

级联液晶偏振光栅的衍射特性分析

王丽娜, 李明秋*, 王春阳, 史红伟, 牛启凤

长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 液晶偏振光栅(LCPG)可实现光束非机械偏转,LCPG 在实际制备中液晶分子填充不均匀会导致液晶层厚度不均匀,从而使光通过级联 LCPGs 有效区域的同一位置时的衍射效率降低。为了提高级联 LCPGs 的衍射效率,基于琼斯矩阵理论分析了驱动电压对 LCPG 衍射效率的影响,利用三级级联 LCPGs 构建光束偏转实验装置,通过施加不同驱动电压来测量光斑能量,得到衍射效率随电压的变化关系曲线。实验结果表明,当电压在 2.0~2.4 V 范围内时,+1 级衍射效率达到 0.80~0.84。

关键词 光栅;级联液晶偏振光栅;光束偏转;衍射效率;驱动电压

中图分类号 TN209

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030501

Diffraction Characteristics Analysis of Cascaded Liquid Crystal Polarization Gratings

Wang Li'na, Li Mingqiu*, Wang Chunyang, Shi Hongwei, Niu Qifeng

College of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Liquid crystal polarization grating (LCPG) can achieve non-mechanical beam steering. During the actual preparation of LCPGs, the filling of liquid crystal molecules is not uniform, resulting in uneven liquid crystal layer thickness, which reduces the diffraction efficiency of light through the same position of the effective region of cascaded LCPG. This study analyzes the influence of driving voltage on the diffraction efficiency of LCPG based on Jones matrix theory to improve the diffraction efficiency of cascaded LCPGs. An experimental device is constructed for beam deflection using a three-stage cascaded LCPGs. The spot energy is measured by applying varying driving voltages, and the relationship between the diffraction efficiency and the voltage is obtained. The experimental results show that the +1st-order diffraction efficiency reaches 0.80–0.84 when the voltage is in the range of 2.0–2.4 V.

Key words gratings; cascaded liquid crystal polarization gratings; beam deflection; diffraction efficiency; driving voltage

OCIS codes 050.1950; 120.5060; 090.1970; 250.7360

1 引言

非机械光束扫描是一种实现激光光束方向精确控制的技术,具有速度快和易控制等优点,在航空航天、新体制激光雷达、空间光通信等领域有着广泛的应用前景^[1-4]。

目前,实现大角度光束偏转的器件主要有电控双折射棱镜、液晶微透镜阵列、液晶偏振光栅(LCPG)

等。佛罗里达大学利用多个双折射棱镜单元级联在 1500 nm 波长条件下实现了最大扫描角度为 40.92° 的光束扫描^[5],对于较大的偏转角,需要较厚的棱镜来实现光束扫描,但是易导致明显的偏移。美国空军研究室的 Shi 等^[6]通过控制液晶微透镜阵列,产生了透镜阵列偏移,从而实现了光束的扫描,但扫描角度过大时存在比较严重的渐晕,整个光学系统的装配误差等人为因素都会造成衍射效率的损耗。

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-04; 录用日期: 2019-08-12

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20190302089GX)

* E-mail: 2314836044@qq.com

LCPG 是一种超薄的衍射光学元件,相较于其他衍射元件,其尺寸、重量和偏移角有明显减小,且在理想情况下可以达到近 100% 的衍射效率^[7]。为了实现大角度、高精度的非机械光束扫描,通常将液晶半波板(LCHWP)与多个 LCPGs 级联。目前,在实际制备中,LCPG 存在液晶分子填充不均匀的问题,导致各片 LCPG 的液晶层厚度不均匀,使得各片 LCPG 需要匹配的光延迟存在差异,从而导致光通过级联 LCPGs 有效区域同一位置时的衍射效率降低。基于此,本文设计了一维准三元结构,在 1064 nm 波长下利用三级级联 LCPGs 搭建了一个实验系统,通过给各片 LCPG 施加不同电压,完成电压的标定,得到精确电压值,使级联 LCPGs 各级的衍射效率达到 80% 以上,为实现大角度、高精度、高衍射效率的非机械光束扫描奠定了基础。

2 LCPG 的原理

2.1 LCPG 的结构和衍射特性

LCPG 由平面单轴双折射液晶分子构成,液晶分子指向矢随其位置 x 的变化而变化^[7-8],如图 1 所示。液晶分子指向矢的表达式为

$$\mathbf{n}(x) = [\sin(\pi x/\Lambda), \cos(\pi x/\Lambda), 0], \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅周期。液晶分子指向矢的方位角 φ ($\varphi = \pi x/\Lambda$) 沿 x 轴呈线性周期变化^[9]。

