

反射式光取向液晶偏振体全息柱透镜的特性*

马陈文 陈芳芳 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)

(2024 年 12 月 30 日收到; 2025 年 1 月 27 日收到修改稿)

光取向液晶技术是利用偏振光照射来实现液晶分子的定向排列, 该技术可以研制成偏振体全息光栅, 具有偏振和体全息选择特性, 且作为光耦合元件在光学波导及扩瞳输出方面有广泛应用前景. 本文报道了一种采用光控取向技术与偏振离轴全息光路相结合的方法, 制备了光斑直径为 2 cm 的液晶偏振体全息柱透镜. 实验过程中可通过控制曝光角度来获得所需光栅周期变化范围, 实现红绿蓝 RGB 三色光入射不同光栅周期下的衍射角度相同. 结果表明, 在 1721.2—5346.5 nm 的光栅周期变化范围内, 当 RGB 三色光分别入射至光栅周期为 3147, 2649.1, 2275.6 nm 位置上时, 所测得的衍射角度均为 11.59° , 实际衍射角度与理论衍射角度的误差不超过 $\pm 0.5^\circ$; 在 532 nm 右旋圆偏光下, 正入射的衍射效率达 90.6%, 满足布拉格条件的斜入射衍射效率为 84.4%; 此外, 通过实现光斑的一维扩束, 初步验证了 PVLS 在彩色波导领域应用的可行性.

关键词: 光控取向, 液晶, 变间距偏振光栅, 光波导**PACS:** 61.30.Gd, 42.79.Gn**DOI:** 10.7498/aps.74.20241794**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241794

1 引言

光取向液晶技术是一种先进的液晶取向技术, 它通过偏振光照射实现液晶分子的定向排列, 从而实现对液晶显示和其他应用的精细控制. 1977 年, 由 Kvasnikov 等^[1]发现, 他们观察到偏振光可以诱导聚乙烯肉桂酸酯膜的双折射. 随后, 1988 年 Ichimura 等^[2]报道了通过光化学方法调节液晶的排列模式. 1991 年, Gibbons 等^[3]利用偏振激光实现了液晶的表面介导排列. 这些研究为光取向技术的发展奠定了基础. 光取向技术是一种非接触式的取向方法, 它不会造成样品损伤, 也不会破坏结构的有序性, 并且能实现高分辨率的图案化取向.

光波导技术^[4,5]因其体积、质量、出瞳大小和制作成本等方面具有一定的优势, 在光纤通信^[6]、

光存储^[7]和增强现实^[8](augmented reality, AR)等领域中得到了广泛的应用. 波导耦合器件在波导显示系统中扮演着核心角色, 其性能直接关联到波导系统的光学效率、出瞳直径、色彩还原能力以及图像的清晰度. 楔形耦合器^[9-11]、透镜耦合器^[12-14]、体全息光栅 (volume holographic grating, VHGs)^[15]以及液晶偏振体全息光栅 (polarization volume grating, PVG)^[16,17]等波导耦合器件凭借着各自的优势受到了广泛的关注.

相较于其他波导耦合器件, 基于液晶材料的反射 PVG 在光学特性和制造工艺方面展现出了其独到之处, 具体表现在高衍射效率、较大的衍射角度、较宽的响应带宽、偏振选择性强以及制造流程的简化等^[18]. 2016 年, Kobashi 等^[19]提出了一种新型胆甾相液晶器件. 2017 年, Lee 等^[20]成功制备了中心波长为 630 nm 的 PVG 光栅, 该光栅能将垂直入射的光束在 50° 的角度下反射衍射. 2018 年,

* 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

Weng 等^[21]成功设计了 PVG 双层彩色波导系统, 实现了 PVG 彩色波导耦合成像功能. 2019 年, Yin 等^[22]在柔性材料上成功制备出了 PVG. 2020 年, Yin 等^[23]沿光束传播方向引入梯度螺距, 将 PVG 的角带宽从 18° 扩展到了 54° , 同时保持超过 80% 的平均效率和 95% 的峰值衍射效率. 这些研究在彩色波导领域具有广泛的应用前景, 但相较于单层彩色波导系统, 双层彩色波导系统在体积和重量上仍然偏大, 容易影响佩戴舒适性.

本文报道了一种基于液晶偏振体光栅的偏振全息光路, 通过将全息曝光技术与光取向液晶技术相结合, 制备了光斑直径为 2 cm 的液晶偏振体全息柱透镜光栅 (polarization variable line-space, PVLS)^[24]; 证明了不同再现波长的光束 (632 nm, 532 nm, 457 nm), 在同一光栅周期变化范围内的不同周期位置上, 具有相同的衍射角度. 结果表明, 在 1721.2—5346.5 nm 的光栅周期变化范围内, 当 RGB 三色光分别入射至光栅周期为 3147 nm, 2649.1 nm, 2275.6 nm 位置上时, 所测得的衍射角度均为 11.59° ; 在 532 nm 右旋圆偏光下, 正入射的衍射效率达 90.6%, 斜入射衍射效率为 84.4%, 且实现了光斑在一维方向上的扩束, 为反射式 PVLS 光栅在波导领域的应用提供了新思路.

2 基本原理

2.1 PVLS 光栅干涉原理

传统 PVG 光取向光栅的基本原理是基于两束

偏振态正交且振幅相同的平面波的干涉. 通过非对称式全息光路所得的光栅周期可表示为

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin\theta}, \quad (1)$$

其中 λ 是记录波长; θ 是两个干涉光束中心之间的曝光夹角. 图 1(a) 和图 1(c) 展示了两束正交偏振平面波的干涉示意图和 PVG 中液晶分子的周期性分布.

