

正交级联液晶偏振光栅的收发分离结构设计

刘 壮^{1,2}, 王启东², 史浩东¹, 王 超¹, 秦 欢³

1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 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, 吉林 长春 130033;
3. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 正交级联液晶偏振光栅可实现光束大范围偏转, 在空间激光通信与激光雷达等领域具有广阔的应用前景, 其大部分应用领域均需要同时发射激光与接收激光, 如何解决发射光与接收光分离的问题尚未见报道。针对这一问题, 文中根据 1/4 波片、1/2 波片以及液晶偏振光栅理论推导了线偏振光源经过被动液晶偏振光栅层以及正交级联液晶偏振光栅后偏振态的变化, 验证了出射光偏振态与光束偏转角度的可逆性。采用偏振分光棱镜、1/4 波片、1/2 波片、正交级联液晶偏振光栅等器件设计了一种可实现发射光与接收光偏转与分离的光学结构, 构建了测试系统, 最后通过测试结果证明了理论的正确性与结构的适用性。

关键词: 光学设计; 液晶偏振光栅; 正交级联; 偏振态; 透过率

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210551

Design of transceiver separation structure for orthogonal cascaded liquid crystal polarization gratings

Liu Zhuang^{1,2}, Wang Qidong², Shi Haodong¹, Wang Chao¹, Qin Huan³

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, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. College of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Orthogonal cascaded liquid crystal polarization grating can realize optical beam large angle-scale deflection, and has broad application prospects in the fields of space laser communication and LiDAR. It need to emit and receive laser at the same time in most application fields, but how to solve the problem of separating emitted light from received light has not been reported. To solve this problem, change of polarization state of outgoing polarization light source after passing through passive liquid crystal polarization grating layer and orthogonal cascade liquid crystal polarization grating was deduced based on the theories of 1/4 wave plate, 1/2 wave plate and liquid crystal deflection grating, the reversibility of the polarization state of the outgoing light and the beam deflection angle was verified. An optical structure which could realize the deflection and separation of transmitted beam and received beam was designed using polarization splitting prism, 1/4 wave plate, 1/2 wave plate and orthogonal cascade liquid crystal polarization grating. A test system was constructed, the test results

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (61805028); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目 (JJKH20190566KJ); 应用光学国家重点实验室开放基金 (SKLAO2021001A08)

作者简介: 刘壮, 男, 讲师, 博士, 主要从事光学设计方面的研究。

prove the correctness of the theory and the applicability of the optical structure finally.

Key words: optical design; liquid crystal polarization grating; orthogonal cascade; polarization state; transmittance

0 引言

液晶偏振光栅 (Liquid Crystal Polarization, LCPG) 是一种衍射光学元件, 不同偏振态光束入射 LCPG 后出射角度不同, 将可调半波片 (Adjustable Half Wave Plate, AHWP) 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组成正交级联偏振光栅 (Orthogonal Cascaded Liquid Crystal Polarization Gratings, OC-LCPGSs), 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-LCPGSs 具有尺寸小、质量轻、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, 具有偏转角度大的优势, 其在激光通信、激光雷达、激光测距、激光测高等领域均具有广阔应用前景^[1-5], 这些领域均需要同时同向发射与接收激光, 如能实现同口径收发则会缩小系统体积, 降低对 OC-LCPGSs 口径的需求。

目前, 参考文献 [6-8] 等给出了 LCPG 的理论、控制方法以及制备工艺, 参考文献 [5] 介绍了光源经过单片 LCPG 后偏振态的变化以及 OC-LCPGSs 中光束方向可逆这一事实, 并给出如何令接收光按原方向返回的方法, 但其给出激光雷达结构仍为分口径结构, 并未说明如何实现发射光与接收光共口径的方法, 限制了其探测距离。

