

·光电系统·

光学相控阵技术进展及其应用

李曼, 许宏

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要:介绍了光学相控阵技术的发展背景和工作原理,研究了国内外基于不同电光材料(钽酸锂、PLZT、AlGaAs和液晶)光学相控阵技术的进展,探讨了光束扫描(指向)控制存在的扫描机械问题及光学相控阵具有的功能优势,针对光学相控阵器件的现状,提出了光学相控阵材料技术的研究方向及光学相控阵技术的应用前景。

关键词:光学相控阵技术;电光材料;激光雷达

中图分类号:TN213

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)05-0008-03

Progress and Application of Optical Phased Array Technology

LI Man, XU Hong

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: The development background and working principle of optical phased array technology are introduced. The progress of optical phased array technology with different electro-optic materials (lithium tantalate, PLZT, AlGaAs and liquid crystal) at home and abroad is summarized. The problem of the mechanical scanning in the beam scanning control and the functional advantage of the optical phased array are discussed. Aiming at the status of optical phased array devices, the research direction for the technology of the optical phased array materials and the application prospect of the optical phased array technology are proposed.

Key words: optical phased array technology; electro-optic material; lidar

光学相控阵技术^[1],利用其工作材料的电光特性,实现光束指向的电控非机械控制,且可通过模块复用,实现大功率、多波束扩展。在激光雷达、激光打印、空间光通信等军用及民用领域具有广阔的应用前景^[2]。

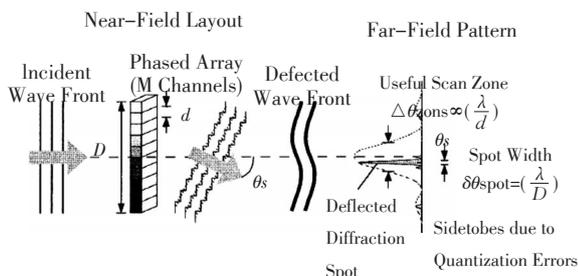


图1 光学相控阵工作原理示意图

1 光学相控阵技术基本原理

光学相控阵名称的由来是源于微波相控阵技术,但又与微波相控阵不同,是一种新型的光束指向控制技术^[3-6]。称其为光学相控阵,是因为光学相控阵器件是由若干个相控阵单元组成,每个相控阵单元都以电光材料作为工作物质,利用电光材料的电控双折射特性,通过改变加载在不同单元的电压,进而可以改变通过不同单元光波的光学特性,如相位、光强等,实现对每个单元光波的独立控制,通过调节从各个相控单元辐射出的光波之间的相位关系,在设定方向上产生相互加强的干涉,干涉的结果是在该方向上产生一束高强度光束,而在其他方向上从各相控单元射出的光波彼此相消,从而实现光束的偏转。

设光学相控阵为 M 个间距为 d 的相控阵单元构成的一维阵列(如图1),相邻单元之间具有相同的相位差,以零号单元为参考相位时,其他相位的变化与坐标成正比。若光束将偏转 θ 角度,相邻单元的相位差为 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$, 则第 i 号单元的相位为 $\phi_i = \frac{2\pi(i-1)d}{\lambda} \sin \theta$, λ 是入射光的波长。分别控制每个单元的相位来调整相位波前,从而达到控制入射光束的偏转。

设入射光为等幅单色光束,不同单元发射光束的复振幅分布为

$$\begin{aligned} U_1(t) &= |U| \exp(j\phi_1) \exp(j\omega t) \\ U_2(t) &= |U| \exp(j\phi_2) \exp(j\omega t) \\ &\dots \end{aligned} \quad (1)$$

忽略时间因子,只考虑合成后振幅和光强,平行光通过 M 个单元的相控阵后的合振动为

$$U(\theta) = |U| \sum_{i=0}^{M-1} \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} id \sin \theta) \quad (2)$$

光强分布为

$$I = U(\theta) \times U^*(\theta) = |U|^2 \frac{\sin^2[\pi(d/\lambda)M \sin \theta]}{[\pi(d/\lambda) \sin \theta]^2} \quad (3)$$

