

引用格式: LIU Zhuang, WANG Qidong, WANG Chao, et al. Deflection Angular Model of Orthogonal Cascade Liquid Crystal Polarization Gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1105003

刘壮,王启东,王超,等. 正交级联液晶偏振光栅角度偏转模型[J].光子学报,2021,50(11):1105003

正交级联液晶偏振光栅角度偏转模型

刘壮^{1,2},王启东²,王超¹,史浩东¹

(1 长春理工大学 空间光电技术研究所,长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,长春 130033)

摘要:目前正交级联液晶偏振光栅使用过程中的偏转角度均被认为是其角分辨率的整数倍,实际使用过程中,正交级联液晶偏振光栅的偏转角度与设计角度存在一定偏差。针对该问题,给出了正交级联液晶偏振光栅偏转角度计算模型。首先根据单片液晶偏振光栅角度偏转理论,推导出级联液晶偏振光栅偏转角度公式,然后进一步推导出二维正交级联液晶偏振光栅角度偏转模型,分析了二维正交级联液晶偏振光栅角度偏转范围与角间隔之间关系,分别计算出满足一定角度范围的角间隔,满足一定角度间隔的角度范围以及同时满足角度范围、角度间隔的设计角间隔。最后分别利用光学设计软件建立了精度为 0.001° 的软件模型并构建测量精度为 0.1° 的实物测试系统,证明了角度偏转模型的准确性。

关键词:衍射光学;液晶偏振光栅;正交级联;角度范围;角度间隔

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215011.1105003

Deflection Angular Model of Orthogonal Cascade Liquid Crystal Polarization Gratings

LIU Zhuang^{1,2}, WANG Qidong², WANG Chao¹, SHI Haodong¹

(1 Institute of Space Photo-electronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, China Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: At present, the deflection angle of orthogonal cascaded liquid crystal polarization grating is considered to be an integral multiple of its angular resolution. Actually, there is deviation between the actual deflection angle and the design angle of the orthogonal cascade liquid crystal polarization gratings. To solve this problem, the deflection angle formula of cascaded liquid crystal polarization gratings is derived according to the angle deflection theory of single-chip liquid crystal polarization gratings firstly, and then the deflection angle model of two-dimensional orthogonal cascaded liquid crystal polarization gratings is derived, the relationship between the deflection range and the angle resolution of two-dimensional orthogonal cascaded liquid crystal polarization gratings is analyzed, and the actual angle resolution satisfying a certain angle range, the angle range that satisfying the actual angle interval and the design angle interval that satisfying the angle range and angle interval at the same time is calculated respectively. Finally, A software model which measurement accuracy is 0.1° is established use optical design software and a construction which measurement accuracy is 0.1° are established, they prove that the angular

基金项目:国家自然科学基金(No.61805028),吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划(No.JJKH20190566KJ),应用光学国家重点实验室开放基金(No.SKLAO2021001A08),长春理工大学青年基金(No.XQNJJ-2018-20)

第一作者(通讯作者):刘壮(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为空间激光通信与激光雷达技术。Email: zhuangzhilingyun2007@aliyun.com

收稿日期:2021-06-28;**录用日期:**2021-09-29

<http://www.photon.ac.cn>

deflection model is accurate.

Key words: Diffractive optics; Liquid crystal polarization grating; Orthogonal cascade; Angular range; Angular resolution

OCIS Codes: 050.2770; 350.5730; 050.1960

0 引言

液晶偏振光栅(Liquid Crystal Polarization Gratings ,LCPG)是一种衍射光学元件,不同偏振态光束入射LCPG后能量分布在不同衍射级次,将可调半波片与LCPG串联,利用可调半波片控制入射光偏振态可实现光束出射方向的非机械偏转,将多片液晶偏振光栅正交串联排布组成正交级联偏振光栅(Orthogonal Cascade Liquid Crystal Polarization Gratings ,OC-LCPGs),可实现光束大角度范围、小角度间隔的二维偏转(角度范围可达到 $\pm 40^\circ$,角度间隔可达到 1.25°)。相较于机械偏转器件,OC-LCPGs具有尺寸小、重量轻、功耗低的优势。相较于液晶空间光调制器、光纤相控阵、光波导相控阵等非机械指向器件,其具有偏转角度大的优势,所以在激光通信、激光雷达、激光测距、激光测高等领域均具有广阔应用前景^[1-4]。

