

文章编号: 0258-7025(2009)09-2358-04

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

万玲玉¹ 苏世达¹ 刘立人² 刘德安² 周煜²

(¹广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)
(²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 综合利用铌酸锂(LiNbO₃)晶体的双折射效应和电光效应,设计了一种适用于相干光通信系统的新型空间光桥接器。其由 4 块结构相同的具有电极控制的晶片和一块检偏双折射元件所组成,两对双折射晶体光学平板利用双折射效应分别实现信号光和本振光的偏振分离和合束,电光调制则产生所需的相移。通过调整晶片的控制电压,可从检偏双折射元件输出四通道的相对相位差为 90° 的信号/本振合成光。与以往的空间光桥接器相比,该桥接器具有结构紧凑、损耗小和相移性能稳定的优点。

关键词 相干光通信; 空间光桥接器; 双折射效应; 电光效应; 90° 相移

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2358

Design of a New $90^\circ 2 \times 4$ Hybrid Based on the Birefringence and the Electro-Optic Effect of Crystal

Wan Lingyu¹ Su Shida¹ Liu Liren² Liu Dean² Zhou Yu²

(¹College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)
(²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new $90^\circ 2 \times 4$ hybrid for coherent optical communication systems was designed based on the birefringence effect and the electro-optic effect of crystal. It consists mainly of four pieces LiNbO₃ crystal plates with the same sizes which are modulated by the electric fields and a polarization analyzer. Two of LiNbO₃ crystal plates split respectively incoming signal beam E_s and local oscillator beam E_{LO} into four beams of laser lights and another LiNbO₃ crystal plates mix them into two synthetic beams by birefringence effects. The desired phase relations between the respective output ports can be obtained by the electro-optic effect. By adjusting the applied voltages on the LiNbO₃ crystal plates, 4 output ports from the polarization analyzer give the mixed beams which are phase shifted by 90° relatively to each other. Compared with traditional optical hybrids, the optical hybrid has the advantage of low losses and good stability of the phase shift.

Key words coherent laser communication; optical hybrid; birefringence effect; electro-optic effect; 90° phase shift

1 引 言

在自由空间激光通信中,采用相干光通信系统提高接收机灵敏度是使系统小型轻量化的重要技术手段之一^[1~8]。光学桥接器将信号激光和本振激光链接到光电接收机,是相干光通信系统中的关键器

件,其性能在很大程度上影响着相干通信系统的接收性能。光学桥接器分为 90° 相移、两输入端两输出端结构和 180° 相移、两输入端两输出端结构两种, 180° 相移桥接器用于平衡锁相环路接收机, 90° 相移桥接器用于科斯塔斯锁相环路接收机。随着光

收稿日期: 2008-10-16; 收到修改稿日期: 2008-11-29

基金项目: 广西青年基金(桂科青 0728009)资助课题。

作者简介: 万玲玉(1975-),女,副教授,博士,主要从事空间激光通信、晶体光学和光栅衍射成像方面的研究。

E-mail: wanlingyu75@126.com

纤通信技术的发展,人们发展了多种光学桥接器方案,有波导集成型^[9~13]、光纤型^[14,15]和混合型^[16]等,但这些适用于光纤通信系统的光学桥接器不适合空间通信的需求,在自由空间激光通信中需发展专门的空间光桥接器。目前,空间光桥接器主要采用波片延迟产生相移,偏振器件进行本振/信号光分束/合束的方法,文献[17,18]提出了几种可能的实现方案,但这些方案都存在相关元件过多,插入损耗较大,不易小型化集成,且需要保证光束等光程传输条件,稳定性较差。原理上,光学桥接器主要由光束分路器、光束合成器和相移器所构成,晶体的许多特性满足组成光学桥接器的需要,如其双折射/双反射效应可实现光束的分光合成,电光调制能够产生可控的波片。

本文根据铌酸锂(LiNbO_3)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,设计了一种适用于空间激光通信系统的新型桥接器。该桥接器由带有控制电极的4块结构完全相同的 LiNbO_3 双折射光学平板和一块检偏双折射器件组成。每束本振/信号光只需通过3块光学平板,两对 LiNbO_3 双折射光学平板由同一块晶片切割制成,具有完全相同的光学性质和结构,可实现相等的相位延迟,不需要光束严格等光程传输条件的保证,因此本桥接器具有结构简单、插入损耗小、性能稳定的特点,适用于自由空间相干激光通信、激光雷达领域。

