

基于空间光通信的光束偏转技术研究现状及趋势分析

李富豪, 赵继广, 杜小平, 张建伟, 段永胜*, 陈攀

(航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

摘要: 光束偏转技术是自由空间激光通信的关键组成部分,其性能决定了自由空间激光通信能否满足快速、稳定的通信需求。系统总结了机械式和非机械式六类光束偏转技术的国内外研究进展,根据不同技术的偏转特性,从关键指标方面比较分析了各类光束偏转技术的特点,并从空间应用性能需求的角度给出了发展趋势,展望了电光偏转技术在空间光通信领域具有很好的应用前景,为下一步的研究工作指明了方向。

关键词: 光束偏转技术; 电光偏转; KTN 晶体; 空间光通信

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230004

0 引言

空间激光通信具有容量大、带宽高、保密性强以及优良抗电磁干扰能力等优势,被广泛应用于卫星激光通信领域,激光通信是实现星地、星空、星间、空海、空地、空空等链路大容量保密通信的重要途径之一^[1],目前已经成为各国实现空间通讯联系的研究热点。

在空间光通信领域中,星间建链模式是实现稳定高效的自由空间激光通信的前提,如今激光终端的扫描和捕获过程通常采用一对一的传统光束建链过程,这种方式接入系统耗时长,光束指定方向是同一个方向,在实现通信链路时只能达到点对点的程度,不能同时进行多终端的动作^[2],而实现高效稳定的自由空间激光通信需要建立在高性能的捕获、跟踪和瞄准技术(Acquisition, Tracking, Pointing, ATP)基础上。为实现多组光信号同时捕获、高效组网,需要发射机和接收机的工作指向发生改变,但由于轨道和能量约束,空间目标以及航天器不能随意改变姿态和位置,光束偏转技术的应用可以很好地解决这个问题。

光束偏转技术具体可分为两大类:机械式光束偏转技术和非机械式光束偏转技术。其中,机械式光束偏转技术有扫描振镜、快速控制反射镜和微机电系统变形镜等类型;非机械式光束偏转技术包括声光偏转技术、基于液晶材料的偏转技术以及电光偏转技术,文中将对上述技术进行总结,并分析其应用特点及发展状况。

1 机械式光束偏转技术

1.1 扫描振镜

技术最为成熟的机械式光束偏转器件为扫描振镜,其本质是一个步进响应时间可达毫秒/亚毫秒级、指向精度为微弧度量级的光反射镜,如图 1 所示。扫描振镜结构主要由两个相互垂直的反射镜构成^[3]。

机械式光束偏转技术类型有扫描振镜,其已在偏转角度方面达到卓越的性能标准,例如美国 THORLABS 公司推出的 XG210 系列扫描振镜,其偏转角度可达 $\pm 20^\circ$ 。目前,国内外的研究人员正在致力于提高扫描速度,采用飞秒激光脉冲和多维振镜结构等方法来提升其性能。

收稿日期:2023-01-05; 修订日期:2023-03-06

作者简介:李富豪,男,硕士生,主要从事光电信息处理等方面的研究。

导师简介:赵继广,男,教授,博士生导师,博士,主要从事目标探测与光电信息处理等方面的研究。

通讯作者:段永胜,男,讲师,博士,主要从事航天发射工程方面的研究。

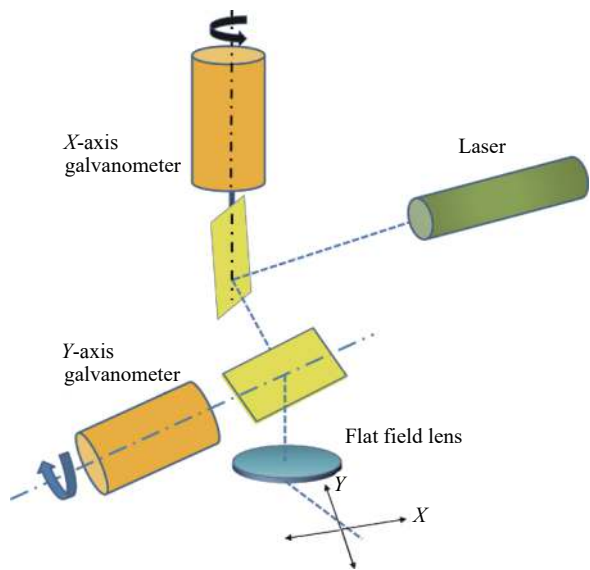


图 1 扫描振镜示意图

Fig.1 Diagram of scanning galvanometer

1.1.1 国外研究进展

在提高偏转速度方面,法国 ALPhANOV 激光与光学技术中心的 Mincuzzi 等人针对传统长脉冲激光较强的热效应会损伤振镜材料表面这一问题,利用飞秒短脉冲激光和多边形扫描头,在降低热效应的同时提高了扫描速度。在 13 MHz 的工作频率和 100 W 的输出功率下,配合飞秒激光器,最高扫描速度可达 30 m/s^[4]。这一技术在切割和加工方面有着广阔的应用前景。

为提高偏转精度和效率,该团队于 2019 年提出了采用多光束并行处理的方法,利用空间光调制器扫描头控制光束的传输方式,减少了热积累,提高了吞吐量。这一技术对于高质量加工制造方面有着重要的意义^[5],未来有望用于星载信息的高效传输。

针对传统振镜变化导致扫描质量下降的缺陷,该团队采用了按需脉冲技术 (Pulse on Demand, POD) 的飞秒激光,可以在所需的位置和时间进行精确的激光触发,通过改进传统振镜扫描方式,脉冲位置精度可达微米级以下,扫描时间比传统扫描缩小了 40%^[6]。

1.1.2 国内研究进展

国内学者的研究主要集中于基于扫描振镜的子系统搭建。上海科技大学范娜娜^[7]等人于 2020 年使用二维扫描振镜搭建了激光雷达的发射光学系统部分,利用其大视场扫描的特点,提高了激光雷达的探测距离和视场角,实验得出最大探测距离为 45 m,全

视场角为 40°×10°。

2022 年,成都电子科技大学胥守振等人将声学扫描振镜应用于一种超声/光声双模态成像系统的信号扫描收集子系统,该系统具有低成本、小尺寸的优点,并在兼顾扫描成像速度的同时获得成像结果的结构信息和高对比的功能性信息^[8]。

1.2 快速控制反射镜

快速控制反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 的结构有两种:一种是 X-Y 轴框架结构,也叫做有轴系结构,如图 2 所示,反射镜支撑采用精密轴系,外框架轴系轴承座固定在底板上,镶嵌于反射镜的内框架轴系安装在外框架,采用直线电机驱动内外框架进行旋转;另一种是柔性轴结构,它是目前 FSM 的主要发展方向。对于转角范围较小的,采用压电陶瓷,对于转角范围较大的,采用音圈电机来驱动铰链变形,带动整个镜架实现无摩擦运动,使镜面快速旋转,实现扫描,如图 3 所示^[9-10]。

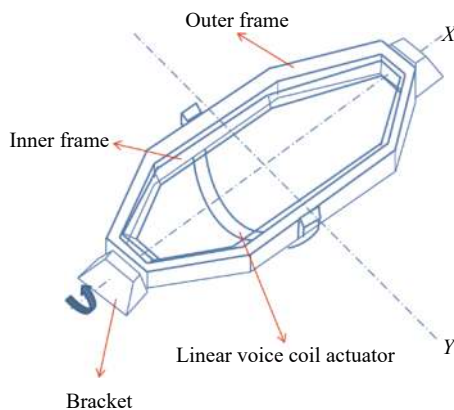


图 2 快速控制反射镜 X-Y 轴框架结构图

Fig.2 Structural diagram of the X-Y axis frame of the fast control mirror

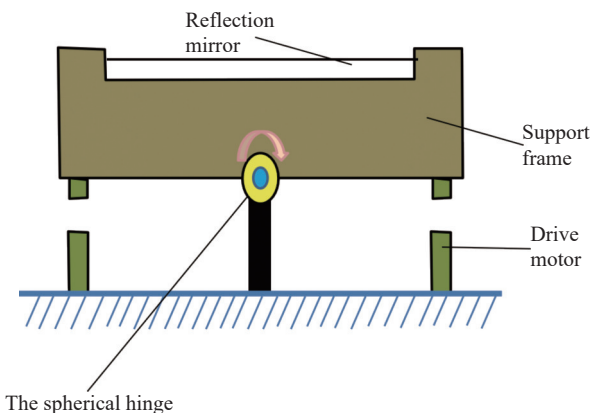


图 3 快速控制反射镜柔性轴结构图

Fig.3 Flexible axis structure diagram of fast control mirror

1.2.1 国外研究进展

抬高器件的角行程、偏转精度和频率带宽等核心性能是国外学者开始研究的方向。为了实现天基光学系统在高频段扫描时的抗干扰性能,美国麻省理工学院林肯实验室的罗尼采用音圈电机驱动和柔性轴+柔性环的支撑结构,研制了高带宽反射镜 (High Bandwidth Steering Mirror, HBSM), 实现了角行程为 ± 13 mrad、闭环带宽为 10 kHz、角分辨率为 $0.2 \mu\text{rad}$ 、角位移精度为 $0.2 \mu\text{rad}$ 的光束偏转性能^[11]。为了抑制光学路径上的外部机械干扰,从而能够在长距离上捕获和跟踪光信号,林肯实验室将快速控制反射镜用于火星激光通信演示计划项目中。Daniel 提出了一种高级快速转向镜 (Advanced Fast Steering Mirror, AFSM), 旨在缩小光束指向误差,同时克服当时 FSM 所带来的加速度和带宽限制,如图 4 所示。该快速转向镜利用永磁体偏置磁通转向执行器驱动两个旋转轴,通过位置反馈回路进行控制,行程范围为 ± 3.5 mrad,测量的角加速度为 10^5 rad/s^2 ,通过光学反馈和双通道模拟控制架构验证了小信号带宽可实现 10 kHz,相比传统 FSM 提高了 5~10 倍^[12]。

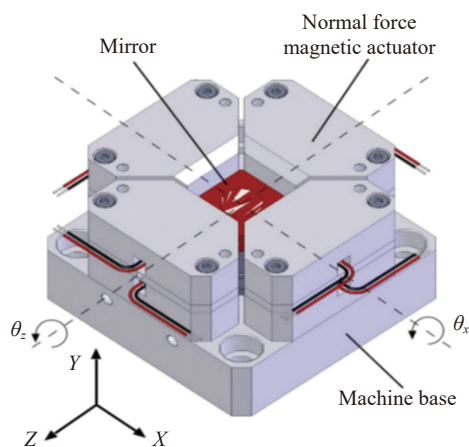


图 4 高级快速转向镜

Fig.4 Advanced fast steering mirror

为满足多样化的应用需求,学术界提出了压电陶瓷驱动的 FSM 和电磁驱动的 FSM。为减小迈克尔逊干涉仪的波前误差和 $P-V$ 误差,美国洛克希德马丁公司的 Tapos 采用 3 个压电陶瓷驱动器和厚度为 12.7 mm 的金属铍材质做镜片,实现了 $1/900\lambda$ 的波前误差以及 $1/250\lambda$ 的 $P-V$ 误差,该 FSM 的角行程最大为 $\pm 1.5^\circ$,

闭环带宽达到了 400 Hz,角分辨率和重复精度均达 $1 \mu\text{rad}$ ^[13]。此外,奥地利维也纳工业大学的 Ernst 通过调整每个轴的旋转刚度以匹配所需的驱动频率,并应用双音调控制器,设计了一种能够利用李萨如曲线的电磁驱动快速反射镜。相较于传统 FSM,该反射镜的电流消耗减少了 10 倍,能量效率减少了 100 倍,扫描范围也增加了 7.7 倍,均方根跟踪误差减小了 48%^[14]。

FSM 的热稳定性是空间光通信实际应用中的重要指标,美国海军实验室的 Willstatter^[15] 等人研究了热效应对光束控制镜角的影响,实验使用了表面镀金的音圈 FSM,在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内,存在高达 1 mrad 的随温度变化的角度偏移量,因此,在使用大口径音圈 FSM 时,需要在预期温度范围作系统校准。

1.2.2 国内研究进展

国内学者主要从提高偏转角度的方面对 FSM 进行结构改进。采用了压电陶瓷叠堆驱动器 (Piezoelectric Ceramic Stack Actuator, PCSA) 作为驱动器,针对柔性铰链杠杆结构进行设计,实现精瞄偏转镜的最大偏转角度达到 0.24° ,响应频率和偏转精度分别达到 1 kHz 和 $0.22''$ ^[16]。在此基础上设计了弹性外框,不仅能够实现激光光束的高频率低转动匀速扫描,并且在 200 Hz 的扫描频率下,偏转角度可达 0.5° ,连续扫描时间长达 7000 h^[17]。基于 PCSA 的 FSM 存在偏转角较小的问题,重庆大学的袁刚使用了一种特殊的柔性铰链结构,使得电压驱动下的 PCSA 产生更大的输出位移,再将输出位移作用于反射镜面,从而实现了固有频率为 180 Hz、镜面偏转角度大于 3° 的大角度定轴压电式 FSM,是传统基于 PCSA 的 FSM 的偏转角度的 3 倍^[18]。

