

文章编号: 1005-4642(2024)04-0049-05

基于偏振全息术制备 Pancharatnam-Berry 相位光栅

郭叁育, 任雪畅, 炉庆洪

(厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361000)

摘要: PB 相位光栅既具有对入射光偏振方向敏感的独特性质, 同时又具有较宽的响应带宽和较高的单级衍射效率. 采用基于偏振全息记录的液晶技术, 将光敏偶氮染料 SD-1 旋涂在单面导电的 ITO 玻璃基板上, 曝光后可得到具有偏振周期性旋转图案的取向层. 结合 FDTD 模拟仿真, 设计了 PB 相位光栅制备方案并搭建了实验装置. 设计 PB 相位光栅衍射效率的检测光路, 验证其高效的单级衍射. 搭建圆偏振光旋向检测光路, 验证了 PB 相位光栅改变入射圆偏振光旋向的特性.

关键词: Pancharatnam-Berry 相位光栅; 偏振全息术; 液晶

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2024.04.009

光栅是利用光的干涉原理制作的可对入射光的振幅和相位或二者之一产生空间调制的光学元件, 广泛应用于光栅光谱仪、光通信、光互联、耦合器、偏转器、滤波器等^[1-2]. 相较于传统的刻划光栅和体全息光栅, Pancharatnam-Berry (PB) 相位光栅既具有对入射光偏振方向敏感的独特性质, 又具有较宽的响应带宽和较高的单级衍射效率^[3], 在波导系统中具有广泛的应用前景. 此外, 包括 PB 相位光栅在内的光学元件(光栅、透镜、偏转器)的厚度只有几微米, 因此可集成到 VR 系统中^[4-5]. 本文在传统制备 PB 相位光栅光路的基础上^[6], 在保证 PB 相位光栅质量的前提下, 搭建了基于偏振全息术的 PB 相位光栅制备光路, 并设计了 PB 相位光栅衍射效率的检测光路, 以验证其高效的单级衍射. 此外, 还搭建了圆偏振光旋向检测光路, 以验证 PB 相位光栅改变入射圆偏振光旋向的特性.

1 PB 相位光栅的原理

PB 相位光栅具有介质内部折射率分布各向异性、介质光轴在空间内周期性旋转的特点. 当光轴在一维方向上(如沿 x 轴)周期性旋转时, 周期性旋转图案呈现出“摆线”的形状, 因此 PB 相

位光栅也被称为摆线衍射波片(Cycloidal diffractive waveplate, CDW)^[3-4]. 光轴周期性旋转使 PB 相位光栅对入射光产生相位调制.

在傍轴近似下, 可以利用琼斯矩阵表示光束在通过 PB 相位光栅前后相位的变化. 假设入射光为圆偏振光, 沿 z 轴入射:

$$E_{\pm}^i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, E_{+}^i 和 E_{-}^i 分别表示入射的左旋和右旋圆偏振光. 当入射偏振光以方位角 φ (φ 为介质光轴与 x 轴的夹角)通过 PB 相位光栅时, 出射偏振光可表示为^[3,7]

$$E_{\pm}^o = R^{-1}(\varphi)W(\Gamma)R(\varphi)E_{\pm}^i, \quad (2)$$

其中, $R(\varphi)$ 和 $W(\Gamma)$ 分别表示光轴旋转和相位延迟, 即

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$W(\Gamma) = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中, $\Gamma = 2\pi\Delta nd/\lambda$, $\Delta n = n_e - n_o$, d 为介质的厚度, λ 为入射光的真空波长. 当介质满足半波条件时, 有 $\Gamma = \pi$, 此时式(2)可简化为

收稿日期: 2023-10-06; **修改日期:** 2024-03-17

作者简介: 郭叁育(2001-), 男, 福建漳州人, 厦门大学物理科学与技术学院 2020 级本科生. E-mail: 19720202202653@stu.xmu.edu.cn

通信作者: 任雪畅(1978-), 女, 浙江宁波人, 厦门大学物理科学与技术学院副教授, 博士, 研究方向为光全息与信息处理. E-mail: xuechangren@xmu.edu.cn

$$E_{\pm}^o = \begin{pmatrix} \cos(2\varphi) & \sin(2\varphi) \\ \sin(2\varphi) & -\cos(2\varphi) \end{pmatrix} E_{\pm}^i, \quad (5)$$