利用琼斯矩阵可以推导出垂直入射时 LCPG 的理想衍射效率^[10],衍射效率表达式为

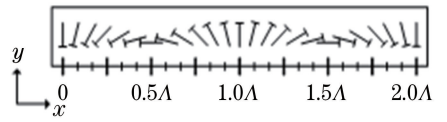


图 1 LCPG 的结构

Fig. 1 Structure of LCPG

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

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1 \mp S'_3}{2} \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right), \quad (3)$$

式中: η_m 为 m 级衍射效率; $S'_3 = S_3/S_0$ 为归一化斯托克斯参数,对应于入射偏振的椭圆率, S_0 为总光强度, S_3 为圆偏振光的分量; Δn 为液晶的双折射率; d 为液晶层的厚度; λ 为入射光的波长。由(2)、(3)式可以得出 LCPG 只有三个衍射级:0 级和 ± 1 级,衍射级间的强度分布取决于入射偏振和相位延迟^[11]。如果施加一定电压使液晶分子的双折射率 Δn 为 $\lambda/2d$,则 0 级衍射效率将为零,且所有的光将偏转到 ± 1 级。当入射光是右旋圆偏振光(RCP),即 $S'_3 = -1$ 时,那么衍射效率将是 $\eta_{+1} = 1$ 和 $\eta_{-1} = 0$,所有通过 LCPG 的光被衍射到 +1 级,如图 2(a) 所示。如果入射光是左旋圆偏振光(LCP),即 $S'_3 = +1$,则所有的光被衍射到 -1 级,如图 2(b) 所示。当 LCPG 处于高电压时,入射光在轴上透射(0 级衍射方向),如图 2(c) 所示。

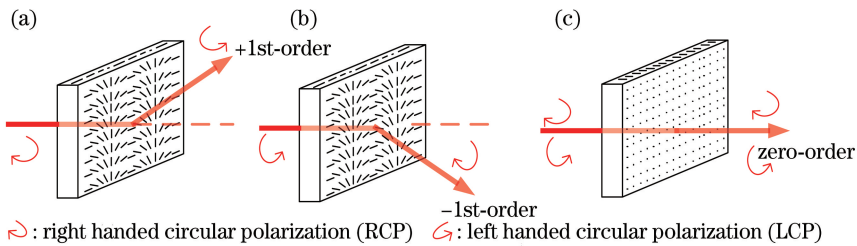


图 2 LCPG 的衍射特性。(a)入射光为 RCP;(b)入射光为 LCP;(c) LCPG 处于高电压下

Fig. 2 Diffraction properties of LCPG. (a) Incident light is RCP; (b) incident light is LCP; (c) LCPG at high voltage

2.2 LCPG 的光学特性

LCPG 是由电控双折射特性的液晶材料制成,当驱动电压高于 LCPG 的阈值电压时,液晶分子指向矢的倾斜角会发生改变^[12]。不同的液晶分子排列状态会引起不同的液晶等效双折射率。根据液晶指向矢分布及液晶折射率各向异性的光学特性,液晶的双折射率可表示为^[13]

$$\Delta n = |n_{\text{eff}} - n_o| = \left| \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} - n_o \right|, \quad (4)$$

式中: θ 为液晶指向矢的倾斜角; n_o, n_e 分别为液晶中寻常光和非寻常光的折射率; n_{eff} 为液晶的有效折射率。施加电压驱动液晶分子转动,倾斜角 θ 发生变化,导致 Δn 发生变化,由(2)~(4)式可知衍射效率随之发生变化。值得注意的是,(4)式中的 n_{eff} 、 Δn 均取的是一个等效平均值^[14]。

LCPG 是双折射光栅,衍射角由光栅方程决定,在正入射条件下,LCPG 的衍射角的表达式为^[15]

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (5)$$

式中： θ_m 为透射光的衍射角， $m = \{-1, 0, +1\}$ 为衍射级次。由(5)式可以看出，通过制备不同周期的 LCPG，其偏转角可以达到十几度甚至几十度。而通过不同周期 LCPG 的组合就可以实现多角度的大范围光束调控。

3 多级级联 LCPGs

3.1 LCPG 的准三元结构

本文的级联 LCPGs 是由一个 LCHWP 和三个 LCPGs (偏转角分别为 3° 、 2° 、 1°) 堆叠而成。LCHWP 可以改变入射光的偏振状态，给 LCHWP 施加一定的电压，可以使入射的圆偏振光发生 LCP→RCP(RCP→LCP) 的变化。当电压值达到饱和时，入射光的偏振状态不再改变^[16]。图 3 为准三元结构。

