

·激光大气传输技术·综述·

微透镜阵列光学相控阵扫描技术研究进展*

杨旭^{1,2,3,4}, 耿超^{1,3}, 李小阳^{1,2,3,4}, 李枫^{1,3}, 姜佳丽^{1,3}, 李斌成², 李新阳^{1,3}

(1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209; 2. 电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 610054;
3. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 光学相控阵光束扫描技术在激光雷达、空间光通信和光开关等领域拥有巨大的应用潜力。微透镜阵列光学相控阵可以通过微透镜阵列间 μm 量级的相对位移同时对多个出射光束的二维倾斜相位进行调制, 从而实现大角度二维光束扫描, 具有出射口径大、结构简单、体积小、微惯性、多功能等优点。首先介绍了微透镜阵列光学相控阵的扫描原理, 之后对微透镜阵列光学相控阵国内外的发展现状、应用和现阶段存在的问题进行了阐述, 最后对微透镜阵列光学相控阵的发展趋势进行了展望。

关键词: 光束扫描; 光学相控阵; 微透镜阵列; 离散寻址; 连续寻址

中图分类号: TN820.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210075

Review of microlens array optical phased array beam scanning technique

Yang Xu^{1,2,3,4}, Geng Chao^{1,3}, Li Xiaoyang^{1,2,3,4}, Li Feng^{1,3}, Jiang Jiali^{1,3}, Li Bincheng², Li Xinyang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Beam scanning technology based on optical phased arrays has great potential for applications in the fields of LIDAR, space optical communication, and optical switching. Among them, the microlens array optical phased array can modulate the tilted phase of multiple beams simultaneously through the relative displacement of micrometer scale between microlens arrays, so as to achieve large angle beam scanning, with the advantages of large emitting aperture, simple structure, small size, micro-inertia, etc. Several well-known institutions at home and abroad have conducted research on the microlens array optical phased array. This paper first introduces the scanning principle of microlens array optical phased array, then elaborates on its development status and application, and finally gives an outlook on the trend of its development.

Key words: beam scanning; optical phased array; microlens array; discrete addressing; continue addressing

相控阵定义为相位基阵, 即可用于光束的发射, 也可用于光束的接收^[1]。相控阵的工作原理是按照程序预设的规则, 通过多个移相器件生成、补偿和调制整体波前, 因此符合上述条件的器件、设备、系统均可称为光学相控阵, 而不是局限于某种技术或器件^[2]。

光学相控阵的概念源于微波相控阵^[3], 但是光学相控阵的概念更加宽泛, 并在多个领域得到应用, 如自适应光学中的波前相位校正^[2]、光束扫描^[4]、激光相干合成^[5]和相控阵望远镜^[6]等。目前应用于光束扫描的光学相控阵器件主要有液晶光学相控阵^[7]、光波导光学相控阵^[8]、微反射镜阵列光学相控阵^[9]和微透镜阵列光学相控阵^[10]。前三种光学相控阵技术受制作工艺的限制, 难以实现大口径, 并且需要庞大的控制电路控制每一个移相单元的相位, 而微透镜阵列光学相控阵只需调节微透镜阵列间在水平和垂直方向上 μm 量级的相对位移, 即可实现大角度二维扫

* 收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675205); 国家自然科学基金青年项目(62005286)

作者简介: 杨旭(1990—), 男, 博士研究生, 从事光场控制、自适应光学方面的研究。

通信作者: 李新阳(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事自适应光学方面的研究。

描,并且不需要庞大的控制电路。本文将介绍微透镜阵列光学相控阵光束扫描的工作原理,并对微透镜阵列光学相控阵的国内外研究进展和应用进行综述,最后总结微透镜阵列光学相控阵的优势及发展前景。

1 微透镜阵列光学相控阵扫描原理

微透镜阵列光学相控阵的扫描原理如图1所示,其主要有三种结构:伽利略结构、开普勒结构和优化开普勒结构。每种结构都由多组微透镜阵列组成,其中伽利略结构由一对焦点重合的凸微透镜阵列和凹微透镜阵列组成,开普勒结构由一对按等焦距放置的凸微透镜阵列组成,通过在开普勒结构的焦点处添加一组凸微透镜阵列从而得到优化开普勒结构。图1从几何光学和物理光学两个视角对微透镜阵列光学相控阵的扫描原理进行了展示,当微透镜阵列间没有相对位移时,准直光束水平入射,被微透镜阵列光学相控阵分割为多个子光束,并水平出射。当微透镜阵列间发生相对位移时,根据几何光学,子光束发生偏转;根据物理光学,多个子光束将具有倾斜波前相位。

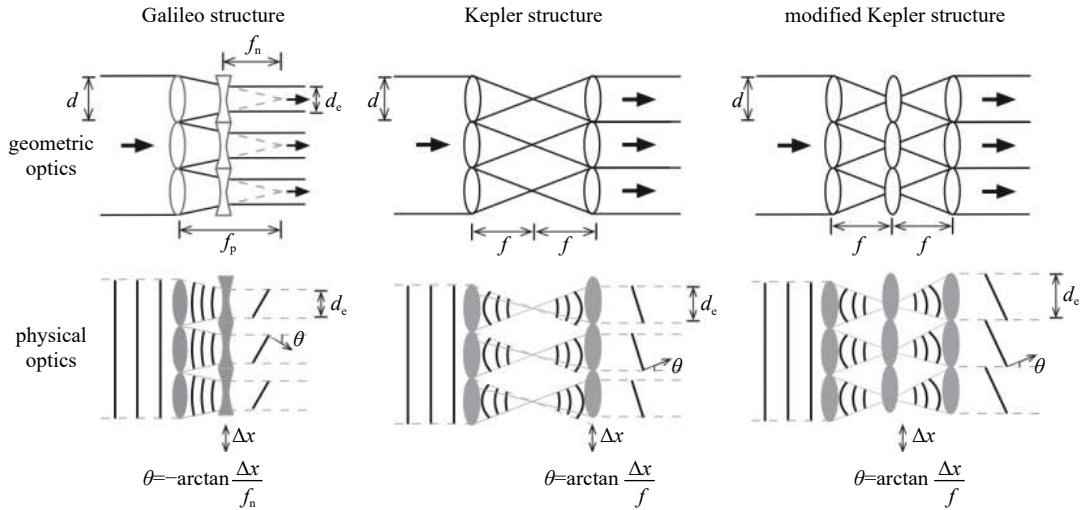


Fig. 1 Schematic diagram of microlens array optical phased array with different structure

图1 不同结构微透镜阵列光学相控阵扫描原理图

根据图1和上述分析,经过微透镜阵列光学相控阵后,出射光束的光场分布可以写为^[11-12]

$$E(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \left[\exp(-jk \tan \theta x) \text{rect}\left(\frac{x}{d_c}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \right] \quad (1)$$

其中, x 为出射光束近场坐标, D 为入射光束的口径, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, θ 为出射子光束偏转角度, d_c 为出射子光束口径, d 为出射子光束间距/微透镜阵列子透镜间距。根据傅立叶光学,对公式(1)进行傅立叶变换,可以得到对应的远场分布为

$$E(f_x) = \text{sinc}\left[\left(f_x + \frac{\tan \theta}{\lambda}\right) d_c\right] [\text{sinc}(f_x D) * \text{comb}(f_x d)] \quad (2)$$

