

光波导阵列相控阵扫描技术研究进展

金亚东 闫爱民 胡志娟 张浩 吕聪玲

上海师范大学数理学院光电材料与器件重点实验室, 上海 200234

摘要 光学相控阵技术是一种灵活、快速、精确的非机械光束扫描技术,在新体制激光雷达和空间激光通信等领域有重要应用。综述了光波导阵列相控阵扫描技术的研究进展,对基于LiNbO₃、GaAs/AlGaAs、磷化铟(InP)、绝缘Si等材料的光学相控阵技术进行了详细介绍,讨论了这几种材料的光波导阵列相控阵的优缺点和适用性,对光波导光学相控阵技术发展前景进行了展望。

关键词 光学器件; 光学相控阵; 光波导阵列相控阵; 非机械扫描

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.080002

Research Progress of Optical Waveguide Phased Array Scanner

Jin Yadong Yan Aimin Hu Zhijuan Zhang Hao Lü Congling

Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, College of Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract The technology of optical phased array is well known for its flexibility, high speed and accurate beam scanning. This technology is used in the new systems of laser radar, space laser communications and other important related applications. This paper reviews the research progress of optical waveguide phased array technology and introduces the latest research progress of optical phased array based on LiNbO₃, GaAs/AlGaAs, InP, and silicon-on-insulator materials in detail. We also discuss the characteristics and advantages of the optical waveguide phased array. The applications in laser scanning imaging, laser radar, laser displays, optical switches, laser printing and other military and civilian areas are discussed. Finally, the development prospect of the optical waveguide phased array technology is proposed.

Key words optical devices; optical phased array; optical waveguide phased array; non-mechanical scanning

OCIS codes 230.4110; 280.5110; 250.7360

1 引言

光学相控阵是一种新型的非机械光学扫描技术,它同传统的转镜机械扫描、声光扫描等扫描技术相比具有扫描速度快、分辨率高等优点,在激光雷达、激光通信、激光电视、高速激光打印机等领域有广泛的应用。光学相控阵源于微波相控阵,采用电子可编程方式控制光学孔径上的相位分布来控制光束的方向和形状,使光束波前在设定的方向上彼此同相,从而获得互相加强的干涉,能够提供可编程随机无惯性电子波束扫描。自从20世纪60年代以来,随着微波相控阵技术的问世,人们就试图将相控阵的概念延伸到光波段,受限于光波波长较微波波长短得多,为满足光波波长量级的要求,因而相应器件的单元尺寸必须很小,制造难度变得非常大。随着制造工艺的进步,直到1972年,Meyer^[1]用钽酸锂移相器制成了第一个一维光学相控阵。该光学相控阵由46个光移相器组成,每一个光移相器都有各自独立的控制电极,从而可以对光束相位进行灵敏的控制。通过对该实验装置的测试,验证了光学相控阵技术的基本理论,奠定了光学相控阵技术的发展基础^[2]。

收稿日期: 2014-02-21; 收到修改稿日期: 2014-03-25; 网络出版日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61307008)、上海市教委科研创新项目(13YZ063)、上海师范大学校级项目(SK201311, SK201214, SK201402)

作者简介: 金亚东(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: jinyadong1989@126.com

导师简介: 闫爱民(1976—),女,博士,副研究员,主要从事衍射光学和激光技术等方面的研究。

E-mail: yanaimin@shnu.edu.cn(通信联系人)

光波导相控阵扫描属于低惯性非机械扫描,由于其具有波束指向灵活、扫描速度快、角度驱动范围大等扫描特点,而且易于实现小型化、集成化和多功能化,因而倍受各国关注^[3-8]。1962年,Yariv等^[9]从P-N结中观测到平板层中的光波导现象。此后各国开始了对各种功能光波导器件的研制。美国国防部高级研究计划局(DARPA),日本,德国,以及国内的中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西安电子科技大学等^[10],进行过相关工作的研究。本文将着重对不同类型光波导相控阵扫描器的性能和结构进行介绍。

