

# 光学相控阵技术发展及其在激光雷达方向的应用思考

潘超, 于勇, 刘宇哲, 崔铮, 刘雅琦  
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

**摘要:** 光学相控阵通过对阵列天线相位的调节以改变发射波束的波前, 从而实现对发射波束的控制。光学相控阵技术在激光雷达、激光通信、高亮度激光生成、合成孔径探测等领域极具应用潜力。本文综述了液晶相控阵、微机电系统相控阵和光波导相控阵的研究进展以及优缺点, 并对激光雷达中的光波导相控阵技术进行了深入思考, 提出了光波导相控阵技术的突破方向。

**关键词:** 光学相控阵; 激光雷达; 光束扫描

中图分类号: TN248.1; TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)06-0099-13

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240513002

引用格式: 潘超, 于勇, 刘宇哲, 等. 光学相控阵技术发展及其在激光雷达方向的应用思考[J]. 遥测遥控, 2024, 45(6): 99-111.

## Optical Phased Array Technology Development and Its Application Thinking in the Direction of LIDAR

PAN Chao, YU Yong, LIU Yuzhe, CUI Zheng, LIU Yaqi  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The optical phased array controls the emission beam by adjusting the phase of the array antenna to change the wavefront, thus achieving control over the emission beam. Optical phased array technology has great potential applications in areas such as laser radar, laser communication, high-brightness laser generation, and synthetic aperture detection. This article reviews the research progress, advantages, and disadvantages of liquid crystal phased arrays, micro-electro-mechanical system phased arrays, and optical waveguide phased arrays. It also delves into the optical waveguide phased array technology in laser radar, proposing breakthrough directions for this technology.

**Keywords:** Optical phased array; Laser radar; Beam scanning

**Citation:** PAN Chao, YU Yong, LIU Yuzhe, et al. Optical Phased Array Technology Development and Its Application Thinking in the Direction of LIDAR[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(6): 99-111.

### 0 引言

光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)技术通过对主动阵列光场的相位调控, 实现光束的高精度控制和多波束智能扫描。与微波相控阵技术相比, 两种相控阵技术原理相同, 但 OPA 技术受限于光波的高频和短波特性, 直至基于钽酸锂晶体移相器的出现, 该技术可行性才被证实<sup>[1]</sup>。OPA 技术最早应用于自适应光学领域, 用于对大气链路湍流畸变进行补偿<sup>[2-4]</sup>, 以及合成孔径高分辨率探测<sup>[5]</sup>。随着材料科学、激光技术等先进科学技术

的发展, OPA 技术被逐渐推广到激光雷达、激光通信和高亮度激光等领域<sup>[6-8]</sup>。

激光雷达作为一种主动探测及测距系统, 得益于出射激光束较短的发射波长、良好的方向性和单色性等特点, 实现了高精度、高分辨率的测量与成像, 在军事科学、航空航天、精密制造等领域发挥着重要的作用<sup>[9-11]</sup>。随着半导体技术的发展, 激光雷达开始进入无人机、服务型机器人、智能医疗及地图测绘等民用领域<sup>[12-15]</sup>。近年来, 得益于无人驾驶技术的发展, 激光雷达的市场需求迅速扩大, 2023 年 Yole Intelligence 发布的报告<sup>[16]</sup>

预计, 到 2028 年, 汽车激光雷达市场将达到 44.8 亿美元, 复合年增长率高达 55%。

OPA 技术作为全固态激光雷达实现的新途径, 与机械式激光雷达<sup>[17]</sup>和混合固态激光雷达<sup>[18,19]</sup>相比, OPA 式全固态激光雷达彻底抛弃了机械部件, 具有不受惯性约束、无机械磨损的特点。与闪光 (Flash) 式全固态激光雷达<sup>[20]</sup>相比, OPA 式全固态激光雷达发出的激光信号更集中于部分区域甚至“一点”, 而整个视场范围, 具有探测距离更远、探测精度更高的特点。同时, OPA 技术与标准集成光子组件(如调制器和检测器)相结合可实现芯片级系统, 大大降低系统复杂度、重量及功耗, 解决了体积大、稳定性差等问题<sup>[21,22]</sup>。因此, OPA 技术成为最具有发展前景的激光雷达技术。

OPA 技术<sup>[23]</sup>是 OPA 式全固态激光雷达中的最核心技术。目前, OPA 技术的主要实现方式有: 液晶阵列<sup>[24,25]</sup>、微机电系统(MEMS)<sup>[26]</sup>、光波导阵列<sup>[27]</sup>等。液晶阵列具有驱动电压低、双折射率高、制造工艺成熟等优点, 是目前 OPA 技术最成熟的实现方式。用于光扫描的 MEMS 早期专注于成像应用领域<sup>[28]</sup>, 如共焦显微镜、条形码读取和指纹传感等。但随着无人驾驶技术的发展, 受扫描速度和可靠性的限制, 传统的机械式扫描激光雷达无法大规模应用, 因此, 多家激光雷达厂商采用 MEMS 微振镜替代机械式扫描结构<sup>[29,30]</sup>。光波导阵列相控阵技术最初由 Acoleyen 等人<sup>[31]</sup>于 2009 年提出, 经过十几年的发展, 其在规模、性能和系统集成方面取得了巨大进步, 并已在各种集成光子学平台中实现, 如 Si、InP、III/V 混合平台、CMOS 工艺, 以及具有集成掺铱激光器的定制工艺等。随着半导体工艺的进步, 尤其是与 CMOS 工艺线相兼容的绝缘体上硅(SOI)技术的发展<sup>[32]</sup>, 使大规模硅光子集成制造成为可能, 为光波导阵列的发展提供了巨大的助力<sup>[33,34]</sup>。

本文综述了 OPA 技术的原理、技术研究进展以及各种实现方式的优缺点。此外, 为应对激光雷达大范围覆盖、远距离探测、高帧率、小型化的发展需求, 对在激光雷达应用中的光波导相控阵技术进行了深入思考, 提出了技术突破的方向。

## 1 光学相控阵技术基本原理

相控阵技术利用阵列中每个天线间的相对相位关系, 通过构造干涉来重构电磁波的辐射场,

在不移动天线面的情况下, 对发射电磁波的偏转方向和扫描范围进行控制。光波是一种电磁波, 其空间传输严格服从麦克斯韦方程。OPA 技术通过对阵列光束进行相位控制, 使不同发射单元之间形成固定相位差, 从而使各发射单元发射的子光束, 其远场的等相位面不再垂直于初始出射方向, 各子波在远场发生干涉。最终使得光束在某一方向上因干涉加强而集中, 在其他方向上因干涉相消而减弱, 从而改变光束的传播方向, 实现扫描<sup>[35,36]</sup>。

一维 OPA 扫描基本原理, 如图 1 所示。由  $N$  个阵元组成的一维相控阵阵列, 各阵元间距相等为  $d$ , 则相邻阵列的光束到达等相位面的光程差表达式为:

$$\Delta R = d \times \sin \theta \quad (1)$$

其中,  $\theta$  为相控阵波束出射角度。OPA 相邻波束相位差与光程差  $\Delta R$  的关系为:

$$\Delta R = \frac{\Delta \varphi \times \lambda}{2\pi} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知, 相控阵相邻光束相位差与波束偏转角的关系为:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi d \times \sin \theta}{\lambda} \quad (3)$$

