

文章编号:1007-2780(2018)02-0144-06

非等光强正交圆偏振光对液晶偏振光栅衍射特性的影响

刘春杰^{1,2}, 彭增辉^{1*}, 李松振^{1,2}, 王启东¹, 刘永刚¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在实际的制备过程中,不可避免地存在非等光强正交圆偏振光制备液晶偏振光栅的情况。为了探究这种情况对制备出的液晶偏振光栅的衍射特性有何影响,本文首次从理论上,利用琼斯矩阵法推导计算出该情况下液晶偏振光栅的衍射特性。首先,计算出两束非等光强正交圆偏振光叠加后的偏振态分布。其次,利用斯托克斯参数表征叠加光场对光控取向膜的折射率响应矩阵。最后,以该响应矩阵为基础,求得液晶偏振光栅的 2×2 琼斯矩阵。结果表明,非等光强正交圆偏振光制备的液晶偏振光栅理论上可以实现 0 级和 1 级的光强分布同时受液晶盒盒厚和入射光偏振态的调制,实现 0 级或 ± 1 当中任意级次衍射效率可达 100%。在非等光强正交圆偏振光情况下,制备出的液晶偏振光栅依然具有良好的光学特性。

关键词:液晶;光栅;琼斯矩阵;光控取向

中图分类号:O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183302.0144

Diffraction properties of liquid crystal polarization gratings with orthogonal circular polarization and different intensities waves

LIU Chun-jie^{1,2}, PENG Zeng-hui^{1*}, LI Song-zhen^{1,2}, WANG Qi-dong¹, LIU Yong-gang¹(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: We report on the numerical analysis of liquid crystal polarization gratings (LCPGs), especially those were fabricated by two incident lights with orthogonal circular polarization and different intensities, and study their general diffraction properties by Jones calculus. First, we represent the electric fields of the incident waves respectively, and figured out the interference pattern and polarization properties. Second, the response matrix of the refractive index change by irradiating the polarized light was inferred and associated with the interference pattern by using the Stokes parameters.

收稿日期:2017-11-03; **修订日期:**2017-11-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61377032, No.61378075, No.11604327, No.61405194)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61377032, No.61378075, No.11604327, No.61405194)

* 通信联系人, E-mail: peng@ciomp.ac.cn

Finally, we obtained the 2×2 Jones matrix and the theoretical properties about the LCPGs based on the response matrix. The results indicate that the LCPGs fabricated by two incident lights with different intensities also can show high diffraction efficiency, about 100%, in zero order and ± 1 order.

Key words: liquid crystal; grating; Jones calculus; photoalignment

1 引言

光束偏转技术在激光通信、激光雷达和目标追踪等领域起着不可或缺的作用^[1-4]。传统的机械式角度偏转,存在精度和稳定性差,所占空间大等缺点;光学相控阵、液晶微透镜等非机械式角度偏转又无法解决偏转角受限这一问题^[5-7]。相较于这些方法,液晶偏振光栅(Liquid Crystal Polarization Gratings, LCPGs)同时具有偏转角度大,衍射效率高(理论可达 100%),响应时间快,可实现准连续调节等优势,具有很好的研究价值和应用前景^[8-9]。要制备出液晶偏振光栅,必须要在每个光栅周期的内部实现特定位置的液晶分子的具有特定的取向排列方向。光控取向法是实现这种取向排列的首选方法。

随着光控取向技术的快速发展,光控取向材料的成膜性、热稳定性和光稳定性越发优秀^[10-12]。在 2004 年,Crawford 小组首次实现两束光强相等的正交圆偏振光作为记录光进行干涉制备出液晶偏振光栅。

但是,在实际的制备过程中,由于制备用激光器出射的高斯光束自身的强度分布特性或者光路设计、摆放等因素,不可避免地存在非等光强正交圆偏振光制备液晶偏振光栅的情况,先前的研究者在液晶偏振光栅的制备研究中很少量化的分析该实验现象,已经发表论文的结果也不甚系统。本文利用琼斯矩阵分析了两束非等光强正交圆偏振光的光场叠加后的偏振态分布情况,接着推导出叠加后的椭圆偏振光对光控取向膜的取向作用,最后再采用琼斯矩阵法计算出采用这种取向膜制备液晶偏振光栅的衍射特性。