2 光波导相控阵的工作原理

光波导相控阵是由横向相位调制器构成的波导阵列,每个相位调制器都由独立的电极进行相位控制。对于较大阵列可应用“子阵相位补偿技术”,即通过控制每个阵列两端的电位进行相位补偿,从而来提高扫描精度,减少线控数目。选择合适的波导光学厚度和长度可以将全波电压控制在10 V以下。与其他光学相控阵相比,波导光学相控阵消除了液晶光学相控阵响应慢的缺点^[11-13],同时克服了电光陶瓷光学相控阵控制电压高、扫描角度小的缺点^[14-16]。另外,它可以通过成熟的金属有机化学气相沉积技术进行大规模生产,开辟了光学相控阵的新方向。

光波导是集成光学调制器、开关、过滤器、传感器和非线性光学频率转换器的基本组件。所有这些设备特别是共振结构的性能取决于波导衰减。光波导光学相控阵的核心部件是光波导阵列。光波导阵列包含多个光波导结构。每一个光波导结构就是一个光波导光学相控阵相移单元,即一个阵元结构,它是由光波导芯层和两侧包层构成的。由高折射率电光晶体材料构成的光波导芯层组成了主要的光通道,并且它们中间的电极层被相邻两个光波导单元所共用。根据晶体的电光效应,电压控制系在不同的电极层上设置不同的电势,可以在芯层内控制各个光波导的电场,从而使不同芯层产生不同的附加折射率差,这些附加折射率差使出射截面光场上产生不同的附加相位差,这些按一定规律分布的相位差又引起输出光束发生偏转,这就是光波导光学相控阵的基本工作原理^[12,17-19]。

3 光波导阵列相控阵扫描器的研究进展

3.1 基于LiNbO₃晶体的光波导相控阵扫描器

1980年Jackel^[20]第一次在240 °C时融化LiNbO₃波导并用离子交换的方法制造出了X切向的LiNbO₃晶体。这提供了第一个直接证据表明离子交换发生在LiNbO₃晶体上。1982年Jackel等^[21]首次利用苯甲酸和LiNbO₃进行质子交换制备出了第一个LiNbO₃光波导,并且将其广泛应用于制作相位调制器。1985年Regener等^[22]提出了LiNbO₃光波导谐振腔,并且在低精细度条件下通过对比集成光学谐振器确定了波导衰减系数的上限。

1995年Tomita等^[23]制造出了直接结合的LiNbO₃单晶光波导,提出了不使用任何粘结剂制造光波导的新方法,并且发现结合界面非常均匀地在原子标度下直接接合,这种方法非常有吸引力,而且这种光学波导表现出来的高性能使其能够在更多的领域中得到应用。

1998年Tsai等^[24]提出了应用质子交换法研制的LiNbO₃波导二维声光扫描仪。一个波长为0.6328 μm的二维波导光束扫描,使用声光共面的布拉格衍射和共线的导模将衬底的辐射模式转换成沿X方向传播的LiNbO₃波导。两个表面声波的中心频率分别为500 MHz和200 MHz,传播方向在Y轴和X轴。在1 mm大小的光束孔径上,二维扫描的束斑总数为720个,水平垂直扫描为1840个束斑。通过简单的大带宽表面声波换能器和更大的光束孔径可以很容易地提高束斑的个数。通过优化设计LiNbO₃波导和表面声波的结构能有效地提高衍射效率。

2003年Tien等^[25]提出了外延生长的LiNbO₃薄膜电光波导的光束扫描和偏转。该实验电路在2.7 mm的光路上有5 pF的电容量,在4°的光束扫描范围内有10个束斑,用于偏转和扫描光束的电光LiNbO₃波导,实现了偏转角和外加磁场的连续变化,光束偏转率得到了优化,使得LiNbO₃光波导在光调制、光导开关、光束扫描等领域有广泛应用。

2005年Pertsch等^[26]设计出了空间超快变频LiNbO₃波导阵列开关(图1)。该波导阵列有101个阵列,阵列长为5 cm,相邻波导阵列之间的距离为13.5 μm,波导损失为 $\alpha_c = 0.4$ dB/cm, $\alpha_{\gamma} = 0.2$ dB/cm,空间波导

