

激光与光电子学进展

从光学相控阵技术展望激光通信的发展趋势(特邀)

宋义伟*, 胡景森**, 李贝, 柏刚, 田永明, 张灿, 钱金杰

上海航天技术研究院上海无线电设备研究所, 上海 200090

摘要 光学相控阵技术通过调节和控制光学天线阵元的相对相位, 可实现高速灵活的定向辐射, 逐渐发展成为非机械式光束控制的主流方案。其兼具功耗低、集成度高、体积小、重量轻等优点, 可以同时控制多波束的收发, 满足未来一对多激光通信的迫切发展需求。本文主要针对光学相控阵技术当前三种主流的技术方案在激光通信领域的应用现状进行阐述, 对比给出了基于液晶、微机电系统和集成光波导平台的技术特点和应用优劣。最后针对光学相控阵技术在激光通信领域的未来发展, 给出了笔者的一些思考与建议。

关键词 激光通信; 光学相控阵; 液晶; 微机电系统; 集成光波导

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240852

Outlook on Development of Laser Communication from Perspective of Optical Phased Array Technology (Invited)

Song Yiwei*, Hu Jingsen**, Li Bei, Bai Gang, Tian Yongming, Zhang Chan, Qian Jinjie

Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai Radio Equipment Research Institute,
Shanghai 200090, China

Abstract Optical phased array technology can achieve high-speed and flexible directional radiation by adjusting and controlling the relative phase of optical antenna elements, gradually developing into the mainstream solution of non-mechanical beam control. It has the advantages of low power consumption, high integration, small size, and light weight, and can simultaneously control the transmission and reception of multiple beams, meeting the urgent development needs of future one-to-many laser communication. This article mainly elaborates on the current application status of three mainstream technical solutions of optical phased array technology in the field of laser communication, and compares the technical characteristics and application advantages and disadvantages based on liquid crystal, micro-electro-mechanical systems, and integrated optical waveguide platforms. Finally, some thoughts and suggestions are provided for the future development of optical phased array technology in the field of laser communication.

Key words optical communications; optical phased array; liquid crystal; micro-electro-mechanical system; integrated optical waveguide

1 引言

光学相控阵(OPA)技术是一个很宽泛的概念, 正如《物理学词典》中给出的定义, 它是一种相位补偿(或延时补偿)基阵, 既可用以接收, 也可用以发射。因此, 符合上述定义的器件、设备、系统均可称为光学相控阵的一种形式, 而不是局限于某种特定的器件或技术。近年来, 随着高光束质量激光光源、电子工程技术、材料科学以及光电子学器件等领域的飞速发展, 形式丰

富的光学相控阵技术逐渐完善并在空间光通信、高分辨率探测以及智能驾驶等领域崭露头角^[1-7]。

卫星激光通信具有可用带宽大、通信速率高、保密性强等显著优势, 是星间高速通信与组网的重要手段^[8]。随着我国低轨互联网星座建设的加快, 卫星激光通信正朝着高速率、高鲁棒性网状网构建等方向发展, 迫切需要通信载荷在高速率、小型化、轻量化、低功耗等方面取得突破^[9]。现在低轨广泛应用的激光通信载荷采用机械扫描机制, 需配备高精度多级跟踪伺服

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-01-20; 录用日期: 2024-02-21; 网络首发日期: 2024-02-29

基金项目: 上海市科委启明星项目(扬帆专项)(22YF1416700)

通信作者: *songyiwei@163.com; **hujingsen19@mailsucas.ac.cn

系统和精密光学系统,只能实现星间点对点通信,需要在单颗卫星上安装多个终端才能搭建通信网络,导致卫星体积增大,质量增加。在星间建链时,由于机械扫描系统结构限制,光束扫描速度慢,建链通常需要花费较长时间,无法实现快速建链^[10]。基于光学相控阵技术的激光通信载荷通过相位控制实现波束扫描,扫描速度快、支持多波束通信,逐渐成为非机械式光束控制技术的主流方案。加快推动光学相控阵技术发展,重点攻克以光学相控阵为解决方案的空间激光多波束通信关键技术,对我国激光通信的跨越发展具有重要的现实意义。

基于传统空间光通信的不足之处,国内外开展了将 OPA 应用到空间光通信中的研究。OPA 具有稳定性好、动态聚焦/散焦能力强、功耗低、体积小、质量轻等特点,在空间光通信领域有较好的应用前景。

OPA 目前主要的研究对象可分为三种类型:液晶光学相控阵(LC-OPA)、基于微机电系统(MEMS)的光学相控阵和集成光波导光学相控阵^[11]。

2 光学相控阵主要技术特点

光学相控阵是微波相控阵应用在光波频段的推广,由于其以激光为载体,具有较窄的波束,因而在不受传统无线电波和微波影响的同时具有良好的隐蔽性和保密性。光学相控阵技术采用电子可编程方式控制光学孔径上的相位分布来改变光束的方向和形状,使光束波前在设定的方向上彼此同相以获得干涉,能够提供可编程随机无惯性波束角度调整,具有如下几方面的技术特点。

1) 快速建链,快速组网

光学相控阵的快速波束指向能力颠覆了传统光学指向调整机构技术。不同于机械扫描系统只能按照一定的规律进行连续扫描,光学相控阵采用电子可编程方式控制光学孔径上的相位分布来改变光束的方向和形状,波束可快速跳变,扫描速度可达微秒量级^[12-14]。光学相控阵的快速波束指向能力可实现激光通信链路的快速建立和切换,为高动态相对运动平台之间的高速通信链路保持提供保障,可提升通信网络的可靠性和灵活性。

2) 支持多链路并行通信

光学相控阵的同时多波束能力对于同时建立多个可靠链路,并快速选择一个信道质量最佳、时延最小的通信链路至关重要。传统机械光束扫描系统只能靠增加多个光学头实现对目标的同时通信,而光学相控阵采用信号处理技术可以形成多波束,实现多个目标的同时通信^[15-16]。如果出现链路中断,光学相控阵的同时多波束可快速通过备份冗余链路实现通信回路保护,确保通信的实时性和连续性。

3) 系统体积小、成本低

当前新型光学相控阵可采用单片集成的微纳工艺

制备,不需摆镜、转台等机械式旋转部件,比原有的光学指向调整机构尺寸和质量减小几个数量级^[13,17-18],且具有更长的寿命、更低的成本,并为大规模加工、生产、测试和使用提供了可能,大幅减小了激光通信终端对平台资源需求,便于在多种卫星平台和空间飞行器上使用。

3 光学相控阵在空间激光通信领域应用现状

国内外针对光学相控阵的研究和探索,主要分为液晶光学相控阵、MEMS 光学相控阵和光波导光学相控阵三种技术体制。

3.1 液晶光学相控阵

液晶光学相控阵具有分辨率高、可编程控制、轻便灵活等突出特点,在小视场高精度光束偏转控制领域具有极其广泛的应用前景。如图 1^[19]所示,液晶光学相控阵中每个电极和它所控区域的液晶组成一个相控阵元,当激光入射到液晶光学相控阵时对各个阵元施加不同的驱动电压,使液晶分子发生旋转,改变液晶的有效折射率,进而改变出射面上的光相位分布,在相邻阵元间相位差相同条件下,使光在指定方向上形成远场干涉加强,实现光束随机指向控制。

国内外对液晶光学相控阵光束偏转的研究起步较早,对液晶相控阵光束偏转和发射效率的研究已经相对成熟。2020 年,中国科学院长春光学精密机械与物理

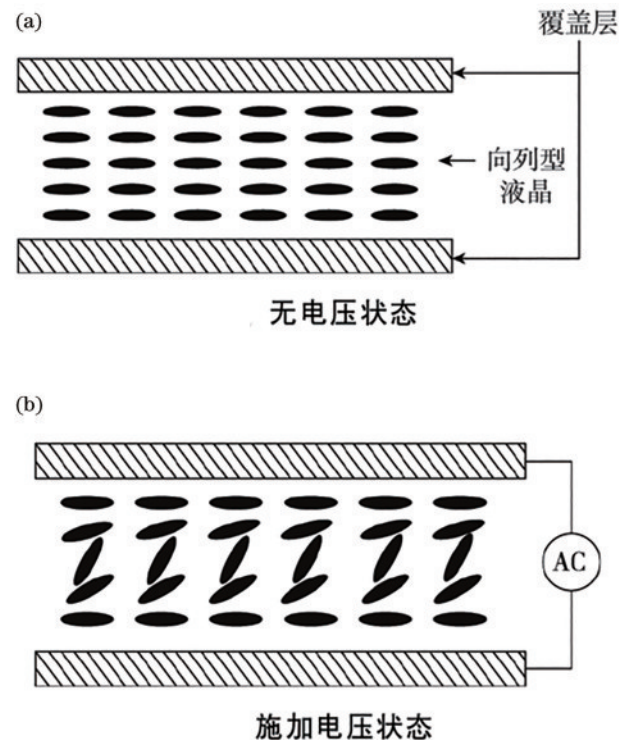


图 1 液晶光学相控阵光束偏转原理^[19]。(a)无电压状态;

(b)施加电压状态

Fig. 1 Beam deflection principle of liquid crystal optical phased array^[19]. (a) No voltage condition; (b) applied voltage condition

研究所的赵志伟^[20]将光栅周期为 8 μm 的液晶光栅级联使用,级联后 1550 nm 波长+1 级和-1 级的衍射效率分别为 83% 和 73%,此时光束偏转角为 31°,解决了单个液晶难以实现大角度偏转和高衍射效率的问题。