其中, $f_x = x/\lambda z$ 为远场归一化坐标, z 为光场传播距离。根据公式(2)可知,其远场由网格因子 $\text{sinc}[f_x D] * \text{comb}[f_x d]$ 和包络因子 $\text{sinc}\left[\left(f_x + \frac{\tan \theta}{\lambda}\right) d_c\right]$ 两部分组成,当微透镜阵列间发生相对位移时,干涉因子保持不变,衍射因子发生偏移对远场能量进行重新分配,最终实现光束扫描的目的。如图2所示,微透镜阵列光学相控只能实现离散寻址扫描,即其扫描点只能从网格因子中的一个衍射级次跳跃到另一个衍射级次,两个峰值点间的空间无法被扫描到,因

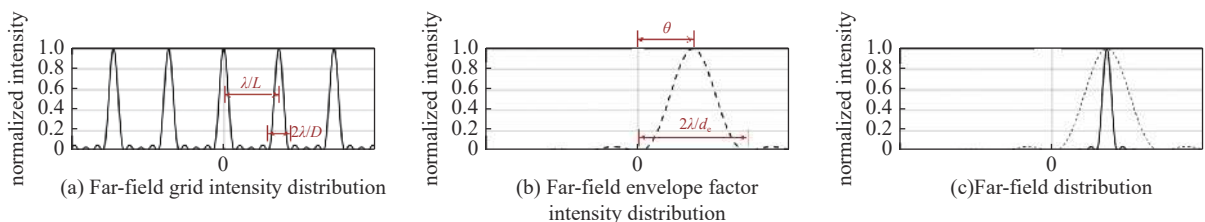


Fig. 2 Schematic diagram of the scanning principle of the microlens array optical phased array

图2 微透镜阵列光学相控阵扫描原理示意图

此微透镜阵列光学相控阵更适用于粗扫描。根据公式(2)可知, 网格因子中的衍射级的角宽度和衍射级间的角宽度分别为

$$\theta_{AW} = \frac{2\lambda}{D} \quad (3)$$

$$\theta_{AS} = \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

需要注意的是: 图 2 是在 $d_c = d$ 的情况下绘制(如图 1 中的优化开普勒结构所示), 即包络的 0 值点正好与网格因子中除当前扫描点外的衍射级的位置重合, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 此时包络因子对网格因子进行调制, 除扫描点外的其他衍射级次均被置为 0, 最终远场只有扫描点一个衍射级次存在, 如图(c) 所示。如果 $d_c < d$ (如图 1 中的伽利略结构和开普勒结构所示), 则包络将展宽, 更多的衍射级次被照亮, 导致扫描效率的降低。

由图 2 和公式(2)可知, 包络的扫描角度 θ 决定了微透镜阵列光学相控阵的扫描角度。这里, 将微透镜阵列子孔径的一半作为最大相对位移, 则最大扫描角度可定义为

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{1}{2F_{\#}}\right) \quad (5)$$

其中, $F_{\#}$ 为微透镜阵列中子透镜的 F 数, $F_{\#}$ 与最大扫描角度的关系曲线如图 3 所示, 可以看出当微透镜阵列 $F_{\#}$ 为 0.5 时, 理论上可以实现 45° 的光束扫描。一般用于光束扫描的微透镜阵列口径介于 100~200 μm 之间, 所以微透镜阵列间 50~100 μm 的二维相对位移即可实现二维大角度的光束扫描, 这为微透镜阵列光学相控阵的微惯性二维快速灵敏扫描提供了便利。

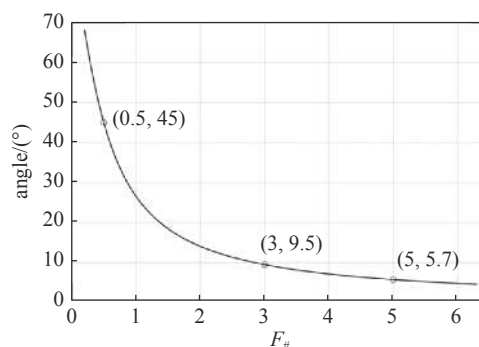


Fig. 3 Curve of relationship between $F_{\#}$ and the maximum scanning angle when half of the sub-aperture is used as the maximum relative displacement

图 3 将微透镜阵列子孔径一半作为最大相对位移时, $F_{\#}$ 与最大扫描角度间的关系曲线

2 国内外微透镜阵列光学相控阵研究进展

微透镜阵列光学相控阵大角度扫描技术需要小 $F_{\#}$ 、高质量的微透镜阵列作为发射天线, 目前已有多种制作技术被引入到微透镜阵列光学相控阵的制作中, 如二元光学、球面和非球面的连续表面微透镜阵列等。微透镜阵列光学相控阵的相位控制方法与闪耀光栅类似, 只能实现离散寻址扫描, 因此多种预扫描装置被添加到微透镜阵列光学相控阵中用于实现高分辨率的连续寻址扫描。微透镜阵列光学相控阵的扫描速率和精度由驱动装置的响应频率和精度决定, 多种驱动器被用于微透镜阵列光学相控阵的制作当中。微透镜阵列光学相控阵的具体研究进展如下所述。

利用微透镜阵列组实现光学相控阵扫描最早可追溯到 1989 年美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室 William Goitsos 和 Michael Holz 研制的基于伽利略结构的微透镜阵列扫描器^[13]。当时正处于二元光学的快速发展阶段, 林肯实验室研究人员利用二元光学技术制作了单元方形微透镜口径为 200 μm , 整体口径 5 cm 的正微透镜阵列和负微透镜阵列, 如图 4 所示。以波长为 632.8 nm 的准直光束作为光源, 当两组微透镜阵列间的相对位移为 100 μm 时, 扫描视场角达到 10°。该器件采用压电陶瓷驱动器作为驱动装置, 扫描速率为 35 Hz。之后这一技术得到了持续发展。



Fig. 4 Microlens arrays for microlens array scanners made in the Lincoln Laboratory at MIT using binary optics

图 4 麻省理工学院林肯实验室利用二元光学技术制作的用于微透镜阵列扫描器的微透镜阵列

美国空军实验研究室(AFRL)在 1993 年提出了基于开普勒结构和优化开普勒结构的微透镜阵列光学相控阵^[14]。相比于开普勒结构, 优化开普勒结构在两组凸微透镜阵列间添加场镜有效克服了由于开普勒结构自身等焦距排布所带来的能量泄漏问题。2002 年, 美国空军实验研究室对基于优化开普勒结构的微透镜阵列光学相控阵技术进行了实验验证^[15], 实现了视场为 36.8° 的大角度扫描, 并且

在 24°视场内能量利用率达到 80%。但是如图 5 所示, 由于色散等原因的影响, 其扫描分辨率未达到理论的衍射极限。2010 年, 美国空军实验研究室利用液晶作为移相器件实现了微透镜阵列扫描器^[16], 对波长为 552 nm 的入射光束实现了 1.008°的光束偏转, 偏转效率达到 94.4%。