扫描阵列的输出波长为 1550.7 nm,功率为 13 mW,输出波导距离中心位置有 12 个阵列。

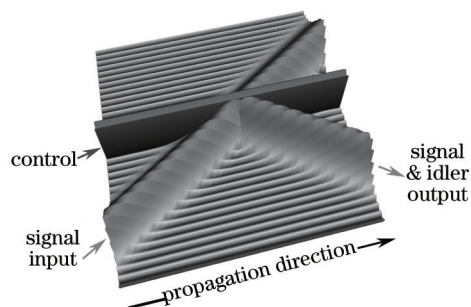


图1 优化设计的非线性波导阵列信号光束全光控制开关

Fig.1 Optimally designed nonlinear waveguide array signal beam all-optical control switch

3.2 基于 GaAs/AlGaAs 材料的光波导相控阵扫描器

20世纪80年代,Hobbs等^[27]在美国空军资助下,提出了一种GaAs光波导电光相控阵光束扫描装置,并给出了二维空间扫描的实验结果,并且把该技术应用在激光雷达、激光扫描等军事项目上。利用5个单元GaAs阵列在波长10.6 μm时得到±20°的偏转和大于500 kHz的扫描速率,相位变化的全波电压小于2 V。1991年,Wight等^[28]设计了由GaAs/AlGaAs光波导材料制成的一维光学相控阵光束扫描器,该光学扫描器具有反应速度快、性能优良等特点。这种新型波导阵列电光扫描器是基于晶体的电光效应,实现了对激光束空间扫描的快速可控调节。通过对每个相互独立的相位调制单元的控制,在30 V电压下实现了远场最大光束扫描角度为±20°。之后,Vasey等^[29]提出了43个脊形AlGaAs集成光波导相位调制阵列,光束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,然后从另一个光栅耦合器输出,在使用较少控制线的条件下,从而实现连续的光束扫描。但这种波导相控阵技术的光学传输损耗较大,通常可以达到20 dB/cm。1992年Sullivan等^[30]提出了基于AlGaAs/GaAs光波导技术的1.32 μm大小转换延迟元件的光控相控阵天线。该集成光时移网络由一个双级联2×2线性电光开关和1.32 μm的GaAs波导光学延时线组成,该网络用来研究实时波束形成的相控阵天线。1994年,Jenkins等^[31]研制了1×N和N×N的自成像多模GaAs/AlGaAs集成波导光开关。每个装置包括一个或多个输入指南,一个多路分路器,可单独寻址的电光波导移相器,一个多路复合器和一个阵列输出端。通过控制施加到电光导板两端的电压,光从任何一个输入端可以切换到任何一个输出端。例如1×10和10×10阵列,实验中最大串扰和插入损耗的值分别为-10 dB和-12 dB。

国内这方面的研究也比较早。1997年开始,石顺祥等对基于光波导材料的电光相控阵扫描技术进行了深入研究,证明了光波导阵列电光扫描器的驱动电压低、扫描速度快的特点^[32-35]。2005年,徐安士等提出了非周期分布阵列波导光学相控阵技术,该技术在旁瓣抑制和器件制作上都有了很大进步^[36-37]。

3.3 基于 InP 的光波导相控阵扫描器

1986年,Alferness等^[38]证明了InP波导的高效性能。当滤波器带宽小于10⁻¹⁰ m时,可使谐振腔的滤波损失降低到1 dB以下,说明InP波导在很多器件的应用上有很大的改进空间。1992年,Zirngibl等^[39]通过连接两个星型耦合器的波导光栅在InP基底上建立了一个单片15×15的波分复用器,该器件有16个波导阵列,其相邻信道之间的串扰小于18 dB,芯片上插入损耗通常是2~4 dB。1996年,Soole等^[40]研制出了方形截面的波导偏振无关的InP阵列波导滤波器。在1.5 μm波导上操作得到一个8 nm×1.6 nm的过滤器,从而获得小于0.01 nm的TE-TM模移位和小于0.1 dB的偏振相关损耗。光纤之间的插入损耗仅为6.7~12 dB,信道串扰低于-26 dB。

