

激光与光电子学进展

液晶光学相控阵技术的研究进展

王琦^{1**}, 高旭峰¹, 张大伟¹, 黄俊^{2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室,
教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093;

²复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076

摘要 液晶光学相控阵因其体积小、结构简单、易于集成、功耗小以及其能够对运动中的目标进行自动捕获、瞄准和跟踪的特点, 被研究人员广泛关注, 以期能够满足未来空间通信与军事发展的需求。从性能指标的角度对国内外液晶光学相控阵光束精确偏转的研究进展进行了介绍并对改善性能方法进行了总结, 也介绍了液晶光学相控阵在多址通信与高能激光相控系统中的应用进展, 以为今后液晶光学相位控的研究提供参考。

关键词 光通信; 液晶光学相控阵; 光束精确偏转; 捕获、瞄准、跟踪

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1700007

Research Progress in Liquid Crystal Optical Phased Array Technology

Wang Qi^{1**}, Gao Xufeng¹, Zhang Dawei¹, Huang Jun^{2*}

¹School of Optics-Electrical and Computer Engineering, Shanghai Key Laboratory of Modern Optics System, Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Science and Technology on Complex Aviation Systems Simulation Laboratory, Beijing 100076, China

Abstract Liquid crystal optical phased array has been widely investigated by researchers because of its small size, simple structure, easy integration, low power consumption, and ability to automatically acquire, point, and track, meeting the requirements of future space communication and military development. This study introduces the research progress of the precise deflection of liquid crystal optical phased array beams worldwide based on the performance indicator perspective and summarizes the methods for improving performance. Furthermore, it introduces the research progress of liquid crystal optical phased array in multiple access communication and high-power laser phased-system. Finally, this study can provide a reference for the future development of liquid crystal optical phased array.

Key words optical communications; liquid crystal optical phased array; precise beam deflection; acquisition, pointing, and tracking

OCIS codes 060.2605; 230.2090; 160.3710; 050.5080

1 引 言

光学相控阵技术, 是一种通过改变材料的一些特性来引入相位差完成调制光束功能的技术, 能被

用于实现光束偏转, 这使得其在空间激光通信、目标跟踪、光信息处理和存储、生物医学等诸多领域有着广泛的应用前景^[1-7]。在空间激光通信、目标跟踪和光电对抗等军事应用领域, 一个共性的要求是

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-13; 录用日期: 2020-10-29

通信作者: huangjun_hk@163.com; *shelly3030@163.com

能够对运动中的目标进行自动瞄准(Pointing)、捕获(Acquisition)和跟踪(Tracking),简称光学PAT技术,这就要求必须有高分辨率的光学控制方法。传统机械式光束方向控制系统是通过万向节、转台等惯性器件来实现光束的偏转,很难实现光学PAT技术所需的高偏转分辨率,而且其结构体积复杂庞大、功能单一,不利于小型化^[8-10]。而在航空航天和军事领域,对于一种体积小、功耗小、控制灵活、高偏转分辨率的系统的迫切需求,使得对于非机械新型光束偏转技术的研究不断取得新的突破与进展^[11]。

不同于利用光的反射来偏转光束的机械式光束偏转技术,非机械新型光束偏转技术往往利用衍射元件来实现光束的偏转,包括声光光束偏转技术^[12]和电光光束偏转技术^[13]。其中,声光光束偏转技术是利用声光效应使介质的折射率发生周期性改变,形成光学“相位光栅”,进而使光束衍射到相应的角度来实现光束偏转的技术^[14]。然而,声光光束偏转技术或是衍射效率太低,或是对入射光的要求较高,限制了这种技术的应用范围。电光光束偏转技术则是利用电光效应来使介质的折射率发生改变,进而实现光线的偏转。但是,电光晶体往往是在很大的电压下才能够使其折射率发生改变,其庞大的驱动电路使它仍旧无法满足航空航天和军事领域的迫切需求^[15-16]。相比之下,另一种电光光束偏转技术——液晶光学相控阵技术,在很小的电压下就可以实现折射率的改变,实现对光波相位的精确调制,更符合光学PAT技术的发展趋势,更能够满足航空航天和军事领域的迫切需求^[17-18]。

本文从性能指标的角度对国内外液晶光学相控阵(LCOPA)光束的精确偏转的研究进展进行了介绍并论述了改善性能的途径,同时也介绍了液晶光学相控阵在多址通信与高能激光相控系统中的应用研究进展,以期今后液晶光学相控阵的研究提供参考,并指出液晶光学相控阵技术需要进一步开展的工作。

2 液晶光学相位控技术

液晶光学相控阵是一种可以用于精确偏转光束的器件,它可通过不太复杂的电控可编程驱动电路使激光光束以尽可能高的衍射效率偏转到一个偏转范围尽可能大的期望角度上去^[19],不仅具有体积小、质量小、结构简单、易于集成、功耗小的特点,

而且能够对运动中的目标进行自动捕获、瞄准和跟踪,能够满足未来空间通信与军事发展的需求。液晶光学相控阵自提出以来,广泛应用于诸多领域,但激光束的精确偏转仍为它的一项重要功能,也是其他功能能够被实现的基础。针对液晶光学相控阵技术,目前主要的研究集中在光束的精确偏转^[17]、多址通信^[20]及高能激光相控系统^[21]这几个方面。

2.1 光束的精确偏转

作为一种精确偏转光束的器件,对光束控制能力的好坏直接决定了其性能。偏转效率、响应时间、最大偏转角(扫描范围)和工作频带都是衡量器件性能的重要指标^[22]。下面主要从这4个性能指标对国内外的研究进展进行了介绍并论述了改善性能的途径。

2.1.1 国外研究进展

1991年, Raytheon公司研制了一款孔径为 $4.3\text{ cm} \times 4.1\text{ cm}$ 的一维(1D)透射式向列液晶光学相控阵,如图1(a)所示。该器件有43000个电极,电极间距为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。为了简化液晶的驱动电路,整个器件的电极被划分为168个子阵列,每个子阵列中有256个独立的可编程电极。这使得这款器件在可见光到红外波段内实现了 $\pm 4^\circ$ 范围内的离散偏转,在偏转角为 4° 和 2° 时偏转效率分别为60%和85%^[11]。Raytheon公司在1996年又研制了一款有效孔径为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的一维反射式高衍射效率的向列液晶光学相控阵,其概念设计与原理如图1(b)所示。该器件有5000个电极,电极宽度为 $2\text{ }\mu\text{m}$,电极间距为 $2\text{ }\mu\text{m}$,液晶盒厚度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。同样,为了简化液晶的驱动电路,整个器件的电极被划分成多个子阵列,每个子阵列包含180个独立可编程的电极。这款器件对束腰直径为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的光束实现了 $\pm 5^\circ$ 范围内的离散偏转,在偏转角为 0.81° 和 2.5° 时的偏转效率分别为97%和76%^[23]。

