

·综述·

## 光束扫描技术研究进展

闫舟<sup>1</sup>, 徐景<sup>2</sup>

(1.空军某军事代表室, 陕西 西安 710068; 2.95561部队, 西藏 拉萨 850002)

**摘要:**回顾了光束扫描技术的发展历程, 重点分析微机电式和纯电控非机械式光束扫描技术的特点, 并综合对比它们各自的技术优势, 最后指出在高速率光通信系统中, 由于纯电控非机械式光束扫描技术得到广泛应用, 因此必须考虑该技术的色散特性对高速光通信系统误码率的影响。

**关键词:**光束扫描技术; 扫描速度; 微机电式; 纯电控非机械式

**中图分类号:** O431      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-1255(2013)-04-0001-09

## Research Development of Beam Scanning Technology

YAN Zhou<sup>1</sup>, XU Jing<sup>2</sup>

(1. Military Representative Bureau of Air Force, Xi'an 710068, China; 2. 95561 Army Unit, Lhasa 850002, China)

**Abstract:** The development process of beam scanning technology is reviewed. The characteristics of beam scanning technology of micro-electromechanical system (MEMS) and mechanics-free electrical control modes are analyzed. And the technology advantages of those two technologies are compared synthetically. In high-speed optical communication system, the influence of chromatic dispersion characteristics of the technology on bit error rate of high-speed optical communication system must be considered due to the widely application of beam scanning technology of mechanics-free electrical control mode.

**Key words:** beam scanning technology; scanning speed; micro-electromechanical system (MEMS); mechanics-free electrical control mode

光束扫描技术是指对激光光束方向精确控制以及定位的技术。该技术被广泛应用于多个领域, 如: 激光雷达、激光显示、光信息存储和处理以及自由空间光通信等<sup>[1-8]</sup>。

光束扫描技术一般可分为机械式、微机电式以及纯电控非机械式三种。传统的光束扫描一般采用机械式, 如: 复杂万向节、旋转平面反射镜、三棱镜等。该方式具有扫描效率高、视场广等优点。然而受限于其体积和质量, 该方式的定位精度差、扫描速度慢。微机电式光束扫描方式的典型代表是 MEMS 反射镜技术, 该技术具有设计灵活、通光口径大、扫描视场广以及偏振无关和色散无关特性, 因此在光束扫描领域得到一定的应用<sup>[9]</sup>。纯电控非机械光束扫描技术具有尺寸小、质量轻、能耗低以及偏转速度快

等优点, 其实现途径有多种, 如: 声光调制、电光调制、全息以及液晶等<sup>[9]</sup>。当前光束扫描技术的研究热点是微机电式和纯电控非机械两种扫描方式。文中主要综述这两类扫描技术的研究进展, 并对比它们的优缺点。

### 1 微机电光束扫描技术

微机电式光束扫描技术起步较晚, 20世纪80年代才出现<sup>[10]</sup>。然而随着平板印刷等工艺水平的不断进步, 该技术在多个领域取得了成功。硅光机械公司 (silicon light machines) 设计了微反射镜阵列结构, 如图1所示<sup>[11]</sup>。

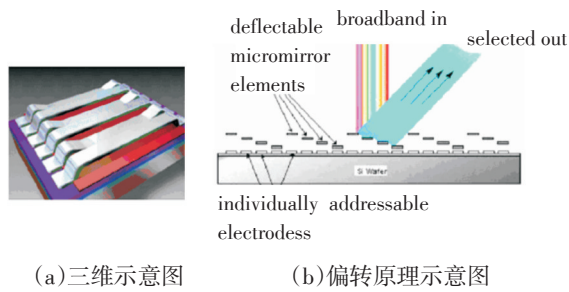


图1 硅光机械公司微反射镜阵列

该装置的主要技术特点是扫描速度较快,一般在微秒范围内,且由于条带反射镜的周期可以小至 $0.5\ \mu\text{m}$ ,因此扫描视场较广。但该技术也存在明显缺点,如:存在多级衍射光斑,扫描效率较低(最大只有70%左右),以及窄带扫描特性,因而实际应用受到诸多限制。

上述早期开发的MEMS反射镜阵列主要采用微平面反射镜镀高反膜的技术,只能转动,且没有相位控制的功能,并只具有一维空间扫描特性,扫描精度较差。佛罗里达大学和美国空军研究试验室于2008年报道了大面积、活塞式微反射镜MEMS的光学相控阵结构。该结构由 $4\times 4$ 的微反射镜组成,如图2所示<sup>[12]</sup>。

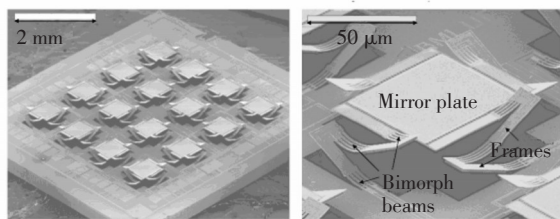


图2 大面积、活塞式微反射镜MEMS的光学相控阵列结构

图2中每一个微反射镜单元尺寸为 $0.5\times 0.5\ \text{mm}^2$ 。当加载直流电压为5 V时,该装置的扫描视场即可达到 $\pm 30^\circ$ ,非常容易实现光束的二维空间扫描。