文中根据 1/4 波片 (Quarter Wave Plate, QWP)、1/2 波片 (Half Wave Plate, HWP) 以及 LCPG 理论推导出线偏振光源经过被动 LCPG、LCPG 层、OC-LCPGSs 后偏振态变化, 提出在 OC-LCPGS 前方加入 PBS、1/4 波片, 在 OC-LCPGS 后加入可调半波片, 组合后可实现发射光与接收光的分离问题, 最后通过实物测试证明了理论与方法的准确性。

1 OC-LCPGS 偏振特性理论

1.1 1/4 波片与可调半波片偏振理论

入射光经过 1/4 波片后, 在快轴方向相位相较于于

慢轴可增加 $\pi/2$, 入射光经过 1/2 波片后, 快轴方向相位相较于慢轴可增加 π 。可调半波片可实现入射光快轴方向与慢轴方向 $0\sim 2\pi$ 范围的相位差电控调制, 经过标定, 可使其只实现 0 与 π 两个相位差值的转换。

传输方向沿 z 轴、振动方向与 y 光轴呈 45° 夹角的线偏振光的可分解为两个频率相同、振幅相同、振动方向互相垂直的单色光波, 可表示为:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(kz - \omega t) \\ E_y &= a_y \cos(kz - \omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

当这一线偏振光透过快轴在 y 方向的 1/4 波片后, 可表示为:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(kz - \omega t) \\ E_y &= a_y \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

该出射光为左旋圆偏振光, 左旋圆偏振光透过快轴在 y 方向的 1/2 波片后, 可表示为:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(kz - \omega t) \\ E_y &= a_y \cos\left(kz - \omega t + \frac{3\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

此时出射光为右旋圆偏振光 (Right-handed Circularly Polarized Light, RCPL), 令右旋圆偏振光或左旋圆偏振光 (Left-handed Circularly Polarized Light, LCPL) 经过可调半波片, 当可调半波片的相位调制值为 0 时, 偏振态没有变化; 当可调半波片的相位调制值为 π 时, 可实现圆偏振光左旋偏振态与右旋偏振态的转换。

1.2 LCPG 层原理与偏振特性

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

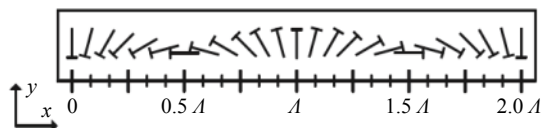


图 1 LCPG 的结构

Fig.1 Structure of LCPG

其两个偏振态的折射率:

$$n(x) = [\sin(x/\Lambda), \cos(x/\Lambda), 0] \quad (4)$$

式中: A 为光栅周期, 液晶分子的相位 $\varphi=\pi x/A$ 沿 x 轴呈周期性变化^[9-11]。

LCPG 方面包含主动式 LCPG 与被动式 LCPG 两种, 其中应用技术成熟的是被动式 LCPG。光束经过被动式 LCPG 液晶光栅后, y 方向的 e 光相位会产生周期性的变化, 相同位相的电磁波能量主要集中在 $+1$ 级或 -1 级, ± 1 级的 e 光相较于 o 光会产生 $(2m+1)\pi$ ($m=0, 1, 2, 3, \dots$) 的延迟, 改变出射光偏振态的同时也改变入射光出射角度, 如图 2 所示。当入射光偏振态为左旋圆偏振光时, 出射光束能量集中在 $+1$ 级, 偏振态为右旋圆偏振光; 入射光偏振态为右旋圆偏振光时, 出射光束能量集中在 -1 级, 偏振态为左旋圆偏振光; 入射光束为线偏振光时, 出射光可以分解成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。通过在被动 LCPG 前加入可调半波片来转换入射偏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, 在不考虑衍射效率、材料吸收等能量衰减因素的情况下, LCPG 对于偏振态的改变相当于 $1/2$ 波片, 入射光经过后偏振态发生左旋与右旋的互换。