因此, 改变相邻波束的波前相位差, 即可实现波束指向的变化, 从而实现波束扫描。

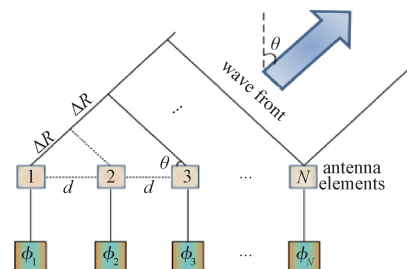


图 1 OPA 原理图<sup>[37]</sup>

Fig.1 OPA schematic diagram<sup>[37]</sup>

## 2 光学相控阵技术研究进展

### 2.1 液晶相控阵

液晶具有较高的双折射率, 可以在较低的驱动电压下实现较大的光程差。液晶相控阵通过调节相邻液晶阵元的相位差, 改变出射光的等相位面来实现光束偏转, 其光束偏转原理如图 2 所示。为使相邻液晶阵元达到足够的相位差, 液晶移相器需要具有足够的厚度, 这也导致液晶移相器响

应时间和光损耗的增大。目前,液晶移相器的响应时间约为ms量级,对应频率为kHz量级,采用双频液晶技术可将频率提升到10 kHz量级,但仍很难满足激光雷达对光束快速指向的需求。另外,液晶移

相器的相位回扫现象和非线性效应对偏转效率也有较大影响,尤其在大角度偏转时,相位回扫引起的边缘效应导致的效率下降尤为严重,角度偏转误差增加,这也限制了液晶的偏转角度范围。

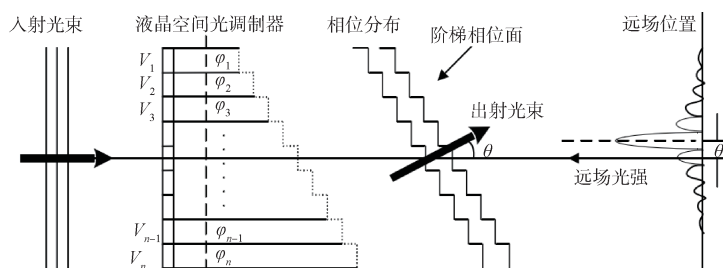


图2 液晶空间光调制器光束偏转原理图

Fig. 2 Schematic diagram of beam deflection of liquid crystal spatial light modulator

美国Meadowlark公司陆续推出多款液晶相控阵,如图3所示。2016年,推出的ODPDM512型<sup>[38]</sup>液晶相控阵,液晶微显示器分辨率为512×512像素,单个阵元大小为15 μm×15 μm;2021年,推出的E-SERIES型液晶相控阵<sup>[39]</sup>,液晶微显示器分辨率为1 920×1 200像素,单个阵元大小为8 μm×8 μm;2022年,推出1 024×1 024型液

晶相控阵<sup>[40]</sup>,液晶微显示器分辨率为1 024×1 024像素,单个阵元大小为17 μm×17 μm。可根据不同的工作波长(400 nm~1 650 nm)定制液晶相控阵,据称激光损伤阈值可达10 W/cm<sup>2</sup>(连续波),脉冲激光损伤阈值可达10 MW/cm<sup>2</sup>,但由于阵元大小限制,其扫描角度在10°左右。



(a) ODPDM512

(b) E-SERIES

(c) 1 024×1 024

图3 Meadowlark公司液晶相控阵

Fig. 3 Liquid crystal spatial light modulator from Meadowlark Company

德国Holoeye公司陆续推出多款液晶空间光调制器,如图4所示。2012年,推出的LC2012型液晶相控阵<sup>[41]</sup>,液晶微显示器分辨率为1 024×768像素,单个阵元大小为36 μm×36 μm,工作波长范围覆盖420 nm~800 nm;2019年,推出的GAEA-2型液晶相控阵<sup>[42]</sup>,液晶微显示器分辨率为4 160×2 464像素,单个阵元大小为3.4 μm×3.4 μm,可根据工作波长范围420 nm~650 nm、650 nm~1 100 nm和1 400 nm~1 700 nm选择具体型号;2020年,推出的LUNA型液晶相控阵<sup>[43]</sup>,液晶微显示器分辨率为1 920×1 080像素,单个阵元大小为4.5 μm×

4.5 μm,工作波长范围覆盖420 nm~1 100 nm,帧率为60 Hz;推出的ERIS型液晶相控阵<sup>[44]</sup>,液晶微显示器分辨率为1 920×1 200像素,单个阵元大小为8 μm×8 μm。

2020年,日本Hamamatsu公司研制出了一款耐光强度达400 GW/cm<sup>2</sup>的液晶空间光调制器<sup>[45]</sup>,如图5(a)所示,其像素阵元为1 272×1 024,阵元宽度为12.5 μm,填充因子为95%,帧率为60 Hz,在1 550 nm的近红外波段附近衍射效率可达97%。2022年,该公司将SLM的有效面积扩大为现有尺寸的4倍,减少单位面积的人射光能量,更适用于

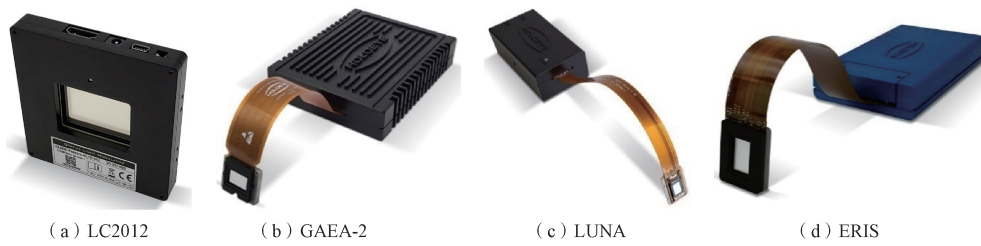


图 4 Holoeye公司的液晶空间光调制器

Fig. 4 Liquid crystal spatial light modulator from Holoeye Company

高功率激光器。2023年, 该公司推出 X15213 型产品<sup>[46]</sup>和 X15223 型产品<sup>[47]</sup>, 如图 5(b)和图 5(c)所示。液晶微显示器分辨率为 1 272×1 024 像素, 单个阵

元大小为 12.5 μm×12.5 μm, 可根据工作波长范围 400 nm~1 600 nm 和 1 850 nm~2 050 nm 选择具体型号。

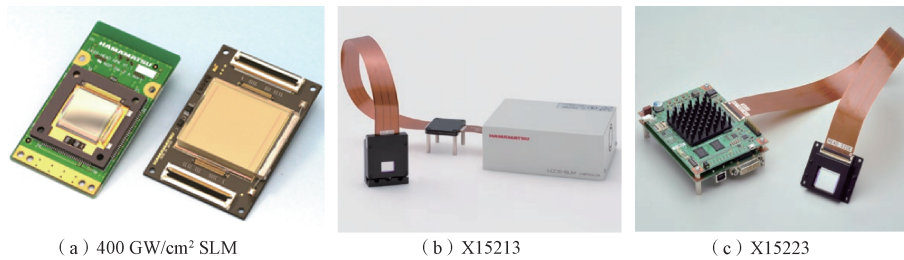


图 5 Hamamatsu公司的液晶空间光调制器

Fig. 5 Liquid crystal spatial light modulator from Hamamatsu Company

液晶调制速度较慢、帧率较低, 且通常由于工艺限制导致扫描范围小, 难以满足激光雷达光束指向快速控制、大范围扫描的需求。但目前液晶相控阵研究最为成熟, 且随着对液晶的电极材料、散热技术等方面研究的深入, 液晶的耐受功率密度大大提高。