随后,WiOptix公司和美国空军研究实验室于2010年提出上翘活塞式(tip-tilt-piston)微反射镜阵列装置<sup>[13]</sup>。该装置具有相位控制功能,其采用电热双晶激励方式,由 $4\times 4$ 个微反射镜组成,微反射镜的边长为0.9 mm,填充因子为54%。当该装置加载电压4.5 V时,活塞可纵向移动 $200\ \mu\text{m}$ ,扫描视场范围为 $\pm 18^\circ$ 。

成都光电所于2011年提出基于有源阵列反射镜相位控制技术,用以实现光束的相干合成以及光束偏转等功能,该装置如图3所示<sup>[14]</sup>。

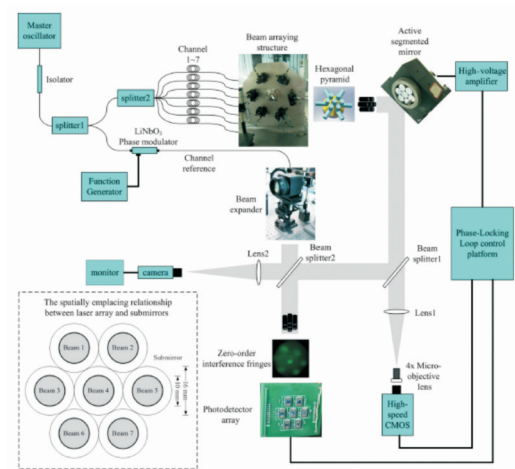


图3 实验装置示意图

从图3中可以看出,该装置通过控制每路的相位来控制光束的扫描方向,因此其涉及光束的成形以及扫描两个过程,因而结构体积庞大,不适合机载和星载平台的使用。

## 2 纯电控非机械式扫描技术

实现纯电控非机械式光束扫描技术可采用声光调制、电光调制、热光调制、体布拉格光栅和液晶等。声光调制是采用光弹技术以实现光束扫描,其响应速度受声速制约,且有改变光波波长的缺点,因此使用范围较窄。电光调制利用泡克尔斯(Pockels)或克尔(Kerr)效应,具有响应速度快的优点,但缺点是驱动电压高、功耗大、通光口径小<sup>[15]</sup>。热光调制利用材料折射率随温度的变化以实现光束的扫描,受环境温度的影响较大,需要一些伺服装置,以优化其使用范围<sup>[16]</sup>。体布拉格光栅法是在玻璃基底空间复用多个体布拉格光栅,不同方向的小角度入射光束将产生不同方向的大角度出射光束,其优点是扫描视场广,但前提是必须有能够产生不同角度的精细光束扫描机构<sup>[17]</sup>。液晶光束扫描器就是利用液晶分子取向可电控的特性实现非机械全电控光束扫描的。由于液晶具有宽双折射范围、宽波段、低驱动电压、制造工艺成熟和高抗光损伤阈值等优点,质量与功耗都显著降低<sup>[4]</sup>。

当前,实现纯电控非机械式扫描的方法主要为光学相控阵技术,该技术首起于1971年,Meyer利用铌酸锂相移器为美国海军制作了一维光学相控阵器

件,该光学相控阵的周期为0.5 mm,大约为800个光波长宽度,实现了0.073°的光束偏转<sup>[18]</sup>。相较机械式扫描技术,光学相控阵技术具有随机存取(random access)、高分辨率、高精度、快速定位等优势。其工作原理主要基于光波的相长和相消干涉,具体实现可采用液晶、光波导阵列、电光晶体、电光陶瓷以及电湿调制等方式。

### 2.1 液晶光学相控阵

液晶是平均折射率可随外加电场发生变化的光学各向异性材料。当对其施加电场时,其平均折射率会产生与加载电场相对应的变化,因此可使光束的出射方向发生改变。折射率的变化与所加电压成正比,与液晶的厚度成反比。液晶具有如下优点,如:驱动电压低、功耗小、质量轻、扫描方向可控等。因此基于液晶的光学相控阵技术得到广泛研究<sup>[19]</sup>。

雷声(Raytheon)公司从1982年开始发展光学相控阵技术,用液晶材料制成由更多单元构成的一维和二维光学相控阵原理装置,并完成了对CO<sub>2</sub>激光束和Nd:YAG激光束进行光束偏转控制的实验<sup>[19]</sup>。

加拿大Hughes研究实验室于1994年提出了利用向列液晶制成闪耀光栅的光束偏转器件<sup>[20]</sup>。采用较小的像元间距,如5 μm,光束偏转角度可达5°,但室温响应时间为61 ms,且衍射效率较低,只有1%~9%,这主要是周期较大,以及相位阶跃变化所致。

液晶相控阵可通过改变周期或闪耀级次以获得不同扫描角度,由于较高级次的衍射效率较低,因此较为常用的是采用改变液晶相控阵周期的方法<sup>[4]</sup>。

液晶光学相控阵技术在1996年取得重大突破,获美国空军资助的雷声公司Dorschner等人制作出一维透射型等周期液晶相控阵,装置如图4所示<sup>[21]</sup>。