随着快速控制反射镜技术的发展成熟,压电陶瓷驱动的快速控制反射镜的动态应力是影响指向精度的关键因素,上海海事大学的冉兵^[19] 等分析了堆叠式压电陶瓷 FSM 的结构模型,研究了 FSM 动态应力与驱动电压频率、幅值以及柔性铰链抗弯刚度之间的关系。通过数据优化,解决了应力集中问题,提高了光束指向的可靠性。

1.3 微机电系统变形镜

微机电系统变形镜 (Micro-Electro-Mechanical System-Deformable Mirror, MEMS-DM) 有电热型驱动、压电型驱动、静电型驱动以及电磁型驱动等多种类型,

鉴于静电型驱动具有结构简单、响应速度快、能够在高频信号下工作等优点,因此多采用静电力驱动,且多以平板电容方式实现,其结构如图 5 所示。通过对某一单元施加控制电压,使得薄膜在静电力吸引作用下发生形变,从而带动单元镜向下运动,多个单元镜独立运动,最终使整个变形镜的镜面凹凸度不均匀,产生形变。光束经过其表面时,每个子单元镜都能对光束进行相位控制,从而实现光束偏转^[20]。

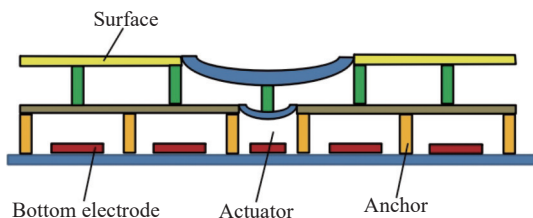


图 5 微机系统变形镜驱动结构图

Fig.5 Drive structure diagram of MEMS deformable mirror

1.3.1 国外研究进展

1993 年,美国 NASA 喷气推进实验室的 Miller 等提出基于微机电系统的变形镜技术^[21]。此后,波士顿大学的 Krishnamoorthy 等运用表面微加工技术设计出分立和连续镜面的变形镜技术^[22]。2003 年,卡耐基梅隆大学的 Xie 等研制了一种带有卷曲铰链梳状驱动器的 CMOS-MEMS 反射镜,其结构由 CMOS 互连层和 40 μm 厚的单硅晶板组合制成,在 18 V 的驱动电压下实现了高达±4.7°的角度位移^[23]。BMC 公司的 Steven 将微机电变形镜技术应用在双子座行星成像仪器上,以矫正其高阶波前相差。研制的连续面片变形镜系统具有 4096 个单元元件,最终测试实验表明机械行程为 4 μm,带宽为 5 kHz^[24]。

传统静电力驱动器存在扫描角度相对小、加工工艺复杂且昂贵等缺点,加拿大滑铁卢大学的 Bai 等采用 SOI 晶圆、混合体/表面微加工技术和高展弦比阴影掩膜的制作工艺,设计了一种带有侧壁电极的静电驱动型 MEMS 双轴微镜,如图 6 所示。该变形镜的侧壁电极有效面积得到增加,从而降低了实现大角度偏转时的驱动电压,在静态工作电压下的最大偏转角度为±11°,在谐振频率驱动下的最大偏转角度为±21°^[25]。

静电驱动型扫描微镜存在的拉入效应会限制光束偏转角度,通过在微镜器件中添加基座和悬架梁,

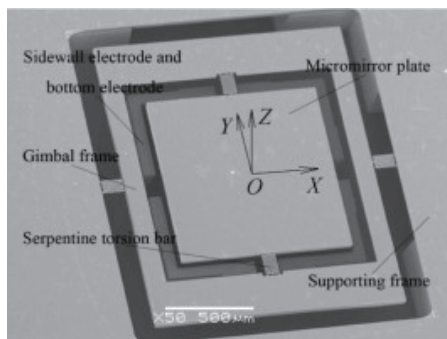


图 6 带有侧壁电极的 MEMS

Fig.6 MEMS with sidewall electrodes

并利用两块电极驱动微镜偏转,在偏转过程中不断改变边界条件,以使偏转范围不断增大,如图 7 所示。最终增加的基座和悬架梁消除了拉入现象的不稳定性,在外加电压 41 V 的条件下实现了 11.4°的最大偏转角度^[26]。

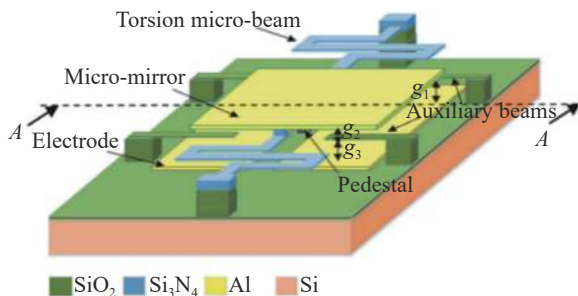


图 7 静电驱动扭转微镜原理图

Fig.7 Schematic of electrostatic driven torsion micromirror

1.3.2 国内研究进展

我国在 2000 年之后才开始进行微机电系统变形镜方面的研究。为提高传统二维倾斜镜在非正交方向上的光转换效率,中国科学院成都光电技术研究中心研制了一种非正交转轴二维 MEMS 倾斜镜,通过改变固定在倾斜镜基底的上、下电极的加电方式实现倾斜镜在两个非正交轴上的偏转,在低驱动电压 3.5 V 下,实现了绕水平 X 轴 0.16°、绕倾斜 Y 轴 0.03°的偏转^[27]。

针对静电力驱动 MEMS 变形镜在使用时存在的静电吸合现象会损坏器件的问题,2012 年,中国科学院大学的胡放荣等研制了一种多组电极结构的静电排斥型微机电系统变形镜,4 组电极分别由 1 根“L”形弹簧与中心电极连接,防止了电极距离过近导致的静

电吸合现象产生,并得到了 4 kHz 的谐振频率和 0.05 s 的暂态响应时间,在 70 V 的外加电压下,实现了 1.4 μm 的变形量,是传统结构最大形变量的 2 倍^[28]。

针对传统变形镜体积大、成本高的问题,中国科学院光电技术研究所的汪为民等研制了 140 单元 MEMS 变形镜,其共有 140 个间距为 400 μm 的六边形平行板电容驱动器,结构如图 8 所示。实验测量和分析表明该 MEMS 变形镜行程为 1.8 μm,工作带宽为 13 kHz,阶跃响应时间为 23 μs^[29]。

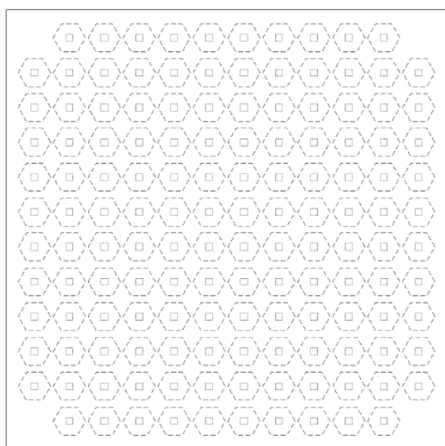


图 8 140 单元变形镜驱动器分布

Fig.8 Distribution of 140-element deformable mirror drivers

2 非机械式光束偏转技术

2.1 声光偏转技术

声光偏转技术是将高频电信号转化为超声波,通过换能器传递至工作介质,形成一个光栅,利用光波衍射来实现光束的偏转^[30],原理如图 9 所示。声光衍射效应按照声光作用区长短分为拉曼奈斯衍射和布

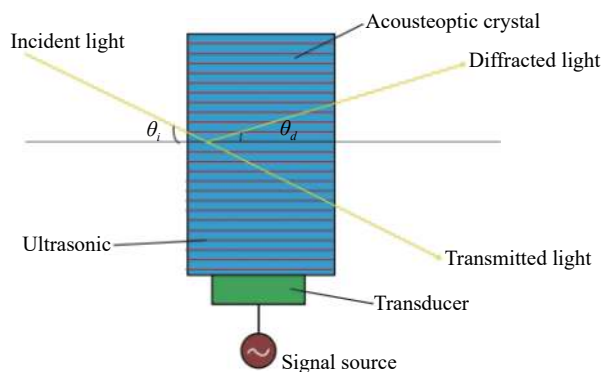


图 9 声光偏转原理图

Fig.9 Schematic diagram of acousto-optic deflection

拉格衍射^[31],由于拉曼奈斯衍射的光利用率低,布拉格衍射衍射效率高,故一般利用布拉格衍射。

设计声光偏转器主要考虑的技术指标有衍射效率 η 、最大偏转角 θ_d 、响应时间 τ_a 。布拉格衍射的一级衍射光效率为^[32]:

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L f_a}{2H}} \right] \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{n_i^2 n_d^3 P_{ef}^2}{\rho V^3} \quad (2)$$

式中: L 、 H 、 f_a 、 M_2 分别为换能器的长度、宽度、声波功率及声光优值, M_2 是描述声光晶体本身性质的常数; ρ 为晶体密度; n_i 和 n_d 分别为入射光与衍射光的介质折射率; P_{ef} 为有效电光系数。

声光偏转器的最大偏转角度 θ_d 取决于光在真空中的波长 λ 、声波的频率 f_a 、材料折射率 n 以及声波在声光晶体中的速度 v_a :

$$\theta_d = \frac{\lambda f_a}{2n v_a} \quad (3)$$

由于声波填充晶体需要有限的时间,从一个特定的声波频率“切换”到下一个声波频率也需要时间,导致从偏转光束的一个特定角度方向切换到下一个偏转角度也需要时间。这个沉降时间称为声光偏转器 (Acousto Optical Deflector, AOD) 的响应时间 τ_a , 取决于声速 v_a 和 D (AOD 的光束直径或光孔径)。

$$\tau_a = \frac{D}{v_a} \quad (4)$$

2.1.1 国外研究进展

俄罗斯科学院的 Antonov 所带领的科研团队对声光偏转器的频率带宽方面有着深入研究。2013 年, Antonov 等人研究了一种两元相控阵的压电换能器,对于总长度为 6 mm 的换能器,在入射光波长为 1.06 μm 的情况下,工作带宽可达到 17~48 MHz,转换效率可达理论最大值的 94%,为后来研究高性能新型材料的声光偏转器奠定了基础^[33]。2016 年,该团队开始对基于准硫酸盐晶体的声光偏转器展开研究,该器件具有两个连续声光单元,这两个声光单元可以分别扫描角间隔的低频和高频部分,理论可实现 100% 激光的利用率,对波长为 1.06 μm 的入射光,工作带宽可实现近 32 MHz,光束扫描角可实现 50 mrad,衍射效率不低于 70%^[34]。2018 年,他们又在基于准硫酸盐晶体的

各向异性双晶体偏转器的基础上额外增加了一个声光偏转器,如图 10 所示,用来调整入射光的角度,工作带宽实现了 32 MHz,光束扫描角度实现了 50 mrad,衍射效率超过了 90% [35],进一步提高了衍射效率。

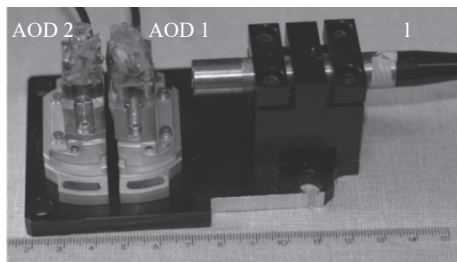


图 10 双晶体偏转器结构图

Fig.10 Structure diagram of double crystal deflector

随着偏转器件日益成熟,更换不同材料的偏转器已不能很好地改善现有性能,该团队又转向对偏转机制上的研究。2021 年,在研究基于准硝酸盐的声光偏转器的内部热效应的产生机制时,发现通过液体接触的方法可以很快地进行热量交换,而在此过程中,晶体的非均匀性被明显表现出来。如图 11 所示,研究结果表明,晶体内部如光楔一般,在换能器附近的光学密度较大,而在离换能器较远的地方密度较小。这项发现为降低换能器长度,进而扩大声光偏转器的扫描带宽提供了全新的方法 [36]。

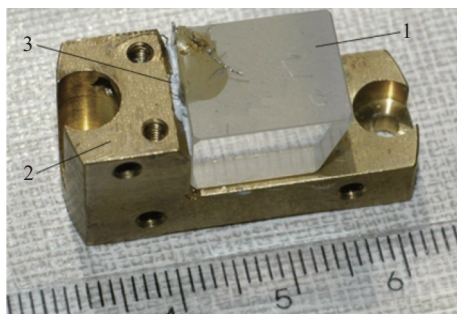


图 11 液体散热功能的声光偏转器结构图 (1-二氧化碲晶体; 2-黄铜外驱; 3-液体接触)

Fig.11 Structure diagram of acoustooptic deflector for liquid heat dissipation function (1-Tellurium dioxide crystal; 2-Brass shell; 3-Liquid contact)

除俄罗斯之外,以色列希伯来大学的 Peled 等为了提高换能器的工作带宽,通过采用改变换能器形状结构的方法,使用多片平面或阶梯结构换能器,提出了一种多通道声光偏转器,该声光偏转器利用多频射

