

光学相控阵扫描技术研究进展

闫爱民 职亚楠 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 光学相控阵技术是一种灵活、快速和精确的非机械光束定向扫描技术,具有分辨率高,抗干扰和高保密性等优点。综述了电控扫描的光学相控阵技术的应用背景,对以铌酸锂晶体、锆钛酸铅陶瓷等电光材料和液晶为移相器材料的光学相控阵技术的最新研究进展进行了详细介绍,讨论了这几种光学相控阵技术的优缺点和适用性,以及光学相控阵器件实用化所需要解决的关键问题,最后对光学相控阵技术发展前景进行了展望。

关键词 光电子学;非机械扫描;光学相控阵;光移相器

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.102801

Recent Development of Optical Phased Array Scanning Technology

Yan Aimin Zhi Yanan Sun Jianfeng Liu Liren

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Optical phased array is a kind of agile, rapid and accurate non-mechanical scanning technology. It has many merits such as high resolution, anti-jamming and keeping secrets. The application background of optical phased array is presented. Recent research developments of optical phased arrays are introduced, including different optical shifter based on LiNbO₃, PLZT ceramics and liquid crystal. Their characteristics and applicability are discussed. And the developing prospect of the optical phased array utility are presented.

Key words optoelectronics; non-mechanical scanning; optical phased array; optical shifter

OCIS codes 280.5110; 230.4110

1 引言

激光光束扫描器在激光雷达、激光通信、激光 3D 显示等方面有着重要的应用,需要将激光束对特定探测空间进行有效的扫描,以获取目标的距离和方位信息,实现对目标进行快速捕获和精密跟踪^[1~5]。通常所用的二维光束扫描器多采用机械扫描原理,缺点是受机械传动精度影响,扫描精度有限,结构复杂而且扫描系统比较庞大、集成微小化程度低。而在空间激光通信、新体制激光雷达和光电对抗新技术等领域需要体积小、重量轻、光束方向准确精密控制的扫描装置。因此,具有上述特点的非机械、灵巧光束控制的新型激光光束扫描技术成为研究热点。

光学相控阵技术(OPA)是一种新的光束偏转技术,其概念来源于微波相控阵,由于光波的波长较微波的波长短得多,光学相控阵技术比微波手段更灵巧、轻便和快速的光束控制,并有着分辨率高,抗干扰和高保密性等诸多优点,对将来光学系统将产生重要影响,被越来越多的应用在激光雷达及光通信新技术领域^[6~10]。本文介绍了国内外光学相控阵扫描技术的研究状况,以铌酸锂(LiNbO₃)晶体、锆钛酸铅陶瓷(PLZT)陶瓷等电光材料和液晶(LC)为移相器材料对该新型光束偏转技术进行了详细介绍,分析了它们的优缺点和适用性。讨论了光学相控阵器件实用化所需要解决的关键问题,并对其发展前景进行了展望。

收稿日期: 2011-04-21; **收到修改稿日期**: 2011-05-20; **网络出版日期**: 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

作者简介: 闫爱民(1979—),女,博士,副研究员,主要从事激光技术、信息光学及激光雷达技术等方面的研究。

E-mail: yanaimin@siom.ac.cn

2 光学相控阵技术研究进展

光学相控阵技术是一种源于微波相控阵但又不同于微波相控阵的新型光束指向控制技术。其光束指向控制的基本原理是:通过调节从各个相控单元即光学移相器辐射出的光波之间的相位关系,使其在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射出的光波都不满足彼此同相的条件,干涉的结果彼此相抵消。组成相控阵的各相控单元在计算机的控制下,可使一束或多束高强度光束的指向按设计的程序实现随机空域扫描。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可以做得很高,易于实现小型化和多功能化,具有广阔的应用前景。

尽管光学相控阵技术的思想是从微波相控阵延伸发展而来的,但由于波段从微波过渡到光波,光波的波长比微波小几个数量级,微波相控阵的原理和方法并不能简单地直接应用到光学相控阵技术中,其相应的器件制造工艺难度大,相位控制精度高。尤其对光学相控阵的核心单元光移相器的设计加工工艺提出了新的要求。

2.1 基于铌酸锂等电光晶体的光学相控阵

1971年, Meyer^[11]用尺寸为 15 mm × 23 mm, 厚度为 0.1 mm 的钽酸锂晶体材料制作了多通道位相调制器,具有 46 个阵列单元的一维光学相控阵器件,每个单元都有独立的控制电极,完成了对激光光束的相位控制,用简单的实验装置验证了光学相控阵扫描的概念,如图 1 所示。