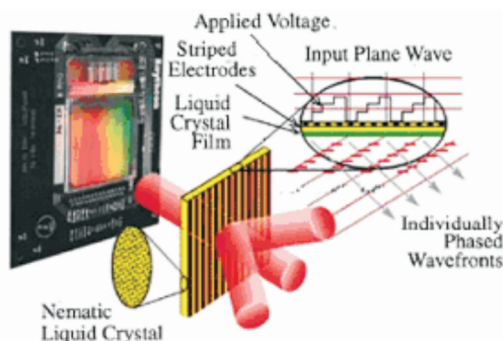
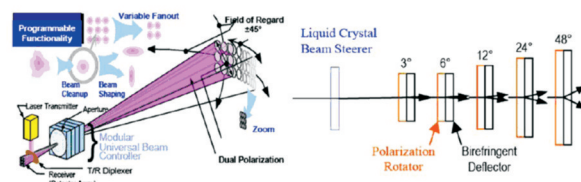


图4 采用透射型液晶光学相控阵的光束偏转示意图

该装置完成了光束精扫描和粗扫描实验。结果表明:精扫描的扫描精度可达1.5 μmrad,且衍射效率高达80%以上(衍射效率和扫描角度有关,角度越大,效率越低),衍射光束的光束质量较好,为1.15倍的衍射极限(入射光束接近于理想高斯光束)。粗扫描对波长为10.6 μm的光束进行实验,此时液晶相控阵周期为4 μm,完成对该光束2.51°的偏转,效率高达85%,且旁瓣抑制效果较佳,比峰值效率低15 dB。

为进一步提高液晶光学相控阵的扫描视场, Rockwell 科技公司于2004年提出利用液晶和棱镜的组合装置以实现大视场光束扫描的功能。液晶用于精扫描,而偏振相关棱镜用于粗扫描,即扫描角度的放大,其工作在“开”“关”两个状态,通过在其之前放置的偏振片来控制其工作状态。该装置可实现±20°视场的扫描,结构如图5所示<sup>[22]</sup>。



(a)粗扫描装置的前后均有两个精扫描的液晶相控阵 (b)粗扫描的结构示意图

图5 准连续、大角度光束扫描装置示意图

这种装置综合了精扫描和粗扫描的优势,可实现大视场、准连续的光束扫描。然而它的结构比较复杂,且衍射效率较低,因此很难用于星载和机载平台。

中佛罗里达大学(University of Central Florida)于2004年提出三维偏振复接光学扫描器(3-D polarization-multiplexed optical sanner, P-MOS)和向列相型液晶棱镜组合装置以实现光束的三维大视场、准连续、高精度扫描的功能,如图6所示<sup>[23]</sup>。

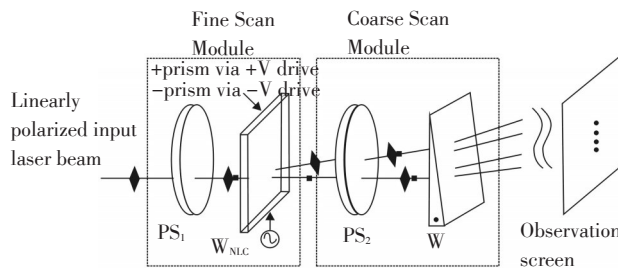


图6 复合扫描装置

该装置可以达到衍射极限精度的光束扫描效果,对1550 nm 光束的扫描视场可达 $\pm 40.92^\circ$ 。但该装置采用了多级串联的结构,因此体积较大,不适于空间受限,或质量受限的卫星平台使用。

哈尔滨工业大学张健课题组于2008年研究了一维透射式向列相液晶光学相控阵,该实验装置如图7所示<sup>[24]</sup>。

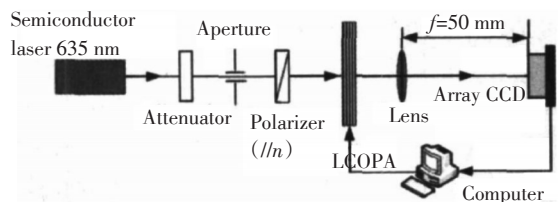


图7 液晶光学相控阵实现光束扫描的实验装置

实验表明,该器件实现了60个角度的准连续电控可编程光束偏转与扫描,视场范围为 $\pm 2.0014^\circ$ 。但该方式仍存有衍射效率随偏转角度增大而迅速降低等问题,因此直接影响扫描视场的范围。

随后,该课题组于2009年提出利用锯齿状相移模型来定量分析相位回程区、周期以及最大相位延迟量对液晶光学相控阵衍射效率的影响,得出相位回程区对其衍射效率的影响最大,给出优化衍射效率的新方法,并以实验加以佐证<sup>[25]</sup>。2010年该课题组综述了液晶光束偏转技术的研究进展<sup>[26]</sup>。

成都电子科技大学孔令讲课题组于2009年提出二进制光栅的模型用以分析液晶光学相控阵的光束扫描特性<sup>[27]</sup>,并于2010年提出采用高精度空间光调制器以实现光束扫描的方法<sup>[28]</sup>。该文主要分析了空间光调制器的定位扫描精度,创新性地提出采用迭代优化算法用以修正光束波前来计算扫描精度,并取得了较好的结果。

