

文章编号 1004-924X(2025)24-3785-29

光学相控阵技术研究现状及展望

白晨旭¹, 李 拓², 朱科建², 严 巍^{1*}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院&苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;

2. 山东云海国创云计算装备产业创新中心有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 光学相控阵技术基于相干合成原理, 可实现自由空间光束的高精度指向和快速偏转。其无需机械部件, 在自由空间通信、激光测距传感、激光雷达等领域具有广泛应用潜力, 尤其在无人驾驶和军事领域优势明显。本文综述了光学相控阵技术的研究现状, 探讨了液晶相控阵、光纤相控阵、基于电光材料的光学相控阵以及基于高折射率对比度集成光波导的光学相控阵等四种主要技术路线。文章综合比较了各类光学相控阵技术的优劣, 分析了其在不同应用场景中的优势与挑战, 并对未来发展方向进行了前瞻性展望。整体而言, 光学相控阵技术正朝着高响应速度、低功耗、大扫描角度、小体积和高集成度的方向发展, 有望在激光雷达、成像、自由空间通信等领域实现更广泛的应用。

关键词: 光学相控阵; 液晶; 光纤; 电光材料; 集成光波导

中图分类号: O439; TN256 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253324. 3785

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253324. 3785

Research status and prospects of optical phased array technology

BAI Chenxu¹, LI Tuo², ZHU Kejian², YAN Wei^{1*}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Shandong Yunhai Guochuang Innovative Technology Co., Ltd., Jinan 250013, China)

* Corresponding author, E-mail: weiyao085@suda.edu.cn

Abstract: Optical phased array technology is based on the principle of coherent synthesis, enabling high-precision pointing and rapid deflection of free-space beams. It does not require mechanical components and has broad application potential in fields such as free-space communication, laser ranging sensors, and LiDAR, particularly showing clear advantages in unmanned driving and military applications. This article reviews the current research status of optical phased array technology, exploring four main technical routes: liquid crystal phased arrays, fiber optic phased arrays, optical phased arrays based on electro-optic materials, and optical phased arrays using high-refractive-index contrast integrated optical waveguides. The article comprehensively compares the advantages and disadvantages of various optical phased array technologies, analyzes their strengths and challenges in different application scenarios, and offers a forward-looking perspective on future development directions. Overall, optical phased array technology is progressing towards faster response times, lower power consumption, larger scanning angles, smaller vol-

收稿日期: 2025-09-08; 修订日期: 2025-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62505205); 中国博士后科学基金(No. 2024M762284)

umes, and higher integration, promising broader applications in fields such as LiDAR, imaging, and free-space communication.

Key words: optical phased array; liquid crystal; fiber; electro-optical materials; integrated optical waveguides

1 引言

光学相控阵技术是一种通过相位调制和相干合成原理,控制自由空间发射光束转向的技术^[1-3]。该技术无需改变或调整任何机械部件,同时能够获得较大的扫描范围、精确的扫描精度以及超快的响应速度,使其成为实现自由空间通信^[4]、激光测距传感^[5-6]以及激光雷达^[7-8]等应用的理想手段。

光学相控阵通常使用功率分配器将激光源的输出光分成若干个分支,然后将每个分支中的光波馈入可调移相器中。最后,由特定的光学天线将这些经过相位调制的若干束光波发射至自由空间。由于相位关系,这些光束在远场中干涉,便形成了阵列的远场模式。此时通过调节各光束间的相对相位,使整个阵列的相位梯度发生连续改变,便可达到波束连续扫描的效果。

在激光雷达应用方面,传统的机械转镜式光束转向系统通常会受到机械系统稳定性的限制^[9]。特定的光束投射方向通常需要十分精确的控制,且光束的扫描往往要求极高的频率和响应速度,而机械转镜式扫描系统存在系统复杂、扫描速度慢、体积和质量大等问题。作为无人驾驶技术中极为重要的一环,传统的机械式的激光雷达已经难以满足各类指标要求。

除了在上述民用领域的应用,光学相控阵在军事领域也具有巨大的应用前景。例如,为了实现快速追踪以及精确打击,机载激光雷达能够有效克服传统机械雷达扫描速度慢、精确率低等问题。除此以外,激光雷达还有望满足弹药智能化发展需求,进一步支撑小尺寸、低成本的小型轻质弹药的引信技术发展。

基于以上背景需求,光学相控阵技术被提出并获得了快速发展。相比于机械的光束控制系统,除了关键性能指标,光学相控阵系统无论在体积还是成本方面都有巨大的优势。Meyer等人于1971年便研制出了基于块状钽酸锂材料移相器的一维光学相控阵^[10]。Ninomiya等人不久

后实现了基于铌酸锂电光棱镜偏转器的一维光学相控阵,实现了光束的连续偏转^[11]。

为了进一步提高光学相控阵的性能,人们在扫描范围、扫描精度、响应速度及器件功耗等方面做出了许多研究探索。近年来,固态光学相控阵技术的研究主要包括四类技术路线,分别是液晶相控阵技术^[12]、光纤相控阵技术^[13]、基于电光材料的光学相控阵技术^[14]以及基于高折射率对比度的集成光波导光学相控阵技术^[15]。其中液晶相控阵具有较高的扫描精度,光纤相控阵以及电光材料相控阵具备较快的响应速度。而基于高折射率对比度的集成光波导相控阵则可同时具备较大的扫描角度和较高扫描速度,并能够使光学相控阵系统进一步向小型化和集成化的方向发展。

本文第2~5节分别介绍了上述四类光学相控阵技术的研究现状,并对各类技术国内外的相关研究进行了比较。最后通过对比上述光学相控阵,对各类技术的优缺点进行了总结和展望。

2 液晶相控阵技术

液晶光学相控阵(Liquid Crystal Optical Phase Array, LCOPA)因其低能耗,低成本,轻质量等优势而被广泛使用。在一维液晶光学相控阵中,液晶层由窄电极阵列进行寻址操作,故可将空间周期性的电压施加到电极上,以产生空间变化的相位延迟。

Wang等人指出了宽扫描范围和精细的扫描精度是液晶光学相控阵的两个冲突要求^[16],在此基础上该研究提出了一种改进的液晶设备,能够同时具备精细的波束扫描精度,并且不会影响扫描范围。该设计为一种全面的游标光学相控阵,可以在大角度范围内精细地控制光束。如图1(a),图1(b)所示,与传统的液晶光学相控阵相比,其公共电极被修改为由其两端的两个不同信号驱动,以实现可编程的光学相位调制。该液晶

光学相控阵的扫描精度可达 $2\ \mu\text{rad}$, 如图 1(c) 所示。

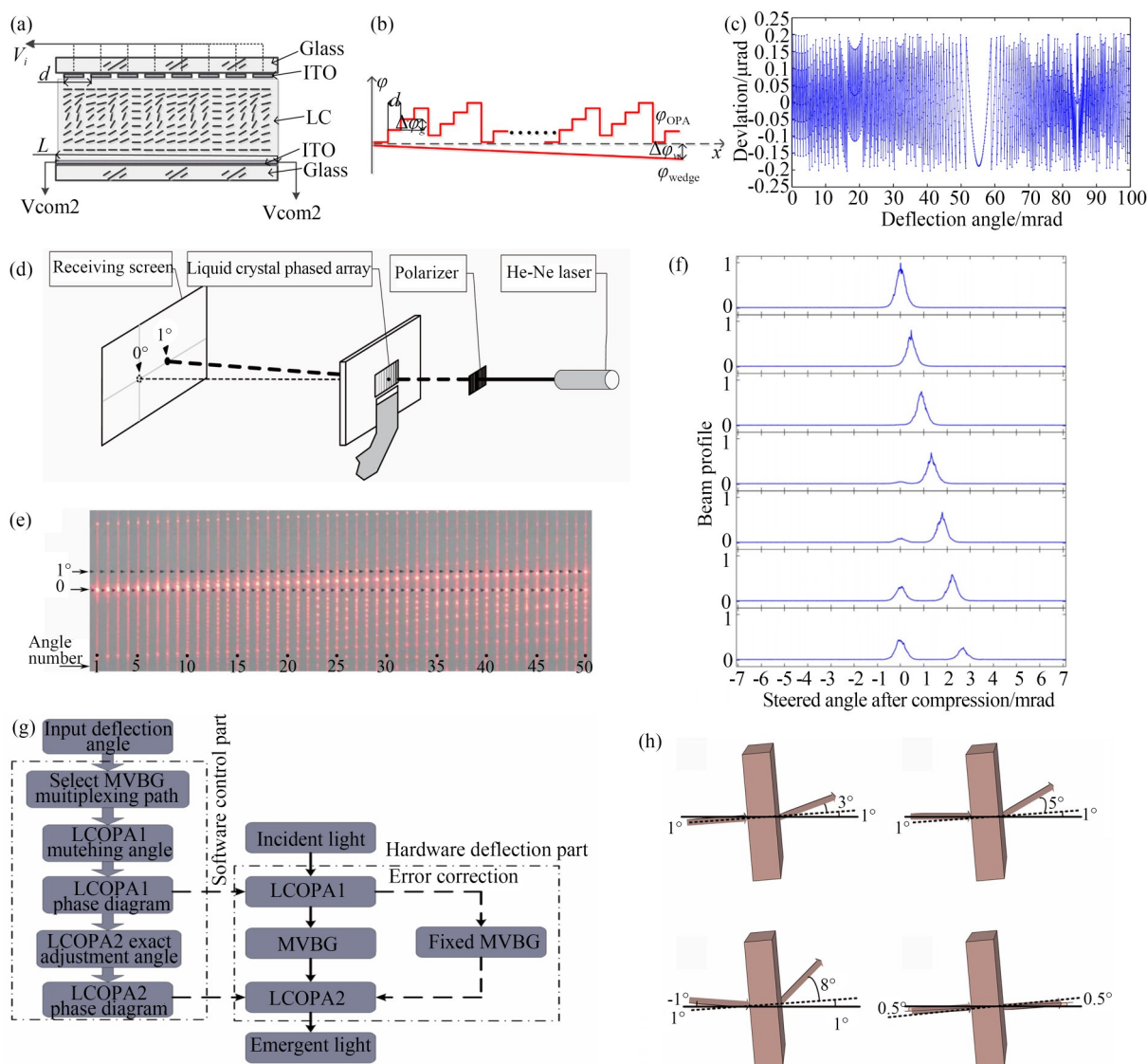
在提升液晶光学相控阵扫描精度方面, Kong 等人提出了一种二元光栅波控模型, 用以精确控制 LCOPA 组件的光束扫描^[17]。仿真结果表明, 该方法可实现偏差在 0.05° 以内的光束偏转。目前, 多数液晶相控阵通过改变光栅周期或闪耀级次来产生不同的衍射角度, 进而实现光束扫描。

基于此, 该研究组进一步从相控阵理论出发, 提出了一种基于非周期性闪耀光栅的波控方法^[18]。光束偏转实验证实, 该方法在衍射角控制方面表现更优, 能使液晶相控阵的衍射角均匀分布, 从而在整个视场范围内实现光波束的连续

扫描。

如图 1(d), 图 1(e) 所示, 基于非周期闪耀光栅的波控方法能够在 $0^\circ \sim 1^\circ$ 范围内, 良好地实现 50 个衍射角度的均匀扫描。实验中采用单片液晶相控阵, 其电极宽度与间距均为 $5\ \mu\text{m}$, 共有 720 个可控电极, 可在 2π 范围内完成相位延迟。在 $635\ \text{nm}$ 激光波长下, 测试结果显示该相控阵的最大扫描角度可达 $\pm 1.8194^\circ$ 。

除此之外, Qin 等演示了基于液晶光学相控阵的光束转向装置^[19], 该装置具有双角度配置, 可增强液晶光学相控阵的相应角分辨率, 因此具有高角度分辨率和低光束发散度。通过引入两个具有特殊夹角的非平行闪耀光栅使入射光实现了多次衍射, 从而实现角压缩。该数值模拟结



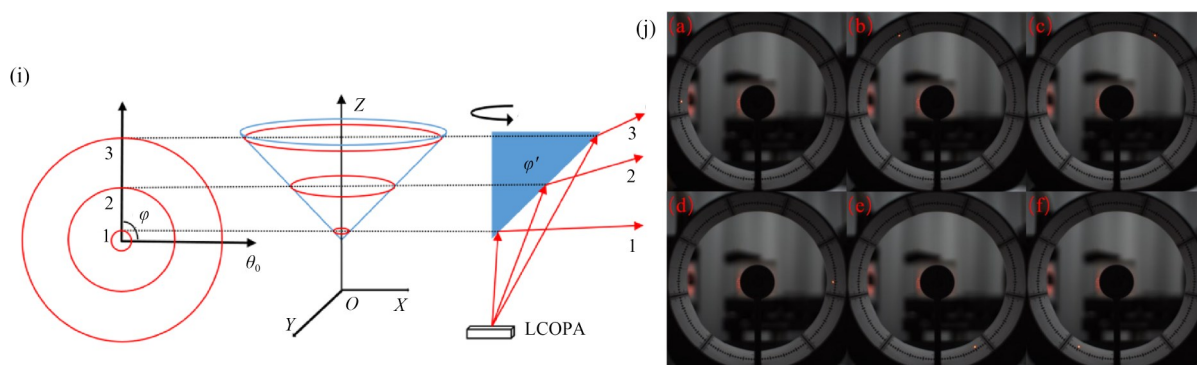


图 1 (a)游标光学相控阵概念图;(b)游标光学相控阵的相位延迟分布;(c)在 0~100 mrad 扫描范围内的角度偏转;(d)基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控装置图;(e)在 0°~1°的扫描范围内 50 个不同衍射角度下的衍射图样;(f)不同偏转角度在水平方向上的归一化功率分布;(g)二维大角度光束偏转系统工作流程图,MVBG:复用体布拉格光栅;(h)角度偏转示意图;(i)圆形扫描沿径向转换为全向扫描, θ_0 :主瓣的转向角, ϕ :光束主瓣的投影与 x 轴的夹角 ϕ' :射出光束投影与 x' 轴之间的夹角;(j)径向全向无混叠扫描,分别对应 0, 60°, 120°, 180°, 240°, 300°

Fig. 1 (a)Conceptual diagram of the vernier optical phased array (OPA). (b)Phase delay distribution of the vernier OPA. (c)Angular deflection in the scanning range of 0-100 mrad. (d)Diagram of the liquid crystal phased array wave control device based on an aperiodic blazed grating. (e)Diffraction patterns at 50 different diffraction angles in the scanning range of 0°-1°. (f)Normalized power distribution at different deflection angles in the horizontal direction. (g)Schematic diagram of the working process for the two-dimensional large-angle beam steering system, MVBG: Multiplexed Volume Bragg Grating. (h)Schematic diagram of angular deflection. (i)Circular scanning transforms into omnidirectional scanning along the radial direction, θ_0 :Steering angle of the main lobe, ϕ :Angle between the projection of the main lobe and the x -axis, ϕ' :Angle between the projection of the outgoing beam and the x' -axis. (j)Omnidirectional aliasing-free scanning in the radial direction corresponds to 0, 60°, 120°, 180°, 240°, 300°

果表明,通过选择合适的光栅常数和双光栅的夹角可以优化角压缩比。进一步的,该实验结果验证了入射光的转向角可以被压缩,从而使转向光束的角分辨率提高六倍以上,使扫描角精度控制在 10 μrad 以下,如图 1(f)所示,且在双光栅配置中光束衍射四次的转向效率为 80%。

为了提高液晶光学相控阵角度分辨率并兼顾其扫描范围,Wang 等人提出了一种改进的周期相位控制方法,实现了角度分辨率约为 20 μrad 的光束偏转,且精度为 5 μrad ^[20]。该研究另外提出一种子孔径相干方法,理论结果显示其可以实现小于 5 μrad 的角度扫描精度。Wu 等通过采用两个偏振相关的一维液晶光学相控阵^[21],提出了一种偏振无关的非机械激光束控制方案,以实现高效的连续二维扫描。这两个一维设备分别在正交方位角转向状态下进行正交工作。实验测得该相控阵的扫描角度偏差小于 5 μrad ,成功地以高转向精度调制了非极化入射的激光光束。

为了进一步分析影响液晶相控阵扫描精度

的因素,Wang 等依据液晶相控阵波控方式的基本原理,针对激光真空波长,电极周期以及相邻电极的间隔这三种典型的影响因素进行了理论仿真分析^[22]。实验采用自行研制的液晶光学相控阵系统,并结合质心法提取光斑质心,进而获取光束偏转角度。该系统可达到 $\pm 3^\circ$ 的波束扫描,且该液晶光学相控阵的精度优于 2 μrad 。