频信号来驱动对应相位的换能器,通过阵列换能器的调谐相位控制,将器件的工作带宽提高了 40% [37]。

2.1.2 国内研究进展

针对声光偏转器由于频率带宽限制而影响偏转性能的问题,国内学者也不断研制改进超声偏转器件。1991 年,徐介平首次提出超声跟踪反常声光器件的概念并开展了初步的理论研究。2000 年,长春邮电学院通信工程系的李公羽和刘大力根据正常布拉格衍射声光互作用原理设计并制作了以 LiNbO_3 晶体作为衬底,中心频率为 300 MHz、工作带宽为 200 MHz 的倾斜式变周期声表面波声光偏转器 [38]。

2005 年,四川压电与声光技术研究所的何晓亮等根据声光偏转器的原理设计了应用于频谱分析的高分辨率声光偏转器,在激光波长为 650 nm 的条件下,实现了带宽为 50 MHz、分辨率为 20 kHz、峰值衍射效率达 74% 的线偏振光 [39]。

针对单片换能器结构的带宽与衍射效率之间的矛盾,2007 年,北京工业大学的俞宽新等利用多片换能器结构的二氧化碲反常声光偏转器对超声跟踪技术进行具体研究,与单片结构相比,其相对换能器长度提高了 34.7%,相对带宽提高了 9.1% [40]。

近年来,研究学者发现工作带宽的提高会导致相应的衍射效率下降,故开始探索兼顾两者性能的声光偏转器件。2014 年,四川压电与声光技术研究所的张泽红、陆川等研制了一种磷化镓声光偏转器,其采用准超声跟踪结构设计,提高了换能器工作的总长度,在 3 dB 下实现了 900 MHz 的带宽,峰值衍射效率为 8%,动态扫描角为 5.2° [41]。随后两人又对之前的声光偏转器做出改进,改用横波模式的超声波,在 3 dB 下实现了 1 040 MHz 的带宽,峰值衍射效率达到 20.4% [42]。

随着声光偏转器工作频率的不断提高,换能器越来越薄,换能器在运输和使用中会累积静电电荷导致其出现静电损伤,影响衍射效率。针对该问题,2021 年,夏茜等通过在换能器表面上焊接有金丝的表电极,将一端焊接在匹配印刷板的正极,另一端焊接在匹配印刷板地上,形成静电内置回路使累积电荷快速释放 [43]。通过 8 000 V 的静电实验,表明该设计方法能够有效保证较高的衍射效率,如图 12 所示。

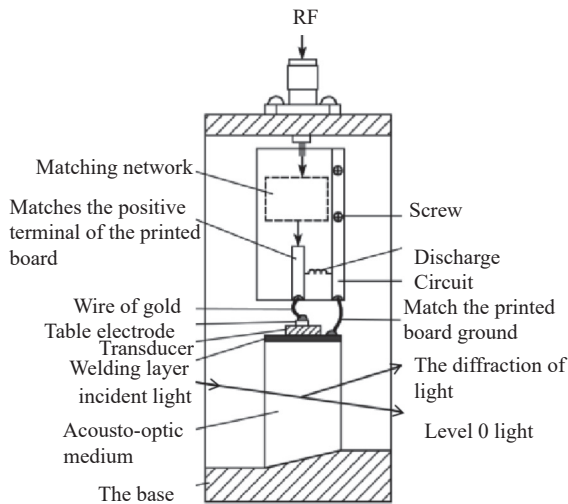


图 12 高频声光偏转器的抗静电设计

Fig.12 Antistatic design of high frequency acoustooptic deflector

2.2 液晶偏转技术

基于液晶材料的光束偏转技术主要包括：液晶相控阵、液晶微透镜阵列以及液晶偏振光栅等。

2.2.1 液晶相控阵

液晶相控阵 (Liquid Crystal Optical Phased Array, LCOPA) 技术是指通过电极对液晶分子施加电压, 由于液晶分子具有电控双折射效应, 外加电压控制着不同状态液晶分子的偏转程度, 从而对光束波前起到相位调制作用, 实现光束扫描, 如图 13 所示^[44]。

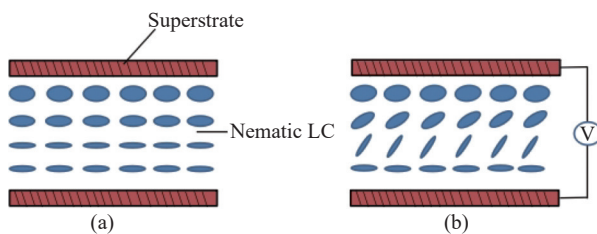


图 13 液晶相控阵偏转原理图

Fig.13 Schematic diagram of liquid crystal phased array deflection

LCOPA 光束偏转角满足^[45]:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{Nd} \quad (5)$$

式中: λ 为入射光波波长; d 为电极有效尺寸; N 为每个周期内的电极数。衍射效率满足:

$$\eta_e = \left[\frac{\sin(\pi/N)}{(\pi/N)} \right]^2 \times (1 - A_F/\Lambda)^2 \quad (6)$$

式中: N 为一个周期内电极数; A_F 为光学回程区大小;

Λ 为每个周期的总尺寸。

LCOPA 响应时间满足:

$$\tau = t^2 \gamma / (\kappa \pi^2) \quad (7)$$

式中: t 为液晶层厚度; γ 和 κ 分别为液晶材料的黏性系数和弹性系数。公式 (7) 表明, 液晶层厚度越大, LCOPA 响应时间越长。

2.2.1.1 国外研究进展

1989 年, 美国 Raytheon 公司的 Sharp 等利用红外电可调谐的液晶波片研制了第一台液晶光波相控阵列, 并利用托克斯-麦克鲁弗椭圆偏振法分别验证了温度和光学诱导重定向对器件性能的影响^[46]。

2009 年, 美国 Displaytech 公司的 David 等利用高倾斜度铁电液晶材料, 研制了一种一维的铁电液晶相控阵, 实现了 $0 \sim 2\pi$ 之间 91% 的相位调制, 可分辨偏转角度多于 700 个, 响应时间小于 $200 \mu\text{s}$ ^[47]。

随着对液晶相控阵的进一步研究, 研究学者发现基于空间光调制器的液晶相控阵有着很高的扫描精度和分辨率, 近年来成为激光雷达、通信领域的研究热点。2015 年, 美国中佛罗里达大学的 Fenglin Peng 于利用一种用于硅上液晶 (Liquid Crystal On Silicon, LCOS) 相位调制的低压聚合物稳定蓝相液晶, 设计了一种新的液晶空间光调制器结构, 使入射光在离开 LCOS 之前可以通过蓝相液晶层 4 次。当控制驱动电压在 $0 \sim 24 \text{ V}$ 范围内变化时, 实现了约为 3 ms 的响应时间和 2π 的相位调制, 有效降低了驱动电压值^[48]。

2017 年, 美国 SLM 公司在光学西部会议上展出了最新的纯相位二维液晶空间光调制器, 该调制器中可控的阵元电极大小为 $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, 阵列规模达到了 1080×1920 个, 有效通光孔径为 $15.36 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$, 每个阵元电极有 256 个可调相位等级, 液晶空间光调制器系统可控的波长范围为 $420 \sim 1700 \text{ nm}$, 并且在这个范围内其零级光衍射效率可达到 93%, 在帧率 180 Hz 的条件下, 液晶空间光调制器的响应时间为 5.6 ms。

2019 年, 新加坡材料研究与工程研究所的李世强等也介绍了一种基于一维纳米天线的透射液晶空间光调制器, 液晶层厚度为 $1.5 \mu\text{m}$, 远小于传统器件。其光束衍射效率大于 35%, 可实现 $0^\circ \sim 11^\circ$ 范围内的光束偏转和 877 lp/mm 的图像分辨率, 是目前商用液晶

空间光调制器的 30 倍^[49]。

日本滨松公司于 2020 年研制出了一款耐光强度达 400 GW/cm² 的液晶空间光调制器, 如图 14 所示, 阵元宽度为 12.5 μm, 像素阵元为 1272×1024 个, 有效通光孔径为 15.9 mm×12.8 mm。

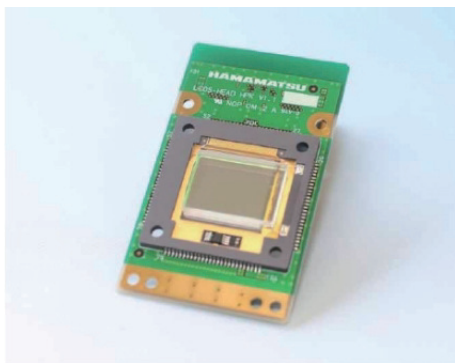


图 14 400 GW/cm² 耐光性能 SLM

Fig.14 400 GW/cm² light resistance SLM

2.2.1.2 国内研究进展

由于液晶相控阵在扫描精度和分辨率方面的突出优势, 国内学者开始研究基于空间光调制器的液晶相控阵的光束偏转性能。2008 年, 哈尔滨工业大学的张健等利用向列型液晶分子在不同电场下会在垂直于液晶层方向产生不同的排列方式特性, 研制出了 1024 个驱动电极的透射式空间光调制器, 通过 FPGA 作为驱动电路, 实现了最大偏转角度为 34.931 mrad、60 个角度的可编程光束偏转扫描^[50]。

2011 年, 电子科技大学的孙洋东通过深入分析液晶光学相控阵的模型和控制方法, 研制出了规模为 1920 阵元、阵元宽度为 5 μm 的一维透射式液晶相控阵, 对 1.064 μm 激光实现了 4°范围内的连续扫描, 并完成了国内第一台基于液晶光学相控阵的激光成像雷达样机研制^[51]。

电子科技大学的汪相如^[52]等又于 2016 年通过将低压驱动液晶材料用作相位延迟介质的方法, 研制出了一款新型的液晶空间光调制器, 如图 15 所示。该器件的阵列大小为 10 mm×10 mm, 可控阵元电极为 1×1920, 对 1.064 μm 激光实现了 4°范围内的连续光束扫描, 完成了液晶空间光调制器实时、任意的波束形成和波束指向。

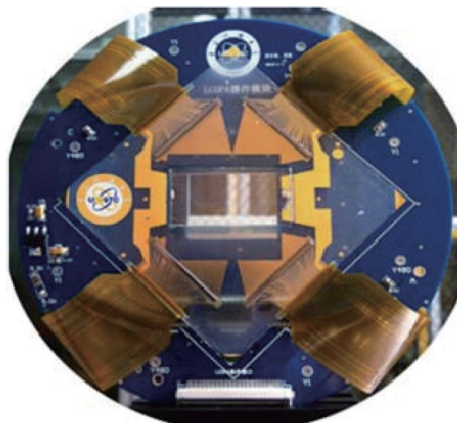


图 15 利用低压液晶驱动材料研制的空间光调制器

Fig.15 A space light modulator using low pressure liquid crystal driving material

2.2.2 液晶微透镜阵列

液晶微透镜阵列 (Liquid Crystal Micro-lens Array, LCMLA) 由 3 个透镜阵列组成, 如图 16 所示, 第一层的后焦面与第三层的前焦面重合, 第二层的阵列起约束作用, 以保证第一层阵列的出射光全部进入到第三层。

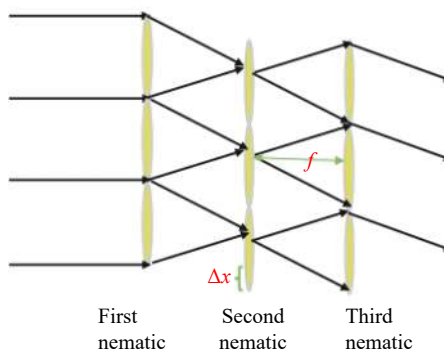


图 16 液晶微透镜阵列原理图

Fig.16 Schematic of liquid crystal microlens array

其最大偏转角满足^[53]:

$$\theta_M = \arctan(2\Delta x/f) \quad (8)$$

式中: Δx 为第一层和第三层阵列在垂直光轴方向上的位移量; f 为 3 个透镜阵列的共有焦距。改变这两个量就可以实现对光束偏转角的控制, 达到光束扫描的目的。

2.2.2.1 国外研究进展

国外学者在光学微透镜的启发下发现液晶微透镜无需进行镜面的运动, 只需操纵液晶分子指向矢即可产生偏转。1989 年, 美国麻省理工学院林肯实验室

最早提出利用微透镜阵列实现光束扫描的技术方案。同年, William 和 Michael 等利用微透镜阵列平移的敏捷光束转向, 研制了一种基于伽利略结构的微透镜阵列扫描器, 微透镜阵列的显微照片如图 17 所示, 其中单个微透镜为 200 μm , 密度为 3000 个/ cm^2 。在两组微透镜阵列间的相对位移为 100 μm 时, 对波长为 632.8 nm 的入射光实现了 11° 的光束偏转转向^[54]。