1973年, Ninomiya^[12]制作了基于铌酸锂晶体材料电光棱镜偏转的一维光学相控阵扫描器件。该器件由铌酸锂电光晶体材料制成,采用楔形顶角对角放置的棱镜阵列的方式实现激光光束的高分辨率扫描,角扫描精度比单个电光棱镜提高了 N 倍,如图 2 所示。每块棱镜镀有可控三角形电极,对每块晶体施加相同的电压,偏转角度是不连续的;每块晶体施加的电压彼此不等,偏转角度是连续的,实验在 ±600 V 电压下分辨出 50 个不同的扫描角度。

1995年, Thomas 等^[13]研制了用 PLZT 电光陶瓷制成的光学相控阵器件,由于 PLZT 是一种性能优良的压电陶瓷材料,其电光系数是一般 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等电光晶体的 10 倍左右,响应速度快,因此这种固体相控阵可实现快速、连续的扫描,如图 3 所示为 32 通道 PLZT 光学相控阵器件。随后为了减轻大调制数目单元的寻址负担^[14,15],提出了用级联策略来减少控制线的数量,从而减少所需高压驱动电源装置的数目,同时验证了所提出的级联理论的正确性。

光学相控阵类似于多缝光栅衍射,研究表明,对于规则排列的相控阵调制器都存在着相控阵单元的尺寸

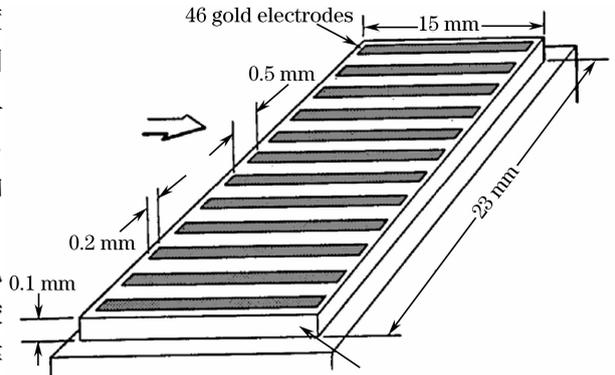


图 1 多通道钽酸锂相位调制器

Fig. 1 Multichannel lithium tantalate phase modulator

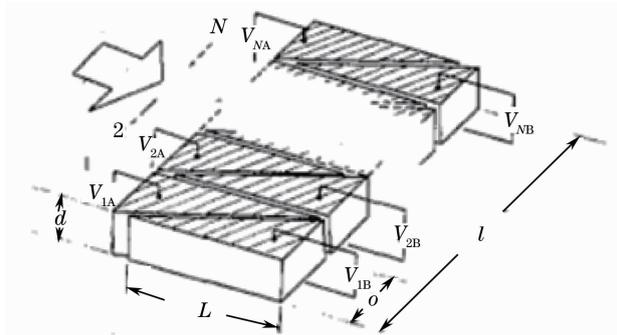


图 2 铌酸锂电光棱镜相位调制器

Fig. 2 LiNbO_3 electro-optic prism phase modulator

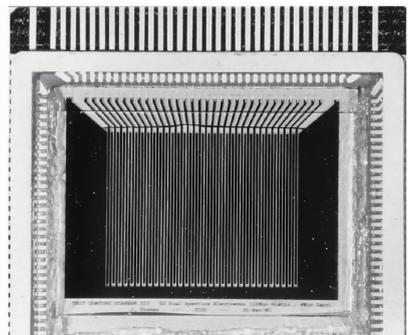


图 3 32 通道 PLZT 光学相控阵器件

Fig. 3 32 channels PLZT optical phased array device

通过减少 2π 周期内的串扰噪声,像素单元的尺寸从 $1.8\ \mu\text{m}$ 减小到 $1.6\ \mu\text{m}$,像素的数目增加了 3 倍,底板的电压从 5 V 升高到 13 V,输出孔径从 $7.4\ \text{mm}\times 6.0\ \text{mm}$ 增加到 $19.66\ \text{mm}\times 19.66\ \text{mm}$ 。在 $1550\ \text{nm}$ 波长条件下偏转角为 $\pm 6.95^\circ$,响应时间为 $24.8\ \text{ms}$ 。美国的 Raytheon 公司研制的液晶光学相控阵也研制出类似的具有 10000 个相移单元,尺寸为 4 cm 的反射型液晶光学相控阵。随后采用一维反射模式液晶光学相控阵^[33]串行层叠配置实现二维的扫描。Wang 等^[34]研究了在考虑光学相控阵的边界场效应和光学性质的条件下,通过配置一个液晶模型的参数(如单元厚度、液晶材料的折射率、电极间距、电压范围、电极的宽度、液晶的弹性系数等)来研究液晶光学相控阵的衍射效率的影响因素、衍射角及加载电压的优化过程等,结果表明,衍射角为 7.7° 时的衍射效率为 70.7%,衍射角为 14.4° 时的衍射效率为 50%。