1996年,Bissersur等^[41]提出了基于InP独立偏振的波导相控阵波分复用器,该脊型波导的4通道和16通道的尺寸分别为0.7 mm×0.8 mm和1.1 mm×1.1 mm,且串扰分别低于-16 dB和-14 dB。1997年Kohtoku等^[42]研制出基于InP基底的大规模阵列波导光栅复用器(图2),该器件有64个输入和输出通道,信道间隔为0.4 nm(50 GHz),芯片尺寸仅为3.6 mm×7.0 mm,相邻信道的串扰低于-20 dB。

2005年,Pruessner等^[43]在InP衬底上制造了光波导MEMS开关,该器件总尺寸为500 μm×5 μm,核心部分横截面大小为2 μm×2 μm。由于波导的传播距离很短,所以开关的反应时间仅为4 μs。2008年,

Takenaka 等^[44]提出 InP-InGaAsP 集成的 1×5 光波导开关, 可用于阵列移相器, 使用 InGaAsP 波导的载体引起折射率变化, 适用于大容量的波分复用光分组交换路由器。2009 年, Tomofuji 等^[45]提出了基于 InP 的多模干涉光波导动态开关特性研究。2010 年, Soganci 等^[46]研制了集成在 InP 上的 1×16 单片光波导开关(图 3), 该设备在芯片上的损失低于 7 dB, 并且使用一个可编程电子电路时能动态切换到 16 个输出端, 响应时间仅为 11 ns。

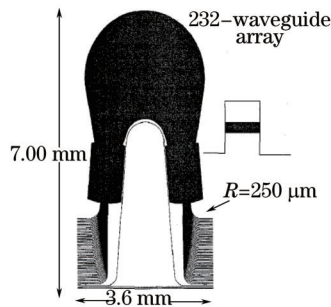


图 2 信道间隔为 0.4 nm(50 GHz)的 64×64 阵列波导光栅复用器示意图

Fig.2 Schematic of 64×64 arrayed waveguide grating multiplexer with 0.4 nm (50 GHz) channel spacing

3.4 基于 Si 材料的光波导相控阵扫描器

1993 年, Tang 等^[47]研制了在绝缘体硅上的脊形光波导结构, 研究了脊形波导尺寸对模式和损耗特性的影响。1997 年, Trinh 等^[48]研制了相控阵波长多路复用器, 使波导技术在绝缘体硅上得以实现。这种四通道波分复用器信号间隔为 1.9 nm, 相邻信道的串扰低于 22 dB, 通道的插入损耗低于 6 dB。2000 年, Pearson 等^[49]在绝缘体硅上制成了具有 8 个通道, 波长为 1550 nm, 芯片尺寸小于 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的阵列波导光栅。2007 年, 加州大学 Gabriel 等^[50]研制成功了当时最复杂的硅相控阵芯片(图 4), 尺寸仅为 $3.2 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$, 该器件是一个在 Q 波段发射信号的 16 阵列相控阵芯片, 具有阵元之间排列均匀、耦合低、耗电低和体积小等特点。这种可发出波束的紧凑型芯片, 在尺寸、重量、性能和造价上均实现了突破。

2009 年, Hosseini 等^[51]提出基于大角度非等间距的硅纳米薄膜相控阵结构的光束转向器件(图 5), 通过优化介质波导结构并且加横向磁场极化, 实现了一级光学相控阵对二维光束扫描的最小旁瓣电压和更大功率效率。当设计精度为 800 nm, 阵元个数为 128 个, 2D 波束转向角在 $\pm 60^\circ$ 和 $\pm 45^\circ$ 范围内时, 该器件将功率效率从 18.0% 提高到 32.0%, 旁瓣电平由 -8.5 dB 提高到 -3.6 dB。

