

基于 Crossbar 电光开关网络的偏振结构自由空间全光路由器

许俊^{1,2} 职亚楠¹ 侯培培¹ 孙建锋¹ 周煜¹ 刘立人¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检测技术重点实验室, 上海 201800

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了一种基于 crossbar 电光开关网络的偏振结构广义无阻塞自由空间全光路由器, 利用电光晶体开关作为入射光束的偏振控制器, 偏振分束棱镜作为分束元件, 提出自由空间 2×2 和 3×3 全光路由器的基本结构, 能够实现自由空间 2×2 和 3×3 全光路由器的任意通道的广义无阻塞连接, 并可以实现 $N \times N$ 全光路由器的拓展。这种自由空间全光路由器具有结构简单、插入损耗低、响应速度快、无阻塞等优点, 可以实现实时可编程控制, 适用于空天全光路由组网。对自由空间 2×2 全光路由器进行了实验验证, 实现了 2×2 光互连, 消光比达到 27 dB, 最大插入损耗约为 0.73 dB。

关键词 光通信; 自由空间全光路由器; 电光开关; 偏振分束棱镜; 无阻塞连接; crossbar 电光开关网络

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906006

Free-Space All-Optical Router with Polarization Structure Based on Crossbar Electro-Optic Switch Network

Xu Jun^{1,2} Zhi Yanan¹ Hou Peipei¹ Sun Jianfeng¹ Zhou Yu¹ Liu Liren¹

¹ Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology,

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A generalized non-blocking free-space all-optical router with polarization structure based on the crossbar switch network is designed. Electro-optic switch is used as the beam polarization controller and the polarization beam splitter is used as beam-separating element. Basic structures of the 2×2 and 3×3 all-optical routers are proposed. They can achieve generalized non-blocking connection between any two channels in free-space and realize the extension of the $N \times N$ all-optical router. The novel free-space all-optical router is simple and reliable. It has the advantages of fast response, non-blocking, and high speed. It is easy to realize the programmable logic controller (PLC) control function. It is suitable for air-space all-optical routing network. The experimental verification of the free-space 2×2 all-optical router is implemented and 2×2 optical interconnection is realized. The extinction ratio is 27 dB and the maximum insertion loss is 0.73 dB.

Key words optical communications; free-space all-optical router; electro-optic switch; polarization beam splitter; non-blocking connection; crossbar electro-optic switch network

OCIS codes 130.5440; 130.4815

1 引言

空间激光通信技术具有速率高、保密性强、体积

小、重量轻和功耗低等优点, 是未来空间高速率信息传输的必然选择。随着点对点空间激光通信技术的

收稿日期: 2013-04-07; 收到修改稿日期: 2013-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61275110)

作者简介: 许俊(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事电光晶体扫描与开关器件方面的研究。E-mail: xiju@siom.ac.cn

导师简介: 职亚楠(1980—), 男, 副研究员, 主要从事空间激光通信和扫描器等方面的研究。

E-mail: jackiezhi@siom.ac.cn

发展和成熟,研究的重点转向空基和天基平台激光通信节点之间的组网技术。传统的激光通信网络主要是沿用光-电-光这样的技术路线,存在电子学瓶颈问题,未来只有发展空天全光路由组网,才能实现真正的高速信息传输和分发^[1]。

目前全光互连网络主要是采用集成光学的方法在一块衬底上制作波导,用波导来实现光开关器件和光开关之间的互连。对于这种实现方式,光被束缚在波导中,大大限制了网络的容量,无法应用于空天全光路由组网,而且响应速度慢,光学元件不能重构,灵活性差^[2-3]。自由空间光学主要是用几何光学和物理光学来实现,能实现自由空间三维光互连^[4],由于系统中信号光一直在自由空间中传播,插入损耗较低,响应速度快,适合空天全光路由组网。自由空间光学中的光开关分为机械式光开关和非机械式光开关两种。机械式光开关主要为机电型光开关,优点是插入损耗低,不受偏振和波长的影响,缺点是响应时间长,一般在毫秒量级,有的还存在回跳抖动和重复性较差等问题,特别是很难实现很大数目的光开关集成^[5-6]。非机械式光开关主要有波导耦合型^[7]、声光调制型^[8]、电光调制型^[9]等,其中波导耦合型响应速度较慢,不易实现三维互连;声光调制型速度可达到微秒量级,但是不适合形成大型光交换矩阵,且损耗与波长有关。Riza 等^[10]提出了一种与偏振无关的自由空间 2×2 双向光纤光开关结构,采用 4 块偏振分束棱镜(PBS),4 块铁电液晶(FLC)偏振光开关及波片、全反镜等光学元件,并用它构造了 4×4 自由空间光开关。文献^[11-12]在此