1990 年, 美国通用电气(GE)天文太空部提出了将液晶相控阵作为预扫描装置的连续寻址扫描系统, 如图 6 所示。通过微透镜阵列间的相对位移实现大角度离散寻址粗扫描, 利用液晶相控阵实现对连续角度的精细扫描^[17]。

美国罗克韦尔科学中心(ROK)在 1994 年制作了以压电堆作为驱动器的微透镜阵列扫描器^[18], 如图 7 所示。该器件的扫描频率达到 300 Hz, 通过适当地抑制机械共振, 可在 1 kHz 下稳定运行。

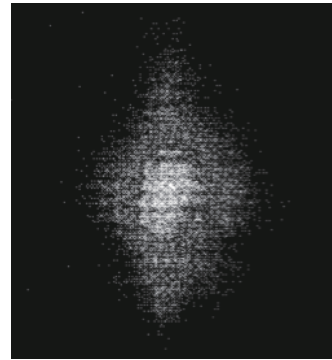


Fig. 5 Scanning spot for modified microlens array optical phased array proposed by the U. S. Air Force Experimental Research Laboratory

图 5 美国空军实验研究室提出的优化开普勒结构微透镜阵列光学相控阵的扫描光斑

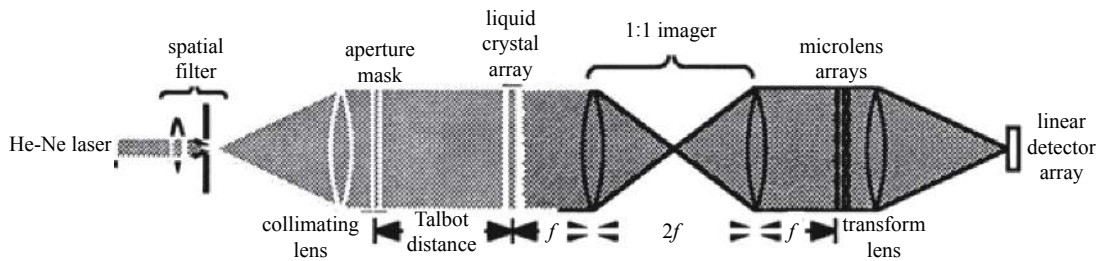
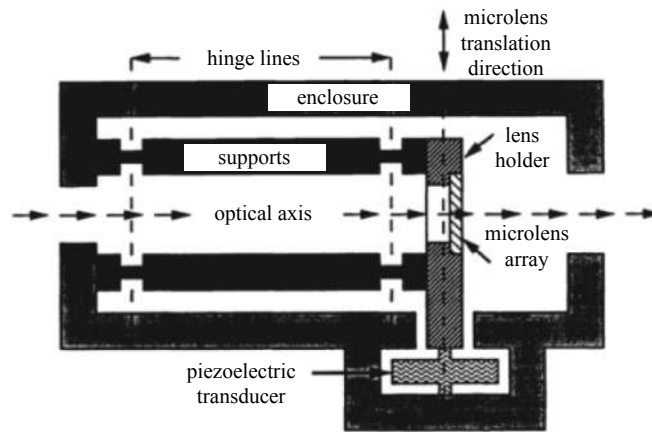


Fig. 6 A continuous addressable scanning system based on liquid crystal optical phased array and microlens array optical phased array proposed by General Electric Astronomy and Space Division, USA

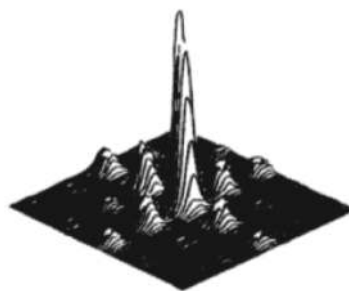
图 6 美国通用电气天文太空部提出的基于液晶光学相控阵和微透镜阵列光学相控阵的连续寻址扫描系统



(a) schematic diagram of the proposed optical system



(b) experimental results of scanning spot in one and two dimensions



(c) experimental results of discrete addressing line scanning

Fig. 7 Schematic diagram of the scanning principle of the optical phased array of microlens array

图 7 美国罗克韦尔科学中心制作的以压电堆作为驱动器的微透镜阵列光束扫描器

土耳其 Koc 大学针对微透镜阵列光学相控阵离散寻址扫描的问题, 在 2006 年提出在微透镜阵列光学相控阵前添加宏观场镜作为预扫描装置的方案^[19-20]。通过同时调节宏观透镜的位移和微透镜阵列间的相对位移, 实现了连续寻址扫描, 其原理图和实验结果如图 8 所示。

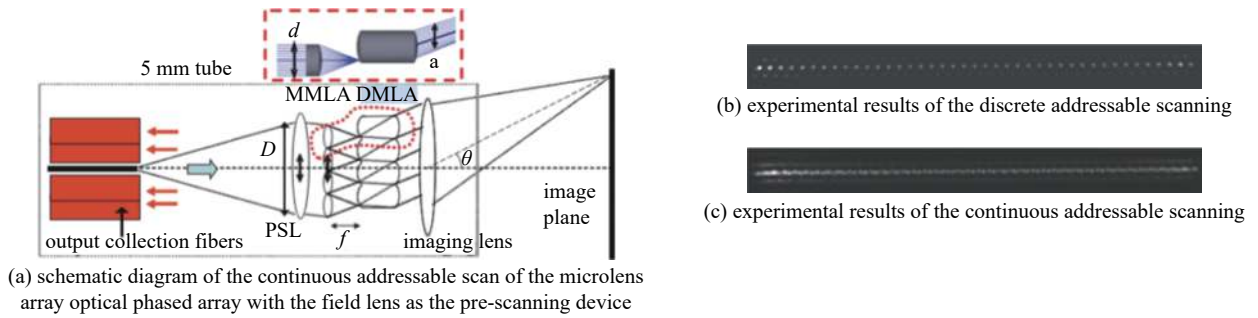


Fig. 8 Continuous addressable scanning microlens array optical phased array proposed by Koc University

图 8 土耳其 Koc 大学提出的连续寻址微透镜阵列光学相控阵

2011 年, Koc 大学制作了以静电梳驱动器 (comb-drive actuators) 作为 2-D 驱动装置的微透镜阵列扫描器, 如图 9 所示, 其扫描速率达到 4 kHz 左右^[21]。