针对液晶光学相控阵的扫描范围,Yan 等人则以液晶相控阵和多路复用体全息光栅为控件,设计了可用于多目标指示的大角度激光光束偏转控制系统^[23],如图 1(g)所示,该设计通过对液晶光学相控阵施加倾斜线性相位改变激光光波的波前相位使波前产生特定倾斜,从而改变光束的传输方向。理论计算表明该系统可对最大偏转角为 15.63°的光束实现二维准连续、可编程控制的偏转,即当指示平台高度为 2 000 m 时,可对地面上在对角线长度为 600 m 的正方形内的多目标进行准连续、准同时照射指示,且经过误差修正,误差可控制在 0.66 m 的范围内,且实现最大偏转 8°,如图 1(h)所示。

Wu 等人则在液晶光学相控阵器件的基础上提出了改进的高阶光栅方法^[24],并成功验证了用于单个液晶光学相控阵上的广角光束转向的改进型高阶光栅的方法。该研究制备了具有约 12.78 rad 的相位延迟深度的一维透射装置。实验结果表明,通过使用改进型高阶光栅的方法,该液晶光学相控阵的性能在转向范围和转向效率上均得到了改善。不同于传统的 2π 模态相位复位,该研究使用 4π 模态方法使扫描范围加倍,扫描角度范围达到了 $0^\circ \sim 0.3^\circ$ 。

Cao 等人针对液晶光学相控阵(LCOPA)有限的扫描视场问题,将主动电控的二维液晶光学相控阵与被动静态的锥形镜有机结合^[25]。在实验中,他们采用波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器和元件间距为 8 μm 的 LCOPA,将 LCOPA 固有的最大偏转角从仅约 2.26° ,通过锥形镜的几何光学变换,成功拓展到了 $360^\circ \times 1.1^\circ$ 的全方位扫描视场。该系统的扫描精度在径向旋转角误差小于 0.2° 、轴向转向角误差小于 0.03° (通过内壁带有精密刻度的圆柱形屏幕测量验证)。同时,通过精确的光路设计严格控制 LCOPA 与锥形镜底面的距离,物理过滤了高阶光栅瓣,从而实现了无混叠扫描,显著提高了扫描纯度和能量利用率。整个系统无任何机械运动部件,构成了一种全固态、无混叠的扫描解决方案。

通过级联一个或多个 LCOPA,或者级联一些其他器件,例如光热诱导折射体布拉格光栅、电双折射棱镜和液晶偏振光栅,可以有效地提高 LCOPA 的质量。Wang 等人利用级联相位和振幅的方法级联两个 LCOPA 来生成任意的多光束^[26],如图 2(a)所示,系统由两个相同的投射式 LCOPA 和中间的 4-f 系统组成,两个 LCOPA 精确的对齐以逐像素的对光场相位和振幅进行调制,中间的 4-f 系统由两个消色差透镜组成,它们的作用是将光场 OPA-A 中继到 OPA-P。如图 2(b)所示,实验结果清楚地表明了快速多光束形成的能力,具有高效率($>85\%$, 4 束)和高精度(偏差 $<90 \mu\text{rad}$)。

该团队又级联了多个 LC 移相器,提出了一种液晶堆叠光学相控阵^[27],用以快速且精确的波束扫描。如图 2(c)所示,该系统由多个 LC 切片移相器组成,每个切片由两部分组成(红色部分

和蓝色部分,彩图见期刊电子版),其中通过光刻技术在 ITO 层中间形成间隙,以在两侧加入驱动电压 u_l 和 u_r 。实测该器件转向效率在 $-100 \sim 100 \mu\text{rad}$ (步长为 $10 \mu\text{rad}$) 范围内超过 90% ,如图 2(d)所示。角度切换时间均小于 10 ms,最低切换时间为 1.52 ms。

同时,如上文所述,Qin 等演示了基于液晶光学相控阵的光束转向装置^[19],在配有 LCOPA 的系统中加入了两个非平行的闪耀光栅,如图 2(e),图 2(f)所示,当光束在双光栅配置中反复衍射后,衍射角可以相应地被压缩,从而可以在较小的转向范围内实现较高的角度分辨率。实验表明角度分辨率可以提高六倍以上,并且在双光栅中光束衍射四次的转向效率为 80% 。

现有研究表明,液晶光学相控阵(LCOPA)的响应速度通常较慢。为实现激光通信系统中光束偏转所需的高响应速度,实时获取目标信息至关重要。针对这一问题,Jiang 等人对液晶光学相控阵中光束扫描的动态响应特性展开了研究^[28]。该研究通过建立 LCOPA 动态过程模型,分析了动态响应过程中的远场特性。如图 3(a),图 3(b)所示,在电场作用下,液晶分子的指向矢倾斜角 ϕ 随电压变化而发生改变。随着电压升高,液晶分子由初始水平排列状态逐渐转向垂直排列,导致其有效折射率产生变化,进而引起入射光相位延迟。这一机制构成了液晶光学相控阵实现动态相位调控的基础原理。

图 3(c),图 3(d)进一步表明,研究发现在响应过程的中间阶段会出现非线性相位变化,该现象会引发初级衍射级次的能量轻微损失及二次衍射,从而降低系统性能。理论分析指出,在液晶分子初始响应阶段施加较低电压,有助于分子更容易克服能量势垒,更快达到稳定取向。该方式有效抑制了初始阶段的非线性变化,从而缩短整体响应时间。在远场衍射方面,初始响应阶段的主瓣强度逐渐减弱,而在最终响应阶段主瓣逐渐增强。研究还观察到,系统的早期响应速度明显快于后期。通过精准调控相位变化,可实现远场衍射特性的有效优化。

同时针对入射角度对 LCOPA 性能的影响,Luo 等人做了研究^[29],如图 3(e)所示,当 LCOPA 级联液晶偏振光栅是可以有效地提高扫描效率

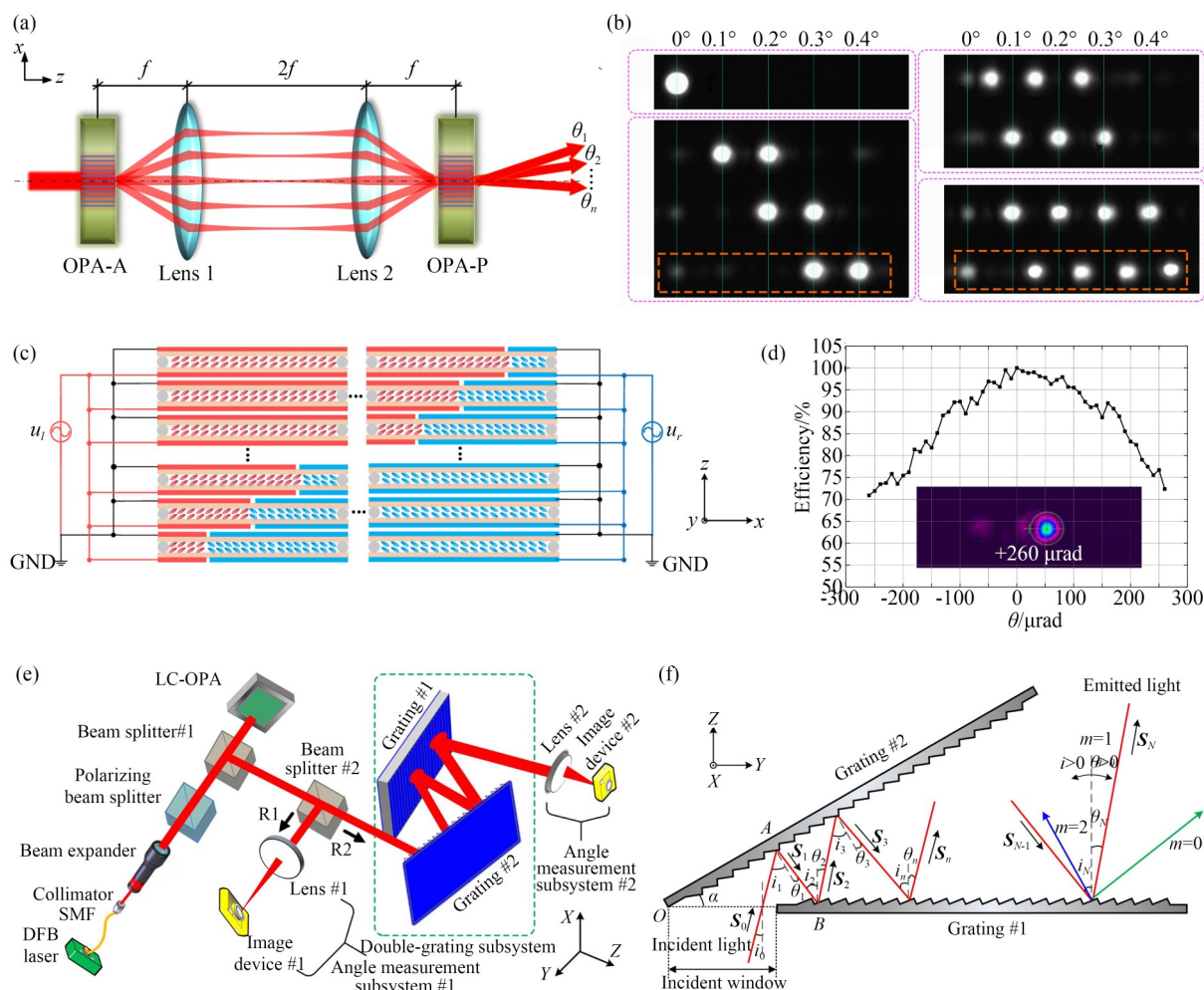


图2 (a) CAP方法形成多光束的原理示意图,CAP:级联幅度和相位;(b)多光束生成的实验光斑图案,对应单光束,双光束,三光束,四光束形成;(c)可堆叠光学相控阵(SOPA)的二维结构示意图;(d) SOPA光束偏转效率曲线,当偏转角在 $\pm 260 \mu\text{rad}$ 时,偏转效率降低到70%左右;(e) 双光栅配置结合传统液晶相控阵(LC-OPA)的实验系统示意图,DFB Laser:分布式反馈激光器,SMF:单模光纤;(f) 双光栅角度压缩原理示意图

Fig. 2 (a) Schematic of the CAP method for multiple beam formation, CAP:cascaded amplitude and phase. (b) Experimental multi-beam patterns, corresponding to single-beam forming, two-beam forming, three-beam forming and four-beam forming. (c) 2D schematic of the stackable optical phased array (SOPA) device. (d) SOPA steering efficiency curve, the steering efficiency decreases to about 70% when the deflection angle is $\pm 260 \mu\text{rad}$. (e) Experimental setup schematic using a double-grating configuration with a conventional LC-OPA, DFB Laser:Distributed Feedback Laser, SMF:Single Mode Fiber. (f) Operating principle of angular compression using a double-grating configuration

和扫描范围,而斜入射相对于正入射来说,扫描范围会大打折扣,尤其是针对大角度斜入射。研究者们利用拓展矩阵理论和传播串扰进行了数值计算,说明了斜入射带来的影响,证明了此系统中LCPG的作用类似于感应振幅光栅,其转向效率与入射角的正弦值和液晶层的厚度乘积成正比,并以此优化了系统的转向效率,如图3(f)所示。

面向3D成像,Tang等人提出了一种基于液晶光学相控阵(LCOPA)的类视网膜大范围扫描技术^[30]。尽管LCOPA在光束控制上具有灵活性,但其在3D成像应用中仍面临诸多挑战:受限制造工艺,其扫描范围通常较窄;由于液晶材料固有的响应速度,导致扫描效率低下;此外,其像素化孔径结构会引入不受欢迎的零级光束,最终劣化成像质量。

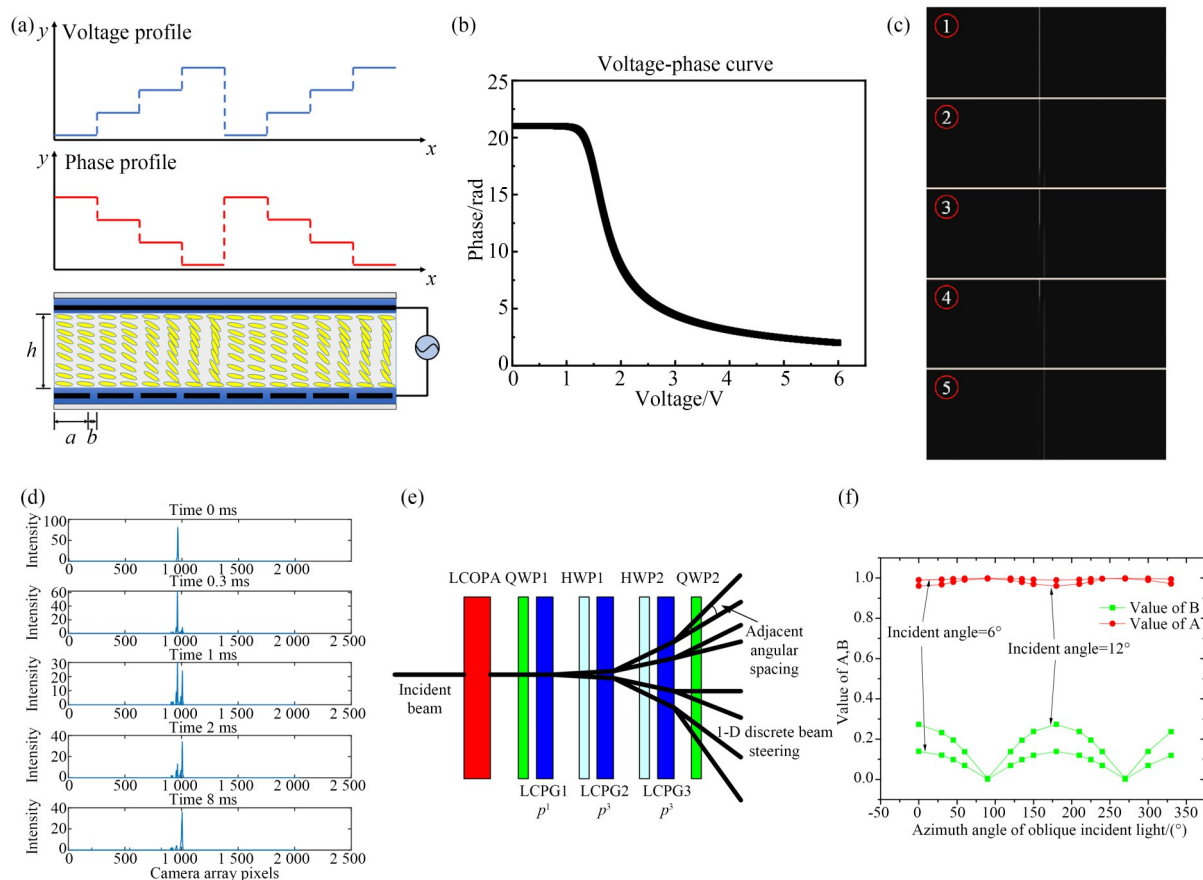


图3 (a) 液晶光学相控阵结构及其相位控制示意图;(b) 电压-相位特性曲线;(c) 光束偏转相机的图像采集;(d) 偏转过程中不同时间的实际远场衍射;(e) 液晶光学相控阵级联多个液晶偏振光栅的系统概念图,QWP:四分之一波片,HWP:半波片,LCPG:液晶偏振光栅;(f) 面外入射角度对于偏转效率有关的拟合A,B值的影响

Fig. 3 (a) Schematic diagram of liquid crystal optical phased array structure and its phase control. (b) Voltage-phase characteristic curve. (c) Image acquisition of beam deflection camera. (d) Actual far-field diffraction at different times during the deflection process. (e) System conceptual diagram of liquid crystal optical phased array cascading multiple liquid crystal polarization gratings, QWP: Quarter-Wave Plate, HWP: Half-Wave Plate, LCPG: Liquid Crystal Polarization Grating. (f) Out-of-plane oblique incidence effect on fitted A and B values associated with steering efficiency

针对上述问题,该研究团队在图4(a)所示系统基础上,提出了一种改进型角放大系统,如图4(b)所示。该设计在LCOPA上增加了一个菲涅尔相位板,用于调制光束的“红色部分”,以此取代原系统中的第一个透镜。经调制的“红色部分”光束再通过透镜进行二次调制,最终形成角度放大的扫描光斑;而未受LCOPA调制的“黄色部分”光束则被透镜分散,无法形成有效的衍射光斑,从而在光学路径上自然消除了零阶光束(彩图见期刊电子版)。

此外,该工作借鉴人眼视网膜的特性,构建了一种优化的类视网膜三维扫描模型如图4(c)

所示。该模型通过蓝色标记指示二维扫描,红色标记指示三维扫描,实现了中央凹区域的高分辨率成像与外围区域低冗余信息采集的平衡。通过调整每个环形区域上的扇区数 N ,该系统能模拟人眼晶状体的纵向调焦功能。例如,当对近距离物体成像时,可适当增大 N 值,以在焦平面上获得更大的“中央凹”高分辨率区域,如图4(d),图4(e)所示。

实验验证在标准光学平台上进行,采用波长635 nm的激光光源与高精度位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)。关键性能数据显示:首先,该角放大系统在 $\pm 15^\circ$ 的原始电气