基础上对器件进行了简化,分别提出了 2×2 和 4×4 自由空间光开关结构,所需光学元件少,结构紧凑,但是只能实现输入端口到输出端口的光路互连,依然不能实现任意端口的广义无阻塞互连。文献^[13]利用微谐振腔(MRR)实现无阻塞 4 端口光路互连并将其拓展到 N 端口的情况,但是系统串扰较大且响应速度较慢。

Crossbar 结构是一种最常见的光交换网络结构,具有结构简单、易于实现和扩展、无阻塞交换等优点,适合于构成光交换矩阵^[14-15]。电光晶体开关响应速度非常快,可达纳秒量级,纯固态结构无活动部件,其具有极高的可靠性与稳定性,方便拓展与集成,很容易组成多端口的光交换系统,另外还具有插入损耗低、串扰低、调制对比度高等特点^[16-17]。本文设计了一种基于 crossbar 电光开关网络的偏振结构自由空间全光路由器,利用电光晶体开关作为入射光束的偏振控制器,偏振分束棱镜作为分束元件,提出自由空间 2×2 和 3×3 全光路由器的两种基本结构,能够实现自由空间 2×2 和 3×3 全光路由器的任意通道的广义无阻塞连接,并可以实现 $N \times N$ 全光路由器的扩展。这种自由空间全光路由器可以有效匹配全光网络,实现任意端口之间的高速、大容量的信息传输和处理。

2 全光路由设计原理

自由空间全光路由器的基本单元是由电光晶体开关和偏振分束棱镜组成的 1×2 电光分束单元,如图 1 所示。

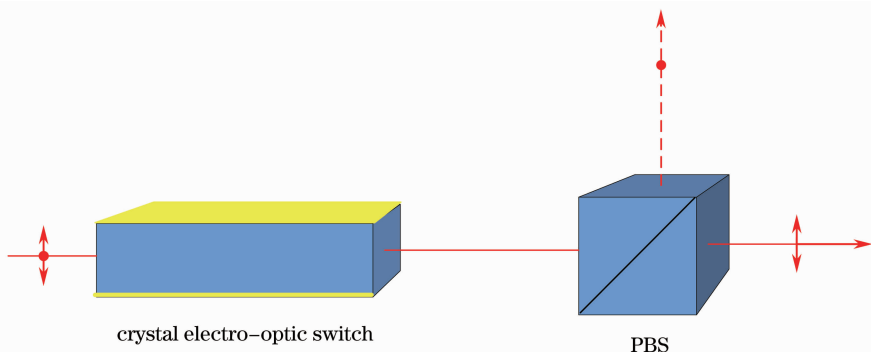


图 1 自由空间全光路由器的 1×2 电光分束单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1×2 electro-optic splitting unit in free-space all-optical router

晶体光轴平行于入射光束方向,金属电极对称地加在晶体的两个相对侧面上,沿着晶体轴向施加横向半波电压。一束波长为 λ 的偏振光垂直入射电光晶体开关。电光晶体开关作为偏振控制元件,控

制出射光束的偏振;偏振分束棱镜作为分束器件,控制出射光束的方向^[18]。通过控制不同电光晶体开关上外加半波电压的通断组合,实现光信号偏振方向的切换和选通输出,最终实现自由空间全光路由

器任意端口的光学互连。

互连网络一般是由节点开关单元和一定拓扑结构的规则互连组成,它可以方便地实现系统内部各单元器件之间或器件与外部其他系统之间整体的、可变的、无阻塞的互连。Crossbar 网络是一种最常见的光交换网络结构,它是由 N 个输入和 N 个输出构成的无阻塞开关网络,网络拓扑结构及路径控制简单,适用于并行计算机系统处理器间的相互连接和全光通信领域。