2022 年,He 等^[21]提出了一种新型液晶堆叠相控阵(SOPA),如图 2 所示。该 SOPA 共有三层,偏转

角范围为-100~100 μrad。在该偏转范围内,所有实验记录的发射效率均超过 90%,发射角度切换时间均小于 10 ms,最快切换时间仅为 1.52 ms。偏转角最大可至±260 μrad,但此时的发射效率将会降至 70%(图 3)。

2022 年,西安空间无线电技术研究所袁方等^[22]采

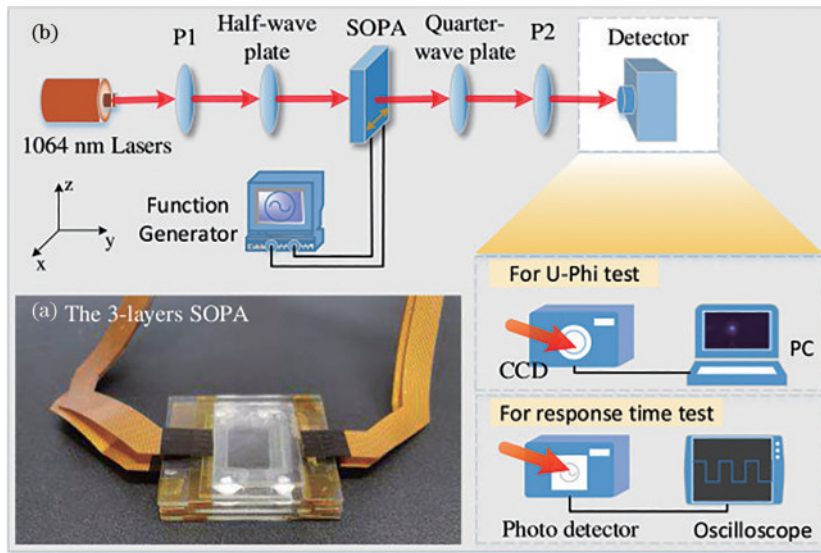


图 2 实验原理图与 3 层堆叠光学相控阵^[21]。(a) 3 层堆叠光学相控阵; (b) 响应时间测试方法原理图

Fig. 2 Schematic of the experiment and the 3-layer stackable optical phased array^[21]. (a) The 3-layer stackable optical phased array; (b) schematic of the method of measuring response time

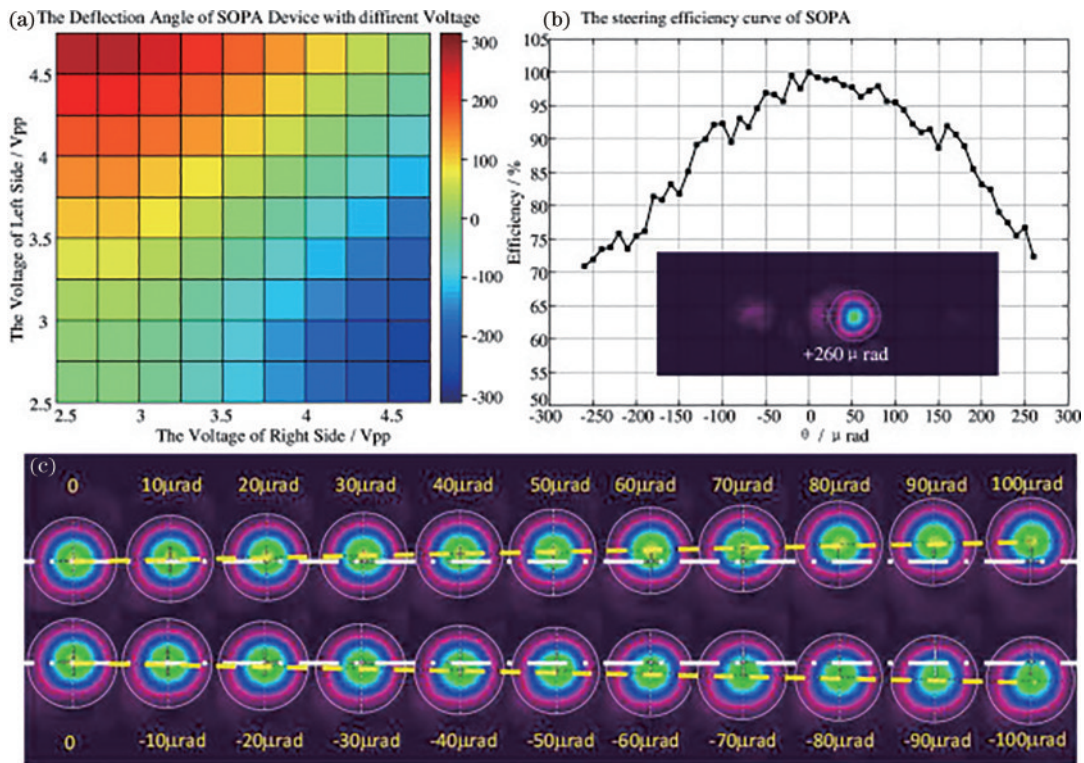


图 3 光束偏转实验数据^[21]。(a) 左右两侧电压与偏转角的关系; (b) SOPA 发射效率曲线; (c) CCD 相机拍摄得到的-100~100 μrad 偏转角范围内的光斑照片

Fig. 3 Experimental data of beam deflection^[21]. (a) Relationship between the voltage on the left and right sides and the deflection angle; (b) steering efficiency curve of SOPA; (c) photos of the spot from a CCD camera in the range of -100 μrad to 100 μrad deflection angle

用两种偏振全息光路分别实现大周期和小周期的液晶聚合物偏振光栅的制备,获得的液晶聚合物偏振光栅最高衍射效率达到 99.3% (图 4)。级联两个液晶聚合

物偏振光栅,再层叠液晶聚合物/铁电液晶/液晶聚合物波片组,实现了更大角度范围的偏转,验证了 70 μs 的 4 通道光束快速扫描。

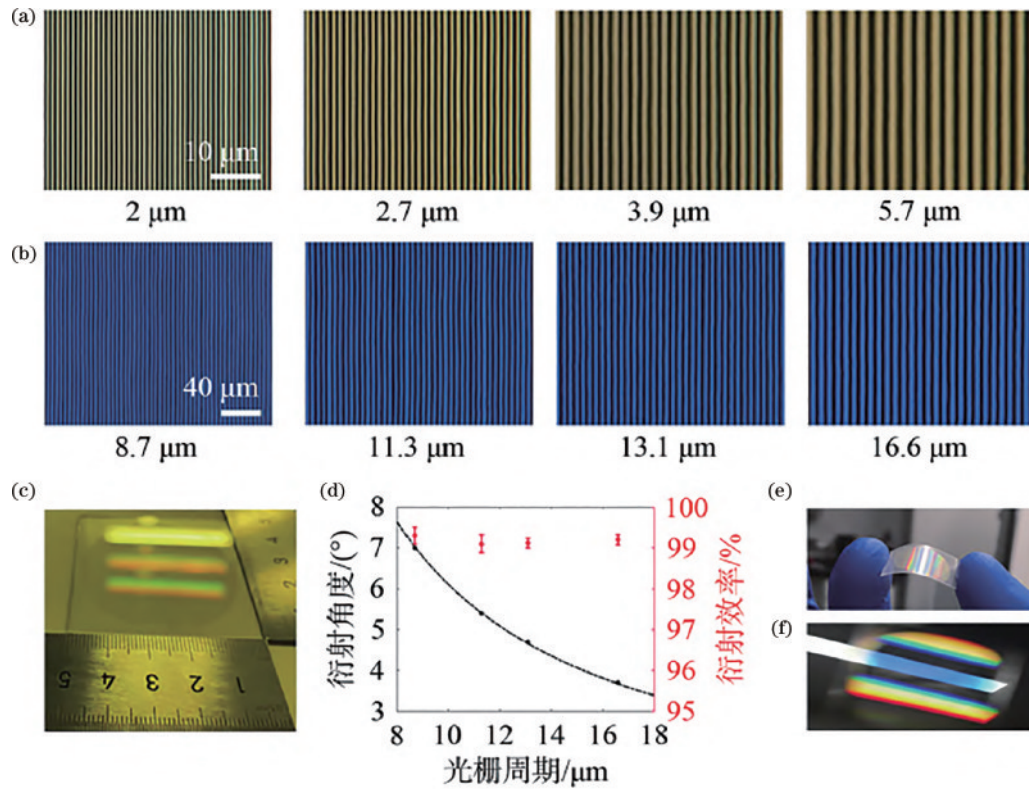


图 4 液晶聚合物偏振光栅^[22]。(a) 偏光显微镜下的液晶聚合物偏振光栅 (633 nm); (b) 偏光显微镜下的液晶聚合物偏振光栅 (1064 nm); (c) 液晶聚合物偏振光栅实物图; (d) 偏振光栅的衍射效率和衍射角度测试数据和光栅方程曲线 (1064 nm); (e) 柔性偏振光栅; (f) 样品对日光灯的衍射效果图

Fig. 4 Liquid-crystal-polymer based polarization gratings^[22]. (a) Polarizing microscope image of liquid-crystal-polymer based polarization gratings (633 nm); (b) polarizing microscope image of liquid-crystal-polymer based polarization gratings (1064 nm); (c) physical photos of the liquid-crystal-polymer based polarization grating (1064 nm); (d) diffraction efficiency and diffraction angle test data and grating equation curves for polarization grating (1064 nm); (e) flexible polarization grating; (f) white light diffraction of the sample