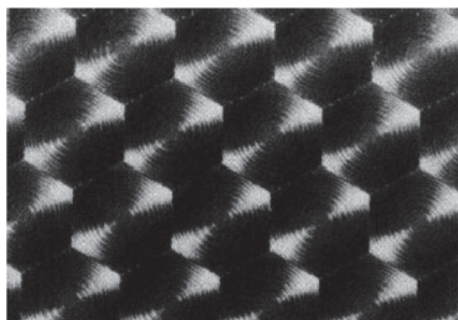


图 17 微透镜阵列显微图

Fig.17 Micrograph of microlens array

2002 年, 美国空军实验研究室的 Waston 等采用优化开普勒结构的微透镜阵列技术, 利用级联偏心微透镜阵列只需要小的运动便可产生大的角度偏转这一优点, 实现了视场为 36.8° 的大角度扫描, 在 24° 视场内能量利用率达到 80%^[55], 如图 18 所示, 但由于色散等原因, 其扫描分辨率未达到理论上的衍射极限。他们又对不同排列顺序的液晶微透镜阵列进行分析, 并进行性能上的讨论。针对液晶偏心微透镜阵列光束转向装置效率低下的问题, 该实验室的 Lei Shi 于

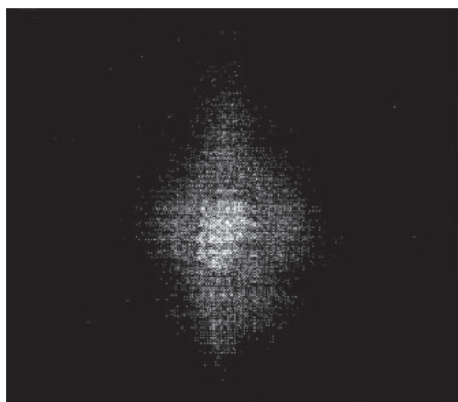


图 18 优化开普勒结构的微透镜阵列技术实现的扫描光斑

Fig.18 Scanning spot realized by microlens array technique with optimized Kepler structure

2010 年正式利用液晶作为移相器件研制了微透镜阵列扫描器, 其通过镜面对称校正和相位上升校正等修改透镜相位轮廓的方法, 大大提高了微透镜阵列的性能, 在 552 nm 的入射光条件下, 实现了 1.008° 的光束偏转, 偏转效率达到 94.4%^[56]。

后来, 研究学者发现使用电控液晶微透镜阵列能够利用电压改变分子指向矢的方向, 较传统方法更加简便, 并开始对电控电极进行研究。2014 年, 肯特州立大学的 Li 等也提出了一种同心圆环电极液晶微透镜, 以此来提高液晶微透镜的高质量性能, 该同心圆环电极可以很好地对相位轮廓进行控制。该液晶微透镜具有 33 个同心圆环电极以及 2.4 mm 的直径, 可以尽可能减小因为电极间隔过大而导致的成像质量和衍射效率下降^[57]。比利时根特大学的 Beekman 等于 2018 年提出了一种只需要一次光刻的圆环电极液晶微透镜, 其在电极上方增加了一层高介电常数的介电层, 该介电层属于低电导层, 没有电流流通, 不会导致能量耗散, 并且可以极大地平滑边缘场。此外, 电极之间的间隔可以增大, 在相同电极数的情况下, 可以增加透镜的孔径, 实现更大的偏转范围^[58]。

2.2.2.2 国内研究进展

我国对微透镜阵列也是以光学式透镜系统为背景进行研究的。2001 年, 中国科学院光电技术研究所的周崇喜等为解决激光二维扫描的设计优化问题, 采用光束利用率高、驱动行程大的非对等聚焦微透镜阵列对, 在 632.8 nm 波长下实现了 15° 的扫描视场角^[59]。

2007 年, 华中科技大学的董珊等基于伽利略结构研制了以压电陶瓷作为驱动器的微透镜阵列扫描器, 在可见光和红外波段, 视场角可达 6.6°, 扫描频率可达 200 Hz^[60]。

2018 年, 天津大学的谢洪波等研制了收发一体且可以连续扫描的微透镜阵列, 其通过使入射和出射端口的微单元光孔径相等, 从而实现收发共用, 在 1064 nm 条件下实现了 20° 的扫描视场角^[61]。

近年来, 国内学者也开始对微透镜阵列的电控电极进行探究。2019 年, 华中科技大学的 Mingce Chen 等^[62]设计了一种非均匀微线圈电极的液晶圆柱微透镜阵列, 相比传统石英固体柱形透镜, 可以通过非宏观运动的电控焦距的变化来实现光束集中或偏转。

此外,为了提高液晶微透镜的聚焦能力,将三角棱镜的高介电层和旋涂形成的低介电层组成复合介电层来设计一种新型的双层液晶透镜,如图 19 所示。通过实验验证得到,相比单介电层 10.7 V 的施加电压,对复合介电层施加电压 3.3 V 时就可以得到近似抛物线型的折射率分布。可调焦距范围可从 1.7827 mm 到无限远,上升时间和下降时间分别为 0.9 s 和 0.32 s^[63]。

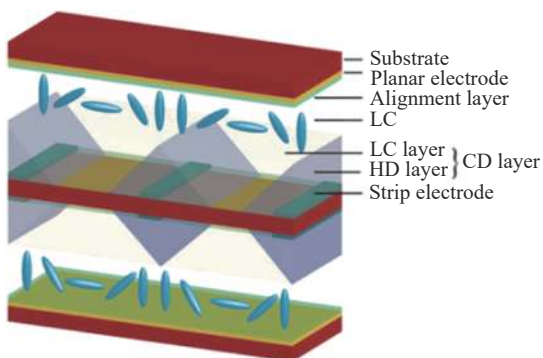


图 19 复合介电层双层液晶透镜结构图

Fig.19 Structure diagram of double layer liquid crystal lens with composite dielectric layer

2021 年,中国科学院光电技术研究所的杨旭等将微透镜阵列和自适应光纤准直器结合应用起来,通过改变自适应光纤准直器在准直透镜焦平面光纤端头的位置以及光纤端头和微透镜阵列的相对位移,分别实现了入射光的偏转和大角度扫描,如图 20 所示,实验最终实现了扫描视场角为 10°的衍射极限分辨率连续寻址扫描^[64]。

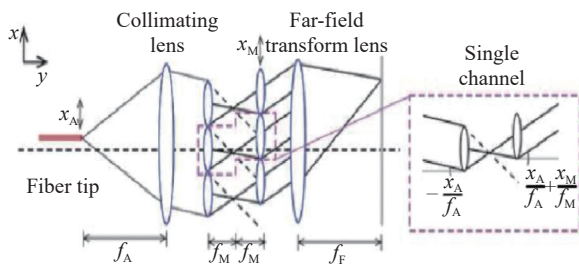


图 20 连续寻址扫描原理图

Fig.20 Schematic of a continuous addressing scan

2.2.3 液晶偏振光栅

液晶偏振光栅 (Liquid Crystal Polarization Grating, LCPG) 原理为入射光通过起偏器形成左旋光和右旋

光,再经过其 LCPG 实现对两个不同方向的光束偏转,偏转光路如图 21 所示。

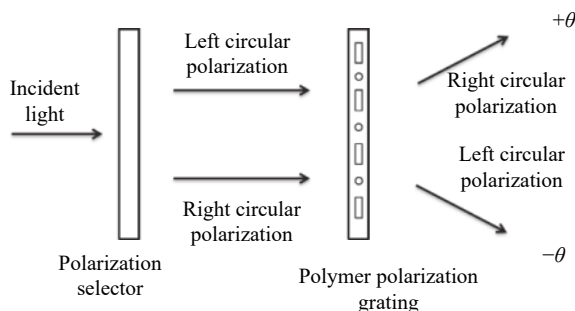


图 21 液晶偏振光栅原理图

Fig.21 Schematic of liquid crystal polarization grating

LCPG 的偏转角服从光栅方程:

$$\sin \theta_m \pm \sin \theta_0 = m\lambda / \Lambda_0 \quad (9)$$

式中: θ_0 为入射角度; m 为衍射级; Λ_0 为光栅常数。对于 LCPG, m 只能取 0、 ± 1 , 其最大偏转角由 Λ_0 决定^[65]。

2.2.3.1 国外研究进展

美国最先开始研究基于液晶偏振光栅的非机械式光束偏转系统。2008 年,北卡罗来纳州立大学的 Kim 等为实现分辨率为 1.25°、角度范围为 $\pm 30^\circ$ 的大角度光束偏转,设计了多个液晶偏振光栅与液晶半波可变延迟器相结合的光束偏转技术^[66],实现了 $-15^\circ \sim +15^\circ$ 范围、角度分辨率为 5° 的光束离散扫描,扫描效果如图 22 所示。在此基础上,通过减少每一级光学器件数的方法实现了偏转角为 52°、62°、80° 的准连续偏转,并极大地提高了系统的偏转效率,在偏转角为 52° 时,偏转效率约为 80%^[67]。为进一步增大最大准偏转角度,该团队采用液晶半波板和被动式液晶相结合的方法,又设计了一种基于聚合物液晶偏振光栅的大角度光束偏转系统,对波长为 1064 nm 的入射光实现了分辨率为 2.6°、角度为 $\pm 80^\circ$ 的光束偏转效果^[68]。针对角分辨率低的问题,超二进制粗偏设计方法被应用于基于聚合物液晶偏振光栅中,在波长为 1550 nm 的入射光条件下,分辨率实现了 8°,光束偏转角达到了 65°^[69]。

大口径光学技术有着高定向、高分辨率和大视场等优点,但应用于机械式的光学转向系统有着较多问题,大口径导致机械式系统的体积和质量大,需要相当大的功率实现宽视场下的高精度性能,而液晶偏振

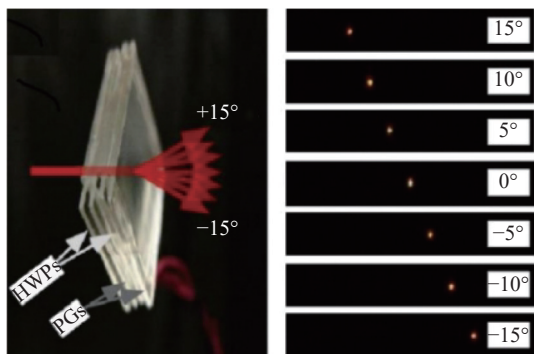


图 22 大角度光束扫描效果图

Fig.22 Large angle beam scan rendering

光栅技术为制造出大口径系统所需的尺寸提供了可能。2016 年,美国博尔德非线性系统公司的 Steven 等利用多层液晶偏振光栅级联的方式,采用固体膜液晶偏振光栅与液晶开关交错的几何序列结构,最终实现了较小口径 (<10 cm) 的角度分辨率为 3.2°、扫描范围为 64°×64° 的宽视场的二维光束离散扫描,衍射效率高于 80%。未来其将实现更大口径 (10 cm) 的 LCPG 组件,并集成到大口径转向系统中^[70]。

在入射角度和波长范围宽的条件下,利用较薄的投射元件实现高效率的大角度偏转是一种挑战,目前使用的不同传输模式衍射光栅的方法不能很好地权衡技术难度和性能之间的利弊,针对这一问题,北卡罗来纳州立大学的 Xiao 等于 2018 年设计了一种液晶聚合物布拉格偏振光栅,其具有亚波长周期,在同一液晶聚合物布拉格光栅单片膜内分层了两个斜面以增加其角响应,在不降低效率的情况下获得了更大的角带宽。实验结果表明,在 532 nm 波长下,光栅周期为 400 nm 的液晶聚合物布拉格偏振光栅具有 40° 的扫描视场,光谱带宽可达到 200 nm,平均效率可实现 76%,是现有技术的 2 倍多^[71]。

2.2.3.2 国内研究进展

我国在液晶偏振光栅方面的研究起步较晚,主要从液晶材料和光栅结构等方面对偏转角度、偏转效率以及响应时间进行了分析。

基于液晶偏振光栅的光束偏转器能够解决传统偏转装置响应速度慢的问题。上海交通大学的黄帅佳利用聚合物网络液晶制备了液晶光栅,提出了一种基于偏振光栅的光束偏转器结构,实现大角度偏转、快响应速度的目标,在 632.8 nm 入射光下实现了±4°

的光束偏转,响应时间提高到亚毫秒量级^[72]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王启东等利用光控取向技术和垂直取向技术制备了双频液晶偏振光栅,该光栅结构采用双频液晶材料,大幅提高了相位调制量,响应速度达到了亚毫秒量级^[73]。

此外,基于液晶偏振光栅的光束偏转器还能够解决传统液晶光栅因将入射光转为圆偏振光,导致光束偏转效率下降的问题。研究学者提出了两种方法进行了尝试:一种是研制了基于周期复合材料的液晶偏振光栅,该系统通过改变入射光线偏振光的偏振方向,将光束偏转至正负一级,偏转效率近 100%^[74];另一种是将基于类二值式级联方式的液晶偏振光栅和液晶相控阵串联,同时兼顾两者的优异特点,研制了一种新型的光束偏转系统。在 730 nm 入射光波长下实现了偏转效率为 42%、偏转范围达±20°、偏转精度为 30 μrad 的高精度二维光束偏转^[75]。

