



·激光合束技术·

光学相控阵技术研究进展与发展趋势*

田博宇, 彭英楠, 胡奇琪, 段佳著, 骆永全, 赵祥杰, 张大勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 光学相控阵技术具有响应速度快、系统紧凑、功能多样和控制灵活等优点, 在众多科学技术领域得到了广泛的应用。在近 50 年来的光学相控阵研究与应用中, 涌现出了众多卓越的成果。为了对光学相控阵领域的发展进行梳理, 简要回顾了光学相控阵技术的历史, 并论述了光学相控阵技术的基本原理。从光束发射与接收等不同应用场景的角度, 结合笔者的思考, 深入介绍了光学相控阵在高品质的光源技术、激光相干合成技术、光束扫描技术、大气链路畸变控制技术以及合成孔径探测与成像技术多个领域的发展现状, 并最后对光学相控阵技术的瓶颈与未来的发展研究趋势进行了评述。

关键词: 光学相控阵; 激光相干合成; 激光扫描; 大气畸变校正; 合成孔径探测

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220305

Review of optical phased array technology and its applications

Tian Boyu, Peng Yingnan, Hu Qiqi, Duan Jiazhu, Luo Yongquan, Zhao Xiangjie, Zhang Dayong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The optical phased array technology has the advantages of fast response speed, compact structure, and flexibility in control, thus it has been widely used in many scientific and technological fields. Over the past 50 years, many excellent research results have emerged. To give an overview of the optical phased arrays, the article first briefly reviews the history of the optical phased arrays, and introduces the basic principles. From the perspective of different applications including beam projecting and receiving, combined with the author's thinking, the current status of the developments in high-quality laser source, laser coherent combining, laser steering, atmospheric distortion correction, and synthetic aperture imaging are introduced in detail. Finally, the bottleneck and the future development trends of the optical phased arrays are given.

Key words: optical phased array, laser coherent combining, laser steering, atmospheric distortion correction, synthetic aperture imaging

相控阵的概念早在 20 世纪初便已出现, 相控阵即相位补偿基阵, 其基本工作原理是通过主动控制单元对以一定规则排列的阵元进行相位调控, 利用阵元电磁场的相移、补偿实现阵列电磁场波阵面的灵活控制^[1-2]。微波相控阵是最早实现应用的相控阵系统, 自 Friis 和 Feldman 于 1937 年首次实现有源相控阵以来^[3], 微波相控阵技术在民用和军事国防领域得到了广泛的应用, 如民用航空雷达、军事预警雷达以及美国的 Nike-X 系统和英国的 AR-3D 弹道导弹防御雷达等^[4]。尽管光学相控阵与微波相控阵物理原理相同, 但是由于光波的高频、短波特性, 一直以来缺乏高效的光场调相手段与器件, 致使光学相控阵的发展长期受到制约。直至 1972 年, Meyer 才首次实现了基于钽酸锂移晶体相器的一维光学相控阵^[5], 在验证了光学相控阵可行性的同时也引领了此后数十年间光学相控阵的研究热潮。

广义上来说, 可以实现主动阵列光场相位调控的器件和系统都可以称为光学相控阵。随着近年来高光束质量光源、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^[6-8], 形式丰富的光学相控阵技术逐渐完善并在通信、高分辨率探测以及智能驾驶等领域崭露头角^[9-10]。比如在拼接孔径激光相干合成系统中, 通过对阵列子光

* 收稿日期: 2022-05-13; 修订日期: 2022-11-25

联系方式: 田博宇, tby_scu@163.com。

通信作者: 赵祥杰, zxjdouble@163.com;

张大勇, zdywx1874@sohu.com。

源的锁相控制实现阵列光束的同相输出,以此提升远场峰值亮度^[11]。在空间光通信的捕获、跟踪、瞄准(Acquisition, Tracking, Pointing, ATP)系统以及激光雷达系统中,利用光学相控阵元相位的动态调节可以实现非机械式的高分辨率快速光束扫描^[12]。自适应光学系统中也使用了光学相控阵技术进行大气链路畸变补偿,如阵列激光发射系统通过湍流畸变补偿实现传输效能提升,以及合成孔径望远镜利用共轭像差消除实现高分辨率探测成像等^[13-14]。

光学相控阵旨在通过分立孔径合成的途径解决大口径元器件制造、高功率光束输出、光场动态调控等技术难题。经历数十年技术发展,光学相控阵基础理论已然完备,技术发展也逐渐趋于成熟。种类丰富的高光束质量激光光源不断涌现,光学相控阵光源选择更加灵活、方便。激光相干合成系统的合成功率、合成路数持续攀升,百千瓦功率输出和百路规模合成早已实现。基于多种技术体制的相控阵光束扫描器件可以轻松实现百毫米大口径和180°大视场。基于合成孔径探测与成像技术的詹姆斯韦伯望远镜也已经进入轨道,助力人类探索深空。未来的光学相控阵技术在以上优秀的发展基础上,将进一步向着更大口径、更大视场、更高功率的方向迈进。为展现光学相控阵技术的发展全貌,展望未来发展趋势,本文将重点介绍近年来高亮度光源技术、激光相干合成技术、光场扫描技术、合成孔径高分辨探测技术以及传输链路畸变主动控制技术的研究进展以及相应的器件、装置工艺水平,从光源、发射、探测、传输多个角度分析光学相控阵技术的应用情况。最后通过分析对比,讨论目前光学相控阵技术的技术瓶颈,分析光学相控阵未来的发展趋势。

1 光学相控阵系统

1.1 光学相控阵的分类与基本原理

自世界上第一个光学相控阵器件诞生至今已整整50年,在其发展历程中,光学相控阵的形式逐渐丰富,应用场景也十分广泛。总体而言,光学相控阵主要包含以下几类关键技术,即高品质的光源技术、激光相干合成技术、相控阵光束扫描技术、大气链路畸变控制技术以及合成孔径探测与成像技术。目前光学相控阵领域尚无公认统一的严格分类标准,但是从相位控制的角度看,光学相控阵可以分为对发射光场相位控制的光学相控阵和对接收光场相位控制的光学相控阵。按照具体用途,对发射光场相位控制的光学相控阵更多应用于高功率激光系统中,而对接收光场相位控制的光学相控阵则多见于弱光系统。值得一提的是,某些光学相控阵并非只有单一用途,部分光学相控阵技术在强光和弱光应用中都有它们的身影,光学相控阵的用途分类如图1所示。

对发射光场相位控制的光学相控阵系统主要功能是对光场进行相位调控,以提升远场光场亮度与传输效率,以及灵活的定向高效输能或光通信。这类光学相控阵系统多使用于激光装置的光源与发射结构中,高品质的光源系统、激光相干合成系统、光束扫描系统以及大气链路畸变控制系统都可以归类为该类光学相控阵。高品质的光源系统为各类相控阵系统提供高亮度、紧凑化的光场输入,是光学相控阵高效合成与发射的重要保障^[15]。激光相干合成系统则是利用拼接孔径的方式实现远场峰值亮度的大幅提升,同时降低系统热管理难度及制造成本,是激光系统获取高亮度光场的重要技术途径^[16]。光束扫描系统利用相位控制实现的非机械式光束扫描,相比于机械式扫描更加灵活、高速、轻便,在激光的灵活控制方面有重大的应用潜力,基于光学相控阵的光束扫描技术典型应用包括空间光通信和激光雷达等^[17-19]。大气链路畸变控制系统通过自适应相位控制抑制光束波前畸变,是改善远程激光传输效率的关键技术^[13]。

对接收光场相位控制的光学相控阵系统主要功能是对光学系统接收到的弱光信号进行相位调控,以此改善探测系统性能,如提升像质或实现大视场的高速探测。这类光学相控阵多使用于光电系统的探测与成像结构中,最为典型的代表便是合成孔径探测与成像系统。合成孔径探测与成像系统与激光相干合成系统类似,同样是利用拼接孔径的方式以降低制造成本与装置规模,并同时保证了空间分辨率,是未来高分辨天文观测与遥感技术的重要发展方向^[20]。此外,大气链路畸变控制系统也可以归为这类光学相控阵。如天文观测装置中的自适应波前校正系统便是这类光学相控阵在弱光场景下的典型用途。

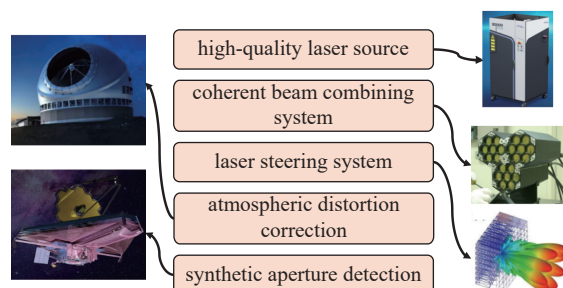


Fig. 1 Classification and applications of optical phased array

图1 光学相控阵的用途分类

不论何种类型的光学相控阵,其基本原理都可以用惠更斯原理来阐述,对于球面波而言,波面上的每一点都是次级球面波的波源,每一个时刻所有次级球面波波面的包络则形成该时刻的波阵面,光波的能量沿波阵面的法向传输。光学相控阵的本质便是对光场波前的控制,故而通过控制子波相位来产生不同的波阵面,便可以实现光传输行为的主动控制。光学相控阵即是惠更斯原理所描述的物理过程离散化,每一个阵元都可以独立地发射相位可控的子波,或者对接收到的光波调相,进而实现光场调控。基于上述原理,光学相控阵的具体实现途径可以分为“共孔径”和“分孔径”两类。“共孔径”是指利用调相器件对单束入射光束进行相位分布调制,进而控制单束光束的传输行为,典型器件包括空间光调制器以及变形镜等,实际物理像素或驱动单元便是这类光学相控阵的阵元,光束扫描技术以及部分大气链路畸变控制技术便是采用“共孔径”的途径。这类光学相控阵结构简单,但是受限于器件制造工艺,难以实现大口径,且实际应用效果受器件分辨率制约。“分孔径”是指通过对多路光束相位独立控制的方式,实现阵列光束整体行为的控制或像质的提升,每一个子孔径便是这类光学相控阵的阵元,激光相干合成和合成孔径探测与成像则采用“分孔径”的途径。这类光学相控阵易于实现等效大口径,但是结构相对复杂,随着路数的提升,相位控制难度也随之增大。激光相干合成、光束扫描、大气链路畸变控制以及合成孔径探测与成像相应的一维相控阵原理图分别如图2(a)~(d)所示,其中 E 为阵元光场复振幅; ϕ 为相位。而二维相控阵本质上是一维相控阵在正交方向上的拓展,其基本原理与一维相控阵相同。

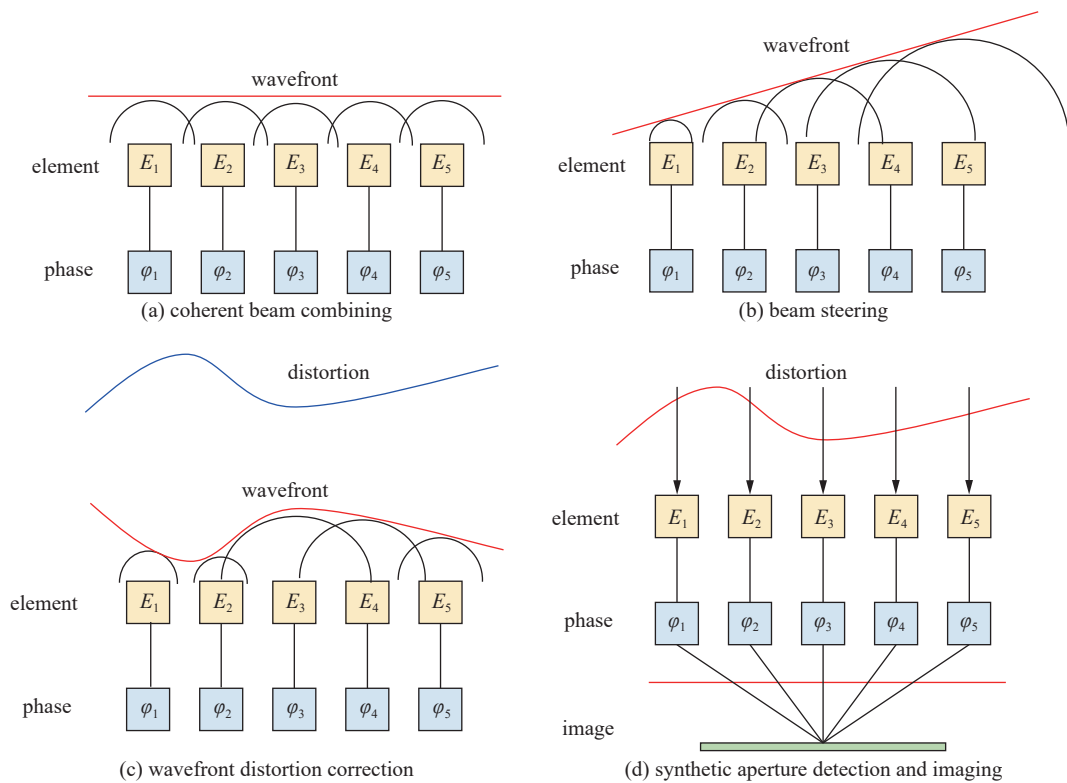


Fig. 2 Principle of optical phased array (1D)