传统机械式激光控制体制不仅无法实现快速捷变的波束控制,也无法同时生成多个目标波束,光学相控阵系统的一个重要应用需求就是同时生成多个可配置光束,利用一点对多点和多点对多点的同时激光传输能力,从而可以在空间中建立起高效的激光通信网络。LC-OPA 是 OPA 中多波束发射技术较为成熟的一类。

2019 年,Guo 等^[23]提出了一种一对二终端通信跟瞄方法 (图 5)。该方法基于液晶光学相控阵的光束控制装置,能够实现双波束生成和连续的光束偏转。通过搭建实验系统,模拟了中继卫星终端与用户终端之间的一对二通信链路。实验表明双终端跟踪精度好,跟踪精度优于 50 μrad ,满足粗跟踪需求。

2022 年,Liang 等^[24]设计了一种基于 LC-OPA 的四通道并行波束偏转天线,该天线由基于级联液晶极化光栅的粗跟踪子系统和基于 LC-OPA 的精细跟踪子系统组成。该光学天线的偏转分辨率为 20 μrad ,二

维偏转覆盖范围为 $\pm 12^\circ$ 。光学孔径为 80 mm \times 80 mm,由 2 \times 2 个子孔径构成,每个子孔径服务于单个波长光束。2023 年,孙婉晴等^[25]提出了一种基于多光束生成方法的多目标同步跟踪和瞄准方案,该方案使用液晶空间光调制器偏转光束进行跟瞄,使用相机作为位置接收探测器。该团队设计并搭建了双目标的同步光束跟踪和瞄准实验系统。当目标分别以 2、3、4、5 mm/s 的速度移动时,光束跟瞄的测量均方根误差分别为 2.7045、5.6014、8.3823、11.9011 μrad ,并在 $-57.9 \sim +57.9$ mrad 的视场范围内实现对目标的光束跟瞄,系统的跟瞄误差小于 20 μrad 。

液晶光学相控阵发展较早,其工作电压较低,但是扫描范围小,想要实现大范围扫描需要级联其他光学元件,并且液晶的电光效应来自于液晶分子在电场作用下的重新取向,液晶分子的重新取向是一个非常缓慢的过程,因而这种光学相控阵响应较慢,限制了其在激光通信等对光束扫描范围和扫描速度要求比较高的

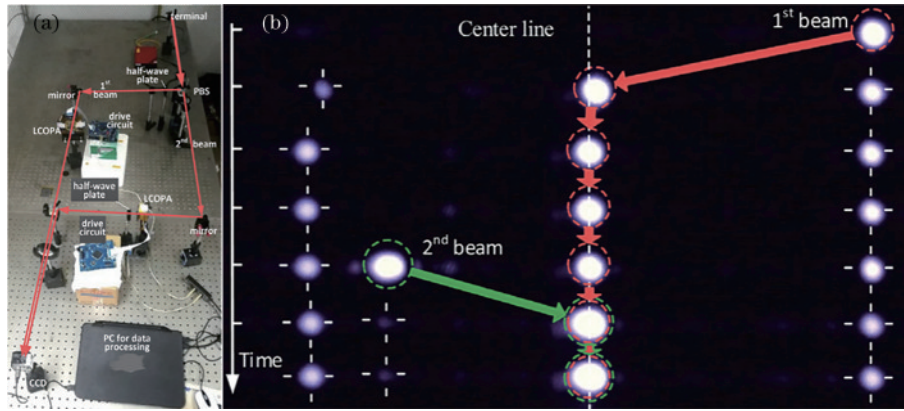


图 5 双终端通信实验^[23]。(a)双终端跟踪实验系统；(b)双终端跟踪实验远场光斑图

Fig. 5 Dual-terminal communication experiments^[23]. (a) Experiment system of dual-terminal tracking; (b) far-field spots image of double-terminal tracking experiment

场合应用,而且液晶无法与激光通信常用光电元件如光放大器、激光器、探测器等进行进一步集成。

3.2 MEMS 光学相控阵

MEMS 微振镜基本原理是利用静电力或者电磁力使得微型反射镜发生偏转,由此使得入射到镜面上的光束发生偏折。将 MEMS 和相控阵技术结合,通过微结构的位移变化实现相位调制,从而达到光束偏转控制。

2017 年,加州大学伯克利分校 Wang 等^[26]提出了基于 MEMS 的光学相控阵,图 6 为扫描电镜(SEM)图。该相控阵实现了 $2.4 \mu\text{m}$ 的小单元间距,在 1550 nm 波长可以实现 40° 的大角度光束偏转,并且实现了 $2 \mu\text{s}$ 的响应时间。

2019 年,Wang 等^[27]又发布基于 MEMS 光栅光学相控阵光束二维扫描技术研究成果(图 7),其采用新型 MEMS 驱动光栅移相器,实现了 160×160 阵列光学相控阵,二维扫描范围 $6.6^\circ \times 4.4^\circ$,光束束散角为 $0.042^\circ \times 0.031^\circ$,发射效率优于 85% 。

利用 MEMS 的光束偏转特点,研究人员使用 MEMS 进行了通信系统的设计。2017 年,宾夕法尼亚大学的 Deng 等^[28]利用 MEMS 设计了一套空间光跟瞄系统(图 8),利用此跟瞄系统,实现了 10 Gbit/s 速率无误码的空间光通信。该跟瞄系统最大跟瞄范围可达 14° 且跟瞄误差为 0.03° 。当未使用此跟瞄系统时,发射光束偏移 0.03° ,接收功率产生了一 29 dB 的衰减,通信误码率增加到 10^{-4} ,继续扩大扫描角度后通信断链。使用此跟瞄系统后,在 4.2° 光束偏转范围内,都可以实现稳定的 10 Gbit/s 无误码率通信。在 4.2° 的光束偏转范围内,接收功率最大衰减仅有 2 dB 。

2022 年,中国科学院上海光学精密机械研究所实现了基于 MEMS 2×2 微镜阵列的光学相控阵激光通信^[29],其采用宏观 MEMS 反射镜,单光束直径为 3 mm ,系统相控扫描角度为 $\pm 20 \text{ mrad}$ (图 9)。利用此系统,团队实现了 625 Mbit/s 的二进制相移键控

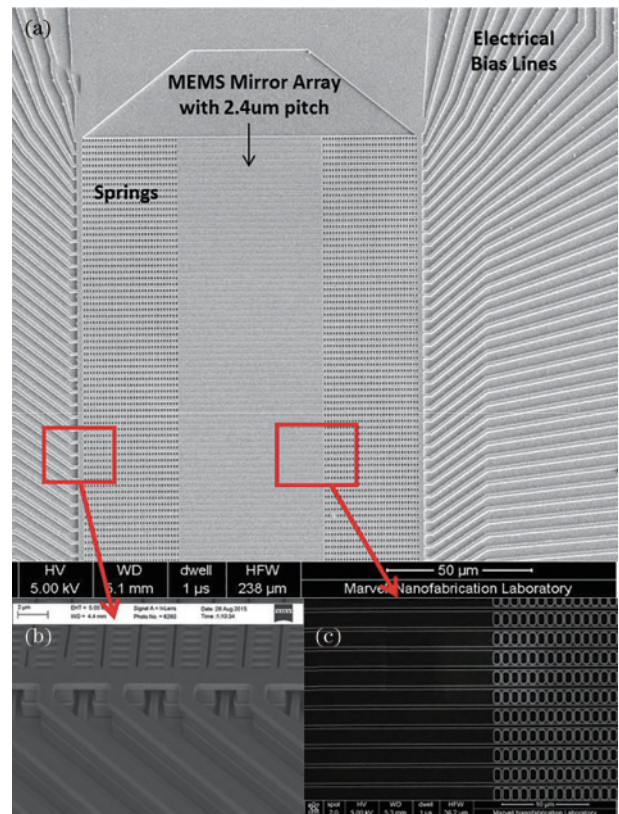


图 6 MEMS OPA 的 SEM 图^[26]。(a)微反射镜阵列的俯视图；(b)锚点区特写；(c)反射镜和穿孔弹簧特写

Fig. 6 SEMs of the MEMS OPA^[26]. (a) Top view of the micromirrors arrays; (b) close-up view of the anchor area; (c) close-up view of the mirrors and perforated springs