2 理论推导

2.1 光控取向膜折射率响应矩阵表示

图 1 所示是液晶偏振光栅制备光路。

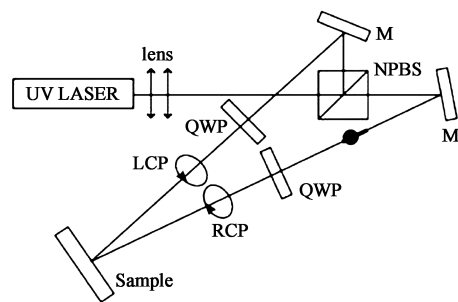


图 1 液晶偏振光栅的制备光路

Fig.1 optic design of LCPG

当椭圆偏振光入射到光控取向膜上,诱导出的折射率各向异性可以表示为^[13-17]:

$$\begin{cases} \Delta n_{\parallel} = C_{\parallel} a^2 + C_{\perp} b^2 \\ \Delta n_{\perp} = C_{\perp} a^2 + C_{\parallel} b^2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中: a, b 指的是椭圆偏振光的长轴与短轴, ψ 为偏振角(如图 2),“ $\parallel$ ”,“ $\perp$ ”分别指的是与长轴平行和垂直的两个方向, $\Delta n_{\parallel}, \Delta n_{\perp}$ 特指两正交方向的折射率变化量, $C_{\parallel}, C_{\perp}$ 分别表征的是在与长轴平行和垂直方向上,取向薄膜对入射光的响应系数。

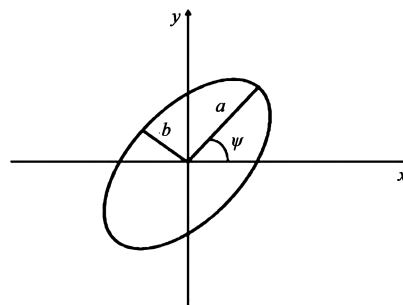


图 2 椭圆偏振光示意图(x, y 分别表征水平、竖直方向)

Fig.2 Polarization ellipse is determined by its axes a and b and its azimuth ψ (x, y denotes the horizontal and vertical directions respectively)

令

$$\mu = \frac{C_{\parallel} + C_{\perp}}{2}$$

$$\nu = \frac{C_{\parallel} - C_{\perp}}{2}$$

光控取向薄膜经过偏振光曝光之后, 折射率变化量 n_1 的琼斯矩阵表达式为

$$n_1 = \begin{bmatrix} \Delta n_{\parallel} & 0 \\ 0 & \Delta n_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu(a^2 + b^2) + \nu(a^2 - b^2) & 0 \\ 0 & \mu(a^2 + b^2) - \nu(a^2 - b^2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

为了统一坐标系, 如图 2 所示, n_1 应旋转偏振角 ψ , 得到其在坐标系 x - y 下的表达:

$$n_{1xy} = R(-\psi) n_1 R(\psi), \quad (3)$$

$R(\psi)$ 为坐标旋转矩阵,

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}, \quad (4)$$

可以得到 n_{1xy} :

$$n_{1xy} = \begin{bmatrix} \mu(a^2 + b^2) + \nu(a^2 - b^2)\cos(2\psi) & \nu(a^2 - b^2)\sin(2\psi) \\ \nu(a^2 - b^2)\sin(2\psi) & \mu(a^2 + b^2) - \nu(a^2 - b^2)\cos(2\psi) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对于如图 2 所示的单色椭圆偏振光, 其斯托克斯参数可以表示为:

$$\begin{cases} S_0 = a^2 + b^2 \\ S_1 = (a^2 - b^2)\cos(2\psi) \\ S_2 = (a^2 - b^2)\sin(2\psi) \end{cases}. \quad (6)$$

用 S_0 、 S_1 和 S_2 表达光诱导后的折射率变化量 n_{1xy} :

$$n_{1xy} = \begin{bmatrix} \mu S_0 + \nu S_1 & \nu S_2 \\ \nu S_2 & \mu S_0 - \nu S_1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2 非等强光干涉光场的理论分析