代入式(1)化简后可得:

$$E_{\pm}^o = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp i \end{pmatrix} e^{\pm i2\varphi}. \quad (6)$$

从式(6)可以看出,出射偏振光与入射偏振光相比,一方面引入了附加相位因子 $e^{\pm i2\varphi}$,且由于沿 x 轴方位角 φ 周期性变化,在 x 轴上不同位置的 φ 值不同,入射偏振光经历的偏振变化过程不同,出射偏振光引入不同的相位差 2φ ,此即 PB 相位^[8]. 经过 1 个完整的光栅周期 π (光轴旋转 φ 与 $\varphi + \pi$ 等效,因此光轴旋转周期为 2π ,而实际光栅周期为 π),出射偏振光将会引入 2π 的相位差,发生衍射. 另一方面,PB 相位光栅具有半波片的作用,使入射圆偏振光的旋向发生左右旋互换.

在正入射情况下,PB 相位光栅的衍射效率理论值为^[9]

$$\eta_0 = \cos^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \right), \quad (7)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1 \mp S_3'}{2} \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda} \right), \quad (8)$$

其中, $S_3' = S_3/S_0$ 为入射光归一化的斯托克斯参量. 以 E_x 和 E_y 分别表示入射光的 x 分量和 y 分量, δ 为两分量的相位差,则有 $S_0 = E_x^2 + E_y^2$, $S_3 = 2E_x E_y \sin \delta$. 对于右旋圆偏振光, $S_3' = +1$; 对于左旋圆偏振光, $S_3' = -1$.

显然,在 PB 相位光栅厚度 d 满足半波条件时,衍射光将全部集中在 ± 1 级. 此外,若入射光为圆偏振光,理论上衍射效率可达到 100%.

2 基于偏振全息术制备 PB 相位光栅

传统的干涉曝光方法(又称振幅全息术^[10])中偏振状态与光强相同的 2 束相干光发生干涉后,干涉光场的光强在空间上呈现周期性的明暗变化,偏振状态在空间上保持一致. 本实验的 2 束相干光采用左旋与右旋圆偏振光,发生干涉后,干涉光场的光强在空间上变化很小,偏振则呈现出线偏振且偏振方向周期性旋转的性质,与 PB 相位光栅的光轴周期性旋转结构一致,此即为偏振全息术^[3,10].

利用 FDTD 软件,对光场进行模拟仿真. 采用平面波模型,2 束相干光以 4° 的小角度沿 z 轴正方向入射,仿真结果如图 1 和图 2 所示.

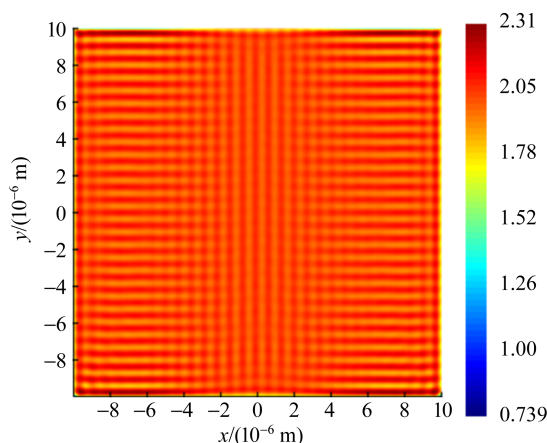


图 1 FDTD 仿真光强分布

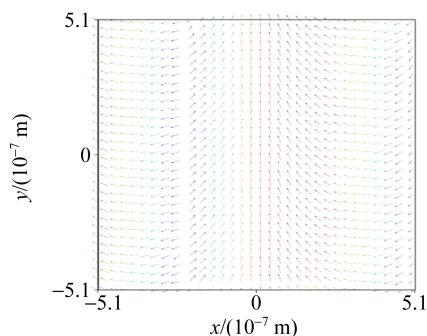


图 2 FDTD 仿真光矢量分布

为了记录该特殊光场,可以采用基于偏振全息记录的液晶技术^[10-11],并且使用光取向材料 PAAD-72, Brilliant Yellow (BY) 或 SD-1^[4] 作为液晶盒中的取向层,经过曝光记录干涉图案. 考虑到环境湿度的影响,实验中选择光敏偶氮染料 SD-1,将其旋涂在单面导电的 ITO 玻璃基板上,曝光后得到具有偏振周期性旋转图案的取向层.