2005 年,McManamon^[9]报道了采用液晶研制光相控阵的进展,并展望了光学相控阵未来的发展方向。一方面,通过窄波段辐射证明了如何提高光束尺寸和效率及速度,得到了非机械的光控阵列在 $6\sim 40\ \text{ms}$ 的响应时间内, $0.5\ \text{cm}$ 的光束尺寸控制下,能够超过 $45^\circ\times 45^\circ$ 的能视域,其效率达到 15%~20%。目前的工作是继续研究如何降低光散射,从而能够在宽频带辐射中得到应用。另一方面,在可见光区和近红光区范围内,以后将在中波红外区和长波红外区范围内进行研究。如果能够将光相控阵技术与微波相控阵技术结合,那么可能对 $1\ \text{cm}$ 、15 GHz 或者 $1.5\ \mu\text{m}$ 、200 THz 的光束进行控制。

近期,在美国国防高级研究计划局的“灵巧控制光束”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相控阵研究^[35]。产生大角度偏转的一种技术是基于多重体全息光栅的角度放大作用。一定数量的可以大角度偏转的多重体光栅被写入全息记录介质中。在全息图前面放置一个小角度偏转的特殊光栅^[36,37]。应用角度寻址,用光束偏振器选择相应的寻址光栅,产生预期的大角度偏转,这种方案的优点是可以应用小角度的连续偏转器件。有关在光热玻璃中记录体全息光栅的进展是一种非常有意义的大角度步进扫描方案。每一玻璃全息光栅可以产生大于 99% 的衍射效率。当两个全息图写入一片玻璃中,效率仍能达到超过 98%。这种方法可以产生大于 45° 的连续光束偏转,如图 5 所示。

第二种大角度光束偏转的方案是用双折射棱镜^[38]。这个技术也是从小角度连续偏转到每个方向的中等角度光束偏转。大角度可以采用两个一组的双折射棱镜。在一个方向上棱镜对一个偏振态的光进行偏转,另一偏振态的光偏转到另外方向。通过旋转棱镜间的偏振可以实现二元光束扫描。在每一双折射棱镜前放置一液晶层来旋转偏振态。多组棱镜可以扩大扫描角度倍数,如图 6 所示。例如,要偏转 40° 视场的连续偏转,双折射棱镜需要 2.5° 、 5.0° 和 10.0° 。

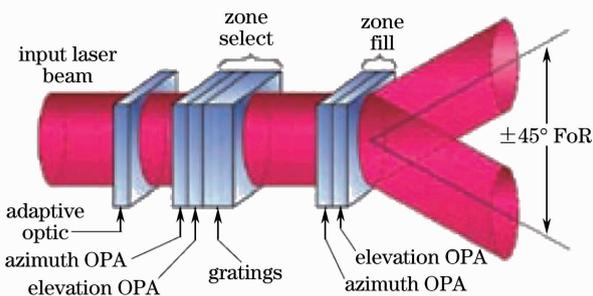


图 5 基于全息光栅的大角度扫描方案
Fig. 5 Holographic wide-angle steering

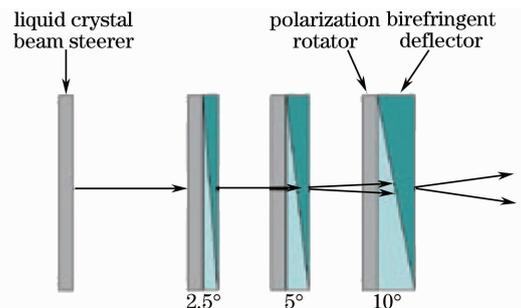


图 6 基于双折射棱镜的大角度扫描方案
Fig. 6 Birefringent prism wide-angle steering

另一种大角度步进扫描的方法是基于在液晶内形成的圆形偏振光栅或者液晶偏振光栅(LCPG)^[39,40]。左旋液晶圆偏振光栅和右旋液晶圆偏振光栅可分别产生角度方向相反的偏转。采用多级级联偏转技术可以获得大角度的光束偏转,如图 7 所示,理论上在 $80^\circ\times 80^\circ$ 的大角度偏转情况下,角度分辨率 1.25° 时,整体透过率可达到 87%。

