

光束扫描技术研究新进展

师宇斌 司磊 马阎星

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 光束扫描技术作为空间光通信、定向能应用等领域的关键技术,得到了广泛研究。介绍了当前国内外光束扫描技术的最新研究进展,分析了几种主流光束扫描技术的优缺点,尤其是对基于液晶相控阵实现的光束扫描技术进行了深入研究。最后,对光束扫描技术的发展做了展望。

关键词 光学器件;光束扫描;液晶相控阵;机械式扫描;声光式扫描

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080024

New Progress of Beam Scanning Technology

Shi Yubin Si Lei Ma Yanxing

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract As the crux technology of free-space communication, directed energy and many other application fields, beam scanning technology has been widely studied. This paper introduces the new development of beam scanning, analyzes the merits and faults of these technologies, especially makes an intensive study on liquid crystal optical phased array technology. Finally, the future development of beam scanning technologies is previewed.

Key words optical devices; beam scanning; liquid crystal optical phased array; mechanical scanning; acousto-optic scanning

OCIS codes 230.3720; 230.2090; 230.1150

1 引言

光束扫描在空间光通信、激光雷达、天文测量、定向能应用等领域具有重要的应用前景。针对不同应用领域的特点,人们先后提出了多种光束扫描技术,主要有机械式光束扫描、声光式光束扫描和基于液晶相控阵的电光式光束扫描。机械式光束扫描是目前最成熟的扫描技术,被广泛应用在天文测量和定向能领域,但其重量和体积较大,不易实现快速扫描^[1-4]。声光式扫描基于声光原理实现,具有体积小、重量轻、速度快的优势,但扫描效率较低,扫描范围有限。近些年,人们又提出了基于液晶相控阵的电光式扫描技术,初步实验证明该技术能够灵活实现光束扫描,在空间光通信和激光雷达方面具有应用潜力^[1-6]。本文将对上述各项技术进行详细介绍,并分析其优缺点及发展状况。

2 机械式光束扫描

机械式光束扫描系统通常由粗扫描系统和精扫描系统组成。粗扫描系统由伺服系统驱动,常以万向节作为俯仰与旋转运动的平台。精扫描系统在粗扫描系统运动平台上实现小角度光束控制,主要以振镜,快速控制反射镜和微机电系统变形镜这三种形式实现。

2.1 振镜扫描

振镜扫描原理如图1所示,主要由两个转轴互相垂直的反射镜构成。反射镜通过振镜电机控制实现小范围的旋转,使光束在二维平面内快速移动。振镜扫描系统的两个扫描头称为振镜电机,它由扫描电机和伺服电

收稿日期: 2013-03-09; 收到修改稿日期: 2013-04-08; 网络出版日期: 2013-07-11

作者简介: 师宇斌(1988—),硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: monkey.backstreet@163.com

导师简介: 司磊(1971—),研究员,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: w_zt@163.com(通信联系人)

路两部分构成。扫描电机是内部集成了转角位置传感器的冲击式有限转动伺服电机;伺服电路接收计算机输出的位置电压信号,驱动扫描电机转到指定转角位置^[7]。

1965年,General Scanning(GS)实验室研制出第一个振镜扫描头^[8]。目前,GS公司相关产品已可实现 $\pm 50^\circ$ 视场的扫描,且全角扫描时间小于0.8 ms。此外,美国Cambridge Technology Inc. (CTI),德国ScanLab等振镜厂商都已推出成熟的激光扫描系统。在国内,2011年,哈尔滨工业大学利用 $2\ \mu\text{m}$ 激光外差干涉系统也实现了 $17^\circ \times 25^\circ$ 的光束扫描^[9]。振镜式系统结构简单,能够实现高速扫描,但其工作范围有限,存在枕形失真、扫描镜磨损等问题^[10-11]。