偏转角度是OC-LCPGs最重要的参数之一,决定了其应用领域与使用方式。目前,关于OC-LCPGs的文献^[5-8]均假设其光束偏转角度是其中每片LCPG偏转角度的叠加,即偏转角度是其角度间隔的整数倍。使用过程中发现,单片LCPG可实现的偏转角会随着入射角变化而变化,所以级联后面LCPG的出射角与设计值会存在一定偏差,光束经过OC-LCPGs后两个维度的角度并不独立,这一影响使实际出射角度进一步偏离设计值。

本文根据单片LCPG角度偏转的理论,进一步推导出一级级联LCPG以及OC-LCPGs偏转角度模型,证明了实际值与设计值间偏差的存在,并且给出了实际偏差值,分析了偏转角度范围与角度间隔之间的关系,通过软件模拟以及实物测试的方式证明了模型的准确性。

1 OC-LCPGs角度偏转理论

1.1 单片LCPG角度偏转原理

LCPG是由平面单轴双折射液晶分子构成的,液晶分子矢量随其位置呈周期性变化,一个周期内结构如图1。

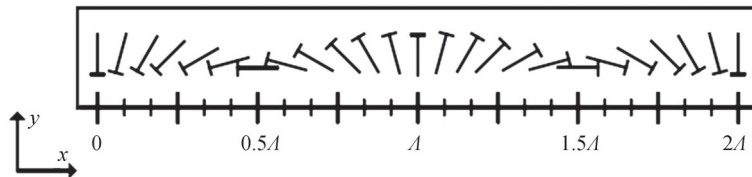


图1 一个周期内LCPG的分子结构
Fig.1 Molecular structure of LCPG in one cycle

其两个偏振态的折射率为

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

式中, Λ 是光栅周期,液晶分子的相位 $\varphi = \pi x/\Lambda$ 沿 x 轴呈周期变化^[5-9]。

LCPG包含主动LCPG与被动LCPG两种,其中技术成熟的是被动LCPG,被动LCPG的衍射特性如图2所示:入射光经过被动LCPG后光能量主要集中在+1级与-1级,当入射光是右旋圆偏振光时,出射光光强主要集中在+1级,当入射光是左旋圆偏振光时,出射光能量主要集中在-1级;当入射光为线偏振光或者自然光时,出射光能量由+1级与-1级均分。通过在被动LCPG前加入可调半波片,转换入射偏振光左旋与右旋的状态,可实现出射光束在 ± 1 级角度($\pm \theta^\circ$)的偏转。如图3所示,利用两片相同的被动LCPG与两片可调半波片串联组成一个“LCPG层”,可实现 0° 、 $-2\theta^\circ$ 、 $+2\theta^\circ$ 三个角度的偏转。

单片LCPG偏转角度与光栅相同,激光经过光栅后出射角度与光栅常数之间关系^[9]为:

$$\sin(\theta_{\text{out}}) = \frac{m\lambda}{d} - \sin(\theta_{\text{in}}) \quad (2)$$

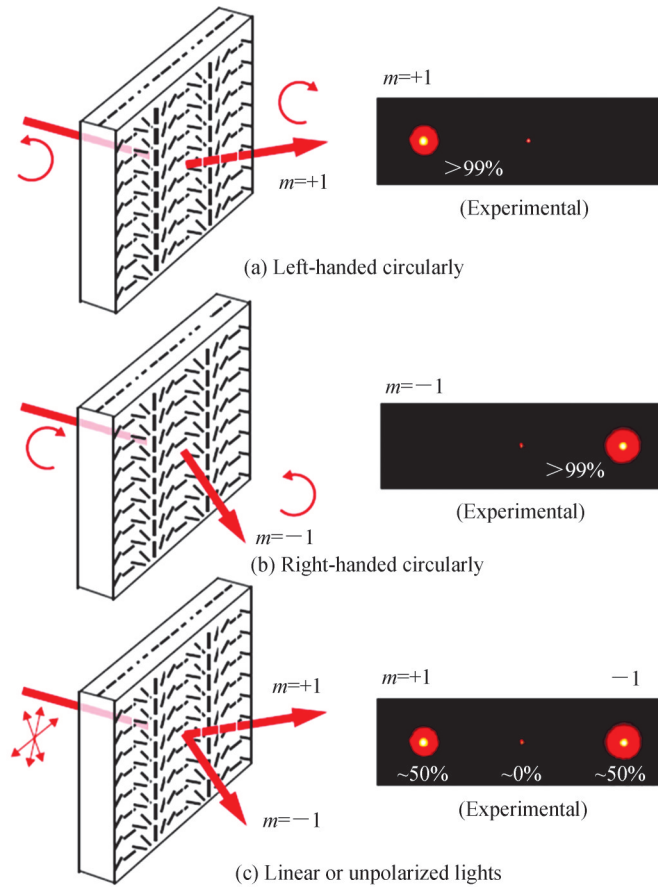


图2 被动LCPG的衍射特性
Fig.2 Diffraction properties of passive LCPG.