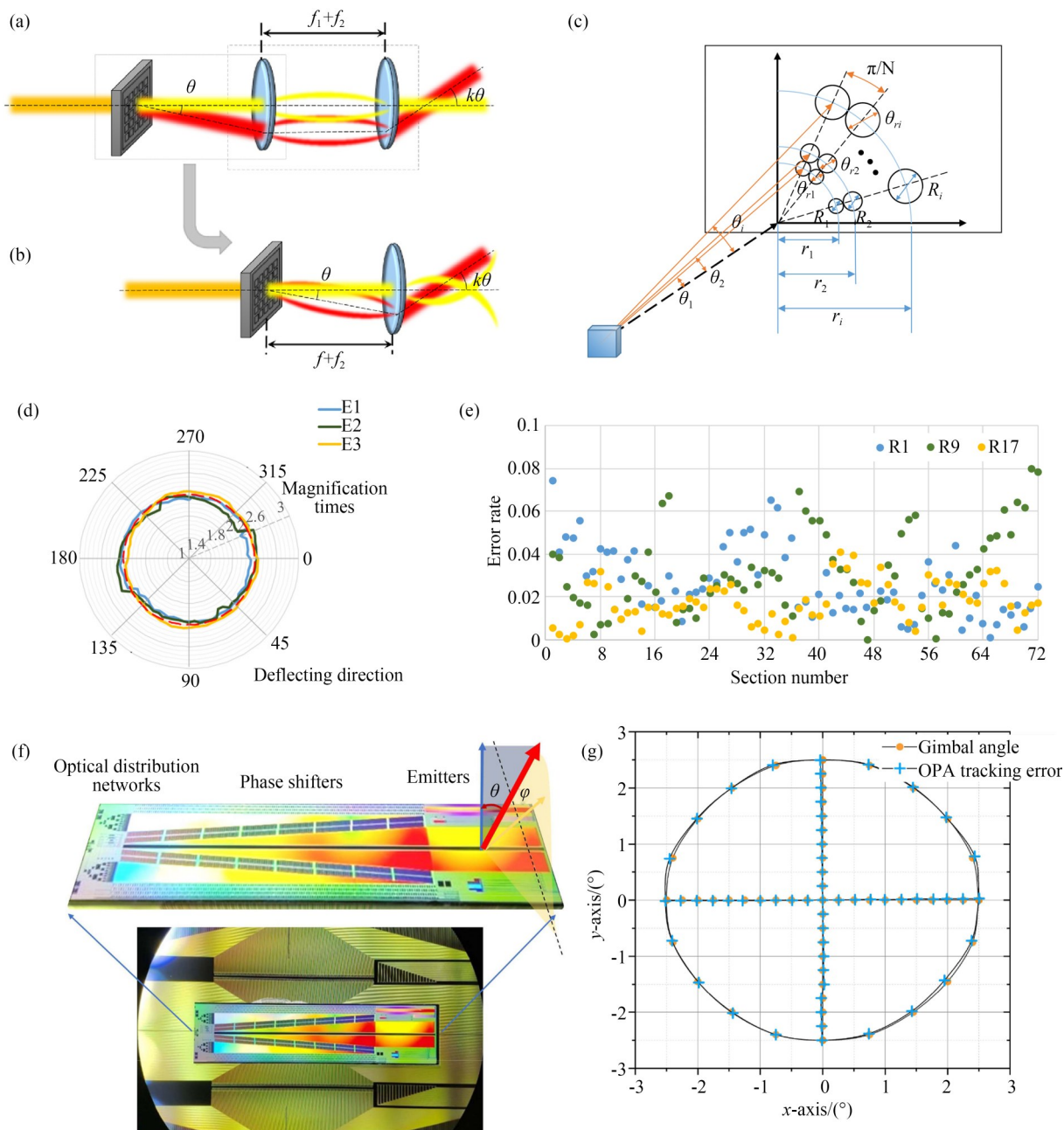


图4 (a)传统的角放大系统;(b)改进的角放大系统;(c)二维与三维视网膜采样的关系;(d)每个方向的放大倍数;(e)每个点的错误率;(f)集成光学相控阵的二维光束扫描;(g)实验结果,将云台引入的跟踪干扰(橙色)与红外相机测量的光学相控阵跟踪误差(蓝色)进行对比

Fig. 4 (a) Traditional angular magnification. (b) The improved angular magnification. (c) The relationship between two dimensional and three dimensional retinalike sampling. (d) Magnification times of each direction. (e) The error rate of each spot. (f) Integrated optical phased array two-dimensional scanning. (g) Experimental result. The tracking interference (orange) introduced by the gimbal is compared with the OPA tracking error (blue) measured by the infrared camera

扫描角内,实现了2.2倍的角放大倍率,将有效光学扫描范围扩大至 $\pm 33^\circ$ 。其次,通过对视场内20个均匀分布的目标点进行反复扫描定位,其平

均扫描误差被证实小于 0.03° (约为1.8 arcmin),相对误差低于5%,体现了优异的指向精度。尤为重要,该系统将零阶光束的衍射效率成功

抑制到1%以下(使用积分球功率计与光阑测量),显著提升了成像对比度。同时,通过优化液晶驱动波形,系统的响应时间(包括上升和下降时间)被缩短至5 ms以内(通过光电探测器与示波器测量),使其能够支持更高帧率的动态扫描。最终,在类视网膜扫描模式下,该技术实现了中心区域角分辨率高达 0.01° 、外围视野瞬时覆盖范围超过 $60^\circ \times 40^\circ$ 的综合性能,验证了其在快速、大范围、高精度3D成像中的应用潜力。

面向空对星激光通信,Wang等人将一个集成光学相控阵作为核心光束控制器件^[31],构建了一套完整的全固态指向采集跟踪(Pointing, Acquisition, and Tracking, PAT)系统,如图4(f)所示。该系统在硅光子平台上利用512个热相位调制器的硅基集成光波导光学相控阵,器件包括移相器、发射极等。该工作解决了空对星激光通信中一个至关重要的难题:如何实现快速、高精度、高带宽的指向、捕获与跟踪,以应对飞机平台的振动和低轨卫星的快速移动,此系统可以在 $5^\circ \times 5^\circ$ 范围内实现闭环跟踪,跟踪精度为 0.024° ,如图4(g)所示。

综合上述工作,目前对于液晶相控阵的研究多集中于提高扫描范围与扫描精度这两大问题上,同时在其他参数,例如转向效率,响应速度等也有较多研究。在面向其他应用上,本综述列举了在3D成像,激光通信上的应用。对比最近的国际报道水平,液晶相控阵的扫描范围可达 $14^\circ \times 0.3^\circ$,扫描精度可达 $2 \mu\text{rad}$ 以下^[32]。

在国际上,McManamon等人报道的液晶相控阵技术通过窄波段辐射得到了提高光束扫描效率的方法,并在6~40 ms的响应时间内,得到了超过 $45^\circ \times 45^\circ$ 的扫描范围,然而其工作效率较低,仅达到15%^[33]。对于空间激光通信的应用场景,美国空军实验室首先在2012年使用液晶光学相控阵作为光束控制设备来实施光学时空分布多址(Space-Time Division Multiple Access, STDMA)实验。除了需要基本的波束敏捷性控制、多波束形成及其他核心功能之外,光学相控阵天线还应满足应用施加的许多限制,包括长距离传输,指向范围宽,跟踪精度高,响应速度快等^[34]。

国内在液晶相控阵的扫描精度和控制算法

上已达到国际先进水平,如实现 $2 \mu\text{rad}$ 的极高精度和创新的非周期闪耀光栅、游标结构等波控方法,在准连续扫描和多目标指示等特定应用上展现了强大的系统集成能力。然而,在响应速度、大角度扫描效率和新材料应用上存在明显短板。国际上,美国等研究机构通过开发新型铁电液晶或聚合物分散液晶材料,已将响应速度提升至百微秒量级,远超国内普遍毫秒级的水平,从而满足了激光雷达等动态应用的需求。同时,国际领先研究通过优化器件结构和驱动方案,在实现大扫描角(如 $>45^\circ$)的同时,能将衍射效率保持在较高水平($>80\%$),而国内技术在大角度和高效率之间通常需要权衡。此外,国内对高性能液晶材料(如高双稳态、高耐光性材料)的自主研发能力依然薄弱,核心材料多依赖进口,制约了其在高功率和极端环境下的应用。

总体而言,液晶相控阵的响应速度较慢,达不到激光雷达所需千赫兹量级的波束切变频率要求;另外,液晶相控阵的相元尺寸难以进一步缩小,影响了相控阵的扫描角度;且材料的功率容量有限,因而提高响应速度、扫描角度和功率容量一直是液晶相控阵的研究热点和难点。

3 光纤相控阵技术

光纤作为一种光学相控阵的相移单元,具有可传送功率高、易于实现二维阵列、调相速度快、驱动电压低等优点。Xu等人指出,传统半导体激光器因发射功率有限、线宽较宽、调制速率较低以及波长稳定性不足等问题,导致基于该类激光器的片上光学相控阵在深空通信中应用受到较大限制^[35]。相比之下,光纤激光器具备传输距离远和精度高的特点,对实现深空高速信息传输具有重要意义。

为此,该研究提出了一种基于光纤激光相控阵光源的全光组网新方法,适用于深空通信场景。如图5(a)所示,系统采用 $1.55 \mu\text{m}$ 单纵模激光种子源作为光纤输入,经耦合器分光后分为两路:一路作为参考光,另一路平均分配至多个通道进行相位调控。4路高速调制光经合束器实现同源激光的相干合成,随后部分合成光与参考光进行相位比较,产生的信号由相位控制电路处理并反馈至相位调制器,从而实现预期的相干合束

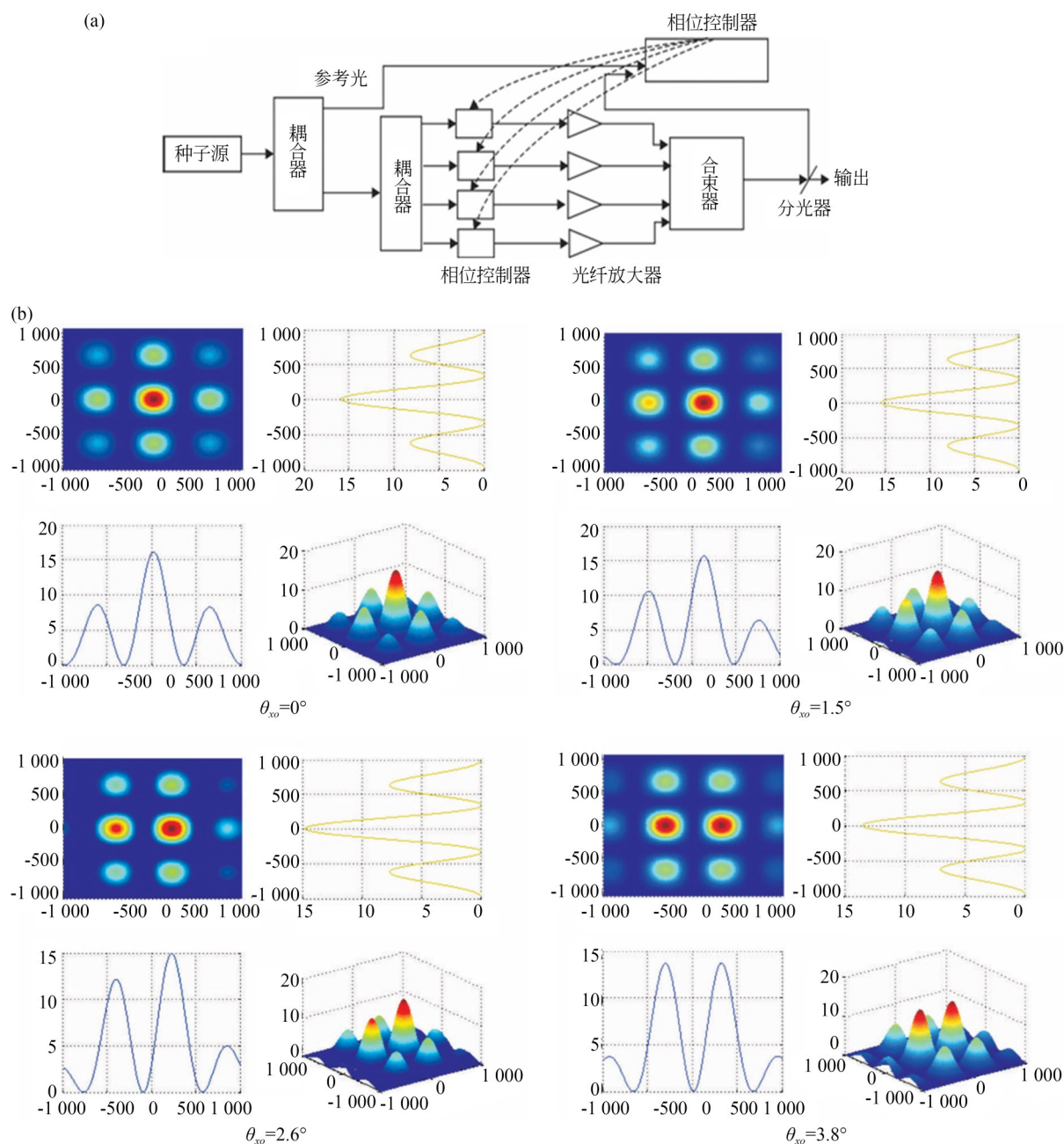
与波束扫描。

研究进一步模拟了该 $1.55\ \mu\text{m}$ 光纤激光相控阵光源在深空通信中的远场光强分布。通过调控各相控单元间的相位差,得到如图 5(b)所示的远场光强图。结果表明,在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 、纤芯半径 $10\ \mu\text{m}$ 、阵元间距 $80\ \mu\text{m}$ 的条件下,扫描角度可达 $\pm 0.9909^\circ$ 。

另一方面, Ren 等人构建了一种基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描控制理论模型,并对其扫描特性进行了数值分析^[36]。如图 5(c)

所示,该扫描系统主要包括激光器、分束器、相位调制器、光纤、光纤准直器、相位差检测回路以及扫描电压控制回路。其中相位调制器采用铌酸锂电光晶体作为介质。研究计算表明,在光纤阵列间距为 $125\ \mu\text{m}$ 时,该系统的最大扫描角度可达 $0.1\ \text{rad}$ (约 5.73°)。

基于相位调制的光纤干涉型相控阵实际是以若干根光纤作为阵列单元。其中,每路光纤中的光通过相位调制器改变光束相位,各光纤光束出射后在远场产生干涉。光束的扫描方向由外



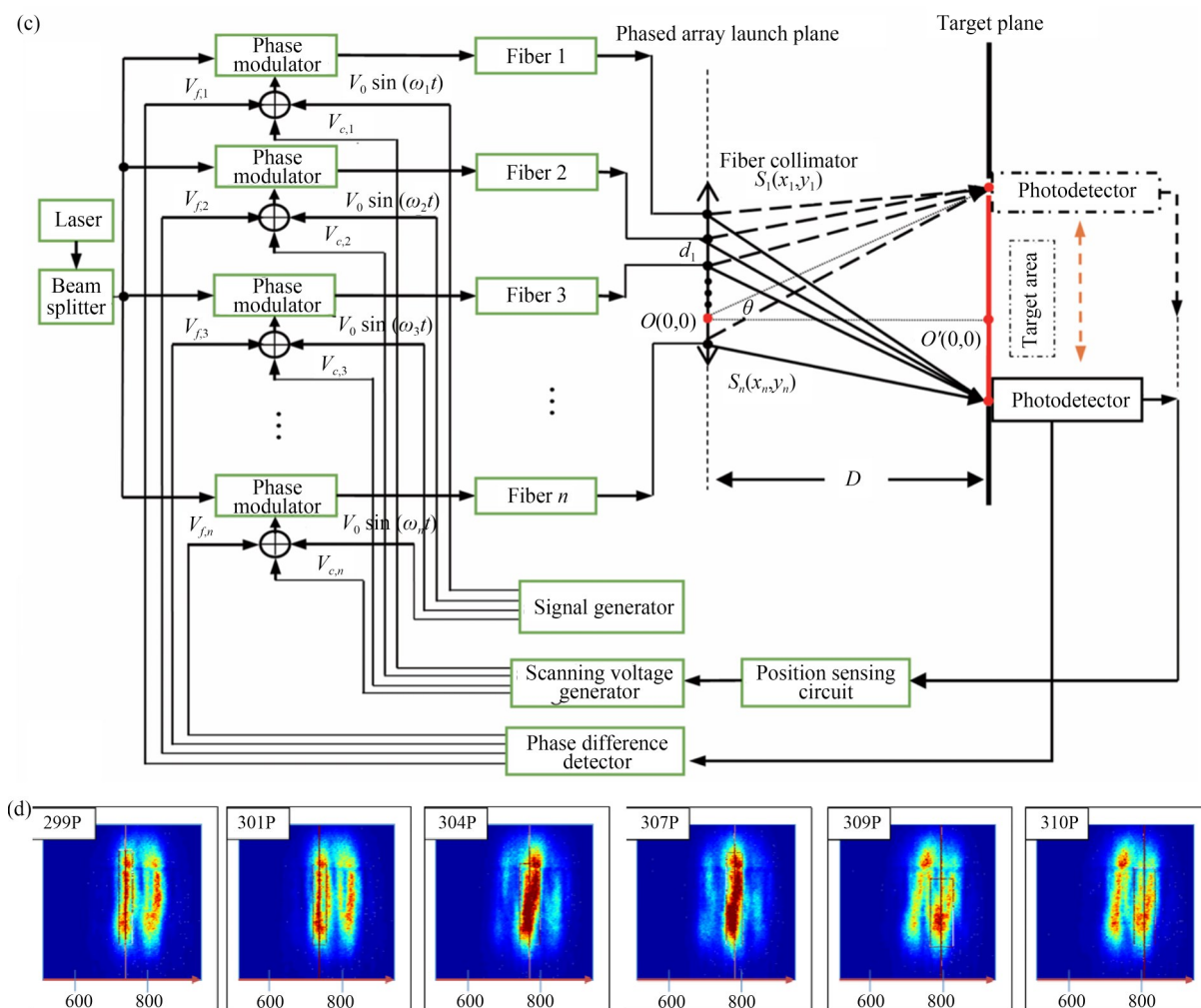


图 5 (a) 光纤激光相控阵技术的全光组网原理结构图;(b) 在 $0^\circ, 1.5^\circ, 2.6^\circ, 3.8^\circ$ 的偏转角度下的远场干涉强度分布, θ_{xo} : 偏转角度;(c) N 路光纤干涉型光学相控阵扫描控制示意图;(d) 最大扫描角度下光纤相控阵的远场测试光斑随帧数 299, 301, 304, 307, 309, 310 P 的变化示意图

