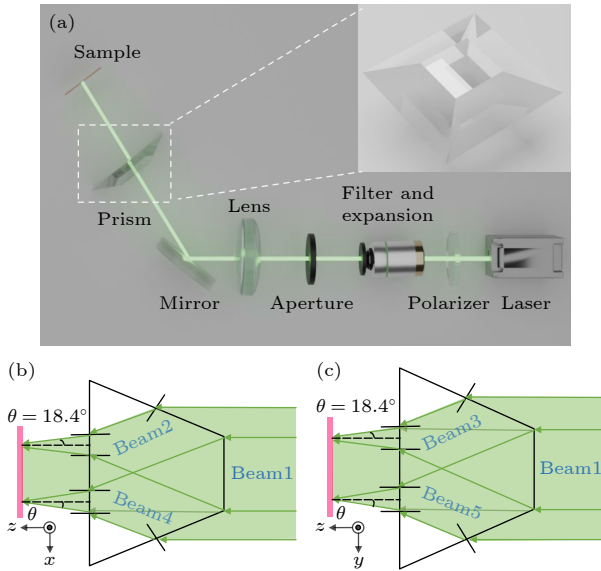


图 9 五波干涉光路制备光栅 (a) 整体光路图; (b) 棱台分光 x - z 平面示意图; (c) 棱台分光 y - z 平面示意图

Fig. 9. Optical path for five-wave interference grating fabrication: (a) Overall optical path diagram; (b) schematic diagram of prism beam splitting in the x - z plane; (c) schematic diagram of prism beam splitting in the y - z plane.

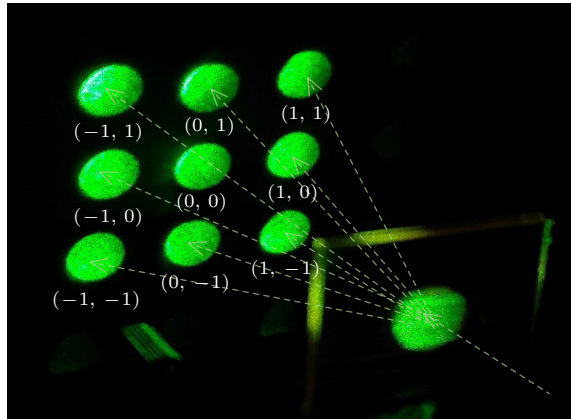


图 10 五波干涉制备样品分光图

Fig. 10. Beam splitting diagram of five-wave interference sample.

表 3 仿真与制备样品测试数据对比

Table 3. Comparison between simulation results and fabricated sample test data.

衍射级次	仿真数据/%	测试数据/%
(0, 0)	2.6	10.4
(0, -1)/(0, 1)	13.4/13.4	12.0/12.4
(-1, 0)/(1, 0)	12.0/12.0	11.0/11.1
(-1, -1)/(-1, 1)	11.8/11.8	10.8/11.0
(1, -1)/(1, 1)	11.5/11.5	10.5/10.8

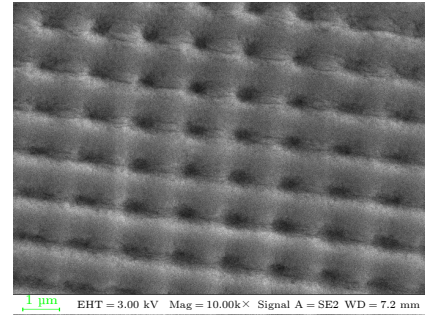


图 11 制备样品电子显微镜扫描图

Fig. 11. Scanning electron microscope image of fabricated sample.

5 结 论

本文基于 H-PDLC 光栅形成机理和全息多波干涉理论, 在有限元仿真软件 COMSOL Multiphysic 中构建对应体全息透射式光栅模型, 其折射率分布与全息干涉场场强分布相匹配. 结合仿真结果, 在光栅厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、参考光/物光曝光光强比为 1.0 条件下, 采用三波干涉光路制备一维光栅样品, ± 1 级衍射分光占比均超过 44%, 验证了所建模型的适用性. 在一维光栅基础上, 利用四棱台分光棱镜构建五波干涉光路, 在光栅厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 以及参考光/物光曝光光强比为 1.5 条件下, 成功制备出符合设计指标的二维光栅样品. 实现了 532 nm 波段正入射下的 3×3 二维阵列衍射, 1 级衍射角为 18.4° , 正交与 45° 方向单 1 级衍射分光占比均超 10%. 突破传统 2×2 衍射阵列二维光栅的局限, 达成了多级次高效的分光目标.