2.3 电光偏转技术

电光偏转技术是利用垂直于光束传播方向的折射率梯度产生的偏转实现的,如图 23 所示,设计特殊形状的电极在晶体内部形成梯度电场,通过电光效应在垂直于光束传播方向上形成梯度折射率分布,光束会向折射率梯度增加的方向偏转,偏转角度可通过外加电压控制。

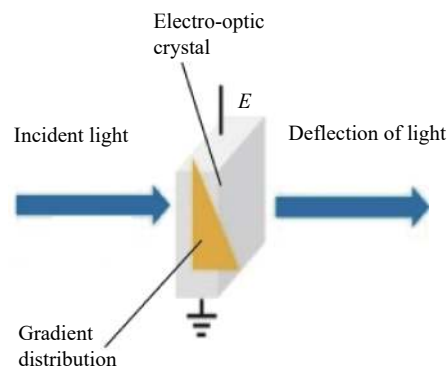


图 23 电光偏转原理图

Fig.23 Schematic diagram of electro-optic deflection

偏转角度满足^[76]:

$$\theta_e = -\frac{9}{8}n^3\varepsilon_0\varepsilon_r^2\frac{V^2}{d_0^3}L \quad (10)$$

式中: ε_0 为真空条件下的介电常数; ε_r 为相对介电常数,一般为 3×10^4 ; L 为激光束在晶体内的传播长度;

d_0 为晶体厚度; n 为晶体的折射率; 负号表示光束总是向着阴极偏转。

电光偏转技术可分为两种: 一种是通过设计电极结构使得电光晶体内部形成不均匀电场, 通过电光效应引起光束偏转, 代表性成果包括徐国昌设计的四凹圆形电极 (Potassium Phosphate Monobasic, KDP) 磷酸二氢钾晶体电光偏转器^[77] 以及艾月霞设计的超越曲面电极结构电光偏转器^[78]; 另一种是日本 NTT 公司提出的基于空间电荷控制的电光偏转新技术, 国外主要研发单位包括日本 NTT 公司、美国宾西法尼亚大学, 国内主要研发单位包括天津大学、哈尔滨工业大学以及山东省科学院。这两种电光偏转技术均是通过在电光晶体内部形成梯度电场, 只是梯度电场的实现机理不同。基于空间电荷控制的电光偏转技术是目前最热门的主流研究方向, 因此下文将重点对其展开综述和分析。

2.3.1 国外研究进展

日本 NTT 公司利用钽铌酸钾 (Potassium Tantalum Niobate, KTN) 电光晶体, 率先提出了基于空间电荷控制的电光偏转技术, 通过向 KTN 晶体注入自由电子形成梯度电场, 利用电光效应在晶体内部形成梯度折射率, 设计出 KTN 电光偏转器, 在 500 V/mm 电场、5 mm 作用长度的条件下实现了 $\pm 7.16^\circ$ 的偏转范围, 并进一步指出向晶体内注入电子的必要条件是电极和 KTN 晶体之间欧姆接触的形成^[79]。Nakamura 从高斯定律和电流连续定律给出了基于空间电荷控制的光束偏转模型^[80], 但该模型表明, 在高频电场条件下, 注入电子不能及时响应电场, 导致理论预测的偏转角大于实验观测到的偏转角。针对该模型的缺陷, Miyazu 指出 KTN 晶体内部的电场分布不是由注入电子造成的, 而是存储在量子阱中电子导致的结果, 基于此得到了一种新颖的光束偏转模型, 该模型能够成功预测高频电场时的光束偏转现象, 并且表明光束偏转的响应速度不受电子迁移率的限制, 而是由 KTN 晶体的电光效应决定的^[81]。

随后, 日本 NTT 公司从增大光束偏转角、提高电子注入效率和提高光斑分辨率方面对 KTN 光束偏转器进行了完善和产品化。Naganuma 通过在 KTN 晶体的入射面和出射面镀高反射膜, 设计了一种三通结构^[82]。在不改变晶体长度的情况下, 该结构将通光距

离增大了 2 倍, 如图 24 所示。实验测量结果表明, 在晶体长度为 6 mm 时, 该三通结构的最大偏转角是传统单通结构的 3 倍。

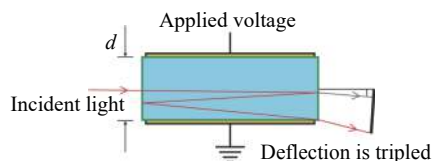


图 24 KTN 晶体偏转器的多通光路结构

Fig.24 Multipass scheme for KTN crystal deflector

光斑质量和光斑大小是影响光斑分辨率的主要因素, Naganuma 和 Sasaki 分别从 KTN 晶体制备和光束整形的角度对提高光斑分辨率进行了分析。由于 KTN 固有的光学不均匀性的影响, Naganuma 指出 KTN 光束偏转器的光斑质量取决于 KTN 晶体的组分变化, 在光束平行于 KTN 生长方向的条件下, 光斑质量达到最佳, 否则光斑会严重退化变形^[82]。由于 KTN 晶体的聚焦效应, 光束从 KTN 晶体出射后会发散成大光斑光束, 导致光束偏转的减小, 针对这一问题, Sasaki 采用光线追迹的仿真方法, 通过在 KTN 晶体前后放置两个焦距相同的柱面凹透镜对光束进行整形, 提高了光束偏转角, 进而改善了光斑分辨率^[83]。

电子注入效率直接决定了 KTN 的光束偏转器性能, 主要因素包括电子注入密度和深度。Imai 通过测量光束的相位延迟间接表征了注入 KTN 晶体的电子注入密度和深度, 实验结果表明阴极附近电子密度最大, 由于注入电子引起的屏蔽效应, 注入电子密度随着远离阴极而逐渐降低, 在阳极附近几乎不存在注入电子, 并且注入电场的幅值越大, 电子的注入深度越大^[84]。为解决注入电荷引起的屏蔽效应降低电场进而阻止电子的进一步注入问题, Sasaki 采用 405 nm 激光照射 KTN 晶体, 增强了 KTN 晶体的电子运输, 提高了 KTN 晶体内自由载流子密度, 以此机理研制出了一种高稳定性的 KTN 电光偏转器。在 405 nm 光的照射下, 电流增加, 迅速产生了稳定的折射率变化, 从而引起偏转。偏转角度在几十秒内达到 160 mrad, 并持续了高达 3000 h^[85]。

温度效应是影响 KTN 光束偏转器偏转稳定性的重要因素, KTN 晶体工作在居里温度附近时的介电

常数会达到最大, 偏转性能也会达到最好。2019 年, Tatsumi 等于针对传统热控制方法存在导热效率低进而影响光束偏转稳定性的问题, 设计了一种双热敏电阻结构进行温度控制的新方案。在上下电极块各使用一块热敏电阻, 并将其串联连接, 通过一个 Peltier 模块进行温度监测控制, 从而提高了温控的精确度, 如图 25 所示。实验测量结果表明, 在 0 V 和 177 V 的外加电压施加下, 双热敏电阻结构对应的偏转角在 20 °C 环境温度下由于热效应变化了 1.3 mrad; 对于传统结构, 偏转角改变了 4.1 mrad, 表明双热敏电阻结构使得环境温度变化对偏转角的影响降低了 37%^[86]。

美国宾夕法尼亚州立大学跟随日本 NTT 公司的研究进展, 对 KTN 晶体的光束偏转性能进行了分析。Chao 以纳秒级别的脉冲电压源作为驱动电压, 使用针孔作为指示物, 其示意图如图 26 所示。测量

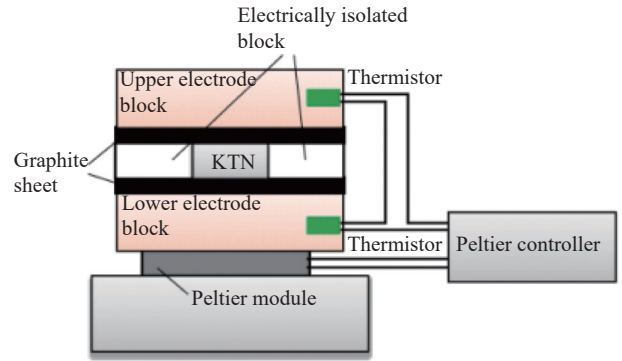


图 25 双热敏电阻温度控制结构图

Fig.25 Double thermistor temperature control structure

偏转的完全响应时间为 26 ns, 表明基于 KTN 晶体的电光偏转器件的响应时间受限于外加的驱动电压速度, 而不是电光效应的响应速度, 验证了纳秒量级响应速率的 KTN 晶体电光偏转器件^[87]。

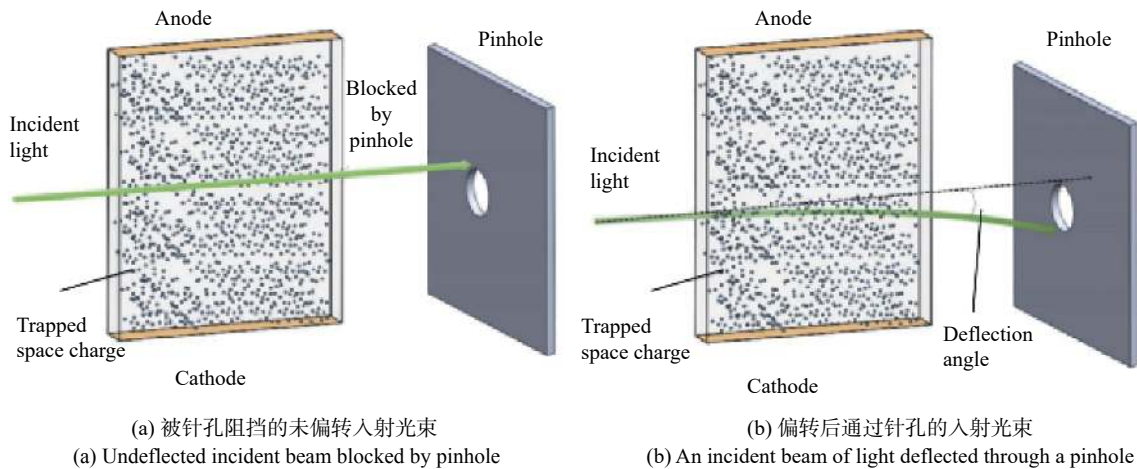


图 26 纳秒响应速率的 KTN 晶体光束偏转装置示意图

Fig.26 Schematic diagram of a KTN crystal beam deflector with nanosecond response rate

为减小电荷注入深度受自由电子屏蔽效应的影响, Zhu 在日本 NTT 公司的基础上, 利用蓝光光子激发束缚电子的物理机理, 在施加预注入电压的同时将蓝光照到 KTN 晶体上, 直到注入电流达到稳定, 提高了电荷注入深度, 进而增大了 KTN 偏转器的孔径。实验结果表明, KTN 偏转器在注入深度 5 mm 处受蓝光激发时的偏转角可由无蓝光激发时的 0.7 mrad 提高到 2.5 mrad^[88]。

对于居里温度附近的 KTN 晶体, 偏置电场能引起 KTN 晶体的场致相变效应, 并使得介电常数在 KTN 晶体相变前随偏置电场的增大而增大^[89]。Chang

等通过在 KTN 喷镀铂金电极阻止电荷注入, 以避免其对偏转角的影响, 分析了介电常数的场致增强效应对光束偏转角的影响。由于场致相变现象仅发生在居里温度附近, Chang 做了对照实验: 1) 将 KTN 晶体设置在远离居里温度, 此时介电常数不随偏置电场发生变化, 测得此时的光束偏转角为 2.4 mrad; 2) 将 KTN 晶体设置在居里温度以上 2 °C, 此时介电常数随着偏置电场的增大迅速增大, 测得此时的光束偏转角提升到 7.2 mrad。Chang 将这种介电常数的场致增强效应归因为电场增强的 PNR 偶极矩^[90], 但根据介电常数响应偏置电场的频率相关性, 介电常数的强场致

增强效应仅发生在 PNR 与电场发生共振的特定频率处^[91]。为进一步理解电场强度和介电常数在 KTN 晶体内的分布, Chang 从理论上通过修正 Curie-Weiss (CW) 定律, 对光束偏转角和电场、介电常数的关系进行了推导建模, 从实验上通过改变光束照射在 KTN 晶体上的位置, 利用图 27 所示的光路测量了光束偏转角随光束位置到阴极距离的变化规律。根据模型, 通过光束偏转角计算出电场和介电常数随位置的变化规律^[92]。

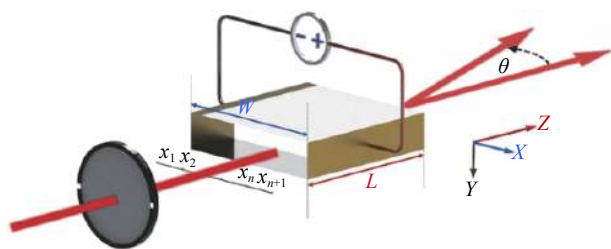


图 27 光束偏转验证电场分布结构图

Fig.27 Structure diagram of electric field distribution verified by beam deflection