当相同偏振态的出射光以 $+\theta^\circ$ 或 $-\theta^\circ$ 反向入射 LCPG 后, 由于光路是可逆的, 光线会在 0° 出射角 (即入射光的 -1 级或 $+1$ 级方向), e 光相较于 o 光会产生 $(2m\pm 1)\pi$ ($m=0, 1, 2, 3, \dots$) 的延迟, 旋转方向发生左旋与右旋的转换。

利用两个相同的被动 LCPG 与两个可调半波片串联组成一个“LCPG 层”(如图 3 所示), 通过调制可调半波片的相位可实现 0° 、 $-2\theta^\circ$ 、 $+2\theta^\circ$ 三个角度的偏转。

不同偏振态入射光经过“LCPG 层”后, 实现不同角度的控制系数与偏振态变化如表 1 所示。

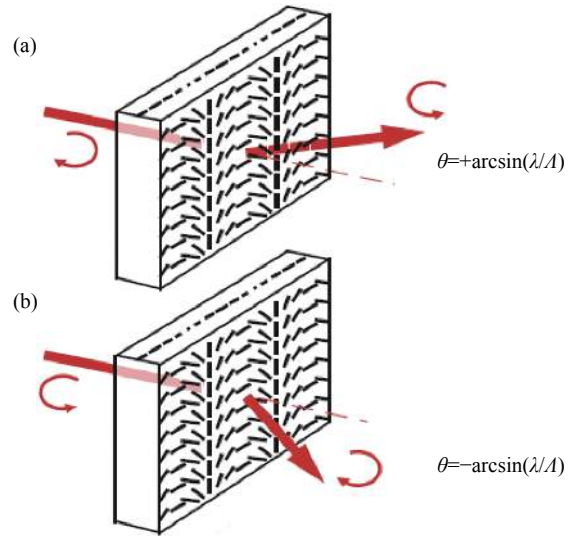


图 2 被动 LCPG 的衍射特性: (a) 入射光为右旋圆偏振光; (b) 入射光为左旋圆偏振光

Fig.2 Diffraction properties of passive LCPG: (a) Incident light is right-handed circular polarization; (b) Incident light is left-handed circular polarization

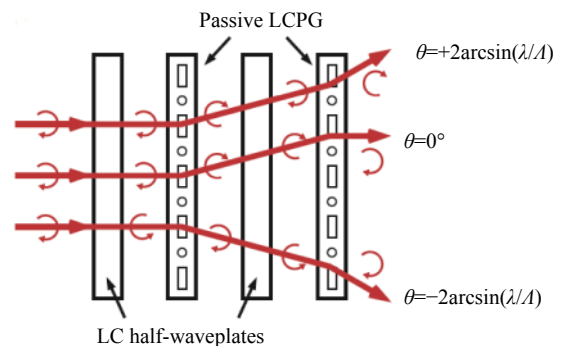


图 3 两个液晶可调半波片与两个 LCPG 组成的被动 LCPG 层

Fig.3 Passive LCPG layer with two LC-AHWPs and two LCPGs

当与出射光偏振态相同, 传输方向相反的入射光逆向经过“LCPG 层”, 其偏振态变化如表 2 所示。

表 1 不同角度的控制系数与偏振态变化

Tab.1 Control coefficient and polarization state change at different angles

Modulation angle/ $^\circ$	Polarization state of incident light	Phase delay of AHWP1	Polarization state after AHWP1	Polarization state after LCPG1	Phase delay of AHWP2	Polarization state after AHWP2	Polarization state after LCPG2
2θ		0	RCPL	LCPL	π	RCPL	LCPL
0	RCPL	0	RCPL	LCPL	0	LCPL	RCPL
-2θ		π	LCPL	RCPL	π	LCPL	RCPL
2θ		π	RCPL	LCPL	π	RCPL	LCPL
0	LCPL	0	LCPL	RCPL	0	RCPL	LCPL
-2θ		0	LCPL	RCPL	π	LCPL	RCPL

表 2 光路逆向条件下不同角度的控制系数与偏振态变化

Tab.2 Control coefficient and polarization state change at different angles reverse light path

