

# 电光调制 $2 \times 4$ $90^\circ$ 相移空间光学桥接器

万玲玉<sup>1</sup> 周煜<sup>2</sup> 刘立人<sup>2</sup> 孙建锋<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004  
<sup>2</sup> 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** 基于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的双折射和电光效应设计制作了一种  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  相移自由空间光学桥接器。该桥接器利用晶体的双折射效应进行信号光和本振光的分光/耦合, 电光效应引入相位调制, 在给定电场条件下实现  $2 \times 4$   $90^\circ$  空间光学桥接器的功能。对空间光学桥接器进行了实验测量和分析。实验结果表明该桥接器性能良好, 相位连续可调, 相位误差可通过电压调制补偿, 应用于相干接收系统。

**关键词** 光学器件; 相干探测; 空间光学桥接器; 双折射效应; 电光效应;  $90^\circ$  相移

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0723002

## A Free-Space $2 \times 4$ $90^\circ$ Optical Hybrid with Electro-Optic Modulation

Wan Lingyu<sup>1</sup> Zhou Yu<sup>2</sup> Liu Liren<sup>2</sup> Sun Jianfeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A free-space  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid with electro-optic modulation is designed and fabricated based on the birefringence effect and electro-optic effect of  $\text{LiNbO}_3$  crystal. It splits and recombines a signal beam and a local oscillator beam by birefringence effect, and the desired phase shift is introduced by electro-optic effect. It realizes the appropriate function of a  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid under given electric-field conditions. The performance of  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid is measured experimentally and analyzed. Experimental results show that the optical hybrid has good performance of phase modulation and the proposed  $90^\circ$  optical hybrid. Its phase shift output is tuned electrooptically and phase errors can be compensated by adjusting the applied electric field. It has potential applications in coherent receivers.

**Key words** optical devices; coherent detection; optical hybrid; birefringence effect; electro-optic effect;  $90^\circ$  phase shift

**OCIS codes** 230.2090; 060.1660; 260.1180; 260.1440

## 1 引 言

相干探测接收相比直接强度探测接收灵敏度可提高一个量级以上, 在激光相干通信、激光相干雷达等先进激光系统中得到重要应用。对于探测空间信号的相干接收光学系统, 自由空间传播型的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器是重要的核心器件, 它的主要功能是将两输入端的信号光束和本振光束进行分光合束, 然后分解输出 4 束组合光束, 并使它们之间具有相对的  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  相移, 从而产生一个同相平

衡接收通道 ( $0^\circ$  和  $180^\circ$  两路) 和一个正交平衡接收通道 ( $90^\circ$  和  $270^\circ$  两路), 其中两个平衡通道之间的相移须为  $90^\circ$  是该桥接器的技术难点。在 Leeb 等<sup>[1~3]</sup> 提出的方案中, 两个平衡通道间的  $90^\circ$  相移通过 1:1 (反射: 透射) 分光合成的分束器的相位要求实现, 而分束器的相位是很难严格控制的, 因此需要相应的相位补偿, 文献[4]采用其中的一种偏振分光方案进行了实验和相位补偿研究, 该补偿方法付出的代价是分光比的失调, 文献[5, 6]提出了基于晶体双折射

收稿日期: 2012-02-05; 收到修改稿日期: 2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(10964001)和中国科学院空间激光通信及检验技术重点开放实验室资助课题。

作者简介: 万玲玉(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事衍射光学、晶体光学和空间光通信等方面的研究。

E-mail: wanlingyu75@126.com

和  $\lambda/8$  波片结合的方案,其相位补偿采用独立的 4 光束的电光调制实现,器件制作复杂化。文献[7]提出了基于晶体双折射和电光效应的自由空间光学桥接器方案,利用晶体的双折射效应进行本振/信号光的分束和合成,利用电光效应实现所需的相移关系,具有结构相对简单,相位关系易实现且连续可调的特点,本文制作并实验验证了该桥接器的功能。