提高自由电子的注入密度和深度已被广泛认为是提高偏转性能的有效方法, 传统上自由电子通过外加偏置电场或低频交变电场实现注入, 但自由电子的电荷屏蔽效应限制了电子的注入深度和密度, 限制了 KTN 晶体偏转角度和孔径, 针对这一问题, Chang 提出了一种利用局部紫外光照射来实现电子和空穴同时注入的新方法, 如图 28 所示。对阳极进行紫外线照射, 阴极使用黑色胶带遮挡, 激发空穴注入, 通过外加电压激发电子注入, 从而实现两种载流子的同时注入。实验表明, 这种双载流子注入的新方法比传统只注入电子的方法提高了 270% 的偏转范围, 并具有双向偏转能力^[93]。

KTN 晶体在生长过程中会在生长方向形成 Nb 组分梯度分布, 由于 KTN 晶体的居里温度受 Nb 浓度调控, 根据介电常数与温度的变化规律, 在相同温度条件下 KTN 晶体的介电常数在不同位置会存在差异, 这种组分梯度造成的介电常数梯度分布同样会引起光束的偏转行为。利用 Nb 的组分梯度分布, Lee 等提出了一种具有温度梯度的 KTN 光束偏转器件。根据 KTN 晶体生长工艺造成 Ta/Nb 成分梯度的固有特性, 通过测量 Ta/Nb 浓度比来得到 Z 轴上不同位置的居里温度, 控制温度使得沿 Z 轴的各个位置能够在

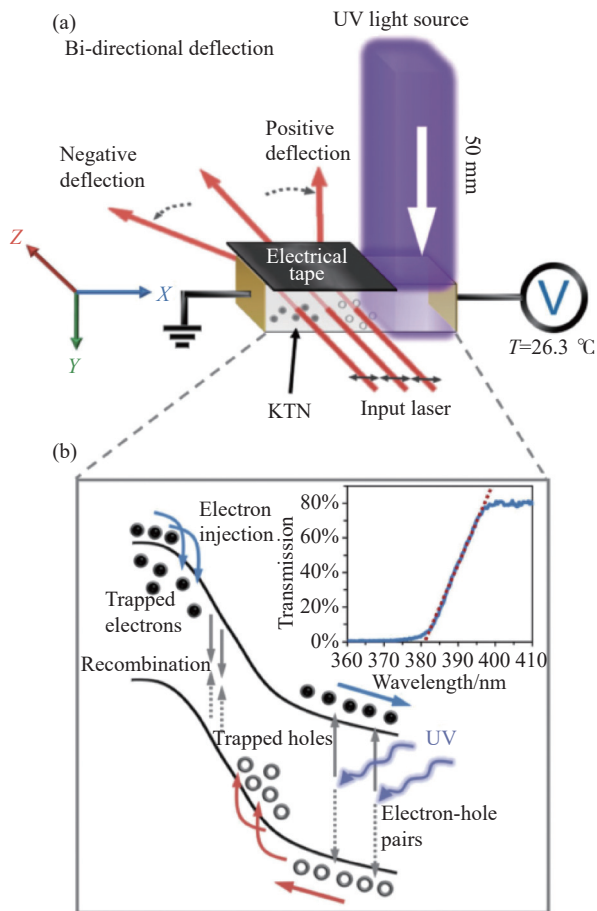


图 28 电子空穴注入示意图。(a) 紫外线照射的 KTN 光束偏转示意图; (b) 沿 X 轴方向的能带图

Fig.28 Schematic diagram of electron and hole injection. (a) Schematic diagram of the deflection of the UV-irradiated KTN beam; (b) Energy band diagram along the X-axis

介电常数最高的条件下工作, 如图 29 所示。实验测量表明, 在波长 632.8 nm 的入射光和 32 °C 均匀温度条件下, 施加 1400 V 外加电场能够实现 8.8 mrad 的偏转角度; 而同等条件下使用具有温度梯度控制的 KTN 偏转器能够实现 24 mrad 的最大偏转^[94]。

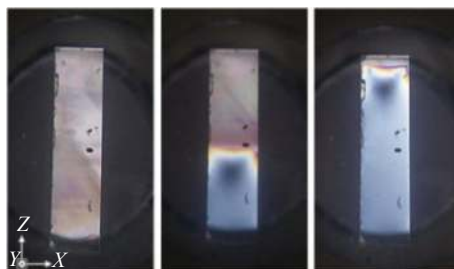


图 29 沿 Z 轴 0 mm、5 mm 和 10 mm 处的 KTN 晶体居里温度分布
Fig.29 Curie temperature profiles of KTN crystals at 0 mm, 5 mm, and 10 mm along the Z-axis

2.3.2 国内研究进展

我国的电光晶体偏转研究起步较晚。山东省科学院的王旭平团队率先开展了对 KTN 晶体偏转特性的研究。2008 年,王旭平利用生长出的 KTN 晶体实现了电控光束偏转,生长的 KTN 晶体大小为 $6\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,居里温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,在电场 $\pm 700\text{ V/mm}$ 条件下实现了 $\pm 105\text{ mrad}$ 的偏转角^[95]。KTN 晶体具有组分梯度,会导致其空间内部不同的折射率,从而发生光束偏转。为研究组分梯度差异对偏转角度的影响机理,该团队首次研制了具有生长组分梯度特性的 KTN 晶体,利用电光效应实现了电控光束偏转技术,如图 30 所示。对大小为 $2.8\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$ 的 KTN:Cu 晶体进行了光束偏转实验,在电场 $\pm 1\ 200\text{ V/mm}$ 条件下实现了 $\pm 50\text{ mrad}$ 的偏转角,通过实验发现光束的偏转方向与电场方向无关,光束总是朝着 Nb 组分增大的方向偏转^[96]。

针对影响偏转性能的温度效应,2017 年,哈尔滨工业大学的王爽对影响电光偏转的温度因素进行深入研究,通过施加直流电压激发晶体热效应来形成温场的方法实现光束偏转,在实验中采用多种结构电极来改变晶体的温场,得出了双面电极所形成的温场可以产生更大的偏转角度,但仅限于一维空间内,单面电极所形成的温场相比双面电极的偏转角度较小,但可以实现二维空间内的偏转^[97]。

针对电光光束调制器件需要较高驱动电压才能实现大偏转角度的问题,暨南大学的田富鹏于 2018 年提出了一种基于微结构电极铌酸锂波导的电光偏转方案,如图 31 所示。其将铌酸锂波导芯层设计为喇叭状结构,将锯齿电极设计为等腰三角形结构嵌入到波导结构中,有效增加了光场和电场作用的接触面

积,在外电压作用下,铌酸锂波导内部折射率呈棱镜式分布,从而达到横向偏转的目的。该偏转器件可实现低压偏转 (5 V 量级),电光实现偏转的位移可达到 $0.267\text{ }\mu\text{m/V}$ ^[98]。

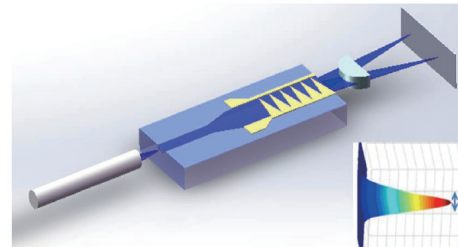


图 31 基于铌酸锂波导的电光偏转模式示意图

Fig.31 Schematic diagram of electro-optic deflection mode based on lithium niobate waveguide

近年来,具有离子掺杂特性的 KTN 晶体在各方面性能优于纯的 KTN 晶体,是目前的研究热点。2019 年,天津大学精密仪器与光电子工程学院的吕且妮课题组基于掺杂 Mn 离子的 KTN 晶体的光折变效应,利用光强具有线性梯度分布的诱导光束照射 KTN 晶体,使得晶体内部产生光生载流子,形成空间电荷场,改变晶体内电场的分布,在施加外电场的作用下,在晶体内将形成与内电场分布相对应的折射率变化,从而实现入射光的偏转。实验测量表明,在外加电压 700 V 、通光长度 1.2 mm 的条件下,这种基于“等效棱镜”的电控光束偏转技术实现了 12.38 mrad 的较大偏转角度^[99]。

倍频光束偏转也被指出可应用于某些电光晶体偏转,哈尔滨工业大学的邢博涵^[100]针对铌酸锂晶体的 Maker 条纹进行了研究, Maker 条纹是由二次极化后的自由波和束缚波相互干涉产生的,通过绕晶体光轴旋转来改变基频光入射角度,利用电光效应来改变束缚波和自由波的干涉情况,改变外加电场,倍频光斑的位置会发生移动,从而实现倍频光束偏转。通过实验,在电压为 $2\ 500\text{ V}$ 时,得到最大偏转角度 0.489° ,响应时间为 0.2 ms ,该方法无需过高的生长工艺和电荷注入技术,易于实现,同时也为可控光强调制领域的应用提供了一种新的思路,但由于其基于线性电光效应实现光束偏转,相比利用二次电光效应的 KTN 晶体,在偏转能力上仍有较大的差距。

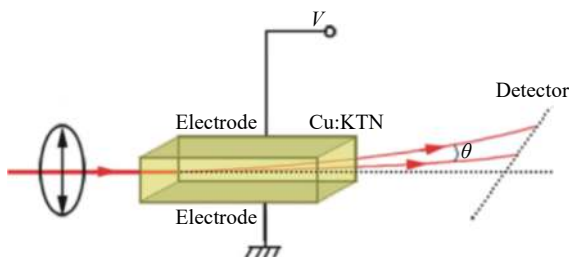


图 30 掺杂铜离子的 KTN 晶体电控光束偏转原理图

Fig.30 Schematic of KTN crystalloelectronic beam deflection doped with copper ions

3 各类偏转技术性能特点及发展趋势分析

3.1 扫描振镜

振镜式扫描系统结构简单、体积小、扫描精度高、速度快、成本相对较低,但存在工作范围有限、枕形失真、振镜磨损等问题。

对于二维振镜和更高维度的振镜扫描技术,系统结构更为复杂,在实际应用时会出现调向误差,需要对误差具有很好的矫正手段。未来可以考虑使用变结构控制技术和粗细两级复合轴控制技术加以辅助来抑制残差,在空间环境良好、工作周期较短的卫星星座中应用,最大效益地实现高精度捕跟扫描。此外,激光通信中一般激光器功率会很大,选择更高反射率的振镜镜面材料以减小表面损伤也是未来需解决的问题。

3.2 快速控制反射镜

快速控制反射镜具有定位精度高、角度分辨率高、响应速度快、体积小等优点,在多种光机电系统中应用广泛,而且柔性支撑结构也减小了机械摩擦,但在实际应用中需要与大惯量机架结构相结合,会导致一定的光轴误差。

目前,一方面国内该领域的研究主要集中在快速反射镜的结构仿真和系统控制上,在开发研制新型反射镜上进展缓慢,这也与其需要不断的迭代验证、研发成本高有关。因此,开发一种联合仿真系统,使得通过调整系统中的某些参数就可以模拟实物验证,从而大大缩短研制周期,更快找到高性能的快速反射镜参数,提高优化效率是未来需要探究的。另一方面,空间环境中存在的热扰动和基础振动,在进行高精度光束指向时会造成其光轴畸变和抖动,目前已有的方法是使用迈克尔逊干涉仪和快速控制反射镜组成的光束指向对准系统来弥补光轴误差这一问题。但该方法处理动态测量误差准确度较低,加强动态测量误差精度以能够实时补偿误差是后续应解决的问题。

3.3 微机电系统变形镜

微机电系统变形镜具有单元密度高、响应时间短、功耗低、成本低、集成电路兼容性好等优点,在成像领域应用更为广泛,但其也存在扫描速度慢、光能利用率低,杂散光较多等问题。近年来开始进行变形镜更多单元执行器的研制,以待增加波前行程和获得

更高的帧速率;同时,更多执行器的变形镜会导致产生更大的机械应力,选择更加轻型、硬度更低的基底材料是未来的发展方向。

3.4 声光偏转技术

声光偏转器件具有体积小、质量轻、驱动功率小、衍射效率高的优点,同时声光偏转技术还具有实时并行处理能力,以及时间带宽大、易于与计算机兼容和进行自动化控制等优点。但也存在以下短板:大部分衍射光为 1 级衍射光,导致声光偏转器件在大角度偏转范围上有着明显不足,偏转精度较低,较难实现对光束的精细调控,分辨率较低,在高速扫描下会出现“啁啾效应”。

通过使用超声跟踪以及单晶多频等方式可以提高有效带宽,从而解决分辨率低的问题,针对“啁啾效应”,在偏转器后外加一个柱面透镜可以消除其影响。目前对入射声波频率的研究很多,并对提高超声波入射下声光偏转器的衍射效率和频率响应性能这一问题进行了不同方法的实验改进,而很少对提高偏转角度这一性能进行分析。未来可考虑通过可控声波矢技术来改变声波入射方向,从而扩大其偏转扫描角度。关于声光偏转器偏转性能的其他指标,包括带宽性能、抗静电能力、热稳定能力,也是目前所关注的研究热点。

