

文章编号: 0258-7025(2008)12-1861-07

# 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展

瞿荣辉 叶青\* 董作人 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 综述了基于电光材料的光学相控阵(OPA)的研究进展。介绍了光学相控阵技术的基本原理以及不同电光材料(铌酸锂电光晶体, AlGaAs 光波导, 液晶和掺镧锆钛酸铅(PLZT)电光陶瓷)光学相控阵技术的基本构想和涉及的关键技术;着重介绍近年来基于 PLZT 电光陶瓷材料光学相控阵技术的发展情况以及在这方面的最新研究成果,包括单级相控阵、级联相控阵、不同电极结构(表面电极和上下电极结构)相控阵技术等;最后简要介绍了光学相控阵技术在激光雷达等军事领域中的应用。

**关键词** 光学器件;光学相控阵技术;电光材料;激光雷达系统

**中图分类号** TH 74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1861

## Progress of Optical Phased Array Technology Based on Electro-Optic Material

Qu Ronghui Ye Qing Dong Zuoren Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Progress of optical phased array (OPA) technology based on electro-optic material is summarized. The basic principle is introduced and the basic structure and key techniques of OPA are reviewed with different electro-optic materials, including LiNbO<sub>3</sub>, AlGaAs waveguide, liquid crystal and lead lanthanum zirconate titanate (PLZT) ceramic and so on. The development of OPA based on PLZT electro-optic ceramic material is reviewed emphatically, and the latest achievements in the areas, such as single-stage OPA, cascaded OPA, and OPAs with surface electrodes and up-down electrodes are listed. The applications of OPA in laser radar are also introduced briefly.

**Key words** optical devices; optical phased array technology; electro-optic material; laser radar system

## 1 引言

光学相控阵(OPA)技术<sup>[1]</sup>在军用和民用光束扫描方面具有广阔的应用前景,除了在激光显示、激光通信和激光照排等方面外,最重要的应用是相控阵激光雷达、空间激光通信等军事应用领域。传统的光束扫描通常是采用一个转镜或振镜来实现的。这种采用机械运动的方法光损耗小,扫描范围大和结构简单,但是其扫描速度和精度相对较低。为了提高光束扫描速度,减小器件的体积重量,适应空间等特殊领域应用的需要,人们正在对光学相控阵技术进行深入的研究。光学相控阵是一种使光束波面的光学相位产生周期性调制的光学器件。当相位调

制器阵列的各个调相单元获得一个在空间上线性分布随时间变化的相位时,将使光束波面在空间发生偏转,产生远场干涉光束扫描的效果。在这一技术中,通常是利用材料的电光效应来实现单元光束相位面的改变,没有机械运动部件,因此可以获得很高的扫描速度和精度。

目前,光学相控阵技术的研究主要采用液晶<sup>[1~5]</sup>、电光晶体(如 LiNiO<sub>3</sub>)<sup>[6~8]</sup>、半导体波导(如 AlGaAs/GaAs)<sup>[9~12]</sup>和高电光系数的掺镧锆钛酸铅(PLZT)电光陶瓷<sup>[13~15]</sup>等材料,由于受加工工艺的限制,光学相控阵技术尚不能满足实际工程应用发展的需要,它正处于快速发展的阶段。尽管如此,光

收稿日期:2008-07-03;收到修改稿日期:2008-08-03

基金项目:国家自然科学基金(60577036,60807020)和中国科学院知识创新工程(2007-T-1)资助项目。

作者简介:瞿荣辉(1972—),男,湖北人,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件及半导体激光领域的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: yeqing@siom.ac.cn

学相控阵技术不仅使低成本的相控阵激光雷达系统成为可能,而且它还将在目标捕获、高精度跟踪/瞄准、高分辨率成像和自适应光学系统等方面展现广阔的应用前景。无论是在提高现有的光电探测系统性能方面,还是研制全新的光电跟踪探测系统,特别是一体化多功能光电探测系统方面,光学相控阵技术都将产生革命性的影响,其发展前景十分光明。本文综述了基于电光材料的光学相控阵的研究进展;简要地介绍了不同电光材料的光学相控阵技术的基本构想和涉及的关键技术。

