

## 基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统

刘禹彤 曹宗新 李子凡 龚君豪 毛红敏 张大伟 赵元安 洪瑞金 樊丽娜 曹召良

### Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating

LIU Yutong, CAO Zongxin, LI Zifan, GONG Junhao, MAO Hongmin, ZHANG Dawei, ZHAO Yuinan, HONG Ruijin, FAN Lina, CAO Zhaochang

引用本文:

刘禹彤,曹宗新,李子凡,等. 基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 557–567. DOI: 10.5768/JAO202445.0310010

LIU Yutong, CAO Zongxin, LI Zifan, et al. Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 557–567. DOI: 10.5768/JAO202445.0310010

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310010>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 激光跟踪仪检测大口径非球面方法研究

Research on detection method of large-aperture aspheric surface by laser tracker

应用光学. 2021, 42(2): 299–303 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203002>

#### 基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究

Large angle range beam scanning control based on crystal spatial light modulator

应用光学. 2020, 41(4): 816–821 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409803>

#### 亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

#### 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究

Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar

应用光学. 2017, 38(4): 581–586 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0402001>

#### 一种基于机械式拼接的结构光扫描测量方法

Structured light scanning measurement method based on mechanical splicing

应用光学. 2021, 42(5): 884–890 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503002>

#### 大尺寸平面激光扫描补偿系统误差分析

Error analysis for large-scale planar laser scanning and compensation system

应用光学. 2018, 39(1): 124–129 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0557-11

# 基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统

刘禹彤<sup>1</sup>, 曹宗新<sup>1</sup>, 李子凡<sup>1</sup>, 龚君豪<sup>1</sup>, 毛红敏<sup>1</sup>, 张大伟<sup>2</sup>,  
赵元安<sup>3</sup>, 洪瑞金<sup>2</sup>, 樊丽娜<sup>1</sup>, 曹召良<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学 物理科学与技术学院 江苏微纳热流技术与能源应用重点实验室, 江苏 苏州 215009; 2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 3. 中国科学院上海光学精密机械研究所 薄膜光学实验室, 上海 201800)

**摘要:** 非机械式激光光束扫描系统具有体积小、重量轻、易集成等优势, 在激光雷达、激光武器和激光通信等领域具有较大的应用前景, 其通光口径决定着设备的工作距离、扫描精度和目标摧毁能力。基于液晶偏振光栅设计了一种全电控制的大口径激光光束扫描系统。采用液晶偏振光栅和液晶空间光调制器的协同工作方式, 实现光束的大角度连续扫描; 设计了光束扫描系统, 并重点分析了级联液晶偏振光栅组的控制策略, 给出了具体控制方法。最后, 进行了激光光束的初步扫描实验, 实现了 70 mm 口径光束在  $-16.575^{\circ} \sim 16.575^{\circ}$  的偏转。该研究结果为激光光束的非机械式扫描控制提供了技术支撑, 并在大口径激光扫描系统应用方面进行了初步探索。

**关键词:** 激光; 液晶偏振光栅; 非机械式扫描; 大口径; 级联控制

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0310010](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310010)

## Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating

LIU Yutong<sup>1</sup>, CAO Zongxin<sup>1</sup>, LI Zifan<sup>1</sup>, GONG Junhao<sup>1</sup>, MAO Hongmin<sup>1</sup>, ZHANG Dawei<sup>2</sup>,  
ZHAO Yuanan<sup>3</sup>, HONG Ruijin<sup>2</sup>, FAN Lina<sup>1</sup>, CAO Zhao liang<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Micro and Nano Heat Fluid Flow Technology and Energy Application, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;  
2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The non-mechanical laser beam scanning system has advantages such as small size, light weight, and easy integration, and has great application prospects in fields such as LIDAR, laser weapons, and laser communication. Its aperture determines the working distance, scanning accuracy, and target destruction ability of the equipment. A fully electrically controlled large aperture laser beam scanning system based on a liquid crystal polarization grating was designed. Based on a liquid crystal polarization grating associated with a liquid crystal spatial light modulator, the large-angle continuous scanning of the beam was achieved. A beam scanning system focused on analyzing the control strategy of cascaded liquid crystal polarization grating groups was designed, providing specific control methods. Finally, a preliminary scanning experiment of the laser beam was conducted, achieving a deflection of the 70 mm aperture beam at  $-16.575^{\circ} \sim 16.575^{\circ}$ . The

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-11-14

基金项目: “十四五”江苏省重点学科资助 (2021135); 吉林省科技厅重点研发项目 (20220203033SF)

作者简介: 刘禹彤 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电仪器与智能检测技术研究。E-mail: [1615728492@qq.com](mailto:1615728492@qq.com)

通信作者: 曹召良 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事液晶自适应光学系统光学设计, 光学实验以及理论分析和模拟等研究。

E-mail: [caozl@usts.edu.cn](mailto:caozl@usts.edu.cn)

research results provide technical support for the non-mechanical scanning control of laser beams, and make preliminary exploration in the application of large-aperture laser scanning systems.