Modulation angle/(°)	Polarization state before LCPG2	Polarization state before AHWP2	Phase delay of AHWP2	Polarization state before LCPG1	Polarization state before AHWP1	Phase delay of AHWP1	Polarization state before AHWP1
2θ	RCPL	LCPL	π	RCPL	LCPL	0	LCPL
0	LCPL	RCPL	0	RCPL	LCPL	0	LCPL
-2θ	LCPL	RCPL	π	LCPL	RCPL	π	LCPL
2θ	RCPL	LCPL	π	RCPL	LCPL	π	RCPL
0	RCPL	LCPL	0	LCPL	RCPL	0	RCPL
-2θ	LCPL	RCPL	π	LCPL	RCPL	0	RCPL

从表 2 中可以看出,在逆入射情况下,LCPG 层中两个 LCPG 前,入射光偏振旋转方向与正入射情况下两个 LCPG 后相同。根据以上单片 LCPG 的分析结果,光束逆向入射情况下,光路方向与正入射方向重合,即光束传输方向可逆。

1.3 OC-LCPGs 偏振特性

OC-LCPGs 是将多层 LCPG 层串联组合,每层 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,其中最常用的是二值式。

按照参考文献 [7],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上一层衍射角的二倍(例如:1.25°、2.5°、5.0°、10.0°、20.0°),对于一个 N 层的 OC-LCPGs,理论上共可以控制 2N+1 个角度,为了实现 1.25°间隔、±40°范围的角度偏转控制,共需要五层 LCPG(2×40°/1.25°=64, 2^{N+1}=64, N=5),为了实现二维的光束偏转,在正交方向

需要同样的五层 LCPG。

在正交方向设置同样的五层 LCPG 层,即正交级联,可实现光束的二维偏转。例如:为实现 (22.5°, -16.25°) 的光束偏转,弧矢方向 (Sagittal Direction, SD) 每一层 LCPG 中可调半波片的控制方式为:

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

子午方向 (Meridian Direction, MD) 每一层 LCPG 中可调半波片的控制方式为:

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

具体到每一层中可调半波片的控制参数如表 3 所示。

根据表 1 中偏振态与偏转角度关系以及实际偏转角度,可得透过每个元件后偏振态变化如表 4 所示。

表 3 每一层中可调半波片的控制参数

Tab.3 Control parameters of AHWP in each layer

Realization angle	0°(MD 1.25° layer)		-1.25°(SD 1.25° layer)	
Wave plate serial number	0.625°	0.625°	0.625°	0.625°
Control coefficient	0	0	1	1
Realization angle	2.5°(MD 2.5° layer)		2.5°(SD 2.5° layer)	
Wave plate serial number	1.25°	1.25°	1.25°	1.25°
Control coefficient	0	1	0	0
Realization angle	0°(MD 5.0° layer)		-5°(SD 5.0° layer)	
Wave plate serial number	2.5°	2.5°	2.5°	2.5°
Control coefficient	0	0	0	1
Realization angle	0°(MD 10.0° layer)		-10°(SD 10.0° layer)	
Wave plate serial number	5.0°	5.0°	5.0°	5.0°
Control coefficient	0	0	1	1
Realization angle	20°(MD 20.0° layer)		0°(SD 20.0° layer)	
Wave plate serial number	10.0°	10.0°	10.0°	10.0°
Control coefficient	0	1	0	0

将这一出射光以相同偏振态逆向入射 OC-LCPGS, 其偏振态变化如表 5 所示。

由表 5 可见, 光束逆向经过 OC-LCPGS 后, 偏振态左右旋转方向相反。

表 4 正交级联液晶偏振光栅每个元件前、后偏振态

Tab.4 Polarization states before and after each element of OC-LCPGS

Layer	MD 1.25° layer	SD 1.25° layer	MD 2.5° layer	SD 2.5° layer	MD 5.0° layer	SD 5.0° layer	MD 10.0° layer	SD 10.0° layer	MD 20.0° layer	SD 20.0° layer
Realization angle/(°)	0	-1.25	2.5	2.5	0	-5	0	-10	20	0
Polarization state after layer	RCPL	RCPL	LCPL	LCPL	LCPL	RCPL	RCPL	RCPL	LCPL	LCPL