### 2.2 MEMS 相控阵

MEMS 主要由静电、电磁、压电和电热等方式驱动微反射镜实现光束偏转, 由于具有移动部件, 使得这些方式的 MEMS 与相控阵固态器件有一定区别。但 MEMS 也可以通过微小位移产生光程差, 通过对入射光相位的调制来实现光束偏转,

应用这一原理的 MEMS 器件也属于固态相控阵范畴。

2013 年, Byung Wook Yoo 等人<sup>[48]</sup>针对早期 MEMS 反射镜需要在致动器顶部涂覆反射膜, 从而限制了其在高光功率密度下应用的技术问题, 提出了一种基于高对比度光栅(HCG)的 MEMS 相控阵技术, 该 MEMS 相控阵具有响应时间快速(μs 量级)、驱动电压低和耐受功率密度高的特点, 并在 SOI 晶片上制备了 8×8 阵元的 MEMS 相控阵, 对 1 550 nm 激光的反射率达到 99.9%, 填充因子为 36%, 如图 6 所示。

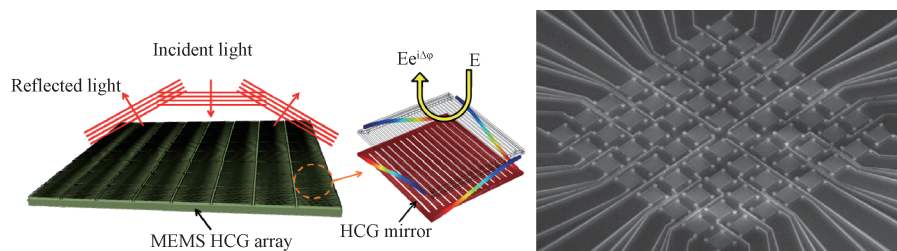


图 6 8×8 阵元的 OPA 器件

Fig. 6 The OPA device with 8×8 array

2014年,UCB(加利福尼亚大学伯克利分校)的Weijian Yang<sup>[49]</sup>制作了8×8阵元的高对比度光栅(HCG)阵元MEMS相控阵,如图7所示。材料为GaAs/AlGaAs,通过对HCG较小驱动距离的调节可以对反射光束的相位进行有效调谐。MEMS相

控阵工作波长为1550 nm,阵元尺寸约33.5 μm×33.5 μm,在10V电压下可产生1.7π的相移,具有0.52 MHz的响应速度,总视场约为2.65°,利用透镜系统扩大视场后其远场总视场角为9.14°。

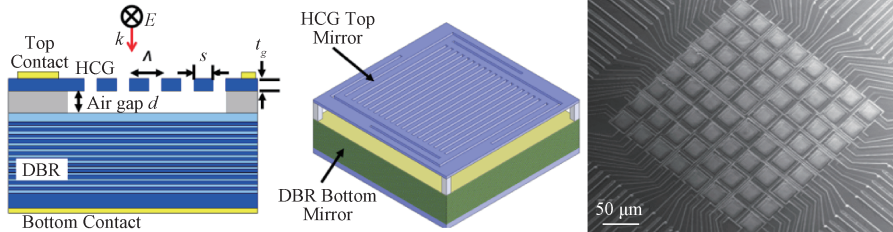


图7 8×8阵元的高对比度光栅MEMS相控阵

Fig. 7 High contrast grating MEMS phased array with 8×8 arrays

2018年,加州大学 Youmin Wang 等人<sup>[50]</sup>制作了具有160×160阵元的MEMS相控阵,首次在MEMS相控阵上同时实现了光学效率高、响应时间快和偏转角度大的功能,如图8所示。阵列尺寸为3.1 mm×3.2 mm,工作波长为1550 nm,10.5 V电压下产生2π相移,其光束扫描覆盖角度范围为6.6°×4.4°,光束发散角为0.042°×0.031°,调制频率为55 kHz,光反射效率约为85%。

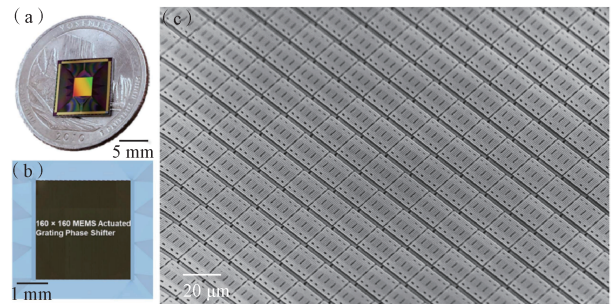


图8 160×160阵元的MEMS相控阵

Fig. 8 MEMS phased array with 160×160 arrays

2021年,多伦多大学的Tarek Mohammad等人<sup>[51]</sup>研发了基于节距调谐的硅微透镜MEMS相控阵,其具有平面内螺距调谐能力,可实现激光束指向高速和高分辨率转向,如图9所示。阵元尺寸

约为195 μm×185 μm,阵列填充系数为40%~57%;在30 V电压下,工作波长为650 nm时,光束扫描范围为0.06°,角分辨率为0.002°。

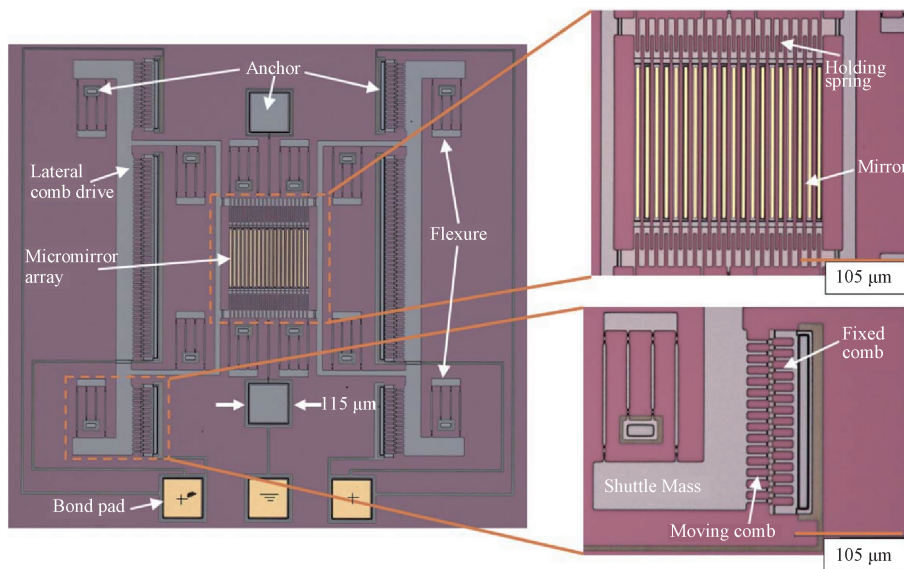


图9 多伦多大学的MEMS阵元

Fig. 9 MEMS array at the University of Toronto

基于MEMS器件的OPA具有扫描速度快、能耗低的特点,但目前采用这种方式制备的OPA扫描角度有限,另外整个器件的结构也较为复杂,离实用尚有一段距离。

### 2.3 光波导相控阵

随着半导体技术的发展,基于半导体集成光电器件的光波导相控阵开始出现,如铝砷化镓(Al-GaAs)相控阵、氮化硅(SiN)波导相控阵、硅(Si)基相控阵等。光波导相控阵可与片上的半导体激光器、放大器,甚至使用在接收端的探测器等集成在一块芯片上,实现单片集成的全固态激光雷达