当 θ 角比较小时,光强分布可近似表示成 $\sin x/x$ 的形式

$$I = |U|^2 \frac{M^2 \sin^2[\pi(\alpha/\lambda) \sin \theta]}{[\pi(\alpha/\lambda) \sin \theta]^2} \quad (4)$$

式中,有效口径为 $\alpha = Md$, 此时波瓣仅有一个最大值,而且不重复出现。

在相控阵中,控制加在每个相控阵单元两端的电压,根据双折射效应,可以对相位波前经行调整,从而达到控制波束的目的。

2 基于不同工作材料光学相控阵技术的研究进展

自从20世纪60年代微波相控阵技术问世以来,人们就试图将相控阵的概念延伸到光波频段,但由于光波波长较微波波长短得多,因而相应器件的单元尺寸很小,为光波长量级,制造工艺难度非常大。直到1972年,随着制造工艺的进步, Meyer用钽酸锂移相器制成了第一个一维光学相控阵^[7]。它由46个光移相器组成,每个光移相器由独立的电极控制,进而实现对光束的相位控制。基于该实验装置,验证了光学相控阵技术的基本理论,为光学相控阵技术

的发展奠定了基础。

1995年,美国加州大学圣迭戈分校的Thomas提出了基于压电陶瓷PLZT的光学相控阵^[8]。PLZT是一种透明的压电陶瓷,在外加电场的作用下,其折射率的变化与电场强度 E 的平方成正比。根据报道^[9], Thomas的装置以350 μm 厚的PLZT晶片为工作物质,有32个单元,孔径大小为12.8 mm \times 10.0 mm,工作波段从可见光到近红外,响应速度高达1 μs 。该光学相控阵采用表面电极结构,如图2,全波电压($V_{2\pi}$)为318 V,单个相位调制器的宽度为40 μm ,相邻相位调制器中心距约为400 μm ,有效占空比为10%,扫描角度被限制在0.1°。由于其扫描角度小及驱动电压高等缺点,使得该装置离实际应用还有很大距离。

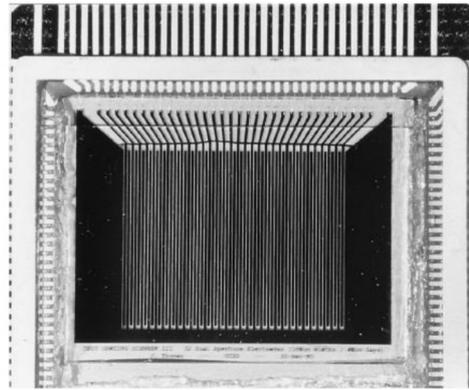


图2 已封装的基于PLZT的32单元光学相控阵

波导光学相控阵是利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术外延生长的一维等间距、单模的P-I-N型光波导构成的,以本征半导体GaAs为光波导芯层,掺杂半导体层AlGaAs为光波导包层。同时,光波导包层外加电压起到电极层的作用。1993年, Vasey等人设计了具有43单元锯齿状电极结构的AlGaAs波导基光学相控阵^[10],如图3所示。光波通过一个光栅耦合器输入到波导介质中,再通过另一个光栅耦合器进行输出。工作在900 nm波长时的最大偏转角度为 ± 7.2 mrad,全波调制电压小于-8.5 V。

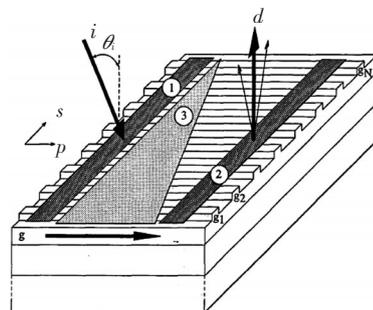


图3 AlGaAs基波导光学相控阵

1996年,美国空军研究实验室(air force research laboratory, AFRL)的McManamon等人详细报道了液晶基光学相控阵技术的相关理论及研究进展^[11]。报道指出,早在1991年,雷声(Raytheon)公司就制作出了液晶光学相控阵列芯片(如图4)并采用多级控制方式实现了波束偏转。该阵列孔径为4 cm×4 cm,多达43 000个相位调制器,分成168个子阵列,每个子阵列含256个相位调制器。阵列工作波长为1.06 μm,可以实现±2 mrad角度范围内的精确波束指向偏转。