表 5 逆入射情况下正交级联偏振光栅每个元件前、后偏振态

Tab.5 Polarization states before and after each element of OC-LCPGS under the condition of reverse incidence

Layer	SD 20.0° layer	MD 20.0° layer	SD 10.0° layer	MD 10.0° layer	SD 5.0° layer	MD 5.0° layer	SD 2.5° layer	MD 2.5° layer	SD 1.25° layer	MD 1.25° layer
Realization angle/(°)	0	-20	10	0	5	0	-2.5	-2.5	1.25	0
Polarization state after layer	LCPL	RCPL	RCPL	RCPL	RCPL	LCPL	LCPL	LCPL	RCPL	LCPL

2 收发分离结构设计

1/4 波片、OC-LCPGSs、末端可调半波片组成的收发分

利用上述理论设计由偏振分光棱镜 (PBS)、

离结构, 如图 4 所示。

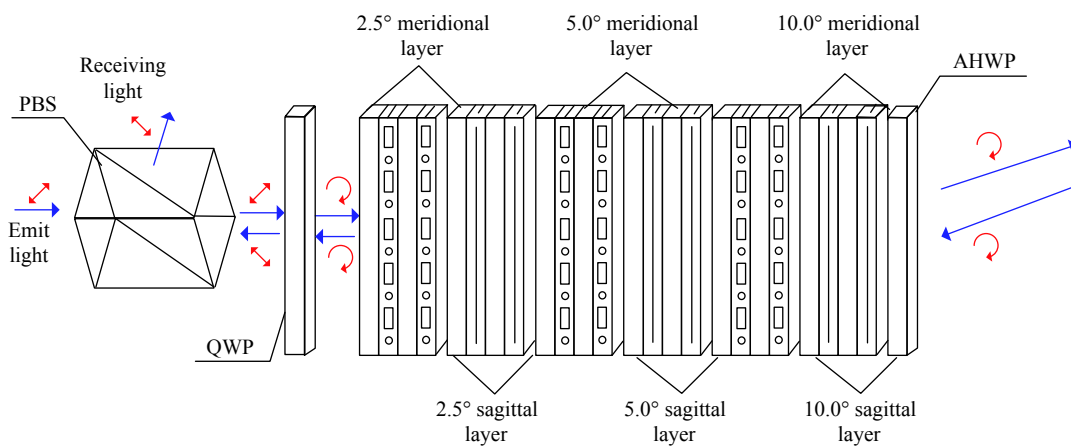


图 4 采用 OC-LCPGS 的光束收发分离结构

Fig.4 Beam transceiver separation structure using OC-LCPGS

该结构中, 通信发射光源为线偏振激光, 振动方向与 y 方向呈 45°, PBS 的 P 光方向与光源振动方向相同, 所以发射光源可以以较小的损耗通过级联 LCPG, 1/4 波片将线偏振光转换成左旋圆偏振光, OC-LCPGSs 通过控制其中的可调半波片实现光束二维角度的控制, 末端可调半波片实现发射通信光最终偏振

态的控制, 根据发射通信光经过正交 OC-LCPGSs 后偏振态, 令发射激光最终偏振态为右旋圆偏振光。

令发射与接收光偏振态相同, 可实现光路逆向传输直到经过 1/4 波片前, 逆向的右旋圆偏振光经过 1/4 波片会变成 S 光, S 光在 PBS 内部反射, 从而实现收发分离。

3 OC-LCPGS 收发分离结构实验

建立由两个同波长激光器、PBS、1/4 波片、1/2 波片 (利用插拔 1/2 波片代替液晶可调半波片)、偏振光栅、光功率计组成的光束偏转结构如图 5 所示, 实验器件的基本参数如表 6 所示。