**Key words:** laser; liquid crystal polarization grating; non-mechanical scanning; large aperture; cascade control

## 引言

激光光束扫描技术是激光雷达、激光武器和激光通信的核心技术,决定着这些应用的技术能力和应用场景,因此被广泛研究<sup>[1]</sup>。目前的激光光束多采用机械式扫描技术,存在着体积大、扫描速度慢、不易集成和小型化等缺点。随着现代光电系统向着低功耗、集成化、易控制的方向发展,非机械式全电光束偏转控制技术也被广泛、深入地研究<sup>[2]</sup>。其中,关于液晶光学相控阵技术的研究最为突出,且在研究过程中发现了一种新型的光束偏转器件,即液晶偏振光栅(liquid crystal polarization gratings, LCPG)。液晶偏振光栅通过调制入射光的偏振态实现光束的偏转调制,理论上可以达到100%的衍射效率,被称为第四代光学元件<sup>[3]</sup>。1983年,NIKOLOVA L等人<sup>[4]</sup>对不同种类偏振光栅的衍射效率和偏振选择性进行了详细的理论分析。1984年,TODOROV T等人<sup>[5]</sup>发现控制入射光的偏振态可以调整衍射级次之间的能量分布,并且可以将绝大部分能量聚集到一个衍射级。直到2004年,美国布朗大学Crawford小组才真正利用偏振全息的方式制备出液晶偏振光栅,但衍射效率只有10%<sup>[6]</sup>。2007年,PROVENZANO C等人<sup>[7-8]</sup>改善了液晶偏振光栅的制备工艺,使得衍射效率可以达到98%。此后,在美国空军SBIR(small business innovation research)等项目资助下,以美国BNS公司SERATI S与北卡罗莱纳州立大学KIM J、ESCUTI M J等为代表的研究人员合作研究了基于液晶偏振光栅的大角度光束扫描系统,利用液晶偏振光栅先后实现了视场角为±15°、±26°、±40°、±52°等光束的准连续偏转<sup>[9-13]</sup>。2016年,SERATI S等人<sup>[14]</sup>研制出新型液晶偏振光栅器件,利用多层液晶偏振光栅级联的方式实现了角度分辨率为3.2°、扫描视场为64°×64°的二维光束离散扫描。2017年,STOCKLEY J E等<sup>[15]</sup>研制出用于航天器着陆时对地面测距和传感的激光雷达,有效口径50 mm,初步实现了雷达回波信号的获取。2022年,WANG C等人<sup>[16]</sup>建立了一套40°×40°子光束的高精度扫描系统,采用Gerchberg-Saxton(GS)算法计算液晶光学相控阵的相位分布,实现了入射平面波分割,提高了激光雷达的扫描效率。

在国内,2010年哈尔滨工业大学张健等人<sup>[17]</sup>提出可以用液晶偏振光栅取代液晶数字光束偏转器,实现高衍射效率的光束粗偏控制。2013年国防科技大学师宇斌等人<sup>[18]</sup>的综述表明,液晶偏振光栅级联实现光束扫描具有潜在的应用前景。2017年中国兵器装备研究院徐林<sup>[19]</sup>设计了一种新型可制备大口径液晶偏振光栅的曝光装置。2018年GUO Q等人<sup>[20]</sup>将液晶偏振光栅与基于铁电液晶的相位开关相结合,实现了可快速响应的光束偏振器件。2019年,长春光学精密机械与物理研究所李松振<sup>[21]</sup>提出了一种基于液晶空间光调制器和液晶偏振光栅级联的光束偏转系统,在730 nm波长条件下实现了±20°范围内的高精度二维光束偏转;2020年,该单位的赵志伟<sup>[22]</sup>制备出周期2 μm、口径14 mm×14 mm的液晶偏振光栅,可以使532 nm激光的偏转角达到±15°。

综上所述,基于液晶空间光调制器和液晶偏振光栅级联的激光光束扫描技术,已经初步实现了激光光束的大角度扫描,目前国际上报道的最大口径为50 mm,接近实用化水平。在实际应用中,光束口径是激光雷达、激光武器和激光通信的核心指标,决定着设备的工作距离、扫描精度和目标摧毁能力<sup>[23]</sup>。因此,大口径、大角度光束扫描系统是这些应用的关键因素。为此,本文基于液晶偏振光栅研究激光光束的大口径、大角度光束扫描技术,为其在激光通信、激光雷达和激光武器等领域的应用提供技术支撑。

## 1 液晶偏振光栅工作原理

液晶是一种各向异性材料,液晶分子产生以指向矢为轴的各向异性<sup>[24]</sup>。液晶主要由电极与液晶盒组成,单个电极与液晶盒一起构成了一个相控单元。在液晶电极上加载不同的电压,液晶盒中液晶分子在外加电场作用下将发生指向矢偏转<sup>[25]</sup>。液晶偏振光栅正是基于液晶的这种特性,通过控制液晶分子的取向,形成如图1(a)所示的周期性取向分布,从而实现对入射的圆偏振光进行调制。液晶分子的指向矢在一个周期内会发生180°变化,形成液晶偏振光栅的周期。液晶偏振光栅分为主动式和被动式两种。主动式液晶偏振光栅

有3个状态:无偏转、+1级偏转和-1级偏转,其分别对应施加电压、不加电压右旋和左旋圆偏振光入射。被动式液晶偏振光栅,即无源液晶偏振光栅有2个状态:+1级偏转和-1级偏转。当入射光是右旋圆偏振光时,所有通过液晶偏振光栅的光被衍射到+1级,如图1(b)所示。如果入射光是左旋圆偏振光,所有的光被衍射到-1级,如图1(c)所示。入射到液晶偏振光栅的光的偏振态可以通过液晶半波片进行控制,通过施加电压控制液晶半波片产生半波或者0相位延迟,从而实现左旋或右旋偏振态的控制。因此,通常将液晶偏振光栅和液晶半波片配对使用,可实现光束的偏转控制。

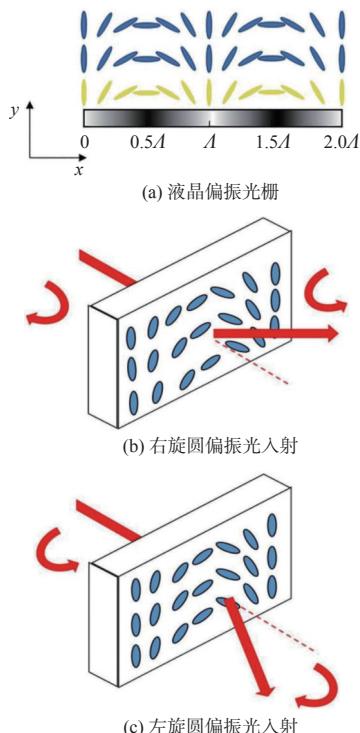


图1 液晶偏振光栅光束偏转原理

Fig. 1 Beam deflection principle of liquid crystal polarization grating

## 2 光束扫描系统设计

### 2.1 系统总体设计

基于液晶偏振光栅组和液晶空间光调制器可以实现光束的大角度二维扫描。其工作原理是,采用液晶空间光调制器实现光束的小角度精调,采用液晶偏振光栅组实现光束的大角度不连续粗调,同时,每个不连续的角度区间由液晶空间光调制器的小角度精调进行填充,这样便可以实现大角度连续精调。系统的具体原理光路如图2所

示。激光器由光纤输出的光经透镜准直并经偏振片后变为线偏振光,入射到液晶空间光调制器上并被再次反射,该反射光经1/4波片后转换为圆偏振光,然后被扩束系统扩束后入射到液晶偏振光栅组,最终实现激光光束的大角度连续扫描。