相比于 Raytheon公司, Boulder Nonlinear Systems(BNS)公司研制的器件均是基于硅上液晶(LCoS)技术的反射式液晶光学相控阵。2000年, BNS公司研制了一款孔径为 $7.4\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的一维液晶光学相控阵,如图2(a)所示。该器件有4069个独立可编程的电极,电极宽度为 $1\text{ }\mu\text{m}$,电极间距为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。这款器件是在 $633\sim 1550\text{ nm}$ 波段内实现了 $\pm 3^\circ$ 范围内8000个角度的连续偏转^[19]。在2006年到2007年期间, BNS公司又研制一款孔

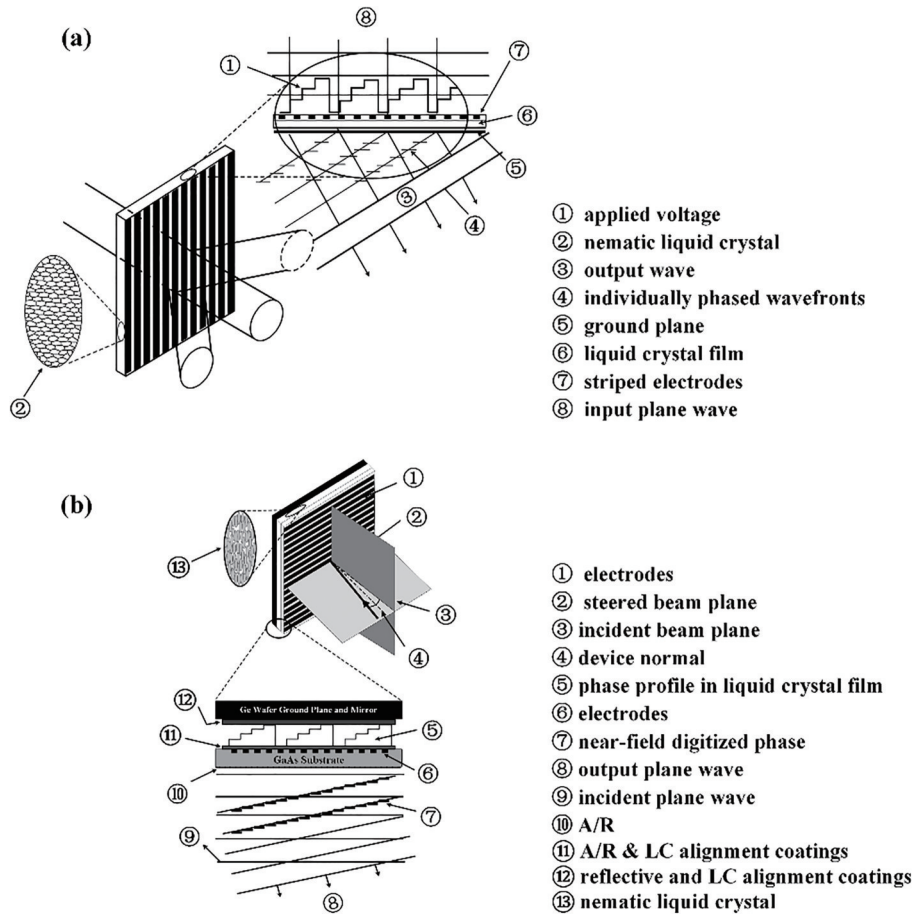


图 1 透射式和反射式液晶光学相控阵的概念设计(如图左部所示)和原理(如图右部所示)。(a) Raytheon 公司于 1991 年研制的透射式液晶光学相控阵^[1]; (b) Raytheon 公司于 1996 年研制的反射式液晶光学相控阵^[23]

Fig. 1 Conceptual design (as shown on the left) and principle (as shown on the right) of transmissive and reflective-type LCOPAs.

(a) Transmissive LCOPA developed by Raytheon in 1991^[1]; (b) reflective LCOPA developed by Raytheon in 1994^[23]

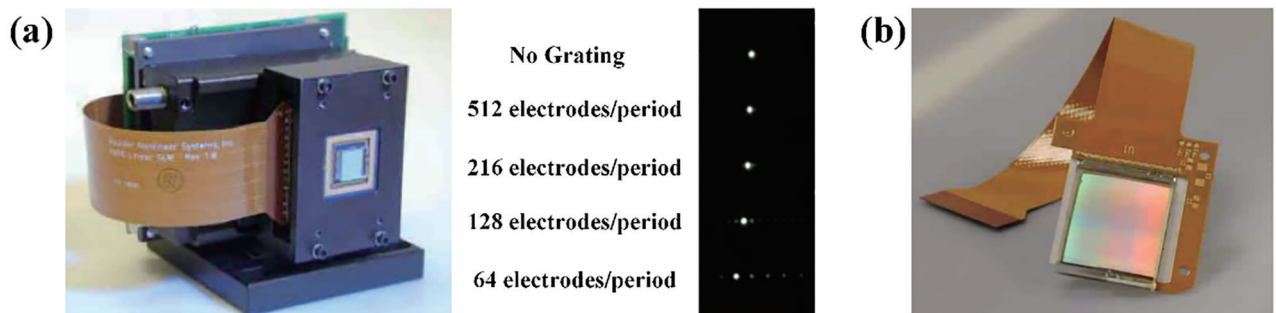


图 2 BNS 公司研制的一维反射式液晶光学相控阵。(a)一维反射式液晶光学相控阵(1 pixel×4096 pixel)照片图及其在波长为 1550 nm 时的光束偏转实验结果^[19]; (b)一维反射式液晶光学相控阵光学头(1 pixel×12288 pixel) 照片图^[24]

Fig. 2 1D reflective LCOPA developed by BNS. (a) Photo of 1D reflective LCOPA device (1 pixel×4096 pixel) and its experiment results for beam steering at the wavelength of 1550 nm^[19]; (b) photo of 1D reflective LCOPA device head (1 pixel×12288 pixel)^[24]

径为 19.66 mm×19.66 mm 的一维液晶光学相控阵,如图 2(b)所示。该器件有 12288 个独立可编程电极,电极宽度为 1 μm,电极间距为 0.8 μm。这款器件在 633~1550 nm 波段内实现了±7°范围的连