图 5 OC-LCPGS 收发分离结构验证实验图

Fig.5 Experimental diagram of OC-LCPGS receiving and transmitting separation structure verification

令激光器 1 的光依次通过 BPS、1/4 波片、4 片 LCPG 以及一片 1/2 波片后, 光束方向为 0°, 测量光束偏振态为右旋圆偏振光, 光功率为 2.61 mW, 可以确认被测光束是各个光栅主级次衍射光, 不是次要级次的杂光。

利用激光器 2、BPS 与 1/4 波片构成右旋圆偏振

表 6 测试系统组成及指标

Tab.6 Composition and index of test system

Component	Parameter	Value
Laser 1	Wavelength/nm	630
	Optical power/mW	3.20
Laser 2	Wavelength/nm	630
	Optical power/mW	1.50
PBS	Transmittance	P: 96%; S: 94%
QWP	Transmittance	96%
HWP	Transmittance	96%
Grating	Linear density of grating 1/lp·mm ⁻¹	159
	Linear density of grating 2/lp·mm ⁻¹	159
	Linear density of grating 3/lp·mm ⁻¹	286
	Linear density of grating 4/lp·mm ⁻¹	286
	Transmittance	As shown in Fig.6
	Thickness/mm	0.45±0.04
	Material	D263

光模拟接收光源, 令其反向通过系统, 在 BPS 的透射方向与反射光方向分别设置光功率计, 观察发现, 光束虽然在经过每片 LCPG 后能量均会分散, 但主级次能量与入射光同轴方向相反, BPS 的反射光方向主级次能量为 1.22 mW, 透射方向主级次能量约为 10 μW, 可见主要能量集中在反射方向。

利用以上方法实现发射端不同调制角度, 移动模拟接收光源多次测量得到的 BPS 的 S 光方向与 P 光方向光透过率如表 7 所示。

表 7 不同调制角度下透过率

Tab.7 Transmittance at different modulation angles

Main order angle/(°)	Transmittance of 1 st measurement of S light	Transmittance of 2 nd measurement of S light	Transmittance of 3 rd measurement of S light	Average transmittance of S light	Average transmittance of P light
0	81%	82%	81%	81%	<1%
10	61%	61%	61%	61%	<1%
-10	61%	61%	61%	61%	<1%
20	52%	50%	53%	52%	<1%
-20	50%	50%	51%	50%	<1%
30	41%	39%	40%	40%	<1%
-30	36%	37%	36%	36%	<1%

由表 7 中的数据可见: 随着偏转角度增大, 接收光主级次能量减小, 但主级次光均从 PBS 的 S 方向反射, 证明发射光与接收光可成功分离。

分析光束光功率透过率低的主要原因为实验采用的 LCPG 设计角度为 0°, 衍射效率随着入射角度增大而增大 (实验中不同出射角度的液晶偏振光栅入射

角度如表 5 所示,采用的两种液晶偏振光栅不同角度下的实测衍射效率如图 6 所示)。同时,不同入射角下的 1/2 波片产生的相位延迟量也不一致,导致入射液晶偏振光栅的相位不为 π ,进而进一步降低衍射效率。

实验系统大角度偏转过程中光束入射后面 LCPG 的角度已经很大(如表 8 所示),所以整体透过率低。利用参考文献 [11]中采用的带有镜面对称结构的液晶偏振光栅可以补偿斜入射的相位,在 $\pm 30^\circ$ 的视场角范围内 ± 1 级的衍射效率均可以达到 90% 以上(如图 7 所示),可以弥补结构器件的局限性。