## 2 基本原理

光学相控阵的原理类似于棱镜使光束发生偏转的工作原理,如图 1(a)所示。由于棱镜的折射率大于空气的折射率,光在棱镜中的传播速度会变慢,棱镜从薄端到厚端对光的延迟作用逐渐加强,使通过棱镜的光束相位面发生倾斜,从而使通过棱镜的光束发生偏转。光学相控阵一般由  $M$  个相控单元组成,如图 1(b)所示。通过控制每个相控单元对输入光束的相位延迟量,使输出光束的相位面相对于输入光束的相位面发生倾斜,从而使输出衍射光束在远场发生干涉偏转。

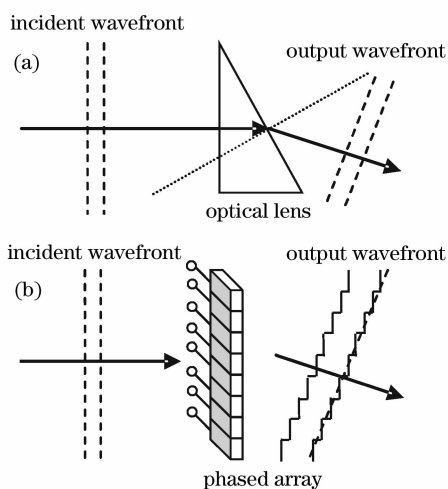


图 1 光学相控阵基本原理图

Fig. 1 Basic scheme of OPA

通常来说,可以将光学相控阵列看作是透射光栅,理论基础是夫琅禾费多缝衍射,如图 2 所示<sup>[13]</sup>。其光束扫描原理为:通过调节从各个相控单元输出的光波之间的相位关系,使其在某一设定方向上彼此同相,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输出的光波都不满足彼此同相的条件,干涉

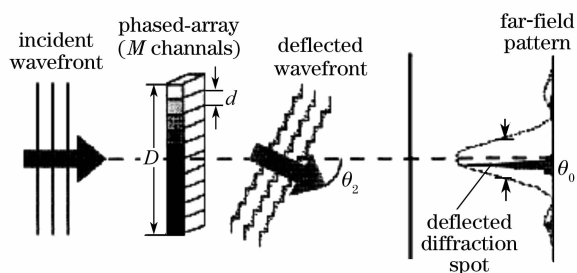


图 2 一维光学相控阵移相扫描原理图

Fig. 2 Basic scheme of one-dimensional (1D) OPA

的结果彼此相抵消,因此,辐射强度接近于零。

光学相控阵无论采用何种材料,一般都采用电压驱动的方式,相控单元的相位延迟量与电压或电压的平方(电光晶体的二次电光效应)成正比。为获得大角度的光束角度偏转,相控阵需要很高的驱动电压来产生大角度偏转所需要的光程差,驱动控制电路一般很难满足这样的要求,所以一般采用相位折叠的方法,这主要根据光波是一种正弦波,其周期为  $2\pi$ ,采用相控单元的相移量对  $2\pi$  求余数,可控制每个调相单元所控制的相位延迟量在一个  $2\pi$  范围内,如图 3 所示,粗短线为产生光束偏转的经过折叠的三角波相位轮廓,这样相控阵的驱动电压是在实现  $2\pi$  相位延迟的驱动电压的范围内,而不是无限增加,从而更好地满足实际应用的需求。

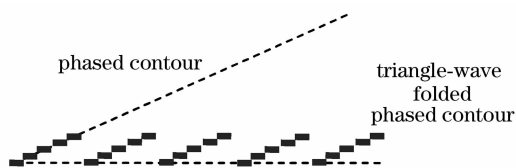


图 3 相位轮廓和经过折叠的相位轮廓

Fig. 3 Phased contour and folded phased contour

## 3 不同电光材料的光学相控阵技术

### 3.1 LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体

自从 20 世纪 60 年代微波相控阵技术问世后,人们就试图将相控阵的概念延伸到光波频段,但由于光波长较微波波长短得多,因而相应器件的制造工艺难度非常大。直到 1971 年,R. A. Meyer<sup>[3,6]</sup>用 LiNbO<sub>3</sub> 移相器制成第一个一维光学相控阵,它由 46 个阵列单元组成,每个单元都有独立的控制电极,以实现光束的相位控制,验证了光学相控阵的基本概念,如图 4 所示。随后在此基础上,Y. Ninomiya<sup>[7,8]</sup>进一步提出了一维电光棱镜型相位调制阵列,其精度较单个电光棱镜来说角扫描的精度提高了  $N$  倍,从而首次实现了在  $\pm 600$  V 的应用电