系统。这类集成器件通常利用辐射光栅天线实现激光的垂直发射,使用热光效应和波长调谐可实现两个维度的光束扫描。此外,依托于成熟的CMOS工艺线和半导体技术(特别是1550nm波段的硅基器件技术),提高了光波导相控阵的工艺稳定性,并降低了生产成本。

2013年,麻省理工学院(MIT)Yaacobi组的Sun J等人<sup>[52]</sup>在Nature上发表了二维大规模硅基OPA器件的研究成果。通过热光调相实现8×8阵元的光栅辐射阵列光束偏转角度达到6°×6°,π相移消耗功率8.5mW,如图10所示。

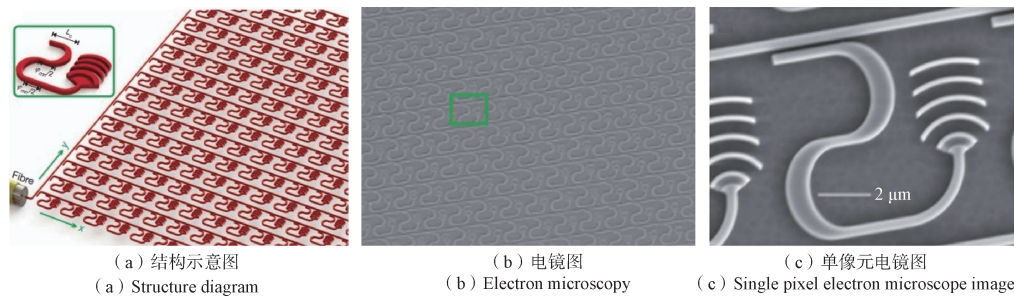


图 10 MIT 8×8 可调相硅基 OPA 器件

Fig. 10 MIT 8×8 adjustable phase silicon based OPA device

2014年,MIT的Yaacobi组研发了高速大角度一维扫描的硅基相控阵<sup>[53]</sup>,测试得到的光束扫描图,如图11所示。该相控阵采用热光效应实现光

束扫描,工作波长为1550nm时,扫描角度达到51°,调制频率可达100kHz。仿真估计该器件效率约为25%。

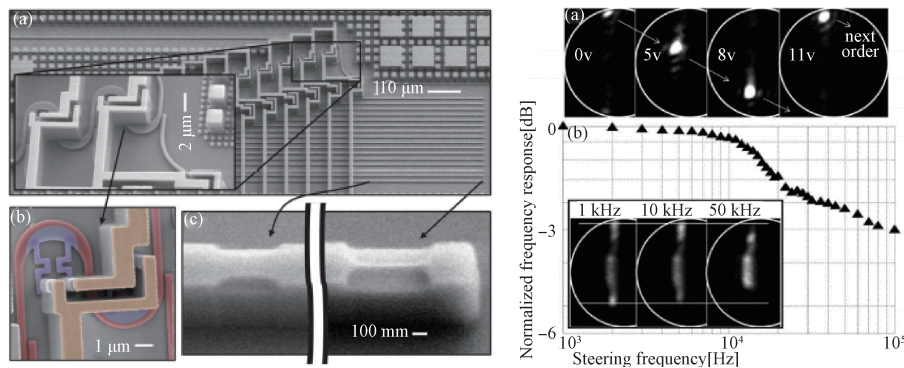


图 11 MIT 高速大角度一维扫描硅基相控阵测试扫描图

Fig.11 MIT high speed large angle one-dimensional scanning silicon phased array test scan

2015年,UCSB(加利福尼亚大学圣芭芭拉分校)的Hulme等人<sup>[54]</sup>报道了硅基混合集成的二维扫描相控阵,其将164个光学元件进行集成,包括激光器、放大器、探测器、相位调节器、光栅耦合器、分束器以及光子晶体透镜,如图12所示。实现的扫描角度范围为23°×3.6°,光束发散角为1°×0.6°,背景抑制比为5.5dB。

2020年,北京大学Haiyang Zhang等人<sup>[55]</sup>研发了8×8阵元的二维OPA,光束由硅相位调制器进行电光调制,通过干涉技术校准随机分布的初始相位,实现了0.92°×0.32°的主瓣宽度,以及8.9°×2.2°的波束扫描范围,如图13所示。

2021年,吉林大学Li等人<sup>[56]</sup>设计了两种基于SiN-on-SOI平台的128通道OPA,利用两种双面光

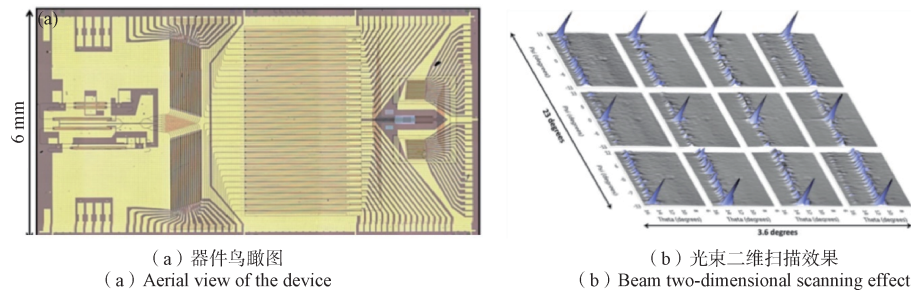


图 12 UCSB 二维硅基混合集成 OPA

Fig. 12 UCSB 2D silicon-based hybrid integrated OPA

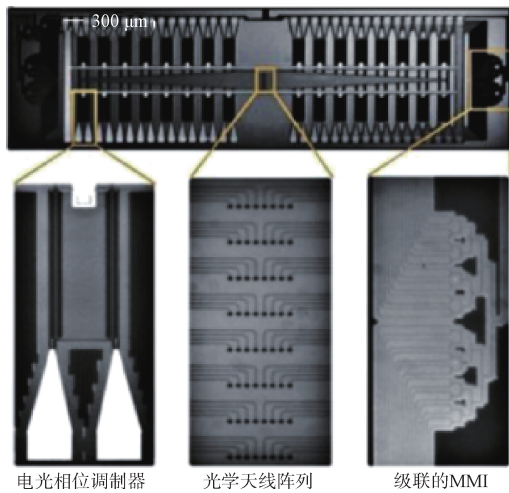


图 13 北京大学 8×8 阵元二维硅基混合集成电光调制 OPA 鸟瞰图

Fig. 13 Aerial view of 8×8 arrays 2D silicon based hybrid integrated electro-optic modulation OPA at Peking University

栅天线来实现高发射指向性。鱼骨天线 OPA 实现

了 100°×19.4°视场，波束发散度为 0.021°×0.029°，链式天线 OPA 实现了 140°×19.23°视场，波束发散度为 0.021°×0.1°，如图 14 所示。

2021 年，美国 Pointcloud 公司的 Christopher Rogers 等人<sup>[57]</sup>在《Nature》上提出了一种通用的固态 3D 成像芯片体系结构，并将 16 通道发射光栅、512 个像素的光学外差探测器阵列与集成电子读取架构集成在单个芯片上，如图 15 所示。在发射功率为 4 mW，距离为 70 m 时，测量精度为 mm 量级。