通信。

基于 MEMS 器件的光学相控阵具有扫描速度快、能耗低的特点,但是扫描角度小,同时其力学性能差,限制了其在卫星激光通信领域应用。

3.3 集成光波导相控阵

集成光波导光学相控阵是近十几年发展起来的一种新型光学相控阵技术,其通过热光效应或电光效应来改变相控阵单元折射率,从而控制入射光的相位延

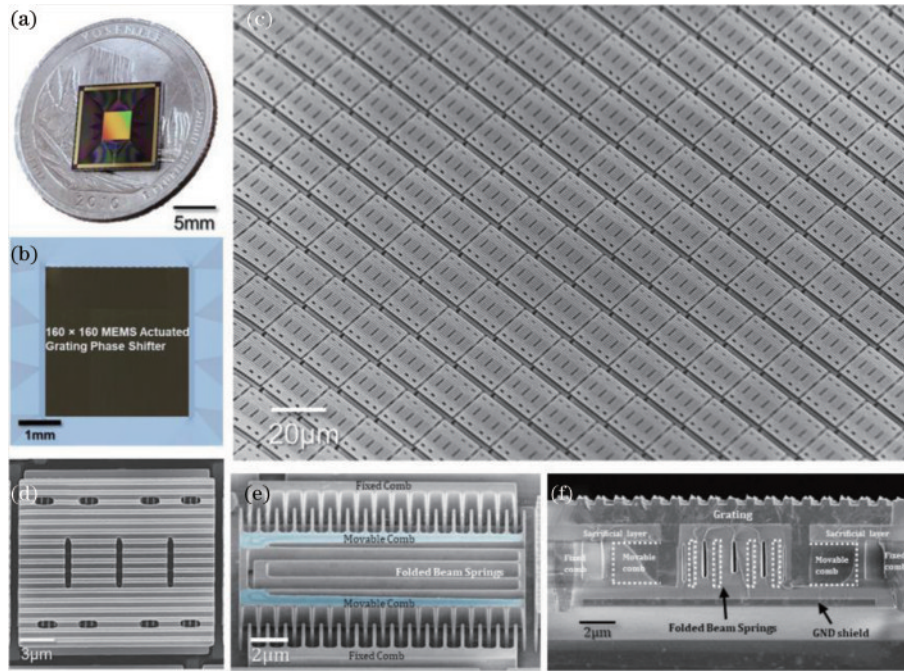


图 7 加州大学课题组制备的 160×160 MEMS 相控阵器件实物图^[27]。(a) 硬币上 OPA 的照片；(b) 光学发射孔径的显微照片；(c) OPA 的 SEM 图；(d) MEMS 衍射单元的特写；(e) 光栅下方的隐藏梳式驱动器；(f) OPA 单元横截面的 SEM 图
 Fig. 7 Photos of 160×160 MEMS phased array device prepared by the University of California research group^[27]. (a) Photo of the OPA on a coin; (b) micrograph of the optical aperture; (c) SEM of OPA; (d) close-up view of a single MEMS grating element; (e) hidden combdrive actuator underneath the grating; (f) cross-sectional SEM of an OPA unit

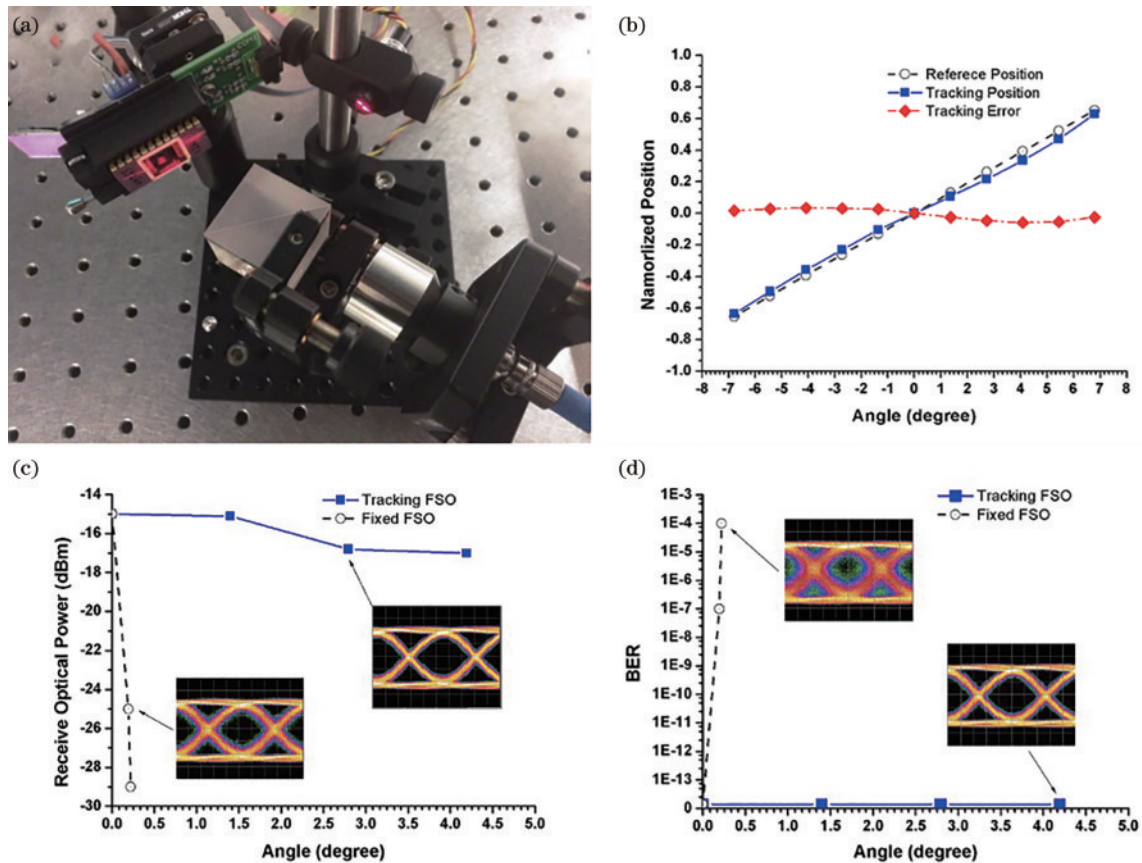


图 8 高精度跟瞄系统与测试结果^[28]。(a) 高精度跟瞄系统；(b) 跟瞄精度曲线；(c) 使用与不使用跟瞄系统接收功率对比；(d) 使用与不使用跟瞄系统通信误比特率对比
 Fig. 8 High-precision tracking system and test results^[28]. (a) High-precision tracking system; (b) curves of tracking accuracy; (c) comparison of the receiving power with and without tracking system; (d) comparison of BER with and without tracking system

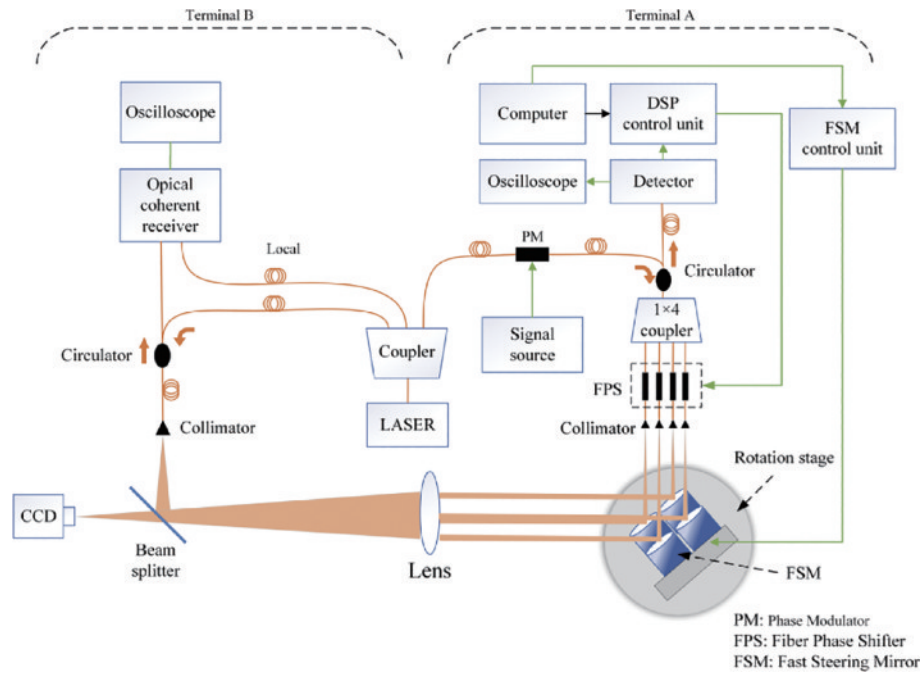


图 9 基于 MEMS 微镜阵列的激光通信系统^[29]

Fig. 9 Laser communication system based on MEMS OPA^[29]

迟,使发射的光束只在指定方向上发生相互干涉,从而产生一束高强度光束。通过控制各相移器的外加电/热场,可以得到相位按照一定规律分布的出射光束,实现光束在远场的偏转,进而实现光束扫描。集成光波导光学相控阵是光学相控阵的一个重要发展方向,它具有响应速度快、控制电压低、扫描角度大等特点,还可以通过阵列复用和子孔径划分等技术手段,实现多波束控制^[18]。随着半导体工艺的进步,尤其是与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺线相兼容的绝缘衬底上硅(SOI)技术的发展,为开展大规模的硅光子集成

提供了坚实的基础,使得集成光波导技术在光学相控阵领域显示出巨大的发展潜力。

集成光波导 OPA 原理如图 10 所示,激光光源输出的光经过光纤输入至端面耦合器,由端面耦合器耦合至 OPA 内。耦合进 OPA 的光被光学功分网络均匀分为多路后输入移相器。移相器通过电热效应或者电光效应来改变相控单元的折射率,通过控制入射光的相位延迟使发射的光束只在指定方向上发生相互干涉,产生特定指向的光束,控制光束衍射角度,实现光束在远场的偏转,进而实现光束扫描。