图2 一维相控阵原理

对发射光场相位控制的光学相控阵系统硬件主要由种子源、相位控制单元、放大模块和发射模块构成。由种子源产生的高光束质量信号光经过分束后,独立地进行相位调制和放大,最终由阵列发射装置输出。光学相控阵系统的核心区别在于波前控制目标和策略的不同。相干光束合成系统需要令所有子波源同相,此时波阵面为一平面,光场实现输出方向上的相长叠加提升峰值亮度,如图2(a)所示。光束扫描系统需要控制阵元间产生预先设计好的等间隔相位延迟,此时波阵面为一倾斜平面,通过在特定方向上产生相长干涉的方式改变输能方向,以此实现光束扫描功能,如图2(b)所示。自适应波前校正系统则是产生一个与传输路径上的累积畸变相位共轭的波前,以预补偿的方式消除畸变,改善传输效能,如图2(c)所示。对于合成孔径探测与成像系统,则是利用相位补偿的方式控制每一路子孔径的相位相同,以此提升相干成像的分辨率,如图2(d)所示。

不同的光学相控阵系统中的相位控制策略不同,相应的技术途径与器件也丰富多样。在阵列光源系统和激光相干合成系统中,需要保证所有子路的激光输出相位一致,即锁相输出。根据物理机制,锁相可以分为被动锁相与

主动锁相。典型的被动锁相方法有自傅里叶变换腔法^[21]、倏逝波耦合法^[22]、Sagnac 腔法^[23]、自组织互注入法^[24]等, 这些被动锁相方法均是通过一定的非线性作用机制或是能量互耦合机制实现阵列光场相位扰动的自发补偿, 进而实现相位锁定。主动锁相则是根据相位反馈信息主动控制独立的相位调制器实现阵列光场相位的灵活控制, 相比于被动锁相, 主动锁相结构更为复杂, 控制难度也更大。但是相比于被动锁相, 主动锁相更符合光学相控阵的定义。典型的主动锁相方法包括外差法^[25]、抖动法^[26]以及优化控制算法^[27]等。

光束扫描系统的核心是种类丰富的光学移相器件, 其基本原理是利用光学材料的物理效应或者微机电精密操控实现阵列光场相位的调控。基于液晶材料的光学移相器是目前较为成熟的技术途径, 利用液晶的各向异性, 调节外加电场控制其分子的取向, 通过双折射效应调控光场相位^[28]。基于光波导的光学移相器利用材料的电光效应或热光效应改变材料折射率来控制相位, 如基于钽酸锂或砷化铝镓的电光调制器^[29], 以及硅基热光调制器^[30]等。基于微机电系统 (MEMS) 的光学移相器得益于其高响应速度、高传输效率的特点近年来也得到了一定程度的发展, 但是扫描角度小、制备工艺复杂以及损伤阈值低的问题也同时制约着其进一步的发展^[31]。

合成孔径探测与成像系统是一种利用多子孔径拼接等效实现大口径的接收光学系统, 为了实现高分辨率的成像, 每一路镜组都包含相位控制单元。通常而言可以使用光学移相器补偿各子路间的相位延迟实现像质改善^[32]。但是在某些对分辨率有着更高要求的应用场景中, 甚至还会在每一个子路中加入自适应光学系统实现高空间频率相位误差的补偿^[33]。

大气链路畸变控制系统严格来说并不作为一种单独的光学相控阵系统, 通常与以上几类光学相控阵系统集成一起共同工作, 如目标在回路 (TIL) 就是一种应用于激光合成发射系统的相位控制技术, 通过靶面目标的图像信息控制每一路的动态相位来校正光源子路间相位误差以及大气链路畸变^[34]。自适应光学系统也是一种典型的大气链路畸变控制系统, 通过波前控制器 (变形镜或空间光调制器)、波前传感器以及控制器可以实现有波前探测的自适应相位补偿^[35], 也可以使用波前控制器、成像单元以及控制器实现无波前探测的自适应相位补偿^[36]。

1.2 光学相控阵的技术发展概况

就目前光学相控阵发展现状而言, 当属美国在该领域研究最为深入。下面将以美国国防高级研究计划局 (DARPA) 近十余年来在光学相控阵技术方面的研究历程为脉络, 简要介绍上述各类光学相控阵的发展与研究热点, 如图 3 所示。

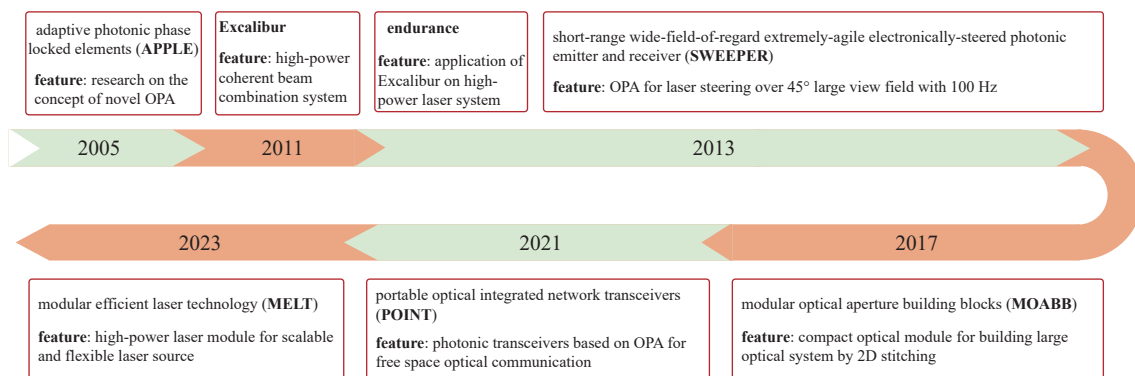


Fig. 3 Optical phased array projects carried out by DARPA

图 3 DARPA 在光学相控阵技术领域的研究历程

光学相控阵是一个十分宽泛的概念, 最能系统性描述光学相控阵系统全貌的当属 DARPA 于 2005 年所提出的自适应光子锁相单元 (APPLE) 这一新型概念^[37]。APPLE 系统希望利用高亮度的相干合成激光光源替代常规的单台光源, 通过纯电子控制的光束扫描技术摆脱传统机械扫描方式所带来的扫描速度的限制, 通过目标探测与自适应相位控制技术相结合的方式实现高效合成与大气传输, 其基本原理示意图如图 4 所示。其中: (J 为评价函数; J_{pl} 为全局评价函数; J^{0l} 为局域评价函数)

种子源产生的信号光经过分束器后依次独立经过相位控制器和放大级, 最后由合成孔径发射望远镜系统合成发射。望远镜具有收发一体的功能, 在发射的同时探测目标表面的光强信号, 并通过自适应优化算法产生反馈信号利用相位控制器对每一路光场相位进行动态调控, 在目标表面实现高亮度激光辐照。可以看出 APPLE 系统是一个综合集成了光源技术、相干合成技术、光束扫描、目标探测以及自适应相位控制技术的理想中的光学相控阵

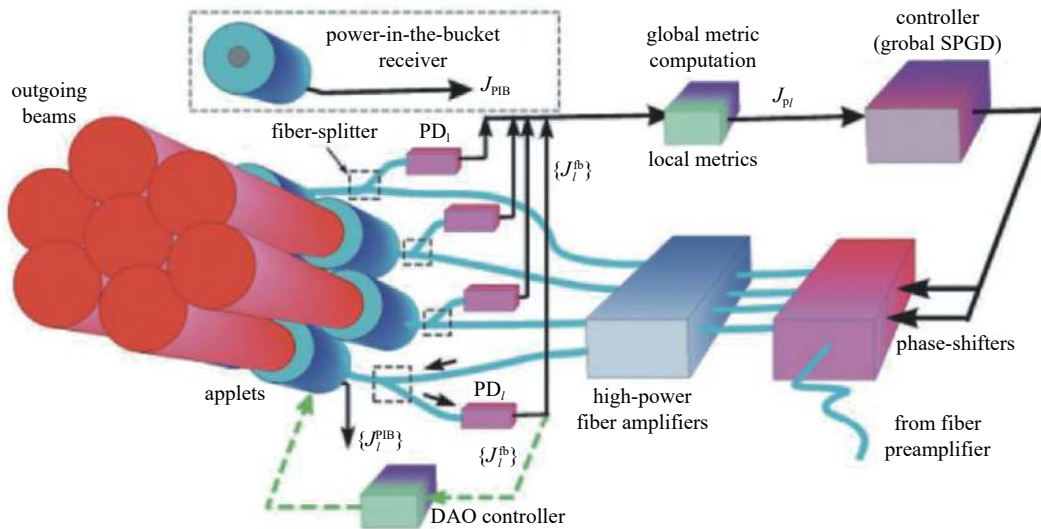


Fig. 4 Schematic diagram of APPLE system

图 4 APPLE 系统基本原理示意图

技术。在提出 APPLE 概念后的次年, APPLE 系统正式由雷神公司开展研制工作^[38]。但是经历了多年的技术发展与迭代, 距离 APPLE 系统的完美实现仍然有较大的差距^[39-40]。

2011 年, DARPA 将 APPLE 计划正式更名为 Excalibur。该项目计划使用由 Optonicus 公司制造的光纤激光器作为光源, 通过 3 簇 7 阵元的模块构成一个 21 阵元激光相控阵, 单路功率达到 3 kW, 每簇口径约为 10 cm, 如图 5 所示。利用其开发的超快算法, Excalibur 相控阵系统具备在 1 ms 内校正大气畸变的能力。2014 年, DARPA 在其高能激光演示系统中实现了 7 km 距离的激光发射演示试验, 经过大气传输后保持了较好的光束质量。DARPA 认识到了大气畸变校正的重要性, 计划重点发展 Excalibur 相控阵系统的湍流校正能力, 并大幅提高输出功率, 但是至今未见其后续成果的报道^[41]。

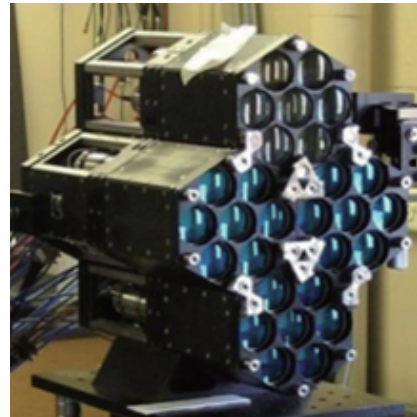


Fig. 5 Prototype of Excalibur system

图 5 Excalibur 系统实物样机

DARPA 后续的 Endurance 项目可以看做是 Excalibur 项目的延续, 该计划旨在发展适配于无人机或载人飞机的激光系统, 以此应对潜在威胁, 并试图推进 Excalibur 项目中开发的技术的早期应用, 重点集中于轻量化的组件以及敏捷灵活的光束扫描器件的开发。

从 APPLE 项目、Excalibur 项目以及 Endurance 项目可以看出早期美国在光学相控阵领域的研究更多的集中于高能激光相干合成技术以及大气畸变校正技术。随着近年来半导体技术、精密制造技术和光子集成电路技术的不断成熟, 美国在光学相控阵技术领域的研究开始向小型化、轻量化的光学相控阵器件转型。

DARPA 于 2013 年实施的短程大视场高灵敏电子控制光子发射器 (SWEEPER) 项目, 计划开发对 10 W 级激光进行 45° 范围内大视场扫描的芯片级波导光学相控阵器件。2017 年实施的模块化光学孔径构建块 (MOABB) 项目计划开发 mm 级单元模块组件, 通过在二维平面上拼接组合的方式任意构成光学系统, 以光学相控阵的方式实现传统光学系统功能的同时, 大幅减小系统规模与重量。2021 年发展的便携式光集成网络收发器 (POINT) 项目重点开发基于光学相控阵技术的小型化、轻量化光子收发器, 用以实现自由空间光通信, 并计划在卫星通信中进行演示。将于 2023 年实施的模块化高效激光技术 (MELT), 计划开发基于激光相干合成技术的高能激光模块, 希望以此实现可扩展的高能激光光源。

从近年来 DARPA 在光学相控阵技术领域的研究方向可以看出, 光学相控阵技术在高功率的基础上, 正逐步向小型化、高灵活性、大自由度的方向拓展, 为了实现这一目标, 需要在高品质光源、激光相干合成、相控阵光束扫描、大气链路畸变控制以及探测成像等技术应用领域都有所突破。本文接下来将重点介绍以上相关领域的发展

历程与技术现状。

2 光学相控阵的应用研究进展

2.1 高品质激光光源

高亮度的光源是光学相控阵的核心组成之一,是关系激光合成与传输性能的重要环节。窄线宽与高光束质量是光学相控阵系统对光源的核心诉求,并且应用于光学相控阵的激光光源还应该具有结构紧凑以及可模块化与集成化的特性。气体激光器和化学激光器虽然输出功率水平极高,但是其庞大的规模注定其难以应用于光学相控阵系统中。在现有激光体制下,按照技术途径可以将适用于光学相控阵的光源主要分为固体激光、光纤激光和半导体激光三类,各类光源的对比如表 1 所示。

表 1 各类激光光源技术的对比
Table 1 Contrast of different laser sources

type	power	feature	compactness	applicability in OPA
gas laser	>500 kW	extremely high power large volume	extremely low	×
chemical laser	>MW	extremely high power large volume	extremely low	×
solid-state laser	>100 kW	high power compact structure	high	√
fiber laser	~10 kW	high power flexible	higher	√
semiconductor laser	~100 W	highly compact high efficiency	extremely high	√

在目前的技术发展水平下,固体激光取得了最高的单路激光器的输出功率。光纤激光虽然在单路激光器输出功率上略有不足,但是因其具有波长可调谐、模式可调谐的灵活性质,以及相对固体激光而言更强的紧凑性,在光学相控阵领域获得了更广泛的应用。半导体激光的物理机制限制了它的极限功率,其输出功率水平与固体激光和半导体激光仍有数个量级的差距。但是因其具有最高的集成度以及更高的转化效率,在弱光条件下的光学相控阵系统中具有非常广泛的应用。下面分别介绍三类光源技术。