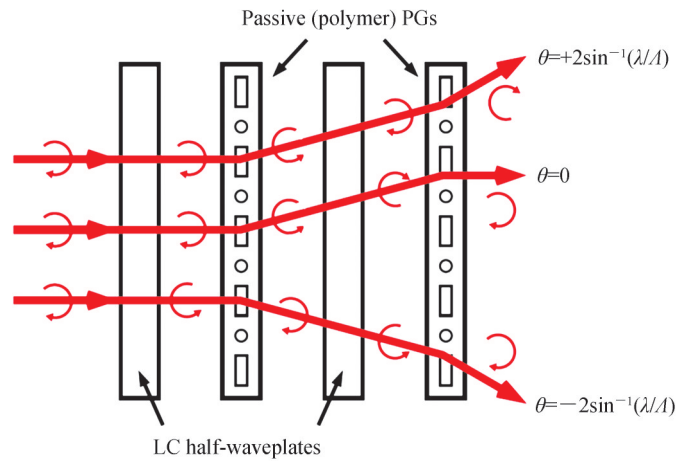


图3 两片液晶可调半波片与两片LCPG组成的LCPG层
Fig.3 Passive LCPG stage with two variable LC half wave plates and two LCPG

式中, θ_{out} 为出射角, θ_{in} 为入射角, λ 为入射光波长, m 为衍射级次 (m 通常取 ± 1), d 为光栅常数。

对于2片被动LCPG串联的LCPG层:

$$\sin(\theta_{out}) = \left(\pm \frac{1}{d_1} \pm \frac{1}{d_2} \right) \lambda - \sin(\theta_{in}) \quad (3)$$

式中, d_1 、 d_2 分别为LCPG层中两片相同的LCPG光栅常数, $d_1 = d_2$, 正负号取决于可调半波片的控制参数。例如: 对于偏转角度分别为 1.25° 、 2.5° 、 5.0° 、 10.0° 、 20.0° 的LCPG层, 当工作波长为 1550 nm 时, 根据式(3),

光栅常数分别为 142.10 μm 、71.07 μm 、35.57 μm 、17.85 μm 、9.06 μm 的光栅,对应线密度分别为 7.04 lines/mm、14.07 lines/mm、28.12 lines/mm、56.02 lines/mm、110.33 lines/mm。

1.2 一维级联 LCPG 光束调制角度计算

级联 LCPG 是将多个 LCPG 层串联组合,每个 LCPG 层实现一个固定角度的偏转,多层 LCPG 组合可实现大角度范围的偏转,组合形式包含:二值式、类二值式与三值式,其中最常用的组合形式是二值式^[10~12]。

二值式组合实现大角度偏转方法为第一层决定角度间隔,以后每一层的衍射角都是前一层衍射角的 2 倍(例如:1.25°、2.5°、5.0°、10.0°、20.0°),对于一个 N 层的级联 LCPG,理论上共可以控制 2^{N+1} 个角度,为了实现 1.25° 间隔,±40° 范围的角度偏转控制,共需要 5 层 LCPG ($2 \times 40^\circ / 1.25^\circ = 64$, $2^{N+1} = 64$, $N = 5$),为了实现二维的光束偏转,在正交方向需要同样的 5 层 LCPG。例如:为实现方位角 22.5° 俯仰角 -16.25° 的光束偏转,方位方向每一层 LCPG 中可调液晶半波片的控制系数为

$$0 \times 1.25^\circ + 1 \times 2.5^\circ + 0 \times 5.0^\circ + 0 \times 10^\circ + 1 \times 20^\circ = (0.625^\circ - 0.625^\circ) + (1.25^\circ + 1.25^\circ) + (2.5^\circ - 2.5^\circ) + (5.0^\circ - 5.0^\circ) + (10^\circ + 10^\circ) = 22.5^\circ \quad (4)$$

俯仰方向每一层 LCPG 中可调半波片的控制方式为

$$-1 \times 1.25^\circ + 0 \times 2.5^\circ - 1 \times 5.0^\circ - 1 \times 10^\circ + 0 \times 20^\circ = (-0.625^\circ - 0.625^\circ) + (1.25^\circ - 1.25^\circ) + (-2.5^\circ - 2.5^\circ) + (-5.0^\circ - 5.0^\circ) + (10^\circ - 10^\circ) = -16.25^\circ \quad (5)$$