## 2 器件设计与制作

器件设计在文献[7]的基础上进行,器件基本结

构如图 1 所示,主要由 4 块电光晶体平板和一个双折射检偏器组成。电光晶体平板要求尽可能大的电光系数和双折射率差,鉴于铌酸锂晶体具有大尺寸和较高电光系数的特点,选择其作为电光晶体平板的设计材料,为使光束在晶体中能尽量分离,在最大偏离条件下进行设计制作,设晶体中 o 光和 e 光的折射率分别为  $n_o$  和  $n_e$ ,此时晶体光轴取向(即晶体光轴和晶面的夹角  $\theta_m$ )为

$$\theta_m = \arctan \frac{n_o}{n_e}. \quad (1)$$

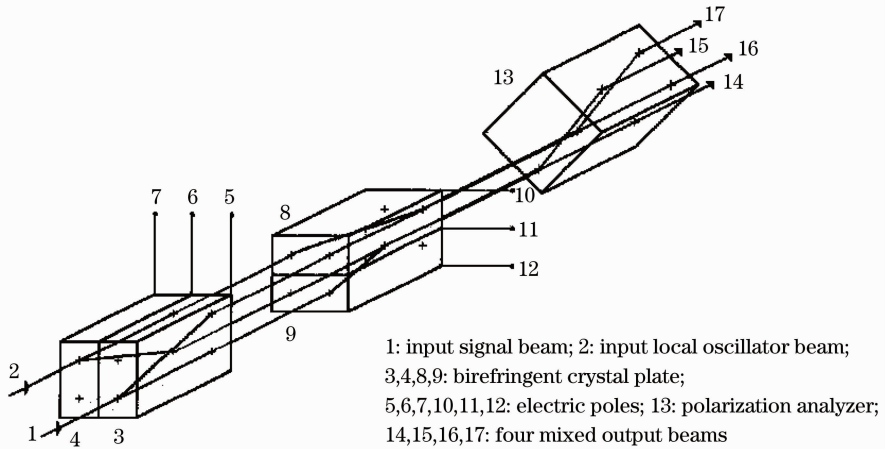


图 1 电光调制  $2 \times 4$   $90^\circ$  相移空间光学桥接器结构

Fig. 1 Schematic configuration of free-space  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid with electro-optic modulation

光在晶体中的最大偏离角为

$$\alpha_m = \arctan[(n_o^2 - n_e^2)/2n_o n_e], \quad (2)$$

若晶体的长度为  $D$ ,光通过晶体后的最大分离距离为

$$\Delta L = D \tan \alpha_m. \quad (3)$$

按使用波长为 1064 nm,入射信号/本振光束直径皆为 2 mm 进行具体设计,在此波长上铌酸锂晶体的主折射率为  $n_o = 2.322, n_e = 2.156$ 。根据(1)式和(2)式计算得最大偏离条件下铌酸锂光学平板的光轴取向为  $\theta_m = 47.12^\circ$ ,最大偏离角为  $4.246^\circ$ 。为使光束通过晶体后能完全分开,晶体长度  $D$  取为 60 mm,为降低调制电压,选择较大的长度和厚度比,综合考虑光束在晶体中的分光合成条件后设计 4 块铌酸锂晶体平板的尺寸为  $60 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。将设计的铌酸锂晶体平板进行加工,为方便切割,加工时光轴取向为  $45^\circ$ ,光束分离距离约 4 mm,晶体切割好后分别在两个  $60 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  表面镀上金电极,晶体切割和电场施加方式如图 2 所示。双折射检偏器 13 在该光学桥接器中的作用实质上是偏振分束器,因此在验

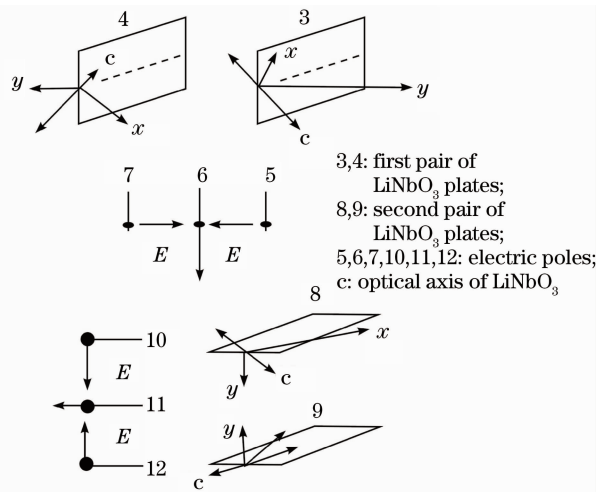


图 2 晶片切割和电场施加方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of crystal cutting and applied electric-field