2.1.1 固体激光

固体激光起步较早,同时得益于半导体激光泵浦技术和自适应光学技术的应用,固体激光在 21 世纪初期得到了飞速的发展,在输出功率和光束质量方面都取得了重大突破。板条固体激光器因其具有相较于棒状和薄片固体激光器等构型更好的热管理性能以及更高的光束质量,一直是近年来固体激光领域的研究热点^[42-43]。国内外的研究机构基于板条固体激光结构在取得高输出功率的同时,都获得了较好的光束质量。2002 年,美国 TRW 公司研制的 Nd:YAG 板条激光器实现了 5.4 kW 功率,光束质量 2.4 倍衍射极限 (DL) 的输出^[44]。2009 年,美国 Northrop Grumman 公司研制了主振荡功率放大(MOPA)结构的板条激光系统,得到了 15 kW 功率的高光束质量单路激光输出。这一研究由美国联合高功率固体激光计划(JHPSSL)推动,旨在研发用于百千瓦级激光合成系统的高功率光源。该 MOPA 板条激光系统采用了传导冷却端面泵浦的三级放大结构,同时在系统中引入了自适应光学系统进行光束净化,在单路 15.3 kW 运行条件下可以实现 1.58 倍衍射极限的光束质量,最高运行时间可达 5 min^[45]。2018 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所利用 Yb:YAG 板条激光实现了室温条件下的 22.3 kW 的输出,该系统结构如图 6(a)所示。该激光系统同样采用 MOPA 结构实现高功率输出,最大光光效率达到 30%,利用自适应光学技术将光束质量由 9.2 倍衍射极限提升至 3.3 倍衍射极限^[46]。2020 年,中国科学院理化技术研究所报道了 21.2 kW 输出的 MOPA 结构 Yb:YAG 板条激光系统,该系统结构如图 6(b)所示。该系统采用了准连续的输出方式,输出脉宽 200 μ s,重频率 1 kHz,使用自适应光学技术最高光束质量达到 1.94 倍衍射极限,是目前为止 20 kW 级别单路激光器中最高光束质量^[47]。单路固体激光代表性研究成果详细汇总如表 2 所示。

2.1.2 光纤激光

光纤激光以其相比于固体激光更强的换热能力以及更轻量化的特性,是目前光学相控阵系统中更为广泛使用的光源类型。光纤激光是一种以掺杂光纤作为增益介质的光源技术。在 1964 年,Snitzer 等人首次实现了利用光纤作为增益介质的光放大^[50],然而其后的数十年间受限于泵浦源与材料技术等关键技术,直至 21 世纪初期光纤激

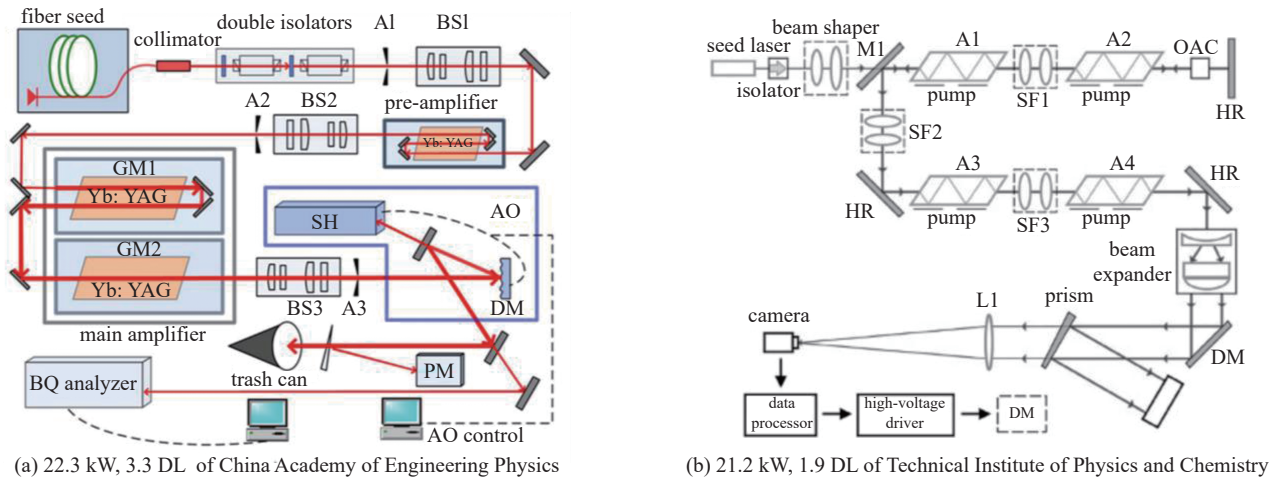


Fig. 6 Schematic diagram of solid-state slab lasers

图 6 板条固体激光器系统示意图

表 2 单路固体激光代表性研究成果^[45-49]

Table 2 Representative research results of solid-state lasers

year	type	institution	power/kW	beam quality
2009	slab	Northrop Grumman , USA	15.3	1.58
2010	slab	North China Research Institute of Electro-Optics, China	11.0	4.8
2011	slab	China Academy of Engineering Physics, China	11.3	7.56
2012	disk	Boeing, USA	30.0	< 2
2015	disk	General Atomics, USA	150.0	
2018	slab	China Academy of Engineering Physics, China	22.3	3.3
2018	disk	China Academy of Engineering Physics, China	9.8	14.7
2019	slab	Technical Institute of Physics and Chemistry, China	60.0	
2021	waveguide	China Academy of Engineering Physics, China	10.0	< 3

光器的功率才突破百 W 量级^[51]。2004 年, Jeong 等人将单模光纤激光器的输出功率推升至 1.36 kW^[52]。自光纤激光迈入 kW 时代后, 进入了飞速发展的阶段。高功率光纤激光的研究主要分为两个技术路线: 一类是单振荡器结构直接输出的光纤激光器, 另一方面是采用 MOPA 结构的光纤激光器。单振荡器结构直接的光纤激光器难以实现超高功率的直接输出, 但是其结构相对简单且稳定, 更容易实现高光束质量输出, 所以更多用于低功率应用场景或作为高质量的种子源进行放大。MOPA 结构的光纤激光器相比于单振荡器结构的光纤激光器在光束质量方面略有不足, 但是更易实现超高功率的输出。在单振荡器结构的光纤激光器方面, 2016 年日本的 Fujikura 公司利用大纤芯直径结构得到了单模 3 kW 的激光输出, 所用光纤总长度达到 20 m, 实测斜效率达到 70%^[53]。2018 年, 国防科技大学利用 915 nm 激光二极管双向泵浦比例优化的方式抑制光纤激光的受激拉曼散射和横模不稳定性, 利用芯径/包层直径比 25/400 的增益光纤实现了 5.2 kW、光束质量因子 M^2 约为 2.2 的输出, 最高斜效率达到 63%, 该激光器结构如图 7 所示^[54]。2020 年, 日本 Fujikura 公司报道了输出功率达到 8 kW 的近单模光纤激光器, 该成果是目前

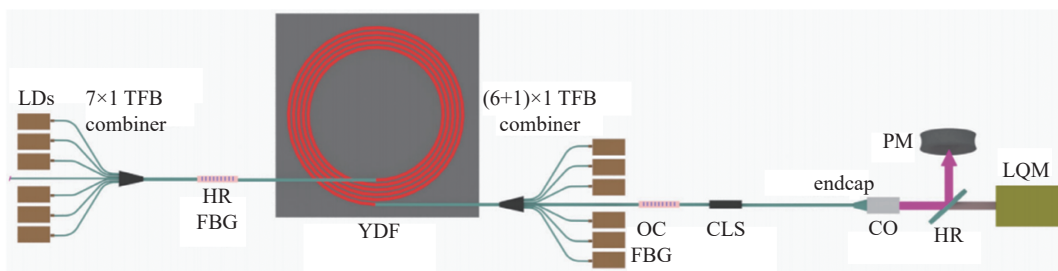


Fig. 7 5.2 kW all-fiber MOPA configuration

图 7 5.2 kW 全光纤激光振荡器结构

为止已报道的单光纤激光振荡器的最高输出。同年,国防科技大学的单光纤激光振荡器输出功率也突破了 7 kW^[55]。在 MOPA 结构的光纤激光器方面,2012 年,美国 IPG 公司利用同带泵浦技术实现了 MOPA 结构的单模 20 kW 的输出^[56]。近年来国内研究单位包括中国工程物理研究院、中国科学院、国防科技大学和清华大学等也推进了 MOPA 光纤激光的研究,但是相比于国外先进水平仍有一定差距。2018 年,中国工程物理研究院利用泵浦增益一体化光纤,通过长距离分布式侧面泵浦技术实现了 11.23 kW 的激光输出^[57]。2019 年,中国科学院上海光学精密机械研究所通过 Al-P-Si 三元光纤获得了 10.14 kW 的激光输出^[58]。单路光纤激光代表性研究成果详细汇总如表 3 所示。

表 3 单路光纤激光代表性研究成果^[53-63]

Table 3 Representative research results of fiber lasers

year	type	institution	power/kW	beam quality
2016		Fujikura Ltd., Japan	2	1.2
2016		National University of Defense Technology, China	2	1.6
2017		Fujikura Ltd., Japan	3	1.3
2017		National University of Defense Technology, China	3.05	1.3
2018	monolithic fiber	Fujikura Ltd., Japan	5	1.3
2018		National University of Defense Technology, China	5.2	2.2
2020		Fujikura Ltd., Japan	8	
2020		National University of Defense Technology, China	7	2.4
2021		National University of Defense Technology, China	6	1.3
2015		National University of Defense Technology, China	3.15	1.6
2016		Massachusetts Institute of Technology, USA	3.1	1.15
2017	MOPA	Tianjin University, China	8.05	4
2018		China Academy of Engineering Physics, China	11.23	
2019		Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China	10.14	
2021		China Academy of Engineering Physics, China	5.07	1.252
2021		National University of Defense Technology, China	6	1.36

2.1.3 半导体激光

半导体激光转化效率高,结构上相比于固体和光纤激光器更为紧凑,在光学相控阵领域同样有着广泛的应用。严格来说只有高功率、窄线宽的半导体激光器可以应用于光学相控阵系统。半导体激光器在高功率运行条件下会出现纵向烧孔效应、双光子吸收、侧向反波导效应和增益压缩效应等物理过程^[64-65],另外半导体激光器本身的物理机制也不适宜直接输出可与固体或光纤激光可比拟的超高功率激光,所以在弱光领域半导体激光的应用更为广泛。近年来国内外的研究机构与企业在大功率半导体激光领域取得了众多优秀成果。2013 年,日本的 Hamamatsu Photonics K.K.公司报道了室温条件下 19.8 W 功率 915 nm 半导体激光器,最大光电效率可达 68%^[66]。2017 年,日本 Fujikara 公司利用宽条型结构,实现了单管最高输出功率 33 W 的 915 nm 半导体激光器^[67]。同年,美国的 IPG 公司报道了效率可达 73% 的 976 nm 单管半导体激光器^[68]。2020 年,西安立芯光电公司报道了 12 °C 运行条件下的 30.1 W 功率 808 nm 单管半导体激光器^[69]。在窄线宽半导体激光器研究领域,利用内腔反馈技术目前已经可以轻易实现带宽小于 10 kHz 的窄线宽半导体激光器^[70]。利用外腔反馈技术则可以进一步抑制半导体激光器的带宽,2015 年德国 FBH 研究所利用集成式共焦法布里-珀罗腔构建的共振反馈谐振腔甚至可以实现 15.7 Hz 的超窄线宽^[71]。

2.2 激光相干合成

无论何种激光器都会受限于非线性受激散射、热效应、材料损伤以及模式不稳定性等非理想因素的影响,输出功率不可能无限制的提高^[72-73]。以光纤激光器为例,美国劳伦斯-利弗莫尔实验室的 Dawson 等人建立了单束光纤激光极限输出功率水平的物理模型,分别评估了单束掺镱和掺铥光纤激光的极限功率为 36.85 kW 和 36.2 kW^[74]。该模型所得到的结果是多模宽谱光纤激光的理论极限值,实际上单模窄线宽光纤激光的极限功率水平将远低于该理论预估。随着单束光纤激光功率的不断攀升,激光非线性效应以及热效应愈发明显,单束光纤激光的功率提升难度也越来越大。若想突破单台激光器输出功率的理论极限水平,就不得不使用激光合成技术。利用多路激光合成发射,便可以在不增加单束激光功率的前提下,大幅提升远场激光亮度^[75]。激光合成包括非相干合成和相干合

成。非相干合成使用 N 路激光的功率叠加, 可以令远场峰值亮度提升至 N 倍。而相干合成则是通过锁相的方式令 N 路激光在远场产生相长干涉, 可以令远场峰值亮度提升至 N^2 倍。严格来说只有激光相干合成系统属于光学相控阵, 非相干合成中并没有使用相位控制技术, 不属于光学相控阵的范畴。相比于非相干合成, 相干合成具有更大的应用潜力, 国内外研究机构针对激光相干合成均开展了大量研究, DARPA 主导的 MELT 项目更是将激光相干合成技术作为未来五年中的研究重点之一。

激光相干合成作为光学相控阵的典型应用, 其重要特征便是独立控制多路分立孔径输出激光的参量, 实现等效大口径强激光输出。子孔径激光参量的控制技术路线主要包括光程控制、倾斜控制和活塞相位控制。光程控制通过补偿子束光程, 控制束间光程差在光源相干长度以内, 是实现相干合成的必要条件。倾斜控制通过控制子束光轴, 确保阵列光场可以在目标处有效重合叠加。活塞相位控制则是对子束的残余相位误差进行补偿, 实现子束的高效相干合成。无论基于何种激光体制的激光相干合成, 均遵循以上技术途径。激光相干合成目前主要有两大发展方向, 即高功率和多路数。围绕核心发展需求, 激光相干合成按照技术途径可以分为气体激光相干合成、半导体激光相干合成、固体激光相干合成和光纤激光相干合成, 其中以固体激光相干合成和光纤激光相干合成最为成熟, 也是一直以来的研究热点。