由于相控单元的尺寸和相控阵单元间距受光波长的限制,相控阵单元尺寸必须很小,因此制作的单个光学相控阵尺寸小,无法获得高功率、大角度和激光发散角小的光束控制,无法满足相控阵雷达等远距离目标探测应用的需要。2002 年,McManamon 等^[41]提出“相控阵的相控阵”(PAPA)概念。PAPA 是一种全新的光学相控阵概念,也是完全不同的激光系统设计概念。在这种概念中采用多个光学相控阵子孔径方案,其中

的每一个光学相控阵都可以作为独立的单元进行扫描,这些独立单元通过相干组合形成一个大的阵列,可以用于光束的发射和接收,每一个光学相控阵是系统的一个子孔径。如图 8 所示,光纤激光器的相干组束构成激光阵列,各自对应一个光学相控阵的子孔径,形成“光纤激光器+相控阵子孔径”的分布式结构,使得可以通过增加光纤激光器和子孔径的数目提高系统的发射功率和孔径尺寸。

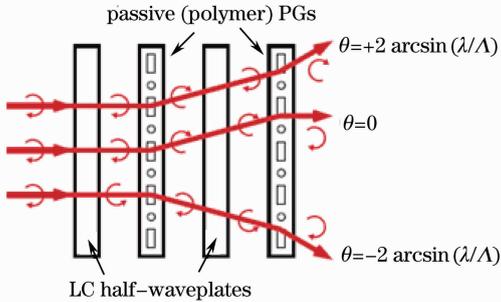


图 7 基于液晶偏振光栅的大角度扫描方案

Fig. 7 LCPG wide-angle steering

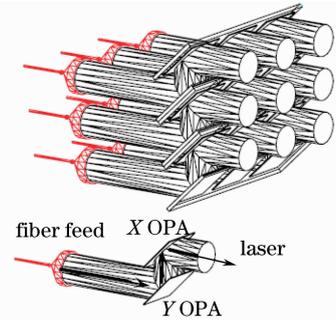


图 8 PAPA 基本原理

Fig. 8 Basic operation of PAPA

2004 年 BNS(Boulder Nonlinear Systems)的 Serati 等^[42]采用反射型液晶光学相控阵实现了 3×3 的串连透射型 PAPA, 3×3 的光纤激光光源被固定在机械固定架上,照射 PAPA 阵列。出射光首先经过一个 3×3 的向列液晶延迟器阵列,进行位相补偿,然后每个光纤的光进入一个子孔径,实现对光束波前的控制。90/10 的分束器是作为取样窗,一小部分出射光被取样入射到红外摄像机,对控制远场波束图提供反馈,通过优化设计每个子孔径的有效面积为 $19.5 \text{ mm} \times 13.8 \text{ mm}$, PAPA 的总有效面积为 $63.7 \text{ mm} \times 43.6 \text{ mm}$,填充因子为 87%。

2006 年,雷声公司赢得美国空军研究实验室 580 万美元的合同,为新的高功率激光器系统开发一种光学孔径相干相控阵,该研究是美国防高级研究计划局自适应光电锁相元件(APPLE)项目的一部分^[43]。这种阵列可以发射、接收以及快速控制空间相控光能,并且每一个子孔径都可以传送图像,如图 9 所示。模块化的特性可以把几个光学孔径通过相干组合成一个任意尺寸的发射/接收阵列。APPLE 项目旨在开发一种模块化的锁相、相干组合激光器系统,该系统可以进行大角度电子操控,同时自动补偿光束控制器内由大气紊流造成的光学像差和热畸变。这是一种将低功率模块综合成高功率武器激光器的可行途径,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。