2.2 快速反射镜

快速控制反射镜(FSM)的结构形式分为两种。一种是X-Y轴框架结构,也称有轴系结构,其结构简图如2(a)所示,方位轴和俯仰轴分别与地轴平行和垂直。反射镜支承采用精密轴系,外框架轴系轴承座固定在底板上,镶嵌于反射镜的内框架轴系安装在外框架,采用直线电机驱动内外框架进行旋转。另外一种柔性轴结构,是目前FSM的主要发展方向,通过音圈电机或者压电陶瓷(PZT)驱动柔性铰链变形,带动整个镜架无摩擦运动,使镜面快速旋转,从而实现对反射光的扫描,其结构简图如2(b)所示^[12-13]。

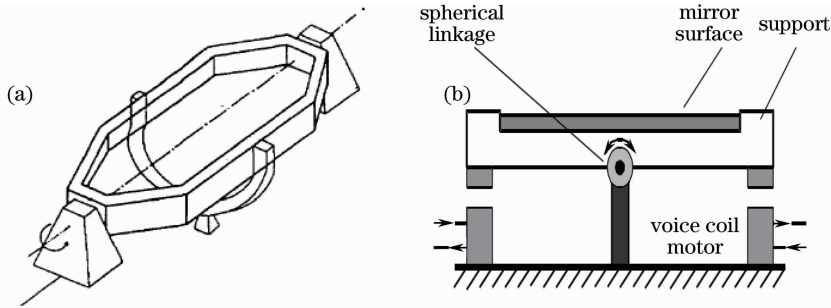


图2 快速控制反射镜示意图。(a) X-Y框架结构复合轴结构图;(b) 柔性轴结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fast steering mirrors. (a) X-Y frame structure of compound axial FSM; (b) structure of flexural-axial FSM

国外对快速控制反射镜的研究始于20世纪70年代。20世纪90年代中期,采用分布式柔度全柔性机构设计概念,与压电陶瓷或者音圈驱动技术相结合,成功研制了快速控制反射镜光束操作系统^[3,14]。目前,美国BAE SYSTEMS研制的快速反射镜已经能够实现 $\pm 85\ \text{mrad}$ 范围的扫描,且其分辨率可以达到 $1\ \mu\text{rad}$ 。他们的产品已经被用在激光雷达、自适应光学、机载激光武器等系统^[15]。国内对FSM的研究始于20世纪90年代中期,主要单位有中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、华中科技大学等,前者在1990~1993年研制的快速控制反射镜扫描范围达到约 0.23° ,而2012年,华中科技大学设计的三支撑结构快速控制反射镜可实现 $1^\circ \times 2^\circ$ 视场的光束扫描^[12-13]。

快速控制反射镜可实现一定范围内的高精度光束扫描,此外,柔性轴结构也不会引入机械摩擦,但实际应用中需与大惯量机架结构相结合,因而会引入一定偏差^[12,13]。

2.3 微机电系统变形镜

微机电系统变形镜(MEMS-DM)多采用静电力驱动,目前多以平板电容方式实现。其原理如图3所

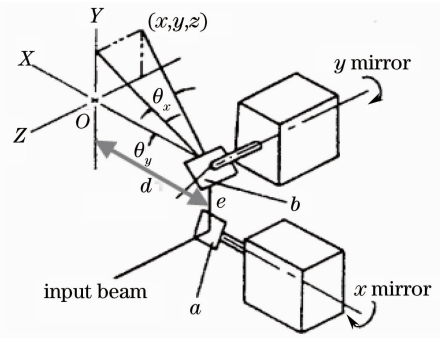


图1 振镜扫描系统原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of galvanometric scanning system

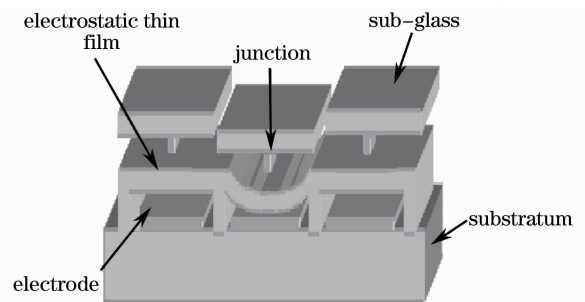


图3 MEMS-DM驱动原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of driving principle of MEMS-DM