偏振全息曝光光路如图 3 所示. 激光器发出 405 nm 的线偏振蓝紫光(p 光),光阑可调节入射偏振光的强度. 入射偏振光经过半波片后光矢量旋转 45° ,在通过第 1 个偏振分束器(PBS)时,分解为正交的 s 光和 p 光. s 光和 p 光经过反射镜反射到达第 2 个 PBS,分别发生反射与透射,通过 $1/4$ 波片后变为旋向相反的正交圆偏振光,在样品表面产生干涉光场进行曝光,曝光时间为 1 h. 完成曝光后,向液晶盒中灌注预先配置好的胆甾相液晶 RM257(手性剂 R5011),完成液晶分子取向,即可得到右手性(反射右旋圆偏振光,透射左旋圆偏振光)的 PB 相位光栅,如图 4 所示.

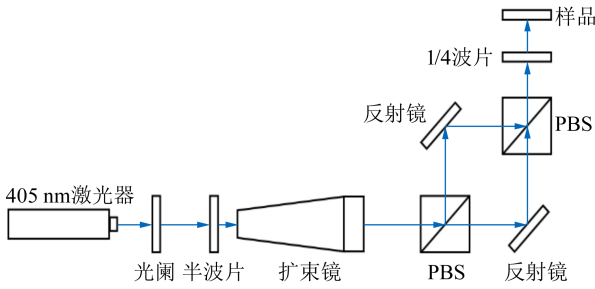


图 3 偏振全息曝光光路示意图

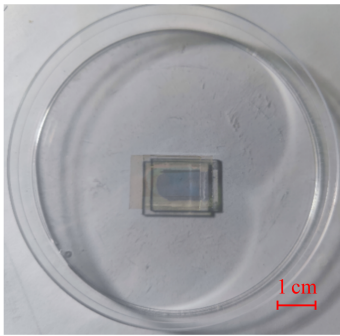


图 4 PB 相位光栅的实物图

制得 PB 相位光栅后,采用徕卡显微镜可观察到清晰的光栅结构,如图 5 所示. 经过测量,该 PB 相位光栅的周期 $\Lambda = 50 \mu\text{m}$,液晶盒的厚度 $d = 7.2 \mu\text{m}$.

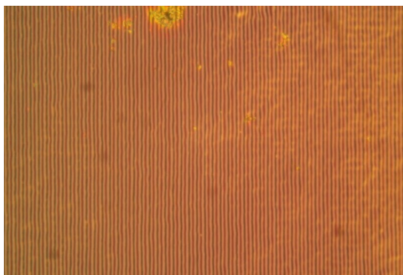


图 5 PB 相位光栅的微观结构

3 PB 相位光栅的衍射效率检测与特性验证

PB 相位光栅可将左旋圆偏振光衍射到 +1 级,右旋圆偏振光衍射到 -1 级,少部分能量以透射光的形式出现在 0 级. 利用右手性 PB 相位光栅可分离出光束中的右旋圆偏振光成分,设计了使用右旋圆偏振光测量衍射效率的光路,如图 6 所示. He-Ne 激光器发出波长为 632.8 nm 的线偏振红光,采用衰减片控制入射光的强度后经过 1/4 波片变为右旋圆偏振光,在 PB 相位光栅上发

生衍射与旋向改变,再经由分束器进入光电探测器. 最后使用照度计测量 0 级衍射光的照度 E_{v0} 和 1 级衍射光的照度 E_{v1} .

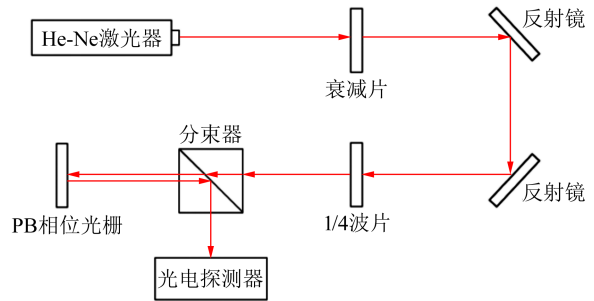


图 6 PB 相位光栅的衍射效率检测光路示意图

PB 相位光栅的衍射效率定义为 1 级衍射光强(或照度)与 0 级、1 级衍射光强(或照度)总和之比,即 $\eta = \frac{I_1}{I_0 + I_1} = \frac{E_{v1}}{E_{v0} + E_{v1}}$.