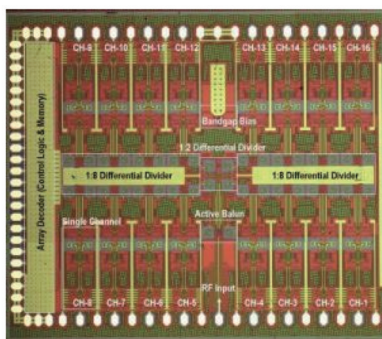


图 4 Gabriel 教授研制的硅相控阵芯片
Fig.4 Silicon phased array chip developed by Gabriel

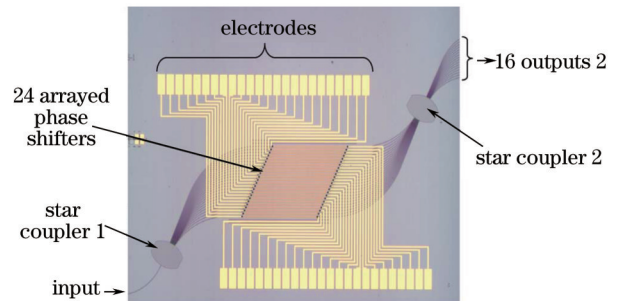


图 3 $4.1 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$ 大小的 1×16 集成的 InP 光波导开关

Fig.3 1×16 size integrated InP optical waveguide switch, with total device size of $4.1 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$

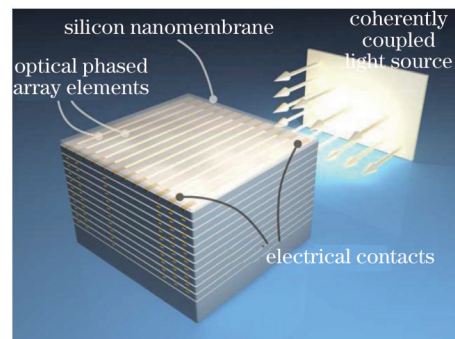


图 5 基于硅纳米薄膜的光学相控阵光束转向原理图
Fig.5 Schematic of silicon nanomembrane-based OPA beam steering

2012 年, Doyle 等^[50]使用硅光学相控阵实现了二维光束的转向, 该器件由一个 16 通道独立调谐的硅光波导表面光栅光学相控阵列构成, 实现了对二维光束的控制。该装置在 $0.6^\circ \times 1.6^\circ$ 的波束宽度和 $20^\circ \times 14^\circ$ 的远场视图中有 10 dB 的背景抑制。2012 年, Okamoto 等^[53]提出二氧化硅和硅波导器件的进步和技术挑战。2013 年, DARPA 验证了二维光学相控阵技术, 这种技术可用于先进激光雷达和其他国防应用^[54]。该相

控阵列的大小为 $576 \mu\text{m} \times 576 \mu\text{m}$, 大约和针头相当, 包含了 4096 个 (64×64) 集成到一块硅芯片上的纳米天线(图 6)。未来发展方向是利用新的微尺寸加工工艺, 将电子和光学部件集成到单个芯片上, 例如硅激光器单元及其他光学器件、硅基控制与处理电子设备等直接集成到芯片上。

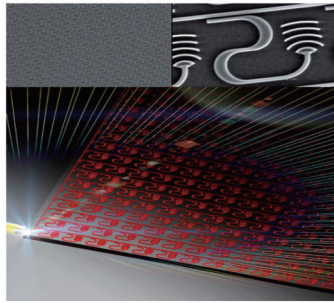


图 6 复杂的二维光学相控阵技术

Fig.6 Complex 2D optical phased array technology

2013 年, DeRose 等^[56]设计出了电控光束转向有源相控阵金属纳米天线(图 7)。该纳米天线光学相控阵制作在一个兼容硅光子的 CMOS 上, 并且通过硅波导反馈与集成欧姆热光相位转向相结合实现 2π 相位转向, 控制电压只有 15 mV。一个 1×8 集成移相器大小为 $6 \sim 9 \mu\text{m}$, 通过控制功率可以实现光束在正常 8° 晶片的表面发生偏转。