PVLS 的基本原理是在制作 PVG 的基础上, 通过在一束干涉光中加入柱透镜, 从而形成偏振态正交且振幅相同的柱面波和平面波的干涉^[25]. 由于两束干涉光在 x 方向上不同位置的曝光角度各不相同, 因此 PVLS 光栅周期可表示为^[26]

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin\theta + x/(D - f)}, \quad (2)$$

其中 D 是菲涅耳衍射距离; f 是柱透镜的焦距. 如图 1(b) 所示, 由于曝光时样品表面沿 x 轴方向 (实线为+, 虚线为-) 的干涉光的相互作用角度各异, 导致了在光敏材料中能够形成变化的周期性结构. 图 1(d) 展示了 PVLS 光栅中液晶分子的周期变化.

如图 2 所示, 右旋圆偏振 (RCP) 柱面波沿 z 轴垂直入射到样品表面, 而左旋圆偏振 (LCP) 平面波以 θ 角入射到样品表面. 柱面波的复振幅为

$$\begin{aligned} U_0(x_0, y_0) &= A \exp \left[-ik_1 \frac{(n-1)x_0^2}{2R} \right] \\ &= A \exp \left(-ik_1 \frac{x_0^2}{2f} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

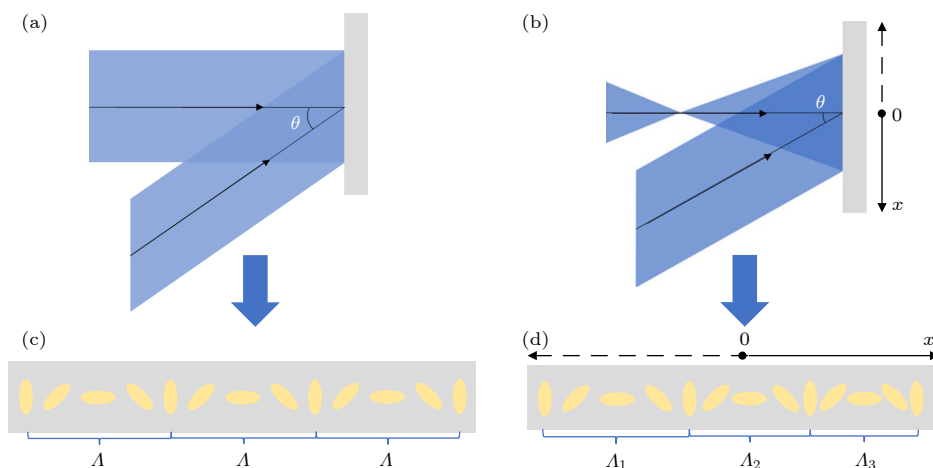


图 1 (a) 两束正交偏振平面波的干涉示意图; (b) 正交偏振柱面波与平面波干涉的示意图; (c) PVG 中偏振态的周期性分布; (d) PVLS 光栅中偏振态的周期性分布

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the interference between two orthogonally circularly polarized plane waves; (b) schematic diagram of the interference between an orthogonally circularly polarized cylindrical wave and a plane wave; (c) periodic distribution of polarization states in LCPG; (d) periodic distribution of polarization states in PVLS.

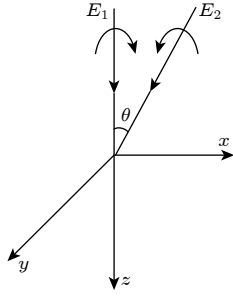


图 2 正交圆偏振全息示意图

Fig. 2. Schematic diagrams of orthogonal circular polarization holography.

其中 $k_1 = (0, 0, 1) \times 2\pi/\lambda$, n , R 和 f 分别是柱面透镜的折射率、半径和焦距. 到达样品表面的复振幅为

$$U_1(x, y) = \frac{A}{A_1 \sqrt{\lambda D}} \cdot \exp \left[ik_1 \frac{x^2}{2(D-f)} \right] \cdot \exp \left(-\frac{i\pi}{2} \right), \quad (4)$$

其中, $A_1^2 = 1/2f - 1/2D$.

平面波以 θ 角入射到曝光面上, 可以表示为

$$U_2(x, y) = A \cdot \exp[-ik_2 x \sin \theta], \quad (5)$$

其中, $k_2 = (-\sin \theta, 0, \cos \theta) \times 2\pi/\lambda$.

考虑到光的偏振态, 并假设两个光束在样品表面上具有相同的强度, 则两束光的矢量表达式为

$$E_1(x, y) = U_1(x, y) = \left[x e^{-\frac{i\pi}{2}} + y \right] \times \exp \left[ik \frac{x^2}{2(D-f)} \right] \cdot \exp \left(-\frac{i\pi}{2} \right), \quad (6)$$

$$E_2(x, y) = U_2(x, y) = \left[(x \cos \theta + z \sin \theta) e^{\frac{i\pi}{2}} + y \right] \times \exp(-ikx \sin \theta). \quad (7)$$

这两束光的复振幅叠加:

$$E(x, y) = E_1(x, y) + E_2(x, y) = 2 \exp \left\{ \left[-ikx \sin \theta + \left(ik \frac{x^2}{2(D-f)} - \frac{i\pi}{2} \right) \right] / 2 \right\} \times \begin{bmatrix} -\sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 δ 是两束光在不同位置的相位差的一半,

$$\delta = \frac{-kx \sin \theta - \left[k \frac{x^2}{2(D-f)} - \frac{\pi}{2} \right]}{2}.$$

叠加光场的表达式可简化为

$$E(x, y) = \begin{bmatrix} -\sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

(9) 式表示的叠加干涉场是线性的, 且偏振方向依赖于 δ . 当 δ 从 0 变化到 π 时, 偏振方向变化一个周期, 如图 1(c) 所示.

2.2 PVLS 光栅扩束原理

PVLS 光栅作为 Pancharatnam-Berry 相位光学元件 (Pancharatnam-Berry phase optical elements, PBOEs) 的一种, 在截面平面内展现出非均匀的空间取向分布的特性. 这种结构使得极化依赖性 P-B 相位得以改变^[27]. 对于反射型 PVLS 光栅, 如果入射光束的波长位于光子带隙内, 并且其圆偏振光的旋光性与手性剂相同时, 则光束将被反射^[28]. 否则, 入射光束将直接穿过元件, 手性保持不变. 图 3 展示了 PVLS 光栅的极化敏感及衍射特性.