续偏转,响应时间小于 24.3 ms^[24]。同时,BNS 公司也相当重视用户的体验,他研制的产品不仅对驱动电路进行了集成化,而且开发了良好的人机交互界面。

Rockwell公司则致力于对液晶光学相控阵器件的体积、质量及功耗进行优化。2004年, Rockwell公司研制出一款孔径为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 、基于双频液晶的反射式光学相控阵,如图3(a)和图3(b)所示。该器件有480个独立可编辑的电极,像素宽度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。这款器件对 1550 nm 的光束实现了 $\pm 1.5^\circ$ 范围内的离散偏转^[4]。与反射型

液晶光学相控阵器件相比较,透射型器件有更小的体积、质量、功耗, Rockwell公司在2005年研制了一款孔径为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 、基于双频液晶透射式光学相控阵,如图3(c)~图3(e)所示。该器件有5120个可独立编辑的电极,像素宽度为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。这款器件对 1550 nm 的光束是实现了 $\pm 2^\circ$ 范围内的离散偏转^[25]。

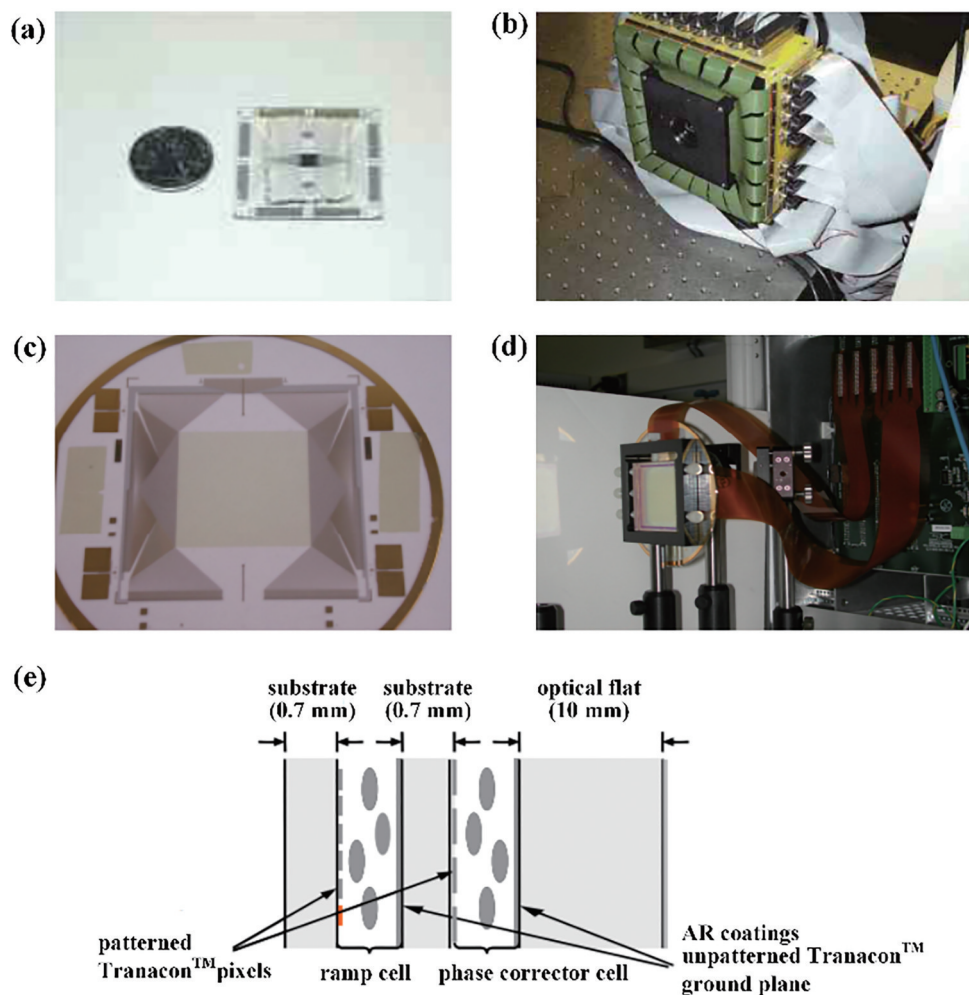


图3 Rockwell公司研制的一维反射式、透射式双频液晶光学相控阵。反射式双频液晶光学相控阵^[4]的(a)核心单元和(b)测试器件外观;透射式双频液晶光学相控阵^[25]的(c)核心单元、(d)测试器件外观和(e)结构示意图

Fig. 3 1D transmissive and reflective dual-frequency LCOPA devices developed by Rockwell. (a) Core element and (b) appearance of the test device of reflective dual-frequency LCOPA device^[4]; (c) core element, (d) appearance of the test device and (e) structural diagram of transmissive dual-frequency LCOPA device^[25]

尽管液晶材料具有巨大的电光效应,但对于较厚的液晶层,这种效应将被减弱。为了规避这种效应, Vescent Photonics公司发明了液晶包层波导结构。在2008年, Vescent Photonics公司研制出了一款孔径约为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的一维液晶光学相控阵,它的质量小于 5 g 。这款器件对 1550 nm 的近红外光束实现了 80° 的最大偏转角,在 $\pm 40^\circ$ 范围内