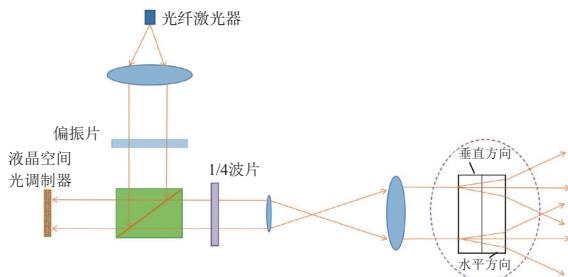


图2 扫描系统光路原理

Fig. 2 Optical path principle of scanning system

为了实现大口径光束偏转扫描和原理验证,设计参数如下:光束口径70 mm,工作波长635 nm,扫描角度±16°。小角度精调选取反射式液晶空间光调制器,分辨率为1920×1080像素,像素尺寸为6.4 μm,一级衍射效率(70~80%)。液晶空间光调制器的口径为12.3 mm×6.9 mm,考虑冗余,按照工作口径6.5 mm进行系统光路设计。为了实现70 mm光束口径,则需要对光束进行10.8×扩束。液晶空间光调制器基于衍射光学原理进行光束的偏转<sup>[26]</sup>,最大偏转角度与量化级次相关。当采用16级量化时,衍射效率为98%,最大偏转角度只有0.36°,再经过10.8×扩束后,角度减小到0.033°;当采用4级量化时,液晶空间光调制器的衍射效率为81%,经10.8×扩束后,最大偏转角度为0.13°。液晶空间光调制器的最大偏转角度即为偏振光栅组的粗调间隔,直接影响偏振光栅的数量。和16级量化相比,采用4级量化可减少4片偏振光栅。因此,采用4级量化虽然减小了液晶空间光调制器的衍射效率约15%,但是由于其同时减少4个偏振光栅,这样反而提升了系统的总体光能利用率,同时减小了系统复杂度。综合考虑,选择4级量化进行设计。

最大光束偏转角度  $\Omega_1$  与 LCPG 个数  $N$  的关系表达式为

$$\Omega_1 = r \cdot \left( \sum_{n=1}^N 2^n \right) \quad (1)$$

总的偏转角个数为

$$S = 2^N \quad (2)$$

式中:  $r$  为粗偏模块设计的角度分辨率;  $n$  为采用偏

振光栅的个数。针对  $0.13^\circ$  的粗调间隔和  $16^\circ$  的最大偏转角度, 根据(1)式设计的偏振光栅组如表 1 所示。从表 1 可知, 共需要 8 片偏振光栅进行组合, 能够实现从  $-16.575^\circ \sim 16.575^\circ$ 、间隔为  $0.13^\circ$  的角度偏转, 共有 256 种排列组合, 如图 3 所示。此外, 单片液晶偏振光栅的光能利用率为 96%, 同

时, 每个液晶偏振光栅还需要配备一片液晶半波片, 其效率也是 96%。因此, 一片有效工作的液晶偏振光栅的总光能效率为 92.2%, 则 8 个液晶偏振光栅组的效率为 52%。从图 3 可以看出, 液晶偏振光栅组对系统的光能利用率影响较大, 设计时需要尽量减少液晶偏振光栅的个数。

表 1 设计的液晶偏振光栅组

Table 1 Designed liquid crystal polarization grating group

参数	序号								角度分辨率/(°)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
衍射角度/(°)	0.065	0.13	0.26	0.52	1.04	2.08	4.16	8.32	0.13
光栅周期/ $\mu\text{m}$	559.736	279.868	139.934	69.968	34.985	17.496	8.754	4.388	

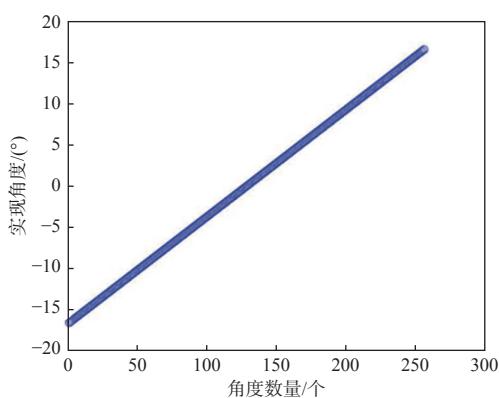


图 3 液晶偏振光栅的扫描角度范围

Fig. 3 Scanning angle range of liquid crystal polarization grating

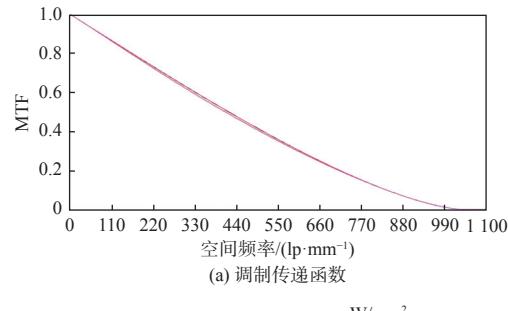
## 2.2 系统光路优化设计

采用 50 mW 激光器, 输出光纤的数值孔径为 0.22, 准直透镜的  $F$  数为 2.27, 准直后光束口径为 6.5 mm, 因此准直透镜的焦距为 15 mm。扩束系统采用 2 个凸透镜, 第 1 个透镜的口径为 25.4 mm, 焦距为 45 mm; 第 2 个透镜的口径为 100 mm, 焦距为 486 mm, 可实现  $10.8\times$  扩束。依据图 2 所示的光路原理, 采用 Zemax 软件进行系统光路优化设计, 结果如图 4 所示。图 5 给出系统的调制传递函数(MTF)曲线和光束截面的强度分布。从图 5(a)可以看出, 优化设计的光学系统传递函数和衍射极限传递函数几乎重合, 满足应用需求。同时, 从图 5(b)光束的几何图像分析可以看出, 光斑大小为 70 mm, 且光强分布均匀, 光束质量较好。图 5(c)能量集中度曲线显示, 绝大部分激光能量也能够集中在像素区域。