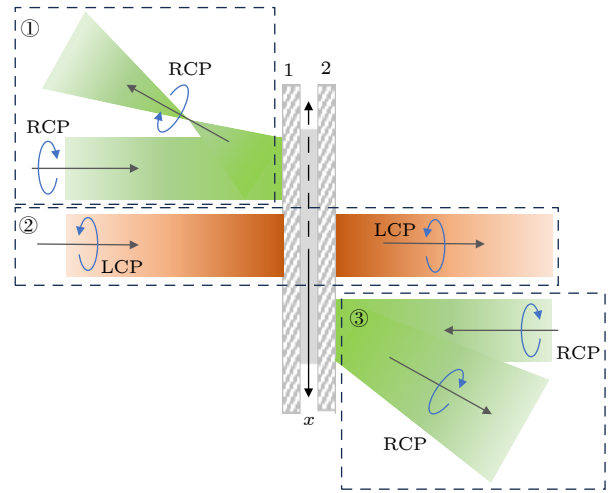


图 3 反射型 PVLS 光栅的偏振敏感及衍射特性 (手性剂为右旋) ①右旋圆偏振光入射样品表面 1; ②左旋圆偏振光入射; ③右旋圆偏振光入射样品表面 2

Fig. 3. Schematic diagram of the polarization sensitivity and diffraction characteristics of the reflective PVLS grating (with a right-handed chiral agent): ① Right-handed circularly polarized light incident on sample surface 1; ② Left-handed circularly polarized light incident; ③ Right-handed circularly polarized light incident on sample surface 2.

因此, 我们可以利用 PVLS 光栅非均匀的空间取向分布的特性, 实现光斑在一维方向上的扩展, 如图 4 所示, 根据 (2) 式可知, 当一束直径为 L_1 的光斑入射至入耦合光栅时, 由于光栅周期 Λ 随 x 的值的 变化而变化, 因此在不同位置上, 衍射角 θ 也不相同, 从而使光斑在一维方向上产生扩散现象, 如图 4(a) 所示; 由于出耦合光栅的设计需要与入耦合光栅的设计精确耦合, 因此出耦合处的光栅的周期也应该在 $\Lambda_1 - \Lambda_2$ 内, 以确保光斑能够在

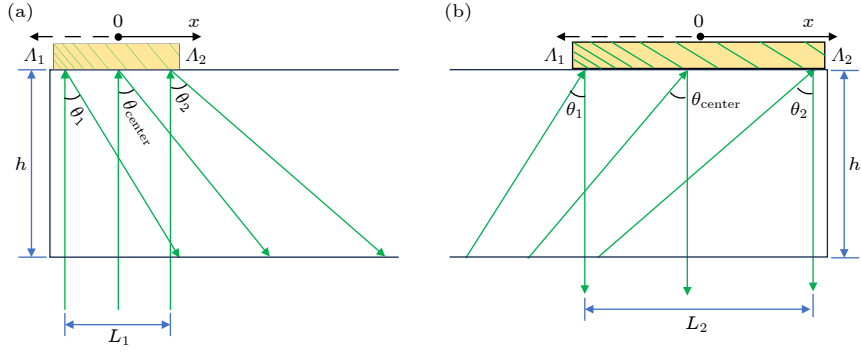


图 4 (a) 入耦合光栅衍射; (b) 出耦合光栅衍射

Fig. 4. (a) In-coupling grating diffraction; (b) out-coupling grating diffraction.

此光栅处成功衍射, 此时光斑的有效直径扩展至 L_2 , 光斑通过光波导介质传播后, 经光栅衍射的光场水平扩展公式为

$$L_2 = 2\alpha h (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) + L_1, \quad (10)$$

其中 h 是波导的厚度; L_1 是入耦合光栅的有效直径; α 是光斑在波导中传输时反射周期的数量.

3 液晶偏振体全息柱透镜的研制及特性研究

3.1 PVLS 光栅的实验制作

本实验中, 制备反射式 PVLS 所用的材料包括偶氮苯磺酸钠 (SD1), 5CB 向列相液晶, R5011 手性剂.

使用 R5011 作为手性掺杂剂, 将 5CB 作为溶剂与其溶解配置可制成胆甾相液晶 (cholesteric liquid crystals, CLC)^[29], CLC 的螺距由手性掺杂剂的螺旋扭转力 HTP 和质量分数 c 决定, 其内部结构如图 5 所示, 计算公式为

$$p = 1 / (\text{HTP} \times c). \quad (11)$$

因此, 纵向周期 (液晶分子转动 180°) 可以表示为

$$\Lambda_y = p/2. \quad (12)$$

CLC 的波长选择性反射的最大值发生在波长 $\lambda = np \cos \theta$ 上, 其中 p 是螺距, θ 是螺旋轴与传播方向之间的夹角, 平均折射 $n = (n_0 + n_e)/2$, 其中 n_0 和 n_e 分别是寻常光折射率和非寻常光折射率. 在正入射时, 带宽与双折射率 Δn ($\Delta n = n_e - n_0$) 和 p 的关系为

$$\Delta \lambda = p \Delta n. \quad (13)$$

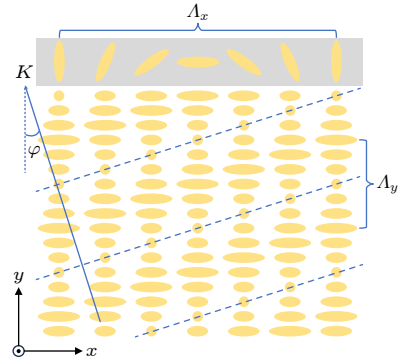


图 5 CLC 的内部结构示意图

Fig. 5. Schematic diagram of the internal structure of CLC.