图4 雷声公司制作的一维液晶光学相控阵芯片

2005年, Rockwell Scientific 公司设计、制作了孔径大小为4 cm×4 cm的透射式一维光学相控阵^[12],其工作波长为1.55 μm,单元间距为8 μm,共5 120个单元,扫描角度超过2.5°,有4个1 cm×4 cm的独立寻址区,如图5。级联两个一维光学相控阵可以实现二维扫描。

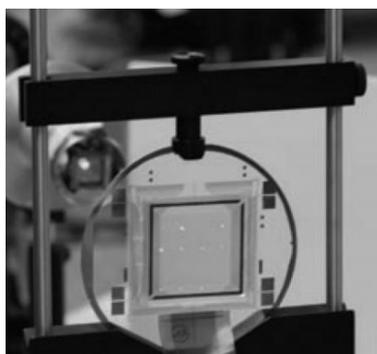


图5 Rockwell公司4 cm×4 cm透射式光学相控阵

自20世纪末起,美国就对将光学相控阵技术应用于军事领域产生了浓厚的兴趣,进行了巨大的投入。国防先进研究计划局(DARPA)先后启动了“灵巧控制光束”项目(STAB)和“自适应光学锁相元件”项目(APPLE),进行基于光学相控阵技术的激光武器方面的研究。其中,“自适应光学锁相元件”(AP-

PLE)项目,以雷声公司为主要参与单位,主要研究目标是通过灵巧的多模块集成(单一模块如图6所示)实现相干、全电子波束合成及控制。这是一种将低功率模块综合成高功率激光器的可行途径,可以用于激光雷达、激光目标指示、激光通信以及武器级激光器等多种领域。其中的光学相控阵器件可以进行方位和俯仰的区域选择及区域填充功能。该器件工作在1.06 μm,光束直径为1.2 cm,光束发散角为105 μrad,可在4 ms回转时间内实现45°的关注区域。

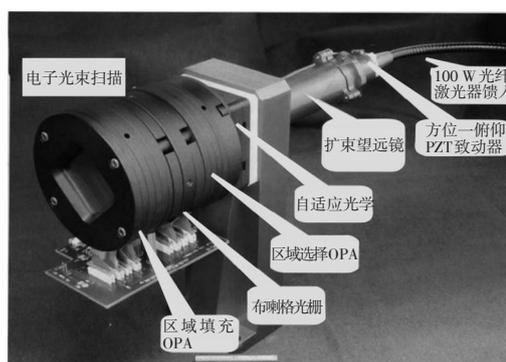


图6 自适应光学锁相元件(APPLE)单一孔徑

国内对光学相控阵的研究深度和研究规模相对滞后一些,但近些年,随着光学相控阵在美国的广泛应用,国内一些研究机构也逐渐开始对光学相控阵材料及器件开展研究,进行了一些基于理论和实验的研究,有些还进行了器件的初步制备。如长春理工大学,哈尔滨工业大学,西安电子科技大学等。

3 光学相控阵技术的应用及其展望

目前光束扫描(指向)控制技术主要存在以下问题:

(1) 扫描的准确、稳定性必须要求快速精确的机械转动,需要机械部分要有精密、坚固的机械结构,然而机械结构的高标准要求就会导致系统庞大的体积和复杂的电路控制,进而造成了整个系统的庞大质量。

(2) 由于机械扫描部件的控制电路趋于复杂,大多数的机械扫描系统响应速度较慢,扫描精度较低。

光学相控阵作为一种新的光束扫描器件,采用非机械电控扫描的光束指向控制方式,与机械偏转器、声光偏转器相比具有结构简单、质量轻、高稳定

(下转第41页)

- (4):111-113.
- [3] 陶洪久,柳键,田金文. 基于小波变换和数学形态学的遥感图像边缘检测[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 154-157.
- [4] 陈凡武. 彩色图像边缘检测的新方法——广义模糊算子法[J]. 中国科学(A辑), 1995, 25(2):219-220.
- [5] Pietro, Malik. Scale-Space and Edge Defection Using Anisotropic Diffusion[J]. IEEE, 1990, 12(7):98-100.
- [6] Chars Minghua, Lee David. Residual analysis for Feature DeCectipn[J]. IEEE Trans on Patt and Mmach Intelligence, 1991, 13(1):30-35.