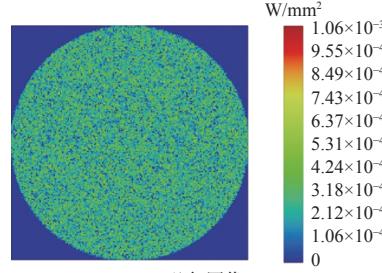


图 4 优化设计的系统光路

Fig. 4 Optimized optical path of system



(a) 调制传递函数



(b) 几何图像

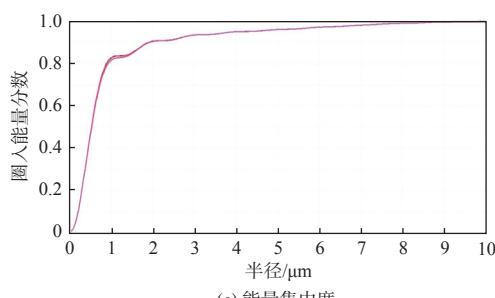


图 5 光学系统评价结果

Fig. 5 Evaluation results of optical system

### 2.3 控制系统设计

光束扫描控制系统主要对液晶偏振光栅和液晶空间光调制器进行控制,通过二者的有机结合,可以实现激光光束的大角度连续扫描,控制系统工作原理如图6所示。光束扫描控制系统中,液晶偏振光栅实现系统的角度粗调,根据(2)式可知,8个液晶偏振光栅会有 $2^8$ (256)个组合方式。每个液晶偏振光栅都匹配一个液晶半波片,通过对一组8片半波片施加电压,便可以实现光束的一维大角度不连续扫描。再根据具体需要扫描的角度,可以得到液晶空间光调制器的精调角度,最终实现光束的大角度连续扫描。

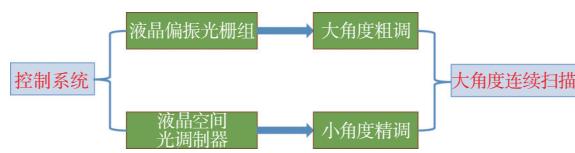


图6 控制系统工作原理

Fig. 6 Working principle of control system

在控制系统中,液晶偏振光栅组是一个多输入、多输出系统,需要和光的偏振态进行结合。为了说明其控制方法,以系统中序号5、6、7这3个液晶偏振光栅为例,进行控制策略分析,3个液晶偏振光栅的组合方式如图7所示,偏转角度分别为 $1.04^\circ$ 、 $2.08^\circ$ 和 $4.16^\circ$ 。控制目标是通过给液晶半

波片(liquid crystal half wave plate, LCHWP)施加不同的电压,实现 $1.04^\circ \sim 7.28^\circ$ 、间隔 $0.13^\circ$ 的离散光束扫描。由于液晶偏振光栅的角度偏转方向和入射光的偏振态相关,因此,假设入射光为左旋圆偏振光,则对应液晶偏振光栅的偏转角度为负值。同时需要考虑光从偏振光栅出射后,圆偏振光的旋转状态会发生改变,即从左旋变为右旋或者右旋变为左旋。最终3个液晶偏振光栅组合的控制策略如表2所示。表2中低压表示给对应的LCHWP施加低电压,此时相位延迟量为0或者 $1\lambda$ ( $\lambda=635\text{ nm}$ ),不改变入射光的偏振态;给LCHWP施加高电压,将产生 $\lambda/2$ 的相位延迟,从而改变入射圆偏振光的旋转态。表2中最后一行是能够实现的扫描角度,对应的每一列为实现该角度的液晶偏振光栅和液晶半波片的组合方式。

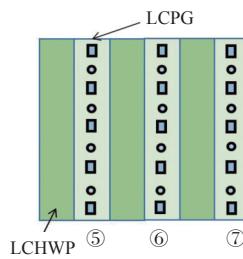


图7 三级级联液晶偏振光栅

Fig. 7 Three-stage cascaded liquid crystal polarization gratings

表2 实现粗调偏转角的组合方式

Table 2 Combination manner for achieving coarse adjustment of deflection angle

元件	施加电压状态							
	半波片5	低压	高压	低压	高压	低压	高压	低压
偏振光栅5	$-1.04^\circ$	1.04°	$-1.04^\circ$	1.04°	$-1.04^\circ$	1.04°	$-1.04^\circ$	1.04°
半波片6	高压	低压	低压	高压	高压	低压	低压	高压
偏振光栅6	$-2.08^\circ$	$-2.08^\circ$	2.08°	2.08°	$-2.08^\circ$	$-2.08^\circ$	2.08°	2.08°
半波片7	高压	高压	低压	低压	低压	低压	高压	高压
偏振光栅7	$-4.16^\circ$	$-4.16^\circ$	$-4.16^\circ$	$-4.16^\circ$	4.16°	4.16°	4.16°	4.16°
偏转角度	$-7.28^\circ$	$-5.20^\circ$	$-3.12^\circ$	$-1.04^\circ$	1.04°	3.12°	5.20°	7.28°

基于液晶偏振光栅的控制方法,整个光束扫描系统的控制流程如图8所示。对于所需的偏转角度 $\theta$ ,先在偏振光栅组产生的不连续角度中查找与 $\theta$ 最接近的角度 $\theta_1$ ,则 $\Delta\theta=\theta-\theta_1$ 为液晶空间光调制器需要产生的角度;接着,控制液晶偏振光栅组和液晶空间光调制器分别产生 $\theta_1$ 和 $\Delta\theta$ 。其中,液晶偏振光栅组的控制流程为:首先判断第一个偏振光栅实现的角度是否小于0,以便给第一个半波片施加相应电压:如果小于0,施加低电压;如果大于

0,则施加高电压。后续液晶半波片施加电压的判断策略是:如果当前偏转角度方向和前边偏振光栅的偏转角度方向一致,则给当前半波片施加高电压;反之,施加低电压。这样,可以实现整个偏振光栅组的控制。 $\Delta\theta$ 的控制流程为:先根据 $\Delta\theta$ 生成对应的闪耀光栅,然后根据液晶空间光调制器的像素分布进行闪耀光栅的量化,获得每个像素对应的相位值,接着把整个相位分布发送给液晶空间光调制器,并通过LUT曲线得到每个像素的驱动