在由电光晶体开关和偏振分束棱镜组成的 1×2 电光分束单元的基础上,考虑到全光路由所要求的任意两端口实现广义无阻塞互连,对经典 crossbar 网络进行一些改进,提出了自由空间 2×2 全光路由器的一种基本结构和自由空间 3×3 全光

路由器的两种基本结构,并可以实现 $N \times N$ 全光路由器的扩展。

3 自由空间全光路由器设计

3.1 自由空间 2×2 全光路由器

提出的自由空间 2×2 全光路由器的原理图如图 2 所示。它由 7 块电光晶体开关(s1~s7)、8 块偏振分束棱镜(p1~p8)构成,可以实现四端口间任意两端口的广义无阻塞的光路互连。自由空间 2×2 全光路由器是自由空间 $N \times N$ 全光路由器的基本组成单元,以 2×2 全光路由器为节点开关单元,按照一定拓扑结构组合即可实现多端口之间广义无阻塞的光路连接。

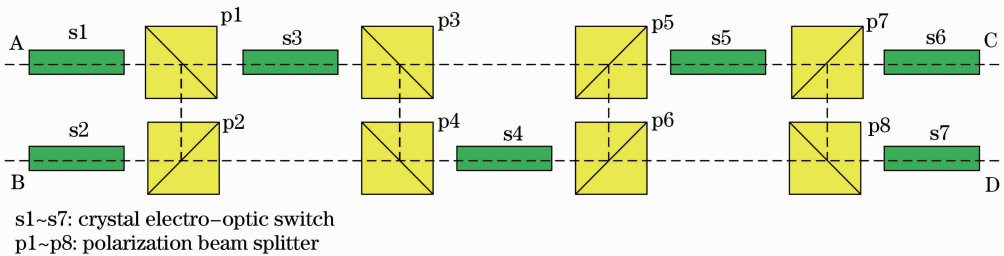


图 2 自由空间 2×2 全光路由器的实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 2×2 all-optical router in free-space

给出一种能迅速有效地实现任意无阻塞互连的控制算法,该算法包括信号流经开关位置的确定和开关状态的确定两部分。预设入射信号光为 p 光,状态 1 代表电光晶体开关上施加了半波电压,状态 0 代表电光晶体开关上无电压,则自由空间 2×2 全光路由单元的电光晶体开关对应的状态如表 1 所示。

表 1 自由空间 2×2 全光路由器的电光晶体开关对应的状态

Table 1 State of electro-optic switch of 2×2 all-optical router in free-space

Light path	s1~s7 electro-optic switch
A-B, C-D	100010
A-C, B-D	000000
A-D, B-C	0011100
B-A, C-D	0100010
A-B, D-C	0100001
B-A, D-C	0100001
A-C, D-B	0000000
C-A, B-D	0000000
C-A, D-B	0000000
A-D, C-B	0011100
D-A, B-C	0011100
D-A, C-B	0011100

3.2 自由空间 3×3 全光路由器

提出了自由空间 3×3 全光路由器的两种结构,其中结构一所需光学元件较少,插入损耗低,结构二易于集成和拓展,各有其优势。

自由空间 3×3 全光路由器结构一由 17 块电光晶体开关(s1~s17)、18 块偏振分束棱镜(p1~p18)、2 块半波片(HWP1、HWP2)构成,光路原理图如图 3 所示。该结构所需光学元件较少,插入损耗低,增强了系统的可靠性与稳定性。

自由空间 3×3 全光路由器结构二由 21 块电光晶体开关(s1~s21)、24 块偏振分束棱镜(p1~p24)、2 块全反射镜(M1、M2)构成,光路原理图如图 4 所示。该 3×3 全光路由器由三个相同的光学模块构成,每个模块皆为 2×2 全光路由单元。该设计具有结构对称性,方便集成和拓展,很容易组成多端口的光交换系统。需要指出的是,这两种结构都是基于 2×2 全光路由器设计的,二者如果化简为 2×2 路由器,结果是一样的对称结构。