3.5 液晶偏转技术

3.5.1 液晶相控阵

LCOPA 具有高功率、低电压驱动等优点,能够实现灵巧、无机械惯性的高精度光束偏转,但其存在响应时间过长、工作谱宽较短等缺点。另外,较小的偏转角也限制了 LCOPA 的应用范围,需要配合角度放大装置来实现更大的偏转角,但受角度放大装置有效孔径、走离角等因素制约,目前角度放大装置很难实现更高的角度放大倍数。同时,液晶相控阵在工作时会存在多级衍射级次,再加上非线性关联效应的影响,导致 LCOPA 的偏转效率降低。

3.5.2 液晶微透镜阵列

与 LCOPA 相比,LCMLA 具有更大的偏转角,并且无光学回程区的影响,偏转效率更高;受液晶材料内的 LC 分子排列变化时间的影响,LCMLA 所需的光程差相较 LCOPA 更小,在厚度方面可以做的更小,因此 LCMLA 比 LCOPA 有着更小的响应时间。但

LCMLA 要实现光束连续偏转扫描,还需要和一些精细角度偏转器件结合使用,增加了应用实现的复杂度,而且 LCMLA 由多层透镜阵列组成,系统的稳定性要比 LCOPA 更差。LCMLA 是通过改变出射光的主级大衍射级来实现光束偏转的,微透镜阵列的空间相干性影响其分辨率,这要求微透镜的尺寸有着极小的误差,是目前亟待解决的一大难题。

3.5.3 液晶偏振光栅

LCPG 未受电场边缘效应的影响,具有分辨率高、可编程控制、轻便灵活、偏转范围大、效率高等优点。相对于前面两种液晶偏转类型,LCPG 具有很多优势,LCPG 只需产生等效半波片的光程差,所需的液晶层厚度更薄,从而使其响应时间更快,同时也没有相位回置造成的光学回程的影响,另外还可以实现宽光谱工作。但单个 LCPG 很难同时实现多角度和大视场的指标要求,而多层级联的 LCPG 对制备工艺以及系统稳定性要求很高。

传统的 LCOPA 轻便灵活,可以实现小角度范围内的精细偏转,系统复杂度较为简单,制备工艺相对成熟,但受到相位回置造成的光学回程区的影响,偏转效率、响应时间等指标存在明显不足,仍需不断提高和发展。LCMLA 与 LCPG 则没有光学回程区的影响,在偏转效率上有着很大提高,但都需要配备精细角度偏转器件来实现光束的准连续偏转扫描,而且在最大偏转角的实现上都使用了多级串联的结构,这就会导致系统尺寸过长,稳定性相对较差。LCPG 相比于 LCOPA 和 LCMLA,除了具有偏转角度大、偏转效率高的特点,还具有宽频谱工作的独特优势,但其只能实现角度间隔较大的光束偏转扫描。

目前,液晶偏转技术在非机械式偏转研究最广,

但在非偏振光条件下,实现大角度、高效率等存在显著局限性,为解决该问题,可对设备架构和材料类型进行思考;在使用液晶偏振光栅器件时,大角度偏转时难以实现连续角度的偏转,这些是未来需要解决的问题。

3.6 电光偏转技术

基于电光晶体的光束偏转器与其他技术相比具有任意偏转角、体积小、响应速度快、灵敏度高等优点,但存在分辨率较低的问题。近年来,国内外报道了具有二次电光效应的电光材料,如铌酸锂、钛酸钡等,相比线性电光效应的晶体,其在响应速度、偏转电压等性能方面更加优越。其中,KTN 晶体最具有代表性,KTN 晶体是现有已知具有最大二次电光效应的晶体,具有介电常数大、介质损耗低、铁电电压电性明显和非线性光学性能优异等突出特点,在光束偏转领域有着非常广泛的应用前景。目前,国外日本 NTT 公司、美国宾夕法尼亚大学,以及国内的哈尔滨工业大学、南开大学以及山东省科学院等对 KTN 晶体的偏转特性做了大量研究。NTT 公司和宾夕法尼亚大学主要研究了基于空间电荷注入的 KTN 晶体光束偏转技术;山东省科学院主要研究了 KTN 晶体的组分梯度诱导的光束偏转技术;哈尔滨工业大学等主要对 KTN 晶体光束偏转器的电极结构、工作温度等工程问题进行了研究。现存在以下问题:在晶体生长的方面难以实现高光学均匀性,难以满足实际应用需求;在居里温度附近应用需要具有精确的温度控制手段;对空间电荷注入机制、居里温度下的极性纳米区,对光束偏转的调控机理等科学问题尚需进一步研究。

为了更直观地展示各偏转技术的优劣,对其进行了比较分析,如表 1 所示。

表 1 光束偏转技术对比

Tab.1 Comparison of beam deflection techniques

Techniques type	Key advantages	Key disadvantages
Scanning galvanometer	High precision (μrad) high speed ($<1\text{ ms}$) high θ ($\sim 50^\circ$)	Easily damage complex fabrication
Fast control mirror	High precision (μrad) high speed ($<1\ \mu\text{s}$)	Complex fabrication optical axis error
MEMS deformable mirror	High precision (μrad) high θ ($\sim 70^\circ$) high resolution	Deformation of stress low speed
Acousto-optic deflection	High speed (μs) high η (almost 100%)	Low θ ($<1\text{ rad}$) low precision
Liquid crystal deflection	For liquid crystal phased array low voltage drive ($<10\text{ V}$) small volume high resolution For polarization grating excellent η (99.5%) high θ ($\sim 40^\circ$)	For liquid crystal phased array precision only at low θ ($<10^\circ$) low response ($\sim\text{ms}$) For polarization grating discrete steering angles
Electro-optic deflection	Single θ ($\sim\text{mrad}$) but cumulative of deflection high response ($<1\ \mu\text{s}$) small volume (mm)	Low resolution strict temperature high voltage drive ($>100\text{ V}$)

4 结束语

文中对非机械式、机械式两大类六种光束偏转技术进行了综述,总结了不同技术的工作原理、国内外研究进展以及发展趋势和性能特点,结论如下:常用的机械式微机电变形镜、快速反射镜和扫描振镜通过机械方式改变发射光轴方向,其精度可达到微弧度量级,偏转角度可达几十弧度,在医学等领域应用前景广泛。但存在结构复杂、体积笨重、能耗高等问题,由于自适应光学系统具有体积大的特点,目前国内外微机电系统变形镜主要应用于成像领域,在光束偏转领域很难满足星载环境对小型化、轻量化的高要求;声光偏转器具较大的工作带宽,但难以满足微弧度量级的偏转精度,且对入射光波长、角度和能量均有较高要求能量损耗较大;液晶相控阵、微透镜阵列等方法功耗小、驱动电压低,但其响应速度慢,非连续角偏转,偏转角度大但大角度时偏转效率低,难以实现大带宽传输的任务需求;基于电光晶体的光束偏转器与其他技术相比具有任意偏转角、体积小、响应速度快、灵敏度高优点,被认为最适合于实现高速光偏转技术的主导方向之一。而在各类电光材料中,基于 KTN 晶体的电光偏转器具有大角度偏转、快响应速度、高偏转效率、高偏转精度、宽带宽工作等优点,在空间光通信等领域应用更有潜力,成为世界各国的研究热点。之后的工作一方面要对 KTN 晶体的生长特性条件进行分析研究,生长出组分均匀、形状规则的高质量晶体;另一方面还要逐渐向 KTN 晶体微观偏转机理方面研究,这具有很重要的现实意义。

参考文献:

- [1] Zheng Yunqiang, Liu Huan, Meng Jiacheng, et al. Development status, trend and key technologies of air-based laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210475. (in Chinese)
- [2] Li Rui, Lin Baojun, Liu Yingchun, et al. Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220393. (in Chinese)
- [3] Chen Fei. Study on high power Nd: YAG laser scanning galvanometer system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] Mincuzzi G, Rebiere A, Lopez J, et al. New, fast, galvo scanner head for high throughput micromachining [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10520: 105200X.
- [5] Mincuzzi G, Rebiere A, Goac B, et al. Beam engineering for high throughput material processing with high power, femtosecond lasers [C]//Proceedings of SPIE, 2019, 10906: 109061B.
- [6] Mincuzzi G, Audouard E, Bourtereau A, et al. Pulse to pulse control for highly precise and efficient micromachining with femtosecond lasers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17209-17218.
- [7] Fan Nana, Wang Mao, Wen Shaocong, et al. Optical design for 2D MEMS-based lidar system [J]. *Optical Technique*, 2020, 46(3): 290-294. (in Chinese)
- [8] Xu Shouzhen, Xie Shimeng, Wu Dan, et al. Ultrasound/photoacoustic dual-modality imaging based on acoustic scanning galvanometer [J]. *Acta Phys Sin*, 2022, 71(5): 050701. (in Chinese)
- [9] Lu Yafei. Research on fast/fine steering mirror system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 21-30. (in Chinese)
- [10] Wu Xin. Research on high-performance fast steering mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 1-19. (in Chinese)
- [11] Loney G C. Design and performance of a small two-axis high-bandwidth steering mirror [C]//Proceedings of SPIE, 1991, 1454: 198-206.
- [12] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [13] Tapos F M, Edinger D J, Hilby T R, et al. High bandwidth fast steering mirror [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5877: 587707.
- [14] Ernst C, Georg S. System design and control of a resonant fast steering mirror for Lissajous-based scanning [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 1963-1972.
- [15] Willstatter L, Mahon R, Ghiorzi J, et al. Characterization of fast-steering mirrors at both high and low temperatures [C]//Proceedings of SPIE, 2020, 11272: 112721K.
- [16] Shao Bing, Sun Lining, Qu Dongsheng, et al. Research on the key technology of ATP system for free space optical communication [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2005, 27(4): 431-433. (in Chinese)
- [17] Xiang Sihua, Chen Sihai, Wu Xin, et al. Laser scanner based on novel piezoelectric actuators [J]. *Infrared and Laser*

- Engineering*, 2010, 39(1): 67-70, 75. (in Chinese)
- [18] Yuan Gang, Wang Daihua, Li Shidong, et al. Piezoelectric fast steering mirror with large excursion angle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2258-2264. (in Chinese)
- [19] Ran Bing, Zhao Dizhi, Wen Lianghua. Research on dynamic stress of piezoelectric fast steering mirror stacked PZT actuator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0523001. (in Chinese)
- [20] Ning Yu. Performance test and application study of a bimorph deformable mirror[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2008: 23-35. (in Chinese)
- [21] Miller L M, Agronin M L, Bartman R K, et al. Fabrication and characterization of a micromachined deformable mirror for adaptive optics applications [C]//Proceedings of SPIE, 1993, 1945: 421-430.
- [22] Krishnamoorthy R, Bifano T G, Vandelli N, et al. Development of microelectromechanical deformable mirrors for phase modulation of light [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(2): 542-548.
- [23] Xie Huikai, Pan Yingtian, Fedder G K. A CMOS-MEMS mirror with curled-hinge comb drives [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 450-457.
- [24] Cornelissen S A, Bierden P A, Bifano T G, et al. 4096-element continuous face-sheet MEMS deformable mirror for high-contrast imaging [J]. *Journal of Micro-nanolithography MEMS and MOEMS*, 2009, 8(3): 031308.
- [25] Bai Yanhui, Yeow J T W, Wilson B C. Design, fabrication, and characteristics of a MEMS micromirror with sidewall electrodes [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(3): 619-631.
- [26] Afrang S, Mobki H, Hassanzadeh M, et al. Design and simulation of a MEMS analog micro-mirror with improved rotation angle [J]. *Microsystem Technologies-Micro and Nanosystems Information Storage and Processing Systems*, 2019, 25(3): 1099-1109.
- [27] Zhuang Xuye, Wang Weimin, Tao Fenggang, et al. Development of non-perpendicular 2D MEMS tilt mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1845-1851. (in Chinese)
- [28] Hu Fangrong, Yao Jun. Microelectromechanical systems deformable mirror actuator based on electrostatic repulsive force [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(1): 41-44. (in Chinese)
- [29] Wang Weimin, Wang Qiang. Development and characterization of a 140-element MEMS deformable mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 104-112. (in Chinese)
- [30] Wang Jian. Research on characteristic of transeceiving systems of intersatellite laser communication based on acousto-optic deflectors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [31] Korpel A. Acousto-Optics [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc, 1997.
- [32] Li Jie. Research on the optimum design of broadband acousto-optic deflector[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016. (in Chinese)
- [33] Antonov S N, Vainer A V, Proklov V V, et al. Extension of the angular scanning range of the acousto-optic deflector with a two-element phased-array piezoelectric transducer [J]. *Technical Physics*, 2013, 58(9): 1346-1351.
- [34] Antonov S N. Acousto-optic deflector of depolarized laser radiation [J]. *Technical Physics*, 2016, 61(1): 134-137.
- [35] Antonov S N. Acousto-optic deflector with a high diffraction efficiency and wide angular scanning range [J]. *Acoustical Physics*, 2018, 64(4): 432-436.
- [36] Antonov S N, Rezvov Y G. An Acousto-optical deflector based on paratellurite: increasing the thermal stability of parameters [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, 64(5): 729-733.
- [37] Peled I, Kaminsky R, Kotler Z. Acousto-optics bandwidth broadening in a Bragg cell based on arbitrary synthesized signal methods [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5065-5073.
- [38] Li Gongyu, Liu Dali. Study of chirp acoustooptic surface wave transducer [J]. *Journal of Changchun Post and Telecommunication Institute*, 2000, 18(1): 23-27. (in Chinese)
- [39] He Xiaoliang, Liu Wei, Zhou Jianguo, et al. Application of high-resolution acoustooptic deflector on spectrum analysis [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(5): 16-17, 28. (in Chinese)
- [40] Yu Kuanxin, Mi Yinmei, Suo Meng. Optimal design of TeO₂ ultrasonic beam steering anisotropic acousto-optic deflector [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2007, 29(5): 510-512, 529. (in Chinese)
- [41] Zhang Zehong, Lu Chuan, He Xiaoliang, et al. Study on acousto-optic deflector based on gallium phosphide [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(5): 694-697. (in Chinese)
- [42] Zhang Zehong, He Xiaoliang. Abnormal acousto-optic