证光学桥接器功能时,该元件采用商用的偏振分束棱镜代替,产生的效果一样,仅是光束 14,15,16,17 的输出方向不同,相应地改变探测器方向即可。

### 3 实验测量与结果

对加工制作好的桥接器进行功能测试,电光调制  $2 \times 4$   $90^\circ$  相移空间光学桥接器实验测量装置如图 3 所示。激光器发出的线偏振光由 1:1 光纤分路器分成两路,一路先经声光移频器移频 80 MHz,再经保偏光纤传输并准直形成信号光束 1,另一路直接经保偏光纤传输并准直形成本振光束 2,本振光束 2 和信号光束 1 由偏振分光棱镜 PBS1 耦合,经  $\lambda/2$  波片(HWP1)后分别从空间光桥接器的上部 and 下部射入,由两对铌酸锂光学平板实现信号光和本振光的分光合成,经铌酸锂光学平板 8 和 9 合成后的光束通过  $\lambda/2$  波片(HWP2)旋转  $45^\circ$  偏振方向,分别被偏振分光棱镜 PBS2 分成 4 通道的合成光束 14,15,16,17 输出,各通道信号分别被平衡接收机探测并输入示波器进行观测。实验所用激光器为德国 MEPHISTO OEM,工作波长 1064 nm,输出功率 0.578 mW,声光移频器中心频率为 80 MHz,示波器为 AGILENTT 54830B。实验分别测量了输出光束 14 和 15,16 和 17,15 和 16,14 和 17 之间的相位关系,根据文献[7]中的推导,该桥接器正确的相位关系应为

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = \varphi_{15} - \varphi_{14} = 180^\circ \\ \Delta\varphi_2 = \varphi_{17} - \varphi_{16} = 180^\circ \\ \Delta\varphi_3 = \varphi_{15} - \varphi_{17} = 90^\circ \\ \Delta\varphi_4 = \varphi_{14} - \varphi_{16} = 90^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $\varphi_{14}, \varphi_{15}, \varphi_{16}, \varphi_{17}$  分别为输出光束 14,15,16,17 的相位, $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \Delta\varphi_4$  分别为输出光束 14 和 15,16 和 17,15 和 17,14 和 16 之间的相位差,即输出

光束 14 和 15,16 和 17 组成前面所述的两个平衡通道,相位差分别为  $180^\circ$ ,两个平衡通道之间的  $90^\circ$  关系取决于  $\Delta\varphi_3 = \varphi_{15} - \varphi_{17} = 90^\circ$  和  $\Delta\varphi_4 = \varphi_{14} - \varphi_{16} = 90^\circ$  的保证。实验测得输出光束 14 和 15,16 和 17 之间的相位关系如图 4 所示,基本都为  $180^\circ$ ,且这两个平衡通道之间的  $180^\circ$  关系不随电场的施加与否而改变,和理论分析结果一致。不施加电场时,输出光束 15 和 17,14 和 16 之间的相位关系如图 5 所示,基本都为  $0^\circ$ ;当给 4 块晶体平板同时施加电场时,输出光束 15 和 17,14 和 16 之间的相位差发生改变,随电场的增大而逐渐增加。当电压值加到 43 V 时,相位差达  $90^\circ$ ,如图 6 所示,此时继续增加电压,则相位差继续增大。可见,通过晶体的双折射效应进行光束的分光合成,通过晶体的电光效应引入所需的相位关系来实现  $2 \times 4$   $90^\circ$  自由空间光学桥接器是切实可行的。实验中,瞬时相位抖动幅度在  $\pm 10^\circ$  之间,相位平均值在 1h 内的相位漂移小于  $\pm 3^\circ$ ,误差来源主要有声光移频器的输出频率抖动、环境噪声和大气扰动以及光路未完全耦合的影响,其中声光移频器的频率抖动和大气扰动是影响相位抖动的主要原因。声光移频器的中心频率为 80 MHz,频率平均值的长期频率漂移小于  $\pm 0.1$  MHz,但瞬时输出频率的抖动幅度在  $\pm 2$  MHz 之间。因该桥接器两个平衡通道之间的  $90^\circ$  相移功能通过晶体的电光效应实现,两个平衡通道之间的相位差随所加电压的变化呈线性变化,系统误差可通过调整控制电压进行补偿,在实际应用中大气抖动的影响可通过器件的紧凑封装来改善。