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the all-optical networking principle based on fiber laser phased array technology. (b) Far-field interference intensity distribution at different deflection angles at deflection angles of $0^\circ, 1.5^\circ, 2.6^\circ$ and 3.8° , θ_{xo} : Deflection angle. (c) Schematic diagram of scanning control for an N-channel fiber interferometric optical phased array. (d) Schematic diagram of the change of the far-field test spot of the fiber phased array with the number of phase-locked frames 299, 301, 304, 307, 309, 310 P under the maximum scanning angle

加扫描控制电压和相位调制器通过晶体的电光效应或热光效应给光束附加相位关系来实现。尽管与集成波导型相控阵相比,光纤相控阵的阵元间距受到单根光纤直径的限制,间距较大,导致扫描角度较小。但由于光纤为成熟产品,实用性较强,因此特别适用于远场一定空间范围内的应用。此外,该组基于相位调制的光纤干涉型相控阵采用马赫-曾德尔干涉光路来模拟两路光路的光纤干涉型相控阵进行模拟实验。在模拟实验中,激光波长为 $1\ 550\ \text{nm}$,相位调制器采用的

介质为铌酸锂电光晶体,其折射率为 2.25,电光系数为 $30\ \text{pm/V}$ 。研究表明,当扫描电压达到 $130\ \text{V}$ 时,该阵列可实现 $\pm 5.5^\circ$ 的波束扫描范围。

为了最大化空间激光器的通信速度,同时大大简化空间平台的激光捕获、跟踪、对准及通信系统,使用光纤相控阵技术是一种新的重要出路。Ci 等人从激光强度编码通信与光纤激光相位控制之间可能的相互作用开始,一方面研究了光纤激光相控阵结构布局与激光通信系统之间

的相关性,另一方面证明了激光通信的调制速率可能会干扰相控阵的锁相稳定性^[37]。在实验 100 MHz 的相位条件下,该研究构建了一套具有 1 064 nm 波长光源,8 通道 V 形槽输出(间隔为 127 μm)的光纤激光相控阵系统。由图 5(d)可见,在扫描过程中,主瓣条纹向右移动,并且移动范围大约为一个明亮的条纹间距,因为在扫描过程中相位没有锁定,条纹在扫描过程中会变得模糊。最终实验结果实现了稳定的 5 s 锁相,锁相精度为 0.25 rad,最大扫描角度达到了 0.8 mrad。Yang 等人制备了具有锆钛酸铅移相器的 1×4 和 1×6 光纤型光学相控阵^[38]。在相控阵系统中,光纤被用作传输路径和发射天线。实验通过反复调整每个锆钛酸铅相移器的相移,在短时间内观

察到了一维波束的形成和控制。然而该研究指出随着发射阵列的规模变大,系统更容易受到环境物理干扰和温度变化的影响,因此辐射方向图将会变得不稳定。同时,规模较大的光纤阵列需要更多的锆钛酸铅移相器和规模更大的驱动电路,系统的成本也将随之增加。

多数芯片级光学相控阵在高功率波束形成方面存在局限性,且探测距离受多种因素制约,难以满足远距离应用需求。为解决这一问题,Shao 等人提出了一种多光束光纤相控阵方案^[39]。该系统的结构如图 6(a),图 6(b)所示,采用硅 V 形槽底板-光纤-硅盖板复合结构,有效限制光纤端面偏移(光纤直径 127 μm ,V 形槽开口略大于光纤直径,盖板为梯形槽设计),并结合微透镜阵

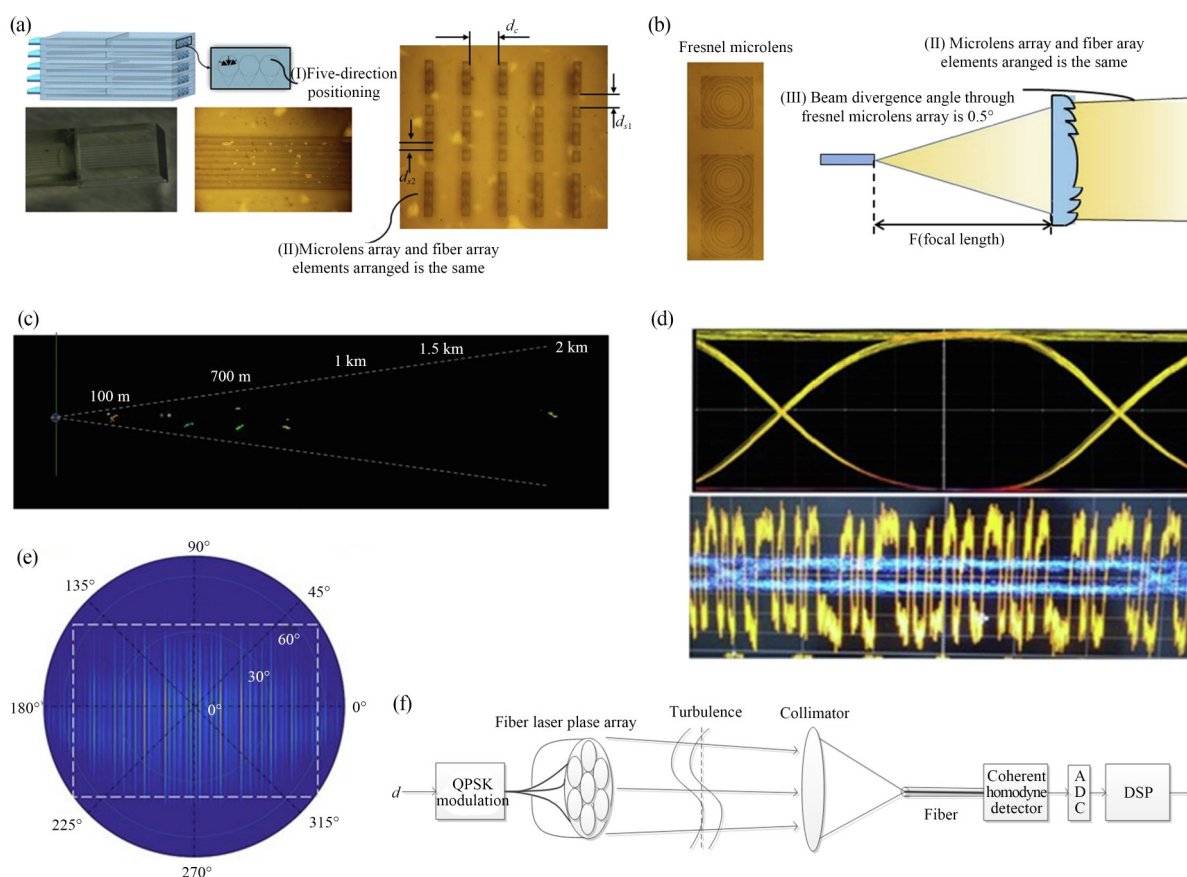


图 6 (a) 55 通道光纤阵列结构图和 SEM 图像; (b) 菲涅尔微透镜阵列对光束的准直; (c) 设备硬件的照片; (d) 使用 APD 接收器以 8 Gbps 的速度接收眼图; (e) OPA 的远场方向图, 白色虚线框代表 FOV; (f) 采用 FLPA 发射器的相干自由空间光通信系统示意图

Fig. 6 (a) Structure diagram and SEM image of the 55-channel fiber array. (b) Collimation of the beam by the Fresnel microlens array. (c) Photograph of the setup hardware. (d) Received eye diagram at 8 Gbps using an APD receiver. (e) Far-field pattern of the OPA, the white dashed box indicates the total FOV. (f) Schematic diagram of coherent FSO communication system with FLPA transmitter

列(焦距与光纤端面重合)将输出光束发散角压缩至 0.5° ,阵列因子提升至90%。

在激光雷达(LiDAR)应用中,系统在室外夜间环境下使用1 064 nm 光纤激光器(线宽8 MHz,最大输出功率40 W)与350 mm口径接收望远镜,成功探测到2 km外的目标。同时,基于三角波线性调频的相干FMCW LiDAR技术(调制带宽B,周期T),系统可同步获取目标的距离与速度信息(图6(c)所示)。

在自由空间通信方面,系统以1 063 nm激光为载波,经马赫-曾德尔调制器加载8 Gbps OOK信号,再通过掺铒光纤放大器放大后由光学相控阵发射。接收端采用铟镓砷雪崩光电二极管,在3 km距离处实现了8 Gbps的高速数据传输,眼图清晰,误码率可控,接收功率范围约为 $-18.64\sim-19.65$ dBm(图6(d)所示)。

该系统还实现了40 MHz的高速扫描(采用高带宽直耦型电光调制器与随机并行梯度下降相位锁定算法,锁定周期200 ms),并支持最高24 W的高功率波束输出。此外,在一个非均匀排布的 5×11 光纤相控阵中(x 方向不等距, y 方向间距0.25 mm),系统实现了 $58^\circ\times 32^\circ$ 的宽视场角(图6(e)所示),并通过遗传算法优化的非等间距排布将旁瓣抑制提升至12 dB,单波束阵列转向角为 0.48° 。

同时Chen等人针对自由空间光通信系统中链路的远距离传输易受到大气湍流的影响而功率低误码率高展开了研究^[40],研究者们发现光纤相控阵作为一种相干光束组合技术不仅可以抑制大气湍流还可以实现精确且快速的光束偏转,如图6(f)所示,该工作将光纤相控阵引入了四相移相键控调制相干系统中,采用传统的SPGD算法,通过子孔径光束相位的迭代来优化评估函数,进而使远场的光斑强度达到稳定和最大。由于每个光束的直径都小于大气相干强度,因此可以有效地补偿大气湍流。最终的结果显示该系统提供了高功率和低误码率。以上的论述注重波束的扫描和系统通信速度方面,然而波束的整形问题在材料加工中非常重要,许多激光器所提供的辐射强度分布例如高斯分布都不能执行正确的操作,许多技术需要不对称或者均匀的强度分布,波束整形技术至关重要。静态器件例如衍

射光学元件、相位板等进行波束整形的缺点是无法消除动态像差、相位噪声以及传播过程中的失真等问题;动态器件例如液晶空间光调制器、可变反射镜虽然很好解决了这一类问题,但是对激光器的光功率有限制(器件的损伤阈值限制)。而光纤相控阵通过控制每个发射光束的振幅和相位,可以动态地调整光束的强度分布,能够自适应控制光束,生成高功率光束。AKSENOV等人提出的光纤激光阵列基于子高斯光束的相位和振幅的自适应控制^[41]。使用相位校正器来对所需相位分布进行反演并结合SPGD算法精确控制相位分布,其中相位校正器位于反馈回路中,有效避免了高功率带来的器件损伤问题,如图7(a)所示为实验装置图。该工作数值模拟了六边形排布的阵列中随着子光束数量的增加可以生成更加复杂的强度分布,还模拟了聚焦距离对衍射效应的影响;实验上演示了利用七分量六边形激光阵列产生涡旋光束和等边三角形顶点处的三个峰值形式的强度分布,如图7(b),图7(c)所示。

光纤相控阵的稳定性和系统性集成同样是研究者们重点关注的,李国会等人对光纤相控阵组束及控制技术展开技术^[42],研究者们并未关注其中任何一个单独的部件,而是将高性能的自适应光纤准直器(Adaptive Fiber Optic Collimator, AFOC)、高度集成的内置探测系统和高稳定性的机械结构这三个子系统完美地融合在一起,形成了一套完整、可靠、高性能的工程化解决方案。研究者们成功地展示了如何通过创新的机械设计(AFOC和框架)和智能的控制架构(内置CCD闭环),在7束激光的规模上,同时实现了大动态范围($>\pm 230\ \mu\text{rad}$)和高指向精度($<1\ \mu\text{rad}$),并最终通过实验验证,将相干合成后的功率密度提升了4.8倍,如图7(d)所示。这为未来更大规模的光纤激光相控阵系统的实际工程应用提供了极具价值的参考范例。

从上述分析可见,光纤相控阵技术凭借其高功率容量、快速响应速度及成熟的器件基础,在远距离自由空间通信、激光雷达探测等需高功率输出的场景中展现出显著优势。研究通过优化阵列结构、锁相控制及多光束动态整形技术,实现了室外远距离目标探测、远距离大数据传输及

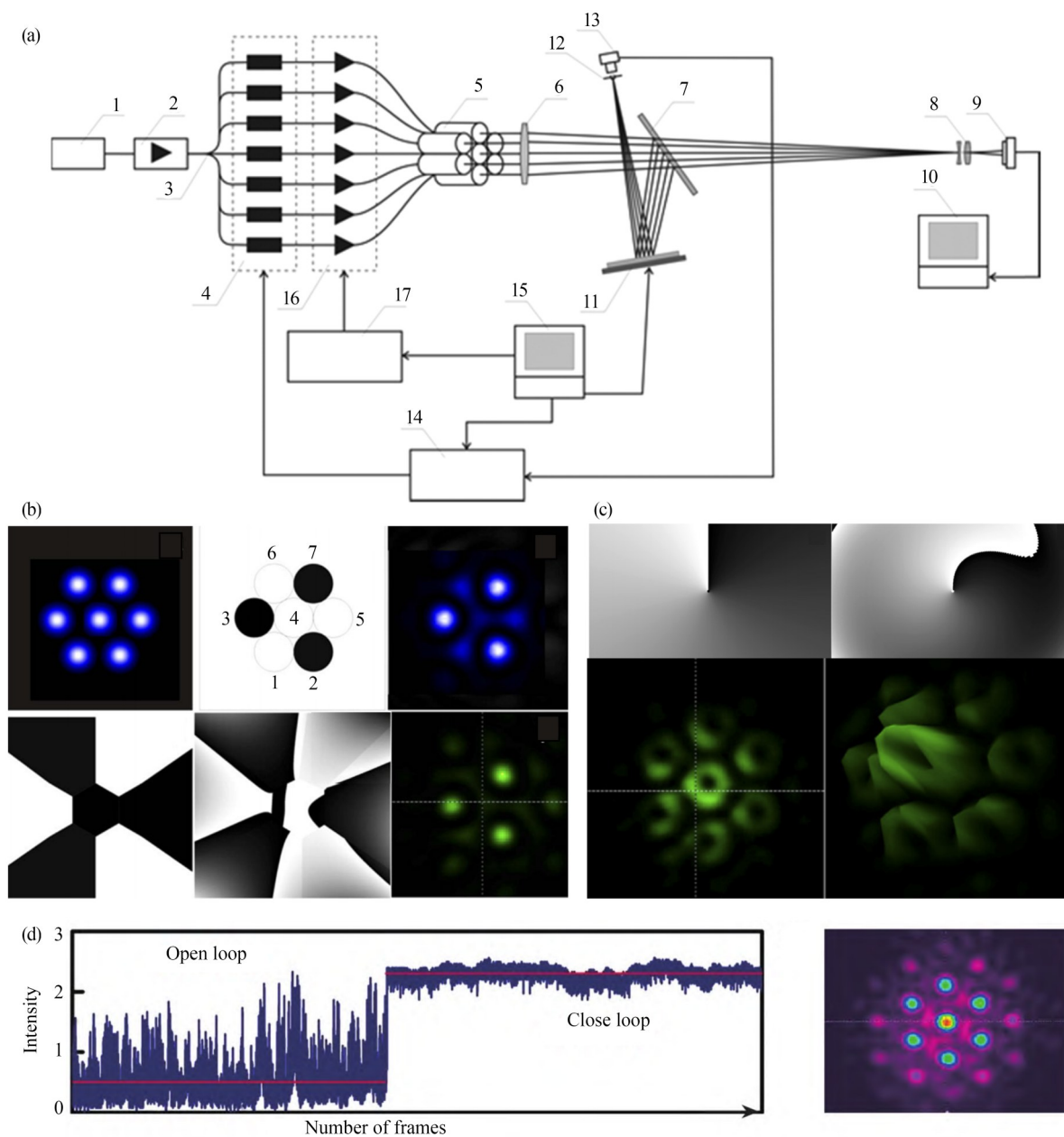


图 7 (a) 基于光纤激光阵列的光束整形;(b)仿真及测试的光纤阵列输出光强度分布和相位分布示意图;(c)不同形状涡旋光束的生成示意图。上下图分别对应相位分布与光强分布,左右图对应为 2D 与 3D 的情况;(d)7 路激光锁相实验结果。左图为开/闭环桶中功率曲线,右图为闭环光斑分布