2 结构设计

电控相移空间光桥接器的整体结构如图1所示。信号光1和本振光2分别从第一对双折射光学平板3,4的下部和上部射入,使光束1和2的偏振方向和双折射晶体平板的主截面成 45° 角,进入晶体后由于双折射效应分成等振幅的信号o光和e光,本振o光和e光,出射后成为4束平行光束,随后进入第二对双折射光学平板8,9,由于这对双折射平板的主截面与第一对双折射光学平板的主截面相互垂直,使得在第一对双折射光学平板内是o光的相对于第二对双折射平板成为了e光,同理,原来的e光成为了o光,所以可在第二对双折射平板内实现合束输出,合成后的信号、本振光再经过检偏双折射元件13则可形成四通道的合光束输出。在双折射光学平板3,4,8,9上分别加上控制电极5,6,7和10,11,12,则可进行光束的相位控制,经过恰当的设计可实现 $90^\circ 2 \times 4$ 空间光桥接器。

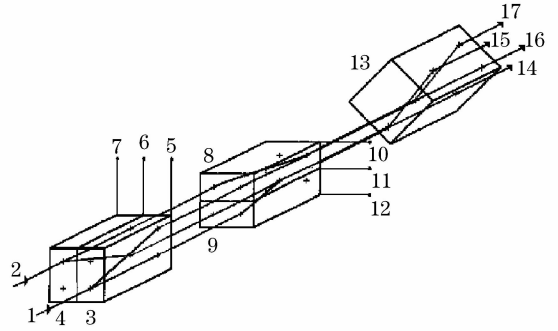


图1 电控相移空间光桥接器结构

Fig.1 Schematic configuration of optical hybrid

2.1 设计原理

设双折射光学平板晶体的光轴取向为 θ ,当光线垂直入射到晶体界面时,光波一进入晶体就分解为折射率为 n_o 和 n_e 的o光和e光,其光束的偏离角 α 满足关系式

$$\tan \alpha = (1 - n_o^2/n_e^2) \frac{\tan \theta}{1 + (n_o^2/n_e^2) \tan^2 \theta}, \quad (1)$$

而光束分离距离为

$$\Delta L = D \tan \alpha, \quad (2)$$

其中, D 为双折射光学平板的长度。

光束在双折射光学平板晶体内,o光的相位延迟为

$$\varphi_o = \frac{2\pi D n_o}{\lambda},$$

e光的相位延迟为

$$\varphi_e = \frac{2\pi n'_e D}{\lambda \cos \alpha},$$

其中 $n'_e = \frac{n_o n_e}{[n_o^2 \sin^2(\theta + \alpha) + n_e^2 \cos^2(\theta + \alpha)]^{1/2}}$ 。

若在双折射平板的两个 y 面上设置电极,施加如图2所示的电压。施加电场 E_y 对于o光和e光产生附加的电感应相移分别为

$$\Delta \varphi_o(E_y) = -\frac{2\pi D n_o}{\lambda} \delta(E_y), \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_e(E_y) = \frac{\pi n'_e D}{\lambda \cos \alpha} \delta(E_y), \quad (4)$$

其中 $\delta(E_y) = \frac{1}{2} n_o^2 \gamma_{22} E_y$, γ_{22} 为 y 方向的主介电常数。由半波延迟定义 $\frac{2\pi}{\lambda} (2\delta n_o D) = \pi$, 则有

$$\delta(V_y) = \frac{\lambda}{4n_o D} \cdot \frac{V_y}{V_y(\lambda/2)}, \quad (5)$$

因此,双折射光学平板的电感应相移和可记为

$$\Delta\varphi(E_y) = \Delta\varphi_o(E_y) + \Delta\varphi_e(E_y) = -\frac{2\pi}{\lambda}Dn_o\delta(E_y)\left(1 - \frac{n'_e}{2n_o\cos\alpha}\right), \quad (6)$$

近似表达为

$$\Delta\varphi(E_y) = -\frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_y}{V_y(\lambda/2)}. \quad (7)$$

设 $\varphi_{3,o}, \varphi_{3,e}, \varphi_{4,o}, \varphi_{4,e}, \varphi_{8,o}, \varphi_{8,e}$ 和 $\varphi_{9,o}, \varphi_{9,e}$ 分别为双折射光学平板 3, 4, 8, 9 中的 o 光和 e 光的相位延迟, 由于 4 块双折射光学平板 3, 4, 8, 9 由同一块晶片切割而成, 其结构、尺寸完全相同, 因而保证它们的相位延迟 φ_o 和 φ_e 都相同, 即

$$\varphi_{3,o} = \varphi_{4,o} = \varphi_{8,o} = \varphi_{9,o},$$

$$\varphi_{3,e} = \varphi_{4,e} = \varphi_{8,e} = \varphi_{9,e}.$$

这样, 每束光在第一对和第二对双折射光学平板内的传播所产生的相位延迟都等于 $(\varphi_o + \varphi_e)$, 即相位延迟一样, 相当于没有引入相位延迟, 只有电场产生的附加相位延迟 $\Delta\varphi(E_y)$ 起作用。