激光相干合成最早应用于气体激光领域, 1964 年美国 Bell 实验室的 Enloe 等人最先用两路氦氖激光器实现了激光相干合成^[76]。此后苏联、法国、英国和中国等国家也在气体激光相干合成领域展开了大量的研究工作^[77-79], 但是随着以固体激光和光纤激光为代表的新型激光光源技术的成熟, 气体激光相干合成的研究逐渐趋于边缘化。近年来也有部分关于化学激光相干合成和半导体激光的相干合成研究, 但是系统输出功率均不过数十 W 量级^[80-81], 距离固体激光和光纤激光相干合成的功率水平有较大的差距, 长期以来一直未能成为相干合成的研究主流。半导体激光相干合成与气体激光相干合成类似, 在合成功率方面并没有体现出明显的优势, 近年来所报道的半导体激光相干合成系统功率水平不过数十 W 量级^[82]。尽管有多种提升半导体激光合成功率的技术方法被提出^[83-84], 但是长期以来半导体激光在相干合成领域并未出现明显进展, 反而在非相干合成领域大放异彩, 合成功率可达数 kW 量级^[85]。

在高功率激光相干合成领域成果最为突出的当属固体激光。20 世纪末至 21 世纪初期, 固体激光的相干合成系统仅能实现瓦量级的输出水平^[86-87]。美国的 Northrop Grumman 公司在 JHPSSL 计划的推进下进行百 kW 级固体激光系统的研制, 2008 年时实现了两路固体激光相干合成 30 kW 有效输出的目标, 在 300 s 连续运行条件下平均光束质量达到了 2.15 倍衍射极限。在 2009 年时, 首先实现了百 kW 量级的固体激光相干合成系统^[88], 如图 8 所示。该系统包含 8 路子激光相干合成模块, 每个子模块采用 MOPA 结构, 单路激光可以实现 15 kW 输出, 相干合成系统总输出功率可达 100 kW。时至今日该系统仍是国际上已报道的固体激光相干合成最



Fig. 8 100 kW solid-state laser system by Northrop Grumman
图 8 美国 Northrop Grumman 公司 100 kW 固体激光系统装置

高水平, 也是目前整个激光相干合成领域的最高功率水平。自此之后国内外再无超高功率固体激光相干合成系统的报道, 对于固体激光相干合成的研究转向相干合成的控制及驱动技术的方向^[89-90]。

光纤激光是近年来激光相干合成领域最为热门的研究方向, 自 DARPA 提出 APPLE 计划后, 光纤激光相干合成技术取得了飞速的发展, 众多卓越的成果相继涌现。在高功率、多路数的光纤激光相干合成系统方面, 美国、欧洲和中国等国家和地区都开展了众多的研究工作。相比于固体激光, 光纤激光更容易实现多路数相干合成。2006 年, 美国林肯实验室实现了基于主动锁相的 32 路光纤激光相干合成, 相位误差小于 $\lambda/50$ ^[25]。2011 年, 法国 Thales 研究中心将光纤激光相干合成的路数提升至 64 路^[91]。2020 年, 国防科技大学实现了 107 路光纤激光相干合成, 该系统使用了 1064 nm 波段激光, 进行两级分束之后通过正六边形拼接的结构达到了 92% 的占空比, 如图 9 所示。这一成果是目前光纤激光相干合成领域的路数之最^[92]。2011 年, 国防科技大学实现了 3×3 结构的 1.08 kW 光纤激光相干合成系统^[93]。美国林肯实验室实现了 8 路 4 kW 光纤激光相干合成, 相应原理如图 10 所示^[94]。近年来, 中国工程物理研究院流体物理研究所也在光纤激光相干合成领域针对系统研制和算法优化等关键技术问题开展了大量深入的研究工作, 取得了重要技术突破。目前已实现超 30 路的高效率光纤激光相干合成, 综合相位误差 $\lambda/54$ ^[95-98]。光纤激光相干合成系统最具代表性的成果当属 2015 年林肯实验室的 42 路 44 kW 光纤激光相干合成系统, 该成果

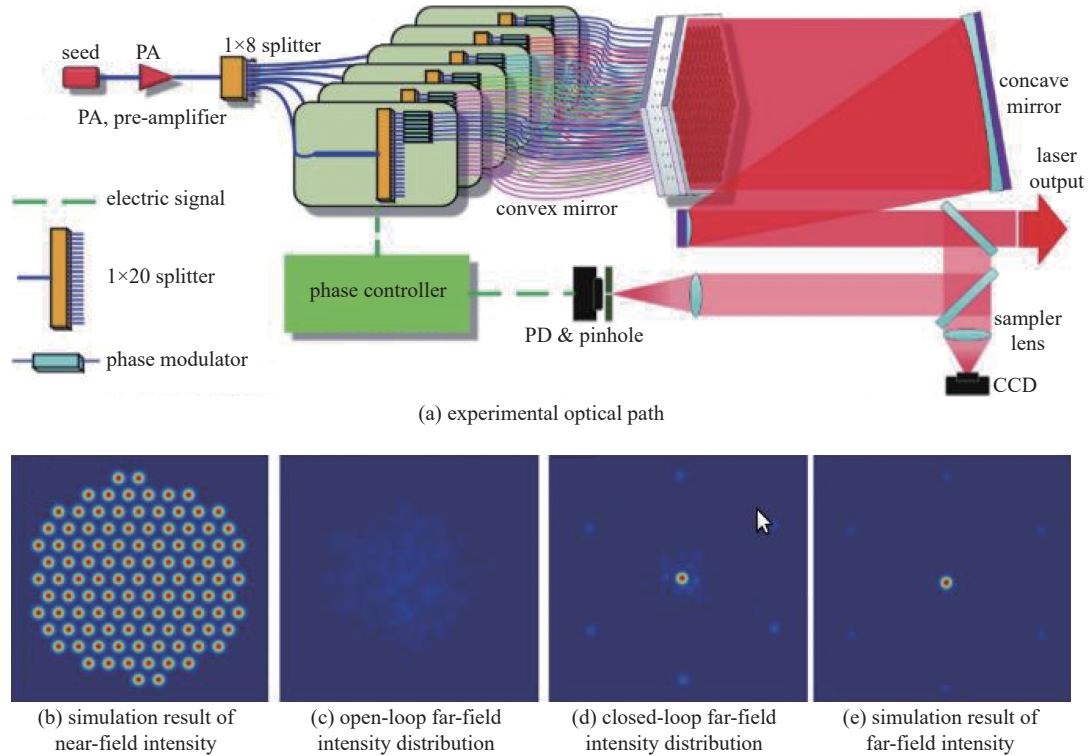


Fig. 9 107-channel fiber laser coherent combining system
图 9 107 路光纤激光相干合成系统结构图及实验结果

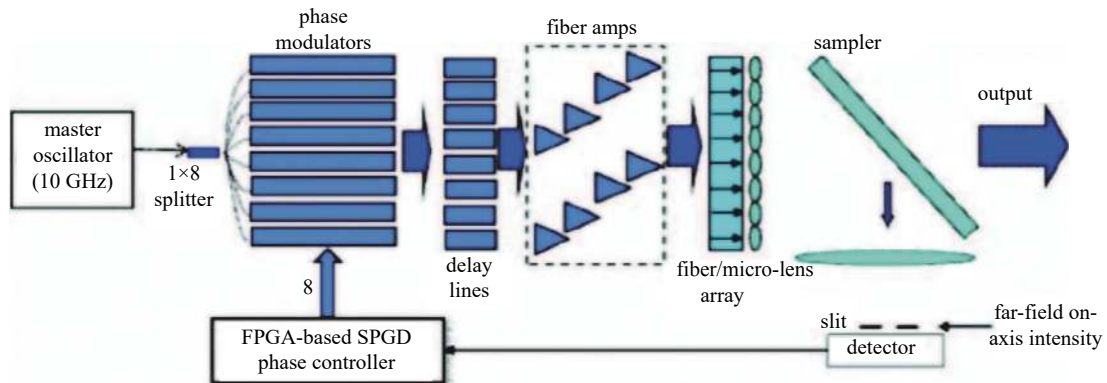


Fig. 10 4 kW fiber laser coherent beam combining by Lincoln Lab. MIT
图 10 美国林肯实验室 4 kW 光纤激光相干合成系统原理示意图

是目前光纤激光相干合成领域的功率之最^[99]。

在追求高功率、多路数相干合成的过程中，研究人员逐渐意识到光程控制、倾斜校正等相位控制技术对于高效相干合成的重要性。激光光子路之间的光程一旦不匹配就会导致群延时效应，影响最终的光束合成效率。而倾斜像差则会导致阵列光束在目标处产生光场的错位，进而不能实现有效的相长干涉叠加。随着激光合成路数的增加，硬件单元数量规模变得更为庞大，势必会影响相位控制算法的收敛速率。此外，随着激光合成功率率的上升，热效应导致的相位噪声和波前倾斜也将更为严重，又进一步增加了相位精密控制的难度。为此，近年来多种新型相位控制方法被提出，包括基于自适应空间光纤激光耦合的倾斜控制法、基于深度学习的锁相控制方法、正交编码抖动法以及自适应随机并行梯度下降算法等^[100-102]，通过算法的优化与软硬件系统的配合，提升有效相位扰动的抑制带宽，一定程度上解决了高功率、多路数激光相干合成的难题。综上，激光相干合成代表性研究成果详细汇总如表 4 所示。

2.3 相控阵激光扫描

光学相控阵的另外一个重要的应用就是实现非机械式的光束偏折。在激光通信 ATP 系统和激光雷达等系统中需要光束进行实时的空间扫描实现光束的定向投射^[105]。采用转塔或振镜的常规机械光束偏折装置中，由于机

表 4 激光相干合成代表性研究成果^[91-104]

Table 4 Representative research results of coherent beam combining

year	type	institution	power/kW	number of channels
2008	solid-state laser	Northrop Grumman, USA	30	2
2009		Northrop Grumman, USA	100 (Record)	8
2011	fiber laser	Thales Research & Technology, France		64
2011		National University of Defense Technology, China	1.08	9
2011		Massachusetts Institute of Technology, USA	4	8
2011		University of Dayton, USA		7
2014		Northrop Grumman, USA	2.4	3
2015		Massachusetts Institute of Technology, USA	44	42
2016		University of Dayton, USA		21
2019		National University of Defense Technology, China		60
2019		National University of Defense Technology, China	8	7
2020		Thales Research & Technology, France	0.105	61
2020	Civan Advanced Technologies, Israel	16	37	
2020	National University of Defense Technology, China		107 (record)	

械式的旋转扫描机构转动惯量大,因此难以提升系统的响应速度进而影响扫描效果^[106]。基于光学相控阵的非机械式光束扫描技术可以利用相位控制实现无机械转动的光束大角度偏折。目前,可用于光束扫描的光学相控阵主要有基于液晶器件的光学相控阵、基于硅基光波导的光学相控阵和基于 MEMS 的光学相控阵^[107-109]。整体上来看,相控阵激光扫描技术的发展面向大口径、高透耐强光和大视场三个主要方向,以上三类主要的光束扫描光学相控阵技术的发展侧重点与技术现状各不相同。

液晶相控阵是目前发展相对成熟的相控阵激光扫描技术,在大口径、耐强光方面相比于其它类型相控阵具有更明显的优势。但是根据公开文献报道,液晶相控阵也仅停留在单元技术方面,液晶相控阵的关键技术仍处于攻关阶段。世界上的第一个一维液晶相控阵由美国的 Raytheon 公司于 1989 年实现,如图 11 所示^[110]。该一维液晶相控阵器件共包含 43 000 个电极,驱动液晶产生周期性闪耀光栅实现光束 $\pm 4^\circ$ 的偏折。通过改变电极电压即可改变闪耀光栅的台阶数,进而产生光束扫描的效应。但是当时的技术尚不成熟,该液晶光学相控阵仅能实现离散角度的扫描,且光束传输效率不理想,最高仅为 85%。2000 年,美国 BNS 公司的硅上液晶(LCoS)相控阵实现了 $\pm 3^\circ$ 范围内 8000 个偏转角度的准连续光束扫描,有效波长范围 633~1550 nm,有效光学口径达到了 7.4 mm \times 6 mm^[111]。以上的研究中可以看到单一的液晶相控阵均难以实现大范围的光束扫描,为此不少学者开展了扫描角度放大技术的研究。最常见的技术手段便是利用在大的角度范围内产生多个离散扫描方向,以扫描范围拼接的方式实现扫描角度的放大,主要包括级联双折射棱镜、多重体全息光栅和圆形偏振光栅等技术途径^[112-114]。2008 年,北卡罗莱纳州立大学研制了一款对 1550 nm 红外光可以实现 $\pm 40^\circ$ 范围连续扫描的一维液晶相控阵器件,大角度衍射效率高于 80%,该器件如图 12 所示^[115]。

得益于材料科学的发展,加之先进工业制造对高功率激光器件提出了更高的要求,近年来液晶相控阵向着耐强光方向快速发展。2010 年,美国空军实验室便报道了强光液晶相控阵的研究成果,其研制的液晶相控阵最高可实现 100 W/cm² 的强光耐受^[116]。2016 年, Rockwell 公司和 Boeing 公司开发的 Transcon 1 液晶相控阵导电薄膜呈现了极好的光学透过性,吸收率仅为 0.2%,结合主动散热系统,该液晶相控阵可承受百瓦级激光辐照^[117]。国内受限于材料工艺等问题,对于耐强光的液晶相控阵研究多停留在理论设计层面,针对仪器设备的研究较少。2017 年,