因此, 通过调整 5CB 与 R5011 之间的配比比例, 可以制备出具有反射红光、绿光、蓝光波长特性的 CLC. 具体的液晶材料配比在表 1 列出. 溶液配置好后需要放入磁力振荡器上, 设置温度 60°C , 以 1500 r/min 振荡 1 h , 使溶质充分溶解. 将制备好的 SD1 溶液利用移液管均匀地涂布于固定在旋涂机上的玻璃基底上. 首先, 以预设的低速 800 r/min (持续 5 s) 进行初步旋涂, 随后加速至 3000 r/min (持续 30 s) 以实现所需的定向层厚度. 完成旋涂后, 将玻璃基底放置在加热台上, 设定温度为 100°C , 进行烘烤 10 min , 以此蒸发多余的溶剂, 确保在基底上形成均匀且稳定的定向膜. 实验中, 采用两片经过上述处理的基底来组装液晶盒: 将一片已经喷洒了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 间隔粒子的玻璃基板与

表 1 PVLS 液晶层主要材料及配比

Table 1. Main materials and ratios of the PVLS liquid crystal layer.

	5CB	R5011
反射红色	97.79%	2.21%
反射绿色	97.37%	2.63%
反射蓝色	96.94%	3.06%

另一片未经喷洒的玻璃基板相扣合,并在两片玻璃的边缘用速干型 AB 胶以 1:1 的比例混合涂抹进行密封.待 AB 胶完全固化后,便可以开始曝光过程.图 6 为制作好的液晶盒结构示意图.

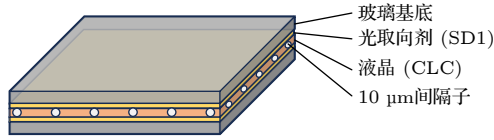


图 6 液晶盒示意图

Fig. 6. Schematic diagram of the liquid crystal cell.

如图 7 所示,使用的光束源自一个波长为 457 nm、功率为 200 mW 的激光器,依次通过孔径滤波器、准直透镜以及半波片 (HWP).随后,光束被分光棱镜 (PBS) 分束,形成两束直径为 25 mm 的相干偏振光.其中一束光经平面反射镜 (Mirror) 反射后,与另一束光相交并形成特定角度.这两束光继而分别通过四分之一波片 (QWP),每个 QWP 的快轴与偏振光的偏振方向成 45° 角,且两个 QWP 的快轴相互垂直,使得两束光分别转换为左旋圆偏振光和右旋的圆偏振光.此外,一束光路上还放置了一个焦距为 100 mm 的圆柱形透镜,并将液晶盒置于曝光平面上.固定样品与 PBS 间的间距,通过控制反射镜与 PBS 间的距离,并旋转反射镜,即可改变曝光处的夹角 θ ,从而获得所需的横向周期.

3.2 PVLS 光栅的衍射特性

3.2.1 PVLS 光栅的变间距衍射特性

将制备好的曝光角度 $\theta = 10^\circ$ 的样品灌入反射

绿光 CLC,等待液晶自然充满液晶盒,样品如图 8(a) 所示.样品所展现出的衍射特性如图 8(b) 所示,可以观察到除了 ± 1 级衍射阶外,还存在较弱的衍射阶.这是因为激光光斑的直径相对较大 (1 mm),当入射到样品上时,光斑会经过多个不同的光栅周期,从而产生新的衍射光斑.减小光斑直径可以抑制这种现象.

测量光路如图 8(c) 所示,将制得的样品放置在 532 nm 激光器的光路中,光束经过偏振片后被转换成线偏振光,以光斑中心为原点 ($x = 0$ cm),固定样品到光屏的距离 $D = 20$ cm,测量 $x = -0.9, -0.5, 0, 0.5, 0.9$ cm 位置衍射光到入射光的距离 d ,来计算出当前照射位置 x 对应的衍射角度,并代入 (1) 式计算出当前位置的光栅周期,证明了 PVLS 光栅的可变间距特性.同时通过该测量光路测得样品在右旋圆偏光照射下的衍射效率为 90.6%.

将 (1) 式计算得出的实验结果 (图 8(b)) 与利用 Matlab 根据 (2) 式获得的仿真结果 (图 8(d)) 进行对比,可以观察到实测值与模拟值之间存在较小的偏差,这证实了实验数据与理论模型的预测相吻合.

此外,为了确保 PVLS 光栅在光波导应用中实现高效的光耦合,实验根据图 7 所示光路,制备了曝光角度 $\theta = 42.44^\circ$ (中心光栅周期 $\Lambda = 677.22$ nm) 的反射绿光 PVLS 光栅.利用图 9 所示的光路配置,通过测量样品衍射光的光强 I_0 ,反射光的光强 I_1 以及透射光强 I_2 ,衍射效率的计算公式为 $I_0/(I_0 + I_1 + I_2)$.实验结果表明,当 532 nm 右旋圆偏光以 60° 角入射至样品表面时,其衍射效率达到了 84.4%.

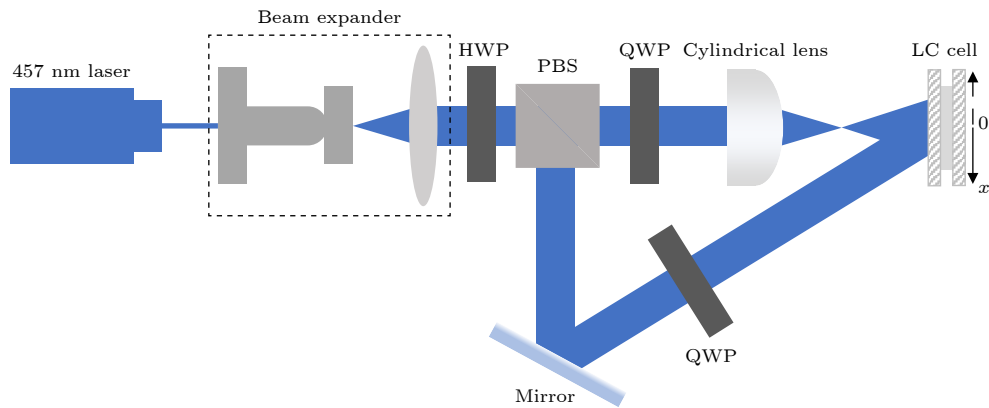


图 7 PVLS 光栅制造实验装置示意图

Fig. 7. Schematic illustration of the experimental setup for fabricating PVLS grating.