电压, 驱动液晶空间光调制器实现光束偏转; 最后, 通过偏振光栅组与液晶空间光调制器的偏转角

度组合, 实现光束偏转角  $\theta$  的控制。因此, 通过连续给出不同的角度  $\theta$ , 便可以实现光束的扫描控制。

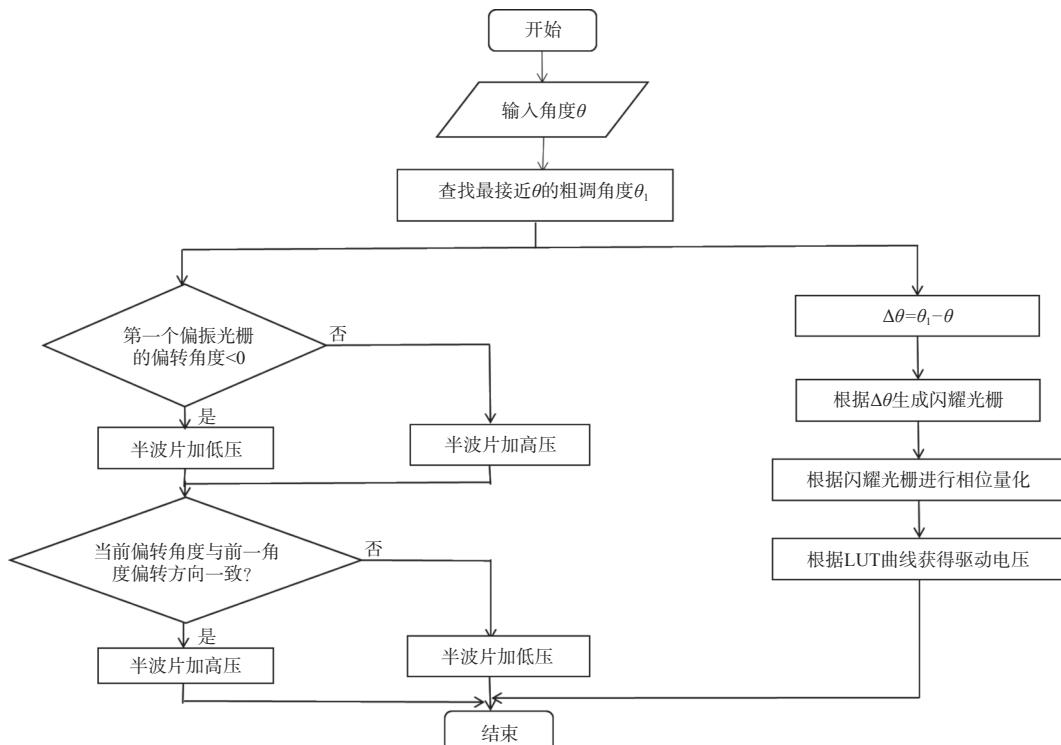


图 8 控制程序流程图

Fig. 8 Flow chart of control program

### 3 大口径光束扫描实验

#### 3.1 液晶半波片相位调制特性

液晶半波片是控制光束偏转的关键器件, 首先对其进行相位调制特性测试。测试实验光路如图 9 所示。

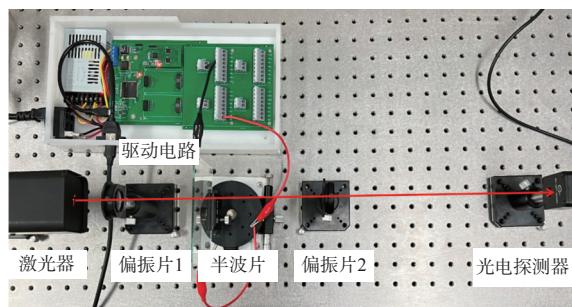


图 9 液晶半波片响应特性测试光路

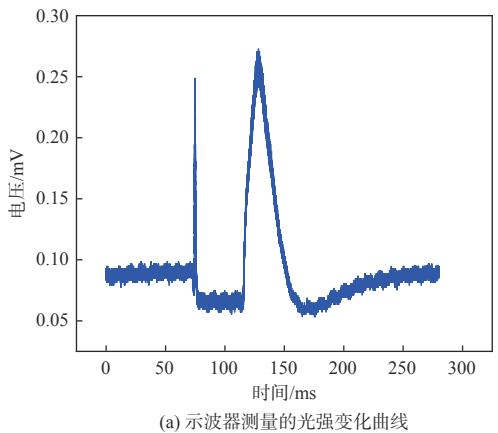
Fig. 9 Optical layout for testing response characteristics of liquid crystal half-wave plate

从图 9 可以看出, 635 nm 激光器发出的激光先经过偏振片 1, 再经过被测液晶半波片, 最后通过偏振片 2 后入射到光电探测器上。其中, 偏振片 1 的偏振方向和液晶分子排列方向呈 45° 放置,

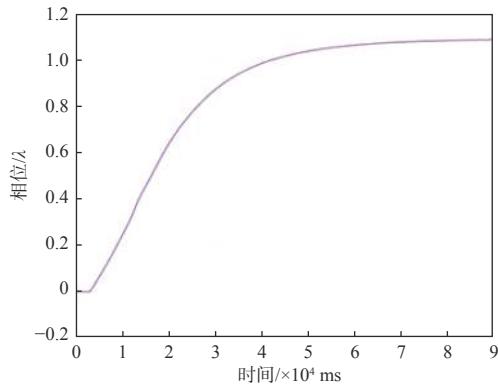
偏振片 1 和偏振片 2 的偏振方向垂直。经过偏振片 1 的线偏振光, 经过液晶半波片后, 形成 o 光和 e 光, 再经过偏振片 2 后发生双光束干涉, 干涉强度的大小取决于 o 光和 e 光的相位差<sup>[17]</sup>。干涉光强的变化被光电探测器转换成电信号, 并输出到示波器上。通过示波器测量干涉强度的变化, 可以计算得到液晶半波片的相位调制量和响应时间<sup>[22]</sup>。

依据上述测量原理, 利用课题组自行研制的多路低压驱动电路板给半波片施加电压。该驱动电路板可以输出 0~10 V、10 bit 模拟电压, 因此液晶半波片最大灰度级为 1 023<sup>[27]</sup>。利用控制计算机给液晶半波片施加 0 和 1 023 灰度级交替变化的电压信号, 液晶分子会在水平排列和垂直排列之间交替变化。依据双光束干涉原理可知, 其干涉强度会发生变化, 实验结果如图 10 所示。图 10(a) 中左侧为液晶的上升响应曲线, 右侧为下降响应曲线。从图 10(a)可以看出, 液晶的下降时间远大于上升时间, 因此, 一般取下降时间作为液晶半波片的响应时间。利用液晶的下降响应曲线, 根据