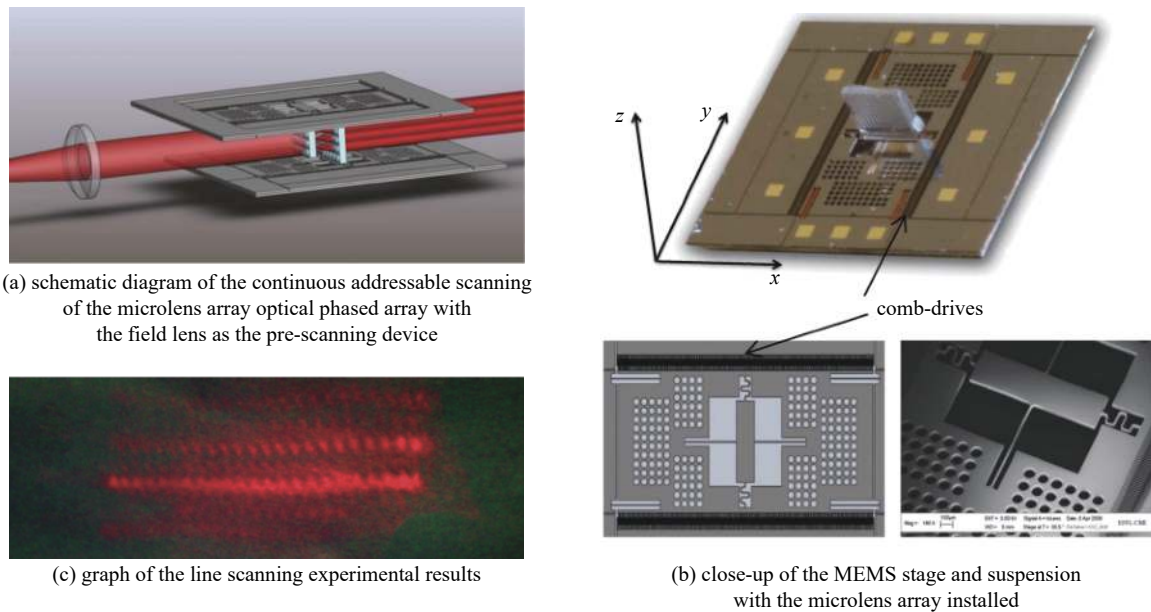


Fig. 9 Microlens array optical phased array with electrostatic comb driver as the driving device at Koc University

图 9 土耳其 Koc 大学以静电梳状驱动器作为驱动装置的微透镜阵列光学相控阵

国内对微透镜阵列光学相控阵的研究较晚, 最早见于金国藩院士 1998 年的著作《二元光学》中, 金国藩院士在书中对微透镜阵列光学相控阵进行了详细的分析和介绍^[22]。2001 年, 中国科学院光电技术研究所在国内首次设计了基于伽利略结构的连续表面微透镜阵列扫描器^[23], 设计波长为 632.8 nm, 视场为 15°。

2007 年, 华中科技大学(HUST)设计并制作了基于伽利略结构, 以压电陶瓷作为驱动器的微透镜阵列扫描器^[24-26]。其工作在可见光和红外波段, 视场角为 6.6°, 扫描频率达到 200 Hz。原型装置和实验结果如图 10 所示。

2018 年, 天津大学(TJU)设计了一种如图 11 所示的新型多镜式收发一体结构^[27], 只需要移动一片微透镜阵列即可实现接收视场的选择与发射光束的同步偏转, 完成扫描光学系统对大视场区域的光束收发, 并且发射和接收光束的通光口径相等。其工作波长为 1064 nm, 扫描视场为 20°。

2020 年, 中国科学院光电技术研究所对基于开普勒结构的微透镜阵列扫描器进行了全面的分析和实验^[28], 对微透镜阵列间的相对位移与扫描角度间的对应关系、离散角宽度、扫描点角宽度、光斑形态和离散寻址等基本关键参数及现象进行了分析和验证, 实验结果与理论分析相符合。图 12 为 0°~5°扫描范围内的部分离散寻址扫描过程图, 右侧数字为对应的两组微透镜阵列间的相对位移。开普勒结构中两组凸微透镜阵列按等焦结构放置, 导致出射光束被同时偏转至两个方向, 导致扫描方向上扫描效率的降低。

2021年,中国科学院光电技术研究所之前工作的基础上,提出将自适应光纤准直器(AFOC)作为预扫描装置的连续寻址扫描系统^[29],并建立了连续寻址扫描方法的数学模型。如图13所示,通过调节AFOC中位于准直透镜焦平面上光纤端头的相对位置,可以实现微透镜阵列扫描器入射光束的偏转。同时调节光纤端头的位置和微透镜阵列间相对位移即可实现大角度连续寻址扫描。实验实现了10°视场、衍射极限分辨率的连续寻址扫描。

表1对微透镜阵列光学相控阵扫描技术的发展进行了总结。根据表1可以看出,微透镜阵列光学相控阵在1989年被提出后,先后有多家单位对其进行了大量研究,前期工作主要围绕伽利略结构进行,后续研究多集中在对微透镜阵列光学相控阵结构的改进,提出了多种新型结构的微透镜阵列光学相控阵,不同类型的驱动装置被用于微透镜阵列的驱动。针对微透镜阵列光学相控阵只能实现离散寻址扫描的问题,多种预扫描装置被引入到微透镜阵列光学相控阵,通过两级偏转的方式实现了连续寻址扫描。但是从表中同时可以看出,微透镜阵列光学相控阵的扫描角度并没有达到前面描述的45°,这是因为高质量的 $F_{\#}=0.5$ 的微透镜阵列以目前的工艺还很难制作。

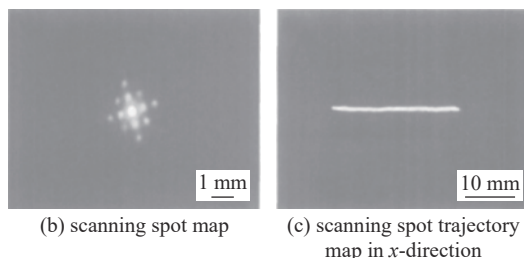
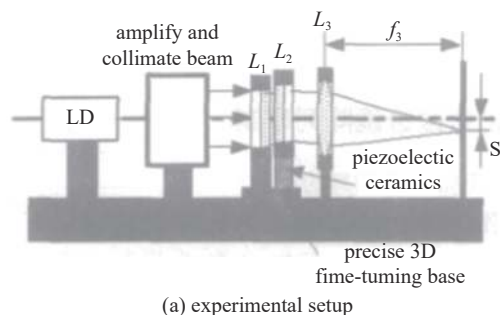


Fig. 10 Prototype device of optical phased array with microlens array made by Huazhong University of Science and Technology

图10 华中科技大学制作的微透镜阵列光学相控阵原型装置

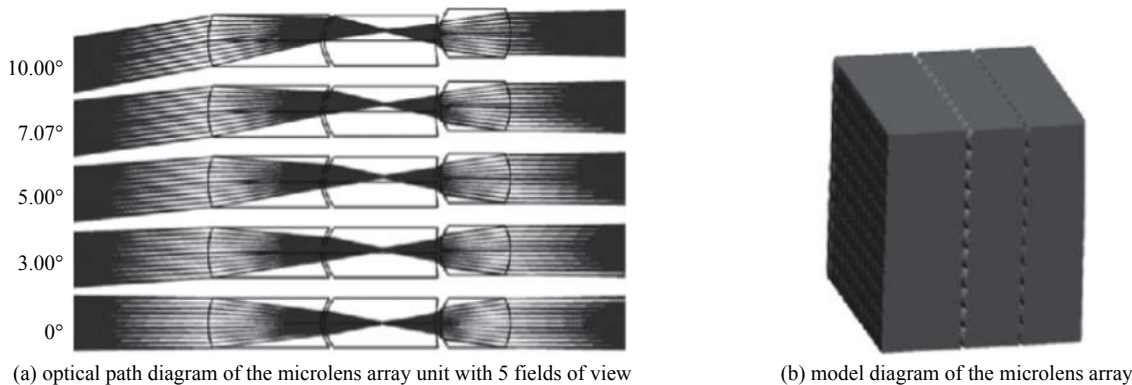


Fig. 11 The transceiver-type integrated microlens array scanner designed by Tianjin University