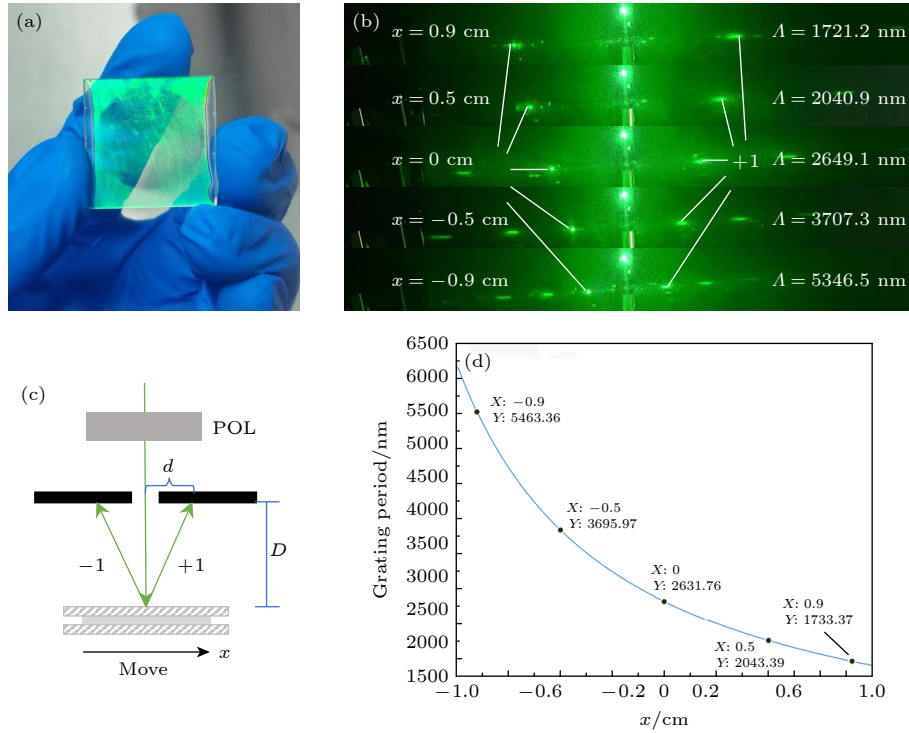


图 8 (a) 制备的反射式 PVLS (反射绿光); (b) 反射式 PVLS 光栅的衍射示意图; (c) 入射光与衍射光的示意图; (d) 一维方向照射位置 x 与光栅周期 Λ 关系图

Fig. 8. (a) Fabricated reflective PVLS (anti-green light); (b) schematic diagram of diffraction for the reflective PVLS grating; (c) schematic diagram of incident and diffracted light; (d) graph of the relationship between the one-dimensional direction x and grating period Λ .

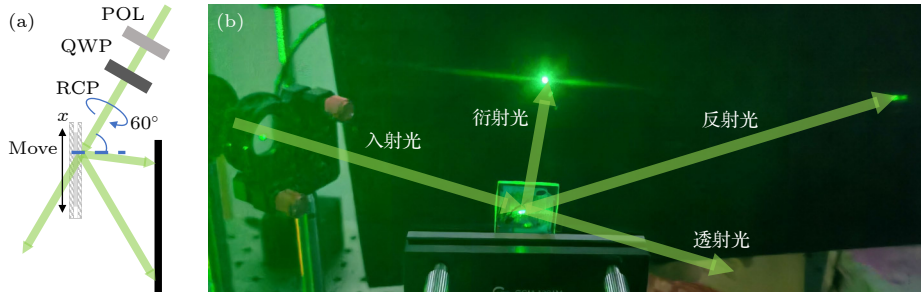


图 9 532 nm 右旋圆偏光斜入射 PVLS 光栅示意图

Fig. 9. Schematic diagram of right-handed circularly polarized 532 nm light obliquely incident on a PVLS grating.

3.2.2 PVLS 光栅在 RGB 三色光照射下的衍射特性

如图 10(a) 和图 10(b) 所示, 为了进一步对反射式 PVLS 光栅的光学特性进行探究, 实验制作了两片曝光角度 $\theta = 10^\circ$ (中心光栅周期 $\Lambda = 2649.1 \text{ nm}$) 的液晶盒, 并分别灌入反射红光和反射蓝光 CLC, 样品如图 10(a) 和图 10(b) 所示. 通过图 8(c) 所示的光路, 分别用 632 nm, 457 nm 的激光照射对应波长的反射式 PVLS, 以光斑中心 ($x = 0 \text{ cm}$) 为原点, 测量并计算 $x = -0.9, -0.5, 0, 0.5, 0.9 \text{ cm}$ 五个特定位置所对应的衍射角度与光栅周

期. 测量结果如表 2 和表 3 所列. 将计算得出的光栅周期, 与图 8(d) 所示的光栅周期变化图进行对比. 结果表明, 实验数据与理论数据相接近, 证明实验制备的反射式液晶偏振体透镜的光栅周期变化范围与理论计算结果一致.