根据式(2),可推导出一维级联 LCPG 入射光经过每一级 LCPG 的偏转角度为

$$\begin{cases} \sin(\theta_{\text{out}1}) = \pm \frac{\lambda}{d_{11}} \pm \frac{\lambda}{d_{12}} - \sin(\theta_{\text{in}1}) = \pm \frac{\lambda}{d_{11}} \pm \frac{\lambda}{d_{12}} - \sin(\theta_{\text{in}}) \\ \sin(\theta_{\text{out}2}) = \pm \frac{\lambda}{d_{21}} \pm \frac{\lambda}{d_{22}} - \sin(\theta_{\text{out}1}) \\ \sin(\theta_{\text{out}3}) = \pm \frac{\lambda}{d_{31}} \pm \frac{\lambda}{d_{32}} - \sin(\theta_{\text{out}2}) \\ \sin(\theta_{\text{out}4}) = \pm \frac{\lambda}{d_{41}} \pm \frac{\lambda}{d_{42}} - \sin(\theta_{\text{out}3}) \\ \sin(\theta_{\text{out}5}) = \pm \frac{\lambda}{d_{51}} \pm \frac{\lambda}{d_{52}} - \sin(\theta_{\text{out}4}) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)上下相加,可得到入射光束经过多级光栅衍射后的实际出射角度为

$$\sin(\theta_{\text{out}}) = \sin(\theta_{\text{out}5}) = \pm \frac{\lambda}{d_{11}} \pm \frac{\lambda}{d_{12}} \pm \frac{\lambda}{d_{21}} \pm \frac{\lambda}{d_{22}} \dots \pm \frac{\lambda}{d_{N2}} - \sin(\theta_{\text{in}}) \quad (7)$$

当光束入射角为 0° 时,式(7)可转化成

$$\theta_{\text{out}} = \theta_{\text{out}5} = \arcsin\left(\pm \frac{\lambda}{d_{11}} \pm \frac{\lambda}{d_{12}} \pm \frac{\lambda}{d_{21}} \pm \frac{\lambda}{d_{22}} \dots \pm \frac{\lambda}{d_{21}} \pm \frac{\lambda}{d_{N2}}\right) \quad (8)$$

由式(8)可知,大多数情况下

$$\theta_{\text{out}} \neq \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{d_{11}}\right) \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{d_{12}}\right) \pm \dots \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{d_{N2}}\right) \quad (9)$$

例如:为实现 38.75° 偏转,需要 1.25°、2.5°、5.0°、10.0°、20° 的 LCPG 同时实现偏转,此时出射角

$$\theta_{\text{out}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d_{11}} + \frac{\lambda}{d_{12}} + \frac{\lambda}{d_{21}} + \frac{\lambda}{d_{22}} + \dots + \frac{\lambda}{d_{52}}\right) = 41.93^\circ > 1.25^\circ + 2.5^\circ + 5.0^\circ + 10^\circ + 20^\circ \quad (10)$$

这一角度偏差引起的主要问题为一部分角度间隔大于设计值。根据式(8),由 1.25°、2.5°、5.0°、10.0°、20.0° 的 LCPG 层组成的一维级联 LCPG 可实现的光束偏转角度与角度间隔如表 1。从表中可见,该一维级联 LCPG 实际光束调制角度范围为 0~41.93°,角间隔在 0.96°~1.66° 之间。

表 1 级联 LCPG 可实现的偏转角度与间隔
 Table 1 Achievable deflection angle and angular resolution of Cascade LCPG