图11 天津大学设计的收发式一体微透镜阵列扫描器

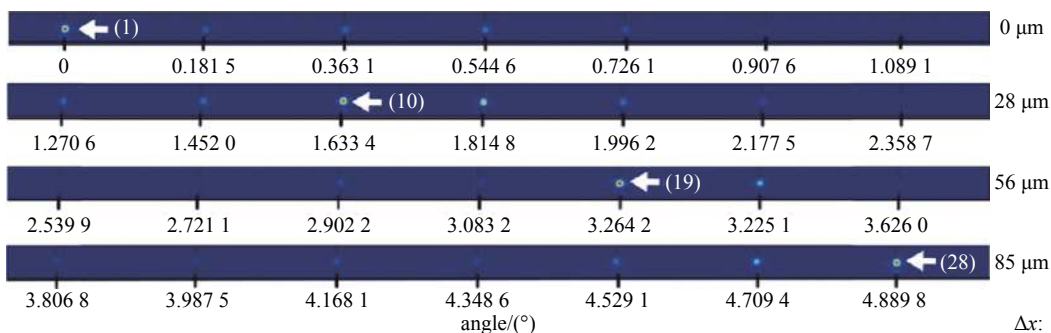


Fig. 12 Experimental results of discrete addressable scanning of microlens array scanner based on Keplerian structure conducted by the Institute of Optics and Electronics (IOE), Chinese Academy of Sciences (CAS)

图12 中国科学院光电技术研究所进行的基于开普勒结构的微透镜阵列扫描器离散寻址扫描实验结果图

3 微透镜阵列光学相控阵的应用

基于微透镜阵列光学相控阵的微机械运动扫描的特性,其被计划应用于到多个领域。在显微成像和侦查测绘

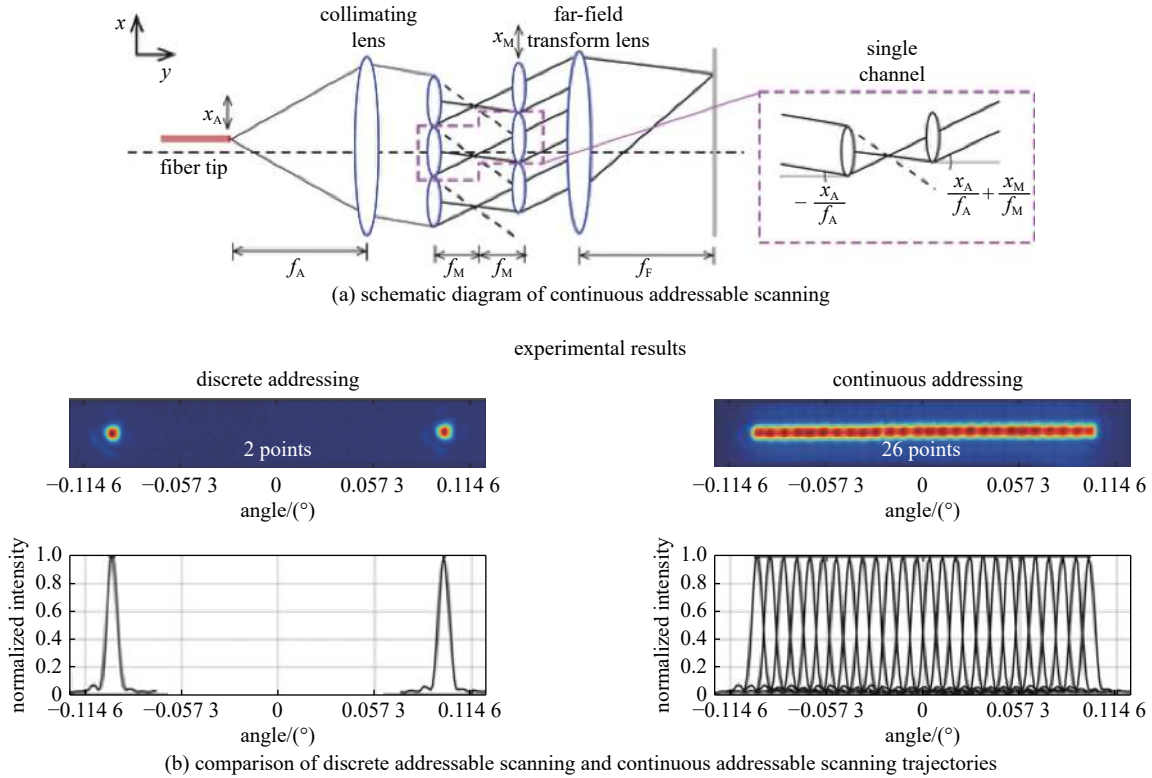


Fig. 13 Optical phased array technique of continuous addressable scanning microlens array with adaptive fiber collimator as a pre-scanning device proposed by IOECAS

图 13 中国科学院光电技术研究所提出将自适应光纤准直器作为预扫描装置的连续寻址扫描微透镜阵列光学相控阵技术

表 1 微透镜阵列光学相控阵扫描技术的发展

Table 1 Development of microlens array optical phased array scanning technology

time	agency	wavelength/nm	structure	FOV/(°)	actuator (speed)	mode	diameter/cm
1989	MIT	632.8	Galileo	10	PZT(35 Hz)	discrete	5
1990	GE	-	LC+Kepler	-	-	continue	-
1994	ROK	632	Galileo	9.5	PZT(300 Hz)	discrete	0.6
2001	IOE	632.8	Galileo	15	-	discrete	-
2002	AFRL	1064	M-Kepler	36.8	-	discrete	1
2006	Koc	632	Field lens+M-Kepler	-	-	continue	0.06
2007	HUST	650	Galileo	6.6	PZT(200 Hz)	discrete	1.35
2010	AFRL	552	M-Kepler(LC)	1	-	discrete	-
2011	Koc	-	Field lens+M-Kepler	-	Comb(4 kHz)	continue	-
2018	TJU	1064	New M-Kepler	20	-	discrete	-
2020	IOE	632	Kepler	10	-	discrete	3
2021	IOE	632	AFOC+Kepler	10	-	continue	3

等领域,大视场和高分辨率始终为成像光学系统的固有矛盾,针对此矛盾的众多解决方案中,光学扫描成像系统是典型代表之一。2004年,德国康斯坦茨大学和德国博登湖设备技术有限公司合作研制了一种基于微透镜阵列光学相控阵的多路复用器(FoV-Muxer)^[30],并计划将该多路复用器用于地面监测系统、导弹预警系统和全固态导引头当中^[30-31]。该系统的核心想法是将一个大视场划分为多个小视场,多个小视场以高帧频被依次成像到同一焦平面,之后拼接多个小视场所成的像,最终实现大视场、高分辨成像的目的,其原理图如图14(a)所示。系统的第一部分由4块光楔组成,用于分割视场。多路复用器被安置在一次成像面上用于对视场的选择,被选择的视场被二次成像到探测平面上。多路复用器实物图如图14(b)所示,其扫描频率达到800 Hz。2018年,天津大学也对多路复用器展开了相应的研究,但目前仅停留在设计阶段^[32]。