两束非等强光圆偏振记录光的光场可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= m \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \exp(-i\delta) \\ \mathbf{E}_2 &= n \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \exp(i\delta), \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$ 分别为两束非等强光圆偏振光的光场;

$$\delta = \delta_{(\xi)} = 2\pi \sin\theta \cdot \xi / \lambda_{\text{record}}, \quad (9)$$

ξ 为水平方向上点与原点之间的距离, 如图 3 所示。

m , n 表征的是两束非等强光场的振幅大小。将光场强度归一化, 得到 m , n 约束条件:

$$2(m^2 + n^2) = 1, \quad (10)$$

所以在光控取向薄膜上的叠加光场:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} (m+n)\cos\delta - i(m-n)\sin\delta \\ -(m+n)\sin\delta - i(m-n)\cos\delta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

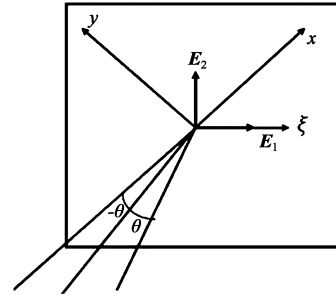


图 3 非等强光正交圆偏光的坐标系表示 (x , y 分别表征椭圆偏振光长轴、短轴方向)

Fig.3 Coordinate system of the orthogonal circular polarization and different intensities (x , y are related to directions parallel and perpendicular to the major axis of the polarization ellipse)

可以看出, 两束非等强光正交的圆偏光的干涉场光强恒定, 但是在偏振态上有调制作用, 且干涉场的偏振态都是椭圆度为 $\frac{m-n}{m+n}$ 的椭圆, 如图 4 所示。

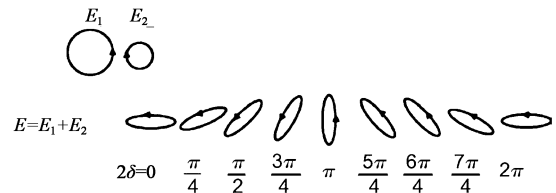


图 4 非等强光正交圆偏光干涉图样

Fig.4 Interference pattern of the waves with orthogonal circular polarization and different intensities

2.3 液晶偏振光栅透过率矩阵的计算

统一到 x - y 坐标系下,如图3所示,需要先将光场的表达式绕原点旋转 $\pi/4$,带入斯托克斯参数求解公式可得:

$$\begin{cases} S_0 = 2(m^2 + n^2) = 1 \\ S_1 = 4mn \cdot \cos(2\delta) \\ S_2 = -4mn \cdot \sin(2\delta) \end{cases}, \quad (12)$$

光诱导后的折射率变化量的矩阵为,

$$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} + 4mn \begin{bmatrix} \cos(2\delta) & -\sin(2\delta) \\ -\sin(2\delta) & -\cos(2\delta) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

用琼斯矩阵表示液晶偏振光栅的透过率函数:

$$T = \exp \left[i \frac{2\pi d}{\lambda} (n_0 + n_1) \right], \quad (14)$$

其中, n_0 为未曝光前的折射率, d 为液晶盒盒厚, λ 为测试波长。

在相位差 $\Delta\varphi = \pi\Delta nd/\lambda$ 非常小时,满足近似条件:

$$\begin{aligned} J_0(4mn \cdot \Delta\varphi) &= \cos(4mn \cdot \Delta\varphi) \\ J_1(4mn \cdot \Delta\varphi) &= \frac{\sin(4mn \cdot \Delta\varphi)}{2}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $J_0()$ 、 $J_1()$ 分别指的是 0 阶和 1 阶贝塞尔函数。

省略所有相位常数项,对透过率函数利用贝塞尔函数展开,得:

$$T = T_{-1} + T_0 + T_{+1}, \quad (16)$$

其中:

$$\begin{aligned} T_0 &= \cos(4mn\Delta\varphi) \\ T_{+1} &= \frac{i \sin(4mn\Delta\varphi)}{2} \exp(i \cdot 2\delta) \cdot \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix} \\ T_{-1} &= \frac{i \sin(4mn\Delta\varphi)}{2} \exp(-i \cdot 2\delta) \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