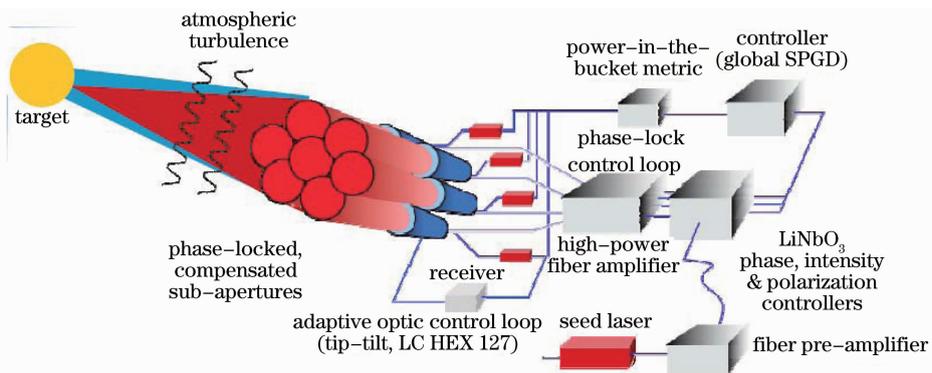


图 9 APPLE 项目光学孔径相干相控阵

Fig. 9 Coherent sub apertures array of APPLE

国内对基于液晶材料的光学相控阵技术的研究处于起步阶段。倪树新^[3]在相控阵激光雷达应用方面对液晶光学相控阵的应用前景进行了研究和讨论。李华伟^[44]在理论上研究并制作了液晶闪耀光栅的光学相控阵器件。哈尔滨工业大学在液晶光学相控阵理论和光束控制关键技术方面也进行了一定的研究^[45]。总体上国内在液晶光学相控阵扫描的工程化应用方面处于起步阶段,而且液晶材料的响应时间比电光晶体要长的多,抗损伤阈值低,很难应用到需要高功率的远距离探测的空间应用中。

3 发展前景和展望

光学相控阵技术可实现比微波手段更灵巧、轻便和快速的光束控制,并有着分辨率高,抗干扰和高保密性等诸多优点,是实现目标侦察、捕获,高精度跟踪/瞄准的有效技术手段。光学相控阵扫描器的制作受激光波长限制,相应的器件制造工艺难度大,相位控制精度要求很高,对所涉及的光机械、光电子器件、电子器件、光学和电子测量仪器等关键技术方面提出了新的更高的要求。在移相器材料方面,不断开发快速响应和抗光损伤阈值高的液晶和电光等新型光学相控阵材料,解决了光学相控阵技术进一步向实用化发展的瓶颈问题,将在激光相控阵雷达、光学对准和跟踪的子系统(APT)技术以及空间目标探测等方面都具有广阔的发展潜力和应用前景。

参 考 文 献

- 1 W. R. Leeb, W. M. Neubert, K. H. Kudielka *et al.*. Optical phased array antennas for free space laser communications [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 14~29
- 2 A. Polishuk, S. Arnon. Communication performance analysis of microsattellites using an optical phased array antenna[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(7): 2015~2024
- 3 Ni Shuxin. Review on development of the new imaging laser radar systems[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(s1): 732~736
倪树新. 新体制成像激光雷达发展评述[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(s1): 732~736
- 4 M. A. Arain, N. A. Riza. High-beamforming power-code-multiplexed optical scanner for three-dimensional displays[C]. *SPIE*, 2003, **5243**: 59~64
- 5 P. F. Mcmanamon, T. A. Porscher, T. A. Porscher *et al.*. Optical phased array technology[J]. *IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 6 A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney *et al.*. The development of phased-array radar technology[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2000, **12**(2): 321~340
- 7 P. F. McManamon, P. J. Bos, M. J. Escuti *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *IEEE*, 2009, **97**(6): 1078~1096
- 8 A. Linnenberger, S. Serati, J. Stockley. Advances in optical phased array technology[C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63040T-1~9
- 9 P. McManamon. An overview of optical phased array technology and status[C]. *SPIE*, 2005, **5947**: 59470I-1~10
- 10 Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material[J]. *Chinese J. 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
- 11 R. A. Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 613~616
- 12 Y. Ninomiya. Ultrahigh resolving electro-optic prism array light deflector[J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(6): 791~795
- 13 J. A. Thomas, Y. Fainman. Programmable diffractive optical element using a multichannel lanthanum-modified lead zirconate titanate phase modulator[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(13): 1510~1512
- 14 J. A. Thomas, M. Lasher, Y. Fainman *et al.*. A PLZT-based dynamic diffractive optical element for high speed, random-access beam steering[C]. *SPIE*, 1997, **3131**: 124~132
- 15 J. A. Thomas, Y. Fainman. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(26): 6196~6212
- 16 S. Yin, J. H. Kim, F. Wu *et al.*. Ultra-fast speed, low grating lobe optical beam steering using unequally spaced phased array technique[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(1): 41~46
- 17 D. A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan *et al.*. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6236~6241
- 18 D. A. Scrymgeour, L. Tian, V. Gopalan *et al.*. Phased-array electro-optic steering of large aperture laser beams using ferroelectrics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(21): 211113-1~3
- 19 K. Nakamura. Optical beam scanner using kerr effect and space-charge-controlled electrical conduction in KTa_{1-x}Nb_xO₃ crystal[J]. *NTT Technical Review*, 2007, **5**(9): 1~8
- 20 Zhu Yuxin. The Equipment and Method of Optical Phased Array[P]. Chinese patent, No: CA97119771.7.
朱雨心. 相控阵光学装置及方法[P]. 中国发明专利, 专利号: CA97119771.7.
- 21 Lu Xiupin, Fen Kecheng, Liu Weiqi. Theoretical study on the optical phased-array scanning[J]. *J. Changchun University*