压下 50 个独立点的角度分辨,如图 5 所示。这些早期的光学相控阵技术从原理上较为清楚地阐述了光学相控阵的定义,显示了对光束高精度、高速度的操控;然而由于相对较大的相移器间隔、小的孔径填充因子和大的插入损耗等阻止了这种光学相控阵技术向高性能和实用化方向的发展。

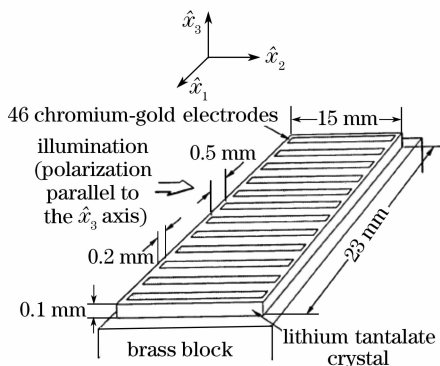


图 4  $\text{LiNbO}_3$  的光学相位调制阵列

Fig. 4 Multichannel lithium tantalate phase modulator

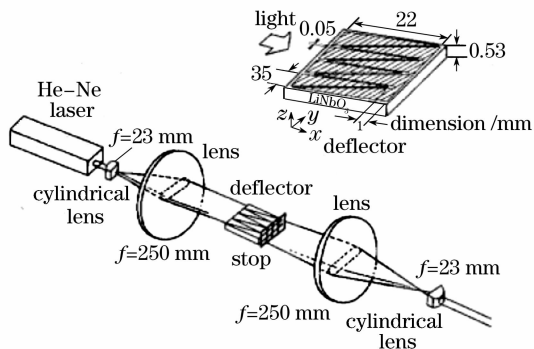


图 5 基于电光棱镜的  $\text{LiNbO}_3$  光学相位调制阵列

Fig. 5 Multichannel lithium tantalate phase modulator based on electro-optic prism

### 3.2 AlGaAs 光波导

1991 年 D. P. Wight 等<sup>[9]</sup>根据相控阵技术的原理设计了由 AlGaAs 光波导材料构成的一维光学相控阵光束扫描器。光波导阵列是利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术沿着 AlGaAs 晶体的(001)方向外延生长的,本征半导体层构成了光波导芯层,掺杂半导体层为光波导包层,并且因光波导包层外加电压而起到电极层的作用。这种新型光波导阵列电光扫描器件是基于光波导中晶体的电光效应实现激光束快速可控空间扫描的。通过独立的对每个相位调制单元的控制,实现了在 30 V 的应用电压下远场光束  $20^\circ$  较大角度的扫描,如图 6 所示。之后不久,F. Vasey 等<sup>[10]</sup>提出了 43 个脊形 AlGaAs 集成光波导调相阵列,它通过一个光栅耦合器将输入的光束耦合进入一个锯齿状电极的波导介质层内,

然后再通过另一个光栅耦合器输出,从而在利用较少控制线的条件下实现了光束的连续扫描。但是这种波导相控阵技术具有较大的光学传输损耗,通常它可以达到 20 dB/cm,这个缺点随着相关制作工艺的发展将可以逐渐地得到改善。