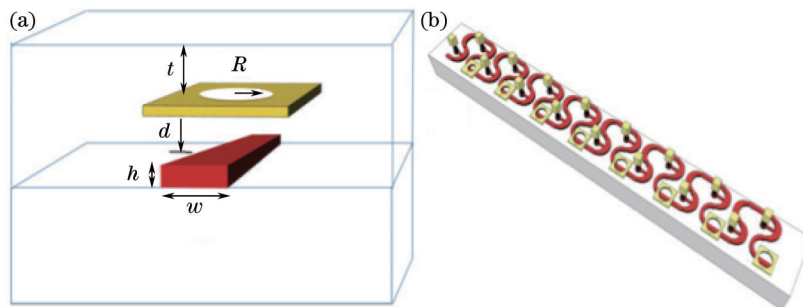


图 7 (a) 波导反馈圆形孔径天线示意图; (b) 1×8 集成热光移相器的线性天线阵列示意图

Fig.7 (a) Schematic of the waveguide fed circular aperture antenna; (b) schematic of 1×8 linear antenna array with integrated thermo-optic phase shifters

2014 年, Kwong 等^[56]设计了二维光束转向的硅光学相控阵芯片(图 8)。该设备用 250 nm 的硅波导制造在硅绝缘体平台上, 每个器件上有 16 个相控阵单元, 该系统由每个通道功率为 20 mW 的电源开关来控制光束转向系统。使用硅波导与多晶硅覆盖的光栅使远场波束宽度增加, 同时降低常规浅蚀刻光栅的蚀刻精确度。转向视场为 $20^\circ \times 15^\circ$, 旁瓣电平大于 10 dB, 波束宽度为 $1.2^\circ \times 0.5^\circ$ 。2013 年, Jared 等^[67]提出了一种新型的超低损耗氮化硅波导集成芯片, 在 1590 nm 波长下超低损耗波导最小传播损耗为 1.2 dB/m。

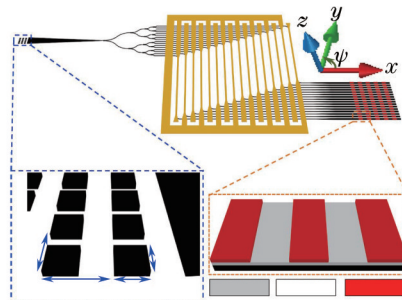


图 8 装置示意图

Fig.8 Schematic of the device

4 结束语

光波导阵列相控阵扫描器克服了以往机械转向扫描的缺点, 具有波束指向灵活、扫描速度快、角度驱动

范围大等扫描特点。随着LiNbO₃、GaAs/AlGaAs、InP、Si等材料相继应用到光学相控阵中,光波导阵列相控阵扫描器的小型化和集成度更高,在激光快速扫描、高精度波束指向等领域将有越来越广泛的应用。更多波导材料的发现和应用将为波导光学相控阵扫描技术提供更大的发展空间。