3.3 自由空间 $N \times N$ 全光路由器

在自由空间 3×3 全光路由器结构二的基础上容易拓展形成自由空间 $N \times N$ 全光路由器,实现自

由空间中 $2N$ 端口之间的任意无阻塞互连。自由空间 $N \times N$ 全光路由器装置结构图如图 5 所示。

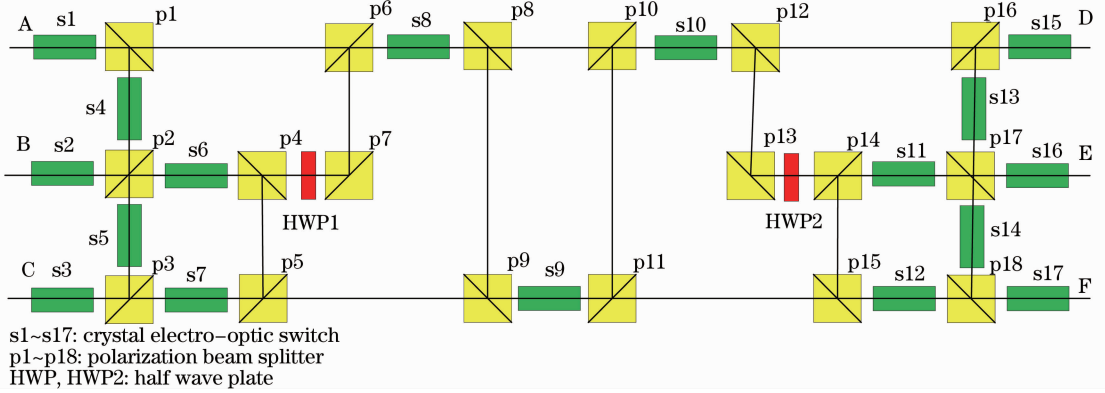


图 3 自由空间 3×3 全光路由器结构一的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of free-space 3×3 all-optical router structure one

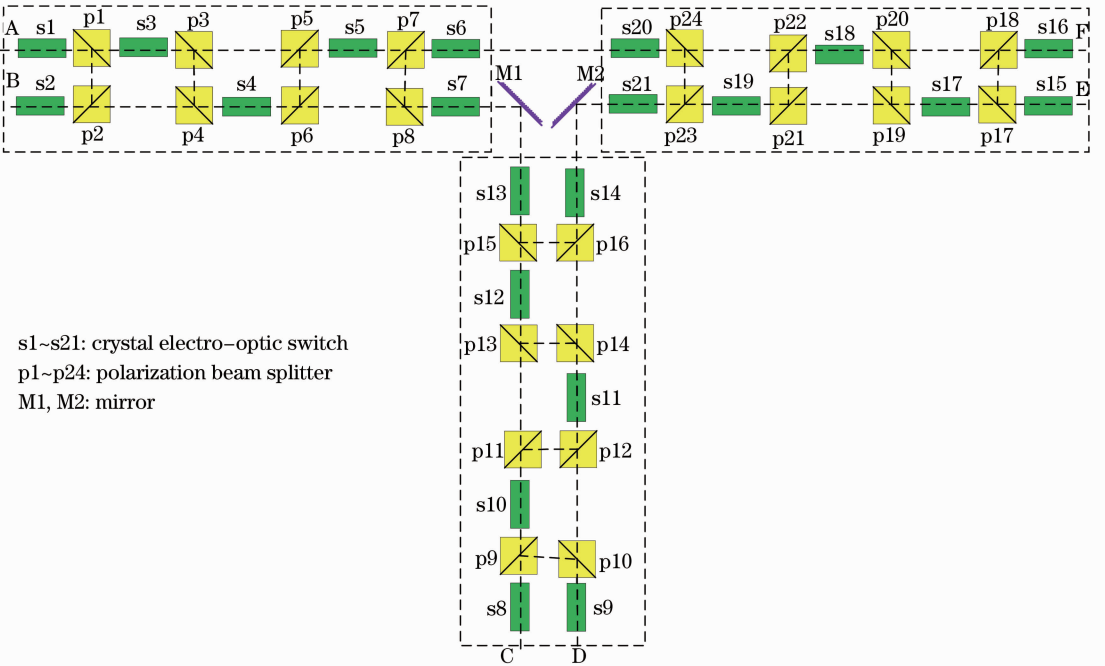


图 4 自由空间 3×3 全光路由器结构二的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of free-space 3×3 all-optical router structure two