在上述研究的基础上, 本实验基于 (1) 式和 (2) 式, 通过 Matlab 进行数值仿真, 仿真结果如图 10(c) 和图 10(d) 所示. 根据图 10(c) 和图 10(d) 中标注的虚线所示, 当 RGB 三色光从相同光栅周期 $\Lambda = 2631.76 \text{ nm}$ ($x = 0 \text{ cm}$) 处照射反射式 PVLS 光栅时, RGB 三色光所对应的衍射光角度各不相同;

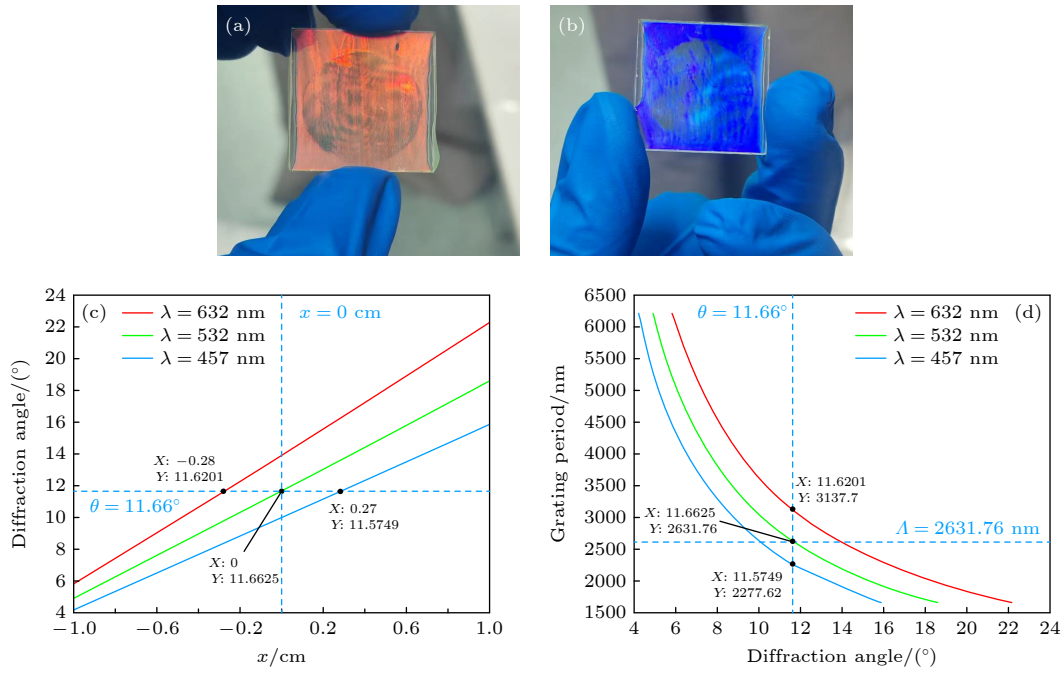


图 10 (a), (b) 制备的反射红光和反射蓝光 PVLS 光栅; (c) 一维方向 x 与 RGB 衍射角 θ 关系图; (d) RGB 衍射角 θ 与光栅周期 Λ 关系图
Fig. 10. (a), (b) Fabricated PVLS gratings for anti-red and anti-blue light; (c) graph of the relationship between the one-dimensional direction x and RGB diffraction angle θ as a function; (d) graph of the relationship between RGB diffraction angle θ and grating period Λ as a function.

而当 RGB 分别入射至光栅周期 3137.7 nm ($x = -0.28$ cm), 2631.76 nm ($x = 0$ cm), 2277.62 nm ($x = 0.27$ cm) 位置上时, 三个不同波长的光束将以相同的衍射角度 ($\theta = 11.66^\circ$) 平行出射。

基于上述分析, 实验以反射绿光 PVLS 光栅中心 ($\Lambda = 2649.1$ nm) 处所测得的衍射角度 11.59° 为

表 2 反射红光 (632 nm) PVLS 测量结果
Table 2. Measurement results of PVLS for anti-red light (632 nm) reflectance.

x/cm	光栅周期/nm	衍射角/(°)
0.9	1739.4	21.31
0.5	2044.7	18
0	2655.9	13.77
-0.5	3567.5	10.2
-0.9	5304.5	6.84

表 3 反射蓝光 (457 nm) PVLS 测量结果
Table 3. Measurement results of PVLS for blue light (457 nm) reflectance.

x/cm	光栅周期/nm	衍射角/(°)
0.9	1723.5	15.38
0.5	2081.9	12.68
0	2651.1	9.93
-0.5	3684.5	7.13
-0.9	5395.9	4.86

参考标准, 依据图 8(c) 所示光路, 分别用 632 nm, 457 nm 的激光照射相应波长的反射式 PVLS, 并测量衍射角度 11.59° 处各波长光对应的光栅周期。实验结果表明, 在 1721.2—5346.5 nm 的光栅周期变化范围内, 当 RGB 三色光在光栅周期分别为 3147 nm ($x = -0.28$ cm), 2649.1 nm ($x = 0$ cm), 2275.6 nm ($x = 0.27$ cm) 位置上时, 所测得的衍射角度均为 11.59° ; 且实际衍射角度与理论衍射角度的误差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内。因此, 通过精确调控 RGB 三色光照射在不同周期的光栅上, 可以实现三个波段的光以相同的衍射角度平行出射, 如图 11 所示。

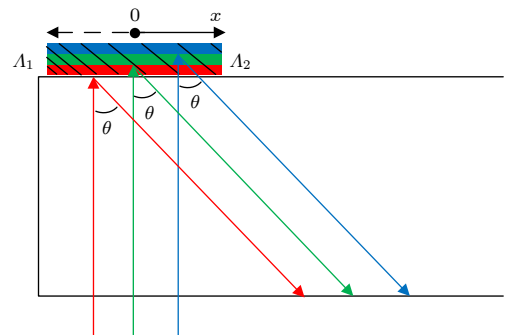


图 11 单层彩色波导理论图

Fig. 11. Theoretical diagram of a single-layer color waveguide.