示^[16]。由附着在基底表面的电极和静电驱动薄膜构成平板电容的两极板。通过对某一单元施加控制电压,隔膜由于静电吸引产生凹凸变形,通过接触点带动镜面单元向下运动,多个单元镜面独立运动构成整个变形镜镜面的形变^[16]。光束经其表面时,每个子单元都能对光束进行相位控制,进而实现小角度范围光束扫描。

1993年,Miller等^[17]提出基于微机电系统的变形镜技术。1994年,美国波士顿大学 Krishnamoorthy等^[18]采用表面微加工技术设计出分立镜面和连续镜面两种微机电变形镜。2009年,BMC公司最新生产的微机电系统变形镜包含有4092个独立子单元,制动距离达到 $4\ \mu\text{m}$ ^[19]。目前,BMC公司和德州仪器(TI)公司在这方面的研究处于世界领先地位。我国在微机电系统变形镜领域的研究起步较晚,直到2000年后才开展微机电系统变形镜的研究工作。2008年,中国科学技术大学制备出了 10×10 阵列的MEMS阵列压电微变形镜样机;2010年,成都光电技术研究中心制备了一种基于PolyMUMPs的MEMS变形镜,可以实现 $1.45\ \mu\text{m}$ 的驱动距离^[16,20-21]。

微机械系统变形镜以其体积小、功耗低、无滞后性、性能稳定、可以单片集成等优点在许多光学系统得到广泛应用^[1,17-19]。但其光能利用率低,杂散光较多^[16],能够实现的角度范围有限。

3 声光式光束扫描技术

声光式光束扫描基于声光效应实现。光波在介质中传播时,被超声波场衍射或散射时发生声光效应。声波是弹性波,在介质中传播会产生弹性应力或应变,介质弹性形变将导致介质的折射率变化。当光波在介质中传播时,会发生衍射现象。衍射光的强度、频率和方向等将随着超声场的变化而变化。声光式光束扫描原理如图4所示,利用驱动源将射频功率信号输入到换能器,换能器将电信号转化为超声信号并传输到声光介质中,介质因受机械应力波作用引起弹光效应而形成超声光栅,从而使入射激光产生衍射^[6,22]。

1967年,狄克逊根据各向异性介质中声光互作用原理提出了共线性,制成了声光可调谐滤波器;1992年,美国林肯实验室采用声光偏转器件进行光束跟踪,首次对非机械装置的光束控制方法进行了探索^[23]。美国Brimrose公司研制的基于 TeO_2 的声光偏转器,响应时间在 $50\ \mu\text{s}$ 左右,功耗仅有 $0.5\ \text{W}$,可以实现 $40\ \text{mrad}$ 的光束扫描^[24]。目前,美国、日本、俄罗斯等多国都在该领域进行了深入研究。国内,国防科学技术大学和电子科技集团等单位也都在这方面开展了一定的研究工作。2006年,国防科学技术大学的温涛^[22]实现了42个可分辨点、 $9.048\ \text{mrad}$ 角度光束扫描。2012年,电子科技集团基于 ZnO 压电薄膜实现了最大角度为 5.7° 的光束扫描^[25]。

声光式扫描具有体积小、重量轻、驱动功率小、易与计算机兼容和自动化控制的特点,但扫描范围有限,衍射效率偏低^[6,22]。此外,目前所建立的声光扫描分析模型,都忽略了超声吸收、超声分布不均匀性等因素对衍射光的影响^[26]。