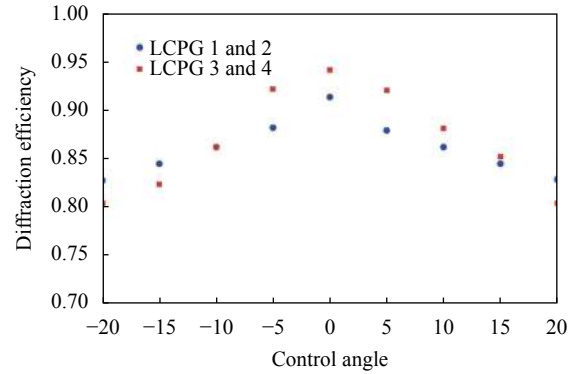


图 6 LCPG 不同角度下的衍射效率

Fig.6 Diffraction efficiency of different LCPG at different angles

表 8 不同调制角度下的入射角

Tab.8 Incident angle at different modulation angles

Main order angle/(°)	Incident angle of LCPG1/(°)	Incident angle of LCPG2/(°)	Incident angle of LCPG3/(°)	Incident angle of LCPG4/(°)
0	0	5	0	10
10	0	5	10	0
-10	0	-5	-10	0
20	0	5	0	10
-20	0	5	0	-10
30	0	5	10	20
-30	0	-5	-10	20

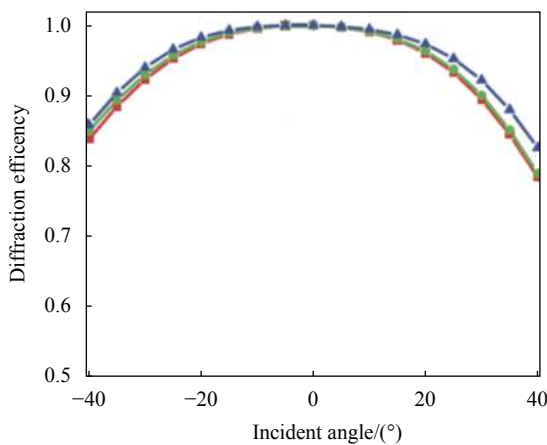


图 7 镜面对称结构的 LCPG 不同入射角下衍射效率

Fig.7 Diffraction efficiency of LCPG with mirror symmetry at different angles

4 结 论

文中提出在 OC-LCPGS 前方加入 PBS、1/4 波片,在 OC-LCPGS 后加入可调半波片,组合后可实现

激光系统中发射光与接收光的分离问题,构建实验测试系统进行了测试,测试结果表明不同调制角度下均可实现发射光与接收光的分离,分析了实验系统透过率低的问题,分析结果表明采用带有镜面对称结构可以提高大偏转角度情况下的透过率。

参考文献:

- [1] Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, et al. Review of optical phased array techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20201042. (in Chinese)
- [2] Wang Xiangru, Zhou Zhuangqi. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser application[J].*Infrared and Laser Enigeering*, 2018, 47(1): 0103006. (in Chinese)
- [3] Sakamoto M, Nhan H T, Noda K, et al. Polarized beam steering using multiply-cascaded rotating polarization gratings [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 2061-2068.
- [4] Sakamoto M, Yamada K, Momosaki R, 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): 191-198.
- [5] Hoy C, Stockley J, Shane J, et al. Non-mechanical beam steering with polarization gratings: A review [J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 1-21.
- [6] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle, non-mechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7093: 709302.
- [7] Kim J, Matthew N M, Steve S, et al. Demonstration of large-angle non-mechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings [C]//Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV, Proceedings of SPIE, 2011, 8052: 80520T.
- [8] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. High efficiency quasi-ternary design for non-mechanical beam-steering utilizing polarization gratings [C]//Advanced Wave-front Control: Methods, Devices, and Applications VIII, Proceedings of SPIE, 2010, 7816: 78160G.
- [9] Zhao Xiangjie, Duan Jiazhu, Zhang Dayong, 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): 1-10.
- [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. (in Chinese)
- [11] Chen Wan, Yu Yang, Mu Quanquan. Super-broadband geometric phase devices based on circular polarization converter with mirror symmetry [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(10): 101103.