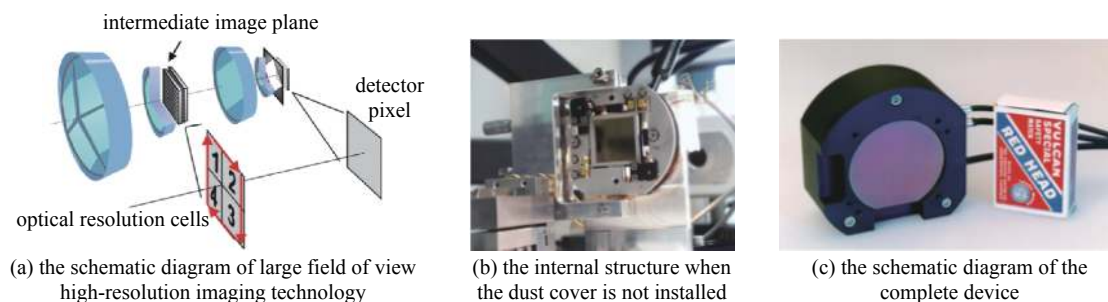


Fig. 14 Schematic diagram of large field of view high-resolution imaging technology based on multiplexer and physical diagram of multiplexer

图 14 基于多路复用器的大视场高分辨率成像技术原理图和多路复用器实物图

光束扫描技术在激光雷达领域也有重要应用。2009年,德国 Diehl BGT Defence 公司研发了基于微透镜阵列光学相控阵的收发式一体激光雷达测试系统^[33],如图 15(a)所示。该系统采用优化开普勒结构,工作波段为 1500 nm,实现了二维 36°视场的目标区域距离图像的获取,实验结果如图 15(c)所示。作为对比,图 15(b)为相机拍摄的目标区域图像。

德国弗劳恩霍夫研究所计划将微透镜阵列光学相控阵用于商业光纤开关中,并在 2003 年阐述了一种用于 600 μm 直径的多模光纤的 1×4 光纤开关的设计、制造和测试,如图 16 所示,该技术采用了两组圆柱形微透镜阵列^[34]。在 2004 年,为了提高传输效率,将优化开普勒结构的微透镜阵列光学相控阵用于光纤开关中,并对传输效率进行了测试,实验结果表明优化开普勒结构有助于传输效率的提高^[35]。

2010 年,比利时布鲁塞尔自由大学将微透镜阵列光学相控阵用于多视场投影显示器^[36],该系统具有 25 英寸屏幕,水平视场 30°。通过改变微透镜阵列间的相对位置,将 3D 对象的图像按时间顺序投影到屏幕上,并转向对应的观看区域,最终在不需要特殊眼镜的情况下,实现感知深度的目的。原型装置如图 17(a)所示,其中投影仪位于左侧,观测屏位于右侧。在观测屏的背面可以观看到 3D 图像,在不同观测位置观察到的图像如图 17(b)(c)(d)所示。

挪威科技大学在 2020 年将微透镜阵列光学相控阵用于太阳跟踪,替代传统机械式太阳能跟踪器^[37],原理图如图 18(a)所示。提出了一种基于多目标优化的光束转向透镜阵列设计方法,量化了光束发散和光学效率之间的权衡,并使用该设计方法设计了两种新型微透镜阵列光学相控阵,如图 18(b)所示,其扫描视场达到了 80°,年平均转化效率达到 73.4%。

远距离和高质量的光束扫描需要大的发射口径^[28],而微透镜阵列光学相控阵的发射口径由所用微透镜阵列的口径决定,并且通过水平和垂直方向上 μm 量级的相对位移即可同时实现对多个子光束二维倾斜相位的调制而不需要复杂、庞大的控制电路,最终实现大角度二维光束扫描,并且多种材质可用于微透镜阵列的制作^[38],根据使用场景的不同,可根据自身需要(如耐光程度、工作波段等)选择合适的材料。因此除上述应用外,微透镜阵列光学相控阵在相干合成^[2]和自由空间光通信^[39]等领域具有广泛的应用前景。

根据前面的回顾和分析可以看出,微透镜阵列中子透镜的 $F_{\#}$ 越小,可实现的扫描角度越大,但是目前高质量的小 $F_{\#}$ 微透镜阵列受像差的影响^[40],制作难度大,导致远场旁斑增加^[40],扫描效率降低。微透镜阵列光学相控阵的发展趋势为多镜式结构(如上述的优化开普勒结构和诸多新型的多镜式微透镜阵列光学相控阵),即采用多组微透镜阵列来提高出射光束的占空比、减小子透镜像差的影响、提高扫描角度等。多镜式结构带来的问题是多个微透镜阵列需要被同时驱动,并需要相互配合,这对整个扫描系统的装调和控制系统提出了很高的要求。为了缓解多镜式结构的微透镜阵列数量,光学设计中常用的方法是将两组微透镜阵列加工在基片的两面,目前该技术并不成熟^[38],

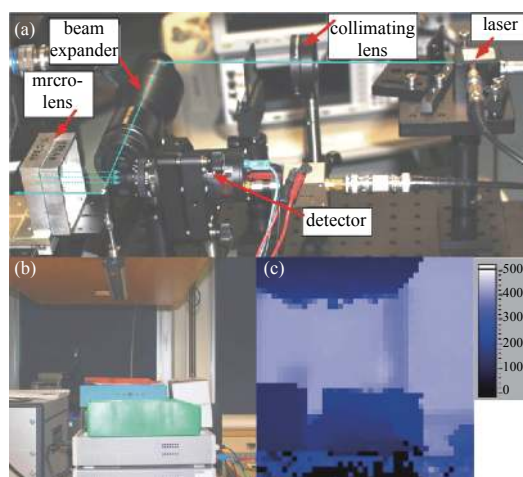


Fig. 15 Transceiver integrated lidar test system based on microlens array optical phased array. (a) optical path diagram of the lidar experimental setup. (b) pictures taken by the camera.