4 基于液晶相控阵的光束扫描技术

液晶相控阵(LCOPA)技术是基于光波传输过程中相位改变 2π 整数倍不会改变远场光强分布的原理,使得每个 2π 周期内光场的波前附加相同的相位倾斜,光传输后产生了等效于光栅的效果,最终使光束传播方向发生改变^[1],如图5(a)所示。向列型LCOPA结构如图5(b)所示,通过电极施加电压,使得液晶分子产生旋转,由于液晶分子具有电控双折射效应,所以能起到相位调制作用,实现光束扫描^[2]。

1971年,Meyer^[27]利用钽酸锂移相器制成第一个具有46个阵列单元的一维光学扫描器件,实现对激光光束的相位控制。1996年出现了液晶相控阵的方法,制出 $4\ \text{cm}\times 4\ \text{cm}$ 大小的LCOPA器件,实现在

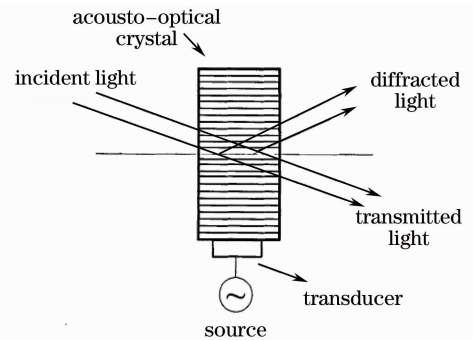


图4 声光扫描原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of acousto-optic beam scanning

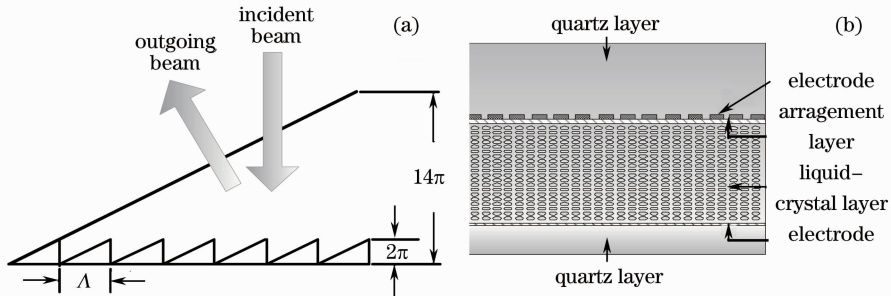


图 5 液晶光学相控阵原理图。(a)相位分布示意图；(b)液晶光学相控阵结构图

Fig. 5 Schematic of LCOPA. (a) Phase profile; (b) structure of nematic LCOPA

10.6 μm 波长条件下 $\pm 4^\circ$ 范围光束扫描,引入一种通过两个不同精度的 LCOPA 级联实现一维大角度连续扫描的方式,精度达到 100 μrad ,并能实现 $\pm 10^\circ$ 范围的光束扫描^[2]。2006 年, Raytheon 公司研制出能够实现 $\pm 120 \text{ mrad}$ 扫描,误差仅为 1.54 μrad 的 LCOPA 器件^[28]。在国内,哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等单位也开展了一定的研究^[29,31]。2006 年,长春理工大学的孙亮^[32]实现了 2700 个可分辨点,最大扫描角度为 0.2 rad 的光束扫描。哈尔滨工业大学的张建等^[33]在 2008 年实现了最大角度 2.0014°的准连续光束扫描。

液晶相控阵器件能够实现一定范围内高精度、非机械式、稳定的光束扫描,但由于存在光学回程区,其实现角度和效率都受到限制^[1-4]。为满足实际应用需求,基于液晶相控阵技术,国外相关研究单位实现了多路体全息光栅和 LCOPA 级联、电控双折射棱镜和液晶 LCOPA 级联、液晶偏振光栅级联以及液晶微透镜阵列等大角度光束扫描技术。