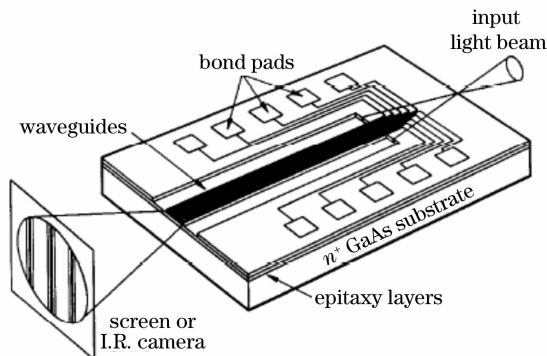


图 6 基于 AlGaAs 光波导的光学相位调制阵列

Fig. 6 Multichannel phase modulator based on AlGaAs optical waveguide

### 3.3 液晶

随着相关技术的发展,近年来基于液晶的光学相控阵技术得到了较快的发展,这种技术的主要优点是具有相对低的控制电压和可以较为方便地形成光束的二维扫描。图 7 显示了利用液晶作为相移器的光学相控阵技术的示意图。当没有电压施加到液晶盒时,液晶分子按照平行衬底的方向进行排列;当向液晶盒施加一个较小的电压时(1~10 V),液晶分子的取向将发生一定的变化,这一点将使入射偏振光的有效折射率发生改变,从而导致相移的变化。一般来说,最大的相移是和液晶层的厚度成正比的,而响应的速度是和厚度成反比的。为了能够方便地操纵各种相移的组合,最薄液晶层必须能够产生  $2\pi$  的相移。目前,在液晶相控阵技术的制作方面,雷声(Raytheon)<sup>[1]</sup>公司的研究成果具有一定代表性。它的这种液晶相控阵技术具有较大的孔径(约  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ ),约有 43000 个独立的相位调制单元,实现了  $\pm 20^\circ$  较大角度的扫描,指向控制精度达微弧度量级,如图 8 所示。此外,他们正在发展口径尺寸在  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  以上,相控单元更多,偏转范围更大的光学相控阵器件。近年来,在美国国防高级研究计划局(DAPRA)的“灵巧控制光束(STAB)”项目支持下,Raytheon/Rockwell,空军高级研究实验室等均获得资助从事光学相控阵技术研究。2005 年,雷声公司得到美国国防高级研究计划局的“自适应光相控阵锁定单元”技术开发项目合同,开发应用于激光通信和激光成像的电扫描激光束控制技术。雷

声公司已完成液晶相控阵激光雷达概念设计,其作用距离为4 km,距离分辨率20 cm,体积约 $1600\text{ cm}^3$  ( $\approx 12\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ ),重量约2 kg,总功耗小于10 W。但是,对于液晶技术来说,缺点是响应速度比较慢(毫秒量级)、热稳定性差和工作波长范围受限制。

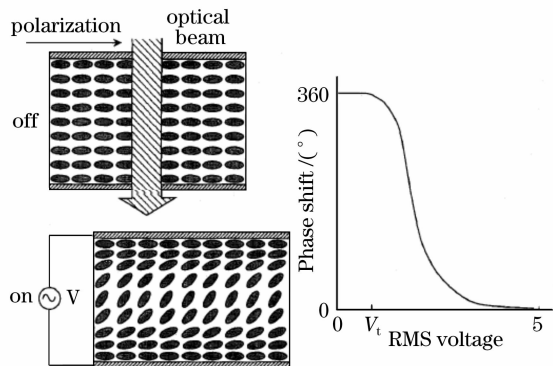


图7 液晶相控阵技术的原理示意图

Fig.7 Phase modulator based on liquid crystal technology

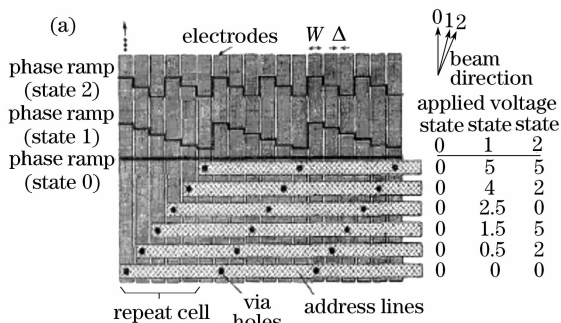


图8 液晶相控阵技术的阵列结构(a)及外观(b)

Fig.8 Phased array technology based on liquid crystal

(a) structure; (b) appearance

### 3.4 PLZT 电光陶瓷

PLZT<sup>[16,17]</sup> 铁电透明陶瓷材料是一类集压电、铁电、电光、电致伸缩等特性于一体的复合钙钛矿型结构的功能材料。在外电场作用下由于材料晶格形变、极化,能表现出优异的电光特性。通过组分设计可以获得线性电光系数优于  $\text{LiNbO}_3$  单晶十几倍,或者具有优异二次电光特性的 PLZT 透明材料。