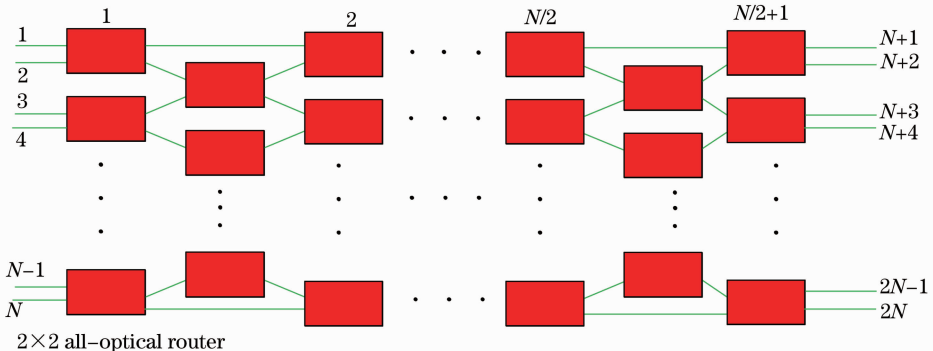


图 5 自由空间 $N \times N$ 全光路由器的原理图

Fig. 5 Schematic diagram of $N \times N$ all-optical router in free-space

4 实验方案和实验结果

实验中采用 2×2 全光路由器进行实验验证,由 7 块铌酸锂电光晶体开关(s1~s7)、8 块偏振分束棱镜(p1~p8)构成,电光分束单元是通过铌酸锂电光开关与偏振分光棱镜的组合来实现的^[18],实验装置采用如图 2 所示的对称结构。

实验中铌酸锂电光开关均为沿轴向切割,沿 z 向透光,在入射端面镀上 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的增透膜,金属电极对称地加在铌酸锂晶体平行于 xy 坐标面的两个相对侧面上,金属电极为溅射制作的 Au/Cr 薄层,厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。铌酸锂电光开关的长径比约为 $7.7:1$,透光口径 5 mm ,严密封装于有机玻璃外壳中。

电场施加在铌酸锂晶体的 x 轴方向,沿 z 方向产生的相位调制为

$$\Gamma = \frac{2\pi l_3}{\lambda} (n'_2 - n'_1) = \frac{2\pi lV}{\lambda d} n_o^3 \gamma_{22}, \quad (1)$$

式中 l 为沿 z 向的晶体长度, d 为 x 向的晶体厚度, l/d 为晶体的长径比。

对于不同波长的入射光束,半波电压会随之发

生改变,半波电压 U_π 与入射波长 λ 之间满足关系:

$$U_\pi = \frac{\lambda d}{2l\gamma_{22}n_o^3}, \quad (2)$$

其中 d 为竖直的晶体厚度, l 为入射光束经过的晶体长度, γ_{22} 为铌酸锂晶体的电光系数, n_o 为铌酸锂晶体的折射率。如果沿着铌酸锂晶体 x 方向施加横向半波电压 U_π ,产生 π 的位相调制,就可以将入射光的偏振方向旋转 90° 。衡量电光开关性能的重要指标是晶体的消光比。消光比的高低主要取决于晶体折射率的均匀性。利用会聚偏振光的光轴干涉图观察沿光轴向的常光折射率不均匀性,晶体沿光轴方向的常光折射率不均匀性反映在干涉图上会产生双光轴头或图形的不规则性。实验测得的铌酸锂晶体的会聚偏振光干涉图如图 6(a) 所示,无双光轴头或图形的不规则性,证明晶体折射率均匀性是满足要求的。实验测得铌酸锂电光晶体开关对于 0.633 、 1.064 、 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射信号光半波电压分别为 560 、 1080 、 1915 V 。其中 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射信号光半波电压测试结果如图 6(b) 所示,消光比最大可以达到 27 dB 。