4.1 多路体全息光栅和 LCOPA 级联

如图 6 所示^[1,7,9],光束首先进入粗扫描 LCOPA 进行多路体全息光栅通路选择,然后进入不同体全息光栅通路实现相应角度放大,最终从不同通路出射经精扫描 LCOPA 器件实现连续光束扫描。2009 年, Raytheon 公司用这种级联方式,以 15%~20%的效率实现超过 $\pm 45^\circ$ 视场角的二维光束扫描,并用于美国自适应锁相计划 (APPLE)。这种方式具有宽光谱、大角度扫描的特点,但是体全息光栅存在一定吸收,光束在大角度扫描时易偏向体全息光栅侧沿,造成严重损耗。此外,响应时间、功率阈值等方面仍然受限于 LCOPA^[1]。

4.2 电控双折射棱镜和液晶 LCOPA 级联

如图 7 所示^[1,34],晶轴方向相互垂直的双折射晶体构成二元双折射棱镜单元,多个单元级联能够实现大角度光束扫描。每一级通过液晶对光束偏振进行控制,实现两个角度偏转的选择,通过 N 级级联的方式可实现 2^N 个离散角度的扫描。2004 年,佛罗里达大学实现在 1550 nm 波长条件下最大扫描角度为 40.92° 的连续光束扫描。美国 Rockwell 公司也通过这种方式实现了 $\pm 20^\circ$ 范围的光束扫描^[5,35]。这种方式也可实现大角度光束扫描,但多层级联会造成效率损耗,也会使光束偏离有效的工作区^[1,4]。

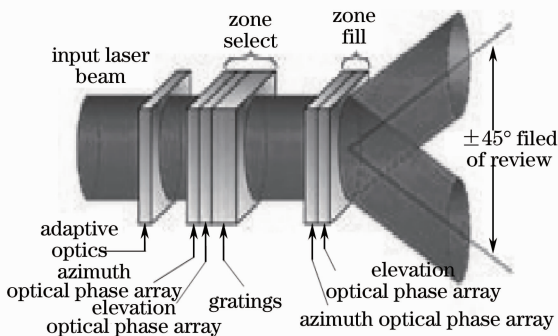


图 6 美国 APPLE 计划中光束控制部分结构简图

Fig. 6 Schematic of beam steering section of APPLE plan

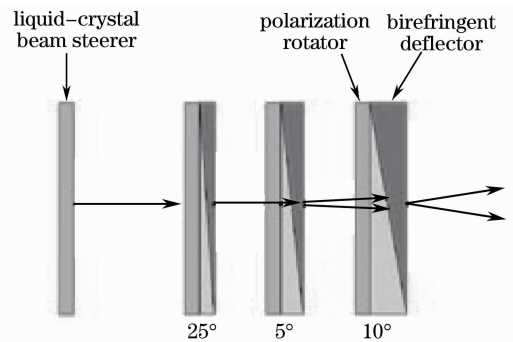


图 7 双折射棱镜实现角度偏转结构简图

Fig. 7 Schematic of birefringent prisms beam steering

4.3 液晶偏振光栅级联

液晶偏振光栅(LCPG)基于 QHQ(quarter-waveplate, half-waveplate, quarter-waveplate)原理实现。QHQ 原理如图 8(a)所示^[1,4],入射光经起偏器 a 变为线偏光,经过 1/4 波片 b 后变为圆偏振光,再经过半波片 c,最后经过 1/4 波片和起偏器出射,可以得到一束相位因子的圆偏振光。液晶偏振光栅实现原理如图 8(b)所示,入射光通过左旋右旋偏振控制,经过 LCPG 可实现两个不同方向的光束偏转。2011 年, Kim 等^[36]利用 LCPG 的方式实现了具有 80°视场,3.2°分辨率,88%~91%衍射效率的光束扫描。目前国内的南京大学等单位也在该方面开展了初步的理论研究^[37]。液晶偏振光栅的方式避免了电场边缘效应的影响,具有扫描范围大、效率高、频谱宽的特点,但只能实现准连续光束扫描,多层的级联方式也会对制备工艺及系统的稳定性提出更高要求^[1-4]。