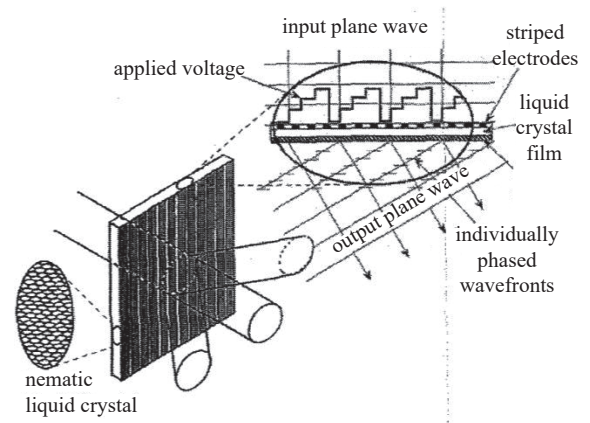


Fig. 11 One-dimensional liquid crystal optical phased array by Raytheon

图 11 美国 Raytheon 公司研制的一维液晶光学相控阵原理

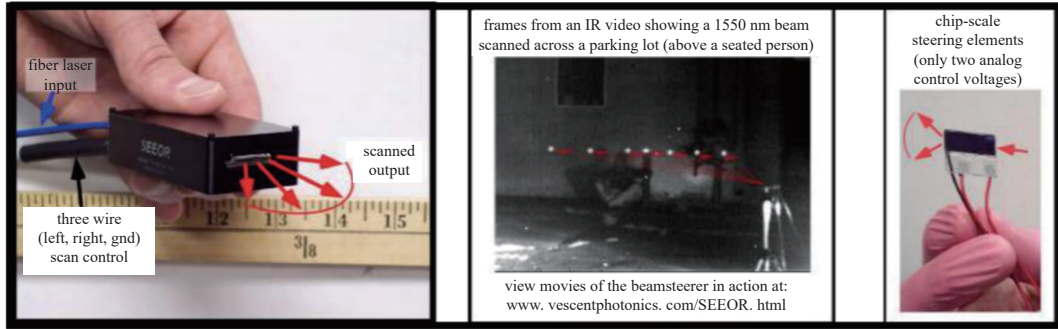


Fig. 12 Wide-angle 1D liquid crystal optical phased array by North Carolina State University

图 12 北卡罗莱纳州立大学大角度一维液晶相控阵器件

电子科技大学研制的反射式液晶移相器报道了 272.4 W/cm^2 的高功率激光耐受测试,但是在主动制冷的条件下温升仍然达到了 $14 \text{ }^\circ\text{C}$,反射率仅有 89.87% ^[118]。自 2002 年起,中国工程物理研究院流体物理研究所在耐强光液晶相控阵器件方面也开展了长期工作,针对液晶器件耐强光损伤特性进行了众多研究^[119-123]。在前期研究基础上,从 2010 年开始系统性地开展了基于液晶相控阵的强激光调控技术与器件研制^[124-127]。目前中国工程物理研究院流体物理研究所在耐强光液晶器件方面取得了关键进展,所研制的液晶光阀在无主动制冷的条件下,耐受强激光功率密度可达 2300 W/cm^2 ^[128]。

硅基光波导相控阵在高功率激光耐受性上相比于液晶相控阵有较大差距,但是其集成度更高,扫描角度与扫描频率都有着明显的优势,近年来也得到了广泛应用。绝缘体上硅(SOI)晶片的优异光学性能使构建百纳米尺度的波导光路成为了可能^[129]。1997 年,Trinh 等人研制了世界上第一个基于 SOI 波导技术的相控阵式波分复用/解复用器,标志了硅基光波导相控阵技术的起步^[130],此后硅基光波导相控阵向着更大视场、更快扫频的方向发展。

在一维硅基光波导相控阵方面,美国哥伦比亚大学的 Christopher 等人于 2018 年设计了一种新型 64 路波导相控阵,通过波导间能量串扰抑制实现了一维 180° 的超大扫描视场角,如图 13 所示,该成果是目前为止已报道的最大扫描范围的波导相控阵^[131]。二维硅基光波导相控阵实现大视场扫描相对较难,但是随着硅光子技术的不断发展,仍然涌现了众多优秀的成果。2014 年,美国麻省理工学院的 Yaacobi 等人通过级联结构的方式实现了大视场二维波导相控阵,扫描频率可达 100 kHz ,最大的扫描角度可达 51° ^[132]。2015 年,基于 DARPA 的 SWEEPER 项目所研制的 64×64 单元相控阵器件最高扫描频率达到了 100 kHz ,总视场仅达到了 51° ,距离设计目标仍有一定差距,但是已经可以满足多数使用场景,并正在寻求车载激光雷达的应用化。DARPA 计划在光电异构集成计划 (E-PHI) 中进一步推进 SWEEPER 的研究,以发展更高效的硅基激光元件^[133]。2018 年,南加州大学的 Chung 等人利用 SOI 射频 CMOS 技术,将 1024 阵元波导相控阵与衰减器、数模转换器和可变移相器集成到了同一个芯片结构中,总规模 $5.7 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$,实现了 1550 nm 激光的 $\pm 22.5^\circ$ 扫描,如图 14 所示^[134]。2020 年,中国科学院航空航天信息研究所的 Ma 等人在波导相控阵中集成了多通道干涉激光器,该有源波导相控阵可以实现宽谱调谐范围的 $18^\circ \times 7^\circ$ 大视场^[135]。

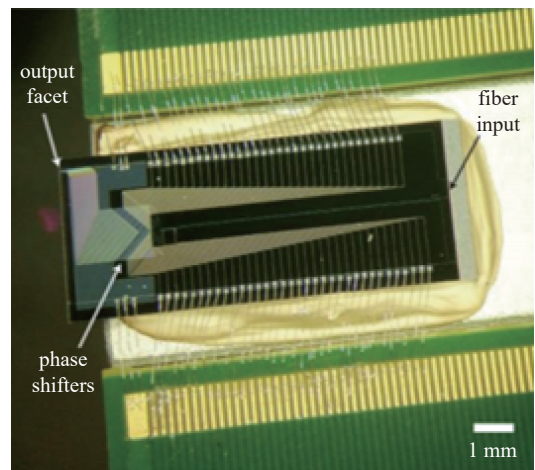


Fig. 13 64-channel 180° waveguide optical phased array

图 13 64 路波导相控阵 180° 视场一维相控阵

MEMS 相控阵本质上是利用电磁效应、压电效应或电热驱动微型机械结构对光束行为进行操控,因此有不少学者认为 MEMS 相控阵本质上不是非机械式的光束扫描技术。但是 MEMS 的机械结构尺寸与质量都非常微小,仍然可以将其视为一种近似无转动惯量的非机械式的光束扫描技术。MEMS 相控阵同样有着不耐强光的缺点,但是 MEMS 相控阵具有一定的半导体集成特性,且容易高效实现大视场的光束扫描。在高效率的 MEMS 相控阵研究方面,2014 年 Yoo 等人研制的基于高对比度亚波长光栅的 32×32 阵元 MEMS 相控阵,对 1550 nm 波段实现了超过 99.9% 的反射效率,最大扫描角度 $\pm 2^\circ$ ^[136]。在大视场的 MEMS 相控阵研究方面,2020 年加州大学伯克利分校研

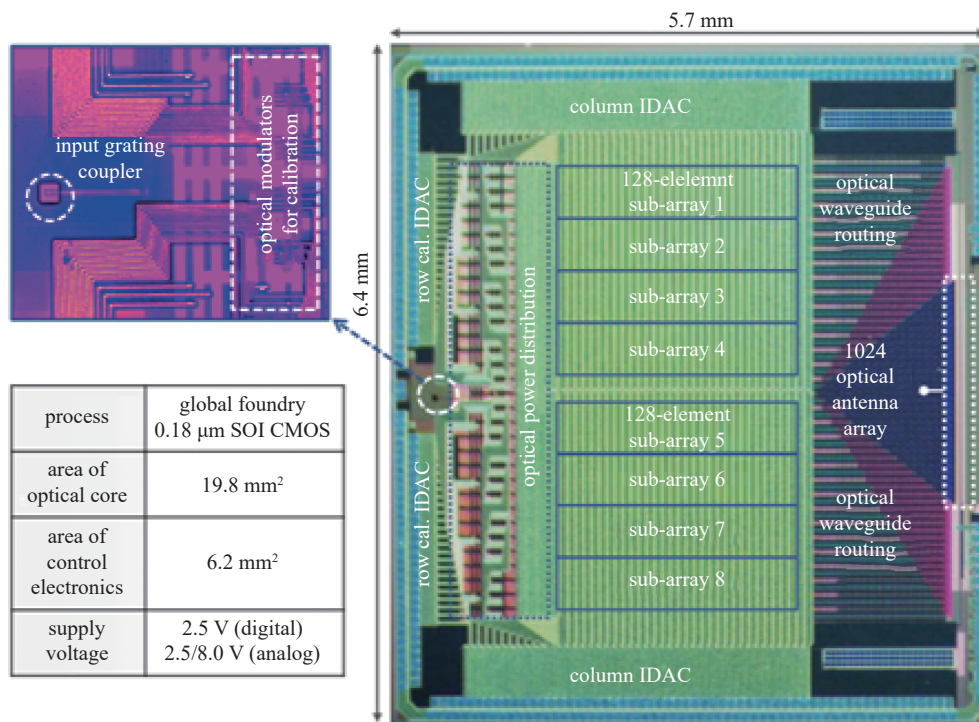


Fig. 14 CMOS waveguide optical phased array by University of Southern California

图 14 南加州大学基于 SOI CMOS 的集成波导相控阵

制的 8192 单元一维相控阵实现了 100° 的大视场^[137]。

除以上几类基本的相控阵激光扫描技术, 2021 年加州大学伯克利分校提出了一种新技术途径, 该单位研制的 16384 单元二维相控阵激光雷达结合了波导技术与 MEMS 技术, 通过 MEMS 光开关控制激光的光栅天线输出端口, 以此实现光束扫描。最大达到 $70^\circ \times 70^\circ$ 的视场, 配合鱼眼镜头有望实现 180° 的超大视场^[138]。

综合以上介绍, 表 5 分别对各类相控阵光束扫描技术的现状与未来主要发展趋势进行了总结。

表 5 相控阵光束扫描技术特点对比与主要发展趋势分析

Table 5 Contrast of optical phased arrays and corresponding development trend

type	maturity	feature	future trends
liquid crystal OPA	high	mature fabrication technology suitable for high-power application	large aperture high damage threshold large range
waveguide OPA	low	compactness large view field high frequency	more channels larger view field higher frequency
MEMS OPA	low	high efficiency fast response	more channels
novel OPA		flexible	more advantages integration

2.4 大气链路畸变控制

大气湍流是影响激光合成和传输效率的核心因素之一, 自适应光学技术是补偿大气湍流畸变最重要的技术手段^[139]。自适应光学的核心思想是通过波前调制器件对光束波前进行调制, 产生与光束传输路径累计畸变波前共轭的补偿波前, 以改善光束质量提升传输效率。按照技术途径, 自适应光学系统可以分为有波前探测的自适应光学系统和无波前探测的自适应光学系统。

有波前探测的自适应光学系统是利用波前传感器对传输路径的畸变进行实时探测, 并驱动波前调制器件直接产生共轭波前。有波前探测的自适应光学系统最常用的波前调制器件便是变形镜或液晶空间光调制器, 这两种器件均通过离散的相位调控来产生逼近真实连续的波前分布, 属于广义上的光学相控阵器件。有波前探测的自适应光学系统最主要的优势便是畸变校正带宽较高, 对于高速扰动的大气畸变有很好的抑制能力。2017 年, 美国的激光通信中继演示计划的实验中, 使用了 10 kHz 帧频的 Shack-Hartmann 波前传感器, 利用高阶变形镜和低阶变形镜

组合校正的方式,在相干长度 5 cm 的大气条件下,可以将地星通信的光束斯特列尔比提升至 0.7^[140]。同年,欧洲空间局的星地相干光通信系统,使用了 24×24 单元的变形镜和 21×21 单元的 Shack-Hartmann 波前传感器,对大气链路畸变控制的闭环带宽超过了 4 kHz^[141]。

无波前探测的自适应光学系统相比于有波前探测的自适应光学系统在畸变校正带宽上有明显不足,但是其结构更为简单,且可以实现传输链路畸变和光源自身畸变的同时校正,所以同样有着广泛的应用。20 世纪 70 年代,美国的 Hughes 实验室的 Bridges 等人提出了相干光学自适应技术(Coherent Optics Adaptive Technology, COAT),通过多抖动法对大气湍流畸变进行校正^[142]。COAT 技术的基本原理为利用探测系统接收由辐照目标表面散射的光强信息,通过分析计算产生补偿相位并加载到发射光源上,通过以上过程的迭代闭环过程实现实时的大气湍流畸变控制,提升远场辐照亮度与传输效率。由于 COAT 没有采用波前探测元件,所以可以归类于无波前探测的自适应光学技术。这种根据目标信息进行相位控制无波前探测的校正策略被称为目标在回路(Target in the Loop, TIL)技术,TIL 的一个重要优点便是目标表面的辐照光强信息包含了从光源到大气链路整个回路中所有过程的相位畸变信息,所以理论上通过目标信息的探测便可以直接实现全链路相位的补偿^[143]。

早期无波前探测的自适应光学技术受限于波前控制器和计算机性能的限制,波前控制精度和校正带宽均难以满足实用的需求。随着近年来光学相控阵技术的不断发展,TIL 技术才再次得到了一定的关注。相关的激光相干合成和发射技术绝大多数都是在实验室内进行研究,尽管有部分研究机构开展了 TIL 技术的实验研究,但是见于公开报道的成果较少。2005 年,APPLE 系统最初的设计理念中提到了利用子路相位控制实现大气湍流畸变的控制,但是后续再无相关实验研究报道。2011 年,美国代顿大学报道了基于 7 路自适应光纤准直器(Adaptive Fiber Optics Collimator, AFOC)的 7 km 大气链路长程相干合成实验,实验装置如图 15 所示^[144],其中: u 为驱动电压。实验