参 考 文 献

- 1 R Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 613–616.
- 2 Yan Aimin, Zhi Ya'nan, Sun Jianfeng, *et al.*. Recent development of optical phased array scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 102801.
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(10): 102801.
- 3 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.
- 4 P F McManamon, P J Bos, M J Escuti, *et al.*. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems [J]. IEEE Xplore, 2009, 97(6): 1078–1096.
- 5 A Linnenberger, S Serati, J Stockley. Advances in optical phased array technology[C]. SPIE, 2006, 3604: 63040T.
- 6 P McManamon. An overview of optical phased array technology and status[C]. SPIE, 2005, 5947: 59470I.
- 7 Yan Zhou, Xu Jing. Research development of beam scanning technology[J]. Photovoltaic Technology, 2013, 28(4): 1–9.
闫 舟, 徐 景. 光束扫描技术研究进展[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 1–9.
- 8 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.
- 9 A Yariv, R Leite. Dielectric-waveguide mode of light propagation in P-N junctions[J]. Applied Physics Letters, 1963, 2(3): 55–57.
- 10 J Farina, R Grasso, R Hobbs. Two-dimensional scanning with laser electro-optic phased array devices (LEOPARD) [C]. IEEE Laser and Electro-Optics Society Conference Proc, 1989, 2(4): 95–96.
- 11 J Stockley, S Serati. Advances in liquid crystal beam steering[C]. SPIE, 2004, 5550: 555032.
- 12 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.
- 13 D Resler, D Hobbs, R Sharp, *et al.*. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. Optics Letters, 1996, 21(9): 689–691.
- 14 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]. Applied Optics, 2001, 40(34): 6236–6241.
- 15 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.
- 16 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]. 中国专利, 1997, 专利编号 CA97119771,7.
- 17 Shi Shunxiang, Li Jiali, Wang Guangsheng, *et al.*. A new type of rapid narrow laser beam electro-optic 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.
- 18 Li Jiali, Shi Shunxiang, Wang Guangsheng, *et al.*. Optical waveguide effect of a new type of rapid narrow laser beam electro-optic scanner[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(8): 1654–1658.
李家立, 石顺祥, 王广生, 等. 新型光波导阵列电光快速扫描器的光波导效应[J]. 光子学报, 2002, 31(8): 1654–1658.
- 19 Liang Huawei, Shi Shunxiang. Theory and Experiment Study on Waveguide Optical Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
梁华伟, 石顺祥. 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.
- 20 J L Jackel. Optical waveguides in LiTaO₃: silver lithium ion exchange[J]. Applied Optics, 1980, 19(12): 1996–1999.
- 21 J L Jackel, C Rice, J Veselka. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO₃[J]. Applied Physics Letters, 1982, 41(7): 607–608.

- 22 R Regener, W Sohler. Loss in low-finesse Ti:LiNbO₃ optical waveguide resonators[J]. Applied Physics B, 1985, 36(3): 143-147.
- 23 Y Tomita, M Sugimoto, K Eda. Direct bonding of LiNbO₃ single crystals for optical waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(12): 1484-1485.
- 24 C S Tsai, Q Li, C L Chang. Guided-wave two-dimensional acousto-optic scanner using proton-exchanged lithium niobate waveguide[J]. Fiber & Integrated Optics, 1998, 17(3): 157-166.
- 25 P Tien, S Riva-Sanseverino, A Ballman. Light beam scanning and deflection in epitaxial LiNbO₃ electro-optic waveguides[J]. Applied Physics Letters, 2003, 25(10): 563-565.
- 26 T Pertsch, R Iwanow, R Schiek, *et al.*. Spatial ultrafast switching and frequency conversion in lithium niobate waveguide arrays[J]. Optics Letters, 2005, 30(2): 177-179.
- 27 R Hobbs, A Cantor, D Grantham, *et al.*. Laser electro-optic phased array devices (LEOPARD)[C]. Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1988. 94-95.
- 28 D Wight, J Heaton, B Hughes, *et al.*. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(8): 899-901.
- 29 F Vasey, F Reinhart, R Houdre, *et al.*. Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array[J]. Applied Optics, 1993, 32(18): 3220-3232.
- 30 C T Sullivan, S D Mukherjee, M K Hibbs-Brenner. Switched time-delay elements based on AlGaAs/GaAs optical waveguide technology at 1.32 μm for optically controlled phased-array antennas[C]. SPIE, 1992, 1703: 264-271.
- 31 R Jenkins, J Heaton, D Wight, *et al.*. Novel 1×N and N×N integrated optical switches using self-imaging multimode GaAs/AlGaAs waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(6): 684-686.
- 32 Wang Li, Shi Shunxiang, Li Jiali. Research on optical waveguide scanning technique based on GaAs/AlGaAs[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(1): 37-39.
王莉, 石顺祥, 李家立. 基于 GaAs/AlGaAs 光波导扫描技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(1): 37-39.
- 33 Li Jiali. Study on Waveguide Optical Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
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.
- 34 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Study on characteristics of an optical waveguide array in a novel type of electro-optic 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.
- 35 Liang Huawei. Theory and Experiment Study on Waveguide Optical Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
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.
- 36 F Xiao, W Hu, A Xu. Optical phased-array beam steering controlled by wavelength[J]. Applied Optics, 2005, 44(26): 5429-5433.
- 37 F Xiao, G Li, A Xu. Cascade arrangement of irregular optical phased arrays[J]. Optics Communications, 2008, 28(1): 1945-1949.
- 38 R Alferness, C Joyner, M Divino, *et al.*. Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(3): 125-127.
- 39 M Zirngibl, C Dragone, C Joyner. Demonstration of a 15×15 arrayed waveguide multiplexer on InP[J]. Photonics Technology Letters, 1992, 4(11): 1250-1253.
- 40 J Soole, M Amersfoort, H Leblanc, *et al.*. Polarisation-independent InP arrayed waveguide filter using square cross-section waveguides[J]. Electronics Letters, 1996, 32(4): 323-324.
- 41 H Bissessur, P Pagnod-Rossiaux, R Mestric, *et al.*. Extremely small polarization independent phased-array demultiplexers on InP[J]. Photonics Technology Letters, 1996, 8(4): 554-556.
- 42 M Kohtoku, H Sanjoh, Y Kadota, *et al.*. Polarization independent semiconductor arrayed waveguide gratings using a deep-ridge waveguide structure[J]. IEICE Transactions on Electronics, 1998, E81-C(8): 1195-1204.
- 43 M W Pruessner, K Amarnath, M Datta, *et al.*. InP-based optical waveguide MEMS switches with evanescent coupling mechanism[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(5): 1070-1081.
- 44 T Takenaka, A A Takeda, S S Nakano, *et al.*. InP - InGaAsP integrated 1 times 5 optical switch using arrayed phase shifters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(3): 1063-1065.