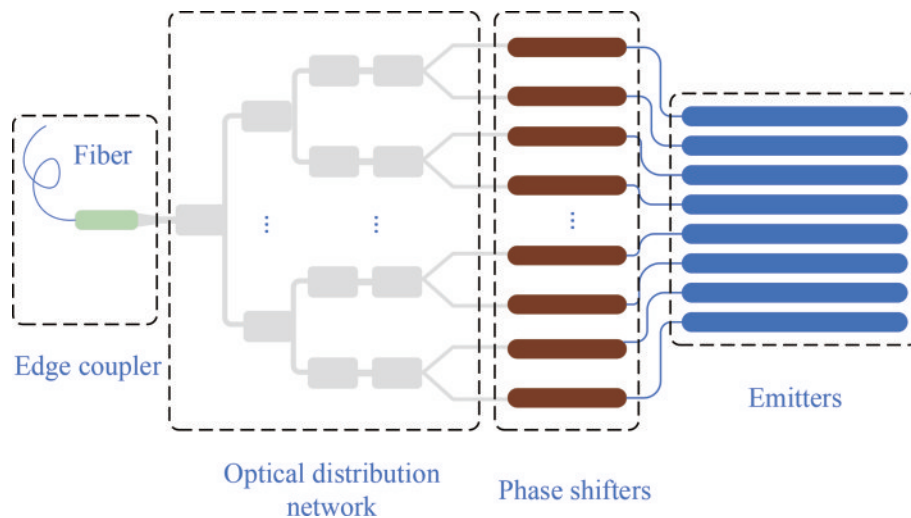


图 10 集成光波导 OPA 原理图

Fig. 10 Schematic diagram of integrated optical waveguide OPA

从概念上讲,为实现二维光束的扫描,最直接的方法就是在一维光学相控阵的基础上堆叠形成一个二维

发射阵列,并对每个单元进行独立控制。但是由于原理和工艺技术限制,二维发射阵列天线数量很难增多,

天线间距很难缩小,暂时还无法实现大阵列、小天线间隔的二维光学相控阵。由于上述原因的限制,现在的二维光学相控阵多为小发射孔径,只能实现静态或者小范围光束扫描,并不适用于空间光通信。当前多数的光学相控阵采用结合相位和波长调谐的方式来实现二维扫描。光栅天线具有色散特性,即光栅天线发射波长的出射角取决于光栅方程对应波长的衍射角。通过调整可调谐光源的输出波长,即可在一个维度控制

光束扫描;同时结合相位调制,即可实现另一个维度的光束扫描。

2020年,哥伦比亚大学 Miller 等^[30]提出了一种低移相功耗多通道硅基光学相控阵(图 11)。该相控阵移相功率仅有 $1.7 \text{ mW}/\pi$,整体功耗仅 1.9 W 。整个相控阵共有 512 个单元,扫描角度为 $70^\circ \times 6^\circ$,远场光束束散角为 $0.15^\circ \times 0.08^\circ$ 。

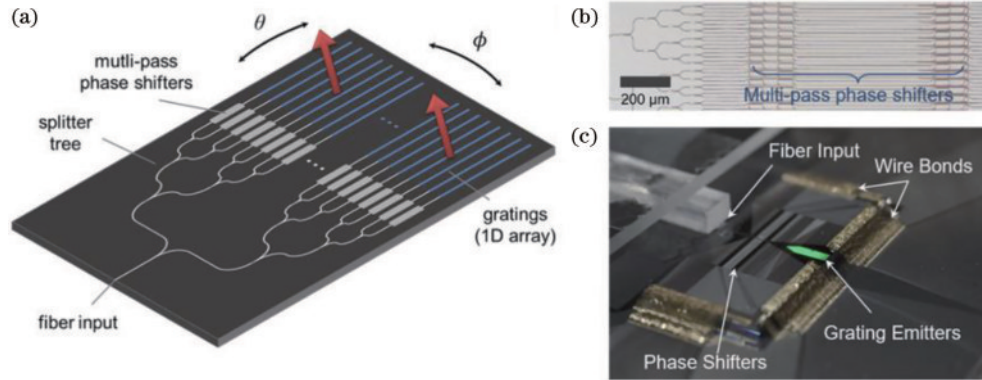


图 11 512 通道光学相控阵^[30]。(a) 光学相控阵原理图; (b) 硅光波导层光学显微图像; (c) 封装芯片实物图

Fig. 11 Optical phased array containing 512 channels^[30]. (a) Schematic diagram of optical phased array; (b) optical microscope image of the silicon waveguide layer; (c) physical photo of the packaged chip

2021 年中国科学院上海微系统与信息技术研究所 Wang 等^[31]提出了一种基于 SOI 的氮化硅集成 OPA (图 12)。相较传统硅光相控阵,氮化硅相控阵具有更高的发射功率、更低的功率传播损失和更小的光束束散角,在空间光通信中具有更好应用前景。该团队研

制出一款 1×64 阵列氮化硅基 OPA,该 OPA 在 1540 nm 波长时通过相位调谐实现一维 35.5° 的扫描,另一维度在输出波长介于 $1500 \sim 1630 \text{ nm}$ 变化时实现 22.7° 的扫描,在 1540 nm 处远场辐射光束束散角为 $0.69^\circ \times 0.075^\circ$ 。

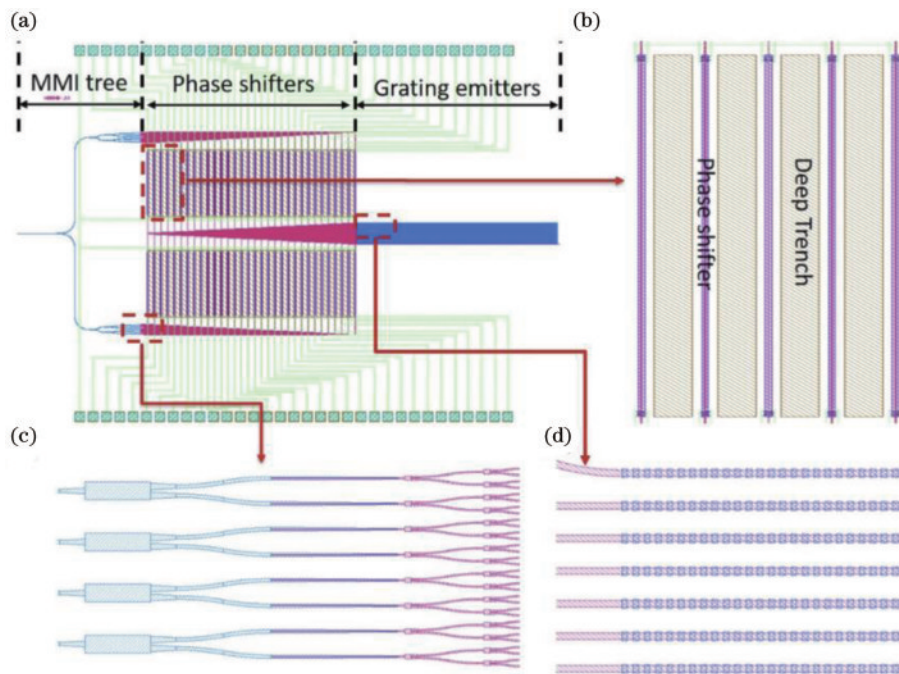


图 12 氮化硅集成光学相控阵^[31]。(a) OPA 的布局; (b) 移相器放大图; (c) 多模干涉器的最后三级; (d) 发射阵列放大图

Fig. 12 Silicon nitride integrated optical phased array^[31]. (a) Layout of the OPA; (b) enlarged image of the phase shifters; (c) last three stages of multi-mode interferometers; (d) enlarged image of the emitters

2021年北京卫星信息工程研究所He等^[32]提出了一种阵元非均匀分布的OPA(图13),该OPA实现了低旁瓣电平和大光束偏转角。该OPA具有1024个单元,可以实现 $\pm 60^\circ$ 的光束偏转。当波束偏转角为 0° 、

20° 、 30° 、 45° 和 60° 时,通过优化相位分布得到的旁瓣电平分别为 -21.35 dB、 -18.79 dB、 -17.91 dB、 -18.46 dB和 -18.51 dB。

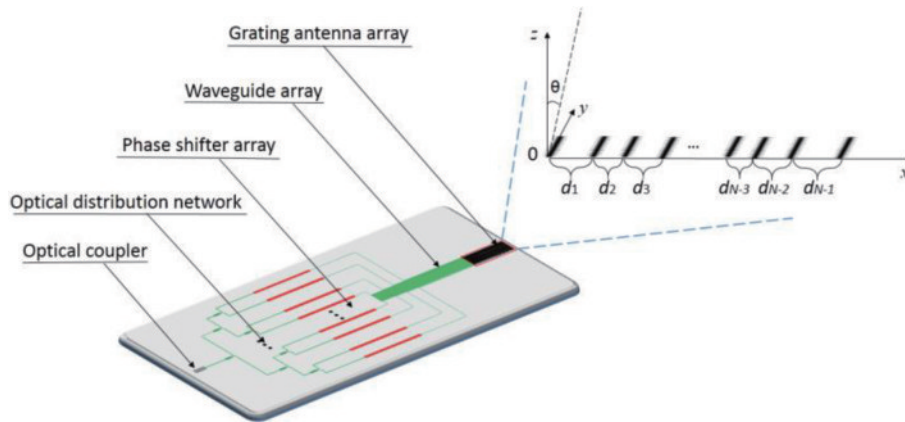


图13 非均匀分布相控阵^[32]

Fig. 13 Nonuniform phased array^[32]

2022年麻省理工学院研究团队制作出了阵列数高达8192路的光学相控阵^[33]。如图14所示,其具备 $100^\circ \times 17^\circ$ 的二维光束扫描范围,并且孔径尺寸达

$8\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,发射束散角达到 $0.01^\circ \times 0.039^\circ$ 。该阵列是目前阵元数最多、工艺最为复杂的硅基光学相控阵实物成果。