Fig. 7 (a) Laser beam shaping system based on a fiber laser array;(b) Schematic diagram of output optical intensity distribution and phase distribution for fiber array in simulation and measurement;(c) Diagram illustrating the generation of vortex beams with different shapes. The upper and lower images correspond to the phase distribution and intensity distribution, respectively, while the left and right images represent the 2D and 3D cases;(d) Experimental results for the 7-beam laser phase-locked loop. Left figure: Power curve in open/closed-loop mode. Right figure: Closed-loop spot distribution

复杂光场调控。然而,其扫描角度受限于光纤物理尺寸,且大规模阵列集成难度高、体积庞大、成本高昂,制约了在小型化系统中的应用。未来需

在缩小阵元间距、提升集成度与降低成本方面持续突破,以拓展其应用边界。

国内在光纤相控阵的高功率合成和部分工

程化应用(如远距离通信和激光雷达)上紧跟国际步伐,例如通过多光束阵列实现了千瓦级功率输出和公里级探测,并在自适应光学补偿大气湍流方面取得了良好效果,系统级解决方案能力较强。但其核心短板在于阵列规模、集成度和核心电光调制器性能。国际上,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)等项目支持下的研究机构已演示了基于光子集成电路与光纤阵列混合集成的数百至数千通道系统,实现了高度的紧凑化和自动化控制。相比之下,国内的光纤阵列规模普遍较小(通常在百通道以下),且依赖分立元件,导致系统体积庞大、稳定性面临挑战。此外,用于高速相位调制的铌酸锂电光调制器芯片等核心元器件,国内在性能(如带宽、线性度)和产业化水平上与国际领先公司(如Lumentum, II-VI)存在差距,限制了系统整体带宽和扫描速度。

4 基于电光材料的光学相控阵技术

相较于液晶相控阵的精密调控与光纤相控阵的高功率承载能力,基于电光材料的光学相控阵技术的核心优势在于其超高的响应速度(可达微秒乃至纳秒量级),使其成为激光雷达、高速自由空间光通信等对实时性要求严苛应用的理想选择。该技术主要利用铌酸锂(LiNbO_3)、掺镧锆钛酸铅(PLZT)陶瓷、砷化镓(GaAs)等材料的电光效应(如泡克尔斯效应)实现光束相位的快速电控调制。其基本原理是通过施加电压改变材料的折射率分布,从而精确、快速地调整阵列中各通道的光程差,实现光束的敏捷偏转。然而,该技术路线也面临两大主要挑战:扫描角度相对有限和所需驱动电压较高,这限制了其在低功耗、小型化系统中的应用。本节将聚焦于利用不同电光材料构建相控阵的研究进展,探讨其在提升扫描性能、降低功耗和实现更高集成度方面的突破。

铌酸锂是工业界广泛使用的最重要的电光材料,其双折射可通过线性电光泡克尔斯效应进行调节。这种材料具有广泛的光学透明范围($0.35\sim 4.5\ \mu\text{m}$)、高电光活性($30\ \text{pm/V}$)。由于其高居里温度($1\ 200\ ^\circ\text{C}$)以及优异的化学和机械稳定性,性能可以在恶劣的环境中保持。使其制

造的组件多功能和高度可靠。研究者们针对铌酸锂平台的优异性能制备了许多光学相控阵架构。

为实现宽视场下的窄光束扫描,通常需要采用大口径光学相控阵,其阵列单元须高度密集排布,并配合可调谐激光源以实现基于波长调谐的波束偏转。然而,设计能在远场生成复杂光场图案的光学相控阵极具挑战性,尤其当阵列规模大幅增加时,制造难度显著上升。推进电光移相器件的小型化、提升集成度,成为解决上述问题的关键路径。

等离子体技术凭借其高集成度和增强的光-物质相互作用,可大幅降低半波电压长度积,从而在极小尺寸下实现高效调制。Martin等人基于集成纳米光子学中的等离子体模式,制备出一种由两个 $10\ \mu\text{m}$ 长等离子体移相器构成的等离子体光学相控阵^[43],结构如图8(a),图8(b)所示。该器件在 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长下,可在 10° 视场内实现超快光束控制,其频率响应在 $10\ \text{MHz}\sim 18\ \text{GHz}$ 范围内保持平坦(受测试设备限制,理论带宽可达 $1.2\ \text{THz}$)。集成的等离子体移相器在相同波长下半波电压长度积为 $0.24\ \text{V}\cdot\text{cm}$,光束偏转角度在 $\pm 5^\circ$ 范围内连续可调,最大无损伤驱动电压下引入的相位差为 $\pm 0.4\pi$ 。

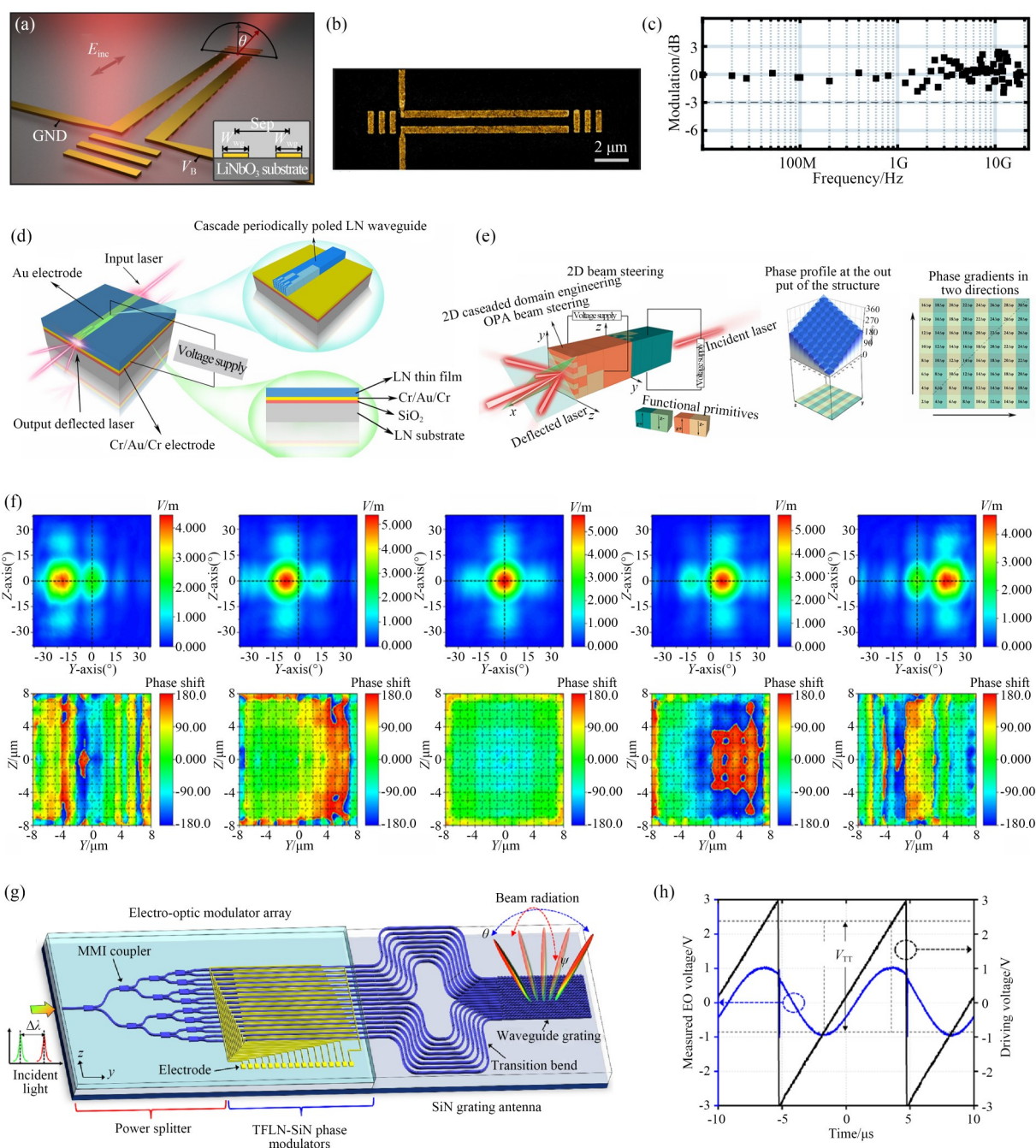
Zheng等人则采用级联畴工程技术提出一种新型光学相控阵结构^[44],进一步从维度上提升了集成水平,如图8(d),图8(e)所示。光束通过该结构时,每一层级联的铁电畴会逐步引入相位差。由于各层光学长度与宽度呈几何级数递减,相位差最终均匀分布于相邻阵列单元(即相邻铁电畴)之间,形成均匀的相位分布。该结构无需可调谐激光器,仅通过两个电极即可实现二维光束偏转,避免为每个单元单独配置电极,显著降低了控制系统复杂度与功耗。仿真结果显示,施加 $\pm 4\ \text{V}/\mu\text{m}$ 的 E_z 电场可实现 $\theta_y=\pm 20^\circ$ 的偏转,施加 $\pm 10\ \text{V}/\mu\text{m}$ 的 E_z' 电场可实现 $\theta_z=\pm 16^\circ$ 的偏转,如图8(f)所示。

为规避直接对电光材料进行图形化加工的困难,研究人员进一步提出基于薄膜铌酸锂-氮化硅平台的混合集成方案。LEE等人首次实现了混合集成薄膜铌酸锂-氮化硅电光相控阵^[45],其结构包含MMI功率分配器、薄膜铌酸锂-氮化

硅相位调制器及氮化硅光栅天线,如图 8(g)所示。该平台融合了铌酸锂的优异电光性能与氮化硅的低损耗、强模场限制等优势,有效克服了热光调制器速度慢、功耗高的问题。该器件在半波电压 3.64 V 、相互作用区长 1.56 cm 时,实现最低功耗 $3.2\text{ pJ}/\pi$,调制速度达 1.2 GHz ,如图 8(h)、图 8(i)所示。通过电光相位调控与波长调谐相结合,该相控阵实现了 $22^\circ \times 5^\circ$ 的二维扫描范围,如图 8(j)所示。

基于电光材料的光学相控阵技术适用于对光束指向速度要求较高的应用场景。在满足高速扫描的基础上,如何进一步扩大扫描角度是该类相控阵面临的关键挑战。

为提升扫描角度范围,Dong 等人利用掺镧锆钛酸铅(Lanthanum-doped Lead Zirconate Titanate, PLZT)电光陶瓷的材料特性,提出一种具有上下电极结构的光学相控阵高速光束扫描器^[46]。该器件通过 PLZT 的电光效应调控各相



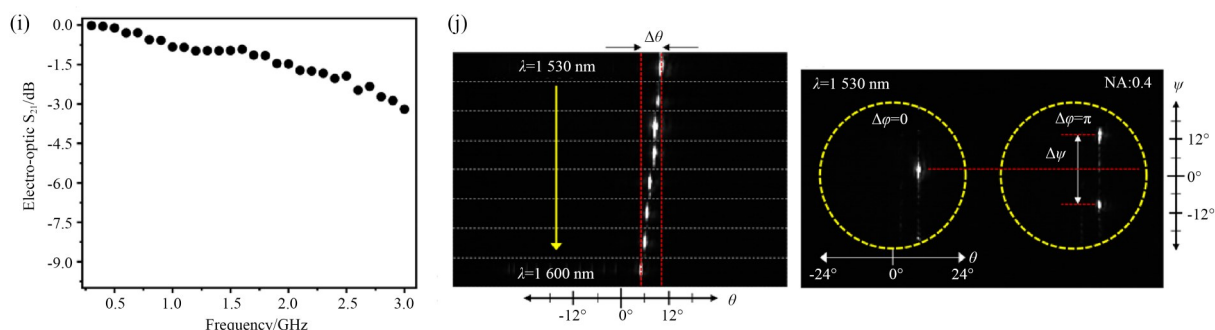


图 8 (a)通过在两个纳米线等离子体波导上施加偏置电压来实现外耦合光功率的光束偏转的概念图。两个平行波导的横截面(插图);(b)所研究的等离子体电光束偏转器的彩色扫描电子显微镜图像。比例尺代表 $2\ \mu\text{m}$; (c)电光偏转响应随射频信号频率的变化关系;(d)级联畴工程光学相控阵整体结构;(e)用于二维光束偏转的级联周期性计划铌酸锂电光相控阵示意图;(f)级联畴光学相控阵沿平面对角线方向的二维光束偏转,上方五张图为仅施加 E_z 时沿 y 轴的模拟光束偏转,下方五张图对应偏转角度下二维电光相控阵输出端面的相位分布;(g)混合集成电光光学相控阵构型;(h)相位调制器中EO信号的测量幅度作为施加的锯齿电压的函数;(i)根据相互作用电极长度为 $9.4\ \text{mm}$ 的干涉调制器的频率测量的EO响应;(j)垂直方向与水平方向的远场分布,左图为沿垂直方向以 $10\ \text{nm}$ 的波长间隔从 $1530\ \text{nm}$ 到 $1600\ \text{nm}$ 的响应,右图为沿水平方向在 $\lambda=1530\ \text{nm}$ 处的相位调谐的远场分布

Fig. 8 (a) Conceptual image of beam deflection of the outcoupled optical power by applying a bias voltage across the two nanowire plasmonic waveguides. Cross-section of the two parallel waveguides (inset). (b) False-colored scanning electron microscope image of the investigated plasmonic electro-optic beam deflector. The scale bar represents $2\ \mu\text{m}$. (c) Measured response of electro-optic steering as a function of the applied RF signal frequency. (d) The overall layout of the cascaded domain engineering optical phased array. (e) The schematic of cascaded periodically poled electro-optical LiNbO₃ phased arrays for two dimension beam steering. (f) Cascaded domain engineering optical phased array two-dimensional beam steering along planar diagonal direction, the five images above show the simulated beam deflection along the y -axis when only E_z is applied, while the five images below show the phase distribution at the output plane of the two-dimensional electro-optic phased array corresponding to the deflection angles. (g) Configuration of the hybrid integrated electro-optical phased array (EOPA). (h) Measured amplitude of the EO signal in the phase modulator in the phase modulator as a function of the applied saw voltage. (i) Measured EO response in terms of the frequency for an interferometric modulator. (j) Far-field distribution along the vertical direction and the horizontal direction, The left figure shows the response along the vertical direction with a wavelength interval of $10\ \text{nm}$ from $1530\ \text{nm}$ to $1600\ \text{nm}$, and the right figure shows the far-field distribution of phase tuning along the horizontal direction at $1530\ \text{nm}$

位单元,实验表明在 $560\ \text{V}$ 调制电压下可实现 $1.18\ \text{mrad}$ 的光束偏转。该团队进一步利用 PLZT 陶瓷的高二次电光效应,通过在施加电压与未施加电压区域之间的界面折射,设计并制备了另一种光学相控阵结构^[47]。研究中分析了 $30\ ^\circ\text{C}$, $50\ ^\circ\text{C}$ 和 $80\ ^\circ\text{C}$ 条件下材料的电滞特性(图 9(a)所示),结果显示随着温度升高,电滞回线逐渐减弱,自发极化也随之降低。

另一方面,Ye 等人基于 PLZT 电光陶瓷的横向电光效应,提出一种新型光学相控阵结构^[48],其示意图如图 9(b)所示。研究从理论与实验两方面分析了光束偏转特性。在采用八个相位调