的连续偏转,其偏转效率不低于 80% ,响应时间小于 1 ms ^[26]。该相控阵的性能原理及结构如图4所示。

2.1.2 国内研究进展

对于光学相控阵的研究,国内已初具规模。但对于液晶光学相控阵而言,国内起步较晚,仍处于起步阶段。哈尔滨工业大学在国内较早地将光束

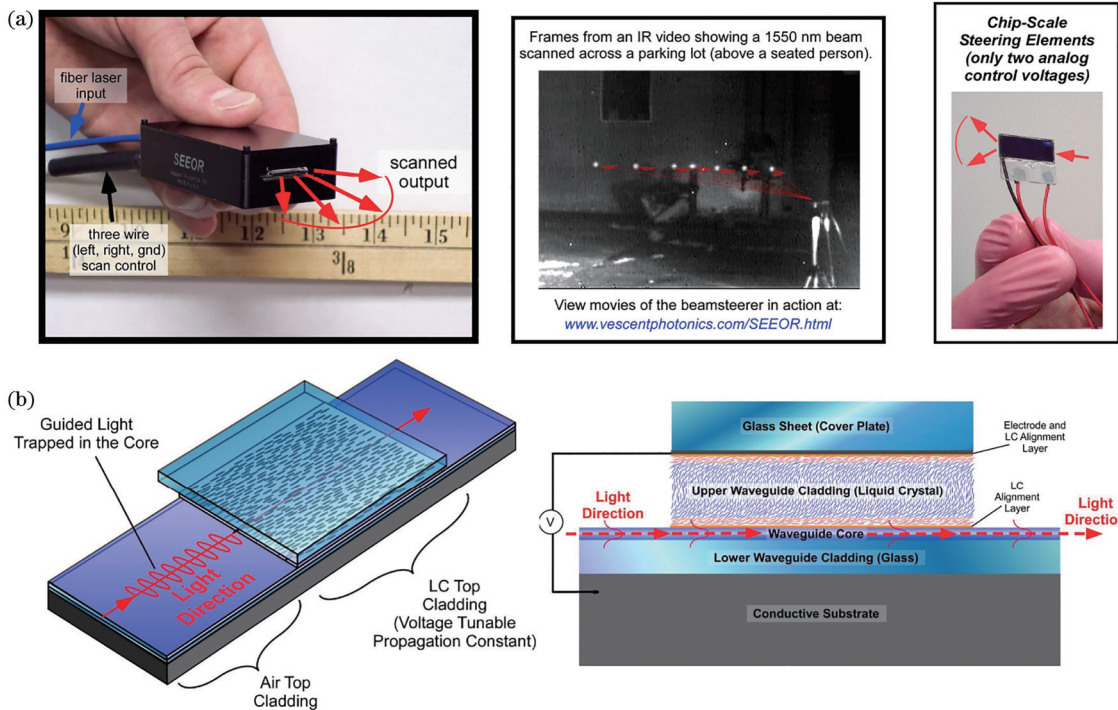


图 4 Vescent Photonics 公司研制的一维液晶光学相控阵的演示实验及其原理结构^[26]。(a) 演示实验；(b) 原理及结构
Fig. 4 Demonstration experiment, principle and structure of the 1D LCOPA device developed by Vescent Photonics^[26].
(a) Demonstration experiment; (b) principle and structure

控制和液晶相控阵的理论、技术和应用作为整体项目，在液晶波前校正以及影响衍射效率等方面进行了探究，该研究成果为后续的相关研究提供了基础^[17,19,27-32]。哈尔滨工业大学的张建研究团队依据自建的一维液晶盒模型深入研究液晶的电压-相移特性，为液晶光学相控阵的驱动电压以及盒厚设计提供了参考依据^[19,31]；依据所构建锯齿状相位延迟模型对回程区、光栅周期及最大相位延迟量对于器件衍射效率的影响进行了综合分析^[19,32]。基于液晶光学相控阵的理论分析，该团队于 2008 年研制了一款一维透射式向列相液晶光学相控阵，该器件有 1024 个独立可编程电极，电极宽度为 $10\ \mu\text{m}$ ，电极间距为 $8\ \mu\text{m}$ ，液晶盒厚度为 $5.8\ \mu\text{m}$ 。这款器件对 $632.8\ \text{nm}$ 的红光实现的最大偏转角为 2.0014° ，实现了 60 个角度的准连续偏转，并对影响衍射效率的“相位凹陷”现象进行了定性分析，如图 5(a) 所示，结果表明相位凹陷的产生与驱动电极的离散性密切相关，通过减小电极之间的距离可以有效减少甚至消除相位凹陷^[17,19]。

电子科技大学的研究人员对液晶的特性、液晶模型及液晶光学相控阵都有一定的研究^[33-38]。2005 年，根据激光雷达的设计要求，他们研制了一款一维透射式向列相液晶光学相控阵，该器件

有 1440 个独立可编程电极，电极宽度为 $3\ \mu\text{m}$ ，电极间距为 $1\ \mu\text{m}$ ，液晶盒厚度为 $6\ \mu\text{m}$ 。这款器件在 $635\sim 1060\ \text{nm}$ 波段内实现的最大偏转角为 3.0381° ，实现了 $\pm 1^\circ$ 范围内 100 个角度的准连续偏转，在偏转角为 0.2° 和 1.8° 时的偏转效率分别为 70% 和 20%，其偏转效果图如图 5(b) 所示。

中国科学院长春光学精密机械物理研究所的研究人员对液晶光学相控阵也开展了研究并确立了电场与晶体折射率的关系，在此基础上，提出非规则光学相控阵的基本理论，随后对相位调制曲线非线性等问题进行了探讨^[39-42]。2013 年该所采用平行排列的液晶盒作为液晶相控阵模型进行研究，优化了盒厚的电压与响应时间的关系，指出该关系普遍适用于其他具有固定相位调制量且呈平行排列的液晶光学器件^[43]。近些年来，该所的宣丽研究员团队开展了基于液晶光学相控阵的光束精调和大角度光束偏转的研究^[44-46]。该团队在子孔径相干算法的基础上，提出了两种新的相位调制方法：径向子孔径相干算法和对称径向子孔径相干算法。依据这两种算法，可以在对液晶光学相控阵的一维与二维扫描中实现高精度、灵活的波束转向的同时，有效地避免了由光束孔径变化引起的转向角整体漂移，极大地提高了光束偏转的稳定性^[44-45]。同时，

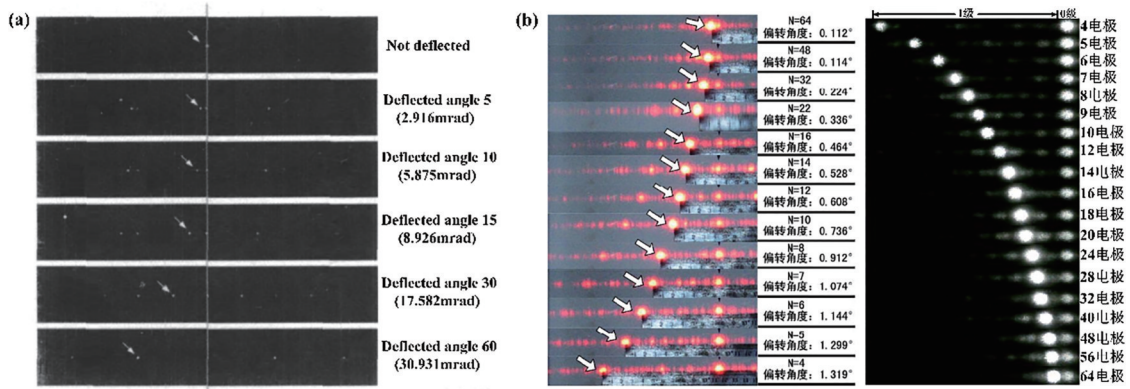


图 5 液晶光学相控阵的偏转效果。(a)哈尔滨工业大学所研制的液晶光学相控阵的偏转效果图^[17, 19];(b)电子科技大学所研制的液晶光学相控阵的偏转效果图,左图为 635 nm 的入射光束,右图为 1060 nm 的入射光束^[33]