当入射光照射到由非等光强正交圆偏振光干涉制出的 LCPG 上时,

令入射光为任意椭圆偏振光:

$$\begin{aligned} E_{in} &= \begin{bmatrix} a_1 \\ -b_1 \cdot i \end{bmatrix} \\ a_1^2 + b_1^2 &= 1, \end{aligned} \quad (17)$$

通过 $E_{out} = T \cdot E_{in}$ 分别计算出 0, ± 1 级衍射光场表达式:

$$E_{0-out} = \cos(4mn\Delta\varphi) \begin{bmatrix} a_1 \\ -b_1 \cdot i \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} E_{+1-out} &= i \frac{\sin(4mn\Delta\varphi)}{2} (a_1 + b_1) \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \\ E_{-1-out} &= i \frac{\sin(4mn\Delta\varphi)}{2} (a_1 - b_1) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (18)$$

进而求解出 0, ± 1 的衍射光强:

$$\begin{aligned} I_0 &= \cos^2(4mn\Delta\varphi) \\ I_{+1} &= \frac{\sin^2(4mn\Delta\varphi)}{2} (a_1^2 + b_1^2 + 2a_1b_1) \\ I_{-1} &= \frac{\sin^2(4mn\Delta\varphi)}{2} (a_1^2 + b_1^2 - 2a_1b_1). \end{aligned} \quad (19)$$

从理论分析的结果中可以看出,在相位差 $\Delta\varphi = \pi\Delta nd/\lambda$ 非常小时,入射光为任意椭圆偏振光,经由两束非等光强正交圆偏振光制备出来的 LCPG,理论上会有且仅会出现 0, ± 1 三个衍射级次。

理论上要想 ± 1 级衍射效率达到 100%,也即消除 0 级光,由余弦函数性质可知,需要满足:

$$\Delta nd = (k + 1/2)\lambda/4mn, k = 0, \pm 1 \dots \quad (20)$$

当满足上述消 0 级光的条件时, ± 1 级的衍射效率($\pm \eta_1$)——由光强公式可以看出,当 $a_1 = b_1$ 时,入射光为右旋圆偏光, -1 级衍射效率为 0, $+1$ 级衍射效率理论上为 100%;同理,当 $a_1 = -b_1$ 时,入射光为左旋圆偏光, -1 级衍射效率为 100%。

由此可见,光强在 ± 1 级的分配可以由入射光的偏振态进行调制——其中,当入射光为右/左圆偏振光时, $+1/-1$ 级衍射效率理论上达 100%。如图 5 所示, χ 为入射光椭圆偏角。

结果表明,在相位差 $\Delta\varphi = \pi\Delta nd/\lambda$ 非常小时,对

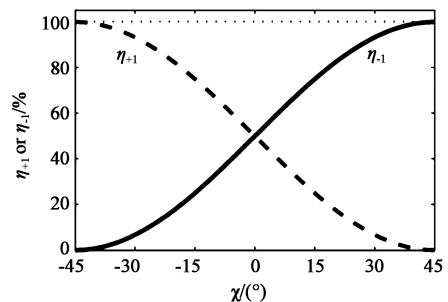


图5 当 $\Delta nd = (k + \frac{1}{2})\lambda/4mn$, ± 1 级的衍射效率

Fig.5 Diffraction efficiencies of a LCPG as $\Delta nd =$

$$(k + \frac{1}{2})\lambda/4mn$$

于非等光强正交圆偏振光干涉制出的 LCPGs 来说, 液晶偏振光栅依然可以通过匹配 $\Delta nd = (k + \frac{1}{2})\lambda/4mm$, 以及入射光偏振态的调制, 实现单一级次衍射效率高(理论值为 100%)的特性。