制单元的实验中,随着外加电压升高,远场干涉图样出现明显偏转。当电压分别为 $283\ \text{V}$, $385\ \text{V}$, $470\ \text{V}$ 和 $560\ \text{V}$ 时,中心条纹偏转角依次达到 $0.59\ \text{mrad}$, $1.14\ \text{mrad}$, $1.57\ \text{mrad}$ 和 $2.35\ \text{mrad}$ 。此外,该团队还基于 PLZT 陶瓷的横向电光效应,系统研究了三角形电极结构偏转器及相控阵技术^[49],实验装置如图 9(c)所示。然而,PLZT 晶片的厚度通常导致较高的工作电压,从图 9(d)可见,即使实现 $0.001\ \text{rad}$ 的偏转角度也需要约 $400\ \text{V}$ 的控制电压,这在一定程度上限制了其在光通信等领域的应用。

王莉等人则采用砷化镓波导作为相控阵基

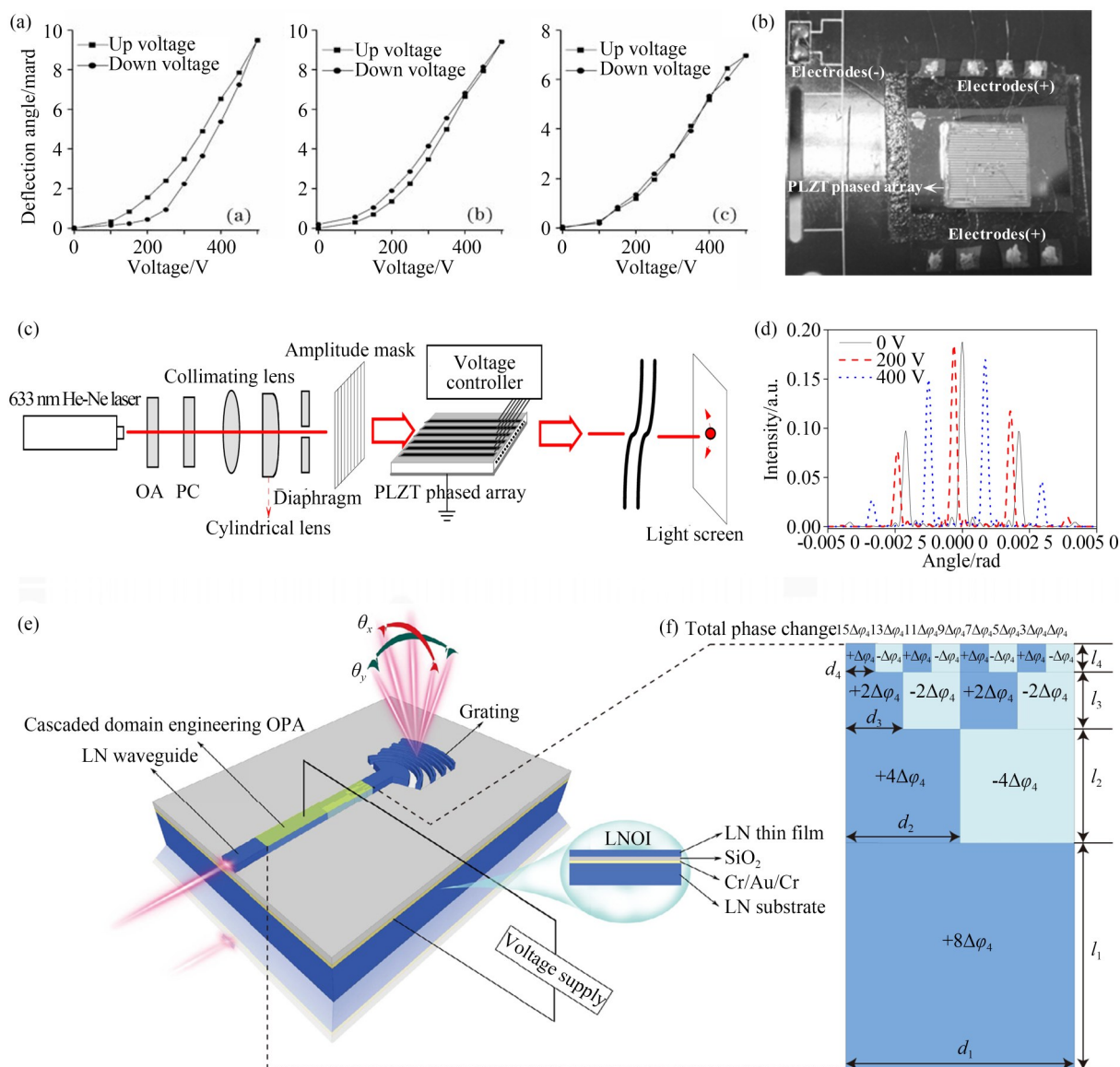


图9 (a) 30 °C、50 °C和80 °C温度下对PLZT陶瓷磁滞特性的影响;(b)掺镧锆钛酸铅电光陶瓷调相阵列结构;(c)基于PLZT电光陶瓷的光束偏转实验装置;(d)调相阵列的数值模拟远场干涉图随施加电压的变化;(e)基于LNOI的片上单电极OPA结构示意图;(f)四级级联畴工程OPA尺寸示意图

Fig. 9 (a) effect of temperature on the hysteresis characteristic of PLZT ceramics under 30 °C, 50 °C and 80 °C. (b) lanthanum-doped lead zirconate titanate electro-optic ceramic phase modulation array structure. (c) The experimental set-up of optical beam deflection based on PLZT electro-optic ceramic. (d) The numerical simulation far-field interference pattern of phase-modulation array varies with the applied voltage. (e) Schematic of LNOI-based on-chip single-electrode OPA structure. (f) Schematic of the dimensions of the four-layer cascaded domain engineering OPA

本单元^[50], 利用其电光效应调控波导传输相位, 具备高响应速度。该结构理论上仅需 10 V 调制电压即可实现 2π 范围的相位调制。实验制备的 1×10 砷化镓波导相控阵在 3.5 V 调制电压下, 可实现频率 800 Hz、角度达 $\pm 6.9^\circ$ 的波束扫描。

针对降低该类器件的功耗开展了研究。Fujita 等人发明了一种具有电光转向的低成本紧凑型光学相控阵^[51]。该结构是一种光束的转向装置, 且有效地规避了因使用电光效应而引起的热管理问题。在光学相控阵 (Optical Phased Array, OPA) 的系统架构创新方面, Li 等人提出了一种

基于绝缘体上铌酸锂薄膜(Lithium Niobate On Insulator, LNOI)平台的级联畴工程单电极OPA^[52],如图9(e),图9(f)所示,实现了控制逻辑的颠覆性简化。该设计的核心创新在于,通过在单个铌酸锂波导内构建多层级联的铁电畴结构,成功将传统OPA中所需的N个独立电极控制单元缩减至仅需一个全局电极。其工作原理是利用铌酸锂晶体固有的线性电光效应,当单一电压施加于该级联结构时,光波在穿过精心设计的正负畴序列后,能在输出端自动形成等效于多通道相控阵的线性相位梯度,从而实现对光束在X维度的电控偏转。这一“单电极控多通道”的革命性思路,从根本上解决了传统集成OPA因通道数增加而导致的控制系统复杂、布线困难与功耗激增的瓶颈问题,为未来实现大规模、高集成度、低功耗的二维光束扫描系统提供了一条全新的技术路径。

Kang等人提出了一种采用电光移相器的 1×16 硅光学相控阵,以实现低功耗高速运行的方法^[53]。该移相器采用p-i-n结构,在i区域的两侧形成了n掺杂的区域。通过优化移相器的i区域宽度,可以降低功耗和传播损耗。制备的p-i-n移相器具有20 MHz的工作频率和 $1.7 \text{ mW}/\pi$ 的低相位调谐功率。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处,通过集成了 $2 \mu\text{m}$ 间距光栅辐射器的一维光学相控阵,横向可实现 45° 的宽光束转向范围。该 1×16 光学相控阵的波束形成操作平均功耗为 39.6 mW ,转向光束的平均过渡时间为24 ns。

Wight等人根据相控阵技术的原理,设计了由AlGaAs光波导材料构成的一维光学相控阵光束扫描器^[54]。光波导阵列利用金属有机物化学气相淀积技术沿着AlGaAs晶体的(001)方向外延生长,其中本征半导体层构成光波导芯层,掺杂半导体层构成光波导包层,并通过外加电压起到电极层的作用。这种新型光波导阵列电光扫描器基于光波导中的电光效应,实现了激光束快速可控空间扫描。通过独立控制每个相位调制单元,实现在30 V的应用电压下远场光束可扫描 20° 的大角度。

Vasey等人提出了43个脊形AlGaAs集成光波导调相阵列^[55],通过一个光栅耦合器将输入光束耦合进入一个锯齿状电极的波导介质层内,然

后再通过另一个光栅耦合器输出,从而在较少控制线的情况下实现了光束的连续扫描。

基于电光材料的光学相控阵技术凭借其无可比拟的高速响应特性,在需要快速光束扫描的关键领域展现出巨大潜力。研究者们通过探索铌酸锂(包括块状、薄膜及混合集成平台)、PLZT陶瓷、GaAs等材料体系,并创新性地引入等离子体结构、级联畴工程、混合集成等设计理念,在提升扫描角度范围、降低功耗和提高集成度等方面取得了显著进展。尽管如此,高工作电压和相对有限的扫描范围仍是其广泛应用的主要瓶颈。未来研究将致力于通过优化材料体系(如探索更高电光系数的材料)、改进器件结构设计(如纳米光子学结构)、发展更高效的驱动电路以及与硅光平台深度融合(混合集成)等途径,进一步降低工作电压、扩展扫描角度,并提升系统的整体性能和集成度,以满足日益增长的高速、高精度光束控制需求。

国内在基于块体铌酸锂和PLZT陶瓷的相控阵研究上有较好积累,特别是在级联畴工程等创新结构设计上提出了具有国际影响力的方案,有效提升了扫描角度和集成度。然而,最大的差距体现在“薄膜铌酸锂”这一革命性平台的技术储备和工艺成熟度上。国际上,以哈佛大学、加州理工学院等为首的研究团队,利用绝缘体上薄膜铌酸锂(LNOI)平台,已经实现了超低功耗($< 1 \text{ pJ/bit}$)、超高速($> 100 \text{ GHz}$)和大规模集成的电光调制器与相控阵,为下一代高速光通信和芯片级激光雷达奠定了基础。反观国内,虽然已启动相关研究,但在LNOI晶圆制备、纳米级波导刻蚀、低损耗电极集成等关键工艺链上仍不成熟,导致器件性能(如半波电压、插损、调制速率)与国际标杆存在代际差距。同时,在砷化镓等III-V族材料与硅光平台的异质集成方面,国内的研发水平和产业化能力也相对落后。

5 基于高折射率对比度集成光波导的光学相控阵技术

随着三维成像、遥感制图、激光测距及无人驾驶等技术越来越受到人们的关注,性能稳定,成本更低的光学相控阵组件开始被大量研究。

其中,基于硅基光电子技术的硅基光学相控阵因其成本低,速度快和尺寸小而受到广泛关注^[56]。由于硅、氮化硅与二氧化硅等包层材料的折射率对比高达 28%~58%,使得模式体积大大缩小,天线间距也因此可以缩小到波长量级,器件扫描角度大大提高,近年来得到了研究者的广泛关注。其中基于集成光波导的光学相控阵移相模

块主要分为热光移相与电光移相两类。

基于热光调制的光学相控阵通常具有较低的传输损耗,但其主要缺点在于功耗较高且扫描速度相对较慢。为应对这一挑战,Wang 等人设计并制备了一种基于氮化硅-硅双层集成光波导的光学相控阵^[57]。该设计充分利用了氮化硅波导的超低传输损耗与硅波导的优良调制特性。

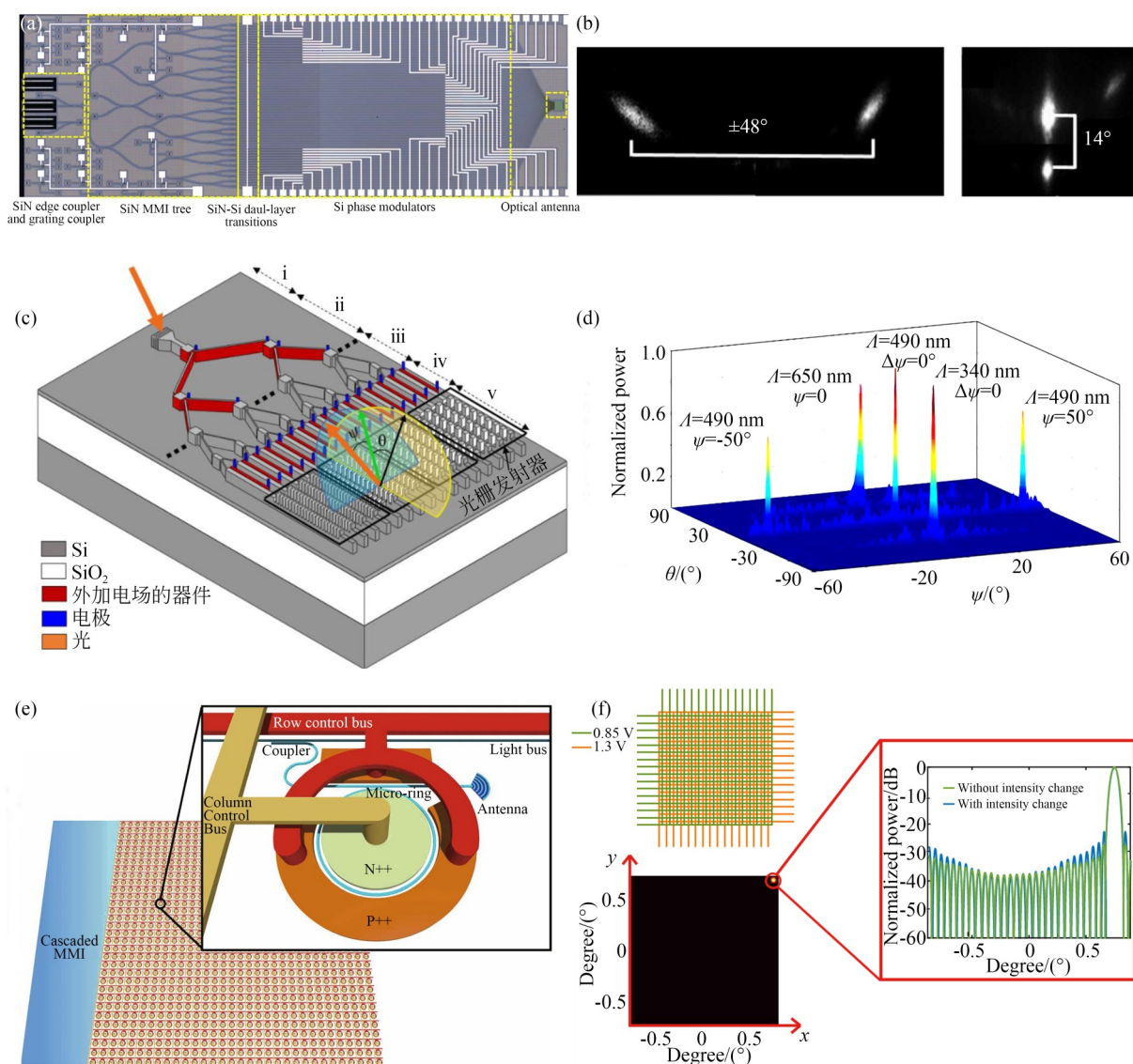


图 10 (a)波导集成光学相控阵结构;(b)水平方向最大扫描角度和垂直方向最大扫描角度;(c)硅基光学相控阵示意图;(d)硅基光学相控阵二维波束偏转仿真示意图;(e)硅基光学相控阵架构的示意图,该架构由一系列基于电光调制的模块化微环单元组成;(f)施加在每个相邻行和列上的周期性偏置电压和光束偏转远场模式图

Fig. 10 (a) Waveguide integrated optical phased array structure. (b) Maximum horizontal scanning angle and maximum scanning angle in vertical direction. (c) Schematic diagram of silicon-based optical phased array. (d) Two-dimensional beam deflection of silicon-based optical phased array. (e) Schematic of the silicon OPA architecture consisting of a series of modularized, EO modulation based micro-ring pixels. (f) Periodic bias voltage applied on each adjacent rows and columns and the far-field pattern of beam steering

整个芯片结构(图 10(a)所示)包含五个功能部分:作为信号输入端的氮化硅波导端面耦合器、实现 3 dB 分光的氮化硅多模干涉耦合器、负责将光场从氮化硅波导耦合至硅波导的双层耦合器、用于相位调控的硅波导热光调制器阵列以及最终辐射光束的光学天线。

与传统的硅波导相控阵相比,该器件在低输入功率下的总插入损耗(包含耦合、传输与辐射损耗)约为 10 dB。通过施加线性相位梯度,该相控阵在 Φ 轴方向实现了超过 96° (即 $\pm 48^\circ$)的扫描范围;同时,通过将工作波长从 1 500 nm 调谐至 1 580 nm,在 θ 轴方向实现了 14° 的扫描范围(图 10(b)所示)。测试结果表明,其硅热光相位调制器的功耗约为 $7 \text{ mW}/\pi$ 。