参考文献

- [1] Wang Y M, Mo S P, Wang H, Qiu L Z, Xu M, Lu H B 2024 *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* **39** 1285 (in Chinese) [王雨蒙, 莫顺聘, 王晗, 邱龙臻, 徐苗, 陆红波 2024 液晶与显示 **39** 1285]
- [2] Yamaguchi M, Matsukizono H, Okumura Y, Kikuchi H 2024 *Molecules* **29** 4837
- [3] Li W C, Liu Y G, Xuan L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046101 (in Chinese) [李文萃, 刘永刚, 宣丽 2011 物理学报 **60** 046101]
- [4] Zhang Z W 2025 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science and Technology Beijing) (in Chinese) [张作为 2025 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [5] Chen H P, Nie Y J, Li G C, Wei Y H, Hu H, Lu G H, Li S T, Zhu Y W 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 177701 (in Chinese) [陈昊鹏, 聂永杰, 李国倡, 魏艳慧, 胡昊, 鲁广昊, 李盛涛, 朱远惟 2023 物理学报 **72** 177701]
- [6] Khalid M, Shanks K, Ghosh A, Tahir A, Sundaram S, Mallick T K 2021 *Renewable Energy* **164** 96
- [7] Cheng D W, Ni D W, Lü X, Wang Y D, Yang T, Wang Y T

- 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0222001 (in Chinese) [程德文, 倪栋伟, 吕鑫, 王永东, 杨通, 王涌天 2024 *光学学报* **44** 0222001]
- [8] Wu K M, Sun J J, Meng F X, Fan M, Kong X M, Cai M L, Zhao T Z, Yang C Y, Xin Y B, Xing J, Xing H Y, Ye W J 2022 *J. Mol. Liq.* **353** 118664
- [9] Kang S, Zhou B, Xie Y, Wang J, Jia W, Zhou C 2024 *Opt. Express* **32** 20589
- [10] He W C, Geng M M, Feng Y, Lai M B, Liu Q, Zhang Z R 2023 *Opt. Commun. Technol.* **47** 8 (in Chinese) [何万才, 耿敏明, 冯瑶, 赖明彬, 刘婧, 张振荣 2023 *光通信技术* **47** 8]
- [11] He Y M, Jin X Y, Li Z M, Hu X W, Li M, Zhou G F 2022 *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* **37** 1052 (in Chinese) [贺雅梅, 靳晓宇, 黎梓铭, 胡小文, 李明, 周国富 2022 *液晶与显示* **37** 1052]
- [12] Yin Y F, Liu Z W, Jirigalantu, Yu H Zhu, Wang W, Li X T, Bao H, Li W H, Hao Q 2020 *Chin. Opt.* **13** 1224 (in Chinese) [尹云飞, 刘兆武, 吉日嘎兰图, 于宏柱, 王玮, 李晓天, 鲍赫, 李文昊, 郝群 2020 *中国光学* **13** 1224]
- [13] Huang C Y, Lin S H 2021 *Polymers* **13** 2906
- [14] Wu K M, Sun J J, Meng F X, Fan M, Kong X M, Cai M L, Zhao T Z, Yang C Y, Xin Y B, Xing J, Xing H Y, Ye W J 2022 *J. Mol. Liq.* **353** 118664
- [15] Shi J L, Li M, Yan M F, Zhan Q S, Zou Q S, Dai S X, Zhang P Q 2025 *Opt. Laser Technol.* **183** 112243
- [16] Zhu N, Zheng J H, Shen T, Li K, Liu Y R 2024 *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* **39** 752 (in Chinese) [朱宁, 郑继红, 申桐, 李科, 刘悠嵘 2024 *液晶与显示* **39** 752]
- [17] Liu Y R 2021 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology) (in Chinese) [刘悠嵘 2021 博士学位论文 (上海: 上海理工大学)]
- [18] Meng S, Kyu T, Natarajan L V, Tondiglia V P, Sutherland R L, Bunning T J 2005 *Macromolecules* **38** 4844
- [19] Gui K, Zheng J H, Wang K N, Li D P, Zhuang S L 2015 *J. Nanomater.* **2015** 298913
- [20] Shen C, Kyu T 1995 *J. Chem. Phys.* **102** 556
- [21] Li S B, Yang M 2011 *J. Southwest univ. (Nat. Sci. Ed.)* **33** 67 (in Chinese) [李松柏, 杨敏 2011 *西南大学学报 (自然科学版)* **33** 67]
- [22] Li K, Cai J, Lu S Y, Xu H, Hu H F, Zheng J H 2025 *Acta Photonica Sin.* **54** 0605001 (in Chinese) [李科, 蔡佳, 鲁思宇, 许海, 胡海峰, 郑继红 2025 *光子学报* **54** 0605001]