(c) distance images taken by the lidar test system

图 15 基于微透镜阵列光学相控阵的收发式一体激光雷达测试系统。(a)激光雷达实验装置光路图;(b)相机拍摄的图片;(c)激光雷达测试系统拍摄距离图像

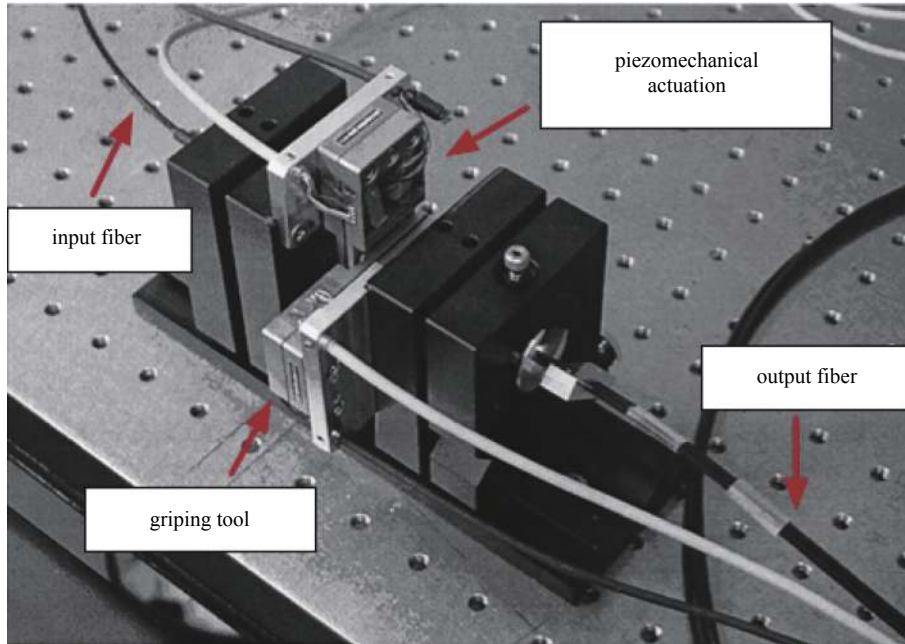
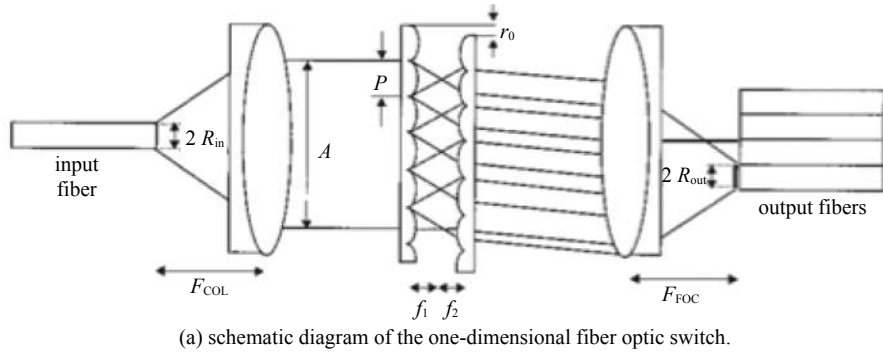


Fig. 16 Fiber optic switch based on microlens array optical phased array

图 16 基于微透镜阵列光学相控阵的光纤开关

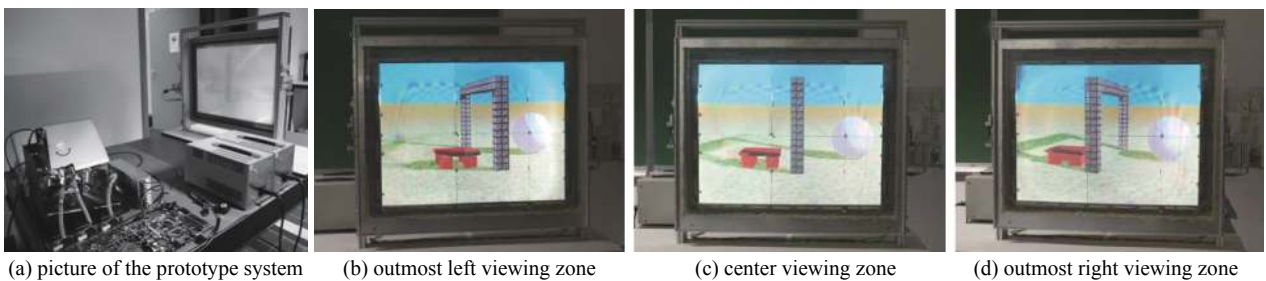


Fig. 17 Multiview projection display based on microlens array optical phased array

图 17 基于微透镜阵列光学相控阵的多视场投影显示器

面临着基片两侧的微透镜阵列难以对齐的问题。微透镜阵列间相对位移和扫描角度间存在固定的对应关系,微透镜阵列光学相控阵的控制精度主要取决于微透镜阵列间相对位移的精准控制,因此除上述因素外,响应速度更快、位移更加精准的驱动器和良好的装调工艺意味着更加敏捷和更高精度的光束扫描^[21]。

4 结 论

本文首先对多种结构微透镜阵列光学相控阵的扫描原理进行了分析和可视化讲解,展示了微透镜阵列光学相控阵独特的离散寻址扫描特性。之后对微透镜阵列光学相控阵的发展现状按照时间和研究单位进行了详细的回顾,自微透镜阵列光学相控阵被提出以来,多种制造工艺和新型结构被用于改善微透镜阵列光学相控阵的扫描性能,并提出多种优化方案来解决微透镜阵列光学相控阵的离散寻址扫描问题。目前微透镜阵列光学相控阵已经被

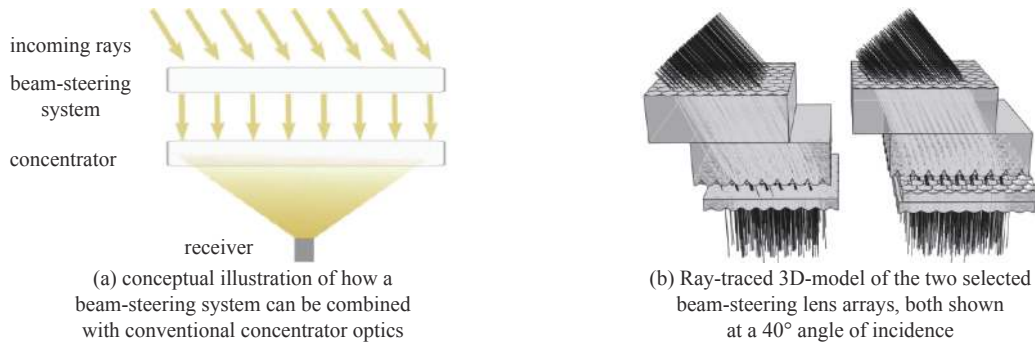


Fig. 18 Solar energy system using micro lens array optical phased array as solar tracker

图 18 利用微透镜阵列光学相控阵作为太阳跟踪器的太阳能系统

计划用于或已经用于多种应用当中,如大视场高分辨率成像、激光雷达、光纤开关、3D 成像和太阳能等。目前微透镜阵列光学相控阵面临的主要问题是高质量微透镜阵列的制作。大角度光束扫描需要小 $F_{\#}$ 的高质量微透镜阵列,以传统的制作工艺很难制作,但是随着超级透镜、超表面和超薄平面透镜等新技术的发展^[41-45],可以制造出更薄、更轻且孔径更大的高质量、小 $F_{\#}$ 的微透镜阵列,这将大大提高微透镜阵列光学相控阵的性能,为微透镜阵列光学相控阵的发展提供有力支撑。基于微透镜阵列光学相控阵的微惯性、小位移、透射式紧凑结构和二维扫描等自身优势,结合目前新型控制器和新型微透镜阵列制造工艺的发展,高速度、大角度、多功能和多领域将成为微透镜阵列光学相控阵的发展趋势。

参考文献:

- [1] 徐龙道. 物理学词典[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Xu Longdao. Dictionary of physics[M]. Beijing: Science Press, 2007)
- [2] 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: 20201042. (Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, et al. Review of optical phased array techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49: 20201042)
- [3] 束咸荣, 何炳发, 高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Shu Xianrong, He Bingfa, Gao Tie. Phased array radar antennas[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007)
- [4] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [5] Bridges W B, Brunner P T, Lazzara S P, et al. Coherent optical adaptive techniques[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(2): 291-300.
- [6] Meinel A B. Aperture synthesis using independent telescopes[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(11): 2501-2504.
- [7] 胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56: 110002. (Hu Jie, Du Shengping, Guo Hongyang. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56: 110002)
- [8] 金亚东, 闫爱民, 胡志娟, 等. 光波导阵列相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 080002. (Jin Yadong, Yan Aimin, Hu Zhijuan, et al. Research progress of optical waveguide phased array scanner[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51: 080002)
- [9] Yoo B W, Megens M, Chan T, et al. Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12238-12248.
- [10] 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.
- [11] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [12] Reynolds G O, Develis J B, Parrent Jr G B, et al. The new physical optics notebook: tutorials in Fourier optics[M]. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1989.
- [13] Goltsos W C, Holz M. Agile beam steering using binary optics microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1392-1397.
- [14] Watson E A. Analysis of beam steering with decentered microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2665-2670.
- [15] Watson E A, Whitaker W E, Brewer C D, et al. Implementing optical phased array beam steering with cascaded microlens arrays[C]//Proceedings, IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2002: 1429-1436.
- [16] Shi Lei, Shi Jianru, McManamon P F, et al. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 409-421.
- [17] Flood K M, Cassarly W J, Sigg C, et al. Continuous wide-angle beam steering using translation of binary microlens arrays and a liquid-crystal phased array[C]//Proceedings of SPIE 1211, Computer and Optically Formed Holographic Optics. 1990: 296-304.
- [18] Motamedi M E, Andrews A P, Gunning III W J, et al. Miniaturized micro-optical scanners[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3616-3623.
- [19] Akatay A, Ataman C, Urey H. High-resolution beam steering using microlens arrays[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(19): 2861-2863.
- [20] Akatay A, Urey H. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4523-4529.
- [21] Gokce S K, Holmstrom S, Hibert C, et al. Two-dimensional MEMS stage integrated with microlens arrays for laser beam steering[J]. *Journal of*

- [Microelectromechanical Systems](#), 2011, 20(1): 15-17.
- [22] 周崇喜, 谢伟民, 董小春, 等. 非等焦距微透镜阵列对二维激光扫描优化设计研究[C]//第十一届全国电子束、离子束、光子束学术年会论文集. 中国电子学会, 2001: 178-181. (Zhou Chongxi, Xie Weimin, Dong Xiaochun, et al. Optimal design of non-iso-focal microlens arrays for two-dimensional laser scanning[C]//11th National Annual Conference on Electron Beam, Ion Beam and Photon Beam. Chinese Institute of Electronics, 2001: 178-181)
- [23] 金国藩. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (Jin Guofan. Binary optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998)
- [24] 黄鹰, 向思桦, 陈四海, 等. 微型光扫描器研究[J]. [红外与毫米波学报](#), 2007, 26(1): 26-29. (Huang Ying, Xiang Sihua, Chen Sihai, et al. Study on microoptical scanner[J]. [Journal of Infrared and Millimeter Waves](#), 2007, 26(1): 26-29)
- [25] 董珊. 微透镜扫描器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. (Dong Shan. Research on beam steering with microlens arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007)
- [26] 刘冉. 微光学扫描器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. (Liu Ran. Research on micro-optical scanner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007)
- [27] 谢洪波, 王瑶, 毛晨盛, 等. 一种可实现收发一体连续扫描的微透镜阵列[J]. [应用光学](#), 2018, 39(5): 613-618. (Xie Hongbo, Wang Yao, Mao Chensheng, et al. Micro-lens array for integrative transmitting and receiving continuous scanning[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2018, 39(5): 613-618)
- [28] Yang Xu, Geng Chao, Li Xiaoyang, et al. Theory analysis and experimental demonstration of a microlens array scanner with Kepler structure[J]. [Applied Optics](#), 2020, 59(34): 10754-10760.
- [29] Yang Xu, Geng Chao, Li Feng, et al. High-resolution beam scanning technique with microlens array and adaptive fiber-optics collimator[J]. [Optics Express](#), 2021, 29(1): 359-367.
- [30] Krogmann D, Tholl H D. Infrared micro-optics technologies[C]//Proceedings of SPIE 5406, Infrared Technology and Applications XXX. 2004: 121-132.
- [31] Bernard W J. Technology demonstrator for ground-based surveillance and missile warning[C]//Proceedings of SPIE 3436, Infrared Technology and Applications XXIV. 1998: 494-504.
- [32] 王瑶. 微透镜阵列在扫描光学系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (Wang Yao. Application research of micro-lens array in scanning optical system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018)
- [33] Rungenhagen M, Kunz M, Romasew E, et al. Monostatic Ladar demonstrator with micro-optical bidirectional beam control[C]//Proceedings of SPIE 7483, Technologies for Optical Countermeasures VI. 2009: 74830Q.
- [34] Duparré J, Götz B, Göring R. Micro-optical 1×4 fiber switch for multimode fibers with 600- μm core diameters[J]. [Applied Optics](#), 2003, 42(34): 6889-6896.
- [35] Duparré J, Radtke D, Dannberg P. Implementation of field lens arrays in beam-deflecting microlens array telescopes[J]. [Applied Optics](#), 2004, 43(25): 4854-4861.
- [36] Bogaert L, Meuret Y, Roelandt S, et al. Demonstration of a multiview projection display using decentered microlens arrays[J]. [Optics Express](#), 2010, 18(25): 26092-26106.
- [37] Johnsen H J D, Aksnes A, Torgersen J. High-performance stationary solar tracking through multi-objective optimization of beam-steering lens arrays[J]. [Optics Express](#), 2020, 28(14): 20503-20522.
- [38] McDearmon G F, Flood K M, Finlan J M. Comparison of conventional and microlens-array agile beam steerers[C]//Proceedings of SPIE 2383, Micro-Optics/Micromechanics and Laser Scanning and Shaping. 1995: 167-178.
- [39] Rabinovich W S, Goetz P G, Pruessner M, et al. Free space optical communication link using a silicon photonic optical phased array[C]//Proceedings of SPIE 9354, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII. 2015: 93540B.
- [40] Gibson J L, Duncan B D, Watson E A, et al. Wide-angle decentered lens beam steering for infrared countermeasures applications[J]. [Optical Engineering](#), 2004, 43(10): 2312-2321.
- [41] Khorasaninejad M, Chen Weiting, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. [Science](#), 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [42] Lin Renjie, Su V C, Wang Shuming, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. [Nature Nanotechnology](#), 2019, 14(3): 227-231.
- [43] Shi Tan, Wang Yujie, Deng Zilan, et al. All-dielectric kissing-dimer metagratings for asymmetric high diffraction[J]. [Advanced Optical Materials](#), 2019, 7: 1901389.
- [44] Cao Guiyuan, Gan Xiaosong, Lin Han. An accurate design of graphene oxide ultrathin flat lens based on Rayleigh-Sommerfeld theory[J]. [Opto-Electronic Advances](#), 2018, 1: 180012.
- [45] Zhu Xufeng, Fang Wei, Lei Jian, et al. Supercritical lens array in a centimeter scale patterned with maskless UV lithography[J]. [Optics Letters](#), 2020, 45(7): 1798-1801.