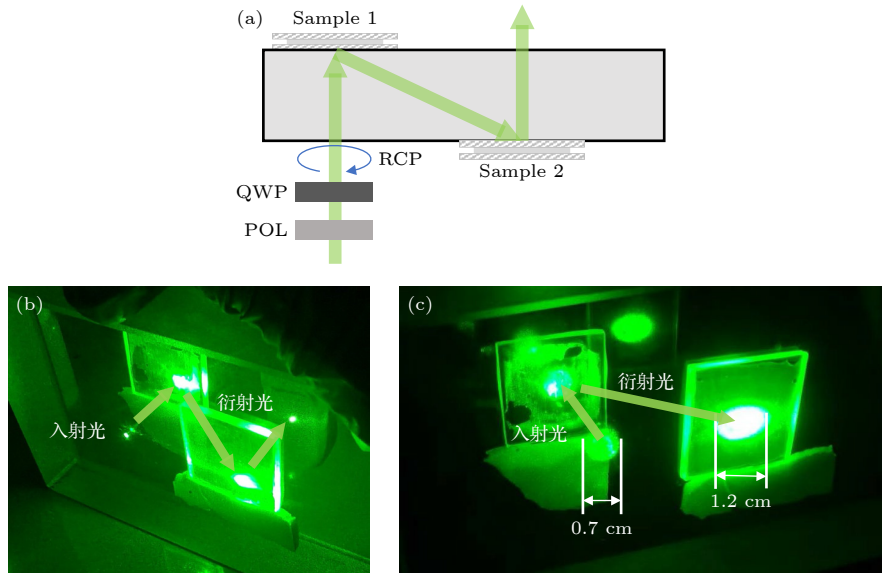


图 12 (a) 光路示意图; (b), (c) 532 nm 激光和直径 0.7 cm 的 532 nm 右旋圆偏光照射至 PVLS 的传播示意图

Fig. 12. (a) Schematic diagram of the optical path; (b), (c) schematic diagram of the propagation of 532 nm laser and 532 nm right-handed circularly polarized light with a diameter of 0.7 cm incident on PVLS.

3.3 PVLS 光栅的波导应用及扩束特性

光波导技术是利用波导介质的全反射条件, 以极低的损耗传输图像光场. 光路如图 12(a) 所示, 实验采用 532 nm 激光器光束作为光源, 光束经过起偏器转变为线偏振光, 随后经过四分之一波片调制为右旋圆偏振光, 垂直入射折射率为 $n = 1.57$ 的波导介质中, 传输至曝光角度 $\theta = 42.44^\circ$ 的反射式 PVLS 光栅表面 (Sample 1), 光束发生衍射, 并在波导内传播; 当衍射光束传播至另一片 PVLS (Sample 2) 时, 再次发生衍射, 并沿垂直于波导平面的方向传播出去.

为了研究在反射式 PVLS 在一维方向上的光束扩散特性, 实验在图 12(a) 所示光路的基础上, 将光斑直径扩大至 0.7 cm. 实验结果表明, 当光束经 Sample 1 衍射至 Sample 2 时, Sample 2 上测得的光斑在水平方向上的尺寸扩展至 1.2 cm, 证明了 PVLS 光栅能够有效地在一维方向上对光斑进行扩束.

4 结 论

本研究成功展示了一种采用光控定向技术制造的、具有周期连续变化特性的反射式 PVLS 光栅. 理论推导了基于光取向液晶的 PVLS 光栅的变间距特性, 从 Matlab 仿真模拟中获得的光栅周

期与从实验制备中获得的光栅周期的误差在 $\pm 8\%$ 以内, 验证了实验分析的正确性. 制备的 PVLS 光栅与理论值具有一致的可变周期, 可通过改变两束干涉光束中心处的曝光角度调整光栅周期的变化范围, 因此根据其特定要求可以制造所需的 PVLS 光栅. PVLS 光栅在 1721.2—5346.5 nm 的光栅周期变化范围内, 当 RGB 三色光分别入射至光栅周期为 3147 nm, 2649.1 nm, 2275.6 nm 位置上时, 所测得的衍射角度均为 11.59° , 实际衍射角度与理论衍射角度的误差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内; 在 532 nm 右旋圆偏光下, 正入射的衍射效率达 90.6%, 斜入射衍射效率为 84.4%. 此外通过实现光斑的一维扩束, 初步验证了 PVLS 在彩色波导领域应用的可行性.

参考文献

- [1] Kvasnikov E D, Kozenkov V M, Barachevskii V A 1979 *Zh. Nauchn. Prikl. Fotogr. Kinematogr.* **24** 222
- [2] Ichimura K, Suzuki Y, Seki T, Kawanishi Y, Tamaki T, Aoki K 1989 *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl.* **28** 289
- [3] Gibbons W M, Shannon P J, Sun S T, Swetlin B J 1991 *Nature* **351** 49
- [4] Zhang M R, Chen K X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 144205 (in Chinese) [张梦若, 陈开鑫 2015 物理学报 **64** 144205]
- [5] Pei L, Zhao R F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184213 (in Chinese) [裴丽, 赵瑞峰 2013 物理学报 **62** 184213]
- [6] Duan L, Xu R Q, Song Y B, Tan S D, Liang C B, Xu F J, Liu Z H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 104203 (in Chinese) [段磊, 徐润亲, 宋云波, 谭姝丹, 梁成斌, 徐帆江, 刘朝晖 2023 物理学报 **72** 104203]
- [7] Zeng Y, She Y C, Zhang W X, Yang H 2024 *Acta Phys. Sin.*