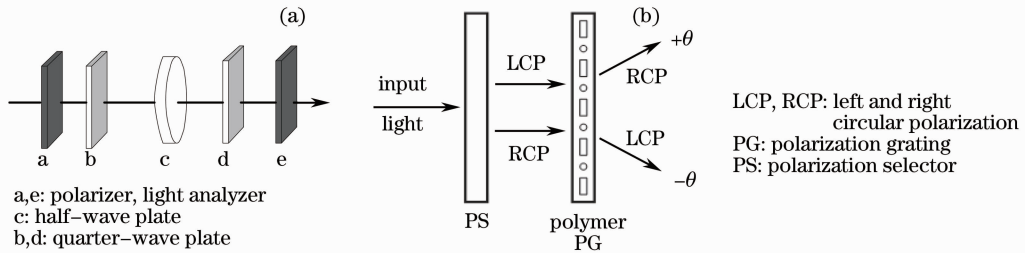


图 8 液晶偏振光栅原理简图。(a)QHQ 基本结构;(b)液晶光栅角度偏转结构简图

Fig. 8 Principle of LCPGs. (a) Basic setup of QHQ device; (b) schematic of LCPGs beam steering

4.4 液晶微透镜阵列

如图 9 所示^[1],光束通过三层液晶微透镜阵列组成的单元,通过对中间层液晶微透镜阵列(LCMLA)的控制,产生透镜阵列偏移,实现角度扫描。2008 年, Bourderionnet 等^[38]使用电光陶瓷阵列和液晶离散微透镜阵列,级联实现了 $\pm 12^\circ$ 的光束扫描。2010 年,美国空军研究室 Shi 等^[39]利用该技术实现了最大角度为 25° 的光束扫描。这种方式也可避免光学回程区影响,能在全波段范围内实现大角度光束扫描,在小角度范围内也可以实现高达 98%的衍射效率^[1,38]。但扫描角度过大时存在比较严重的渐晕,整个光学系统的装配误差等人为因素都会造成衍射效率的损耗^[3]。

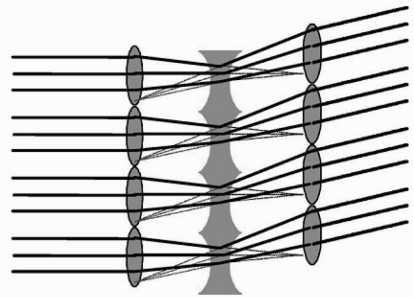


图 9 液晶微透镜阵列原理图

Fig. 9 Principle of LCMLA

5 结束语

机械式光束扫描是目前最为成熟、应用最为广泛的技术。它能够实现大视场、高功率光束扫描,但机械式扫描系统质量和体积较大,受机械惯性影响。声光式光束扫描技术在无线激光通信领域得到了广泛的应用。声光式扫描在数字信息处理功能、容量、稳定性等方面具有比较大的优势,但其扫描效率偏低,能够实现的扫描范围有限。与前面两种技术相比,液晶相控阵能够灵巧、大角度、无机械惯性地实现高精度光束扫描,在激光雷达和激光通信应用领域更具潜力,已成为国际上的研究热点。国内液晶相控阵相关领域也开展了一定的研究,但均未取得关键性技术突破,从目前情况看,体全息级联和 LCOPA 级联的形式以及液晶偏振光栅级联的形式具有较好的应用价值和研究前景,但仍存在很多工程难题,因此加大相关新概念、新器件和新材料的研究力度,建立更为准确的理论计算模型,研究可行的液晶光束扫描技术方案,具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- 1 P F McManamon, P J Bos, M J Escuti, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. Proc IEEE, 2009, 97(6): 1078-1096.