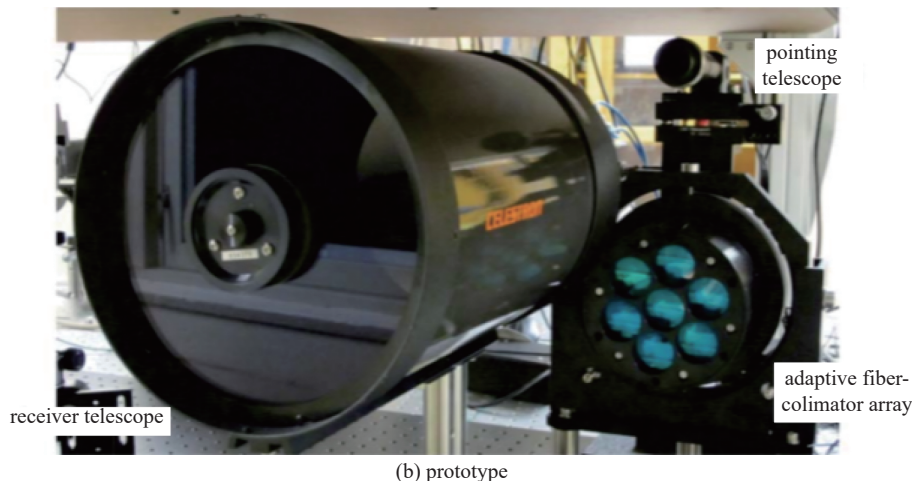
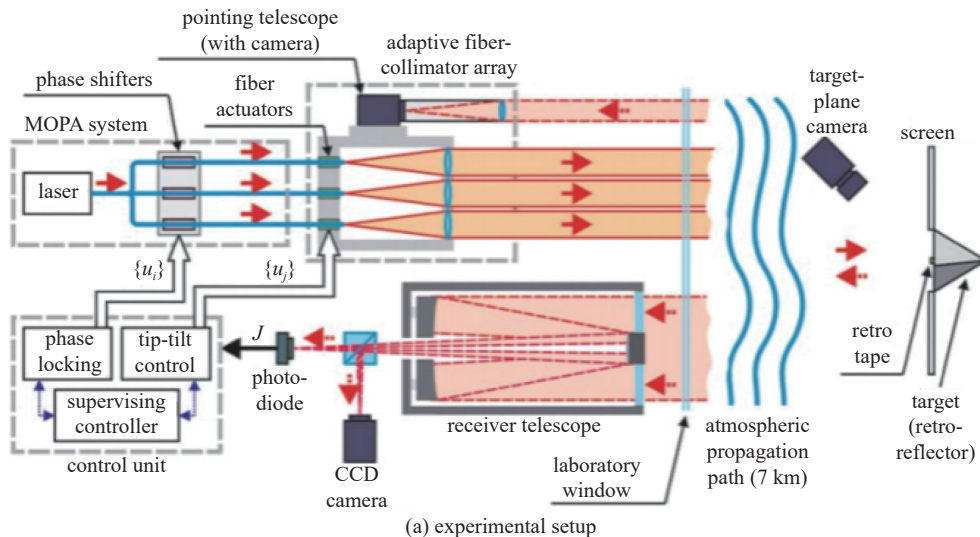


Fig. 15 7-channel coherent beam combining system by University of Dayton

图 15 代顿大学 7 路相干合成实验装置

中采用了延迟的随机并行梯度下降算法 (Delayed Stochastic Parallel Gradient Descent, Delayed-SPGD) 显著改善了远场的相干合成效果。2016年,该系统进一步扩展到了21路,如图16所示。该系统同样采用Delayed-SPGD算法进行闭环控制,最终实现了16.3倍的桶中功率提升^[145]。代顿大学的这项研究可以看作是APPLE计划的延伸,长期以来一直受到DARPA的资助,至目前为止该成果依旧代表了目标在回路技术的最高水平,后续尽管有多家单位跟进,但是在传输距离上还远不能达到代顿大学的水平。

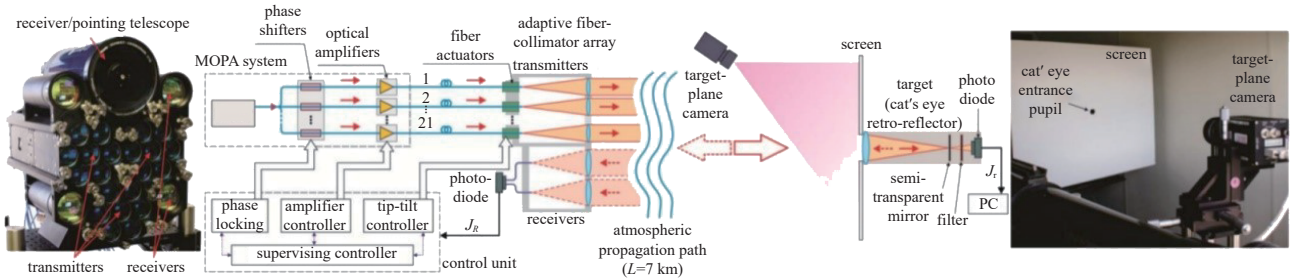


Fig. 16 Experimental setup of 21-channel coherent beam combining system by University of Dayton

图 16 代顿大学 21 路相干合成实验装置(2016)

国内主要有中国科学院光电技术研究所和国防科技大学进行 TIL 技术的研究。中国科学院光电技术研究所开展了基于共孔径传输控制的 7 单元光纤激光阵列相干合成研究,利用收发一体结构与 AFOC 倾斜控制,在实验室内模拟湍流的条件下实现了 7 路激光的相干合成,闭环运行时远场桶中功率提升至开环时的 4.6 倍^[13]。国防科技大学同样在实验室模拟湍流环境下开展了 TIL 技术研究,实现了 10 m 距离 9 路激光相干合成,总功率达到 100 W^[146]。2018 年两家单位开展了室外 TIL 实验,但取得的成果相比于美国仍有较大的差距^[147]。2021 年,中国科学院光电技术研究所搭建了 57 孔径光纤激光相控阵自适应光学系统,该系统由 3 簇填充因子为 0.903 的 19 孔径相控阵构成,并最终演示了低功率的 2.1 km 大气传输的目标在回路相干合成实验,实验装置原理如图 17 所示^[148]。这一成果代表了国际上公里级目标在回路相干合成路数的最高水准。综上,可见目前光学相控阵领域的大气畸变控制技术主流技术路线多采用 TIL 方法,表 6 总结了基于目标在回路的大气畸变控制技术代表性研究成果。

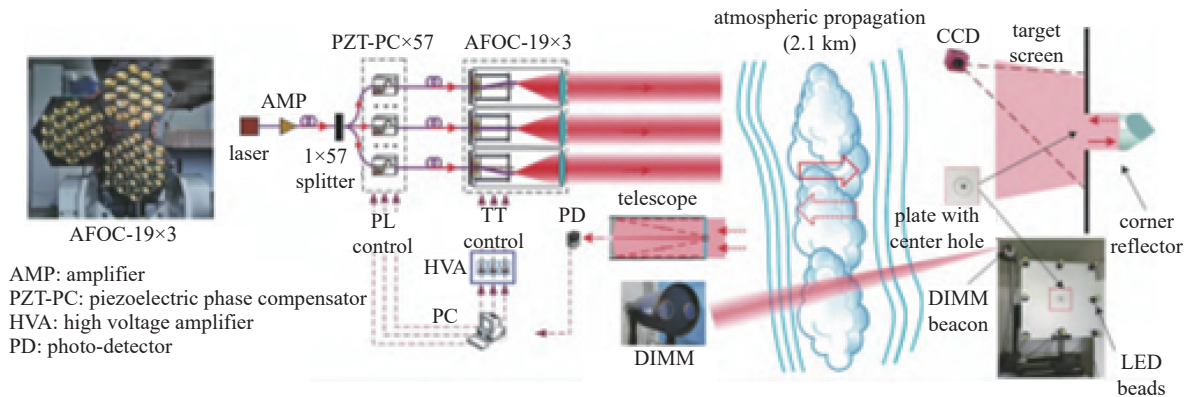


Fig. 17 57-channel TIL system by Institute of Optics and Electronics

图 17 中国科学院光电技术研究所 57 孔径光纤激光相控阵自适应光学系统

表 6 基于目标在回路的大气畸变控制技术代表性研究成果^[144-148]

Table 6 Representative research results of atmospheric distortion correction based on TIL

year	institute	number of channels	experimental environment
2011	University of Dayton, USA	7	7 km outdoor
2016		21	7 km outdoor
2012		7	5 m in Lab. (without turbulence)
2018	Institute of Optics and Electronics, China	7	0.2 km outdoor
2021		19	2 km outdoor
2021		51	2.1 km outdoor
2011	National University of Defense Technology, China	2	10 m in Lab.(without turbulence)
2012		9	10 m in Lab.(without turbulence)
2018		6	0.8 km outdoor

2.5 合成孔径探测成像

对于给定波长而言,探测望远镜系统的分辨能力取决于系统的有效光学口径。合成孔径探测成像是一种将多个小口径的光学镜面按照一定方式进行排列拼接,得到一个等效大口径光学系统的技术途径。合成孔径系统相比于常规的大口径单镜面系统,在保证较高的光学分辨率的同时,有效地节约了制造成本,并大幅降低了系统体积与自重,是高分辨率观测技术的重要发展方向之一^[149-153]。

合成孔径探测成像的概念最早于1951年被美国的古特异航空航天公司提出。1978年,美国的亚利桑那大学建造了世界上第一台合成孔径望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT),如图18所示^[154]。MMT由6组1.8 m口径的子望远镜拼接而成,成像效果可以等价为一台4.5 m口径的大型望远镜,同时还配备了控制面型的自适应光学系统。但是当时的技术尚不成熟,MMT仅能在30 sr的视场内成部分像。欧洲南方天文台在智利建造了甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)^[155]。VLT系统由4台8.2 m口径的子望远镜系统组成,等效口径达到16 m。在VLT系统建成后,欧洲南方天文台进一步在周围相继建造了4台1.8 m口径的辅助成像望远镜,通过与主望远镜系统的干涉成像获取更高的空间分辨率。大型双筒望远镜(Large Binocular Telescope, LBT)是美、德、意三国合作研制的斐索型望远镜,系统采用两片8.4 m口径的望远镜实现等效11.8 m口径的大口径,望远镜结构中使用了自适应光学技术控制波前,利用干涉成像原理进行高分辨率探测^[156]。2021年12月25日在法属圭亚那库鲁基地发射升空的詹姆斯韦伯太空望远镜可以算是目前世界上最为先进的合成孔径探测成像系统,18块正六边形子镜拼接合形成了6.2 m的主镜口径,角分辨率达到了0.07",远超哈勃太空望远镜的0.01"的角分辨率,肩负着探测宇宙形成初期状态的使命,如图19所示。詹姆斯韦伯太空望远镜从立项到正式升空,前后历经了20年的时间,解决了红外镜面材料、镜面面型精密控制、镜面拼接技术和镜面轻量化技术等关键科学问题,也为以后光学相控阵的研究提供了重要启示,即一味追求大系统、多路数可能并非明智之举。尤其是在空间光学场景和机载场景系统中,如何合理设计光学相控阵系统必将是未来研究人员需要深入思考的科学问题。

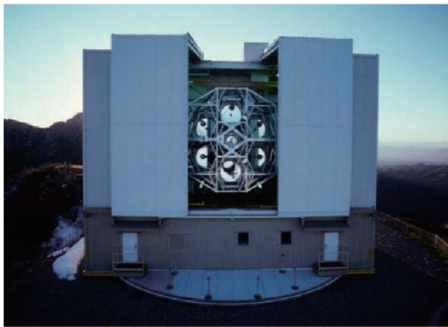


Fig. 18 MMT telescope system

图 18 MMT 望远镜系统

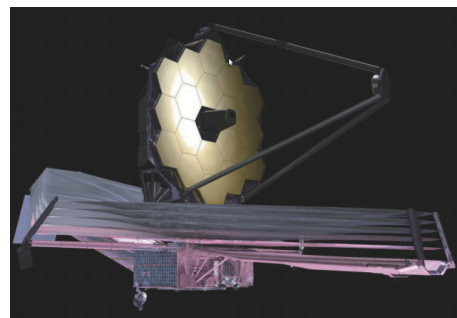


Fig. 19 James Webb Space Telescope

图 19 詹姆斯韦伯太空望远镜

合成孔径探测技术除了大型望远镜系统外的另外一个重要应用便是合成孔径激光雷达。不同于合成孔径望远镜的被动成像方式,合成孔径激光雷达是一种主动有源的成像技术,可以实现高分辨的实时成像。2006年,美国的Northrop Grumman公司和Raytheon公司利用不同的波段实现了世界上第一台机载激光雷达系统^[157]。2009年,美国洛克希德马丁公司实现了1.6 km距离的1550 nm合成孔径激光雷达成像^[158]。近年来,关于合成孔径激光雷达的研究更为多样化,成像算法也向着人工智能领域发展,在未来的军事与民用领域也有着广阔的前景^[159-160]。

3 结论与未来展望

自世界上第一个光学相控阵器件诞生至今,光学相控阵技术已经经历了整整50年的发展。目前光学相控阵技术已经在天文、军事、工业、通讯和智能驾驶等多个领域中得到了广泛的应用。本文对光学相控阵领域的研究进程与关键成果进行了梳理与总结。但是目前光学相控阵技术仍然存在着一些科学技术问题尚未解决,基于笔者的认知与思考,认为面向未来应用的光学相控阵技术还需要在以下几大方向寻求技术突破。