Number	Control parameters of 1.25° grating	Control parameters of 2.5° grating	Control parameters of 5.0° grating	Control parameters of 10.0° grating	Control parameters of 20.0° grating	Realizable angle	Angular resolution
1	0	0	0	0	0	0°	—
2	1	0	0	0	0	1.25°	1.25°
3	0	1	0	0	0	2.50°	1.25°
4	1	1	0	0	0	3.75°	1.25°
5	0	0	1	0	0	5.00°	1.26°
6	1	0	1	0	0	6.26°	1.26°
7	0	1	1	0	0	7.51°	1.26°
8	1	1	1	0	0	8.78°	1.22°
9	0	0	0	1	0	10°	1.27°
10	1	0	0	1	0	11.27°	1.28°
11	0	1	0	1	0	12.55°	1.28°
12	1	1	0	1	0	13.83°	1.28°
13	0	0	1	1	0	15.12°	1.30°
14	1	0	1	1	0	16.42°	1.31°
15	0	1	1	1	0	17.72°	1.32°
16	1	1	1	1	0	19.04°	0.96°
17	0	0	0	0	1	20°	1.34°
18	1	0	0	0	1	21.34°	1.35°
19	0	1	0	0	1	22.68°	1.36°
20	1	1	0	0	1	24.05°	1.37°
21	0	0	1	0	1	25.42°	1.39°
22	1	0	1	0	1	26.81°	1.41°
23	0	1	1	0	1	28.22°	1.43°
24	1	1	1	0	1	29.64°	1.40°
25	0	0	0	1	1	31.04°	1.47°
26	1	0	0	1	1	32.51°	1.49°
27	0	1	0	1	1	34.01°	1.52°
28	1	1	0	1	1	35.53°	1.54°
29	0	0	1	1	1	37.07°	1.58°
30	1	0	1	1	1	38.66°	1.62°
31	0	1	1	1	1	40.27°	1.66°
32	1	1	1	1	1	41.93°	—

为实现 1.25° 的角度间隔与大于 ±38.75° 的角度偏转范围,类二值式采用 1.25°、3.75°、8.75°、18.75° 和 38.75° 的 LCPG 级联,三值式采用 1.25°、3.75°、11.25° 和 33.75° 的 LCPG 级联,采用这两种级联方式可实现的偏转角度与角间隔如图 4。

从图中可以看出,类二值式与三值式方式分别在角度 18.75°~20.0°、16.25°~17.5° 存在较大偏差,后续偏转角度不升反降,解决该方法是在使用过程中不按设计角度顺序排序,而通过实际偏转角度排序,重新排列后的偏转角度值如图 5。从图中可以看出两种方案的角间隔趋于接近,类二值式偏转角度间隔为 1.22°~1.66°,三值式为 0.76°~1.69°。

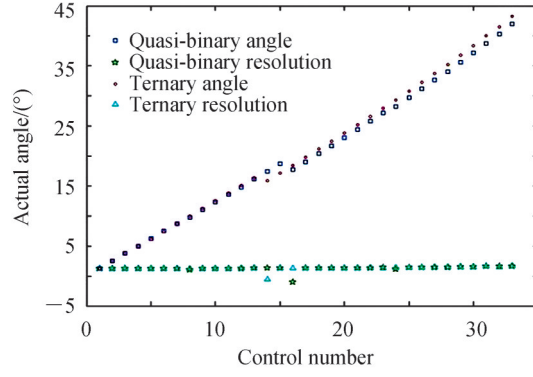


图4 类二值式和三值式级联LCPG光束偏转角度

Fig.4 Achievable beam deflection angle of Quasi-binary and Ternary Cascade LCPG

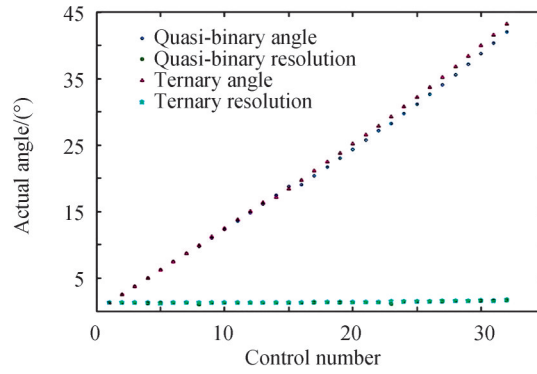


图5 校正后类二值式和三值式级联LCPG光束偏转角度

Fig.5 Achievable beam deflection angle of Quasi-binary and Ternary Cascade LCPG after correction

1.3 OC-LCPGs偏转角度计算方法

经分析,OC-LCPGs的衍射角度理论与文献[13]中关于矩阵孔衍射角度理论应相同,根据文献[13],OC-LCPGs衍射光斑中心位置二维坐标为

$$\begin{cases} x = z \frac{\lambda\chi_x}{\sqrt{1 - (\lambda\chi_x)^2 - (\lambda\chi_y)^2}} \\ y = z \frac{\lambda\chi_y}{\sqrt{1 - (\lambda\chi_x)^2 - (\lambda\chi_y)^2}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, z 为OC-LCPGs与像面距离,根据式(8)

$$\begin{cases} \chi_x = \left(\pm \frac{1}{d_{x11}} \pm \frac{1}{d_{x12}} \pm \frac{1}{d_{x21}} \pm \frac{1}{d_{x22}} \dots \pm \frac{1}{d_{xN2}} \right) \\ \chi_y = \left(\pm \frac{1}{d_{y11}} \pm \frac{1}{d_{y12}} \pm \frac{1}{d_{y21}} \pm \frac{1}{d_{y22}} \dots \pm \frac{1}{d_{yN2}} \right) \end{cases} \quad (12)$$