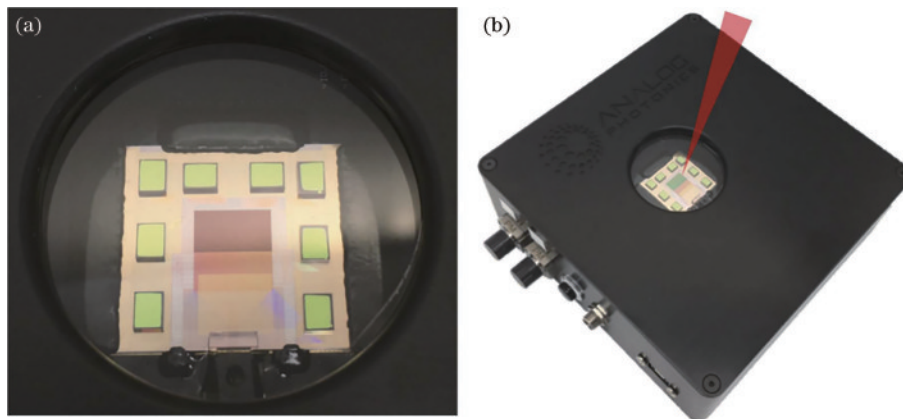


图14 8192通道光学相控阵^[33]。(a)采用倒装CMOS的OPA光子集成电路;(b)芯片封装完成后的照片

Fig. 14 8192-channel OPA^[33]. (a) OPA photonic integrated circuits with flip-chip CMOS; (b) photograph of the chip after packaged

2022年,Sun等^[34]提出了一种孔径为 $2.3\text{ mm} \times 2.3\text{ mm}$ 的大规模SiN纳米光子相控阵(图15)。通过 $650\sim 1064\text{ nm}$ 范围的波长调谐,该OPA可以实现 53.7° 的光束偏转,利用相位调谐则可实现 50° 的光束偏转。在全偏转范围内,发射束散角变化范围为 $0.03^\circ \sim 0.054^\circ$ 。

由于波长调谐偏转角会受到光源可调谐波长范围的影响,当光源无法实现宽波段调谐时,OPA的扫描角度则受到了约束。近年,由于工艺和相位校准算法的进步,完全依靠相位调谐实现大角度二维扫描的集成光波导相控阵开始崭露头角,展现出了较好的发展前景。

2022年,中国科学院长春精密机械与物理研究所Jiang等^[35]设计了一种二维OPA(图16),通过理论设

计,实现了 $N \times N$ 个单元的OPA只需 $2N$ 个移相器,减小了器件功耗和制造难度。理论分析表明,该OPA仅通过相位调谐实现 1550 nm 波长 $10.5^\circ \times 10.5^\circ$ 的扫描范围,光束半峰全宽为 1.21° ,旁瓣抑制比可达 12 dB 。

2024年,浙江大学Lian等^[36]研制了一种无衍射瓣的二维硅光子OPA(图17)。经实验测试,该OPA扫描视场为 $20^\circ \times 20^\circ$,半峰全宽约为 $0.64^\circ \times 0.59^\circ$,旁瓣抑制比优于 4.81 dB ,最高可达 10.52 dB 。

由于集成光波导光学相控阵具有光束扫描角度大、响应速度快等特点,现已有实验将集成光学相控阵应用于激光通信中。

2018年,Byrd等^[37]利用硅基光学相控阵进行了通信模拟实验(图18)。该团队首先使用两个无源硅基光学相控阵进行 50 m 静态点对点通信实验。外部输

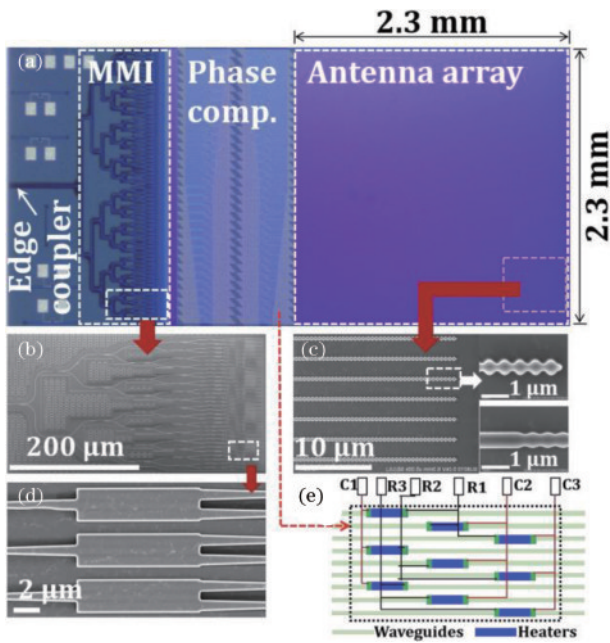


图 15 1024 通道 SiN 光学相控阵照片^[34]。(a) SiN OPA 的完整图像；(b)多模干涉器最后七级的 SEM 图像；(c)移除外包层后发射阵列的 SEM 图像；(d)多模干涉器最后一级 SEM 图像；(e)相位补偿器的设计示意图

Fig. 15 Photograph of 1024-channel SiN optical phased array^[34]. (a) Full image of the SiN OPA; (b) SEM photo of last seven stages of multi-mode interferometers; (c) SEM photo of emitters with upper cladding removed; (d) SEM photo of last stage of multi-mode interferometers; (e) schematic layout of phase compensation

入光源使用 C 波段光源,输出光经调制后由光纤进入掺铒光纤放大器(EDFA)放大至 200 mW 后耦合进发射 OPA。接收端采用相同的 OPA,接收光耦合进入 OPA 后经光纤进入 EDFA,被放大后进入光纤耦合式光电探测器中。实验结果显示,实现了 10 Gbit/s 的通信速率。该团队又进行了一对二的静态通信实验。测试系统与一对一通信实验相似,仅将发射 OPA 更换为有源 OPA,而接收采用两个无源 OPA。实验实现了 1 m 的通信距离下,一对双目标 1 Gbit/s 的传输速率,光束切换速度优于 30 μs。

2021 年,You 等^[38]利用光学相控阵实现了一对三目标的通信。通信系统如图 19 所示,由一个 OPA 发射,并使用三个相同的 OPA 进行接收。该系统在 0.15 m 的通信距离下,实现了一对三目标单向静态通信,信号调制方式为 OOK(on-off keying),传输速率为 10 Gbit/s,校正后通信误码率为 3×10^{-3} 。该系统通信距离较短,误码率较高的原因是发射 OPA 的发射束散角($2.1^\circ \times 3.6^\circ$)较大,接收 OPA 的耦合效率较低。

2022 年,北京卫星信息工程研究所搭建了“一对二”光学相控阵通信演示验证系统^[39],验证光学相控阵波束扫描切换功能,波束切换时间约为 50 ms,通信速率约为 300 Mbit/s。

2023 年,Kim 等^[40]设计了一款 1×101 的硅基 OPA。该 OPA 通过调谐 30.37 nm 的波长范围实现 15.4° 的光束扫描。通过实验成功实现了 5 m 通信距离下,静态点对点 25 Gbit/s 传输速率,无误码通信。

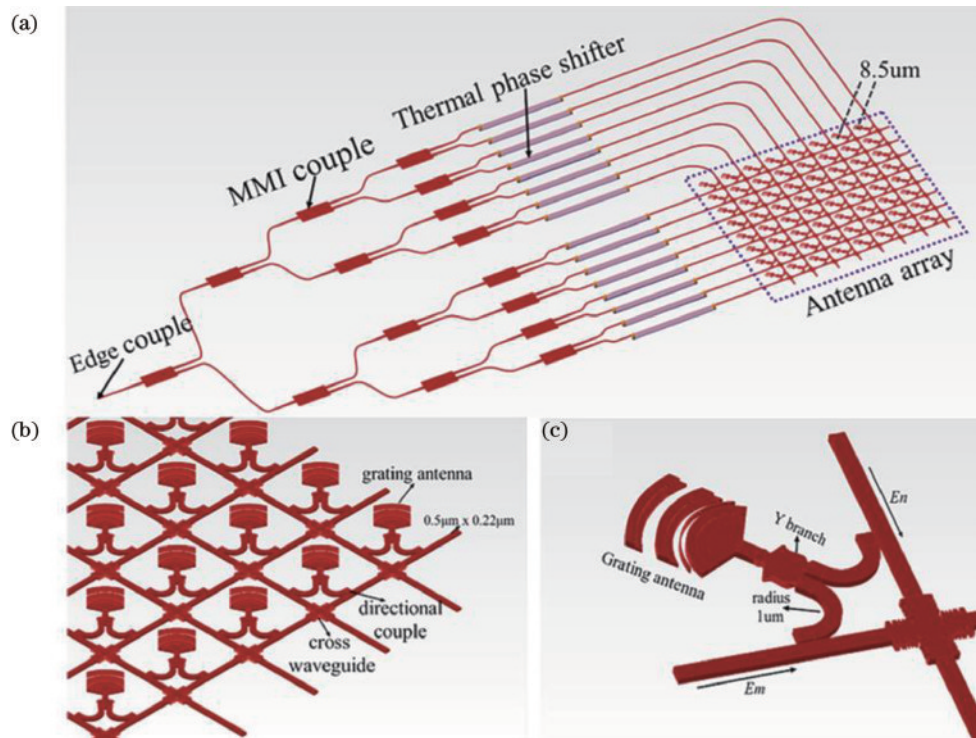


图 16 硅光子光学相控阵^[35]。(a) 仅含 16 个移相器的 8×8 光学相控阵天线；(b) 天线阵列结构示意图；(c) 天线单元结构示意图

Fig. 16 Silicon-photonics optical phased array^[35]. (a) The 8×8 optical phased array antenna with only 16 phase shifters; (b) antenna array structure diagrams; (c) antenna unit structure diagram