利用其电控双折射效应,可以实现对入射光的相位、强度、偏振的控制,在集成光波导技术中具有广泛的应用前景。目前,PLZT 电光陶瓷材料在电光开关<sup>[18,19]</sup>、高速的光束扫描器<sup>[20,21]</sup>、光束的幅度调制器<sup>[22]</sup>等器件研究方面已经显示出了良好性能,并且在应用领域获得了较好的效果,也显示出了突出的优点。这种材料由于大的电光系数、宽的透射光谱( $0.5 \sim 10\ \mu\text{m}$ )、低的损耗和便宜的价格,因此在光学相控阵技术研究方面近年来取得了较快的发展。

#### 3.4.1 表面的电极结构

表面电极结构的 PLZT 光学相控阵技术如图 9 所示<sup>[13]</sup>。它在抛光的 PLZT 透明陶瓷上表面通过溅射沉积形成一个叉指状的电极结构,在正负电极之间将产生一个平行于衬底上表面的切向电场分布。由于这种材料具有较大的二次电光系数(通常在  $\sim 10^{-16}\text{ m}^2/\text{V}^2$ ),因此强的切向电场将会引起介质折射率的变化,从而导致入射光束的相位改变。一般来说,对于这种表面结构的 optical 相控阵技术,为了获得最大的角度扫描和最高的角分辨率,其电极的设计通常应该满足以下三个原则<sup>[23]</sup>: 1) 在每个狭缝具有一致的相位调制; 2) 具有最低的全波电压 ( $V_{2\pi}$ ); 3) 最小的单元调制器宽度。

但是,对于表面电极结构 optical 相控阵技术来说,电场在衬底表面的穿透通常比较小,为了获得较大的折射率调制,通常要求表面电极间隔比较小。此外,在这一结构中,材料中的电场强度在材料的厚度方向上不均匀。随着材料厚度的增加,电场强度将很快下降。据相关文献报道<sup>[13]</sup>,在材料厚度为  $350\ \mu\text{m}$  情况下,调相单元全波电压为  $318\text{ V}$ ; 光束偏转角度比较小,约为  $1.7\text{ mrad}$ 。为了获得较大的角度偏转,在大视场范围内实现高衍射效率、高分辨率的光束导向扫描,级联 optical 相控阵技术也被提出,如图 10 所示。其工作原理是:第一级 optical 相控阵 (stage 1, 有  $N$  个结构相同的子阵列组成,每个子阵列有  $M_1$  个相控单元) 出射的光束偏转角是离散的,第二级 optical 相控阵 (stage 2, 有  $M_2 = NM_1$  个相控单元,可以通过  $M_2$  个寻址控制线分别对  $M_2$  个相控单元进行控制) 出射的光束偏转角较小,角度范围是第一级 optical 相控阵相邻离散角之间的差值,这两个 optical 相控阵出射的光束偏转角相加,从而产生连续的光束偏转。相对于单级 optical 相控阵,两级 optical 相控阵可以大大减少寻址控制线的数量。两级 optical 相控阵仅使用  $M_1 + M_2$  个控制线,就能够寻址  $N_R = M_1 M_2$  可分辨角度,这意味着控制线数量以对数级数减少。