另一方面,李中宇等人基于硅基光学相控阵,提出了一种结合相位控制与不同周期光栅发射器的点阵扫描方法^[58]。该方案通过对两个维度的单元相位进行独立调控,实现了大范围的二维波束扫描,其系统结构如图 10(c)所示。该设计采用多模干涉耦合器作为分光器件,利用热光效应进行相位调制,并通过光栅结构实现光束发射。其中,每个相位调制单元的功耗为 $215 \text{ mW}/\pi$ 。仿真结果表明,该 16×16 光学相控阵可实现 $100^\circ \times 120^\circ$ 的大范围二维波束扫描,部分角度的偏转效果如图 10(d)所示。

基于电光调制虽然增加了器件损耗,但是其响应速度更快。Zhang 等人制备并演示了二维电光芯片级相控阵,在具有 8×8 阵列规模的绝缘体上硅(SOI)平台上实现了快速和二维光束转向^[59]。实验通过干涉技术校准了随机分布的初始相位,在远场观测模式下实现了 $0.92^\circ \times 0.32^\circ$ 的光束发散度和 $8.9^\circ \times 2.2^\circ$ 的扫描范围。在此基础上,通过马赫-曾德尔干涉仪结构测得相位调制器的 3 dB 带宽为 324 MHz,在电路带宽限制下实现了 20 MHz 的点对点波束控制速度。整个模块在输入功率为 13 dBm 的条件下测得插入损耗为 37 dB,控制功率为 13 dBm(在偏振控制器输出端测量)。

Zhao 等人同样通过电光效应,在 SOI 平台上提出了大规模光学相控阵的模块化体系结构^[60]。每个移相及发射单元包含定向耦合器,微环移相器和光栅光学天线,具有紧凑的结构,面积为 50

$\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,其单元结构示意图如图 10(e)所示。此外,该研究提出了一个由 32×32 的电光控制单元组成的光学相控阵的模型设计,该设计模块的主瓣的宽度设置为 $0.04^\circ \times 0.04^\circ$,理论波束扫描最大可扩展到 $\pm 8.9^\circ$ 。图 10(f)展示了其给定相位分布时的远场模式的分布。

此外,磁光光学相控阵作为一种突破性技术被提出,Yan 等人首次将非互易光学路由与相控阵结构结合,为集成光子学提供了全新的调控维度。其基于光学相控阵结构在硅基绝缘平台上实现了首个 5×5 磁光非互易路由器^[61],如图 11(a)~图 11(c)所示。该器件通过在硅波导阵列顶部沉积铈掺杂的钇铁石榴石(Ce:YIG)磁光薄膜,引入非互易移相。其核心原理在于,前向与后向传输光在磁光波导中积累不同的相位差,形成特定的相位梯度,使双向光信号聚焦至不同输出端口,如图 11(d)所示。实验表明,该器件在 1 551 nm 波长下实现 16 dB 隔离比与 -18 dB 串扰,支持光学环行及复杂路由功能,如图 11(e)~图 11(g)所示。

传统的光学相控阵多面向激光通信领域,吉林大学团队面向消费电子与机器视觉的 3D 感知应用领域,提出的行门控光学相控阵(Row-Gated Optical Phased Array, RG-OPA)^[62]实现了关键性突破,如图 11(h)所示。该技术摒弃了传统结构光系统中笨重的机械扫描部件或固定的衍射光学元件,首次通过全固态、单片集成的光子芯片,动态生成了高达 2 500 点的密集结构光点阵。其革命性在于采用独特的“行选通”机制与片上二极管寻址网络,仅需单一波长激光即可完成二维扫描,这不仅极大地简化了系统构架、降低了功耗与成本,更使其在 1 m 距离内实现了 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 的高精度 3D 测量,如图 11(i)所示。这项成果标志着高精度、眼安全(1 550 nm 波段)、芯片级的 3D 结构光投影成为现实,为在智能手机面部识别、机器人导航、以及 AR/VR 交互等对体积和成本敏感的消费级场景中,实现高性能 3D 感知铺平了道路。

国际上,近年来对于高折射率对比度波导光相控阵也开展了广泛研究。为了降低器件的功耗,Sun 等人在 SOI 平台上制备了 64×64 的二维光学天线阵,且可分别对近场及远场区域进行扫

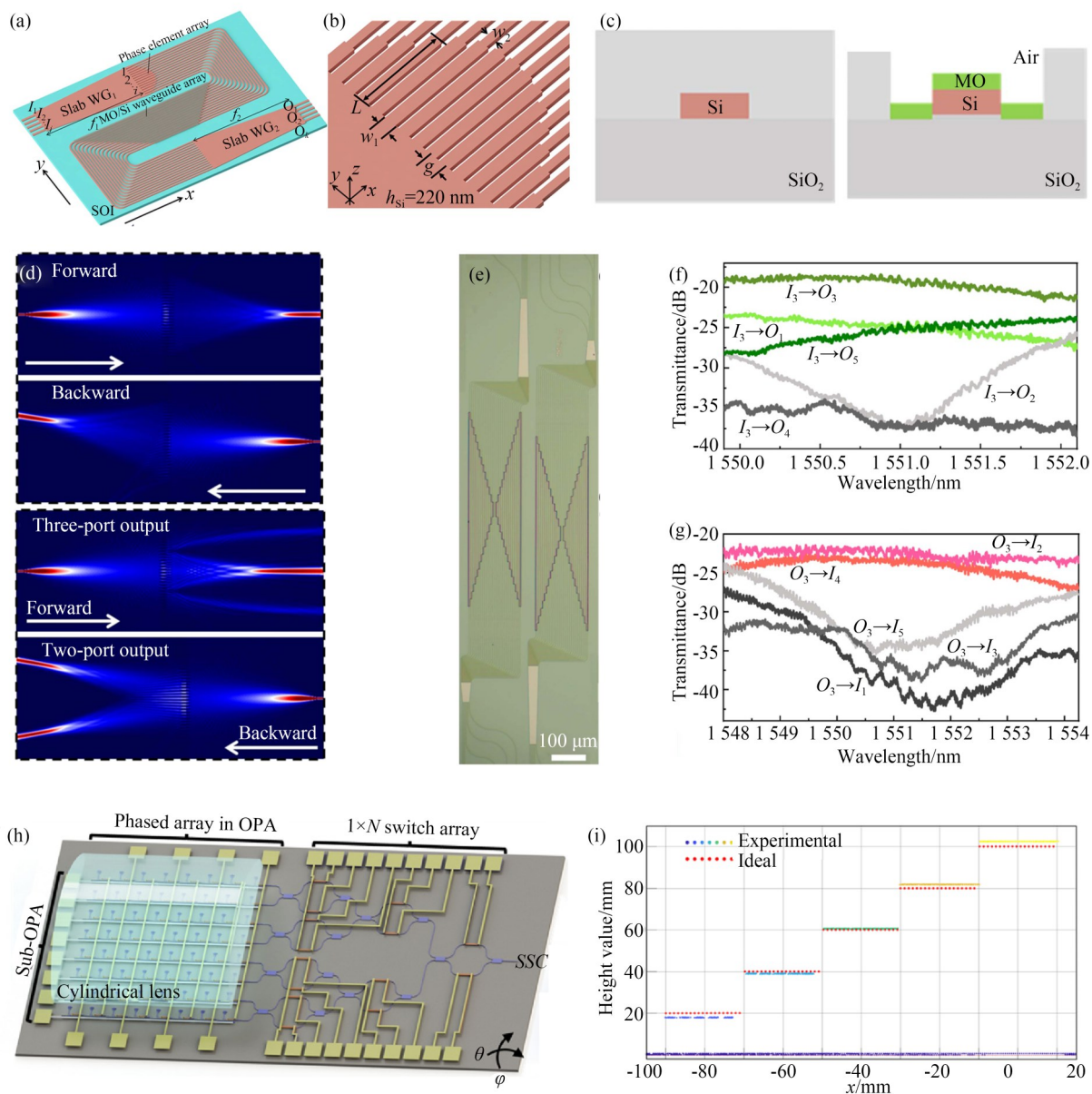


图 11 (a) 硅集成磁光相控阵列示意图;(b)器件中的相位单元阵列示意图;(c)硅波导与磁光/硅(MO/Si)波导的截面结构;(d)光环行器与磁光相控阵列的仿真透射功率,左侧两张图为光环行器的仿真传输功率,右侧两张图为磁光相控阵的仿真传输功率;(e)磁光相控阵器件显微镜图片;(f)当光从 I_3 端口输入时的传输谱线图;(g)当光从 O_3 端口反向输入时的传输谱线图;(h)行门控光学相控阵(RG-OPA)结构示意图;(i)结构光(SL)系统获得的平均高度值

Fig. 11 (a) Schematic of the silicon integrated magnetic-optical phased array. (b) A sketch of the phase element array in the device. (c) Cross sectional structure of Si waveguide and MO/Si waveguides. (d) Simulation transmission power of an optical circulator and an magneto-optical phased array, the two images on the left show the simulated transmission power of a circulator, and the two images on the right show the simulated transmission power of the magneto-optical phased array. (e) Microscopic images of magneto-optical phased array devices. (f) The transmission spectra when the light is input from port I_3 . (g) The transmission spectra when the light is input reversely from port O_3 . (h) Schematic diagram of row-gated optical phased array structure (RG-OPA) structure. (i) Average height values obtained by the SL system

描^[63]。其光学信号由光纤进行耦合,通过热光效应对阵列单元进行相位调制。经测试,对个调相单元需要施加 8.5 mW 的功率实现 π 移相。

此外, Poulton 等在 SOI 平台中制备了波形校准和平衡检测器,所组成的硅基光学相控阵具有八路光束,且器件尺寸仅为 9 mm²^[64]。在探测 60 m 范围内的移动实体时,该光学相控阵只需 5 mW 的功率消耗。图 12(a),图 12(b)展示了其

扫描主瓣宽度及所设计的远场分布图像。随着高折射率对比度集成光波导相控阵技术的进一步发展,该类器件的功耗性能也得到了进一步的改善。最近的研究展示了集成到大型相控阵中的多通道光子平台,将移相器的功耗降低到近 1/9。多通道结构可将热光相移器的功耗降低至 1.7 mW/ π ,而不会牺牲速度或带宽^[65]。该平台演示了包含 512 个有源控制单元的硅光子相控

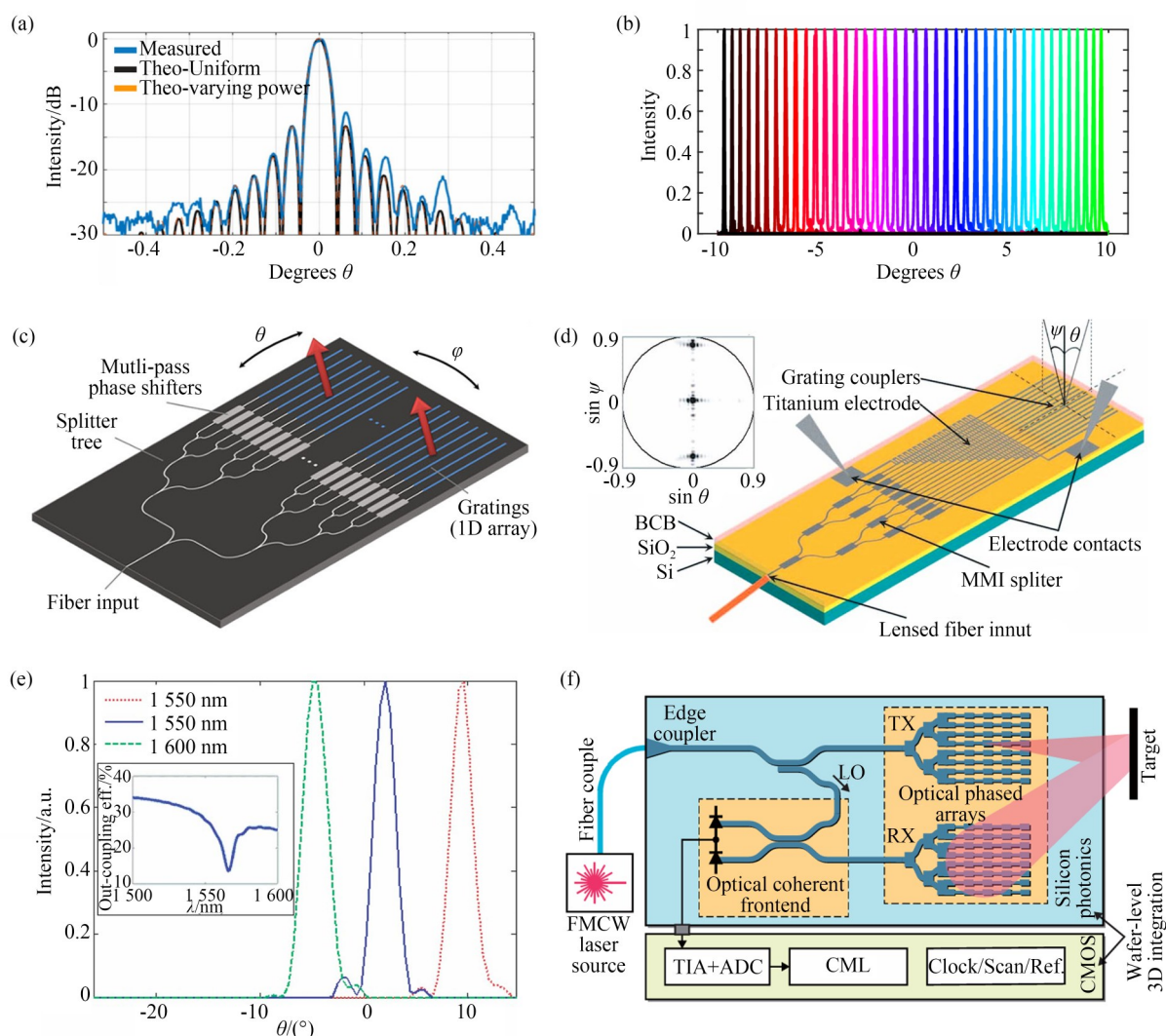


图 12 (a) 光学相控阵的远场模式分布与具有一维移相器的光束转向示意以及远场光束的展示;(b)具有一维移相器的光束转向示意;(c)1×512 天线单元光学相控阵结构示意图及其封装器件示意图;(d)光束偏转组件的示意图;(e)1 500,1 550 和 1 600 nm 波长的角度归一化的远场图案;(f)集成激光雷达收发系统示意图

Fig. 12 (a) The far-field mode distribution of the optical phased array. (b) The beam steering diagram with a one-dimensional phase shifter. (c) A schematic diagram of the optical phased array structure of a 1×512 antenna unit and a schematic diagram of its packaged devices. (d) Schematic of the beam steering component. (e) Normalized far-field pattern along the angle for wavelengths of 1 500, 1 550 and 1 600 nm. (f) Schematic diagram of integrated lidar transceiver system

阵,仅消耗 1.9 W 的功率,可同时在 $70^{\circ}\times 6^{\circ}$ 的视场范围内执行二维光束扫描,其光学相控阵结构及器件的封装示意如图 12(c)所示。Martin 等制备了 1×512 的单元天线阵列,并利用电光效应对单元相位进行了有效调控^[66]。各单元所需要的调制功率仅为 $1\text{ }\mu\text{W}/\pi$,且调制速度为 10 ns。经测试,所制备的光学相控阵可达到 $56^{\circ}\times 15^{\circ}$ 的二维扫描角度范围,且波束偏转所需的时间仅为 30 μs 。

针对相控阵扫描角度范围,Tyler 等人提出了使用包含光学相控阵的氮化硅集成电路在近红外中进行二维光束控制^[67]。在 905 nm 的固定波长下,在 $17.6^{\circ}\times 3^{\circ}$ 的范围内实现了光束转向。该结构通过光相控阵列通道之间的相位差控制第一维扫描,通过主动在包含具有不同周期的输出衍射光栅的各种光学相控阵子设备之间的切换来控制第二维扫描。Van 等同样借助热光效应对单元阵列进行相位调制,其输出阵列硅波导阵列,如图 12(d)所示^[68]。在波导间距设置为 2 μm 时,该光学相控阵能够达到 2.3° 的水平扫描范围。同时该工作通过波长调谐在垂直方向上获得了 14.1° 的扫描范围。如图 12(e)所示,波长的调谐范围分别是 1 500 nm,1 550 nm 以及 1 600 nm。

进一步的,为了实现收发一体化,Bhargava 等基于 128 个天线单元分别制备了用于发射及接收的天线^[69],如图 12(f)所示,其整体尺寸为 $0.5\text{ mm}\times 0.254\text{ mm}$ 。同时该工作通过三维集成工艺,将光学收发天线与 CMOS 电路集成到了同一块芯片上。经测试该光学相控阵可实现 18.5° 的波束扫描范围。