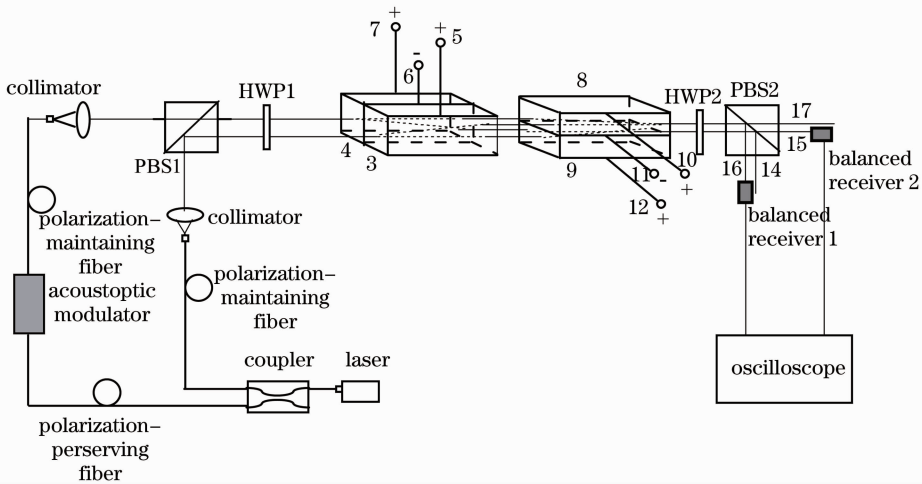


图 3 电光调制  $2 \times 4$   $90^\circ$  相移空间光学桥接器实验测量装置图

Fig. 3 Test arrangement for the free-space  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid with electro-optic modulation

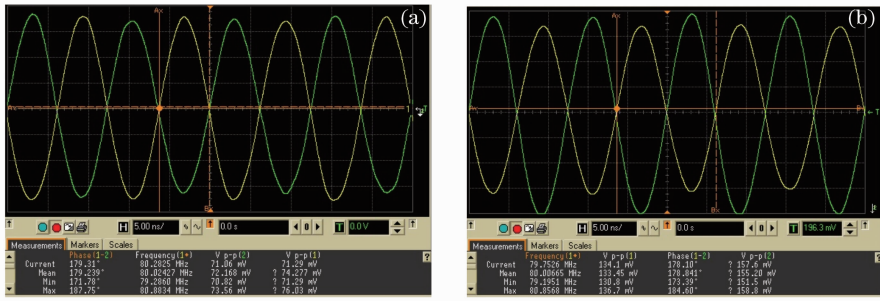


图 4 输出光束(a)14 和 15,(b)16 和 17 之间的相位关系

Fig. 4 Phase relations between output beams 14 and 15 (a), 16 and 17 (b)

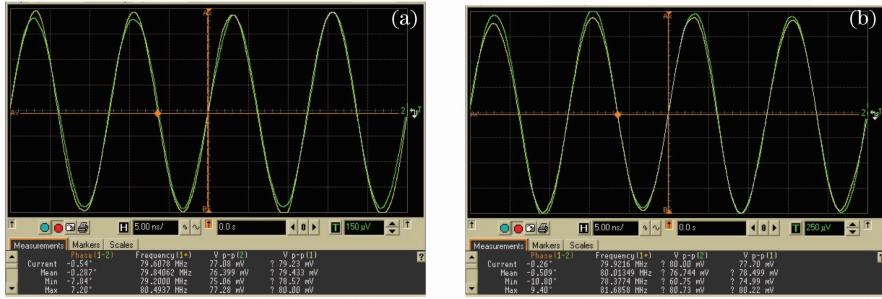


图 5 未加电场时输出光束(a)15 和 17,(b)14 和 16 之间的相位关系

Fig. 5 Phase relations between output beams 15 and 17 (a), 14 and 16 (b) without applied electric field