- [7] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法与运用[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [8] 秦琴,滕奇志,罗代升,等.一种改进的SPIHT图像编码算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2007, 44(3): 525-530.
- [9] 苏红旗,吕萌,谈芳,等. SPIHT图像编码算法研究及改进[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2009, 28(6):51-54.
- [10] 刘志俭. Matlab应用程序接口用户指南[M]. 北京:科学技术出版社, 2000.
- [11] 谢用华,傅德胜. VC++和Matlab混合编程在图像处理中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(2): 120-121.

(上接第10页)

性、随机角度偏转、动态实时控制的特点,同时兼备高分辨率、高准确度、电控可编程多光束控制等功能优势。

由于光学相控阵具有上述优点,现逐渐应用于军用及民用领域。军用方面,包括激光雷达、激光制导、导弹拦截、激光通信、激光定向能等领域。民用方面,可用于激光显示、激光照排、激光打印、空间光通信等领域,可带来巨大的经济效益及社会效益。

当然,光学相控阵技术也存在一些问题。由于光波长较短,决定了光学相控阵器件的单元尺寸很小,工艺难度很大,现阶段制作成本很高;此外,电场的边缘效应及光学衍射效应使得现有器件的光学效率偏低。解决这些问题,未来的光学相控阵技术应主要着重以下2个角度的研究:器件方面,进一步发展微机电技术和系统,减小相控阵单元尺寸,提高衍射效率,减小器件尺寸;更为根本的材料研究方面,除开发快速响应液晶材料外,还应开发工作中波红外、长波红外、紫外波段的液晶材料,以及继续寻求具有大双折射、响应速度快、热稳定性高、耐强激光的高性能电光材料,同时发展对中长波和紫外波段具有较好透过率的电光材料,以扩展光学相控阵器件的应用领域。

4 结论

光学相控阵技术是一种可编程电控、非机械、实时、模块化的光束指向控制技术,通过控制不同单元材料的电特性控制不同单元光波的光学特性,实现光束的指向控制。文中介绍了光学相控阵技术的产生背景和基本原理;国内外基于不同电光材料光学相控阵技术的研究进展以及光学相控阵技术的应用

前景。

参考文献

- [1] 倪树新.新体制成像激光雷达发展评述[J]. 激光与红外, 2006,36(增刊):732-736.
- [2] 梁鸿秋,杨传仁.电光材料在光学相控阵技术中的应用[J]. 电工材料,2007,2:32-34.
- [3] 徐林,张健,吴丽莹.液晶光学相阵列相移单元的电压-相移特性[J]. 红外与激光工程, 2007,36(6):932-935.
- [4] P F McManamon.An overview of Optical Phased Array Technology and Status[C]//Proc.SPIE,2005,5947: 1-10.
- [5] Bin Wang,Guoqiang Zhang.Stressed Liquid-crystal Optical Phased Array for Fast Tip-tilt Wavefront Correction.Appl. Opt.,2005,44(36):7754-7759.
- [6] A Linnernberger,S Serati, J Stockley. Advanced in Optical Phased Array Technology[C]//Proc.SPIE,2006, 6304:1-9.
- [7] R A Meyer.Optical Beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J].Appl.Opt.,1972,11(3): 613-616.
- [8] James A Thomas,Yeshaiahu Fainman.Programmable diffractive optical element using a multichannel lanthanum-modified lead zirconate titanate phase modulator [J]. Optic.letter, 1995,20:1510-1512.
- [9] J A Thomas,Y Fainman.Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors [J]. Appl. Opt.,1998,37(26):6196-6212.
- [10] F Vasey, F K Reinhart, R Houdre, et al.Spatial beam steering with an AlGaAs integrated phased array [J]. Appl.Opt., 1993,32(18):3220-3232.
- [11] Paul F Mcmanamon.Optical Phased Array Technology[J]. IEEE,1996,84(2):268-298.
- [12] Yu-Hua Lin, Milind Mahajan.Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[C]//Proc.of SPIE,2005, 5892: 58920C-1-58920C-10.