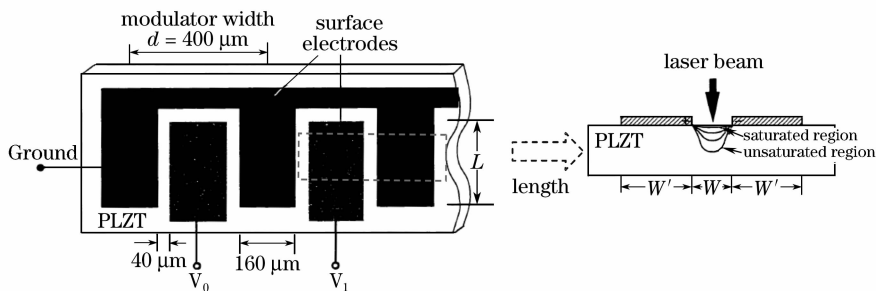


图 9 表面电极结构的 PLZT 光学相控阵示意图

Fig. 9 PLZT optical phased array based on surface electrodes

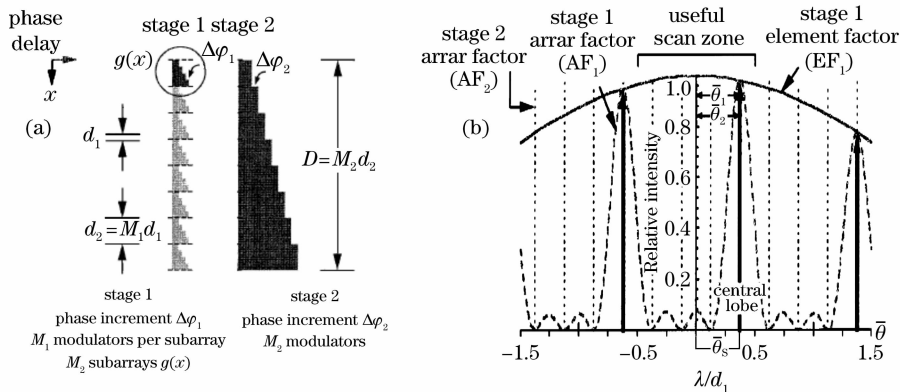


图 10 二级级联光学相控阵技术的原理示意图(a)和光束的扫描(b)

Fig. 10 Two-stage cascaded phase-array with surface electrodes; schematic layout (a) and optical beam deflection (b)

例如,使用两个有 32 个相控单元的相控阵级联,只需要  $M_1 + M_2 = 64$  个寻址控制线,就能够产生  $N_R = 1024$  个可分辨角度,而一个单级光学相控阵要有 1024 个控制线,才会产生 1024 个可分辨角度。图 11 显示了相应的 32 个调相阵列的器件封装图。

PLZT 器件结构<sup>[15]</sup>。这一结构合理地分解了光程和电场强度这两个因素,可以在不改变电场强度的情况下,加长光束传输的光程,从而可以通过两种方法来增大相移量:1) 减小材料厚度、提高电场强度;2) 增加光束在材料中通过的光程。这就解决了文献[13]所采用的结构中光程和电场强度之间的矛盾。理论和实验分析表明,这种结构可以降低工作电压,较小功耗,并将有利于提高扫描速度,其原理结构如图 12 所示。

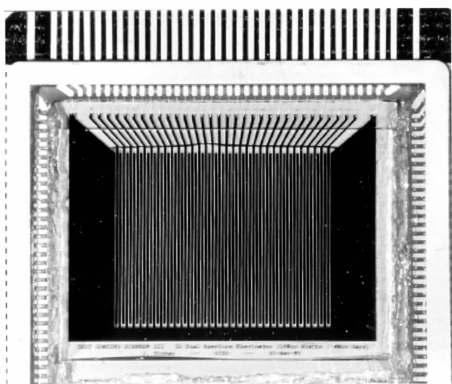


图 11 32 通道表面电极 PLZT 光学相控阵技术的器件封装图

Fig. 11 Packaged 32-channel optical phased array made with PLZT based on surface electrode

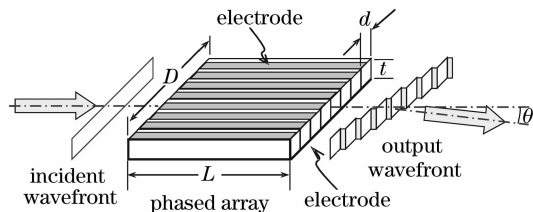


图 12 光学相控阵光束扫描基本原理

Fig. 12 Basic scheme of optical phased-array beam deflector

### 3.4.2 上下电极结构

为了避免表面电极结构中电场强度和光程之间的矛盾,提出了上下电极布局的横向电光调相

在实验装置中,从氩氦激光器出射的波长为 633 nm 的相干光,经过偏振片、透镜组扩束、柱面透镜压缩光斑。在入射到调相器阵列之前插入一个与阵列等周期的幅度掩模版,以消除或减弱调相单元

之间的无电极区的光波。光路上用一个平行于器件平面的狭缝光阑,阻挡杂散的散射光。出射的光束打在7.2 m处的光屏上,用摄像设备进行记录。实验制备的阵列器件,周期  $d$  为300  $\mu\text{m}$ ,电极区的透光孔径  $w$  为180  $\mu\text{m}$ ,材料厚度为1 mm;阵列周期数为8,器件总宽度为2.4 mm。图13显示了不同外加电压引起的PLZT调相阵列光束的偏转,当施加的电压为283 V,385 V和470 V时,中心条纹偏转的角度分别为0.32 mrad,0.71 mrad和1.18 mrad;在560 V电压下,条纹移动接近一个周期,偏转角度达1.81 mrad。