Fig. 5 Deflection effect diagrams of LCOPA. (a) deflection effect diagrams of liquid crystal optical phased array developed by Harbin Institute of Technology^[17, 19]; (b) Deflection effect diagrams of LCOPA developed by the University of Electronic Science and Technology, left for 635 nm of the incident beam, right for 1060 nm of the incident beam^[33]

该团队也建立了径向子孔径相干算法和对称径向子孔径相干算法的基本数学框架及相应的局部误差消除的方法,补充了相位生成算法的理论支撑,为其应用于其他波束控制,提供了直观、必要的参考^[46]。

2.1.3 性能的改善

对于偏转效率的提升而言,主要是考虑入射光束经过器件的精确调制后,如何将其大份额能量偏转到特定方向上去。电场边缘效应和相位回程区是影响偏转效率的主要因素^[19, 47]。

优化控制和实现波前相位的控制是减弱电场边缘效应的有效方法。2003年,Harris通过4种不同的方法分别对电压-相位关系进行优化,如图6所示,这4种不同的方法在有效扫描的范围内均有较高的偏转效率^[48]。2004年,Cruneyisen等提出一种使

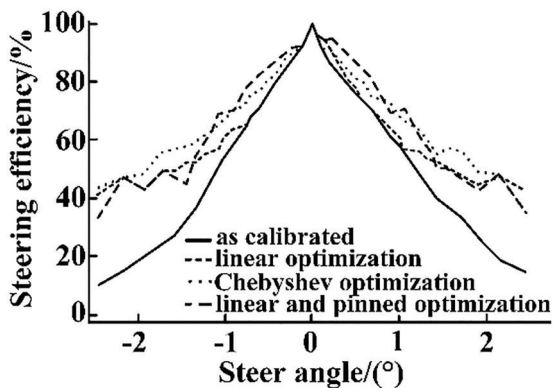


图 6 通过 4 种优化方法提高衍射效率^[48]

Fig. 6 Diffraction efficiency improvement by four optimization approaches^[48]

用光电导介质充当电极层的方法,消除了电场边缘效应带来的效率损失,显著提高了偏转效率^[49]。

多种波控算法也被用来减弱电场边缘效应^[50-54]。目前有效控制波前相位的算法是对计算的实际相位进行迭代反馈,能够将偏转效率提升 10% 以上^[50-51]。虽然迭代反馈的算法可以有效提升偏转效率,但其扩展性展性较差。为了提高有效控制波前相位算法的扩展性,研究者们在自适应光学优化随机并行梯度下降算法的基础上,提出一种控制并优化液晶相控阵偏转效率的方法,该方法适用于周期与非周期闪耀光栅模型^[52]。近年来,由于蝙蝠算法和快速搜寻优化算法能够有效压缩旁瓣,使主瓣的能量提升,故这两种算法也受到研究者的青睐^[53-54]。2008年,徐林指出虽然相位凹陷无法避免,但可通过减小液晶盒厚度的方法来减小回程区,提升响应速度和偏转效率^[19]。近年来,针对偏转效率提升的问题,研究人员也提出一些新的解决方案。台湾交通大学的研究人员于 2010 年制作了一种使用稳定聚合物的自由极化的蓝色液晶相控阵,其偏转效率和系统的利用率都得到了提升^[55]。同时,随着占空比的减小,远场分布的旁瓣越来越多,这使得衍射效率下降。故可以通过改变占空比来提升偏转效率。

对于偏转角度的改善而言,主要考虑的问题是提升其最大偏转角度与高偏转分辨率。器件可偏转的角度取决于独立可编程的电极数目,即独立可编程的电极数目越多的器件,偏转的分辨率也就越高^[17]。但在制备工艺以及驱动电路集成难度的限

制下,器件在一个子阵列中所能够拥有的独立可编程电极的数目是有限的。美国空军研究实验室的 Paul 博士通过精调/粗调结合的层叠式结构改善了器件的偏转分辨率,实现了光束的准连续偏转^[1]。中国科学院光电技术研究所的杜升平于 2017 年通过改变液晶电极间相位差来控制光束的出射方向,对电子科技大学研制的液晶光学相控阵在 0.15° 的扫描范围内实现了优于 $20 \mu\text{rad}$ 的连续光束偏转^[18,56]。对于器件的最大偏转角度(扫描范围)而言,光栅的周期 d 决定了空间的扫描范围,理想的扫描范围值为 λ/d ,即随着光栅周期的减小,扫描范围会相应地增大。但结构的优化往往会受到制备工艺的限制,针对这一限制,Paul 博士提出一种通过粗调与精调的结合来实现光束大角度偏转的方法^[26,37,57-60]。2003 年,Raytheon 公司通过 8 片全息片与液晶光学相控阵的叠加实现了 45° 的最大偏转角,偏转效率超过 98%^[57]。Rockwell 公司于 2004 年采用液晶光学相控阵与双折射棱镜级联的方式实现了 40° 的最大偏转角^[58]。Vescent Photonics 公司则采用液晶包层波导结构实现了 80° 的最大偏转角,实现了在 $\pm 40^\circ$ 范围内的连续偏转且偏转效率不低于 80%^[26]。中国科学院光电技术研究所于 2012 年通过沃拉斯顿棱镜与液晶相控阵级联的方式实现了 13.25° 的最大偏转角^[59]。

向列液晶有较长的响应时间,这在一定程度上限制了其在空间通信及军事上的应用。目前已经找到合适的方法来提升响应速度。研究者通过使用铁液晶材料、双频液晶材料等替换向列液晶材料,显著缩短了相位控的响应时间^[61-62]。近年来,为追求更高效更快速的响应,硅基光波导成为一种热门的光学相控阵材料。2010 年,Doyle 等提出并制作了一款硅基波导二维光束相控阵,实现了 $\pm 12^\circ$ 扫描范围,但其旁瓣明显,偏转效率较低^[63]。麻省理工学院(MIT)于 2013 年制备了一款由全硅蚀刻形成的波导光栅纳米天线,能够偏转光束,但其性能有待提升^[64]。微型机电系统光学相控阵(MEMS OPA)对于提升响应速度也是一个不错的选择,加利福尼亚大学的 Wang 等^[65]通过结合二维光学相控阵与微型机电系统(MEMS)驱动移相器在 $1200\sim 1700 \text{ nm}$ 的通信波段内实现了一个 $6.6^\circ \times 4.4^\circ$ 的视场,衍射效率达到了 85%。