文献[28]中计算公式,可以求出液晶半波片的相位调制量,如图10(b)所示。从图10(b)可以看出,液晶半波片施加最大灰度值1 023时,可以实现 $1.08\lambda$ 的相位调制量,当调制量为 $0.5\lambda$ 时,对应的响应时间为26 ms。



(a) 示波器测量的光强变化曲线



(b) 时间与相位关系曲线

图 10 液晶半波片响应特性

**Fig. 10 Response characteristics of liquid crystal half-wave plate**

在液晶半波片相位调制量测量的基础上,进行全波电压与半波电压测试,实验光路如图11所示。

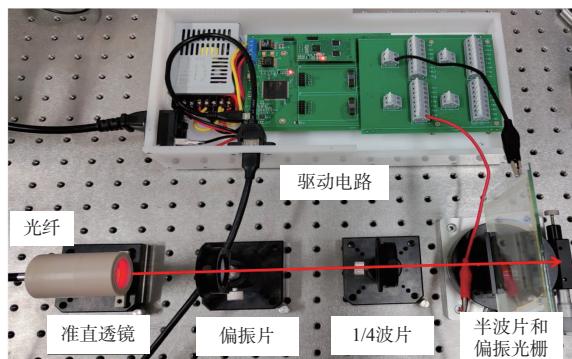
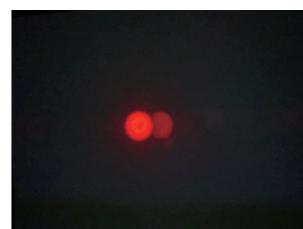


图 11 测量液晶半波片控制电压实验光路

**Fig. 11 Experimental optical path for measuring control voltage of liquid crystal half-wave plate**

激光器发出的光经光纤输出后,被准直透镜准直,然后经过偏振片后变成线偏振光,线偏振光经 $1/4$ 波片后变成左旋圆偏振光,再入射到液晶半波片和液晶偏振光栅组合上,最后,在后方的观察屏上可以看到激光光斑。

利用上述光路对液晶半波片1施加电压测试,并通过对比观察屏上光斑强度的分布,进行有效电压的确认。为此,首先在光路中移去液晶半波片,然后记录观察屏上的光斑,如图12(a)所示。随后加入液晶半波片,并根据上述相位调制量测量结果,给液晶半波片施加一个低电压,实现相位延迟量为 $1\lambda$ 。通过精细调整,最终当施加4 V电压时,观察屏上的光斑分布如图12(b)所示。可以看出,图12(b)的光斑和图12(a)的光斑几乎完全一致,说明液晶半波片没有改变入射圆偏振光的偏振态,因此其相位延迟量为 $1\lambda$ 。接着,给液晶半波片施加一个高电压并进行精细调整,当施加电压为9.2 V时,得到的光斑图样如图12(c)所示。



(a) 无半波片



(b) 半波片低压



(c) 半波片高压

图 12 测量半波片控制电压的光斑图样

**Fig. 12 Optical spot images of measuring control voltage of half-wave plate**

对比图12(a)和图12(c)可以看出,图12(c)仅仅是产生了光斑的移动,即从-1级位置偏转到+1级位置,而强度没有发生改变。此时液晶半波

片产生  $\lambda/2$  的相位延迟,使得入射光变为右旋圆偏振光,激光光束从-1 级偏转到+1 级位置。利用上述方法,测量每个半波片的高、低电压,具体测量结果如表 3 所示。利用改组电压表,可以对所有的半波片进行有效控制。

表 3 液晶半波片的控制电压

Table 3 Control voltage of liquid crystal half-wave plates

元件	低压/V	高压/V
半波片1	4.0	9.2
半波片2	4.2	9.2
半波片3	4.3	9.9
半波片4	4.2	9.0
半波片5	4.1	9.4
半波片6	4.0	9.7
半波片7	4.1	9.1
半波片8	4.2	9.1

### 3.2 光束偏转实验

对整个光束扫描系统进行集成装调,最终光束偏转系统如图 13 所示。从图 13 可以看出,635 nm 激光器出射的光被准直系统准直后,形成口径为

6.5 mm 光束,该光束经偏振片后再被非偏振分束棱镜反射到反射式液晶空间光调制器上,被再次反射后经过 1/4 波片,接着进入扩束系统。该光束被扩束成口径 70 mm,并最终入射到液晶偏振光栅组,经偏转后投射到接收屏上。利用激光光束扫描系统的控制软件进行水平方向的光束扫描实验,并在接收屏上记录扫描结果。实验中,光束从-16.575° 扫描到+16.575°,扫描方向沿水平轴从左到右,图 14 给出 8 个扫描位置的光斑。初步实验结果显示,该系统的扫描范围为±16.575°,可实现 70 mm 口径激光光束的偏转控制。

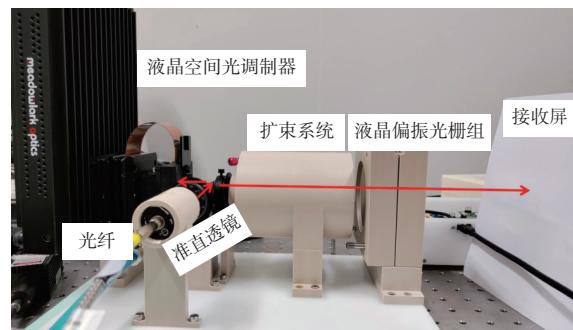


图 13 光束扫描实验系统

Fig. 13 Experimental system for beam scanning

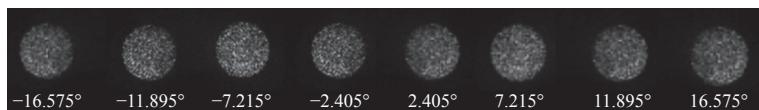


图 14 光束不同扫描位置的光斑

Fig. 14 Optical spots for different scanning positions of beam

为了分析图 14 中光束指向误差,对相机采集到的光斑图像进行质心计算,可得到光斑在相机靶面上的偏移量。不同扫描角度下,光斑质心采用下式进行计算:

$$x_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{i,j}} \quad (3)$$

$$y_c = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{i,j}} \quad (4)$$

式中:  $(x_{i,j}, y_{i,j})$  为  $(i, j)$  像素点处的坐标;  $I_{i,j}$  为  $(i, j)$  像素点处的光强。由上式计算得到的质心坐标如表 4 所示。