- of Science and Technology*, 2002, **25**(2): 47~49
- 22 Sun Liang. The Study of Light-Beam Scanning Based on Optical Phased Array[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008
孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008
- 23 Wan Lingyu, Liu Liren, Zhang Mingli *et al.*. High-speed electrooptic phased array two-dimensional laser beam scanner [P]. Chinese patent, No. 200320122621, 2004
万玲玉, 刘立人, 张明丽等. 高速电光相控阵二维激光光束扫描器[J]. 中国发明专利: No. 200320122621, 2004
- 24 Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material[J]. *Chinese J. 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
- 25 Q. Ye, Z. Dong, R. Qu *et al.*. Experimental investigation of optical beam deflection based on PLZT electro-optic ceramic [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16933~16944
- 26 F. Xiao, W. Hu, A. Xu, Optical phased-array beam steering controlled by wavelength[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(26): 5429~5433
- 27 Y. Zhao, X. Yang, Q. Cai *et al.*. Application of simulated annealing to design and realization of two-dimension fibre-type optical phased array[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(7): 490~491
- 28 X. Zhao, Y. Yang, Q. Cai *et al.*. Primary experiments on 2-D and 1-D fiber-type optical phased array [C] *SPIE*, 2008, **7136**: 71363J-1~8
- 29 Stockley, S. Serati. Advances in liquid crystal beam steering[C]. *SPIE*, 2004, **5550**: 32~39
- 30 Zhang Jian, Fang Yun, Wu Liying *et al.*. Liquid crystal beam steering technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 325~334
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
- 31 D. P. Resler, D. S. Hobbs, R. C. Sharp *et al.*. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 689~691
- 32 S. Serati, J. Stockley. Advances in liquid crystal based devices for wavefront control and beam steering [C]. *SPIE*, 2005, **5894**: 180~192
- 33 J. Stockley, S. Serati. Cascaded one-dimensional liquid crystal OPAs for 2-D beam steering [C]. IEEE Aerospace Conference, 2003, **4**: 1817~1822
- 34 X. Wang, B. Wang, P. F. McManamon *et al.*. Spatial resolution limitation of liquid crystal spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2006, **5553**: 46~57
- 35 P. F. McManamon. Agile nonmechanical beam steering[J]. *Opt. Photon. News*, 2006, **17**(3): 24~29
- 36 Z. Yaqoob, M. A. Arain, N. A. Riza. High-speed two-dimensional laser scanner based on Bragg gratings stored in photothermo refractive glass[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(26): 5251~5262
- 37 N. A. Riza, M. A. Arain. Code-multiplexed optical scanner[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(8): 1493~1502
- 38 S. A. Khan, N. A. Riza. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 868~882
- 39 J. Kim, C. Oh, M. J. Escuti *et al.*. Wide-angle, nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings [C]. *SPIE*, 2008, **7093**: 709302-1~12
- 40 S. R. Davis, G. Farca, S. D. Rommel *et al.*. Analog non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard[C]. *SPIE*, 2008, **6971**: 69710G
- 41 P. F. McManamon, W. Thompson. Phased array of phased arrays (PAPA) laser systems architecture [C]. IEEE Aerospace Conference, 2002, **3**: 1465~1472
- 42 S. Serati, H. Masterson, A. Linnenberger. Beam combining using a phased array of phased arrays (PAPA) [C]. IEEE Aerospace Conference, 2004, **3**: 1722~1729
- 43 A. Dorschner. Adaptive photonic phase locked elements [R]. MTO Symposium March, 2007
- 44 Li Huawei. A Kind of Blazed Gratings for Beam Scanning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007
李华伟. 一种可实现扫描的液晶闪耀光栅[D]. 成都: 电子科技大学, 2007
- 45 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying *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的研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1497~1502