- 2 P F McManamon. An overview of optical phased array technology and status[C]. SPIE, 2005, 5947: 594701.
- 3 K Aokik, H Kuroda, S. Yashima, *et al.*. Wide and fine pointing mechanism with flexible supports for optical inter-satellite communication[C]. SPIE, 1999, 3615: 222–229.
- 4 Zou Yongchao, Si Lei, Tao Rumao, *et al.*. Research progress of liquid crystal based light beam steering technique[J]. Laser Technique, 2011, 35(3): 293–304.
邹永超, 司磊, 陶汝茂, 等. 基于液晶材料的光束偏转技术研究进展[J]. 激光技术, 2011, 35(3): 293–304.
- 5 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin, *et al.*. New technology and new configuration for high energy laser system[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2008, 45(1): 37–42.
周朴, 许晓军, 刘泽金, 等. 高能激光系统的新技术和新结构[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(1): 37–42.
- 6 Chen Wenyong. Development trend of acoustooptic technology and its applications in military [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 1994, 16(2): 21–28.
陈文友. 声光技术的发展动态及其在军事上的应用[J]. 压电与声光, 1994, 16(2): 21–28.
- 7 Chen Fei. Study on High Power Nd:YAG Laser Scanning Galvanometer System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 1–17.
陈飞. 大功率 Nd:YAG 激光振镜扫描系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 2–17.
- 8 Yang Shaocheng, Liu Xiaping, Gong Runze, *et al.*. Galvanometers based laser beam deflections and scanning system for graphic imaging[J]. Laser and Infrared, 1997, 27(2): 95–99.
杨少晨, 刘夏萍, 宫润泽, 等. 振镜式光束扫描/偏转系统及成像过程的研究[J]. 激光与红外, 1997, 27(2): 95–99.
- 9 Wang Chunhui, Ji Yiqing, Gao Long, *et al.*. Optical design of large working area $f\theta$ scanning lens for 2 μm laser heterodyne interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1216002.
王春晖, 季一勤, 高龙, 等. 2 μm 激光外差干涉系统中大口径 $f\theta$ 扫描系统的光学设计[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1–5.
- 10 Ye Qiao. A Study of High Speed Galvanometer and Practise [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. 2–17.
叶乔. 高速振镜理论研究及实践[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004. 2–17.
- 11 Zhao Yi, Liu Bingheng. Pillow-shaped distortion correction algorithm of galvanometric scanning system[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(3): 216–218.
赵毅, 卢秉恒. 振镜扫描系统的枕形畸变校正算法[J]. 中国激光, 2003, 30(3): 216–218.
- 12 Lu Yafei. Research on Fast/Fine Steering Mirror System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 21–30.
鲁亚非. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 21–30.
- 13 Wu Xin. Research on High-Performance Fast Steering Mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. 1–19.
吴鑫. 高性能快速控制反射镜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 1–19.
- 14 Francisc M Tapos, Derek J Edinger, Timothy R Hilgy, *et al.*. High bandwidth fast steering mirror[C]. SPIE, 2005, 5877: 587707.
- 15 Deng Yaochu. The Light-beam Pointing Stability Techniques Based on FSM[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 3–6.
邓耀初. 基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 3–6.
- 16 Ning Yu. Performance Test and Application Study of a Bimorph Deformable Mirror[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 23–35.
宁禹. 双压电片变形反射镜的性能分析与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 23–35.
- 17 L M Miller, M L Agronin, R K Bartman. Fabrication and characterization of a micromachined deformable mirror for adaptive optics applications[C]. SPIE, 1993, 1945: 421–430.
- 18 R Krishnamoorthy, T G Bifano, N Vandelli, *et al.*. Development of MEMS deformable mirrors for phase modulation of light[J]. Opt Engng, 1997, 36(2): 542–548.
- 19 T Bifano. Adaptive imaging; MEMS deformable mirrors[J]. Nature Photon, 2010, 5(1): 21–23.
- 20 Ma Wenyong, Yao Jun, Ren Hao, *et al.*. Design and analysis of MEMS 2D electrostatic scanning mirrors [J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(5): 296–299.
马文英, 姚军, 任豪, 等. MEMS 二维静电驱动扫描镜设计和分析[J]. MEMS 器件与技术, 2009, 46(5): 296–299.
- 21 Zhuang Xuye, Wang Weimin, Tao Fenggang, *et al.*. Development of non-perpendicular 2D MEMS tilt mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1845–1851.
庄须叶, 汪为民, 陶逢刚, 等. 非正交二维 MEMS 倾斜镜的研制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1845–1851.
- 22 Wen Tao. Study on the Key Techniques of an Acquisition Tracking and Pointing System in Wireless Laser Communication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 1–118.
温涛. 无线激光通信中 ATP 关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. 1–118.
- 23 Xue Linsheng, Wang Yan. Development and outlook of optical space communication[J]. Chinese J Electron Devices, 2003, 26(3): 287–294.