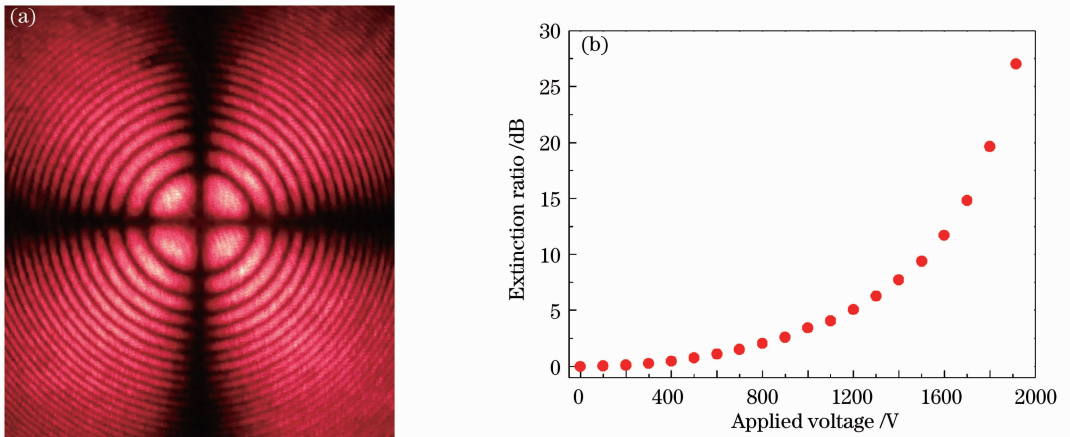


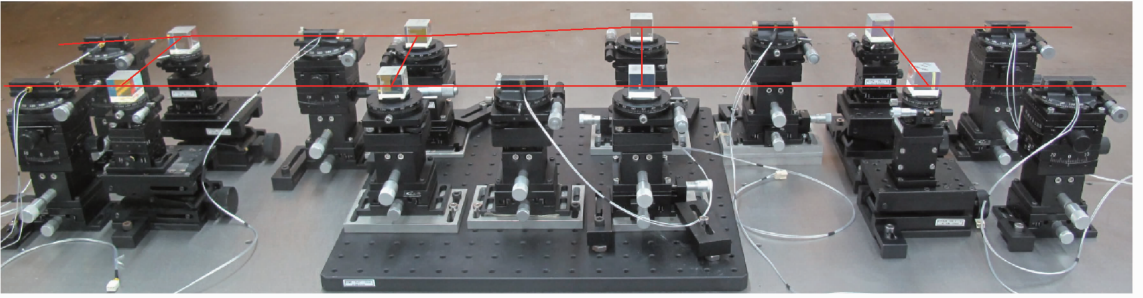
图 6 (a) 实验测得的铌酸锂晶体会聚偏振光干涉图;(b) 铌酸锂电光晶体开关对 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射信号光半波电压测试结果图

Fig. 6 (a) Convergent polarized light interference pattern of LiNbO_3 ; (b) test result of half-wave voltage while $1.55 \mu\text{m}$ signal light incident into LiNbO_3 crystal electro-optic switch

2×2 全光路由器采用计算机控制驱动多通道高压电源实现对 7 通道电光晶体开关的控制,总体设计包括高压直流电源和 14 个独立的高压开关。高压开关采用绝缘栅双极型晶体管实现,每个电光晶体两端各加一个高压开关,用于双开关切换,共 7 组,实现对 7 个电光晶体的控制,最大重复频率为 1 kHz ,高压脉冲的上升沿和下降沿均小于 $5 \mu\text{s}$ 。7 通道计算机控制时序发生器接受本地计算机控制,可以在本地计算机上编程实现电光晶体开关施加高

电平的准确控制,实现任意算法的 2×2 光互连,并在本地计算机上监控电光开关运行状态。

对自由空间 2×2 全光路由器进行了实验验证,实现了 2×2 光互连,并可以实现系统光互连的实时可编程控制。消光比达到 27 dB 。自由空间 2×2 全光路由器是不等光程的,最少的光程经过 4 个器件,最多的光程经过 9 个器件,目前实验测得的最小插入损耗约为 0.29 dB ,最大插入损耗约为 0.73 dB 。实验装置实物图如图 7 所示。

图 7 自由空间 2×2 全光路由器实验装置图Fig. 7 Experimental setup of 2×2 all-optical router in free-space