2022 年，丹麦技术大学的 Yong Liu 等人<sup>[58]</sup>提出了一种二维 OPA 芯片结构，光纤发出的光束通过光栅耦合器和星形耦合器以高斯型振幅分布到 64 个通道，然后将 64 个通道中的光束汇聚到一个半波长间隔波导阵列中，并通过梯形平板光栅发射到远场，如图 16 所示。实现了低副瓣电平的高质量光束输出，且在 180°视场范围内光束无混叠转向。当光束在 -40°~40°转动时，在整个 180°视场范围内低副瓣电平 < -19 dB。

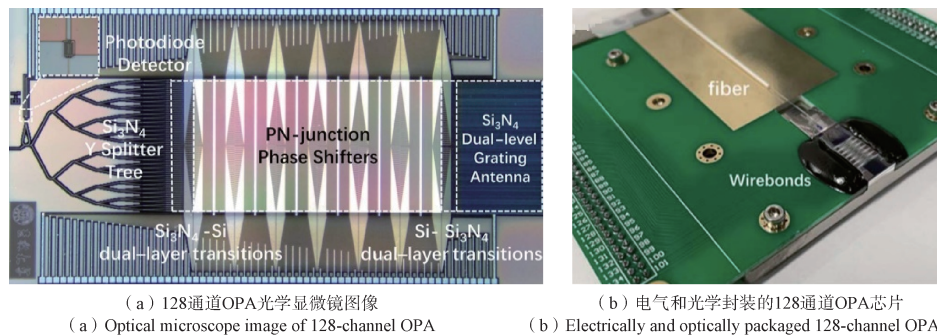


图 14 吉林大学的 128 通道 OPA

Fig. 14 The 128-channels OPA of Jilin University

2023 年，加州大学 Michael Nickerson 等人<sup>[59]</sup>在砷化镓光子集成电路平台上，制备了一种工作在 1 064 nm 附近的 16 通道 OPA，该阵列波束宽度为 0.92°，无光栅瓣转向范围为 15.3°，副瓣抑制为

12 dB。光子集成电路的足迹尺寸为 5.2 mm×1.2 mm，单个波导输入宽度为 5 μm，随后逐渐变细至 2 μm，并通过 1×2 多模干涉耦合器的级联树分裂成 16 个相等的通道，每个通道尺寸均为

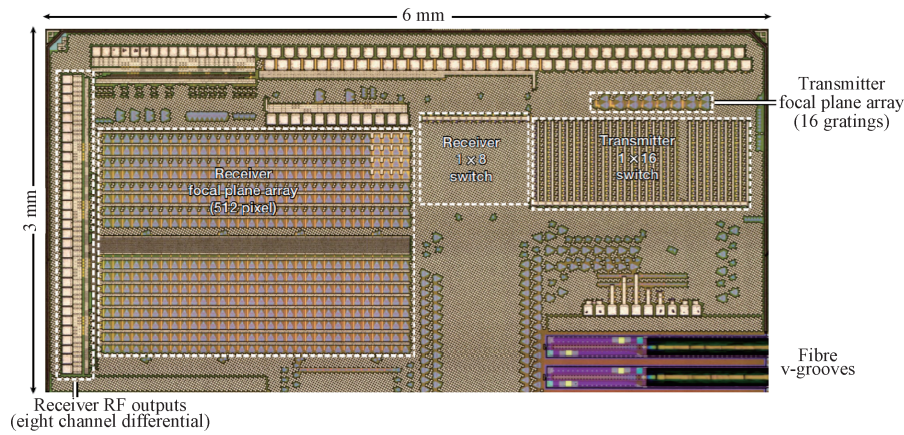
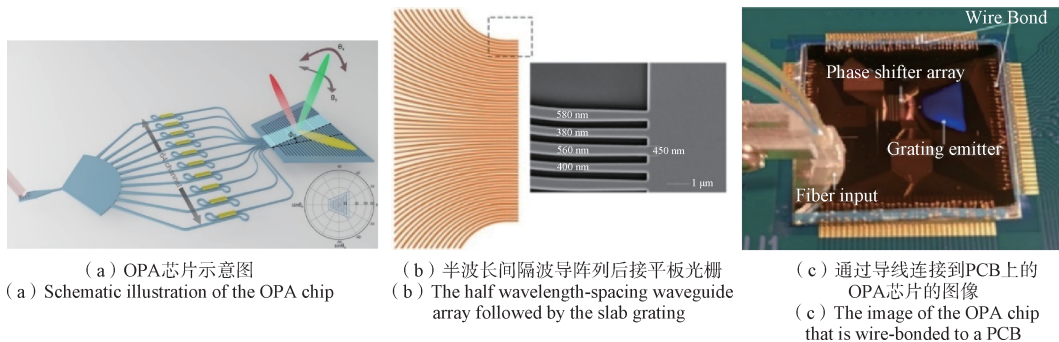


图 15 Pointcloud 公司硅基混合集成固态 3D 成像芯片鸟瞰图

Fig. 15 Aerial view of Pointcloud's silicon-based hybrid integrated solid-state 3D imaging chip



(a) OPA 芯片示意图  
(a) Schematic illustration of the OPA chip

(b) 半波长间隔波导阵列后接平板光栅  
(b) The half wavelength-spacing waveguide array followed by the slab grating

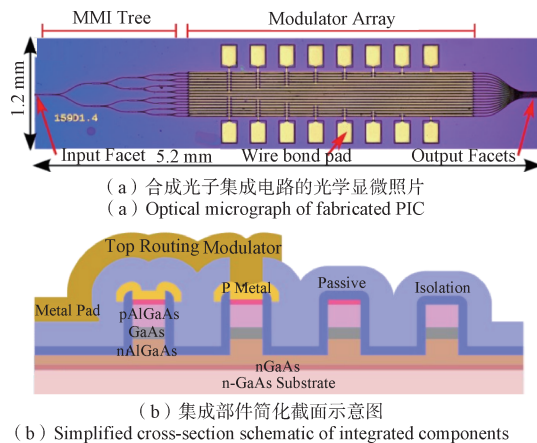
(c) 通过导线连接到 PCB 上的 OPA 芯片的图像  
(c) The image of the OPA chip that is wire-bonded to a PCB

图 16 丹麦技术大学的 OPA 芯片

Fig. 16 The OPA chips from the Technical University of Denmark

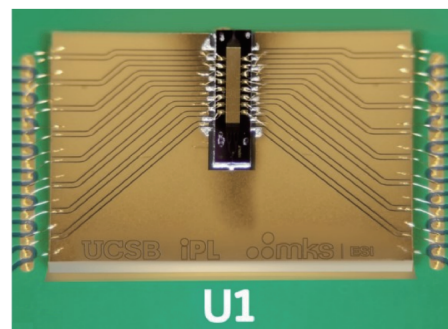
3 mm×2 mm, 如图 17 所示。同年, 加州大学的 Hani Nejadriahi 等人<sup>[60]</sup>报道了利用富硅的氮化硅 (SRN)实现宽转向端射面的 OPA, 在 1 525 nm 波长

下, 端射面天线波束转向大于 115°, 轴视处光束宽度为 6.3°, 如图 18 所示。



(a) 合成光子集成电路的光学显微照片  
(a) Optical micrograph of fabricated PIC

(b) 集成部件简化截面示意图  
(b) Simplified cross-section schematic of integrated components



(c) 光子集成电路安装在载体和 PCB 上的照片  
(c) Photograph of PIC mounted on carrier and PCB

图 17 加州大学的 OPA

Fig. 17 The OPA from the University of California

2023 年, 清华大学 Yue 等人<sup>[61]</sup>研发了一种基于膜铌酸锂材料的 16 通道集成 OPA, 该 OPA 工作在近红外波段, 具有 24°×8° 的二维光束转向角, 远