表 4 不同扫描角度下的误差值

Table 4 Error values at different scanning angles

扫描角度/(°)	质心坐标
-16.575	(2151.5, 3806.7)
-11.895	(2865.9, 3803.2)
-7.215	(3580.2, 3802.9)
-2.405	(4314.4, 3803.1)
2.405	(5048.8, 3803.4)
7.215	(5783.0, 3803.6)
11.895	(6497.3, 3806.6)
16.575	(7211.7, 3806.2)

根据得到的质心坐标,与 0° 时光斑的质心位置作差,便可以求出相对于中心坐标的偏移量。通过(5)式计算光斑实际偏移的角度:

$$\tan \theta = \Delta x \cdot d/f \quad (5)$$

式中:  $\theta$  为光斑实际偏移角度;  $\Delta x$  为光斑相对于中心偏移的距离;  $d$  为像素尺寸;  $f$  为聚焦透镜的焦距。实验中, 像素尺寸为  $3.2 \mu\text{m}$ , 透镜焦距为  $28 \text{ mm}$ , 利用(5)式便可以计算出光斑实际的偏转角, 具体计算结果如图 15 所示。从图 15(a)可以看出, 实际偏转角度和理论值非常接近。为了分析偏转误差, 给出二者的差值, 如图 15(b)所示。从图 15(b)可以看出, 角度的偏转误差在  $0.0007^\circ$  左右, 实现了高精度的角度偏转。

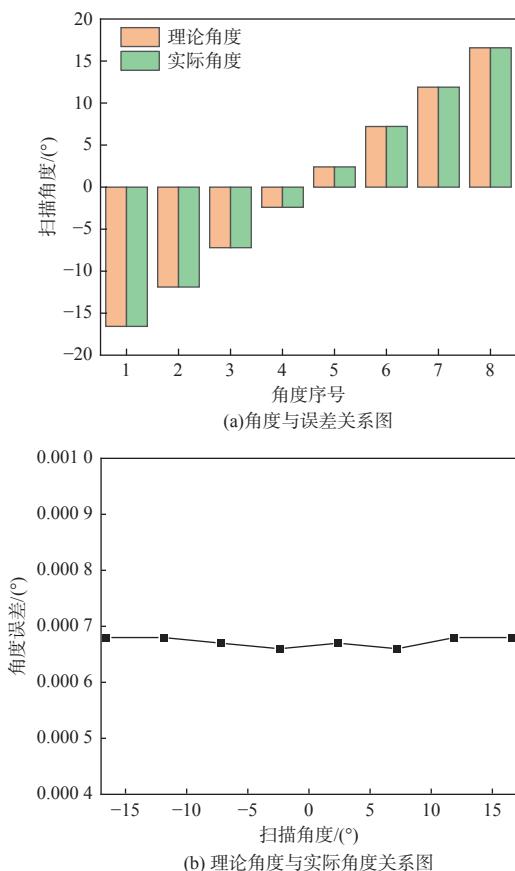


图 15 扫描角度与误差关系图

Fig. 15 Diagram of relationship between scanning angles and errors

接着进行重复指向实验, 以验证光束指向的一致性。针对  $10.4^\circ$  偏转角, 通过控制系统重复进行 10 次光束偏转, 然后计算其偏转角度的 RMS 值, 进行光束指向一致性评价。为了消除光强抖动、环境扰动误差, 每次光束偏转采集 10 幅图片, 然后根据(3)式和(4)式进行光斑质心位置计算, 再根据(5)式进行偏转角度计算。把计算得到的 10 个偏转角度进行平均, 作为本次的光束偏转角度。依据此方法, 对 10 次光束偏转数据进行处理, 得到的光束实际偏转角度如图 16 所示。从图 16 可以看

出, 每次的偏转角度都基本为  $10.4^\circ$ 。定量计算得到其 RMS 误差为  $0.0002^\circ$ , 相对于偏转角度的误差为  $0.2\%$ , 说明光束偏转一致性较好。

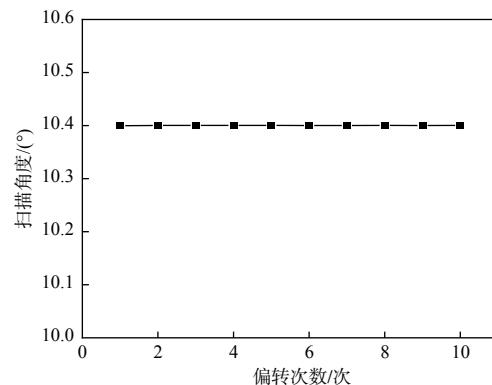


图 16 偏转次数与扫描角度关系图

Fig. 16 Diagram of relationship between deflection times and scanning angles

## 4 结论

本文重点研究了大口径激光光束的非机械式扫描控制技术。首先, 基于液晶偏振光栅, 给出了全电控制光束扫描的工作原理: 采用液晶空间光调制器进行光束的小角度精调, 采用级联液晶偏振光栅进行光束的大角度不连续粗调; 每个不连续的角度区间由液晶空间光调制器的小角度精调进行填充, 从而实现大角度的连续精调。然后, 设计了  $70 \text{ mm}$  口径激光光束扫描系统, 并利用 Zemax 光学设计软件进行光路优化, MTF 和点列图结果显示系统满足设计要求。接着, 对大角度光束偏转的控制方法进行分析, 并给出偏转角度的分解方法和控制策略。最后, 重点研究了液晶偏振光栅的多层次级联模式, 给出液晶半波片的控制电压和光束偏振态以及光束偏转方向的关系, 同时给出液晶半波片施加高、低电压的判断策略。