5 讨 论

设计的 $N \times N$ 全光路由器优点在于可以实现任意端口的无阻塞互连,并能实现任意光路之间高速切换,无活动部件,插入损耗低,具有极高的可靠性与稳定性,方便集成与拓展。缺点在于系统所需分离器件较多,装配调节复杂,偏振相关结构易受入射光偏振态的影响,互连不具有等光程性。保证全光路由器的分离元件的共轴是实验的重点和难点,尤其是铌酸锂电光开关,必须避免近光轴传播,否则消光比会受到严重影响。目前采用精密 6 维调整台来实现器件共轴,装置复杂而且庞大。下一步将研究如何实现 2×2 和 3×3 全光路由器的光学集成,在现有的基础上考虑构建偏振无关网络,并考虑其他拓扑结构使其各通道的互连具有等光程性。

实验中制约全光路由器开关速度的最重要因素为高压电源。目前设计制作了 16 路高压脉冲直流电源,可以实现 16 路电光晶体开关的独立高速开关功能,并实现电光开关的可编程逻辑控制,在某一时刻对特定的通道施加适当参数的直流高压脉冲,脉冲输出电压为直流 $30 \sim 3000$ V 每路,电压上升沿和下降沿均小于 $5 \mu\text{s}$,最小脉冲持续时间为 1 ms。但是晶体的电光系数可以跟得上 10^{10} Hz 变化的电场,理论上电光晶体开关的速度可以达到 10^{-10} s。因此全光路由器电光开关对高压开关电源要求比较高。未来会着重解决这个瓶颈问题,进一步降低电光开关的半波电压,缩短高压脉冲的脉宽,缩短上升沿和下降沿时间,真正实现高速路由控制。

实验中制约全光路由器系统损耗的重要因素包括电光开关的消光比、偏振分束棱镜的消光比以及器件的透射率。实验中单极铌酸锂电光开关消光比最大可以达到 27 dB,尤其是在集成结构中,消光比会降低,这将是比较严重的损耗来源。因此未来会考虑采用消光比更高的电光晶体作为电光开关,并

且优化集成设计。偏振分束棱镜的消光比以及器件的透/反射率采用比较成熟的商业产品,偏振分束棱镜的消光比可以大于 30 dB,镀膜器件的透/反射率可以达到 99%。

目前实验结果与实际应用的要求还有较大的距离。由于该 2×2 光路由器还处于初步的调试阶段,随着实验的继续深入和有关实验设备的调整完毕,该光路由器相关性能参数的测试指标将会进一步得到提高。未来将采用更理想的集成设计,实现 3×3 全光路由,实现 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的波分复用。自由空间 3×3 全光路由器可以实现 6 端口间的任意光路互连,平均光程基本为自由空间 2×2 全光路由器的 2 倍,且随着分离器件的增加,系统装配和调节也愈加困难。因此可以预见自由空间 3×3 全光路由器消光比会下降,插入损耗会显著增加,控制算法也更加繁琐。

6 结 论

设计了基于 crossbar 电光开关网络的偏振结构自由空间全光路由器,利用晶体的电光效应和 crossbar 网络结构,给出了自由空间 2×2 全光路由的一种基本结构和自由空间 3×3 全光路由的两种基本结构,并实现了 $N \times N$ 全光路由器的拓展。该自由空间全光路由器具有简单可靠、响应速度快、无阻塞、插入损耗低等优点,可以实现实时可编程控制,适用于空天全光路由组网。对自由空间 2×2 全光路由器进行了实验验证,实现了 2×2 光互连,消光比达到 27 dB,最大插入损耗约为 0.73 dB。本工作的意义在于提出了一种新的全光路由器结构,理论分析和实验验证表明其具有合理性,目的是研究适合空天全光路由组网的高速光信息传输技术。下一步将采用更理想的集成设计,实现 3×3 全光路由,实现 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的波分复用,并且进一步提