LCPG 在实际制备中液晶分子填充不均匀会导致液晶层厚度不均匀^[14]，从而使得光通过级联 LCPGs 有效区域同一位置时的衍射效率降低。为了提高级联 LCPGs 的衍射效率，需要对每一片 LCPG 的电压进行标定。

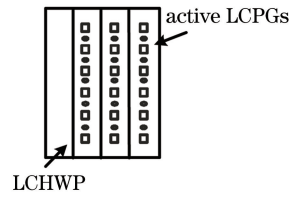


图 3 准三元结构

Fig. 3 Quasi-ternary structure

3.2 多级级联 LCPGs 的电压标定

实验装置如图 4 所示，整个系统由激光器、四分之一波片(QWP)、级联 LCPGs、能量计等构成。实验中采用 1064 nm 的线偏光，通过光阑空间滤波、准直器准直，以及扩束镜压缩光束发散角，使入射激光尽可能接近平形光，确保其垂直于基板平面，使用 QWP 将光的偏振状态设置为 RCP，最后经过级联 LCPGs 后光束发生偏转，出射光束照射到能量计上。在级联 LCPGs 上施加 1 kHz 的方波，利用 PC 控制驱动器产生 LCPG 所需的驱动电压信号，通过 PC 控制软件的输入来改变电压值，同时用能量计记录 0 级、+1 级衍射光强度随控制电压的变化，来完成级联 LCPGs 电压的标定。

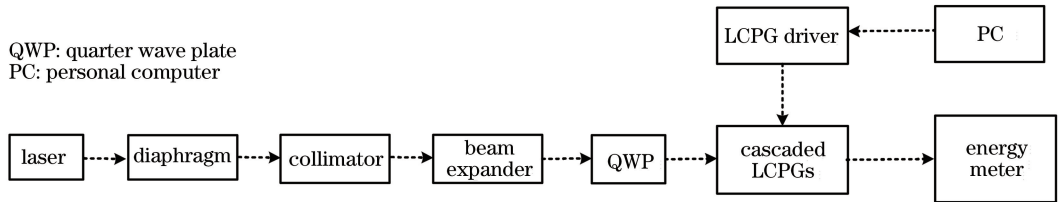


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of the experimental device

用能量计对级联 LCPGs 输入与输出光进行能量测量，分析各片 LCPG 在不同驱动电压下的衍射效率。衍射效率 η 可表示为^[16]

$$\eta = I_m / I_{tot}, \quad (6)$$

式中： I_m 为从级联 LCPGs 出射的第 m 衍射级的光斑能量； I_{tot} 为入射到级联 LCPGs 的光斑能量。

4 实验结果与分析

给级联组 LCPGs(2° 、 1°) 同时施加 20 V 的高电压，根据实验数据拟合出不同驱动电压与 LCHWP 衍射效率之间的曲线关系，如图 5 所示。从图 5 可以看出：电压在 2.5 V 时，衍射效率最低，接近 0；随着电压的增加，衍射效率持续上升，电压在 12 V 时，衍射效率达到最高，为 0.84。故可以得到本文中的 LCHWP 调偏振态的电压值为 2.5 V，饱和电压值为 12 V。根据图 5 结果，通过给 LCHWP 施加 12 V

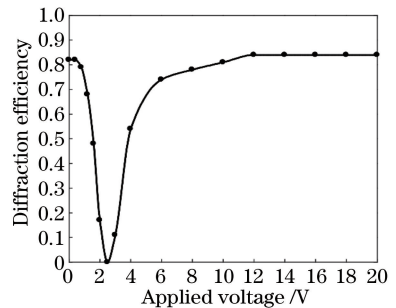


图 5 LCHWP 衍射效率

Fig. 5 Diffraction efficiency of LCHWP

的电压，给偏转角为 1° 和 2° 的 LCPG 施加 20 V 的固定电压，根据实验数据拟合出不同驱动电压与 3° LCPG 的 0 级衍射效率之间的曲线关系，如图 6 所示。