- 45 S Tomofuji, S Matsuo, T Kakitsuka, *et al.*. Dynamic switching characteristics of InGaAsP/InP multimode interference optical waveguide switch[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23380–23388.
- 46 I M Soganci, T Tanemura, K Williams, *et al.*. Integrated phased-array 1×16 photonic switch for WDM optical packet switching application[C]. *IEEE International Conference on Photonics in Switching*, 2009. 1–2.
- 47 C Tang, G Reed, A Walton, *et al.*. Simulation of a low loss optical modulator for fabrication in SIMOX material[C]. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1993. 247–247.
- 48 P Trinh, S Yegnanarayanan, F Coppinger, *et al.*. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity[J]. *Photonics Technology Letters*, 1997, 9(7): 940–942.
- 49 M R Pearson, A Bezinger, A Delage, *et al.*. Arrayed waveguide grating demultiplexers in silicon-on-insulator[C]. *Symposium on Integrated Optoelectronics*, 2000. 11–18.
- 50 Gabriel M R, Kwang-Jin K, Jason M. World's most complex silicon phased-array chip developed at UC San Diego[OL]. [http://ucsdnews.ucsd.edu/archive/newsrel/science/10-07 Phased Array Chip DK-L. asp.](http://ucsdnews.ucsd.edu/archive/newsrel/science/10-07%20Phased%20Array%20Chip%20DK-L.asp) [2007-08-30].
- 51 A Hosseini, D Kwong, Y Zhao, *et al.*. Unequally spaced waveguide arrays for silicon nanomembrane-based efficient large angle optical beam steering[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(5): 1439–1446.
- 52 J Doyle, M R Heck, J Bovington, *et al.*. Free-space beam steering in two dimensions using a silicon optical phased array[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012.
- 53 K Okamoto. Progress and technical challenge for planar waveguide devices: silica and silicon waveguides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 14–23.
- 54 J Sun, E Timurdogan, A Yaacobi, *et al.*. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195–199.
- 55 C DeRose, R Kekatpure, D Trotter, *et al.*. Electronically controlled optical beam-steering by an active phased array of metallic nanoantennas[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 5198–5208.
- 56 D Kwong, A Hosseini, J Covey, *et al.*. On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 941–944.
- 57 Jared F Bauters, Michael L Davenport, Martijn J R Heck. Silicon on ultra-low-loss waveguide photonic integration platform[J]. *Optics Express*, 2013, 22(1): 544–555.