从上述分析可见,基于硅、氮化硅等高折射率对比度波导的光学相控阵具有模式体积小、扫描角度大的优点,其主要缺点是功率容量低和耦合损耗高。由于模式体积被大大约束,单位面积

的功率密度大大提高,硅或氮化硅等材料的非线性光学效应严重制约了传输效率和相位精度,使得器件功率容量较小;同时由于模式体积小,模式耦合精度要求很高,导致耦合损耗通常较高。

国内在硅基和氮化硅基光学相控阵的理论设计、仿真和大范围扫描演示方面非常活跃,部分扫描角度指标已达到国际领先,并开始在磁光非互易等新兴方向进行前沿探索。但在规模化集成、系统级芯片和先进制造工艺上存在系统性差距。国际领先企业(如 Intel、Analog Photonics)和科研机构已经展示了拥有数千个单元、集成驱动电路与控制算法的单片大规模相控阵芯片,并成功应用于商业化的激光雷达原型机中。国内目前演示的系统大多通道数有限(如几十至上百),且普遍将光芯片、电子驱动和控制系统分立,未能实现真正的“单片光电融合”。究其根源,差距在于成熟的硅光工艺平台(如 12 英寸 SOI 产线)的可获得性、与先进 CMOS 工艺线的协同设计能力,以及用于大规模阵列校准的智能控制算法的工程化实现经验。此外,在面向 FM-CW 激光雷达的窄线宽、可调谐激光器与相控阵的共集成方面,国内技术成熟度较低。

综合比较上述四种光学相控阵调控技术,在扫描范围、扫描精度、响应速度及器件功耗等关键指标方面,液晶相控阵具有较高的光束指向精度、光纤相控阵具有较大的功率容量、基于电光材料的光学相控阵具有较高的速度、高折射率对比度集成光波导相控阵具有较小的器件体积和较大的扫描角度。各技术的主要问题包括,基于光纤与电光材料的光学相控阵具有较大的体积及较高的调制电压,液晶光相控阵具有较慢的速度和较低的功率容量,高折射率对比集成光波导器件具有较低的功率容量和较高插损等,如表 1 所示。

表 1 各种光学相控阵技术研究现状及典型指标对比

Tab. 1 Comparison of various optical phased array technologies

光学相控阵技术	扫描角度范围	扫描精度	功耗	体积	响应速率
液晶	较宽($\pm 22.5^{\circ}$)	高(2 μrad)	较低(5 V)	小/ mm^2	慢/(~ms)
光纤	较窄($\pm 5^{\circ}$)	较高(0.1 mrad)	高(100 V)	大/($\text{mm}^2\sim\text{cm}^2$)	较快/ μs
电光材料	窄($\pm 0.5^{\circ}$)	低(0.32 mrad)	较高(10 V)	大/($\text{mm}^2\sim\text{cm}^2$)	快/ns
高折射率对比度集成光波导	宽($\pm 48^{\circ}$)	低(0.4 mrad)	低(0.1 W)	小/ mm^2	快/ns

6 结 论

本文综述了近年来光学相控阵技术的研究进展,对液晶相控阵技术、光纤相控阵技术、基于电光材料的光学相控阵技术以及基于高折射率对比度集成光波导光学相控阵技术的研究现状进行了分析,并指出其优势和劣势。各光学相控阵技术经过多年发展,已在一些关键指标上取得进展。目前,新型光学相控阵技术正朝着高响应速度、低功耗、大角度、小体积、高集成度的方向不断发展。在众多光学相控阵中,硅光平台凭借其易实现大规模集成、低功耗、高折射率对比度

等优势脱颖而出。为了满足未来光学相控阵在大角度、高速、高精度、小体积以及 CMOS 工艺兼容等方面的需求,在激光雷达、成像、自由空间通信等领域,单片集成的硅基光学相控阵将具有更广泛的发展前景。

作者贡献声明:

白晨旭:论文撰写,相关文献整理;

李拓:论文修改,相关文献整理;

朱科建:论文修改,相关文献整理;

严巍:论文构思和撰写,论文修改,项目管理,终稿审阅。

参考文献:

- [1] DOYLEND J K, HECK M R, BOVINGTON J T, *et al.* Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21595-21604.
- [2] LINNENBERGER A, SERATI S, STOCKLEY J. Advances in optical phased array technology[C]. *Free-Space Laser Communications VI. San Diego, California, USA*. SPIE, 2006.
- [3] 马阎星,吴坚,栗荣涛,等. 光学相控阵技术发展概述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 44-57.
MA Y X, WU J, SU R T, *et al.* Review of optical phased array techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 44-57. (in Chinese)
- [4] BYRD M J, POULTON C V, KHANDAKER M, *et al.* Free-space Communication links with transmitting and receiving integrated optical phased arrays [C]. *Frontiers in Optics / Laser Science. Washington, DC*. OSA, 2018.
- [5] POULTON C V, YAACOB A, COLE D B, *et al.* Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4091-4094.
- [6] LI D F, YAO K M, GAO Z, *et al.* Recent progress of skin-integrated electronics for intelligent sensing[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(1): 39.
- [7] YANG K Y, SKARDA J, COTRUFO M, *et al.* Inverse-designed non-reciprocal pulse router for chip-based LiDAR [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 369-374.
- [8] DE YOUNG R J, BARNES N P. Profiling atmospheric water vapor using a fiber laser lidar system [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(4): 562-567.
- [9] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [10] MEYER R A. Optical beam steering using a multi-channel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [11] NINOMIYA Y. Ultrahigh resolving electrooptic prism array light deflectors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(8): 791-795.
- [12] CAO J, LI Y D, ZHOU D, *et al.* Liquid crystal optical phased array based on isomeric structure [C]. *2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications. November 2-4, 2019. Beijing, China*. SPIE, 2020.
- [13] TANG Y, HUANG M Y, CHEN Y W, *et al.* A 4-channel beamformer for 9-Gb/s MMW 5G fixed-wireless access over 25-km SMF with Bit-Loading OFDM [C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. San Diego, California*. OSA, 2019: 1-3.
- [14] JENKINS M, CARRON C, MIDDLETON C, *Optical Device Including A Monolithic Body of Optical Material and Related Methods*: US15890605 [P/OL]. 2019-07-30 [2022-12-29]. <http://www.google.co.in/patents/US15890605>.

- [15] WANG C Y, NIU Q F, SHI H W, *et al.* Development status of optical phased array beam steering technology[C]. *Third International Conference on Photonics and Optical Engineering*. December 5-8, 2018. Xi'an, China. SPIE, 2019.
- [16] WANG X R, TAN Q G, HUANG Z Q, *et al.* Liquid crystal optical phased array device with a fine steering precision of a few micro-radians[J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 360-364.
- [17] 孔令讲, 朱颖, 杨建宇, 等. 一种新的液晶相控阵组件波控方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1961-1966.
- KONG L J, ZHU Y, YANG J Y, *et al.* A new method of scanning angles screening of liquid crystal phased array component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1961-1966. (in Chinese)
- [18] 孔令讲, 朱颖, 宋艳, 等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 219-224.
- KONG L J, ZHU Y, SONG Y, *et al.* A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 219-224. (in Chinese)
- [19] QIN S Y, LIU C, WANG J Y, *et al.* Liquid crystal-optical phased arrays (LC-OPA)-based optical beam steering with microradian resolution enabled by double gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15): 4091-4098.
- [20] WANG X R, WU L, XIONG C D, *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.
- [21] WU L, WANG X R, XIONG C D, *et al.* Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phased arrays[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(10): 101601.
- [22] 汪相如, 黄子强. 液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(4): 33-37.
- WANG X R, HUANG Z Q. Analysis and research on liquid crystal optical phase array component steering precision[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 33-37. (in Chinese)
- [23] 闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 158-166.
- YAN Z Q, GUO T, WU J, *et al.* Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 158-166. (in Chinese)
- [24] WU L, WANG X R, XIONG C D, *et al.* Design and experimental demonstration on improved high order grating for wide angle beam steering of liquid crystal optical phased array[C]. *Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XX-IX*. San Francisco, California, USA. SPIE, 2017.
- [25] CAO J, ZHOU S L, CHENG Y, *et al.* Omnidirectional all-solid-state aliasing-free scanning using liquid crystal optical phased array and conical mirror[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 184: 108664.
- [26] WU L, WANG X R, HE X X, *et al.* Arbitrary multiple beam forming by two cascaded liquid crystal optical phased arrays[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17066-17077.
- [27] HE X X, LI M F, LIANG Z Q, *et al.* A liquid crystal stackable phased array to achieve fast and precise nonmechanical laser beam deflection[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127598.
- [28] ZHANG Y, WANG Q D, JIANG H L, *et al.* Dynamic response characteristics of optical beam deflection in liquid crystal optical phased array[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 35733-35742.
- [29] ZHAO X J, DUAN J Z, ZHANG D Y, *et al.* Oblique incidence polarization effect on steering efficiency of liquid crystal polarization gratings used for optical phased array beam steering amplification[J]. *Optical Review*, 2016, 23(5): 713-722.
- [30] TANG M Y, CAO J, HAO Q, *et al.* Wide range retina-like scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106885.
- [31] CHEN L, ZHU L, DU H, *et al.* Pointing acquisition and tracking system for free space optical communication based on integrated optical phased array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2025, 17(4): 7301608.

- [32] FRANTZ J A, MYERS J D, BEKELE R Y, *et al.* Chip-based nonmechanical beam steerer in the midwave infrared[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2018, 35(12): C29.
- [33] MCMANAMON P. An overview of optical phased array technology and status[C]. *Liquid Crystals: Optics and Applications*. Warsaw, Poland. SPIE, 2005.
- [34] GUO H R, WANG X R, LI J, *et al.* Research review on the development of liquid crystal optical phased array device on the application of free space laser communication[C]. *9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Meta-Surface-Wave and Planar Optics*. June 26-29, 2018. Chengdu, China. SPIE, 2019.
- [35] 许磊, 马万卓, 李鑫. 一种基于光纤激光相控阵技术的全光组网的新方法[J]. *光电技术应用*, 2015, 30(3): 17-22.
- XU L, MA W Z, LI X. New method of all-optical networking based on optical fiber laser phased array technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2015, 30(3): 17-22. (in Chinese)
- [36] 任远中, 柴金华. 基于相位调制的光纤干涉型光学相控阵扫描特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 212-219.
- REN Y Z, CHAI J H. Scanning characteristics of fiber-optic interferometric phased array based on phase modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 212-219. (in Chinese)
- [37] LIU J J, CI M R, HAN L, *et al.* Optical fiber laser phased array technology for space laser communication[C]. *Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications*. May 22-24, 2018. Beijing, China. SPIE, 2018.
- [38] YANG X Z, FANG A, YANG Y Y, *et al.* 1-D beam steering with fiber-type optical phased array[C]. *2008 IEEE Photonics Global@Singapore. December 8-11, 2008, Singapore*. IEEE, 2008: 1-4.
- [39] WU Y H, SHAO S, LI Y X, *et al.* Multi-beam optical phase array for long-range LiDAR and free-space data communication[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108027.
- [40] CHEN S L, ZHANG Z G, CAI S Y. High power budget coherent free space optical communication system based on fiber laser phased array[C]. *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). October 26-29, 2018, Hangzhou, China*. IEEE, 2018: 1-3.
- [41] ADAMOV E V, AKSENOV V P, ATUCHIN V V, *et al.* Laser beam shaping based on amplitude-phase control of a fiber laser array[J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(1): 182-192.
- [42] 李国会, 顾静良, 岳献, 等. 7束光纤激光相控阵组束及控制技术[J]. *中国激光*, 2025, 52(7): 122-133.
- LI G H, GU J L, YUE X, *et al.* Combination and control technology of seven-beam fiber laser phased array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(7): 122-133. (in Chinese)
- [43] THOMASCHEWSKI M, WOLFF C, BOZHEVOLNYI S I. High-speed plasmonic electro-optic beam deflectors[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 4051-4056.
- [44] LI J W, ZHENG H B, HE Y C, *et al.* Cascaded domain engineering optical phased array for 2D beam steering[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(21): 4017-4030.
- [45] LEE W B, KWON Y J, KIM D H, *et al.* Hybrid integrated thin-film lithium niobate-silicon nitride electro-optical phased array incorporating silicon nitride grating antenna for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Express*, 2024, 32(6): 9171-9183.
- [46] 董作人, 叶青, 瞿荣辉, 等. 基于掺铋锆钛酸铅电光材料的光学相控阵光束扫描器[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 373-377.
- DONG Z R, YE Q, QU R H, *et al.* Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(3): 373-377. (in Chinese)
- [47] DONG Z R, YE Q, QU R H, *et al.* Characteristics of a PLZT electro-optical deflector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(9): 540-542.
- [48] YE Q, DONG Z R, QU R H, *et al.* Study of optical phased-array technology based on PLZT electro-optic ceramic[C]. *2007 Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference*.

- October 17-19, 2007, Shanghai, China. IEEE, 2007: 528-530.
- [49] YE Q, DONG Z R, FANG Z J, *et al.* Experimental investigation of optical beam deflection based on PLZT electro-optic ceramic [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16933-16944.
- [50] 王莉, 石顺祥, 李家立. 基于 GaAs/AlGaAs 光波导扫描技术的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(1): 37-39.
- WANG L, SHI S X, LI J L. Research on optical waveguide scanning technique based on GaAs/AlGaAs[J]. *Laser & Optronics Progress*, 2005, 42(1): 37-39. (in Chinese)
- [51] FUJITA J, ELDADA L, *Low Cost and Compact Optical Phased Array with Electro-Optic Beam Steering: US15342958* [P/OL]. 2018-05-03 [2022-12-29]. <http://www.google.co.in/patents/US15342958>.
- [52] LI J W, ZHENG H B, HAN Y Y, *et al.* Design and analysis of single-electrode integrated lithium niobate optical phased array for two-dimensional beam steering[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 184: 108617.
- [53] KANG G, KIM S H, YOU J B, *et al.* Silicon-based optical phased array using electro-optic p-i-n phase shifters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(21): 1685-1688.
- [54] WIGHT D R, HEATON J M, HUGHES B T, *et al.* Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(8): 899-901.
- [55] VASEY F, REINHART F K, HOUDRÉ R, *et al.* Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3220-3232.
- [56] LIANG D, BOWERS J E. Recent progress in heterogeneous III-V-on-silicon photonic integration [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(1): 59.
- [57] WANG P F, LUO G Z, XU Y, *et al.* Design and fabrication of a SiN-Si dual-layer optical phased array chip [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 912.
- [58] 李中宇, 章玲璇, 曾超, 等. 基于硅基光学相控阵的大范围二维光束扫描[J]. *光子学报*, 2018, 47(9): 913003.
- LI Z Y, ZHANG L X, ZENG C, *et al.* Ultra-wide Two-dimensional beam steering by silicon integrated optical phased array [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 913003 (in Chinese).
- [59] ZHANG H Y, ZHANG Z X, LV J X, *et al.* Fast beam steering enabled by a chip-scale optical phased array with 8×8 elements [J]. *Optics Communications*, 2020, 461: 125267.
- [60] ZHAO C, PENG C, HU W W. Blueprint for large-scale silicon optical phased array using electro-optical micro-ring pixels [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17727.
- [61] YAN W, SONG X Y, WU D, *et al.* Nonreciprocal optical routing via a magneto-optical phased array on silicon [J]. *Photonics Research*, 2025, 13(9): 2432.
- [62] HU H M, YUE W Q, LI J, *et al.* Row-gated optical phased array using integrated diodes for 3D structured light imaging [J]. *Optica*, 2025, 12(6): 789.
- [63] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, *et al.* Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493: 195-199.
- [64] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, *et al.* Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 7700108.
- [65] MILLER S A, CHANG Y C, PHARE C T, *et al.* Large-scale optical phased array using a low-power multi-pass silicon photonic platform [J]. *Optica*, 2020, 7(1): 3.
- [66] MARTIN A, DODANE D, LEVIANDIER L, *et al.* Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [67] TYLER N A, FOWLER D, MALHOUITRE S, *et al.* SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5851-5858.
- [68] VAN ACOLEYEN K, BOGAERTS W, JÁGERSKÁ J, *et al.* Off-chip beam steering with

a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (9) : 1477-1479.

[69] BHARGAVA P, KIM T, POULTON C V, *et*

al. Fully integrated coherent LiDAR in 3D-integrated silicon photonics/65nm CMOS [C]. 2019 *Symposium on VLSI Circuits*. June 9-14, 2019, Kyoto, Japan. IEEE, 2019: C262-C263.

作者简介:



白晨旭(2001—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事硅基光波导器件方面的研究。E-mail: chenxubai0312@163.com

通讯作者:



严 巍(1996—),男,江苏苏州人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事硅基光波导、AR衍射光波导器件方面的研究。E-mail: weiyao085@suda.edu.cn