国防科学技术大学邹永超研究了基于液晶相控

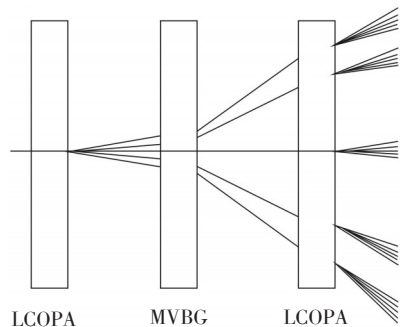


图8 基于多路复用体布拉格光栅的大角度光束偏转系统示意图

阵的大角度光束偏转技术,并分析采用液晶相控阵与多路复用体布拉格光栅的级联结构,如图8所示<sup>[17]</sup>。

利用该装置,实验实现了 $0\sim 11.82^\circ$ 的光束准连续、可控偏转,角度分辨率小于 $0.02^\circ$ ,接近衍射极限角。

上述传统的光学相控阵采用周期型结构,因此当其周期远大于光束波长时,会出现衍射级次多,衍射效率低,以及扫描视场窄等缺点。为了克服多级衍射以及视场窄等问题,就必须使液晶相控阵周期接近于光束波长的一半,尽管微加工技术有了长足的进步,然而制作与光波长等量级周期的光学相控阵器件仍有很大的难度,且因为加载电极较多,将使得控制复杂,实际效果较差。

摩托罗拉公司于2000年提出非周期型的光学相控阵(irregular optical phased-array),该结构如图9所示<sup>[29]</sup>。

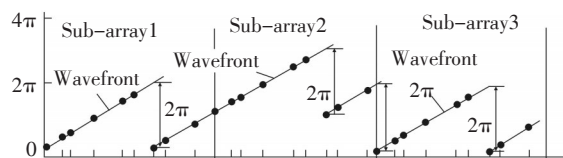


图9 非周期型光学相控阵示意图

仿真结果表明:采用1024单元的光学相控阵,当平均周期为100倍波长,并设定每个单元在平均周期位置点 $\pm 45\%$ 距离内以等概率分布时,光束发生 $2^\circ$ 偏转,且效率接近100%。因此该方法克服了传统周期型光学相控阵在大角度、准连续扫描应用的不足,且具有无衍射旁瓣、衍射效率高,扫描视场大等特点。

宾夕法尼亚州立大学(Pennsylvania state university)Stuart Yin等人于2007年提出低衍射旁瓣的非周期相控阵技术<sup>[30]</sup>。仿真结果表明:与周期型光学相控阵相比,该技术将旁瓣的衍射效率从80%降低到15%,旁瓣的抑制效果较好,且扩大了扫描视场范围,并提高了主瓣效率。

孔令讲课题组于2011年提出基于非周期闪耀光

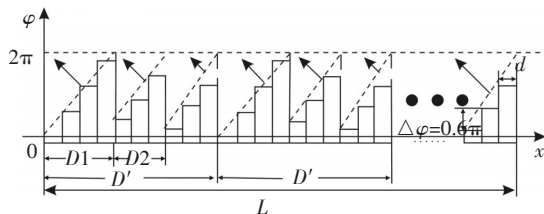


图10 非周期型闪耀光栅的出射波阵面

栅的液晶相控阵方法,该结构如图10所示<sup>[31]</sup>。

仿真结果表明,这种方法较周期闪耀光栅型,可在不降低扫描效率的前提下,极大地增加单片液晶相控阵器件的可分辨扫描角度数量。实验实现了 $0^\circ \sim 1^\circ$ 之间50个角度的均匀扫描,为准连续激光扫描技术提供了一种可行的方案。2012年,该课题组报道了利用液晶光学相控阵实现双光束偏转的实验<sup>[32]</sup>。

以上所述的光学相控阵技术都采用向列相液晶,而向列相液晶具有一些固有缺陷,如:抗恶劣环境差(对温度、压力、加速度敏感,难以忍受强激光)、响应速度慢、有源液晶器件分辨率仍然很难达到与可见光波长相当等,从而在本质上限制了高性能光相移阵列的获得。

Displaytech公司于2009年提出铁电液晶光学相控阵技术,该技术除了具有传统向列相液晶光学相控阵的优点之外,还具有快速响应的能力,响应速度可达微秒量级。当光束波长为 $1.55 \mu\text{m}$ ,折射率差为1.5,相控阵周期为 $5 \mu\text{m}$ 时,扫描视场达 $\pm 9^\circ$ <sup>[33]</sup>。