2.2 多址通信与高能激光相控系统

随着液晶光学相控阵在低功率激光通信与传

输领域应用的增长,激光通信与传输的要求不断提高,特别是在多址通信和高能激光相控系统中的要求,研究多址通信与发展高能激光相控系统已成为必然趋势^[20,66-67]。相比于液晶光学相控阵在低功率激光的通信与传输领域的应用来看,多址通信的研究与高能激光相控系统的研发仍然面临诸多问题^[67],主要集中在:如何提高液晶光学相控阵的耐受功率、如何实现多路激光协同等问题。

2.2.1 多址通信

多址通信也是液晶光学相控阵技术的一个重要特点。液晶光学相控阵技术要在卫星激光通信中使用,多址通信是其必须具备的能力,其中一个终端需与多个终端通信,以便建立卫星激光通信网络。此外,在激光雷达应用中,光束转向器需要从本地终端传输多束光或接收来自许多运动目标的多束光,才能实现快速的多目标瞄准和跟踪。液晶光学相控阵在多址通信上的应用已逐渐引起了国内外研究人员的重视。

2016 年,牛津大学的 Gomez 等^[20]利用液晶光学相位控在室内实现了一点对两点的无线通信,其实验装置如图 7 所示。在实验中, $1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.6 \mu\text{m}$ 两种波长的光被 50:50 的合束器合成一束光,通过液晶相控阵同时射向两个不同位置的终端,视场为 $\pm 30^\circ$,传播距离约 3 m。

2018 年,电子科技大学研究人员通过级联两个透射式液晶光学相控阵来调制入射激光束的振幅和相位,在多个任意方向同时实现了光束的近场波峰,如图 8 所示。该两个阵列之间的衍射是通过精确的 $4f$ 成像来实现。实验中,以 632.8 nm 的光束入射至上述结构,最多可以同时偏转出 4 束光线,光线的强度满足应用要求,衍射效率不低于 80%^[66]。该实验结果清楚地表明,这是一种高偏转效率和高偏转精度的多波束的快速形成法。

2.2.2 高能激光相控系统

为了提升液晶光学相控阵的激光耐受功率,满足器件在高能激光偏转场景下的应用,国内外各国纷纷对高能激光相控系统进行研究。2006 年,美国 Raytheon 公司^[68]研制的液晶光学相控阵的耐受功率达到了 113 W/cm^2 ,见图 9。

2010 年,美国空军实验室采用 1064 nm 的连续激光对其液晶光学相控阵进行了测试^[69],器件的耐受功率达到 100 W/cm^2 。但由于国外各国已将高能激光相控技术封锁,相关的公开和详细报道甚少。

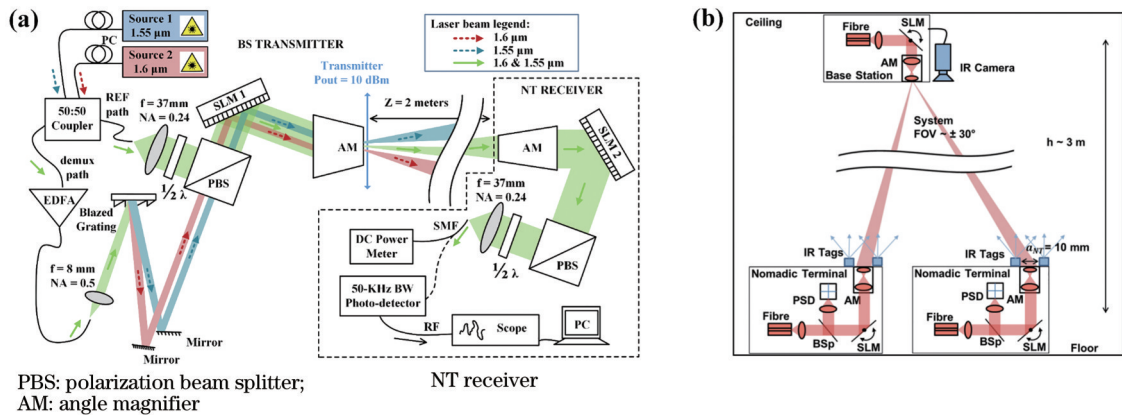


图 7 采用液晶双光束偏转的室内一点对两点无线光通信的原理框图及其演示实验框图^[20]。(a)原理框图;(b)演示实验框图
Fig. 7 Principal block diagram and demonstration experimental block diagram of indoor point-to-two point wireless optical communication using liquid crystal double beam deflection^[20]. (a) Principal block diagram; (b) demonstration experimental block diagram

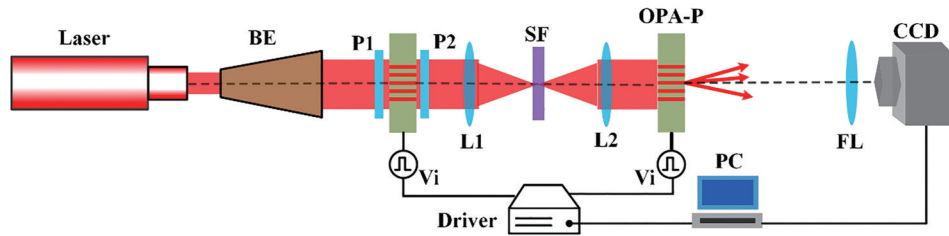


图 8 电子科技大学所采用的级联结构示意图^[66]
Fig. 8 Schematic diagram of cascade structure adopted by University of Electronic Science and Technology of China^[66]

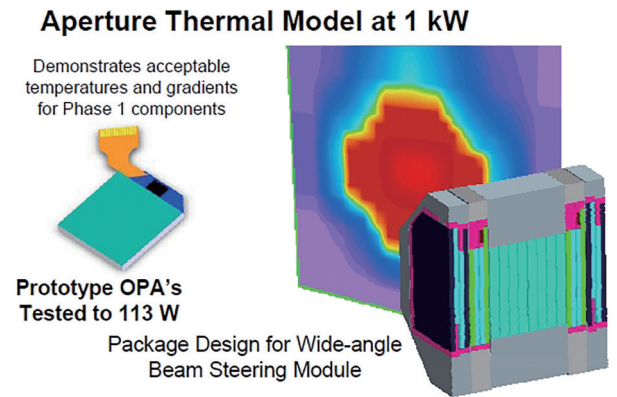


图 9 Raytheon 公司研制的耐受高功率的液晶光学相控阵^[68]
Fig. 9 High power LCOPA developed by Raytheon^[68]