3 结 论

本文利用琼斯矩阵法计算出了非等光强椭圆

偏振光对光控取向膜的折射率响应矩阵, 得出两束非等光强正交圆偏振光对液晶偏振光栅衍射特性的影响, 并得出 LCPGs 的衍射特性的理论表示。

在非等光强正交圆偏振光情况下, 制备出的液晶偏振光栅依然具有良好的光学特性, 有效地降低了制备液晶偏振光栅的实验要求, 该结果对实验具有良好的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] BUCK J, SERATI S, HOSTING L, *et al.* Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications [J]. SPIE, 2012, 8395: 83950F.
- [2] 王灿进, 孙涛, 李正炜. 基于快速轮廓转动力矩特征的激光主动成像目标识别[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 775-784.
WANG C J, SUN T, LI Z W. Target recognition in laser active imaging based on fast contour torque features [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 775-784. (in Chinese)
- [3] 王新华, 黄玮, 欧阳继红. 多探测器拼接成像系统实时图像配准[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 211-219.
WANG X H, HUANG W, OUYANG J H. Real-time image registration of the multi-detectors mosaic imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 211-219. (in Chinese)
- [4] 郭巴秋, 许廷发, 王洪庆, 等. 改进的粒子群优化目标跟踪方法[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 759-767.
GUO S Q, XU T F, WANG H Q, *et al.* Object tracking method based on improved particle swarm optimization [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 759-767. (in Chinese)
- [5] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [6] 邹永超, 司磊, 陶汝茂, 等. 基于液晶材料的光束偏转技术研究进展[J]. 激光技术, 2011, 35(3): 293-298, 304.
ZOU Y C, SI L, TAO R M, *et al.* Research progress of liquid crystal based light beam steering technique [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 293-298, 304. (in Chinese)
- [7] MCMANAMON P F, BOS P J, ESCUTI M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [8] JONES W M. Development of switchable polarization gratings for highly efficient liquid crystal displays [D]. Raleigh: the Graduate Faculty of North Carolina State University, 2006.
- [9] TAN L. Liquid crystal polarization gratings and their applications [D]. Hong Kong, China: The Hong Kong University of Science and Technology, 2013.
- [10] 纪小妹, 焦杨, 董晓明, 等. 液晶光定向材料研究进展[J]. 信息记录材料, 2008, 9(4): 33-41.
JI X M, JIAO Y, DONG X M, *et al.* Development of research on LC light control materials [J]. *Information Recording Materials*, 2008, 9(4): 33-41. (in Chinese)
- [11] 梁兆颜, 宣丽, 杨柏梁, 等. 光控取向弱锚定表面的液晶分子排列[J]. 液晶与显示, 2000, 15(1): 53-60.
LIANG Z Y, XUAN L, YANG B L, *et al.* Liquid crystal molecules alignment on the weak anchoring surface by LPP method [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2000, 15(1): 53-60. (in Chinese)
- [12] 姚丽双, 彭增辉, 张伶俐, 等. 一种新型光敏小分子用于光控取向的研究[J]. 液晶与显示, 2007, 22(5): 516-519.
YAO L S, PENG Z H, ZHANG L L, *et al.* Photoalignment film of liquid crystal based on a novel photosensitive monomer [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(5): 516-519. (in Chinese)
- [13] NIKOLOVA L, RAMANUJAM P S. *Polarization Holography* [M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [14] HIROSHI O, MANABU N, AKIRA E, *et al.* Diffraction properties in polarization holography written by ellipti-

- cal polarized light [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(3): 032502.
- [15] ONO H, NAKAMURA M, KAWATSUKI N, *et al.* Conversion of circularly polarized light into linearly polarized light in anisotropic phase gratings using photo-cross-linkable polymer liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(23): 231107.
- [16] PAN X, XIAO S F, WANG C S, *et al.* Photoinduced anisotropy in an azo-containing ionic liquid - crystalline polymer [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(5): 763-768.
- [17] CHOI H, WU J W. Optical properties of holographically generated twisted nematic liquid-crystal gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(1): 1-9.

作者简介:刘春杰(1994—),男,安徽舒城人,硕士研究生,2015年于重庆大学获得学士学位,主要从事液晶偏振光栅制备与应用的研究。E-mail: chunjie0209@163.com

彭增辉(1976—),男,河北石家庄人,研究员/博士生导师,分别于1998年和2001年在吉林大学获得学士学位、硕士学位,2005年于长春光学精密机械与物理研究所获凝聚态博士学位,主要从事液晶组液晶器件物理与材料化学两个方向的研究。E-mail: peng@ciomp.ac.cn