衍射光斑探测结果如图 7 所示,相比于传统光栅,1 级衍射光的强度显著增强,与 0 级衍射光强相当. 衍射效率测试数据如表 1 所示.

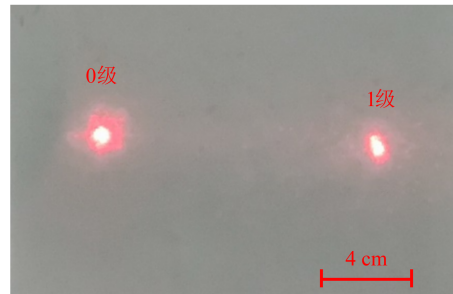


图 7 PB 相位光栅衍射效率检测衍射光斑

表 1 PB 相位光栅衍射效率检测实验数据

点位	E_{v0}/lx	E_{v1}/lx	η
1	19.4	29.0	59.92%
2	20.3	24.4	54.59%
3	17.9	18.4	50.69%
4	20.3	22.4	52.46%
5	21.5	21.2	49.65%
6	20.1	23.5	53.90%
7	21.1	23.3	52.48%
8	22.0	23.8	51.97%
9	27.9	28.7	50.71%
10	21.8	19.3	46.96%
11	19.0	16.3	46.18%
12	16.0	14.7	47.88%

由表 1 可知,最终测得该 PB 相位光栅的 1 级衍射光的衍射效率最优值为 59.92%,最劣值为 46.18%,平均值为 51.45%。此结果与理论预期存在差距。分析制备与测试过程发现,这是由于制得的 PB 相位光栅结构并非理想,在制备过程中可能出现液晶盒厚度不完全均匀、取向层结构与理论预期存在偏差等,从而导致光栅的衍射效率偏离预期,且出现衍射效率分布不均匀的现象。但本文所设计和搭建的制备系统所获得的光栅样品实现了对入射光偏振方向的选择性,可应用于实现分离获取特定旋向圆偏振光。

针对 PB 相位光栅可改变入射圆偏振光旋向的特性,设计了如图 8 所示光路进行验证。

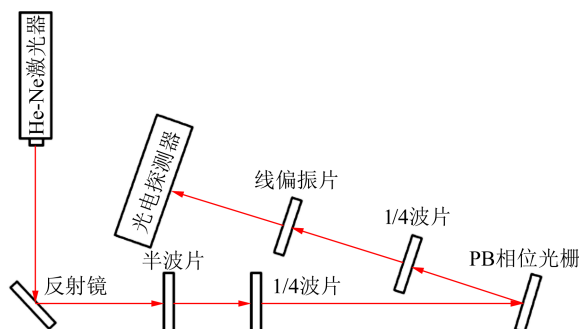


图 8 PB 相位光栅改变入射圆偏振光旋向特性的检测实验光路示意图

He-Ne 激光器发出波长为 632.8 nm 的线偏振红光,经过半波片后偏振方向与 x 轴夹角呈 45° ,再经过第 1 块 $1/4$ 波片起偏后变为右旋圆偏振光,经由 PB 相位光栅衍射,通过第 2 块 $1/4$ 波片后重新变为线偏振光。通过旋转线偏振片,测量 1 级衍射光强变化,记录光强极大值与极小值对应的刻度盘读数,即可判断出射圆偏振光的旋向。1 级衍射光强测量结果如表 2 所示,线偏振片透振方向对应刻度盘读数为 214° ,刻度盘朝向为激光传播方向。

表 2 1 级衍射光强测量结果

组别	E_{vmax}/Ix	θ_{max}	E_{vmin}/Ix	θ_{min}
1	63.3	169.5°	34.3	259.2°
2	64.8	168.9°	35.1	259.5°
3	64.4	169.2°	34.8	258.8°
4	64.2	169.4°	34.6	258.6°
5	64.3	168.6°	35.5	259.3°