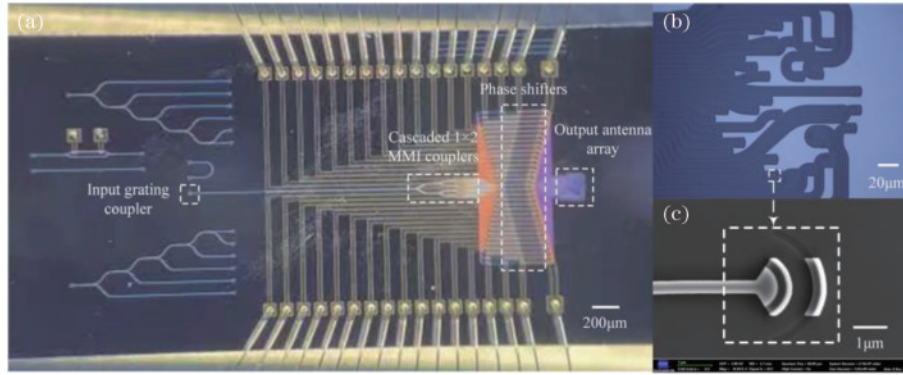


图 17 2D 光学相控阵实物图^[36]。(a) 封装芯片的显微图像；(b) 输出天线阵列的放大图像；(c) 天线单元的 SEM 图像

Fig. 17 Physical photos of the 2D optical phased array^[36]. (a) Microscope image of the packed chip; (b) zoom-in of the output antenna arrays; (c) SEM image of the antenna unit

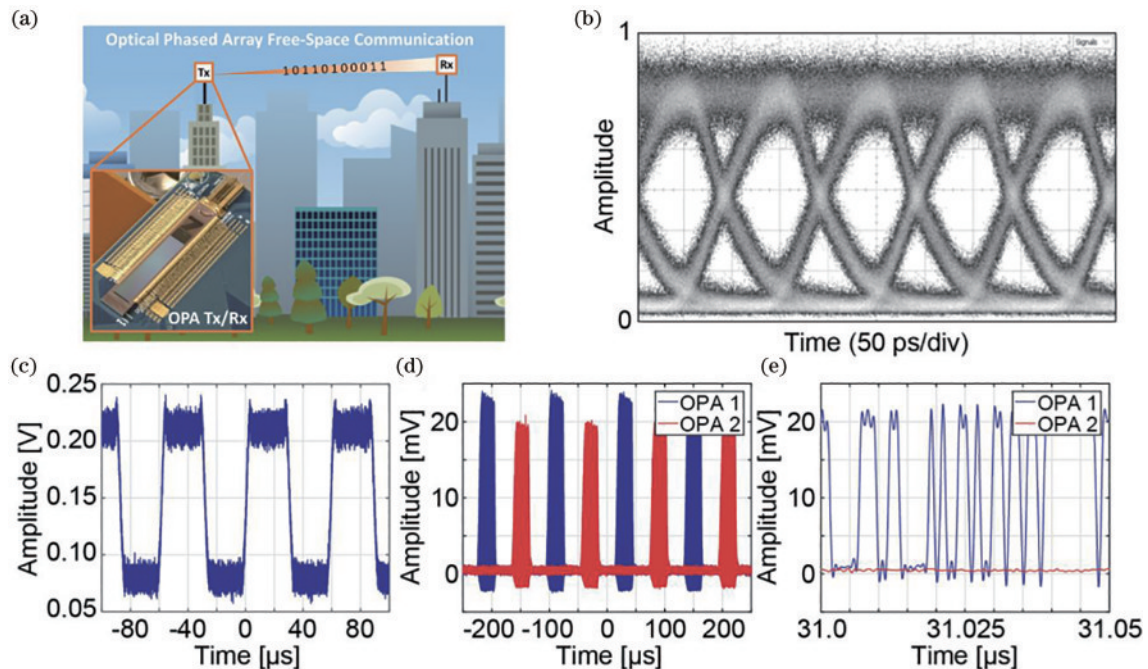


图 18 OPA 对 OPA 空间光通信^[37]。(a) OPA 对 OPA 空间光通信示例；(b) 点对点通信接收到的眼图；(c) 发射 OPA 点对点扫描时间；(d) 由 OPA1 向 OPA2 发射得到的接收数据；(e) 图(d)局部放大图像

Fig. 18 Spatial optical communication from OPA to OPA^[37]. (a) Example of OPA-to-OPA free-space optical communication; (b) received eye diagram of point-to-point communication; (c) point-to-point sweep time of the transmitter OPA; (d) received data in sequence from OPA1 to OPA2; (e) local zoom-in of Fig. (d)

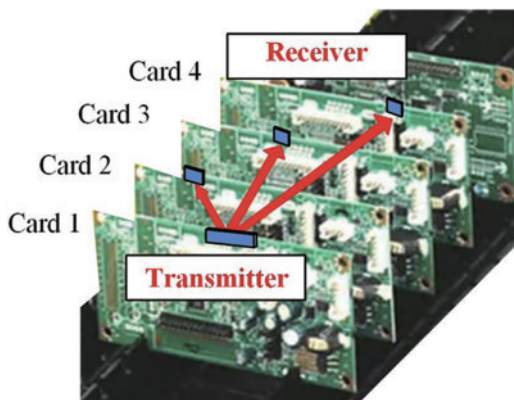
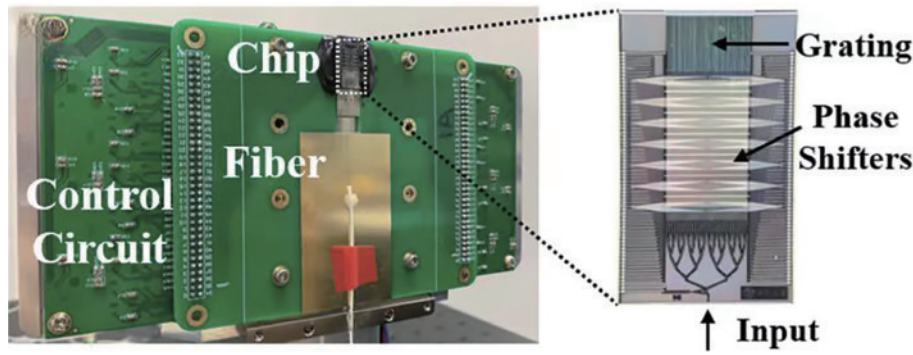


图 19 一对三目标通信^[38]

Fig. 19 One-to-three targets communication^[38]

2023 年, 吉林大学集成光电子国家重点实验室 Li 等^[41]使用 12 mm^2 大孔径集成硅-氮化硅 OPA 实现了高速率和长距离无线光通信传输(图 20)。实验表明, 该 OPA 多目标之间切换时间小于 $27 \mu\text{s}$, 光束束散角为 $0.021^\circ \times 0.029^\circ$, 通过相位调谐实现了水平方向 100° 的光束偏转。此外, 还利用此 OPA 在 54 m 自由空间距离上实现了传输速率 32 Gbit/s 、误码率 1×10^{-9} 的不归零编码信号传输。该团队还在 10 m 的自由空间距离下, 测得了水平方向上 0° 和 50° 位置处的清晰眼图, 成功实现了 50 Gbit/s 的 PAM4 编码信号传输。

同年, 上海无线电设备研究所联合外部的优势单位, 开展硅基光波导 OPA 天线的优化设计, 实现了

图 20 128 通道非均匀空间光学相控阵实物图^[41]Fig. 20 Physical photos of the 128-channel nonuniform-space optical phased array^[41]

512 阵列规模的 OPA, 压缩激光束散角小于 0.1° , 通过改变天线阵列中每个阵元的相位, 实现扫描范围大于 45° 、切换速度高达 kHz 量级的定向辐射, 并基于此 OPA 天线构建了空间光通信系统, 最终完成 10 Gbit/s 传输信号的无误码传输。

集成光波导相控阵采用了芯片集成工艺, 因此其尺寸小, 非常适合器件小型化需求。其光束偏转角度也很大, 相位调谐的一维偏转角度通常能达到 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。集成光波导 OPA 的光束发射和偏转是由电子器件控制的, 因此具有较高的响应速度, 热光相位调制通常能达到 10 kHz 左右的量级, 若采用电光相位调谐的方式则频率能更高。但由于光束分束和光波导传输中的损耗, 集成光波导 OPA 的插入损耗较高, 发射功率有限。多波束控制和高精度扫描也对算法有一定的要求, 暂时无法实现较好的多波束控制和高精度扫描。

表 1 是各类 OPA 性能的对比。综上所述可以发现, 在空间光通信中, 光学相控阵技术具备很大的应用前景。相较于 LC-OPA 和 MEMS-OPA, 集成光波导 OPA 的特点更加全面和均衡, 可扩展性强, 因此更适合应用到空间光通信中。