场光束发散度为 2°×0.6°, 副瓣抑制水平为 10 dB, 如图 19 所示。

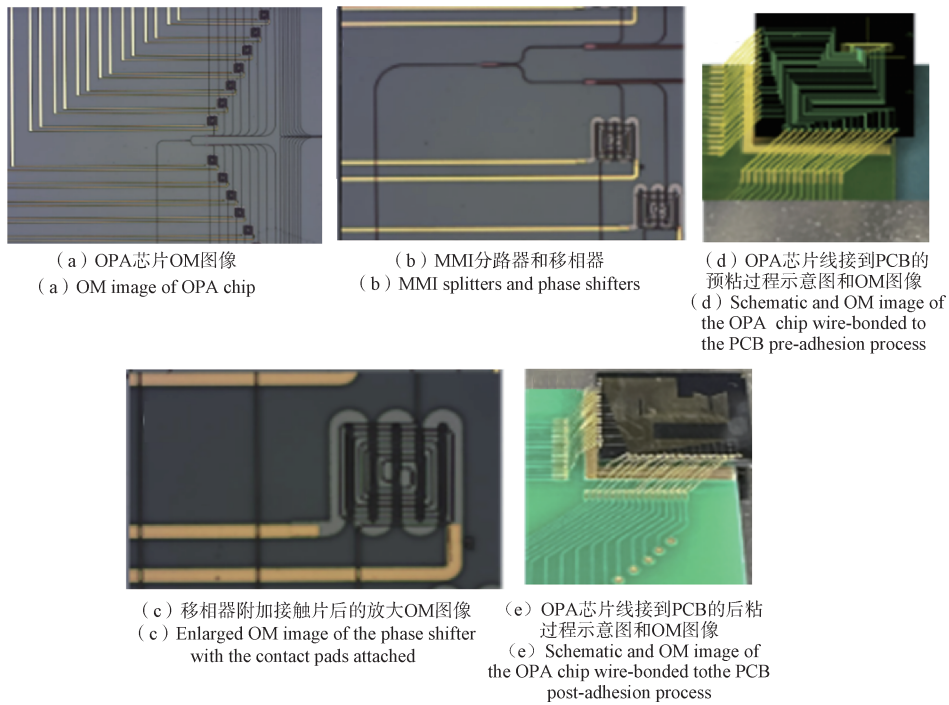


图 18 加州大学的 OPA

Fig. 18 The OPA from the University of California

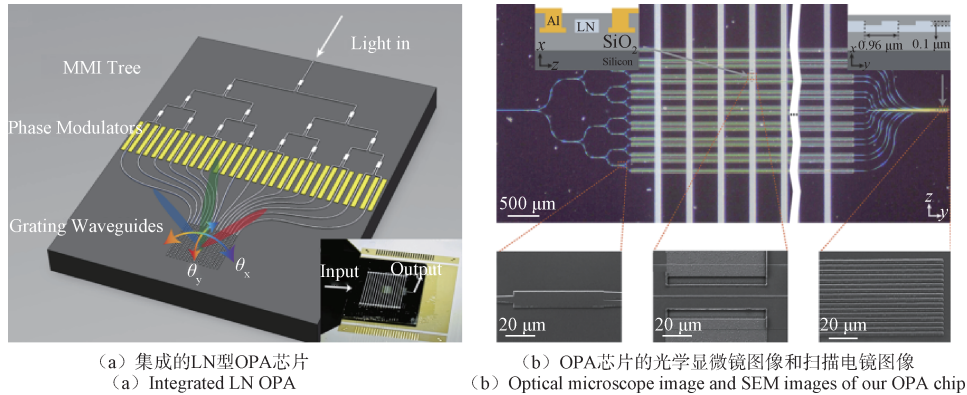


图 19 清华大学的 OPA 芯片

Fig. 19 Tsinghua University's OPA chip

2024年，上海交通大学 Zuoyu Zhou 等人<sup>[62]</sup>设计了一种波长辅助二维波导型多波束 OPA 芯片，芯片尺寸为 3.5 mm×2.1 mm，其发射孔径由 1.55 μm 的光栅耦合器组成，波束发散角(FWHM)为 3.2°×3.91°，在相控阵扫描轴方向和波长调谐扫描轴方向的 60°×8°视场范围内，该芯片能够同时实现多波束工作，如图 20 所示。

### 3 光学相控阵技术应用于激光雷达领域的思考

随着人工智能、5G 技术的发展，激光雷达已

成为新技术革命的强大助力，高可靠性、低成本的 OPA 式全固态激光雷达将是“最具前途”的激光雷达。当前，OPA 式全固态激光雷达技术还不够成熟，一旦相关光学集成工艺技术得到突破，OPA 式全固态激光雷达将在军事、民用领域具有广阔的应用前景。此外，对 OPA 式全固态激光雷达的研究，不仅是对高性能 OPA 技术的研究，还需要对整个激光雷达系统进行深入研究，以满足实际工程的应用需求。由 OPA 技术研究进展可知，液晶相控阵器件已推出商用化产品，而 MEMS 和光波导相控阵器件仍处在实验室阶段或初期应用

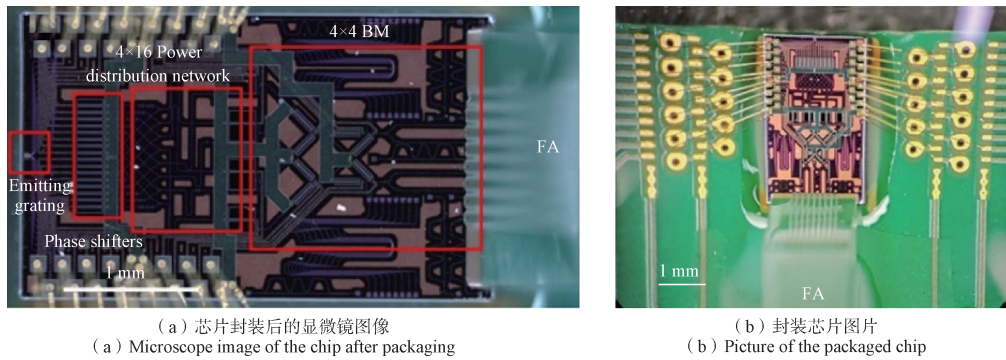


图 20 上海交通大学的多波束 OPA 芯片

Fig. 20 Multibeam OPA from the Shanghai Jiao Tong University

阶段。OPA 技术的三种实现方式性能对比, 如表 1 所示。液晶相控阵最为成熟、应用最为广泛, 但其调制频率慢、扫描角度小。MEMS 相控阵调制频率高、扫描角度有限, 其性能与偏振无关, 在激光雷达系统中应用时仍需要与其他光学系统配

合实现更大视场, 且通常为反射式。光波导相控阵具有扫描精度高、响应速率快、集成度高等优势<sup>[63]</sup>, 存在很大的应用潜力, 极有可能实现大规模、低成本与商用化。

表 1 三种光学相控阵性能对比

Table 1 Comparison of three optical phasing properties

光学相控阵	波长	视场角	调制频率	效率	其他
液晶相控阵	400 nm~1 650 nm/1 850 nm~2 050 nm	<20°	<10 kHz	80%~95%	损伤阈值可达~10 MW/cm <sup>2</sup> (脉冲)
MEMS 相控阵	—	<10°	1 kHz~100 kHz	99.9%	功率阈值高、偏振无关、反射式
光波导相控阵	0.9 μm~3.5 μm	<51°	100 kHz 以上	<50%	功率阈值低、集成度高、效率低