(1)激光扫描技术向着无机械、大口径、大视场、耐强光等方向发展。目前以液晶、硅基光波导和MEMS为代表的无机械激光扫描器件中,以液晶器件在高功率应用中相对最为成熟,同时液晶器件也最容易实现大口径,而硅基光波导和MEMS相控阵激光扫描器件则因为集成化程度较高、器件规模小以及材料特性等原因,难以实现大口径且不能直接承受高功率激光辐照。在扫描视场方面,光学相控阵技术虽然摆脱了机械结构的转动惯量对光束控

制频率的制约,但是在光束扫描角度上还远不如纯机械式的激光扫描,基于相控阵的大视场光束扫描的精度与传输效率仍有较大的提升空间。因此未来光学相控阵技术若要实现广泛的应用,还必须解决大视场扫描的精度、效率和扫描等技术问题,以此应对更为复杂多变的应用环境。并且在实现大视场的同时,还需要兼顾光束质量的保持。

(2)相位控制算法向高速度、智能化方向发展。相位控制是光学相控阵技术的核心问题,相位控制算法决定了光学相控阵系统的性能。目前的光学相控阵系统中所采用的相位控制算法多为传统的优化算法,通过迭代优化计算寻找相位的相对最优解。但是传统的优化算法的迭代计算效率低,且寻优过程中容易陷入局部最优解。所以应用在激光相干合成这类仅有中低频相位扰动的场景中表现尚可,一旦应用在大气湍流畸变校正这类存在高频相位扰动的场景中时则捉襟见肘。为了解决相位控制算法计算收敛速度慢的问题,目前有两大主要技术方向。一是发展新型的优化算法,寻找更为高效、迅速的优化模型,改善优化算法的收敛速度。另一个则是结合人工智能深度学习的方法,另辟蹊径,构建智能相位控制算法。

(3)光学相控阵系统向集成化、实用化方向发展。光学相控阵经历了数十年的发展,技术途径不断丰富,目前已经成为了涵盖多领域、多学科的一大技术门类。尽管目前光学相控阵在众多单元技术方面取得了突破,但是距离大范围应用仍有一定差距。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。例如,未来的地基高清观测系统需要大气畸变控制技术与合成孔径探测成像技术的综合应用,先进工业制造所需的高能激光系统也需要激光相干合成技术以及光束扫描技术的有机整合。寻求关键技术的突破将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。

参考文献:

- [1] 徐龙道. 物理学词典[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (Xu Longdao. Dictionary of physics[M]. Beijing: Science Press, 2004)
- [2] Mahan A I, Bitterli C V, Cannon S M. Far-field diffraction patterns of single and multiple apertures bounded by arcs and radii of concentric circles[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, 54(6): 721-732.
- [3] Friis H T, Feldman C B. A multiple unit steerable antenna for short-wave reception[J]. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1937, 25(7): 841-917.
- [4] 赵志超. 导弹防御雷达网数据融合技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. (Zhao Zhichao. Study on data fusion techniques of missile defense radar network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010)
- [5] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [6] Chang Shuo, Wang Zhaokun, Wang D N, et al. Tunable and dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on graded-index multimode fiber device[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107081.
- [7] Wu Bo, Zhang Bin, Liu Weijie, et al. Recoverable and rewritable waveguide beam splitters fabricated by tailored femtosecond laser writing of lithium tantalate crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107500.
- [8] Zhu Shuangqi, Xu Zhenao, Zhang Hao, et al. Liquid crystal integrated metadvice for reconfigurable hologram displays and optical encryption[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9553-9564.
- [9] Hsu C P, Li Boda, 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: 8300416.
- [10] Lu Ping, Xu Weihai, Zhu Chen, et al. Integrated multi-beam optical phased array based on a 4×4 Butler matrix[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1566-1569.
- [11] Fathi H, Nārhi M, Gumenyuk R. Towards ultimate high-power scaling: coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Photonics*, 2021, 8: 566.
- [12] Tang Mingyuan, Cao Jie, Hao Qun, et al. Wide range retina-like scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106885.
- [13] 耿超, 李枫, 黄冠, 等. 基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 0103003. (Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research Progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 0103003)
- [14] DeHainaut C R, Duneman D C, Dymale R C, et al. Wide field performance of a phased array telescope[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(3): 876-880.
- [15] Qin Qi, Yan Fengping, Liu Yan, et al. Multi-wavelength thulium-doped fiber laser via a polarization-maintaining Sagnac loop mirror with a theta-shaped configuration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4517-4524.
- [16] Ma Pengfei, Chang Hongxiang, Ma Yanxing, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [17] Van Acoleyen K, Bogaerts W, Jägeršká 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.
- [18] Wang Ke, Yuan Zeshi, Wong E, et al. Experimental demonstration of indoor infrared optical wireless communications with a silicon photonic integrated circuit[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 619-626.
- [19] He Jingwen, Dong Tao, Xu Yue. Review of photonic integrated optical phased arrays for space optical communication[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 188284-

- 188298.
- [20] Kendrick R L, Aubrun J N, Bell R, et al. Wide-field Fizeau imaging telescope: experimental results[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4235-4240.
- [21] Corcoran C J, Pasch K A. Modal analysis of a self-Fourier laser cavity[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(5): L1.
- [22] Minden M L. Passive coherent combining of fiber oscillators[C]//Proceedings of SPIE 6453, Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications. 2007: 6453.
- [23] Daniault L, Hanna M, Papadopoulos D N, et al. Passive coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4023-4025.
- [24] Kurtz R M, Pradhan R D, Tun N, et al. Mutual injection locking: a new architecture for high-power solid-state laser arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 578-586.
- [25] Wickham M, Anderegg J, Brosnan S, et al. Coherently coupled high power fiber arrays[C]//Advanced Solid-State Photonics 2004. 2004: 202-206.
- [26] Shay T M. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12188-12195.
- [27] Yu C X, Kansky J E, Shaw S E J, et al. Coherent beam combining of a large number of PM fibers in a 2D fiberarray[C]//2006 Conference on Lasers and Electro-optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference. 2006: 1-2.
- [28] Stockley J, Serati S. Advances in liquid crystal beam steering[C]//Proceedings of SPIE 5550, Free-Space Laser Communications IV. 2004: 32.
- [29] 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.
- [30] Van Acoleyen K, Rogier H, Baets R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13655-13660.
- [31] Koh K H, Lee C. A two-dimensional MEMS scanning mirror using hybrid actuation mechanisms with low operation voltage[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1124-1135.
- [32] Seldin J H, Paxman R G, Zarifis V G, et al. Closed-loop wavefront sensing for a sparse-aperture multitelescope array using broadband phase diversity[C]//Proceedings of SPIE 4091, Imaging Technology and Telescopes. 2000: 48-63.
- [33] Hill J M, Salinari P. The large binocular telescope project[C]//Proceedings of SPIE 5489, Ground-based Telescopes. 1998.
- [34] 马阎星. 光纤激光抖动法相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014. (Ma Yanxing. Study on coherent beam combination of fiber laser based on dithering phase locking technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014)
- [35] Seifert L, Liesener J, Tiziani H J. Adaptive Shack-Hartmann sensor[C]//Proceedings of SPIE 5144, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III. 2003: 250-258.
- [36] Zhang Xiaofang, Guo Jing, Ren Xiaofeng, et al. The wavefront sensorless adaptive optics correction for a wide field of view optics system based on the SPGD algorithm[C]//Proceedings of SPIE 7849, Optical Design and Testing IV. 2010: 78492H.
- [37] Vorontsov M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept[C]//Proceedings of SPIE 5895, Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II. 2005.
- [38] Dorschner T A. Adaptive photonic phase locked elements: an overview[C]//MTO Symposium. 2007.
- [39] 刘泽金, 周朴, 许晓军, 等. 高平均功率光纤激光相干合成[M]. 长沙: 国防工业出版社, 2016. (Liu Zejing, Zhou Pu, Xu Xiaojun, et al. Coherent beam combining of high average power fiber lasers[M]. Changsha: National Defense Industry Press, 2016)
- [40] Coffey V. High-energy lasers: new advances in defense applications[J]. *Optics and Photonics News*, 2014, 25(10): 28-35.
- [41] Optics.org. DARPA extends laser weapon range[EB/OL]. (2014-03-11). <https://optics.org/news/5/3/13>.
- [42] Di Pengcheng, Li Xuepeng, Yang Jing, et al. High-power VCSEL-pumped slab laser with temperature fluctuation adaptability[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(8): 395-398.
- [43] Mi Shuyi, Li Junhui, Wei Disheng, et al. 105 W continuous-wave diode-pumped Tm: YAP slab laser with high beam quality[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106847.
- [44] Machan J P, Long W H, Zamel J, et al. 5.4 kW diode-pumped, 2.4x diffraction-limited Nd: YAG laser for material processing[C]//Advanced Solid State Lasers 2002. 2002: PD1.
- [45] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference. 2009: 1-2.
- [46] Wang Dan, Du Yinglei, Wu Yingchen, et al. 20kW class high-beam-quality CW laser amplifier chain based on a Yb: YAG slab at room temperature[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3838-3841.
- [47] Huang Lei, Zheng Yamin, Guo Yading, et al. 21.2 kW, 1.94 times diffraction-limit quasi-continuous-wave laser based on a multi-stage, power-scalable and adaptive optics controlled Yb: YAG master-oscillator-power-amplifier system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18: 061402.
- [48] 郭亚丁. 高能固体激光自适应光学光束质量控制[C]//第四届大气光学及自适应光学技术发展研讨会. 2019. (Guo Yading. Beam quality control technology for high energy solid laser system[C]//The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics. 2019)
- [49] 尚建力, 王君涛, 彭万敬, 等. 二极管泵浦高能激光研究进展和展望[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011007. (Shang Jianli, Wang Juntao, Peng Wanjiang, et al. Research progress and prospects of laser diode pumped high-energy laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011007)
- [50] Koester C J, Snitzer E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [51] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 1999. 1999: CPD11/1-CPD11/2.

- [52] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [53] Ikoma S, Nguyen H K, Kashiwagi M, et al. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing[C]//Proceedings of SPIE 10083, Fiber Lasers XIV: Technology and Systems. 2017: 100830Y.
- [54] Yang Baolai, Shi Chen, Zhang Hanwei, et al. Monolithic fiber laser oscillator with record high power[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 075106.
- [55] 奚小明, 王鹏, 杨保来, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破7kW[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0116001. (Xi Xiaoming, Wang Peng, Yang Baolai, et al. All-fiber laser oscillator reach 7kW output power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0116001)
- [56] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Proceedings of CLEO: Applications and Technology 2013. 2013.
- [57] 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 060101. (Lin Aoxiang, Zhan Huan, Peng Kun, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 060101)
- [58] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化10 kW光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0336001. (Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0336001)
- [59] Yang Baolai, Zhang Hanwei, Wang Xiaolin, et al. Mitigating transverse mode instability in a single-end pumped all-fiber laser oscillator with a scaling power of up to 2 kW[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18: 105803.
- [60] Fang Qiang, Li Jinhui, Shi Wei, et al. 5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9: 1506107.
- [61] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing[C]//Proceedings of SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems. 2018: 105120C.
- [62] Yang Baolai, Wang Peng, Zhang Hanwei, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26366-26374.
- [63] Huang Zhimeng, Shu Qiang, Tao Rumao, et al. > 5kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [64] Wang Xiaozhuo, Crump P, Wenzel H, et al. Root-cause analysis of peak power saturation in pulse-pumped 1100 nm broad area single emitter diode lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 658-665.
- [65] Wenzel H, Crump P, Pietrzak A, et al. Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12: 085007.
- [66] Morita T, Nagakura T, Torii K, et al. High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19: 1502104.
- [67] Kaifuchi Y, Yamagata Y, Nogawa R, et al. Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes[C]//Proceedings of SPIE 10086, High-Power Diode Laser Technology XV. 2017: 100860D.
- [68] Gapontsev V, Moshegov N, Berezin I, et al. Highly-efficient high-power pumps for fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE 10086, High-Power Diode Laser Technology XV. 2017: 1008604.
- [69] Ren Zhanqiang, Li Qingmin, Li Bo, et al. High wall-plug efficiency 808-nm laser diodes with a power up to 30.1 W[J]. *Journal of Semiconductors*, 2020, 41: 032901.
- [70] Virtanen H, Uusitalo T, Karjalainen M, et al. Narrow-Linewidth 780-nm DFB lasers fabricated using nanoimprint lithography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(1): 51-54.
- [71] Lewoczko-Adamczyk W, Pyrlík C, Häger J, et al. Ultra-narrow linewidth DFB-laser with optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Perot cavity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9705-9709.
- [72] Codemard C A, Vukovic N T, Chan J S, et al. Resonant SRS filtering fiber for high power fiber laser applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24: 0901509.
- [73] Liu T, Yang Z M, Xu S H, et al. Analytical investigation on transient thermal effects in pulse end-pumped short-length fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12875-12890.
- [74] Dawson J W, Messerly M J, Heebner J E, et al. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials[C]//Proceedings of SPIE 7686, Laser Technology for Defense and Security VI. 2010: 768611.
- [75] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 474-476.
- [76] Enloe L H, Rodda J L. Laser phase-locked loop[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(2): 165-166.
- [77] Glova A F, Drobyazko S V, Likhanskii V V. Multi-beam CO₂ lasers and theirs applications[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. 2005: 43-46.
- [78] Abramski K M, Colley A D, Baker H J, et al. Phase-locked CO₂ laser array using diagonal coupling of waveguide channels[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(5): 530-532.
- [79] Hornby A M, Baker H J, Colley A D, et al. Phase locking of linear arrays of CO₂ waveguide lasers by the waveguide-confined Talbot effect[J]. *Applied*