高系统的消光性能,优化可编程控制,进一步降低高压脉冲的脉宽,缩短上升沿和下降沿时间,实现真正意义上的自由空间高速全光路由控制。

参 考 文 献

- 1 T Dreischer, F Arnold, K Kudielka, *et al.*. Lasercom for interplanetary missions: recent European activities, future possibilities, and synergy aspects [C]. SPIE, 2010, 7587: 758704.
- 2 Ting Hu, Huiye Qiu, Ping Yu, *et al.*. Wavelength-selective 4×4 nonblocking silicon optical router for networks-on-chip [J]. Opt Lett, 2011, 36(23): 4710—4712.
- 3 S C Nicholes, M L Masanovic, R Jevremovic, *et al.*. An 8×8 InP monolithic tunable optical router (MOTOR) packet forwarding chip [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(4): 641—650.
- 4 Z Song, P Hou, L Fu, *et al.*. Free-space optical crossbar network integrated in a single block of LiNbO₃ crystal [J]. Appl Opt, 2012, 51(9): 1328—1335.
- 5 Herzel Laor. MEMS mirrors application in optical cross-connects [C]. IEEE LEOS Summer Topical Meetings: Optical MEMS, 1998. 20—22.
- 6 Teck Yoong Chai, Tee Hiang Cheng, Sanjay K Bose, *et al.*. Array interconnection for rearrangeable 2-D MEMS optical switch [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(5): 1134—1140.
- 7 Chen Yuanyuan, Li Yanping, Yu Jinzhong. A 4×4 thermo-optic SOI waveguide switch matrix [J]. J Optoelectronics • Laser, 2009, 20(3): 283—285.
陈媛媛, 李艳萍, 余金中. 4×4 热光 SOI 波导开关阵列 [J]. 光电子·激光, 2009, 20(3): 283—285.
- 8 Dong Liangwei, Yan Xiaona, Shi Kaiyuan, *et al.*. Theory of electric field-controlled 2×2 photo refractive switch [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(7): 787—792.
董良威, 阎晓娜, 史开源, 等. 利用光折变晶体的电光电压电效应实现 2×2 开关的原理 [J]. 光学学报, 2003, 23(7): 787—792.
- 9 Song Zhe, Liu Liren, Ren Haixia, *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 777—780.
宋 哲, 刘立人, 任海霞, 等. 单块晶体 2×2 光开关 [J]. 光学学报, 2004, 24(6): 777—780.
- 10 N A Riza, S Yuan. Low optical inter channel crosstalk, fast switching speed, polarization independent 2×2 fiber optic switch using ferroelectric liquid crystals [J]. Electron Lett, 1998, 34(13): 1341—1342.
- 11 Yang Junbo, Su Xianyu. Polarization-independent bidirectional 3×3 optical switch [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1279—1284.
杨俊波, 苏显渝. 与偏振无关的双向 3×3 光开关结构设计 [J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1279—1284.
- 12 Luo Fengguang, Cao Mingcui, Xie Hu, *et al.*. 4×4 free-space optical switch structure and its matrix analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1677—1682.
罗风光, 曹明翠, 谢 胡, 等. 4×4 自由空间光开关结构及其矩阵分析 [J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1677—1682.
- 13 Min Rui, Ji Ruiqiang, Chen Qiaoshan, *et al.*. A universal method for constructing N -port nonblocking optical router for photonic networks-on-chip [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(23): 3736—3741.
- 14 Hou Peipei, Song Zhe, Li Xudong, *et al.*. Integrated optical $N \times N$ crossbar network and its control algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 365—369.
侯培培, 宋 哲, 李旭东, 等. 单块晶体集成的 $N \times N$ 纵横开关网络及其控制算法 [J]. 光学学报, 2008, 28(2): 365—369.
- 15 M E Marchic, S G Lee. Mirror-folded free-space crossbars with holographic implementation [J]. Appl Opt, 1993, 32(32): 6438—6444.
- 16 Wang Jiyang, Huang Linyong, Qin Fangli, *et al.*. Progress of the electro-optic crystal research and the symmetry dependence of electro-optic effect [J]. Progress in Physics, 2012, 32(1): 33—56.
王继扬, 黄林勇, 覃方丽, 等. 电光晶体研究进展及其对称性研究 [J]. 物理学进展, 2012, 32(1): 33—56.
- 17 Wan Lingyu, Su Shida, Liu Liren, *et al.*. Design of a new 90° 2×4 hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2358—2361.
万玲玉, 苏世达, 刘立人, 等. 基于晶体双折射和电光效应设计的 90° 2×4 空间光桥接器 [J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2358—2361.
- 18 A M Yan, Y N Zhi, J F Sun, *et al.*. Design and experiment of a large aperture digital beam deflector based on electro-optic crystal switch array [J]. Appl Phys B, 2012, 107(2): 421—427.

栏目编辑: 韩 峰