二维偏转角度 (θ, φ) 为

$$\begin{cases} \theta = \arctan \left(\frac{\lambda\chi_x}{\sqrt{1 - (\lambda\chi_x)^2 - (\lambda\chi_y)^2}} \right) \\ \varphi = \arctan \left(\frac{\lambda\chi_y}{\sqrt{1 - (\lambda\chi_x)^2 - (\lambda\chi_y)^2}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $d_{x11}, d_{x12}, \dots, d_{xN1}, d_{xN2}, d_{y11}, d_{y12}, \dots, d_{yN1}, d_{yN2}$ 分别为 x 方向与 y 方向不同液晶偏振光栅的光栅常数。在不考虑 OC-LCPGs 厚度, 光束为垂直入射情况下, 由 $1.25^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ, 10.0^\circ, 20.0^\circ$ 的 LCPG 组成的 OC-LCPGs 可实现的偏转角度如图 6 所示。

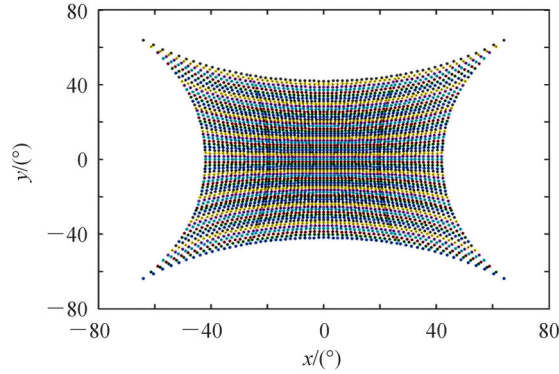


图 6 OC-LCPGs 可实现偏转角度图

Fig. 6 OC-LCPGs beam deflection angle distribution diagram

1.4 OC-LCPGs 偏转角间隔分析

从图 6 中可以看出, 整个偏转角度图呈现“枕”型分布, OC-LCPGs 偏转角间隔是变化的, 同时 x 方向与 y 方向间的耦合效应影响随着偏转角度的增大而增大。

根据式 (14) 可以计算出采用 $1.25^\circ, 2.5^\circ, 5.0^\circ, 10.0^\circ, 20.0^\circ$ OC-LCPGs 可实现的最大角度为 $(63.93^\circ, 63.93^\circ)$, 次最大角度为 $(57.92^\circ, 57.92^\circ)$, 其间隔为 $(6.01^\circ, 6.01^\circ)$, 与理想值 $(1.25^\circ, 1.25^\circ)$ 相差甚远。

在需要限定角间隔的应用条件下 (例如采用粗精复合指向的空间激光通信系统中), 若不考虑角度偏转范围, 设定角间隔在 $(2.0^\circ, 2.0^\circ)$ 内, 则可实现的角度范围为 $(\pm 39.60^\circ, \pm 39.60^\circ)$ 。

若要实现矩形的偏转范围, 最大偏转范围可达到 $(\pm 41.93^\circ, \pm 41.93^\circ)$, 此时角间隔范围在 $0.96^\circ \sim 2.12^\circ$ 。

如将角度偏转范围限制在 $(\pm 40.00^\circ, \pm 40.00^\circ)$ 的矩形区域, 同时最大角度间隔满足小于等于 $(2.0^\circ, 2.0^\circ)$ 的指标, 可通过降低最小设计间隔的方法来实现, 当设计角度间隔等于 1.22° 时, 可满足这一要求。

2 OC-LCPGs 偏转角度模拟与测试

2.1 OC-LCPGs 偏转角度模拟

利用光学设计软件可以获得 OC-LCPGs 偏转角度。建立厚度与间距相对于工作距离可忽略的透射“Grating”表面用以模拟 LCPG, 光束角度模拟精度可达到 0.001° , 软件的模型结构如图 7。令单色光源依次通过四组“Grating”表面 (其中两组刻线在 x 方向, 两组刻线在 y 方向) 到达像面, 根据像面中心位置坐标与像