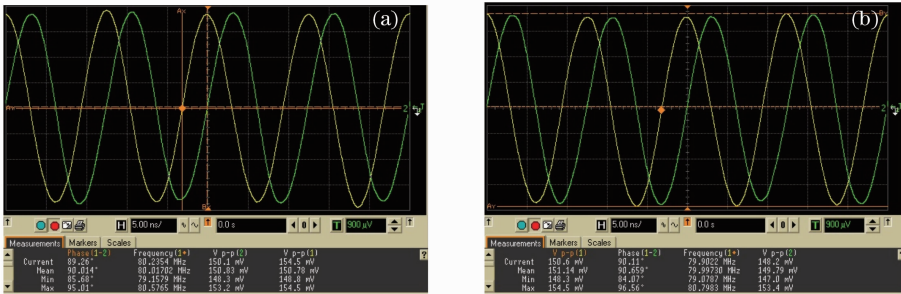


图 6 施加电压为 43 V 时输出光束(a)15 和 17,(b)14 和 16 之间的相位关系

Fig. 6 Phase relations between output beams 15 and 17 (a), 14 and 16 (b) when applied electric field is 43 V

## 4 结 论

设计制作了一个通过晶体的双折射效应和电光效应实现的自由空间传播型  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器, 搭建实验系统对器件功能进行了实验测试, 实验表明该器件可实现  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器的信号/本振光的空间桥接和各输出组合光束的相对  $90^\circ$  相移功能, 通过电光调制可较好地控制两个平横通道之间的相位关系, 在基本不影响分光比的情况下实现连续可调的相位输出。在实验中, 除了声光移频器频率抖动的影响外, 因实验光路稍长, 桥接器的相位关系还受环境振动和大气扰动的影响而产生相位漂移, 实际应用中可通过 4 片电光晶体平板的综合封装, 缩减空气中的光路来改善。另外, 如果提取出相位漂移量, 在输出信号和电场施加间引入反馈自动

控制电路, 则可实现相位的实时校准, 这是其他空间光学桥接器无法比拟的。该桥接器可应用于需要空间桥接的相干接收系统。

## 参 考 文 献

- 1 W. R. Leeb. Realization of  $90^\circ$  and  $180^\circ$  hybrids for optical frequencies [J]. *Arch. Elek. Ubertragung.*, 1983, **37** (5-6): 203~206
- 2 W. R. Leeb. Optical  $90^\circ$  hybrid for costas-type receivers[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1431~1432
- 3 R. Garreis, C. Zeiss.  $90^\circ$  optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 4 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Ya'nan *et al.*. Polarization-splitting  $2 \times 4$   $90^\circ$  free-space optical hybrid with phase compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3291~3294  
周 煜, 万玲玉, 职亚楠 等. 相位补偿偏振分光  $2 \times 4$   $90^\circ$  自由空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 5 Hou Peipei, Zhou Yu, Zhi Ya'nan *et al.*. Free space optical  $2 \times 4$

- $90^\circ$  hybrid based on crystal birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3413~3419  
侯培培, 周煜, 职亚楠等. 晶体双折射自由空间  $2 \times 4$   $90^\circ$ 光学桥接器[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3413~3419
- 6 Peipei Hou, Ya'nan Zhi, Yu Zhou *et al.*. An optical  $2 \times 4$   $90^\circ$  hybrid based on a birefringent crystal for a coherent receiver in a free-space optical communication system[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(7): 074204
- 7 Wan Lingyu, Su Shida, Liu Liren *et al.*. Design of a new  $90^\circ 2 \times 4$  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  $90^\circ 2 \times 4$  空间光桥接器[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2358~2361

栏目编辑：韩峰