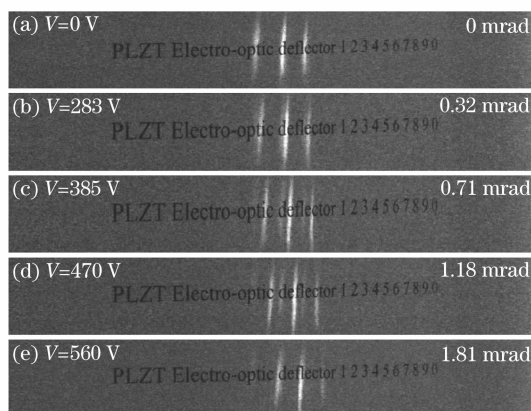


图13 不同外加电压引起的PLZT调相阵列光束的偏转  
Fig. 13 Beam deflection of modulated-phase array varies with applied voltage

#### 4 光学相控阵技术在激光雷达等军事领域中的应用

现代光电子技术的迅速发展,极大地促进了军事光电子技术的日趋成熟和完善。在军事应用中,光学精密跟踪瞄准技术一直是影响军事光电装备发展的关键技术,如果说在光电制导武器和光电侦测设备中的信息获取单元(光电传感器)和信息处理单元(计算机),就象人的眼睛和大脑,那么跟踪瞄准单元就象人灵活的躯体,它由信息处理单元指挥,控制光信息获取单元(光电传感器)的探测方位,实现对空域的全立体全方位扫描。毋庸置疑,对于任何军事光电武器系统来说,目标探测、捕获和跟踪都是首要任务。

雷达波束指向控制是实现目标搜索、捕获、跟踪、瞄准和成像的重要技术环节。传动的机械扫描方法导致雷达结构笨重,响应速度慢。基于微波相控阵(Microwave phased array)技术的相控阵雷达借助有源相控阵天线实现了微波雷达波束的无惯性

电扫描,是雷达体制的重大突破。然而,由于微波相控阵雷达需要采用由大量的发射/接收模块组成的有源相控阵天线,使其结构复杂、规模庞大、功耗大、成本高,在一定程度上限制了它的应用。激光雷达因其极高的频域、空域和时域分辨率,而在目标探测、跟踪、瞄准和成像识别方面得到越来越广泛的应用。与微波雷达一样,激光雷达也存在发射光束的指向控制(空域扫描)问题。光学相控阵技术是源于微波相控阵但又不同于微波相控阵的一种新的光束指向控制技术,光学相控阵无需机械运动而实现光束扫描,具有扫描速度快、灵活,指向精度和空间分辨率高,易于实现小型化和多功能化等特点,因此在激光雷达中具有广泛的应用前景。以光学相控阵技术为基础的光束扫描系统与无源捕获传感组合可以构成多种相控阵激光雷达系统,如相控阵扫描激光搜索雷达、红外焦平面阵列引导的高分辨率成像激光雷达系统、捕获传感器视场增强相控阵激光雷达系统、与无源传感器互引导的相控阵激光雷达系统和两级无源引导相控阵激光雷达系统等。

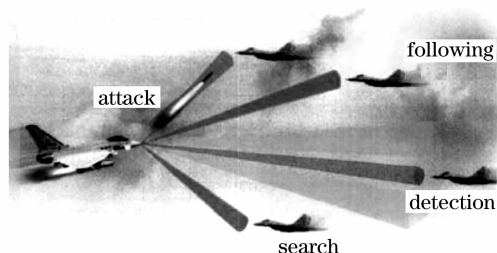


图14 相控阵技术在激光雷达中的应用

Fig. 14 Application of optical phased array in laser radar

然而,总体来说由于受加工工艺和其他各种相关因素的制约,光学相控阵尚不能满足实际工程发展的需要,光学相控阵技术正处于快速的发展阶段。但是光学相控阵技术在目标捕获、高精度跟踪/瞄准、高分辨率成像和自适应光学系统等方面展现了广阔的应用前景。它无论是在提高现有的光电探测系统性能方面,还是研制全新的光电跟踪探测系统,特别是一体化多功能光电探测系统方面,光学相控阵技术都将产生革命性的影响,发展前景十分光明,其相关技术的发展必将受到各国军方的高度重视。