- deflector with large-bandwidth [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2016, 38(6): 837-839. (in Chinese)
- [43] Xia Qian, Chen Qinghua, Zhang Zehong, et al. Study on antistatic of high frequency acousto-optic deflector [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2021, 43(1): 51-53, 58. (in Chinese)
- [44] McManamon P F. An overview of optical phased array technology and status [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 594701.
- [45] Mcmanamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, et al. Optical phased array technology [J]. *Proc of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [46] Sharp R C, Resler D P, Hobbs D S, et al. Electrically tunable liquid-crystal wave plate in the infrared [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(1): 87-89.
- [47] Engstrom D, O'Callaghan M J, Walker C, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [48] Peng F, Lee Y H, Luo Z, et al. Low voltage blue phase liquid crystal for spatial light modulators [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 5097-5100.
- [49] Li S Q, Xu X W, Veetil R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [50] Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying, et al. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1497-1502. (in Chinese)
- [51] Sun Yangdong. Research and application of phased array laser radar wave control technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [52] Wang X, Wu L, Xiong C, et al. Agile laser beam deflection with high steering precision and angular resolution using liquid crystal optical phased array [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, 17(1): 26-28.
- [53] Mcmanamon P F. Agile Nonmechanical beam steering [J]. *Optical Photonics News*, 2006, 17(3): 24-29.
- [54] Goltsov W C, Holz M. Agile beam steering using binary optics microlens arrays [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1392-1397.
- [55] Watson E A, Whitaker W E, Brewer C D, et al. Implementing optical phased array beam steering with cascaded microlens arrays [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 2002: 1429-1436.
- [56] Shi Lei, Shi Jianru, Memanamon 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.
- [57] Li Liwei, Bryant D, Bos P J. Liquid crystal lens with concentric electrodes and inter-electrode resistors [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2014, 2(2): 130-154.
- [58] Beeckman J, Yang T-H, Nys I, et al. Multi-electrode tunable liquid crystal lenses with one lithography step [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 271-274.
- [59] 周崇喜, 谢伟民, 董小春, 等. 非等焦距微透镜阵列对二维激光扫描优化设计研究 [C]//第十一届全国电子束、离子束、光子束学术年会论文集. 中国电子学会, 2001: 178-181.
- [60] Dong Shan. Research on beam steering with microlens arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007. (in Chinese)
- [61] Xie Hongbo, Wang Yao, Mao Chensheng, et al. Micro-lens array for integrative transmitting and receiving continuous scanning [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 613-618. (in Chinese)
- [62] Chen Mingce, Li Zheng, Shao Qi, et al. A new type of liquid-crystal cylindrical microlens arrays with nonuniform microcoil electrodes [C]//Proceedings of SPIE, 2019, 10941: 109410U.
- [63] Li Rui, Chu Fan, Dou Hu, et al. Double-layer liquid crystal lens array with composited dielectric layer [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 248-254.
- [64] Yang Xu, Geng Chao, Li Xiaoyang, et al. Review of microlens array optical phased array beam scanning technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(8): 69-79. (in Chinese)
- [65] Oh C, Kim J, Muth J M, et al. A new beam steering concept: Risley gratings [C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7466: 74660J.
- [66] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7093: 709302.
- [67] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7816: 78160G.
- [68] Kim J, Miskiewicz M N, Serati S, et al. Demonstration of large-angle non-mechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8052: 80520T.
- [69] 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): 2086-2077.
- [70] Serati S, Hoy C L, Hosting L, et al. Large-aperture, wide-angle nonmechanical beam steering using polarization gratings [J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(3): 031211.
- [71] Xiang X, Kim J, Escuti M J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 467-475.
- [72] Huang Shuaijia. The beam steering applications of polymer network liquid crystal devices[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [73] 王启东, 穆全全, 刘永刚, 等. 一种混合排列型双频液晶偏振光栅: CN108594540A[P]. 2018-09-28.
- [74] 王启东, 陈万, 穆全全, 等. 一种双周期复合液晶偏振光栅: CN110646992A[P]. 2020-01-03.
- [75] Li Songzhen. Design of liquid crystal polarization-n grating and study of its beam deflector characteristics[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [76] Liu Bing, Wang Xuping, Yang Yuguang, et al. Principles, devices, and applications of beam deflection based on quadratic electro-optic effect of potassium tantalate niobate [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071609. (in Chinese)
- [77] Xu Guochang. The characteristics and design of the electro-optic deflector with quadrupole electrodes [J]. *Journal of Southeast University*, 1992, 22(6): 13-17. (in Chinese)
- [78] Ai Yuexia, Li Jingzhen, Gong Xiangdong. Studies on electro-optic deflector with hypersurface electrode structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 33-36. (in Chinese)
- [79] Nakamura K, Miyazu J, Sasaura M, et al. Wide-angle, low-voltage electro-optic beam deflection based on space-charge-controlled mode of electrical conduction in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(13): 131115.
- [80] Nakamura K, Miyazu J, Sasaki Y, et al. Space-charge-controlled electro-optic effect: Optical beam deflection by electro-optic effect and space-charge-controlled electrical conduction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(1): 013105.
- [81] Miyazu J, Imai T, Toyoda S, et al. New beam scanning model for high-speed operation using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(11): 111501.
- [82] Nakamura K, Miyazu J, Shogo Y. High-resolution KTN optical beam scanner [J]. *NTT Technical Review*, 2009, 7(12): 1-6.
- [83] Sasaki Y, Okabe Y, Ueno M, et al. Resolution enhancement of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ electro-optic deflector by optical beam shaping [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(10): 102201.
- [84] Imai T, Miyazu J, Kobayashi J. Charge distributions in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ optical beam deflectors formed by voltage application [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14114-14126.
- [85] Sasaki Y, Toyoda S, Sakamoto T, et al. Electro-optic KTN deflector stabilized with 405 nm light irradiation for wavelength-swept light source [C]//Proceedings of SPIE, 2017, 10100: 101000H.
- [86] Tatsumi S, Imai T, Yamaguchi J. Reduction of ambient temperature dependence of $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ electro-optic deflector by double-thermistor structure [J]. *Precision Engineering*, 2019, 59(1): 150-155.
- [87] Chao J H, Zhu W B, Wang C, et al. Nanosecond speed pre-injected space charge controlled KTN beam deflector [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9586: 95860T.
- [88] Zhu W, Chao J H, Chen C J, et al. Photon excitation enabled large aperture space-charge-controlled potassium tantalate niobate (KTN) beam deflector [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(13): 132901.
- [89] Kawamura S, Imai T, Miyazu J, et al. 2.5-fold increase in lens power of a KTN varifocal lens by employing an octagonal structure [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 4197-4201.
- [90] Chen C J, Chao J H, Lee Y G, et al. Enhanced electro-optic beam deflection of relaxor ferroelectric KTN crystals by electric-field-induced high permittivity [J]. *Optical Letters*, 2019, 44(22): 5557-5560.
- [91] Zhang J W, Du X P, Zhao J G, et al. Discrete electro-optic effect induced by multiscale nanoresonators [J]. *Optical Materials*, 2022, 127: 112271.
- [92] Chen C J, Chao J H, Lee Y G, et al. Analysis on the electric field distribution in a relaxor ferroelectric KTN crystal near field-induced phase transition using optical deflection measurements [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31034-31042.
- [93] Chen C J, Shang A N, Lee Y G, et al. Anomalous bi-directional scanning electro-optic KTN devices with UV-assisted electron and hole injections [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 5360-5363.
- [94] Lee Y G, Chen C J, Shang A N, et al. Enhanced c-axis KTN beam deflector by compensating compositional gradient effect with a thermal gradient [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(2): 665-671.
- [95] Tang Y J, Wang J Y, Wang X P, et al. KTN-based electro-optic beam scanner [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7135: 713538.
- [96] Wang X P, Liu B, Yang Y G, et al. Anomalous laser deflection

- phenomenon based on the interaction of electro-optic and graded refractivity effects in Cu-doped $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 051910.
- [97] Wang Shuang. The applied research of the temperature controlled light beam deflection based on lithium niobate crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [98] Tian F, Lu H, Sui Z, et al. Electro-optic deflection in a lithium niobate quasi-single mode waveguide with microstructured electrodes [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30100-30107.
- [99] Ma Xiangguo. Study on the theory and experiment of optical programmable electronically controlled beam deflection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [100] Xing Bohan. Study on controllable frequency doubling modulation and deflection properties of lithium niobate crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)

Research status and trend analysis of beam deflection technology based on space laser communication

Li Fuhao, Zhao Jiguang, Du Xiaoping, Zhang Jianwei, Duan Yongsheng*, Chen Pan

(Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract:

Significance Space laser communication has the advantages of large capacity, high bandwidth, strong confidentiality and great anti-electromagnetic interference ability. It is widely used in the field of space communication. Laser communication is one of the important ways to realize large capacity secure communication between space and earth, starry sky, interspace, air and sea, air and air links. It has become a research hotspot for realizing space communication links at present. The fast and stable space laser communication needs to be based on high performance ATP (Acquisition, Tracking and Pointing) technology. In order to achieve the purpose of optical signal acquisition, the working direction of the transmitter and receiver needs to be changed. However, due to orbit and energy constraints, space targets and spacecraft cannot change their attitude and position at will. The application of beam deflection technology can solve this problem well.

Progress In the study, the research progress of 6 types of beam deflection technologies, mechanical and non-mechanical, is systematically summarized. According to the deflection characteristics of different technologies, the characteristics of each type of beam deflection technology are compared and analyzed from the aspect of key performance index. Table 1 is used to visually compare and analyze the key index that affect the deflection performance. In addition, the research progress of electro-optical deflection technology in recent years is analyzed. KTN (Potassium Tantalate Niobate) electro-optical crystal has good quadratic electro-optic effects and can achieve better deflection performance compared with other deflection technologies. By following up the progress of major research institutions at home and abroad, such as, NTT (Nippon Telegraph and Telephone) in Japan, University of Pennsylvania in the United States, Shandong Academy of Sciences, Harbin Institute of Technology, Nankai University, etc., sorted out their own research context of the main line, summed up and analyzed the problems to be solved. Then, the development trend and prospect are presented from the perspective of space application performance requirements.

Conclusions and Prospects Comparing various beam deflection technologies, it is found that mechanical beam deflection technology has a large deflection Angle, but it is difficult to meet the high requirements of miniaturization and lightweight for space laser communication in spaceborne environment due to its complex structure, large volume, high energy consumption and easy wear. In the non-mechanical deflection technology,

the acoustic and optical deflection technology has high deflection efficiency, but it has a strong dependence on the incident wavelength and angle of the beam. The liquid crystal deflection technology has low power consumption and large deflection angle, but the response speed is slow, and it is difficult to meet the task requirements of large-bandwidth transmission. The beam deflection device based on electro-optical crystal has the advantages of continuous deflection angle, fast response speed and high sensitivity. It is considered to be one of the leading directions for realizing high-speed optical deflection technology. Among all kinds of electro-optical materials, the electro-optical deflection device based on KTN crystals have many advantages, such as large angle deflection, fast response speed, high deflection efficiency and deflection accuracy, and wide bandwidth operation, etc., which have more potential applications in space laser communication and other fields. However, there are still some shortcomings: 1) The uniformity of the components in KTN crystal is a major factor affecting the deflection performance. At present, the preparation of KTN crystal with uniform components cannot be realized. 2) The regulation mechanism of beam deflection by polar nanoregions in KTN crystals near Curie temperature is not clear yet and needs further study. In the future work, on the one hand, the crystal growth method can be studied, and KTN crystals can be grown according to the growth law of other crystals. On the other hand, the microscopic deflection mechanism of KTN crystals should be gradually studied to find the internal causes affecting the beam deflection performance.

Key words: beam deflection technique; electro-optic deflection; KTN crystal;
space laser communication