当信号/本振合成光通过检偏双折射元件后将

$$I_{14} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s||A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \varphi_{l0}) - 180^\circ] \}, \quad (8)$$

$$I_{15} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s||A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - 0^\circ] \}, \quad (9)$$

$$I_{16} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s||A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - \sum \Delta\varphi(E) - 180^\circ] \}, \quad (10)$$

$$I_{17} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s||A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - \sum \Delta\varphi(E)] \}, \quad (11)$$

其中 $|A_s|, |A_l|$ 分别为信号光、本振光的振幅; ω_s, ω_l 分别为信号光、本振光的频率; $\varphi_s(t)$ 为信号光相位调制函数; $\varphi_{s0}, \varphi_{l0}$ 分别为光桥接器输入端信号光、本振光的初始相位; $\sum \Delta\varphi(E) = \Delta\varphi_8(E_8) + \Delta\varphi_9(E_9) - \Delta\varphi_3(E_3) - \Delta\varphi_4(E_4)$, 为两组 180° 相移光强输出之间的相移。

由公式 (8) ~ (11) 可看出只要合理选择 $\sum \Delta\varphi(E)$ 的值, 如令 $\sum \Delta\varphi(E) = 90^\circ$, 即可实现 $90^\circ 2 \times 4$ 空间光桥接器。

2.2 设计方案

鉴于 LiNbO_3 晶体具有大尺寸、高电光系数的优点, 选择铌酸锂晶体作为双折射晶片对的设计材料, 而检偏双折射元件则采用方解石。为获得较大的光束偏离, 采用最大化设计方案。对方程 (1) 取一阶导数, 可推出在最大偏离角条件下, 光轴取向为

形成 4 束线偏振光, 令检偏双折射元件 13 的主截面和双折射光学平板 8 的主截面成 45° 角放置, 可得 4 束输出光 14, 15, 16 和 17, 它们的光强分别为

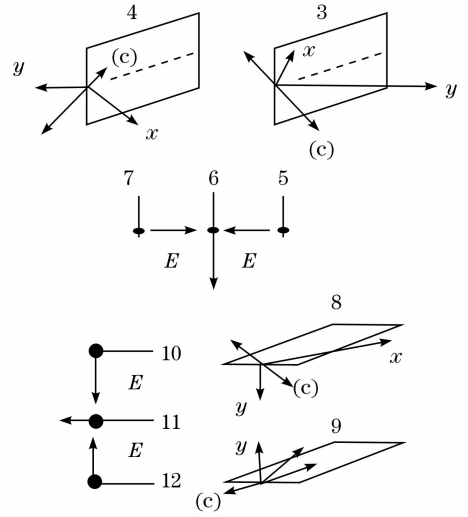


图 2 电场施加方向

Fig. 2 Direction of controlling electric field

$$\theta_m = \arctan \frac{n_o}{n_e}, \quad (12)$$

最大偏离角为 $\alpha_m = \arctan \frac{n_o^2 - n_e^2}{2n_o n_e}$, 相应的最大分离距离为

$$\Delta L = D \tan \alpha_m. \quad (13)$$

在此条件下, 施加电场 E_y 对于 o 光和 e 光产生的附加电感应相移分别为

$$\Delta\varphi_o(E_y) = -\frac{2\pi}{\lambda}Dn_o\delta(E_y),$$

$$\Delta\varphi_e(E_y) = \frac{\pi D}{\lambda} \frac{n_o^2 + n_e^2}{2} \sqrt{\frac{n_o^2 + n_e^2}{n_o^4 + n_e^4}} \delta(E_y), \quad (14)$$

而 LiNbO_3 晶体平板的电感应相移和为

$$\Delta\varphi(E_y) = \Delta\varphi_o(E_y) + \Delta\varphi_e(E_y) = -\frac{2\pi}{\lambda}Dn_o\delta(E_y) \left[1 - \frac{n_o + n_e^2/n_o}{4} \sqrt{\frac{n_o^2 + n_e^2}{n_o^4 + n_e^4}} \right], \quad (15)$$

可近似用方程 (7) 式表示。

通过恰当的设计使得电压极性 δ_8 和 δ_9 符号相同, δ_3 和 δ_4 符号相同, 而 δ_8 和 δ_3 符号相反, 如图 2 所示, 得到: $\sum \Delta\varphi(E) = 4\Delta\varphi(E)$, 而近似地有:

$\Delta\varphi(E_y) = -\pi \cdot \frac{V_y}{V_y(\lambda/2)}$ 。则当 $V = -\frac{V(\lambda/2)}{2}$ 时, 得到 90° 相移的 4 个输出为

$$I_{14} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s \parallel A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \varphi_{l0}) - 180^\circ] \}, \quad (16)$$

$$I_{15} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s \parallel A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - 0^\circ] \}, \quad (17)$$

$$I_{16} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s \parallel A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - 270^\circ] \}, \quad (18)$$

$$I_{17} = \frac{1}{4} \{ |A_s|^2 + |A_l|^2 + 2 |A_s \parallel A_l| \cos[(\omega_s - \omega_l)t - \varphi_s(t) - (\varphi_{s0} - \omega_{l0}) - 90^\circ] \}. \quad (19)$$

设使用波长为 1064 nm, 入射空间光桥接器的信号/本振光束直径皆为 1 mm, 设计 4 块双折射光学平板的尺寸为长 \times 宽 \times 高 = 100 mm \times 10 mm \times 4 mm, 计算得 LiNbO₃ 双折射光学平板的光轴取向为 $\theta_m = 44^\circ$, 光束偏离距离为 $\Delta L = 3.46$ mm, 而方解石检偏双折射元件的尺寸为长 \times 宽 \times 高 = 40 mm \times 12 mm \times 12 mm, 光轴取向 $\theta'_m = 41.85^\circ$, 光束偏离长度为 $\Delta L' = 0.11D$, 最后输出光束 14 和 15, 16 和 17 的相邻距离约为 4.4 mm。在使用波长 1064 nm 处, LiNbO₃ 晶体的半波电压约为 5000 kV, 对应 90° 相移所需的电压约为 100 V。

3 结 论

根据空间光桥接器的基本组成原理, 综合利用晶体的双折射效应和电光效应, 设计出了一种新型的可应用于空间相干探测系统的 $90^\circ 2 \times 4$ 空间光桥接器。该桥接器主要由两对具有电极控制的双折射光学平板和一块检偏双折射光学元件构成, 具有结构简单紧凑、性能稳定可靠、插入损耗小等优点, 在未来空间激光通信和激光雷达领域有重要潜在应用。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Yan, M. Jeganathan, J. R. Lesh. Progress on the development of the optical communications demonstrator[C]. *SPIE*, 1997, **2990**:94~101
- 2 A. T. Nakamori. Present and future of optical intersatellite communication research at the National Space Development Agency of Japan(NASDA)[C]. *SPIE*, 1994, **2123**:2~13
- 3 M. Boroson, R. S. Bondurant, J. J. Seozzafava. Overview of high rate deep space laser communications options[C]. *SPIE*, 2004, **5338**:37~49
- 4 M. Bopp, G. Huther, T. Spatscheck *et al.*. BPSK homodyne and DPSK heterodyne receivers for free-space communication with Nd : host lasers[C]. *SPIE*, 1991, **1522**:199~209
- 5 F. Herzog, K. Kudielka, D. Erni *et al.*. Optical phase locked

- loop for transparent inter-satellite communications[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(10):3816~3821
- 6 F. T. Herzog. An optical phase locked loop for coherent space communications [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006
- 7 Liu Liren. Laser communications in space. I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
- 刘立人. 卫星激光通信. I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
- 8 Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(8):44~51
- 许楠, 刘立人, 刘德安等. 自由空间相干光通信技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(8): 44~51
- 9 Heinrich-Hertz. Compact bulk optical 90° hybrid for balanced phase diversity receivers[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(22): 11~12
- 10 Seiji Norimatsu, Noboru Takachio, Yasuyuki Inoue *et al.*. An optical 90° -hybrid balanced receiver module using a planar lightwave circuit[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(6): 737~740
- 11 Pak S. Cho, Geof Harston, Chris J. Kerr *et al.*. Improvement of coherent homodyne detection performance using time-gated amplification and LiNbO₃ optical 90° hybrid[C]. *SPIE*, 2004, **5403**: 762~773
- 12 D. Hoffmann, H. Heidrich, G. Wenke *et al.*. Integrated optics eight-port 90° hybrid on LiNbO₃[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(5): 794~798
- 13 W. R. Leeb. Optical 90° hybrid for costas-type receivers[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1431~1432
- 14 Hideki Tsunetsugu, Masakaze Hosoya, Seiji Norimatsu *et al.*. A packaging technique for an optical 90° -hybrid balanced receiver using a planar lightwave circuit [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B*, 1996, **19**(3): 569~574
- 15 Leonid G. Kazovsky, Lyn Curtis, William C. Young *et al.*. All-fiber 90° optical hybrid for coherent communications[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 437~439
- 16 Matthias Seimetz, Carl-Michael Weinert. Options, feasibility and availability of 2×4 90° hybrids for coherent optical systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1317~1322
- 17 R. Garreis, Carl Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 18 Walter R. Leeb. Realization of 90° and 180° hybrids for optical frequencies[C]. *AEÜ*, 1983, **37**: 203~206