#### 5 结 论

光学相控阵是一种使光束波面的光相位产生周期性的调制的光学器件。当相位调制器阵列的各个单元获得一个在空间上线性分布的随时间变化的相位时,将使光束波面在空间发生偏转,产生光束扫描

的效果。在这一技术中,没有机械运动部件,因此可以获得很高的扫描速度,它将在目标捕获、高精度跟踪/瞄准、高分辨率成像和自适应光学系统等方面展现广阔的应用前景。本文简要地综述了基于电光材料的光学相控阵的研究进展;介绍了几种不同电光材料( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{AlGaAs}$ , 液晶和 PLZT 电光陶瓷)的光学相控阵技术的基本构想和涉及的关键技术;简要介绍了光学相控阵技术在激光雷达等军事领域中的应用。

### 参 考 文 献

- Paul F. Mcmanamon, Terry A. Dorschner, David L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):268~298
- G. D. Love, J. V. Major, A. Purvis. Liquid-crystal prisms for tip-tilt adaptive optics [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**:1170~1172
- Liang Hongqiu, Yang Chuanren, Zhang Jihua *et al.*. Application of electro-optic materials in optical phased array technology [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2007, **2**:32~35  
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**:32~35
- B. J. Cassarly, J. C. Ehlert, D. J. Henry. Low insertion loss high precision liquid crystal optical phased array [C]. *SPIE*, 1991, **1417**:110~121
- R. M. Matic. Blazed phased liquid crystal steering [C]. *SPIE*, 1994, **2120**:194~205
- R. A. Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**:613~616
- Y. Ninomiya. Ultrahigh resolving electro-optic prism array light deflector [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(6):791~795
- Y. Ninomiya. High S/N ratio electro-optic prism array light deflector [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**:358~362
- D. P. Wight, J. M. Heaton, B. T. Hughes *et al.*. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**:899~901
- 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
- Shi Shunxiang, Li Jiali, Wang Guangsheng *et al.*. A novel optical waveguide array electro-optic fast scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1318~1322  
石顺祥, 李家立, 王广生等. 一种新型的光波导阵列电光快速扫描器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1318~1322
- Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Study on characteristics of an optical waveguide array in a novel type of electrooptic scanners [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1654~1658  
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
- J. A. Thomas, Y. Fainman. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(26):6196~6212
- Qiwang Song, Xuming Wang, R. Bussjager *et al.*. Electro-optic beam-steering device based on a lanthanum-modified lead zirconate titanate ceramic wafer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(17):3155~3162
- Dong Zuoren, Ye Qing, Qu Ronghui *et al.*. Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):373~377  
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
- D. Goldring, Z. Zalevsky, E. Goldenberg *et al.*. Optical characteristics of the compound PLZT [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(32):6536~6543
- G. H. Haertling. PLZT electro-optic materials and application—a review [J]. *Ferroelectrics*, 1987, **75**:25~55
- Liu Feng, Ye Qing, Qu Ronghui *et al.*. Polarization independent lanthanum-doped lead zirconium titanate electro-optical switch based on fiber loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):107~110  
刘峰, 叶青, 瞿荣辉等. 基于光纤环形镜的偏振无关的掺镧锆钛酸铅电光开关[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):107~110
- Ronghui Qu, Feng Liu, Qing Ye *et al.*. Polarization independent PLZT electro-optical switch based on fiber sagnac interferometer [C]. *OECC*, 2005, **5E1-4**:78~79
- Zuoren Dong, Qing Ye, Ronghui Qu *et al.*. Characteristics of a PLZT electro-optical deflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9):540~542
- T. Utsunomiya. Optical deflector with tandem electrodes using PLZT ceramics [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, **28**(Suppl.):164~166
- H. Sato, K. Toda. Reflection-type electrically controllable diffraction grating and its application to intracavity laser modulation [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(5):1280~1288
- James A. Thomas. Optical Phased Array Beam Deflection using Lead Lanthanum Zirconate Titanate [D]. Doctor Dissertation, University of California San Diego, 1998