理想的左旋圆偏振光,极大值与极小值应出现在 169° (或 349°)与 259° (或 79°)。实验结果与理论预期符合较好,出射圆偏振光为左旋圆偏振光,即 PB 相位光栅改变了入射圆偏振光的旋向。

4 结束语

本文设计并搭建了基于偏振全息术的 PB 相位光栅制备实验装置,制得 PB 相位光栅样品。实验方案具有制备装置简单、流程简短、制备效率高的优点。对于 PB 相位光栅高效单级衍射和改变入射圆偏振光旋向的特性,分别设计并搭建了相应的检测装置。衍射效率测量结果表明:该实验装置实现了对入射光偏振方向的选择性,可应用于实现分离获取特定旋向圆偏振光。

参考文献:

- [1] 郭永康,朱建华,王磊,等. 光学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2017:189.
- [2] 朱江转,马梦姿,杨伟雪,等. 基于菲涅耳双棱镜分波前干涉装置的全息光栅制作实验[J]. 物理实验, 2021,41(2):22-26.
- [3] 翁一士. 彩色波导显示光学耦合技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [4] LEE Y H, TAN G J, ZHAN T, et al. Recent progress in Pancharatnam-Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities [J]. Optical Data Processing and Storage, 2017,3: 79-88.
- [5] KIM J, GOPAKUMAR M, CHOI S, et al. Holographic glasses for virtual reality [C]//SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings. Vancouver, 2022.
- [6] KIM J, LI Y M, MISKIEWICZ M N, et al. Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts [J]. Optica, 2015,2(11):958.
- [7] CHENG H H, BHOWMIK A K, BOS P J, et al. Analysis of a dual-twist Pancharatnam phase device with ultrahigh-efficiency large-angle optical beam steering [J]. Applied Optics, 2015,54(32):10035-10043.
- [8] BOMZON Z, KLEINER V, HASMAN E. Pancharatnam-Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings [J]. Optics Letters, 2001,26(18):1424-1426.
- [9] YIN K, HSIANG E L, ZOU J, et al. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: Principles and applications [J]. Light: Sci-

- ence & Applications, 2022,11(7):1344-1365.
- [10] CRAWFORD G P, EAKIN J N, RADCLIFFE M D, et al. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques [J]. Journal of Applied Physics, 2005,98 (12):123102.
- [11] NIKOLOVA L, TODOROV T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording [J]. Optica Acta International Journal of Optics, 1984,31(5):579-588.

Preparation of Pancharatnam-Berry phase grating based on polarization holography

GUO Sanyu, REN Xuechang, LU Qinghong

(College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

Abstract: Pancharatnam-Berry (PB) phase grating not only has the unique property of being sensitive to the polarization direction of incident light, but also has a wide response bandwidth and a high single-stage diffraction efficiency. The liquid crystal technology based on polarization holographic recording was adopted, the photosensitive azo dye SD-1 was spin coated on a single conductive ITO glass substrate, the orientation layer with periodic rotation pattern of polarization could be obtained after exposure. Based on FDTD simulation, a preparation scheme for PB phase grating was designed and an experimental setup was built. The detection optical path of PB phase grating diffraction efficiency was designed to verify its efficient single-stage diffraction. It was verified by constructing a circularly polarized light detecting path that the characteristic of PB phase grating have changed the rotation of incident circularly polarized light.

Key words: PB phase grating; polarization holography; liquid crystal [编辑:任德香]

(上接 42 页)

Research on the evaluation of college students' optical cognitive development based on mental model

JIANG Lexin, ZHOU Shaona

(School of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Physical models are important thinking methods in physics learning. Exploring the structure and characteristics of students' mental models can improve the effectiveness of constructing physics models. In this study, the five-stage diagnostic test method was introduced to evaluate the light interference mental model of undergraduates majoring in physics, and the corresponding mental model understanding level was refined to deeply study the students' professional quality. The results showed that the understanding level of undergraduates' light interference mental model was quite different and the degree of mental model construction was incomplete. There were 6 types of scientific mental models and 11 types of non-scientific mental models. However, the non-scientific mental model had the trend of developing into a scientific mental model after the intervention of the light interference experiment. The more flexible understanding level of the mental model was, the stronger the confidence was, which was positively correlated.

Key words: interference of light; mental model; physical experiment; evaluation [编辑:郭伟]