Simulation and preparation of two-dimensional polymer-dispersed liquid crystal gratings via holographic multi-beam interference*

XU Hai CAI Jia LU Siyu XU Mengjie ZHENG Jihong†

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(Received 17 October 2025; revised manuscript received 17 November 2025)

Abstract

Polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) gratings, as an emerging optical material, have significant advantages such as low fabrication cost, suitability for large-area processing, and rapid electro-optic response. They show great potential in holographic waveguide displays and optical interconnection systems, where they are often used as key beam-splitting and coupling components. However, most of current beam-splitting devices based on PDLC materials are limited to generating 2×2 diffraction arrays, which greatly restricts their ability to achieve multi-channel and multi-order light field modulation, thereby failing to meet the growing demands for high-dimensional optical information processing.

To overcome this limitation, this study proposes a fabrication scheme for two-dimensional PDLC gratings based on holographic multi-beam interference. First, starting from holographic interference theory, we rigorously derive the light intensity distribution function of the multi-beam interference field. Second, a physical model of a volume holographic transmission grating with a refractive index distribution matching the interference field intensity is constructed using the finite element analysis software COMSOL Multiphysics. Utilizing this model, we simulate and optimize the final diffraction performance by changing key fabrication parameters, such as the exposure intensity ratio between the reference and object beams and the grating layer thickness.

During the experimental validation phase, we successfully fabricate a one-dimensional PDLC grating by

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62475158).

† Corresponding author. E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

using a symmetrical three-wave interference exposure method. Under normal incidence with a 532 nm laser, the fabricated one-dimensional PDLC grating exhibits symmetric diffraction, with both first-order beams showing a diffraction efficiency exceeding 44%, thereby preliminarily verifying the reliability of the model. On this basis, we further design an innovative five-wave interference exposure setup. Using a custom-made quadrilateral pyramid beam splitter, we achieve five-beam interference and successfully prepare a two-dimensional PDLC grating that meets the design specifications. The test results demonstrate that under normal incidence at 532 nm, this two-dimensional grating produces a 3×3 two-dimensional diffraction array. The 1st-order diffraction angle is 18.4° , and the beam-splitting energy ratio of each single 1st-order diffracted light exceeds 10%, achieving efficient energy distribution.

Keywords: polymer-dispersed liquid crystal, multi-wave interference, two-dimensional grating, beam splitting device.

DOI: [10.7498/aps.75.20251418](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251418)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251418](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251418)

全息多波干涉的二维聚合物分散液晶光栅的仿真与制备

许海 蔡佳 鲁思宇 徐梦杰 郑继红

Simulation and preparation of two-dimensional polymer-dispersed liquid crystal gratings via holographic multi-beam interference

XU Hai CAI Jia LU Siyu XU Mengjie ZHENG Jihong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 1 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251418

CSTR: 32037.14.aps.75.20251418

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251418>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚合物分散液晶薄膜的极化特性及其对电光性能的影响

Polarization characteristics of polymer dispersed liquid crystal films and their effects on electro-optical properties

物理学报. 2023, 72(17): 177701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230664>

利用全息法在偶氮聚合物薄膜中记录涡旋光场

Recording optical vortices in azo polymer films by applying holographic method

物理学报. 2021, 70(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201496>

聚合物内封装层辅助空气中钙钛矿模组器件制备及其光电特性

Preparation and optoelectronic characteristics of perovskite module devices in air assisted by polymer inner packaging layer

物理学报. 2023, 72(24): 248802 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231055>

导热高分子聚合物研究进展

Research progress of polymers with high thermal conductivity

物理学报. 2022, 71(2): 023601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211876>

聚合物衬底上微纳物体的激光捕获及操控

Laser trapping and manipulation of micro/nano-objects on polymer substrates

物理学报. 2025, 74(8): 088703 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241654>

空间调制的驱动外场下活性聚合物的动力学行为

Dynamic behavior of active polymer chain in spatially-modulated driven field

物理学报. 2022, 71(24): 240501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221367>