Kent大学和美国空军研究实验室于2010年联合报道了采用液晶偏心微透镜阵列以实现高效率偏转光束的装置,如图11所示<sup>[34]</sup>。

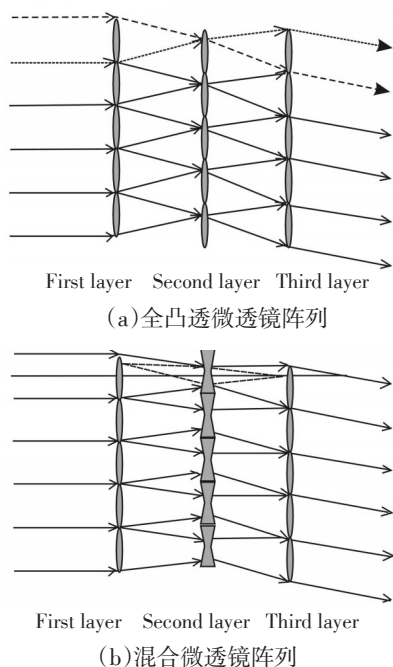


图11 液晶偏心微透镜阵列实现高效偏转光束的装置

该装置是传统微透镜阵列的一种改进,主要区别在于传统的微透镜阵列基于二氧化硅材料,微透镜的结构以及参量都已固定,而液晶微透镜阵列的

参量可随着加载电压的不同而产生变化。液晶偏心微透镜阵列采用了三层微透镜阵列结构。对于全凸微透镜式,每层微透镜的焦距相等,且各层之间的间距均为微透镜的焦距大小,而对于混合微透镜式,微凸透镜的焦距相等,而微凹透镜的焦距则为它们的四分之一,各层之间的间距则为凸透镜焦距的一半。与传统机械式偏心微透镜阵列相比,该装置中的微透镜阵列都是以液晶加载周期型的电压来实现,因此该装置是纯电控装置,可对加载电压进行优化以提高偏转效率,有效规避了机械式的偏移精度较差、控制不够灵活以及偏转效率较低等不足。实验表明:通过适当的加载电压优化,当微透镜的半径为 $552 \mu\text{m}$ ,该装置对 $632.8 \text{ nm}$ 的He-Ne光束在偏转 $1.008^\circ$ 时,衍射效率可从84.2%提高到94.4%,充分实现了高效率光束偏转的效果。通过合理的控制微透镜的尺寸,可以达到大视场、高效率光束偏转的目的。

## 2.2 光波导阵列光学相控阵

日本ATR光通信和射频通信研究实验室于20世纪90年代提出波导阵列的光学相控阵天线技术<sup>[35-37]</sup>。该波导阵列由三根光纤组成,如图12所示<sup>[35]</sup>。

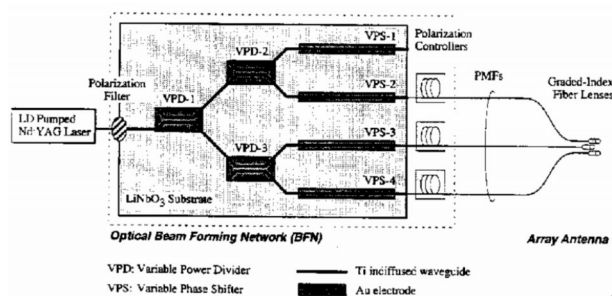


图12 三根光纤所组成的光学相控阵天线

通过控制光束相位,采用相干合成的方法实现了光束的二维空间扫描,并完成了 $0.30^\circ$ 的光束偏转实验。该方法从理论以及实验上证明了光纤波导阵列以实现光束扫描的可行性。

西安电子科技大学石顺祥课题组在光波导光学相控阵领域开展研究较早<sup>[38-40]</sup>,其主要研究基于波导阵列结构的光学相控阵技术,并分析基于光波导光学相控阵技术的理论和实验研究,该阵列波导结构如图13所示<sup>[38]</sup>。

该波导采用GaAs/AlGaAs作为掺杂物,具有响应速度快等特性(高达 $100 \text{ ps}$ )。设计研制十波导的光

波导阵列,获得的最大扫描角度为13.6°,扫描速度为800 Hz,加载电压为8.7 V。

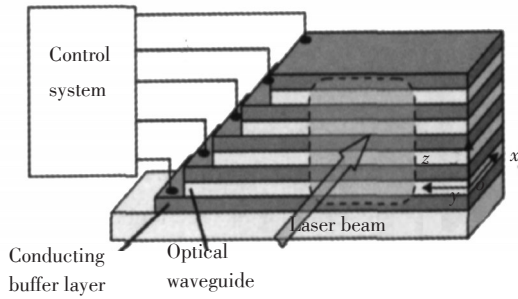
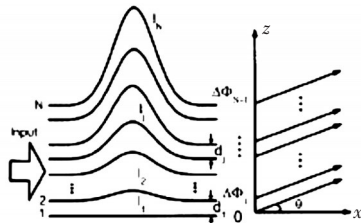


图13 波导阵列结构示意图

北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室徐安士课题组于2005年提出基于非周期分布阵列波导的光学相控阵技术,如图14所示<sup>[41]</sup>。



(a)非周期分布的光波导阵列示意图 (b)光束偏转的计算模型

图14 基于非周期分布阵列波导的光学相控阵技术

该技术避免了周期型光学相控阵技术存在的多旁瓣以及难以制作等困难。该实验室于2008年提出串联非周期阵列波导结构的光学相控阵技术,如图15所示<sup>[42]</sup>。

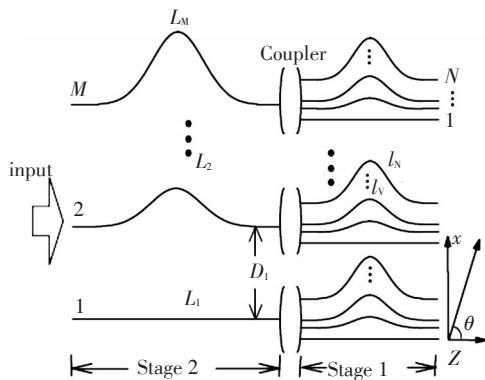
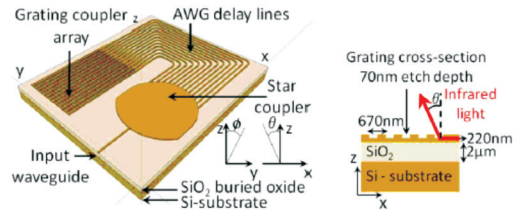