中国工程物理研究所对液晶光学相控阵的膜层激光损伤进行了详细的探究^[70],特别是对导电层氧化锡和取向层聚酰亚胺进行了详细的分析,这为国内后续在高能激光相控系统的研究提供了基础。电子科技大学汪相如团队^[71]在中国工程物理所的研究基础上,分别从器件吸收率、冷却流速、热沉积结构及基底材料这几个角度,详细探讨了高能激光对于液晶光学相控阵性能的影响,深入研究了如何

提高液晶相控阵的激光耐受功率。2018年,他们研制了以氧化锡锡作为导电层、以聚酰亚胺作为取向层,带有散热系统的石英基底反射式液晶光学相控阵,在 1064 nm 的连续激光加载下,器件的耐受功率达到 272.4 W/cm²^[71]。

3 结 论

液晶光学相控阵因其体积小、质量小、结构简单、易于集成、功耗小以及能够对运动中的目标进行自动捕获、瞄准和跟踪的特点,被研究人员广泛关注,以期能够满足未来空间通信与军事发展的需求。从性能指标的角度出发,对国内外液晶光学相控阵光束的精确偏转的研究进展进行了介绍并论述了改善性能的途径,同时也介绍了液晶光学相控阵在多址通信与高能激光相控系统研究中的研究进展。自 Raytheon 公司、BNS 公司、Rockwell 公司、美国空军实验室等研究机构通过研制液晶光学相控阵实现光束偏转以来,这种偏振敏感型液晶光栅已经成为一种重要的主动电光器件,也是最有可能实用的光学相控阵。波前探测、自适应光学等方面是未

来液晶光学相控阵可用的民用领域。综合国内外对于液晶光学相控阵的研究进展,发现液晶光学相控阵目前主要的研究领域仍集中于低功率激光的精确偏转,有效提高液晶光学相控阵器件的响应速度、偏转角度及偏转效率,仍是亟待解决的问题。同时,随着液晶光学相控阵在低功率激光的通信与传输领域应用的增长,激光通信与传输的要求不断提高,特别是在多址通信和高能激光相控系统的要求,多址通信的研究与高能激光相控系统的研发已成为必然的趋势。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hands P J W, Tatarkova S A, Kirby A K, et al. Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells[J]. Optics Express, 2006, 14(10): 4525-4537.
- [3] Matkin B W. Steered agile beams support for army requirements[J]. Proceedings of SPIE, 3952: 4-14.
- [4] Winker B, Mahajan M, Hunwardsen M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 6-13, 2004, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2004, 3: 1702-1709.
- [5] Chao T H, Zhou H Y, Reyes G F, et al. High-speed high-density holographic memory using electro-optic beam steering devices[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4803: 70-73.
- [6] Bai S, Wang J Y, Zhang L, et al. Development progress and trends of space optical communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- [7] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110002.
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(11): 110002.
- [8] Cazaubiel V, Planche G, Chorvalli V, et al. LOLA: a 40000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10567: 1056726.
- [9] Gregory M, Heine F, Kämpfner H, et al. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7923: 792303.
- [10] Geng L, Zhang Z P. Foreign spaceborne laser application[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9): 919-925.
耿林, 张忠萍. 国外空间激光应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(9): 919-925.
- [11] Hao Y J. The research of non-mechanical beam steering controller in laser communication[D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology), 2014.
郝雅静. 光通信中非机械式光束偏转控制器研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2014.
- [12] Fu Q, Jin T, Zhou Q. Research of the beam steering theory based on acousto-optic effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 1083-1087.
付琼, 金韬, 周诠. 基于声光效应的光束偏转控制理论研究[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1083-1087.
- [13] Qu R H, Ye Q, Dong Z R, et al. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1861-1867.
瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861-1867.
- [14] Shi S X. Physical optics and applied optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.
石顺祥. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [15] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [16] Ninomiya Y. Ultrahigh resolving electrooptic prism array light deflectors[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1973, 9(8): 791-795.
- [17] Zhang J, Xu L, Wu L Y, et al. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1497-1502.
张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1497-1502.
- [18] Du S P. Research on liquid crystal beam deflection for space optical communication[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2017.
杜升平. 应用于空间光通信的液晶光束偏转技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术

- 研究所), 2017.
- [19] Xu L. Research on phase delay and diffraction efficiency of liquid crystal optical phase array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
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.
- [20] Gomez A, Shi K, Quintana C, et al. A 50 Gb/s transparent indoor optical wireless communications link with an integrated localization and tracking system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2510-2517.
- [21] Liu X F, Zhao Y A, Peng L P, et al. Application problems of liquid crystal phase modulators to high power lasers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(3): 032003.
刘晓凤, 赵元安, 彭丽萍, 等. 液晶相位调控器件的高功率激光应用相关问题[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(3): 032003.
- [22] Han X Q, Li L, Tan D J, et al. Liquid crystal optical phased array technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2012, 23(1): 65-69.
韩学勤, 李丽, 谭东杰, 等. 液晶光学相控阵技术[J]. 航空科学技术, 2012, 23(1): 65-69.
- [23] 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.
- [24] Linnenberger A, Serati S, Stockley J. Advances in optical phased array technology[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6304: 63040T.
- [25] Lin Y H, Mahajan M, Taber D, et al. Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5892: 58920C.
- [26] Davis S R, Farca G, Rommel S D, et al. Analog, non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6971: 69710G.
- [27] Zhang H X, Zhang J, Wu L Y. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1360-1364.
张洪鑫, 张健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1360-1364.
- [28] Liu B H, Zhang J. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(7): 899-902.
刘伯哈, 张健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 899-902.
- [29] Liu B H, Wu L Y, Zhang J. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 219-224.
刘伯哈, 吴丽莹, 张健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 219-224.
- [30] Shi Y L. Research on driving technology of liquid crystal optical phased array for beam steering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
石永亮. 用于光束偏转的液晶光学相阵列驱动技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [31] Xu L, Zhang J, Wu L Y. Influence of phase delay profile on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(4): 509-516.
- [32] Xu L, Zhang J, Wu L Y. Numerical modeling for liquid crystal optical phased array and its phase delay characteristic[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6352: 635225.
- [33] Wu Z Y. Research on liquid crystal phased array controller for LIDAR[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
吴志勇. 激光雷达液晶相控阵波控器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [34] Tang Z H. Target location research based on distributed phased array radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
汤镇辉. 液晶光学相控阵的波束扫描方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [35] Song Y. Research on beam steering control model and algorithm for liquid crystal phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
宋艳. 液晶相控阵波束控制模型与算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [36] Liu K. Research and design of liquid crystal blazed grating capable of laser scanning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
刘坤. 可实现激光扫描的液晶闪耀光栅的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [37] Wang L, Lu Y X, Huang Z Q, et al. Influence of marginal effect of electric field on properties of liquid crystal grating[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2007, 22(1): 61-64.
王俐, 卢亚雄, 黄子强, 等. 电场边缘效应对液晶光