从图 6 可以看出，当施加电压值大于阈值电压时，衍射效率开始发生变化，当电压增加到 2.2 V

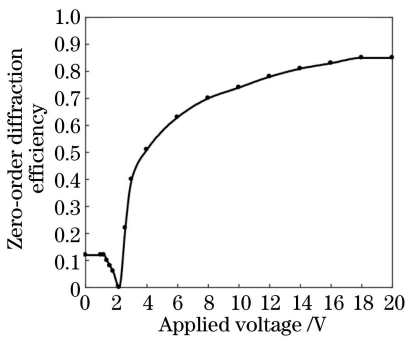


图6 0级衍射效率实验结果

Fig. 6 Experiment results of zero-order diffraction efficiency

时,LCPG衍射效率最低,随着电压的增加,衍射效率逐渐增大,在电压为20 V左右时达到最大,为0.85。

利用图5结果,给LCHWP施加12 V的固定电压,给偏转角为 2° 、 3° 的LCPG各施加20 V电压,根据实验数据拟合出偏转角为 1° 的LCPG在不同驱动电压下的+1级衍射效率,如图7中虚线所示;给LCHWP施加12 V的固定电压,给偏转角为 1° 、 3° 的LCPG各施加20 V电压,根据实验数据拟合出偏转角为 2° 的LCPG在不同驱动电压下的+1级衍射效率,如图7中圈标线所示;给LCHWP施加12 V的固定电压,给偏转角为 1° 、 2° 的LCPG各施加20 V电压,根据实验数据拟合出偏转角为 3° 的LCPG在不同驱动电压下的+1级衍射效率,如图7中实线所示。

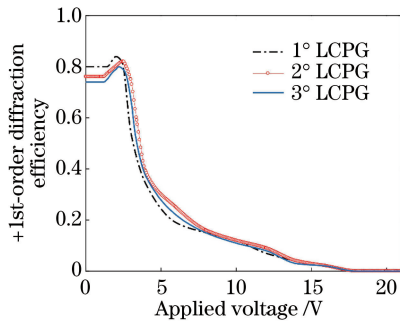


图7 +1级衍射效率实验结果图

Fig. 7 Experiment results of +1st-order diffraction efficiency

从图7中可以看出:各片LCPG的阈值电压约为1.4 V,偏转角为 1° 的LCPG在电压值为2.0 V时衍射效率达到最高,接近0.84;偏转角为 2° 的LCPG在电压值为2.4 V时衍射效率达到最高,接近0.82;偏转角为 3° 的LCPG在电压值为2.2 V时衍射效率达到最高,接近0.80。随着电压的增加,衍射效率持续下降,在高电压20 V左右,降为0。

5 结 论

本文基于琼斯矩阵理论,从器件结构参数出发,着重分析了外加驱动电压对级联LCPGs衍射效率的影响,利用MATLAB对不同驱动电压下的衍射效率的实验数据进行拟合。实验结果表明:LCHWP的驱动电压为2.5 V时,可以改变圆偏光的偏振状态;当LCPG的对应电压大于等于12 V时,0级衍射效率趋于稳定,最高达0.85;当电压在2.0~2.4 V范围内时,LCPG的+1级衍射效率为0.80~0.84。本研究为实现大角度、高精度、高衍射效率的非机械光束扫描奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110002.
胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110002.
- [3] Ding K, Qi B. Beam steering performance simulation of liquid crystal spatial light modulator based on 2D scalar diffraction [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0205005.
丁科, 齐波. 基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0205005.
- [4] Han X Q, Li L, Tan D J, et al. Liquid crystal optical phased array technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 23(1): 65-69.
韩学勤, 李丽, 谭东杰, 等. 液晶光学相控阵技术[J]. 航空科学技术, 2012, 23(1): 65-69.
- [5] Shi Y B, Si L, Ma Y X. New progress of beam scanning technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080024.
师宇斌, 司磊, 马阎星. 光束扫描技术研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080024.
- [6] Shi L, Shi J R, McManamon P F, et al. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light [J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 409-421.
- [7] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization

- gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8052: 80520T.
- [8] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7093: 709302.
- [9] Zhao X J, Duan J Z, Zhang D Y, et al. Oblique incidence effect on steering efficiency of liquid crystal polarization gratings used for optical phased array beam steering amplification [J]. Optical Review, 2016, 23(5): 713-722.
- [10] Oh C, Komanduri R, Escuti M J. P-167: FDTD and elastic continuum analysis of the liquid crystal polarization grating [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2006, 37(1): 844-847.
- [11] Tehrani M K, Mousavi Fard S S. Design of LCPG-type polarization-independent shutter with diffractive efficiency and high contrast at wavelength 532 nm [J]. Laser Physics, 2017, 27(2): 026201.
- [12] Duan W, Chen P, Wei B Y, et al. Fast-response and high-efficiency optical switch based on dual-frequency liquid crystal polarization grating [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(2): 597-602.
- [13] Niu Q F, Wang C Y, Zhang G P, et al. Solution of liquid crystal phased array director and its beam deflection [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2894-2901.
牛启凤, 王春阳, 张广平, 等. 液晶相控阵指向矢分布求解及其光束偏转[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2894-2901.
- [14] Liu C J. The study on the fabrication of active liquid crystal polarization grating [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
刘春杰. 主动式液晶偏振光栅的制备研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [15] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Nonmechanical laser beam steering based on polymer polarization gratings: design optimization and demonstration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(10): 2068-2077.
- [16] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7816: 78160G.