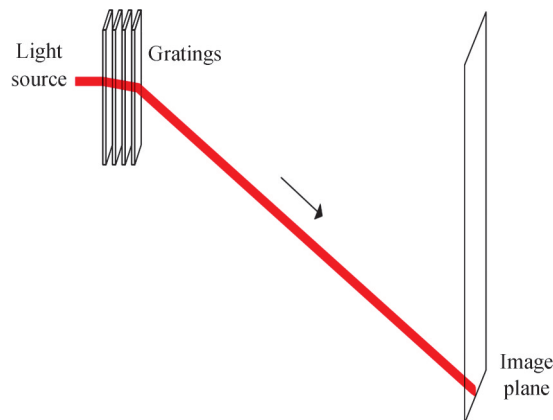


图 7 软件模型构成图

Fig. 7 Composition diagram of software model

面间距获取偏转角度。

实验系统主要参数如表2。光学设计软件模拟得到的出射光束方向为 $(61.098^\circ, 47.374^\circ)$,将光源参数与光栅参数输入式(14),得到光束方向为 $(61.098^\circ, 47.379^\circ)$,两者相差 0.001° ,偏差与软件误差相近,可认为结果相同,公式准确。

表2 软件参数
Tab.2 Software model parameter

Component	Parameter	Value
Light source	Wavelength	632.8 nm
	Aperture	0.1 mm
Grating	Linear density and direction of grating 1	100 lines/mm@x
	Linear density and direction of grating 2	200 lines/mm@x
	Linear density and direction of grating 3	100 lines/mm@y
	Linear density and direction of grating 4	400 lines/mm@y
Thickness	Material	BK7
	Thickness	0.5mm
	Grating and grating	0.5mm
	Grating and image plane	1 000m

2.2 OC-LCPGs偏转角度测试

针对OC-LCPGs实物偏转角度进行了测试,测试系统如图8,利用半波片代替可调半波片,通过手动切代替电控调制,测量不同控制参数下激光在距离2 000 mm屏幕上形成的能量最大光斑中心坐标点 (l, m) ,调制角度可由式(14)计算得到。

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{l}{2000\text{mm}}\right) \\ \varphi = \arctan\left(\frac{m}{2000\text{mm}}\right) \end{cases} \quad (14)$$

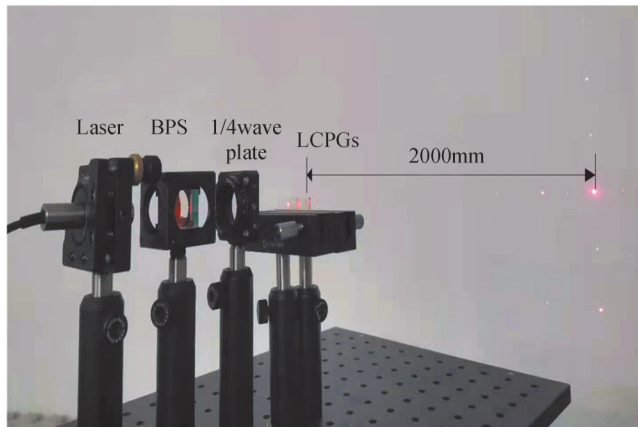


图8 调制角度测试系统实物

Fig.8 Physical diagram of modulation angle test system

系统中器件参数如表3。该测试方法中:光斑中心坐标测量精度约为2 mm,对应角度测量精度约为 0.05° ;器件的厚度与间距对光斑坐标影响约为5 mm,对应光斑中心位置误差约为2 mm,对应角度测量精度约为 0.05° 。由于屏幕摆放角度、屏幕表面凹凸对光斑中心位置误差约为2 mm,对应角度测量精度约为 0.05° ,数据处理过程中采用四舍五入,产生的数据不确定性约为 0.05° ,所以总精度约为

$$\sqrt{(0.05^\circ)^2 + (0.05^\circ)^2 + (0.05^\circ)^2 + (0.05^\circ)^2} = 0.1^\circ \quad (15)$$

表3 测试系统组成及指标
Table 3 Composition and parameter of test system

Component	Parameter	Value
Light source	Wavelength	630 nm
Grating	Linear density and direction of grating 1	138.3 lines/mm@x
	Linear density and direction of grating 2	138.3 lines/mm@x
	Linear density and direction of grating 3	275.6 lines/mm@y
	Linear density and direction of grating 4	275.6 lines/mm@y
Half wave-plate	Material	BK7
	Thickness	0.5 mm
Thickness	Grating and half wave-plate	0 mm
	Grating and grating	0.5 mm
	Grating and screen	2 000 mm