- [Physics Letters](#), 1993, 63(19): 2591-2593.
- [80] Bernard J M, Chodsko R A, Mirels H. Coupled multiline CW HF lasers—Experimental performance[J]. [AIAA Journal](#), 1988, 26(11): 1369-1372.
- [81] Redmond S M, Kansky J E, Creedon K J, et al. Active coherent combination of >200 semiconductor amplifiers using a SPGD algorithm[C]//Laser Science to Photonic Applications. 2011: 1-2.
- [82] Albrodt P, Niemeyer M, Crump P, et al. Coherent beam combining of high power quasi continuous wave tapered amplifiers[J]. [Optics Express](#), 2019, 27(20): 27891-27901.
- [83] Bogatov A P, Drakin A E, Mikaelyan G T. Coherent combining of diode laser beams in a master oscillator – zigzag slab power amplifier system[J]. [Quantum Electronics](#), 2019, 49(11): 1014-1018.
- [84] Schimmel G, Doyen I, Janicot S, et al. Passive coherent combining of two tapered laser diodes in an interferometric external cavity[C]//2015 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference. 2015: 11-12.
- [85] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Teradiode's high brightness semiconductor lasers[C]//Proceedings of SPIE 9730, Components & Packaging for Laser Systems II. 2016: 97300C.
- [86] Oka M, Masuda H, Kaneda Y, et al. Laser-diode-pumped phase-locked Nd: YAG laser arrays[J]. [IEEE Journal of Quantum Electronics](#), 1992, 28(4): 1142-1147.
- [87] Kono Y, Takeoka M, Uto K, et al. A coherent all-solid-state laser array using the Talbot effect in a three-mirror cavity[J]. [IEEE Journal of Quantum Electronics](#), 2000, 36(5): 607-614.
- [88] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]//Proceedings of SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications. 2009: 719507.
- [89] Kienel M, Müller M, Demmler S, et al. Coherent beam combination of Yb: YAG single-crystal rod amplifiers[J]. [Optics Letters](#), 2014, 39(11): 3278-3281.
- [90] Huang Zhimeng, Tang Xuan, Zhang Dayong, et al. Phase locking of slab laser amplifiers via square wave dithering algorithm[J]. [Applied Optics](#), 2014, 53(10): 2163-2169.
- [91] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(18): 17053-17058.
- [92] 常洪祥, 常琦, 侯天悦, 等. 百束规模光纤激光相干合成[J]. [中国激光](#), 2020, 47: 0916002.
- [93] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. [Optics and Lasers in Engineering](#), 2011, 49(8): 1089-1092.
- [94] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. [Optics Letters](#), 2011, 36(14): 2686-2688.
- [95] Huang Zhimeng, Tang Xuan, Luo Yongquan, et al. Active phase locking of thirty fiber channels using multilevel phase dithering method[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2016, 87: 033109.
- [96] Peng Yingnan, Hu Qiqi, Duan Jiazhu, et al. Active phase locking of laser coherent beam combination using square wave dithering algorithm[J]. [Journal of Russian Laser Research](#), 2022, 43(5): 626-633.
- [97] Peng Y, Hu Q, Duan J, et al. Numerical and experimental study on rapidly varying phase-distortion correction using modified square wave dithering algorithm[J]. [Laser Physics](#).
- [98] 彭英楠, 胡奇琪, 段佳著, 等. 基于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法[J]. [强激光与粒子束](#), 2023, 35: 041010. (Peng Yingnan, Hu Qiqi, Duan Jiazhu, et al. Self-adaptive tilt control method based on second order moment of beam for laser array[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2023, 35: 041010)
- [99] 任国光, 伊炜伟, 齐予, 等. 美国战区和战略无人机载激光武器[J]. [激光与光电子学进展](#), 2017, 54: 100002. (Ren Guoguang, Yi Weiwei, Qi Yu, et al. U. S. Theater and strategic UVA-borne laser weapon[J]. [Laser & Optoelectronics Progress](#), 2017, 54: 100002)
- [100] Li Feng, Geng Chao, Huang Guan, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. [IEEE Photonics Journal](#), 2017, 9: 7102812.
- [101] Hou Tianyue, An Yi, Chang Qi, et al. Deep learning-based phase control method for coherent beam combining and its application in generating orbital angular momentum beams[J]. [arXiv](#): 2019, 1903: 03986.
- [102] Azarian A, Bourdon P, Lombard L, et al. Orthogonal coding methods for increasing the number of multiplexed channels in coherent beam combining[J]. [Applied Optics](#), 2014, 53(8): 1493-1502.
- [103] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. [IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics](#), 2014, 20: 0901008.
- [104] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126021.
- [105] 胡贞, 姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信终端ATP技术与系统研究[J]. [兵工学报](#), 2011, 32(6): 752-757. (Hu Zhen, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al. Research on ATP system technology of laser communication terminal in space[J]. [Acta Armamentarii](#), 2011, 32(6): 752-757)
- [106] Haellstig E, Stigwall J, Lindgren M, et al. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator[C]//Proceedings of SPIE 5087, Laser Systems Technology. 2003.
- [107] Apter B, Efron U, Bahat-Treidel E. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices[J]. [Applied Optics](#), 2004, 43(1): 11-19.
- [108] Abe H, Takeuchi M, Takeuchi G, et al. Two-dimensional beam-steering device using a doubly periodic Si photonic-crystal waveguide[J]. [Optics Express](#),

- 2018, 26(8): 9389-9397.
- [109] Tuantranont A, Bright V M, Zhang J, et al. Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 91(3): 363-372.
- [110] 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.
- [111] Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, et al. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 689-691.
- [112] 徐林. 液晶光学相控阵相位延迟及衍射效率研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (Xu Lin. Research on phase delay and diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008)
- [113] Khan S A, Riza N A. Demonstration of 3-dimensional wide-angle no-moving-parts laser beam steering[C]//Proceedings of SPIE 5550, Free-Space Laser Communications IV. 2004.
- [114] Riza N A, Arain M A. Code-multiplexed optical scanner[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(8): 1493-1502.
- [115] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[C]//Proceedings of SPIE, 2008: 709302.
- [116] Whitaker B, Harris S R. A preliminary investigation into the effects of high-power illumination on optical phased arrays[R]. AFRL, 2010.
- [117] Gu D, Wen B, Mahajan M, et al. High power liquid crystal spatial light modulators[C]//Proceedings of SPIE 6306, Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications IV. 2006: 630602.
- [118] 汪相如, 周庄奇. 液晶光学相控阵在高功率激光应用中的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 103006. (Wang Xiangru, Zhou Zhuangqi. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser applications (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 103006)
- [119] 李阳龙, 王伟平, 骆永全, 等. 1 064 nm激光对氧化锡薄膜的损伤研究[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(1): 107-112. (Li Yanglong, Wang Weiping, Luo Yongquan, et al. 1 064 nm laser damage on indium tin oxide films[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(1): 107-112)
- [120] 罗飞, 骆永全, 张大勇, 等. ITO薄膜电极激光损伤形貌的多重分形研究[J]. *应用激光*, 2010, 30(2): 86-90. (Luo Fei, Luo Yongquan, Zhang Dayong, et al. Analysis of multi-fractal patterns of ITO films radiated by laser[J]. *Applied Laser*, 2010, 30(2): 86-90)
- [121] 骆永全, 张大勇, 张翠娟, 等. 液晶光学器件激光损伤研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(3): 392-394. (Luo Yongquan, Zhang Dayong, Zhang Cuijuan, et al. Research of laser damage on liquid crystal optical elements[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 392-394)
- [122] 骆永全, 王伟平, 罗飞. 连续激光辐照下二氧化钒薄膜热致相变实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(5): 713-716. (Luo Yongquan, Wang Weiping, Luo Fei. Experimental study on heating-induced phase transition of vanadium dioxide thin films irradiated by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 713-716)
- [123] Wang Haifeng, Huang Zhimeng, Zhang Dayong, et al. Thickness effect on laser-induced-damage threshold of indium-tin oxide films at 1064 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110: 113111.
- [124] Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Duan Jiazhu, et al. Morphology effect on the light scattering and dynamic response of polymer network liquid crystal phase modulator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14757-14768.
- [125] Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Zhang Dayong, et al. Direct investigation and accurate control of phase profile in liquid-crystal optical-phased array for beam steering[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(29): 7109-7116.
- [126] Zhao Xiangjie, Zhang Dayong, Luo Yongquan, et al. Numerical analysis and design of patterned electrode liquid crystal microlens array with dielectric slab[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1834-1839.
- [127] Zhao Xiangjie, Liu Cangli, Zhang Dayong, et al. Modeling and design of an optimized patterned electrode liquid crystal microlens array with dielectric slab[J]. *Optik*, 2013, 124(23): 6132-6139.
- [128] 陈一波, 沈浩, 段佳著, 等. 用于高功率密度光束控制的光寻址光阀研制[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 041012. (Chen Yibo, Shen Hao, Duan Jiazhu, et al. Development of optically addressed liquid crystal light valve for high power density beam control[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 041012)
- [129] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 24(12): 4600-4615.
- [130] Trinh P D, Yegnanarayanan S, Coppinger F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(7): 940-942.
- [131] Phare C T, Shin M C, Miller S A, et al. Silicon optical phased array with high-efficiency beam formation over 180 degree field of view[J]. arXiv: , 1802, 04624: 2018.
- [132] Yaacobi A, Sun Jie, Moresco M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [133] Writers S. SWEEPER demonstrates wide-angle optical phased array technology[EB/OL]. (2015-05-25). https://www.spacedaily.com/reports/SWEEPER_Demonstrates_Wide_Angle_Optical_Phased_Array_Technology_999.html.
- [134] Chung S W, Abediasl H, Hashemi H. A monolithically integrated large-scale optical phased array in silicon-on-insulator CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, 53(1): 275-296.
- [135] Ma Weichao, Tan Su, Wang Kuankuan, et al. Practical two-dimensional beam steering system using an integrated tunable laser and an optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(32): 9985-9994.
- [136] Yoo B W, Megens M, Sun Tianbo, et al. A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.

- [137] Poulton C V, Byrd M J, Moss B, et al. 8192-element optical phased array with 100° steering range and flip-chip CMOS[C]//CLEO: Applications and Technology 2020. 2020: JTh4A. 3.
- [138] Zhang Xiaosheng, Kwon K, Henriksson J, et al. A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR[J]. *Nature*, 2022, 603(7900): 253-258.
- [139] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. *自然杂志*, 2006, 28(1): 7-13. (Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1): 7-13)
- [140] Israel D J. Laser communications relay demonstration: introduction for experimenters[R]. NASA, 2017.
- [141] 闻传花, 李玉权. 星地激光通信中的自适应光学研究[C]//2006北京地区高校研究生学术交流会——通信与信息技术会议论文集(上). 2006. (Wen Chuanhua, Li Yuquan. Research on adaptive optics in satellite-to-ground laser communication[C]//2006 Academic Meeting for Postgraduates in Beijing Area—Communication and Information Technology Conference Proceedings. 2006)
- [142] Bridges W B, Brunner P T, Lazzara S P, et al. Coherent optical adaptive techniques[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(2): 291-300.
- [143] Vorontsov M A, Kolosov V. Target-in-the-loop beam control: basic considerations for analysis and wave-front sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(1): 126-141.
- [144] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [145] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [146] Ma Yanxing, Zhou Pu, Tao Rumao, et al. Target-in-the-loop coherent beam combination of 100 W level fiber laser array based on an extended target with a scattering surface[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1019-1021.
- [147] 支冬. 光纤激光目标在回路相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018. (Zhi Dong. Study on the target-in-the-loop coherent beam combination technology of fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018)
- [148] 李枫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 57孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经2 km大气传输的目标在回路相干合成[J]. *中国激光*, 2022, 49: 0616002. (Li Feng, Zou Fan, Jiang Jiali, et al. Target-in-the-Loop in 2 km atmosphere based on 57-channel adaptive fiber laser optical phased array system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 0616002)
- [149] Meinel A B. Cost-scaling laws applicable to very large optical telescopes[J]. *Optical Engineering*, 1979, 18: 186645.
- [150] 王海涛, 周必方. 光学综合孔径干涉成像技术[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 434-442. (Wang Haitao, Zhou Bifang. Optical synthesis aperture interference image technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 434-442)
- [151] Giesen P, Ouwerkerk B, van Brug H, et al. Mechanical setup for optical aperture synthesis for wide-field imaging[C]//Proceedings of SPIE 5528, Space Systems Engineering and Optical Alignment Mechanisms. 2004: 361-371.
- [152] 明名, 王建立, 张景旭, 等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 104-108. (Ming Wang, Wang Jianli, Zhang Jingxu, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 104-108)
- [153] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M, Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59(5): 597-599.
- [154] Hege E K, Beckers J M, Strittmatter P A, et al. Multiple mirror telescope as a phased array telescope[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(16): 2565-2576.
- [155] Beckers J M. VLT interferometer: III. Factors affecting wide field-of-view operation[C]//Proceedings of SPIE 1236, Advanced Technology Optical Telescopes IV. 1990.
- [156] Hill J M, Ashby D S, Brynneel J G, et al. The Large Binocular Telescope: binocular all the time[C]//Proceedings of SPIE 9145, Ground-based and Airborne Telescopes V. 2014: 914502.
- [157] Ricklin J, Schumm B, Dierking M, et al. Synthetic aperture ladar for tactical imaging (SALTI) (Briefing Charts)[R]. DARPA, 2007.
- [158] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture ladar flight demonstration[C]//CLEO: Applications and Technology 2011. 2011: PDPB7.
- [159] Tian He, Liu Zheng, Zeng Zheng, et al. An airborne inverse synthetic aperture ladar imaging method based on sparse sampling[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 174: 694-699.
- [160] Lu Tianan, Huang Fei, Li Hongping. Neural network based synthetic aperture ladar imaging through marine atmosphere[J]. *Optik*, 2020, 219: 164975.