图15 串联非周期阵列波导结构示意图

仿真结果表明,该技术具有扫描视场宽,以及旁瓣抑制好等优点,同年该实验室在绝缘材料硅基片上(silicon on insulator)上制作出16和32单元的非周期光纤波导阵列光学相控阵。实验表明,通过改变光束的波长,光束可以被连续扫描,如:当光波长从1 550.7 nm

变化至1 551.9 nm时,光束从0°偏转到3°<sup>[43]</sup>。

比利时哥根大学(Ghent university)于2011年提出基于硅光子平台的全集成光学器件的光束二维偏转装置,如图16所示<sup>[44]</sup>。

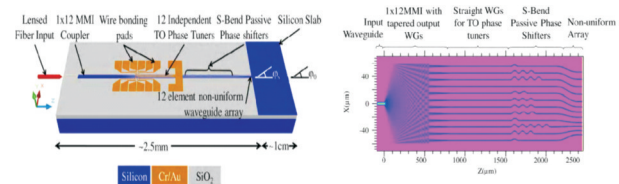


(a)基于硅光子平台的光束二维扫描装置 (b)光栅耦合阵列的横截面示意图

图16 基于硅光子平台的全集成光学器件的光束二维偏转装置

该装置采用光栅耦合阵列结构,确实光波的长从1 550 nm变化到1 600 nm时,其可实现15°×50°视场的扫描。

对于周期型的光纤波导光学相控阵,若要其实现大角度偏转,则必须使其周期小于工作波长的一半,这就会导致在相邻波导之间有很强的耦合效应。为了克服最大偏转角度与周期型光波导之间的间距,德克萨斯大学(University of Texas)于2011年提出了非周期型阵列波导结构。该阵列为1×12结构,如图17所示<sup>[45]</sup>。



(a)阵列波导光学相控阵示意图 (b)波导阵列示意图

图17 非周期型1×12结构阵列波导结构

该装置的宽度为60 μm,长度为553.4 μm。输入以及输出的波导宽度为2.6 μm。该器件的扫描速度为100 kHz,对1 550 nm光束可偏转31.9°。

### 2.3 电光晶体光学相控阵

电光晶体光学相控阵技术可采用铌酸锂晶体,该方法可实现光束的准连续扫描。1973年,Ninomiya制作了基于铌酸锂晶体的电光偏转棱镜一维光学相控阵扫描器件。该器件采用楔型棱镜顶角互补放置的方式以实现光束的高分辨率扫描。实验结果表明:当该装置加载600 V电压时,可实现50个离散角

度的扫描功能<sup>[46]</sup>。

1995年,Thomas等人研制了基于PLZT电光陶瓷的光学相控阵器件<sup>[47]</sup>。基于电光陶瓷的光束偏转器件具有结构紧凑、质量小、能耗低、价格低以及偏转速度快等优点。电光陶瓷的电光系数是铌酸锂、钽酸锂等材料的10倍左右。因此基于电光陶瓷的光束扫描技术比传统的电光晶体更具优势。

成都电子科技大学于2007年综述了光学相控阵的发展背景,对不同电光材料铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)、碲化镓铝(AlGaAs)、锆钛酸铅(PLZT)陶瓷和液晶制作的光学相控阵进行了阐述<sup>[48]</sup>。

中国科学院上海光学与精密机械研究所于2008年提出基于掺镧锆钛酸铅(PLZT)电光材料的光学相控阵光束扫描器,该扫描原理如图18所示<sup>[49]</sup>。

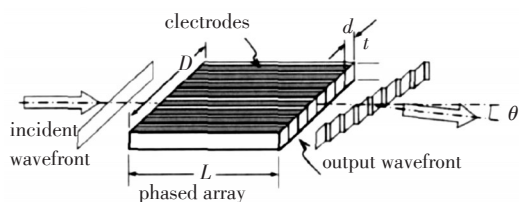


图18 光学相控阵光束扫描基本原理示意图

该器件的阵列周期为300 μm,通光孔径为130 μm,厚度为1 mm,周期数为8,总宽度为2.4 mm。所加电压为560 V时,光束偏转了1.81 mrad。

该研究所于2010年提出利用高速电光晶体开关阵列数字光束扫描技术器。该光束扫描器由电光分束单元和偏转棱镜阵列构成,如图19所示<sup>[50]</sup>。

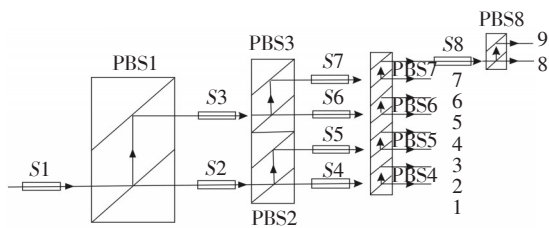


图19 光束扫描器系统结构示意图

图19中S1~S8为电光开关,PBS1~PBS8为偏振分束棱镜。电光分束单元是通过铌酸锂电光开关与偏转分光棱镜的组合实现。但其扫描时间为10 ms,扫描视场范围只有1.5×1.5°,通光口径只有5 mm,且加载电压高达1 900 V。因此还远不能满足星载平台的使用。