虽然光波导相控阵存在很大的应用潜力, 但光波导相控阵的劣势(或者说目前还无法实际应用落地的原因)也十分明显。第一, 光波导相控阵的功率阈值低, 限制了其高功率激光出射能力, 对于远距离探测较难实现; 第二, 基于半导体的调相阵列常使用热光调相, 调制速率慢导致激光雷达的帧率低, 由于相邻阵元间的热隔离较差, 在相位调制时会引起出射光功率产生波动, 当前光波导光学相控阵还不能同时满足低损耗和快速工作响应的需求; 第三, 由于工艺难度大, 光波导相控阵为实现大范围扫描, 需要阵元周期结构足够小, 以降低周期结构所引起的旁瓣对单波束扫描范围的限制; 第四, 由于二维控制电路复杂, 二维扫描光波导相控阵需要二维架构的控制线路, 这再次增大了工艺难度。因此, 为了适应激光雷达大覆盖范围、远距离探测、高帧率、小型化的发展需求, 光波导相控阵需要在以下几个方面寻求技术突破。

① 应用多光束扫描方式, 提高角度覆盖范围及帧率。

目前, 单光束扫描的光波导相控阵的角度覆盖范围尚可。但是, 若利用大角度覆盖的多光束并行输出, 结合小范围的角度扫描将会进一步提高角度覆盖范围。同时, 与同样扫描角度覆盖范围的单光束扫描方式相比, 在每帧数据分辨率相等、扫描部件频率一致(即扫描角度步长相等、每步用时相等)的情况下, 多光束扫描方式由于其单次发射接收数据量更多, 可在更短时间内完成一帧数据的测量, 帧率会更高。多光束扫描方式可通过改变光栅天线的结构实现, 可行性较大。

② 与铌酸锂调制器异质混合集成, 提高调制频率。

薄膜铌酸锂调制器常用于 1 550 nm 的光纤通信领域, 调制频率可达 100 GHz 量级, 其与半导体光电器件制作工艺相同, 只在衬底材料上存在差异。因此, 可以考虑将高速的铌酸锂调制器与其他片上波导和光栅天线作异质集成, 提高相控阵调制频率, 实现激光雷达系统的高速扫描。

③ 应用锁相相干技术, 提高激光输出功率。

在单个芯片上集成多个激光器, 保证单个芯

片上多个激光器同相同频输出。虽然分流到波导及光栅天线处的激光功率较低,但整个相控阵输出的激光功率将会提高,从而提高整个系统的探测距离。

#### 4 结束语

现阶段 OPA 技术因耐受激光功率阈值低、扫描速度慢、角度覆盖范围有限等因素的制约,只能满足激光雷达领域在近距离探测、低帧率、小视场等应用,还无法满足在远距离探测、大角度成像等领域应用需求。本文概述了光学相控阵技术的基本原理,介绍了液晶相控阵、MEMS 相控阵和光波导相控阵的技术发展,并对三种 OPA 性能进行对比,分析了光波导相控阵的劣势,以及为适应激光雷达的发展需求,分析了光波导相控阵的突破方向。

#### 参考文献

- [1] 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):1-22.  
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): 1-22.
- [2] MEYER R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [3] BRIDGES W B, BRUNNER P T, LAZZARA S P, et al. Coherent optical adaptive techniques[J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 291-300.
- [4] CATHEY W T, HAYES C L, DAVIS W C, et al. Compensation for atmospheric phase effects at 10.6  $\mu\text{m}$  [J]. Applied Optics, 1970, 9(3): 701-707.
- [5] 旻博王,张雨秋,常洪祥,等.光纤激光相控阵光束扫描技术发展[J].红外与激光工程,2023,52(6):280-294.  
SHU B W, ZHANG Y Q, CHANG H X, et al. Recent progress in beam steering by fiber laser phased arrays [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 280-294.
- [6] CHAO T H, ZHOU H Y, REYES G F, et al. High-speed high-density holographic memory using electro-optic beam steering devices[C]//2002 SPIE Optics+Photonics. SPIE, 2002, 4803: 70-73.
- [7] NIKKHAH H, ACOLEYEN K V, BAETS R. Beam steering for wireless optical links based on an optical phased array insilicon[J]. Annals of Telecommunications, 2013, 68: 57-62.
- [8] WINKER B, MAHAJAN M, HUNWARDSSEN M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. IEEE, 2004, 3: 631-634.
- [9] 赵建川.激光相干探测在国防及军事应用中的表现[J].光电技术应用,2019,34(1):57-62.  
ZHAO J C. Performance of laser coherent detection in defense and military application[J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(1): 57-62.
- [10] 赵一鸣,李艳华,高雅楠,等.激光雷达的应用及发展趋势[J].遥测遥控,2014,35(5):4-21.  
ZHAO Y M, LI Y H, SHANG Y N, et al. Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-21.
- [11] 赵树忠,张国雄.多边法激光三维坐标测量系统及其跟踪机构设计[J].现代制造工程,2005(10):64-66.  
ZHAO S Z, ZHANG G X. A laser tracking 3D coordinate measuring system based on muti-lateration and its tracking mechanism design[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(10): 64-66.
- [12] SHAN Y, YAO X, LIN H, et al. Lidar-based stable navigable region detection for unmanned surface vehicles[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.
- [13] PHANG D R Y, LEE W K, MATSUHIRA N, et al. Enhanced mobile robot localization with Lidar and IMU sensor[C]//IEEE International Meeting for Future of Electron Devices. IEEE, 2019: 71-72.
- [14] MOLEBNY V, MCMANAMON P, STEINVALL O, et al. Laser radar: Historical prospective from the East to the West[J]. Optical Engineering, 2016, 56(3): 031220.
- [15] CHIANG K W, TSAI G J, LI Y H, et al. Development of LiDAR-based UAV system for environment reconstruction[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2017, 14(10): 1790-1794.
- [16] BOULAY P. Automotive LIDAR market: Competitive dynamics, technology evolution, and revenue trends[EB/OL] [2024-05-13]. Automotive LiDAR Conference 2023, October 3-5. [https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/automotive-lidar\\_boulay\\_yole\\_intelligence\\_v2.pdf](https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/automotive-lidar_boulay_yole_intelligence_v2.pdf).
- [17] 戴永江.激光雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [18] YE L, ZHANG G, YOU Z. 5 V compatible two-axis PZT driven MEMS scanning mirror with mechanical leverage structure for miniature LiDAR application[J]. Sensors, 2017, 17(3): 521.