- 73 164202 (in Chinese) [曾莹, 余彦超, 张蔚曦, 杨红 2024 物理学报 73 164202]
- [8] Yang Y H, He L, Deng L X, Zhu L Q, Gu C, Xu L X 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 114201 (in Chinese) [杨雨桦, 何龙, 邓林宵, 朱立全, 顾春, 许立新 2023 物理学报 72 114201]
- [9] Zhang X F, Xiao J B, Zhu J B, Cai C, Ding D, Zhang M D, Sun X H 2003 *J. Southeast Univ. (Nat. Sci. Ed.)* **33** 22 (in Chinese) [张夕飞, 肖金标, 朱建彬, 蔡纯, 丁东, 张明德, 孙小蕊 2003 东南大学学报 (自然科学版) 33 22]
- [10] Ma H, Yi X J, Chen S H 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 756 (in Chinese) [马宏, 易新建, 陈四海 2004 光学学报 24 756]
- [11] Zengerle R, Bruckner H, Olzhausen H, Kohl A 1992 *Electron. Lett.* **28** 631
- [12] Zhou J Z, Huang Z H, Zeng X Y, Zhang Y 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1212001 (in Chinese) [周进朝, 黄佐华, 曾宪佑, 张勇 2012 光学学报 32 1212001]
- [13] Cui N D, Liang J Q, Liang Z Z, Wang W B 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 239 (in Chinese) [崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 王维彪 2012 光学学报 32 239]
- [14] Lu Z L, Prather D W 2004 *Opt. Lett.* **29** 1748
- [15] Cameron A 2012 *Conference on Head- and Helmet-Mounted Displays XVII/Conference on Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI* Baltimore, Maryland, United States, April 25–26, 2012 p83830E
- [16] Luo H, Weng J C, Li H F 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1005002 (in Chinese) [罗豪, 翁嘉承, 李海峰 2022 光学学报 42 1005002]
- [17] Chen Y 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [陈艳 2021 硕士学位论文 (南京: 东南大学)]
- [18] Weng Y S, Xu D M, Zhang Y N, Li X H, Wu S T 2016 *Opt. Express* **24** 17746
- [19] Kobashi J, Yoshida H, Ozaki M 2016 *Nat. Photonics* **10** 389
- [20] Lee Y H, Yin K, Wu S T 2017 *Opt. Express* **25** 27008
- [21] Weng Y S, Zhang Y N, Cui J Y, Liu A W, Shen Z W, Li X H, Wang B P 2018 *Opt. Lett.* **43** 5773
- [22] Yin K, Lee Y H, He Z Q, Wu S T 2019 *J. Soc. Inf. Disp.* **27** 232
- [23] Kun Y, Hung-Yuan L, Shin-Tson W 2020 *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **51** 371
- [24] Wang K N, Zheng J H, Lu F Y, Gao H, Palanisamy A, Zhuang S L 2016 *Appl. Opt.* **55** 4952
- [25] Chen J W, Fu S F, Zhang D, Qi Z F, Yang S, Wang Z J 1986 *Chin. J. Lasers* **13** 291
- [26] Chen F F, Shen T, Ma C W, Sang J X, Xing C C, Zheng J H, Zhuang S L 2024 *Opt. Lett.* **49** 3528
- [27] Wang C T, Tam A, Meng C L, Tseng M C, Li G J, Kwok H S 2020 *Opt. Lett.* **45** 5323
- [28] Chen C W, Feng T M, Wu C W, Lin T H, Khoo I C 2023 *Appl. Phys. Rev.* **10** 011413
- [29] Bi Y J, Yang G C, Guan R H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4287 (in Chinese) [毕亚军, 杨国琛, 关荣华 2004 物理学报 53 4287]

Characteristics of reflective liquid crystal polarization holographic cylindrical lenses^{*}

MA Chenwen CHEN Fangfang 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 30 December 2024; revised manuscript received 27 January 2025)

Abstract

Photo-oriented liquid crystal technology utilizes polarized light illumination to achieve the directional alignment of liquid crystal molecules. This technology can be developed into polarization volume gratings (PVGs), which possess polarization and volume holographic selectivity characteristics, and also have a broad application prospect as an optical coupling element in optical waveguides and for pupil expansion output. This paper reports on the fabrication of a liquid crystal polarization volume holographic cylindrical lens (PVLS) with a beam diameter of 2 cm by using photo-oriented technology combined with a polarization off-axis holographic optical path. During the experiment, the exposure angle can be controlled to achieve the desired grating period variation range, enabling the diffraction angles of red, green, and blue light incident on different grating periods to be the same. The experimental results show that within the grating period variation range from 1721.2 to 5346.5 nm, when the red, the green, and the blue light are incident on grating with periods of 3147 nm, 2649.1 nm, and 2275.6 nm respectively, the measured diffraction angles are all 11.59° , with an error between the actual and theoretical diffraction angles within $\pm 0.5^\circ$; under 532-nm right-handed circularly polarized light, the diffraction efficiency for 18 normal incidence reaches 90.6%, and the diffraction efficiency for oblique incidence satisfying the Bragg condition is 84.4%; simultaneously, beam expansion in one-dimensional direction is achieved, preliminarily verifying the feasibility of PVLS application in the field of color waveguides.

Keywords: photocontrolled orientation, liquid crystal, variable spacing polarization grating, optical waveguide

PACS: 61.30.Gd, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.74.20241794

CSTR: 32037.14.aps.74.20241794

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

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

反射式光取向液晶偏振体全息柱透镜的特性

马陈文 陈芳芳 郑继红

Characteristics of reflective liquid crystal polarization holographic cylindrical lenses

MA Chenwen CHEN Fangfang ZHENG Jihong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 076101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241794

CSTR: 32037.14.aps.74.20241794

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241794>

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

内腔亚波长光栅液晶可调谐垂直腔面发射激光器

Liquid crystal tunable vertical cavity surface emission laser with inner cavity sub-wavelength grating

物理学报. 2021, 70(22): 224208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210957>

软物质激光微纳加工技术

Laser micro/nanomachining technology for soft matter

物理学报. 2022, 71(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220625>

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>

偏振光声成像技术的研究与发展

Research and development of polarized photoacoustic imaging technology

物理学报. 2023, 72(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230900>

圆偏振光伏效应

Circular photogalvanic effect

物理学报. 2021, 70(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210498>

基于矢量光场空间调制的光波偏振方向解算方法研究

Algorithms for calculating polarization direction based on spatial modulation of vector optical field

物理学报. 2023, 72(1): 010201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221745>