4 结束语

光学相控阵技术在空间激光通信领域具有广阔的应用前景, 其技术特征满足未来轻小型、低成本、高可

靠光束成型扫描需求, 其技术颠覆传统激光通信终端复杂度高、集成度低, 依赖于对机械部件、光学系统的控制精度, 为未来组网星座高速通信、精密测量和高精度时频同步应用提供有力支撑。展望未来, 从光学相控阵技术的实际应用到系统集成将聚焦在以下方面:

1) 加快二维集成光学相控阵技术攻关

当前国内外研究最多的是一维集成光学相控阵, 其通过波长调谐和相位调制实现二维扫描, 但调制过程中会带来波动, 不适合远距离激光通信系统, 受限于当前的集成光学相控阵设计和工艺约束, 大规模二维光学相控阵面临插入损耗大、阵列规模难拓展等难题。在片上光互连应用的驱动下, 集成光电子学迅速发展, 各类相关光子器件的设计方法和制造工艺逐渐成熟, 受益于硅基三维异质异构集成技术的发展, 充分利用不同材料优异特性使得上述难题的解决成为可能。例如通过三维光子集成解决大规模阵列布线问题, 通过片上集成光放大器解决片上损耗大的问题等。

2) 光学相控阵系统向集成化、实用化方向发展

尽管目前光学相控阵在众多单元技术方面取得了突破, 但是距离大规模应用仍有一定差距。光学相控阵的研究尚停留在元器件、部组件级的层面, 未来的光学相控阵系统必将是多技术单元的有机结合体。系统级应用将推动光学相控阵技术的高速发展, 针对具体的应用场景 (例如星间高速激光多波束通信), 通过产

表 1 各类光学相控阵特点对比

Table 1 Comparison of various types of optical phased arrays

Types of optical phased array	Features and advantages	Problem
Liquid crystal optical phased array	1) Mature process technology 2) High transmission power 3) Low power consumption 4) Multichannel transmission and reception	1) Small effective emission aperture 2) Low response speed 3) Small beam deflection angle 4) Low integration
MEMS optical phased array	1) High emission efficiency 2) High response speed	1) Small beam deflection angle 2) Reliability of micro mechanical structures cannot be guaranteed 3) Multichannel transmission and reception
Integrated optical waveguide phased array	1) High integration and small size 2) Large beam deflection angle	1) Low transmission power 2) High loss

学研的深度合作,实现资源的优化配置和高效集约利用。寻求传统技术的突破是未来光学相控阵领域的发展趋势,同时光学相控阵也将向技术整合、系统集成的方向迈进。

3) 推动在轨技术验证,支撑应用落地

随着大规模星间光通信组网的需求越来越迫切,推动光学相控阵技术的在轨验证可为将来空间光通信终端的批量化加工、生产、测试和使用奠定研究基础,减少空间光通信终端所需的资源要求,便于在各种空间飞行器上使用,加快我国低轨互联网星座建设的进程,并为未来无线光通信网络带来颠覆性变革。

参 考 文 献

- [1] 马阎星, 吴坚, 粟荣涛, 等. 光学相控阵技术发展概述[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20201042.
Ma Y X, Wu J, Su R T, et al. Review of optical phased array techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20201042.
- [2] Anselmi N, Rocca P, Morichetti F, et al. Planar phased array design for quantum free space optical communications [C]//2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), December 4-10, 2021, Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2021: 1807-1808.
- [3] 孙艳玲, 曹瑞, 王子豪, 等. 基于光学相控阵双周期光场的关联成像[J]. 物理学报, 2021, 70(23): 234203.
Sun Y L, Cao R, Wang Z H, et al. Correlated imaging based on biperiodic light field of optical phased array[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(23): 234203.
- [4] 王帅, 孙华燕, 赵延伸, 等. 基于光学相控阵的提高 APD 阵列三维成像分辨率方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0406003.
Wang S, Sun H Y, Zhao Y Z, et al. Method of improving 3D imaging resolution of APD array based on optical phased array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 0406003.
- [5] Zhao S, Chen J Y, Shi Y C. All-solid-state beam steering via integrated optical phased array technology[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 894.
- [6] Hsu C P, Li B D, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(1): 8300416.
- [7] 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.
- [8] 王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
Wang T S, Lin P, Dong F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99.
- [9] 鲁绍文, 侯霞, 李国通, 等. 空间光通信技术发展现状及趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 39-46.
Lu S W, Hou X, Li G T, et al. Development status and trend of space optical communication technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(2): 39-46.
- [10] He J W, Dong T, Xu Y. Review of photonic integrated optical phased arrays for space optical communication[J]. IEEE Access, 2022, 8: 188284-188298.
- [11] 田博宇, 彭英楠, 胡奇琪, 等. 光学相控阵技术研究进展与发展趋势[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(4): 041001.
Tian B Y, Peng Y N, Hu Q Q, et al. Review of optical phased array technology and its applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(4): 041001.
- [12] 李富豪, 赵继广, 杜小平, 等. 基于空间光通信的光束偏转技术研究现状及趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(10): 20230004.
Li F H, Zhao J G, Du X P, et al. Research status and trend analysis of beam deflection technology based on space laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(10): 20230004.
- [13] 颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 光学相控阵技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020006.
Yan Y W, An J M, Zhang J S, et al. Research progress of optical phased array technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020006.
- [14] 王琦, 高旭峰, 张大伟, 等. 液晶光学相控阵技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700007.
Wang Q, Gao X F, Zhang D W, et al. Research progress in liquid crystal optical phased array technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700007.
- [15] 周恒超, 王春阳, 王子硕, 等. 硅基光波导光学相控阵多光束形成方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1123001.
Zhou H C, Wang C Y, Wang Z S, et al. Multibeam formation method for silicon-based optical waveguide phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1123001.
- [16] Xiao F, Kong L J. Optical multi-beam forming method based on a liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2017, 56(36): 9854-9861.
- [17] Hsu C Y, Yiu G Z, Chang Y C. Free-space applications of silicon photonics: a review[J]. Micromachines, 2022, 13(7): 990.
- [18] Guo Y J, Guo Y H, Li C S, et al. Integrated optical phased arrays for beam forming and steering[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4017.
- [19] 丁军. 光学相控阵技术最新研究进展[J]. 飞控与探测, 2020, 3(6): 11-33.
Ding J. Review of the latest research progress of the optical phased array technology[J]. Flight Control & Detection, 2020, 3(6): 11-33.
- [20] 赵志伟. 大偏转角液晶偏振光栅的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020: 104-108.
Zhao Z W. Study on liquid crystal polarization grating with large deflection angle[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

- Academy of Sciences, 2020: 104-108.
- [21] 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.
- [22] 袁方, 谭庆贵, 王光耀, 等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(11): 1411-1419.
- Yuan F, Tan Q G, Wang G Y, et al. Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419.
- [23] Guo H R, Wang X R, Liu X P, et al. Nonmechanical two-user tracking method of space-polarization division using the liquid crystal optical phased array[J]. *Optics Communications*, 2019, 447: 74-79.
- [24] Liang Z Q, Huang Y W, He X X, et al. Four-access, 80 mm aperture all phase-controlled liquid crystal laser antenna[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(10): 105113.
- [25] 孙婉晴, 王子雄, 于晋龙, 等. 基于空间光调制器的双目标同步光束跟瞄系统[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0505001.
- Sun W Q, Wang Z X, Yu J L, et al. Synchronous beam tracking and aiming system for double-target based on spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0505001.
- [26] Wang Y M, Wu M C. Micromirror based optical phased array for wide-angle beamsteering[C]//2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 22-26, 2017, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2017: 897-900.
- [27] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [28] Deng P, Kavehrad M, Lou Y. MEMS-based beam-steerable FSO communications for reconfigurable wireless data center[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10128: 1012805.
- [29] Han R L, Sun J F, Hou P P, et al. Multi-dimensional and large-sized optical phased array for space laser communication[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5026-5037.
- [30] 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): 3-6.
- [31] Wang Q, Wang S X, Jia L X, et al. Silicon nitride assisted 1×64 optical phased array based on a SOI platform[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10509-10517.
- [32] He X Y, Dong T, He J W, et al. A design approach of optical phased array with low side lobe level and wide angle steering range[J]. *Photonics*, 2021, 8(3): 63.
- [33] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Coherent LiDAR with an 8, 192-element optical phased array and driving laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 6100508.
- [34] Sun C M, Li B H, Shi W, et al. Large-scale and broadband silicon nitride optical phased arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(6): 8200710.
- [35] Jiang R T, Wang R, Guo J, et al. Design and analysis of a two-dimensional large-scale silicon-photonic optical phased array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108551.
- [36] Lian D X, Zhao S, Li W L, et al. Grating-lobe-free optical phased array with 2-D circular sparse array aperture and high-efficiency phase calibration[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(1): 29-37.
- [37] 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, September 16-20, 2018, Washington, DC. Washington, DC: OSA, 2018: FTu4E.1.
- [38] You Q, Chen D G, Xiao X, et al. 10 Gb/s free space optical interconnect with broadcasting capability enabled by a silicon integrated optical phased array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 120602.
- [39] 董涛, 贺敬文, 徐月. 光子集成相控阵技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2022: 131-135.
- Dong T, He J W, Xu Y. Photonic integrated phased array technology[M]. Beijing: China Astronautic Press, 2022: 131-135.
- [40] Kim J Y, Yoon H, Yoon J, et al. Demonstration of high-speed wireless data transmission using passive silica optical phased array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12413: 124130M.
- [41] Li Y Z, Chen B S, Na Q X, et al. High-data-rate and wide-steering-range optical wireless communication via nonuniform-space optical phased array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(15): 4933-4940.