- 薛琳生, 王 岩. 空间光通信技术的发展与展望[J]. 电子器件, 2003, 26(3): 287-294.
- 24 Wen Tao, Wei Jibo, Ma Dongtang, *et al.*. A novel method of increase acousto-optic deflector spatial resolution[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(12): 1631-1635.
- 温 涛, 魏急波, 马东堂, 等. 提高声光偏转器空间分辨率的方法研究[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1631-1635.
- 25 Liu Biao, Zhang Xiaorong, Yi Ping. Study on the acousto-optic deflector based on the ZnO piezoelectric film [J]. Piezoelectrics and Acoustooptic, 2012, 34(1): 21-26.
- 刘 彪, 张晓容, 易 平. 采用 ZnO 压电薄膜的声光偏转器研制[J]. 压电与声光, 2012, 34(1): 21-26.
- 26 Wei Shengyu. The Research and Simulation Analysis of the Acousto-Optic Steering System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 1-15.
- 韦胜钰. 声光偏转系统特性研究及仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 1-15.
- 27 R A Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Appl Opt, 1972, 11(3): 613-616.
- 28 Terry A Dorschner. Adaptive photonic phase locked elements[C]. MTO Symposium, 2007.
- 29 Cui Rongliang. The Research of a New Electric-Optic Beam Scanning System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. 1-33.
- 崔荣亮. 一种新型的电光式扫描系统的设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002. 1-33.
- 30 Long Fei. The Research of Inertialess Light-beam Scanning Control Technology[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 5-24.
- 龙 飞. 无惯性光束扫描控制技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 5-24.
- 31 Anna Linnenberger, Steve Serati, Jay Stockley. Advances in optical phased array technology[C]. SPIE, 2006, 6304: 63040T.
- 32 Sun Liang. The Study of Light-Beam Scanning Based on the Optical Phased Array[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006. 39-57.
- 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, 2006. 39-57.
- 33 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1-8.
- 张 建, 徐 林, 吴丽莹. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1-8.
- 34 Paul F McManamon. New technologies and architectures for laser systems[C]. SPIE, 2004, 5413: 1-14
- 35 Lingjiang Kong, Ying Zhu, Yan Song, *et al.*. Beam steering approach for high-precision spatial light modulators[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(11): 1085-1091.
- 36 J Kim, M N Miskiewicz, S Serati. Demonstration of large-angle nonmechanical laser beam steering based on LC polymer polarization gratings[C]. SPIE, 2011, 8052: 80520T.
- 37 Wei Hu, Abhishek Kumar Srivastava, Xiao Wenlin, *et al.*. Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(11): 111116.
- 38 J Bourderionnet, M Rungenhagen, D Dolfi, *et al.*. Continuous laser beam steering with micro-optical arrays: experimental results[C]. SPIE, 2008, 7113: 71130Z.
- 39 L Shi, J R Shi, P F McManamon. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light[J]. App Opt, 2010, 49(3): 409-421.