- 栅特性的影响[J]. 液晶与显示, 2007, 22(1): 61-64.
- [38] Wang X R, Huang Z Q. Analysis and research on liquid crystal optical phase array component steering precision[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(4): 33-37.
汪相如, 黄子强. 液晶光学相控阵组件扫描精度分析研究[J]. 光电技术应用, 2017, 32(4): 33-37.
- [39] Zhu C Y. Study on technology of spatial light modulation by electrical addressing[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2002.
朱成禹. 电寻址空间光调制技术的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2002.
- [40] Lü X P, Feng K C, Liu W Q. Theoretical study on the optical phased-array scanning[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2002, 25(2): 47-49.
吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(2): 47-49.
- [41] Lü X P, Feng K C, Liu W Q. A design for laser television with optical phased array scanning[J]. Journal of Shantou University (Natural Science Edition), 2003, 18(1): 43-47.
吕秀品, 冯克成, 刘伟奇. 光学相控阵扫描激光电视的设计[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2003, 18(1): 43-47.
- [42] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, et al. Nonlinear phase modulation of liquid crystal wavefront corrector and closed loop correction[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(2): 157-162.
曹召良, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶波前校正器位相调制非线性及闭环校正研究[J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 157-162.
- [43] Qi M J, Wang Q D, Mu Q Q, et al. Study of response time depending on driving voltage of liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 092302.
齐梦娇, 王启东, 穆全全, 等. 驱动电压对液晶空间光调制器响应时间影响的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 092302.
- [44] Wang C, Peng Z, Liu Y, et al. Radial sub-aperture coherence method used to achieve beam steering with high precision and stability[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6331-6347.
- [45] Wang C, Peng Z, Liu Y, et al. Two-dimensional symmetrical radial sub-aperture coherence and the local precision defect elimination method for high-precision beam steering[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18751-18765.
- [46] Wang C M, Chen W, Zhao Z W, et al. Quantitative error analysis for non-mechanical phase-controlled beam steering based on symmetrical radial sub-aperture coherence algorithm[J]. Liquid Crystals, 2021, 48(3): 361-367.
- [47] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 59470I.
- [48] Harris S R. Numerical optimization of the performance of nematic liquid crystal optical phased arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5162: 157-171.
- [49] Gruneisen, Mark T. Programmable diffractive optics for wide-dynamic-range wavefront control using liquid-crystal spatial light modulators[J]. Optical Engineering, 2004, 43(6): 1387-1393.
- [50] Cai D M, Yang H Z, Ling N, et al. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(4): 491-495.
蔡冬梅, 杨慧珍, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 491-495.
- [51] Yin X H. Research on optimization algorithm of steering data for laser radar phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
尹晓虎. 激光雷达液晶相控阵波控数据优化算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [52] Zhao X J. Research on key technologies and applications of liquid crystal phase control arrays[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014.
赵祥杰. 液晶相位控制阵列关键技术及其应用[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014.
- [53] Huang Z W, Wang C Y, Peng L H, et al. Beam optimization of liquid crystal optical phased array based on bat algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082303.
黄志伟, 王春阳, 彭丽华, 等. 基于蝙蝠算法的液晶光学相控阵波束优化[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082303.
- [54] Xiao F, Kong L J, Chen J. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4585-4590.

- [55] Lin Y H, Chen H S, Lin H C, et al. Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 113505.
- [56] Du S P, Huang Y M, Fu C Y, et al. Liquid-crystal beam deflection wave control method based on phased array radar[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 581-586.
杜升平, 黄永梅, 付承毓, 等. 基于相控阵雷达模型的液晶光束偏转波控方法研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(4): 581-586.
- [57] Yaqoob Z, Arain M A, Riza N A. High-speed two-dimensional laser scanner based on Bragg gratings stored in photothermorefractive glass[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(26): 5251-5262.
- [58] Khan S A, Riza N A. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 868-882.
- [59] Xiao W B, Huang Y M, Wu Q Y, et al. A wide-angle beam steering system based on Wollaston prisms[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(5): 588-592.
肖文奔, 黄永梅, 吴琼雁, 等. 基于 Wollaston 棱镜的大角度液晶光束偏转系统[J]. *光学技术*, 2012, 38(5): 588-592.
- [60] Yan Z Q, Guo T, Wu J, et al. Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0323001.
闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息光栅的激光多目标指示技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0323001.
- [61] Engström D, O'Callaghan M J, Walker C, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [62] Mahajan M, Wen B, Bhupathy V, et al. Voltage calibration of dual-frequency liquid crystal devices for infrared beam steering applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5892: 58921A.
- [63] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, et al. Hybrid silicon free-space source with integrated beam steering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8629: 862911.
- [64] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [65] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [66] Wu L, Wang X R, He X X, et al. Arbitrary multiple beam forming by two cascaded liquid crystal optical phased arrays[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17066-17077.
- [67] Piasecka M, Strąk K, Maciejewska B. Calculations of flow boiling heat transfer in a minichannel based on liquid crystal and infrared thermography data[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2017, 38(3): 332-346.
- [68] Gu D, Wen B, Mahajan M, et al. High power liquid crystal spatial light modulators[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6306: 630602.
- [69] Whitaker B, Harris S R. A preliminary investigation into the effects of high-power illumination on optical phased arrays[Z]. [S.l. : s. n.], 2010: 1-20.
- [70] Li Y L. Laser damage on functional films of liquid crystal optical elements[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010.
李阳龙. 液晶光学器件功能薄膜的激光损伤机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
- [71] Wang X R, Zhou Z Q. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103006.
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(1): 0103006.