实验测得数据及理论值如表4。从表中可见,单片LCPG、OC-LCPGs的理论值与理想值确实存在差异,实验的偏转角度最大值为 0.7° 。

实验结果与理论值仅在 x 方向存在极小角度误差,误差范围近似等于测量方法的误差值。可认为测量值与理论值相符。

表4 实验结果
Table 4 Experimental result

Ideal angle/ $(^\circ)$	Theoretical angle/ $(^\circ)$	Average value of measured coordinates/mm	Actual angle/ $(^\circ)$	Angle error/ $(^\circ)$
(0,10.0)	(0,10.1)	(0,356)	(0,10.1)	0
(0,-10.0)	(0,-10.1)	(0,356)	(0,-10.1)	0
(20.0,0)	(20.4,0)	(744,0)	(20.4,0)	0
(-20.0,0)	(-20.4,0)	(-746,0)	(-20.5,0)	0.1
(20.0,10.0)	(20.7,10.7)	(757,381)	(20.7,10.7)	0
(20.0,-10.0)	(20.7,-10.7)	(756,-382)	(20.7,-10.8)	0.1
(-20.0,10.0)	(-20.7,10.7)	(-760,381)	(-20.8,10.7)	0.1
(-20.0,-10.0)	(-20.7,-10.7)	(-759,-381)	(-20.8,-10.7)	0.1

3 结论

本文为获取原有OC-LCPGs实际偏转角度值,推导出单片LCPG以及OC-LCPGs偏转角度模型,结合实例分析了OC-LCPGs角度偏转范围与角度间隔之间的关系,例子中:OC-LCPGs为2个5层LCPG正交级联,最大角度为 $(63.93^\circ, 63.93^\circ)$,最大角度间隔为 $(6.01^\circ, 6.01^\circ)$;设定角间隔在 $(2.0^\circ, 2.0^\circ)$ 内时,可实现的角度范围为 $(\pm 39.60^\circ, \pm 39.60^\circ)$;同时满足角度偏转范围 $(\pm 40.00^\circ, \pm 40.00^\circ)$,最大角间隔小于等于 $(2.0^\circ, 2.0^\circ)$ 时,设计间隔需要等于 1.22° 。最后通过光学设计软件进行了模拟,利用实物进行了测试,软件模拟精度为 0.001° ,测试系统精度为 0.1° ,软件与测试系统均证明了公式的准确性。

参考文献

- [1] MORITSUGU S, THANH N, KOHEI N, et al. Polarized beam steering using multiply-cascaded rotating polarization gratings[J]. Applied Optics, 2021, 60(7):2062-2068.
- [2] MORITSUGU S, KOYA Y, RYUSEI M, et al. High-efficiency aerial display using a liquid crystal polarization grating, a retroreflector array, and a right-angle prism[J]. Applied Optics, 2020, 59(14):4228-4233.
- [3] HOY C, STOCKLEY J, SHANE J, et al. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: a review [J]. Crystals, 2021, 11:361.
- [4] KIM J, OH C, JESUCUTI M, et al. Wide-angle, non-mechanical beam steering using thin liquid crystal polarization

- gratings[C]. SPIE, 2008.
- [5] KIM J, MATTHEW N, STEVE S, et al. Demonstration of large-angle non-mechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[C]. SPIE, 2011.
- [6] KIM J, MATTHEW N, SSTEVE, et al. High efficiency quasi-ternary design for non-mechanical beam-steering utilizing polarization gratings[C]. SPIE, 2010.
- [7] ZHAO Xiangjie. 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): 1-10.
- [8] 刘晓鹏. 基于液晶激光转向器和LCPG的级联光束控制方法[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [9] 郁道银. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [10] LI Songzhen. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
李松振. 液晶偏振光栅的设计及其光偏转特性研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019
- [11] WANG Lina, LI Mingqiu, WANG Chunyang, et al. Diffraction characteristics analysis of cascaded liquid crystal polarization grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3):030501.
王丽娜, 李明秋, 王春阳, 等. 级联液晶偏振光栅的衍射特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3), 030501.
- [12] ZHAO Zhiwei. Study on liquid crystal polarization grating with large deflection angle [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
赵志伟. 大偏转角液晶偏振光栅的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [13] YU Fengjun. The characteristic analysis of the diffraction pattern of two-dimensional grating[J]. College Physics, 2016, 35(8):32-35.
于凤军. 二维光栅衍射图样的特性分析[J]. 大学物理, 2016, 35(8):32-35.