- [19] HOLMSTRM S T S, BARAN U, UREY H S. MEMS laser scanners: A review[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(2): 259-275.
- [20] ZHOU G, XIANG Z, YANG J, et al. Flash lidar sensor using fiber coupled APDs[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 4758-4768.
- [21] 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.
- [22] DOSTART N, ZHANG B, KHILO A, et al. Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic lidar beam steering [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 726-733.
- [23] 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): 36-49.  
MA Y X, WU J, SU R T, et al. Review of optical phased array techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 36-49.
- [24] 周源, 李润泽, 于湘华, 等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1-32.  
ZHOU Y, LI R Z, YU X H, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators(Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1-32.
- [25] 张梦雪, 王浩, 汪相如. 液晶光学相控阵的高功率波束指向特性研究[J]. *遥测遥控*, 2022, 43(4): 62-70.  
ZHANG M X, WANG H, WANG X R. Research of liquid crystal optical phased array beam steering characteristics with high power laser incidence[J]. *Journal of Telemetry*, 2022, 43(4): 62-70.
- [26] 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.
- [27] POULTON C V, YAACOBI A, COLE D B, et al. Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays[J]. *Optics Letters*, 2017, 42: 4091-4094.
- [28] 丁汛, 赵跃进, 丁玉奎. 基于多图像融合的 MEMS 显微三维形貌重构[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1275-1285.  
DING X, ZHAO Y J, DING Y K. Three-dimensional microscopic reconstruction of MEMS based on multi image fusion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1275-1285.
- [29] 乔大勇, 苑伟政, 任勇. MEMS 激光雷达综述[J]. *微电子学与计算机*, 2023, 40(1): 41-49.  
QIAO D Y, YUAN W Z, REN Y. Review of MEMS LiDAR[J]. *Microelectronics & Computer*, 2023, 40(1): 41-49.
- [30] ROYO S, BALLESTA-GARCIA M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4093.
- [31] ACOLEYEN K V, BOGAERTS W, JAGERSKA 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.
- [32] ACOLEYEN K V, ROGIER H, BAETS R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13655-13660.
- [33] ACOLEYEN K V, KOMOROWSKA K, BOGAERTS W, et al. One-dimensional off-chip beam steering and shaping using optical phased arrays on silicon-on-insulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(23): 3500-3505.
- [34] 刘海鹏, 葛锦蔓, 谭庆贵, 等. 具有栅瓣抑制功能的非等间距光学相控阵芯片研究[J]. *空间电子技术*, 2022, 19(2): 23-28.  
LIU H P, GE J M, TAN Q G, et al. Research on non-equal spaced optical phased array chip with grating lobe suppression function[J]. *Space Electronic Technology*, 2022, 19(2): 23-28.
- [35] 庞亚军, 苗睿锴, 白振旭, 等. 扫描激光雷达大视场与全景成像技术研究进展[J]. *激光杂志*, 2021, 42(8): 1-8.  
PANG Y J, MIAO R K, BAI Z X, et al. Research progress of large field of view and panoramic imaging technologies of scanning LIDAR[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(8): 1-8.
- [36] WANG D, WATKINS C, XIE H. MEMS mirrors for LiDAR: A review[J]. *Microma Chines*, 2020, 11(5): 456.
- [37] 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): 52-62.  
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): 52-62.
- [38] Meadowlark Optics. Spatial light modulator-512×512 [EB/OL]. [2024-05-13]. <https://preview-assets-us-01.kc-usercontent.com/210eb585-dc2c-0008-b663-73b9ea5cff38/676b65a8-b6f5-4bbe-98a6-b01d7b1cd4c4/Datasheet.pdf>.
- [39] Meadowlark Optics. Meadowlark optics 1 920×1 200 spatial light modulator[EB/OL]. [2024-05-13]. <https://www.meadowlark.com/product/1920-x-1200-spatial-light-modulator/>.
- [40] Meadowlark Optics. Meadowlark optics 1 024×1 024 spatial light modulator[EB/OL]. [2024-05-13]. <https://www.meadowlark.com/product/1024-x-1024-spatial-light-modulator/>.

- www.meadowlark.com/1k-x-1k-spatial-light-modulator/.
- [41] HOLOEYE. LC 2012 spatial light modulator (Transmissive) [EB/OL]. [2024-05-13]. <https://holoeeye.com/products/spatial-light-modulators/lc-2012-spatial-light-modulator-transmissive/>.
- [42] HOLOEYE. GAEA-2 10 megapixel phase only LCOS-SLM[EB/OL]. [2024-05-13]. <https://holoeeye.com/products/spatial-light-modulators/gaea-2-phase-only/>.
- [43] HOLOEYE. LUNA phase only spatial light modulator [EB/OL]. [2024-05-13]. <https://holoeeye.com/products/spatial-light-modulators/luna-phase-only/>.
- [44] HOLOEYE. ERIS phase only spatial light modulator [EB/OL]. [2024-05-13]. <https://holoeeye.com/products/spatial-light-modulators/eris-phase-only-spatial-light-modulator/>.
- [45] 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): 291-313.
- 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): 291-313.
- [46] 滨松光子学株式会社. LCOS-SLM(空间光调制器) X15213 系列[EB/OL].[2024-05-13]. <https://www.hamamatsu.com.cn/cn/zh-cn/product/optical-components/lcos-slm/for-research-and-development.html>.
- [47] 滨松光子学株式会社. LCOS-SLM(空间光调制器) X15223 系列[EB/OL].[2024-05-13]. <https://www.hamamatsu.com.cn/cn/zh-cn/product/optical-components/lcos-slm/for-industrial.html>.
- [48] YOO B W, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two-dimensional beamforming and beam-steering[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [49] YANG W, SUN T, RAO Y, et al. High speed optical phased array using high contrast grating all-pass filters [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20038-20044.
- [50] WANG Y, ZHOU G, ZHANG X, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array[J]. Optica, 2019, 6(5): 557-562.
- [51] TAREK M, HE S Y, RIDHA B M. A MEMS optical phased array based on pitch tunable silicon micromirrors for LiDAR scanners[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(5): 712-724.
- [52] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.
- [53] YAACOBI A, SUN J, MORESCO M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [54] HULME J C, DOYLEND J K, HECK M J R, et al. Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5861-5874.
- [55] ZHANG H, ZHANG Z, LV J, et al. Fast beam steering enabled by a chip-scale optical phased array with 8×8 elements[J]. Optics Communications, 2020, 461: 125267.
- [56] LI Y, CHEN B, NA Q, et al. Wide-steering-angle high-resolution optical phased array[J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2511-2518.
- [57] ROGERS C, PIGGOTT A Y, THOMSON D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. Nature, 2021, 590: 256-261.
- [58] LIU Y, HU H. Silicon optical phased array with a 180-degree field of view for 2D optical beam steering[J]. Optica, 2022, 9(8): 903-907.
- [59] MICHAEL N, JIM B, GREGORY E, et al. Gallium arsenide optical phased array beam steering photonic integrated circuit[C]// Advanced Photonics Congress, 2023. Optica Publishing Group, 2023, IW4A.1.
- [60] HANI N, PRABHAV G, KARL J, et al. Realization of a wide steering end-fire facet optical phased array using silicon rich silicon nitride[J]. Optics Letters, 2023, 48(3): 807-810.
- [61] YUE G, LI Y. Integrated lithium niobate optical phased array for two dimensional beam steering[J]. Optics Letters, 2023, 48(14): 3633-3636.
- [62] ZHOU Z Y, XU W H, LIU C X, et al. Butler matrix enabled multi-beam optical phased array for two-dimensional beam-steering and ranging[J]. Photonics Research, 2024, 12(5): 912-920.
- [63] 任远中, 柴金华. 光波导相控阵技术研究综述[J]. 船舶工程电子学, 2019, 39(5): 1-5, 83.
- REN Y Z, CHAI J H. Research reviews of optical waveguide phased array technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(5): 1-5, 83.

#### [作者简介]

- 潘超 1981年生, 博士, 研究员。  
于勇 1971年生, 博士, 研究员。  
刘宇哲 1989年生, 博士, 高级工程师。  
崔铮 1987年生, 博士, 工程师。  
刘雅琦 1993年生, 博士, 工程师。

(本文编辑: 傅杰)

(英文编辑: 赵尹默)