## 2.4 电湿调制光学相控阵

Cincinnati大学和Dayton大学于2006年联合提出电湿微棱镜技术(electrowetting microprisms)。该技术采用对液体接触角电湿调制的方法,实现对传统棱镜结构的模拟,以达到光束偏转的目的,该装置如图20所示<sup>[51]</sup>。

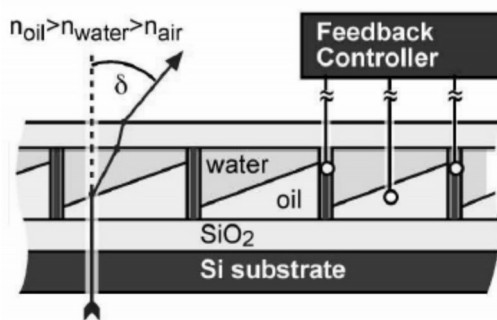


图20 电湿微透镜技术示意图

该方法的核心思想是采用电湿技术以实现“各种不同顶角的微棱镜”以实现光束连续扫描的效果。其具有偏转速度快、偏振无关、偏转效率高以及光束可聚焦等特性。扫描视场与液体的折射率相关,如折射率为1.359时,扫描视场为±7°,当折射率为1.6时,扫描视场可达±15°。

## 2.5 热光调制光学相控阵

热光弹性材料,polydimethylsiloxane(PDMS)聚二甲基硅氧烷被用作相位变化媒质。它的折射率与温度相关,将其沉积在闪耀光栅上,可以通过温控来实现光束的扫描,其装置如图21所示<sup>[16]</sup>。

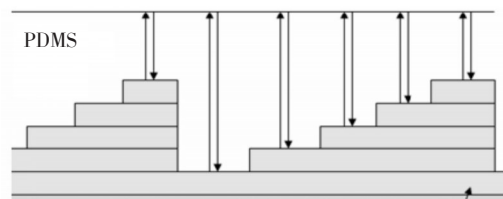


图21 基于PDMS光束偏转装置的横截面示意图

该技术避免了液晶相控阵的弥散场效应(fringing field effect),且价格便宜,易于制作成大面积,并可实现宽视场、离散角度的光束扫描。实验表明:当温度从20 °C变化到200 °C时,该方法可以实现1.2°

的光束偏转。

综上,纯电控非机械式的光学扫描方式主要采用光学相控阵技术。根据是否需要波束成形,光学相控阵可分为波束成形光学相控阵和非波束成形光学相控阵两类,其中光波导阵列光学相控阵为波束成形方式,该技术和微波相控阵技术类似,需同时实现波束成形以及波束扫描两个功能。而非波束成形光学相控阵技术可直接实现光束扫描,因此结构比波束成形方式简单、易于控制实现。

### 3 前景与展望

通过以上分析,可以得出纯电控光学相控阵是当前实现光束扫描的主流技术。宽视场、高精度、快响应、高效率是光学相控阵扫描方式所追求的技术指标,宽视场意味着要能实现大角度的光束扫描,因此当其实际应用于高速空间光通信时,还需要考虑在大角度偏转条件下,光学相控阵对脉冲信号的色散特性,这对于分析系统的误码率,以及能否工作于高速空间光通信至关重要。

#### 参考文献

- [1] 孔令讲,易伟,杨建宇,等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1080-1085.
- [2] M A Arain, N A Riza. High-beamforming power-code-multiplexed optical scanner for three-dimensional displays[C]// Proc. of SPIE, 2003, 5243: 59-64.
- [3] 刘伯晗,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.
- [4] P F McManamon, T A Dorschner, D L Corkum, et al. Optical phased array technology[J]. Proc. of IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [5] 刘才明. 激光大屏幕显示系统中振镜扫描的工作原理及图像失真研究[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 263-266.
- [6] T H Chao, H Zhou, G Reyes, et al. High-speed high density holographic memory using electro-optic beam steering devices[C]//Proc. of SPIE, 2002, 4803: 70-73.
- [7] B Winker, M Mahajan, M Hunwardsen. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 3: 1702-1708.
- [8] Hamdam Nikkhah, Karel Van Acoleyen, Roel Baets. Beam steering for wireless optical links based on an optical phased array in silicon[J]. Ann. Telecommun. 2013, 68: 57-62.
- [9] P F McManamon, P J Bos, M J Escuti, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. Proc. of IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [10] K E Peterson. Silicon as a mechanical material[J]. Procs of IEEE, 1982, 70(5): 420-457.
- [11] S Kim, G Barbastathis, H L Tuller. MEMS for optical functionality[J]. Journal of Electroceramics, 2004, 12: 133-144.
- [12] L Wu, S B Maley, S R Dooley, et al. A large-aperture, piston-tip-tilt micromirror for optical phase array applications [C]//MEMS 2008 of IEEE, Tucson, AZ, USA, 2008: 754-757.
- [13] WU Lei. A tip-tilt-piston micromirror array for optical phased array applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(6): 1450-1461.
- [14] ZHENG Yi, WANG Xiao-hua, DENG Li, et al. Arbitrary phasing technique for two-dimensional coherent laser array based on an active segmented mirror[J]. Applied Optics, 2011, 50(15): 2239-2245.
- [15] 翟荣辉,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.
- [16] M T Johnson. Thermally activated, variable blazed grating for coherent beam steering[D]. Air force institute of technology, 2007.
- [17] 邹永超. 基于液晶相控阵的大角度光束偏转技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [18] R A Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalite crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613-616.
- [19] 闫爱民,职亚楠,孙建锋,等. 光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48: 102801-1-6.
- [20] Roy M Matic. Blazed phase liquid crystal beam steering[C]// Procs. of SPIE, 1994, 2120: 194-205.
- [21] Terry A Dorschner, Lary J Friedman, Michael Holz, et al. An optical phased array for lasers[C]//Proc. of the IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996: 5-10.
- [22] Paul McManamon. An overview of optical phased array technology and status[C]//Proc. of SPIE, 2005, 5947: 594701.
- [23] Sajjad A Khan, Nabeel A Riza. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals [J]. Optics Express, 2004, 12(15): 868-881.
- [24] 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.
- [25] XU Lin, ZHANG Jian, WU Li-ying. Influence of phase delay profile on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41:



- 509–516.
- [26] 张健,方运,吴丽莹,等. 液晶光束偏转技术[J]. 中国激光,2010,37(2):325–334.
- [27] KONG Ling-jiang, ZHU Ying, YANG Jian-yu. A new method of scanning angles screening of liquid crystal phased array component[J]. IEEE, 2009.
- [28] KONG Ling-jiang, ZHU Ying, SONG Yan, et al. Beam steering approach for high-precision spatial light modulators[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1085–1089.
- [29] Tom Y Zhu. Irregular virtual optical phased-array[C]//Proc. of SPIE,3951:61–72.
- [30] Stuart Yin, Jae Hun Kim, FEI Wu, et al. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique[J]. Optics Communication, 2007, 270: 41–46.
- [31] 孔令讲,朱颖,宋艳,等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. 光学学报, 2011,31(1): 0123001–1–6.
- [32] PAN Fei, KONG Ling-jiang, YANG Xiao-bo, et al. Dual beam deflection of liquid crystal optical phased array[J]. Chinese Optics Letters, 2012, S20502.
- [33] David Engström, Michael J O'Callaghan, Chris Walker, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1721–1726.
- [34] SHI Lei, SHI Jian-ru, Paul F McManamon, et al. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light[J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 409–421.
- [35] K Inagaki, Y Karasawa. Fiber-type optical phased array antenna—two dimensional beam steering and coherent power combining[C]//IEEE: Antennas and propagation, 1995: 1–8.
- [36] Keizo Inagaki, Yoshio Karasawa. Ultra-high-speed optical beam steering by optical phased array antenna[C]//Procs. of SPIE, 1996, 2699: 210–217.
- [37] Keizo Inagaki, Yoshio Karasawa. Three-element fiber-type optical phased array antenna with high-speed two dimensional optical beam steering[J]. Electronics and Communications in Japan, 1999, 82(8): 42–51.
- [38] 李家立. 光波导光学相控阵技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [39] 梁华伟,石顺祥,李家立. 新型电光扫描器中光波导阵列特性研究[J]. 光子学报,2006, 35(11): 1654–1658.
- [40] 梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
- [41] FENG Xiao, HU Wei-wei, XU An-shi. Optical phased-array beam steering controlled by wavelength[J]. Applied Optics, 44(26), 2005:5429–5433.
- [42] FENG Xiao, LI Guang-yuan, XU An-shi. Cascade arrangement of irregular optical phased arrays[J]. Optics Communication, 2008, 281: 1945–1949.
- [43] FENG Xiao, LI Guang-yuan. Fabrication of irregular optical phased arrays on silicon-on-insulator wafers[J]. Optics Letters, 2008, 47(4): 140503–1–3.
- [44] Karel Van Acoleyen, Wim Bogaerts, Roel Baets. Two dimensional dispersive off-chip beam scanner fabricated on silicon-on-insulator[J]. IEEE photonics technology letters, 2011, 23(27).
- [45] David Kwong, Amir Hosseini, YANG Zhang, et al.  $1 \times 12$  unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99: 051104–1–3.
- [46] Y Ninomiya. Ultrahigh resolving electro-optic prism array light deflector[J]. IEEE Quantum Electron., 1973, 9(6): 791–795.
- [47] J A Thomas, M Lasher, Y Fainman, et al. A PLZT-based dynamic diffractive optical element for high speed, random access beam steering[C]//Proc. of SPIE, 1997, 3131: 124–132.
- [48] 梁鸿秋,杨传仁,张继华,等. 电光材料在光学相控阵技术中的应用[J]. 电工材料,2007(2):32–39.
- [49] 董作人,叶青,瞿荣辉,等. 基于掺镧锆钛酸铅电光材料的光学相控阵光束扫描器[J]. 中国激光,2008,35(3): 373–377.
- [50] 职亚楠,闫爱民,舒嵘,等. 高速电光晶体开关阵列数字光束扫描器[J]. 光学学报,2010, 30(12): 3430–3434.
- [51] Neil R Smith, Don C Abeysinghe, Joseph W Haus, et al. Agile wide-angle beam steering with electrowetting microprisms[J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6557–6563.