对大口径激光光束进行了扫描实验, 搭建了  $635 \text{ nm}$  激光扫描实验系统。首先测试了液晶半波片的相位调制特性, 测试结果显示, 位相调制量为  $1.08 \lambda$ , 响应时间为  $26 \text{ ms}$ , 能够实现全波和半波相位延迟。然后, 搭建了液晶半波片高、低电压的测试光路, 利用液晶半波片和液晶偏振光栅的组合, 通过观察屏上光斑的分布, 确认液晶半波片延迟量为全波和半波时对应的电压值。最后, 利用系统控制软件, 实现了级联液晶偏振光栅和液晶空间光调制器的协同工作, 并进行了  $70 \text{ mm}$  口径

光束的扫描实验。实验结果显示,光束可以从 $-16.575^\circ$ 扫描到 $+16.575^\circ$ ,初步实现了系统的设计指标。后续将进行大角度光束扫描的详细测试,确定其扫描精度、指向精度、重复性和稳定性等技术指标。

本文进行了大口径激光光束扫描的初步探索工作,研究结果为后续其在激光雷达、激光武器和激光通信中的应用提供了技术支撑,同时为非机械式光束扫描的应用提供了控制策略和方案参考。

#### 参考文献:

- [1] 周建华. 液晶相控阵波控技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
ZHOU Jianhua. Research on liquid crystal phased array wave control technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [2] 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): 18-27.  
HU Jie, DU Shengping, GUO Hongyang. Research progress in beam scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 18-27.
- [3] 颜跃武, 安俊明. 光学相控阵技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 58-68.  
YAN Yuewu, AN Junming. Research progress in optical phased array technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 58-68.
- [4] NIKOLOVA L, TODOROV T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording[J]. Optical Acta, 1984, 23(31): 579-588.
- [5] TODOROV T, TOMOVA N, NIKOLOVA L. High-sensitivity material with reversible photo-induced anisotropy[J]. Optics Communications, 1983, 20(47): 123-126.
- [6] EAKIN J N, XIE Y H, PELCOVITS R A, et al. Zero voltage freedericksz transition-in periodically aligned liquid crystals[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(10): 1671-1673.
- [7] PROVENZANO C, PAGLUSI P, CIPARONE G. Highly efficient liquid crystal based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(12): 121105-1-3.
- [8] PROVENZANO C, CIPPARRONE G, MAZZULA A. Photopolarimeter based on two gratings recorded in thin organic films[J]. Applied Optics, 2006, 45(17): 3929-3934.
- [9] KIM J, OH C, ESCUTI M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. SPIE, 2008, 7093: 709302-709312.
- [10] KIM J, OH C, SERATI S. Wide-angle, nonmechanical beam steering with high throughput utilizing polarization gratings[J]. Applied Optics, 2011, 50(17): 2636-2639.
- [11] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S, et al. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings[J]. SPIE, 2010, 7816: 78160G-78111.
- [12] SERATI S, ESCUTI M J. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering base on LC polymer polarization gratings[J]. SPIE, 2011, 8052: 80520T-80512.
- [13] BUCK J, SERATI S, HOSTING L. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications[J]. SPIE, 2012, 8395: 83950F-83956.
- [14] SERATI S, HOY C L, HOSTING L, et al. Large-aperture, wide-angle non-mechanical beam steering using polarization gratings[J]. Optical Engineering, 2016, 56(3): 031211.
- [15] STOCKLEY J E, KLUTTZ K. Non-mechanical beam control for entry, descent and landing laser radar (conference presentation)[J]. SPIE, 2017, 1019: 10190F-10195.
- [16] WANG C, WANG Q, MU Q, et al. High-precision beam array scanning system based on liquid crystal optical phased array and its zero-order leakage elimination[J]. Optics Communications, 2022, 506(15): 127610.
- [17] 张健, 方运, 吴丽莹, 等. 液晶光束偏转技术[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 325-334.  
ZHANG Jian, FANG Yun, WU Liying, et al. Liquid crystal beam deflection technology[J]. China Journal of Laser, 2010, 37(2): 325-334.
- [18] 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): 223-229.  
SHI Yubin, SI Lei, MA Yanxing. New progress in beam scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 223-229.
- [19] 徐林. 一种可制造大口径液晶偏振光栅器件的曝光装置及方法: 107966885A[P]. 2018-04-27.  
XU Lin. Exposure device and method capable of manufacturing large-aperture liquid crystal polarization grating

- device: 107966885A [P]. 2018-04-27.
- [ 20 ] GUO Q, XU L, SUN J T, et al. Fast switching beam steering based on ferro electric liquid crystal phase shutter and polarisation grating[J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(9): 1383-1388.
- [ 21 ] 李松振. 液晶偏振光栅的设计及其光偏转特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.  
LI Songzhen. Design of liquid crystal polarization grating and study of its beam deflection characteristics[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [ 22 ] 赵志伟. 大偏转角液晶偏振光栅的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
ZHAO Zhiwei. Study on liquid crystal polarization grating with large deflection angle[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [ 23 ] TANG D L, SHAO Z L, XIE X, et al. Flat multifunctional liquid crystal elements through multi-dimensional information multiplexing[J]. *Opto-Electron Advances*, 2023, 6(4): 39-47.
- [ 24 ] 王启东, 陈万. 一种双周期复合液晶偏振光栅: CN110646992A [P]. 2020-01-03.  
WANG Qidong, CHEN Wan. A dual period composite liquid crystal polarization grating: CN110646992A [P].
- 2020-01-03.
- [ 25 ] 杜升平, 黄永梅, 付承毓, 等. 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 581-586.  
DU Shengping, HUANG Yongmei, FU Chengyu, et al. Research on liquid crystal beam deflection wave control method based on phased array radar model[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 581-586.
- [ 26 ] 郑新波, 张旋, 栾琳, 等. 基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 816-821.  
ZHENG Xinbo, ZHANG Xuan, LUAN Lin, et al. Research on large angle beam scanning technology based on spatial light modulators[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 816-821.
- [ 27 ] 曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究[J]. 液晶与显示, 2008(2): 157-162.  
CAO Zhaoliang, MU Quanquan, HU Lifá, et al. Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and closed loop correction[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008(2): 157-162.
- [ 28 ] 陈梅蕊, 杜莹, 毛红敏, 等. 无源液晶光学器件的低成本驱动电路设计[J]. 液晶与显示, 2022, 37(12): 1572-1579.  
CEHN Meirui, DU Ying, MAO Hongmin, et al. Design of low-cost drive circuit for passive liquid crystal optical device[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(12): 1572-1579.