

2×4 集成结构 90°空间光学桥接器

宋哲*, 于伟行, 宋佳, 王妍, 田小凡, 赵趣, 王安鸽

辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029

摘要 利用晶体的双折射、双反射现象及电光效应,设计了一种具有集成结构的 2×4 的 90°空间光学桥接器,其由一块电控双折射晶体和一块检偏双折射晶体构成。电控双折射晶体通过 4 次全内双反射和电光调制实现信号光与本振光的分束和耦合,通过调节电控双折射晶体的控制电压和检偏双折射晶体的双折射效应,输出了 4 路具有 90°相移的信号光与本振光混合光束。该桥接器具有结构简单紧凑、损耗小、性能稳定等优点,适用于空间相干通信系统。

关键词 光学器件; 相干光通信; 90°光学桥接器; 双折射; 双反射; 电光效应

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.112302

2×4 Free-Space 90° Optical Hybrid with Integrated Structure

Song Zhe*, Yu Weihang, Song Jia, Wang Yan, Tian Xiaofan, Zhao Qu, Wang Ange

College of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China

Abstract Based on the double refraction and double reflection phenomena and on the electro-optic effect of crystals, a 2×4 free-space 90° optical hybrid with an integrated structure is designed. This optical hybrid is composed of an electrically controlled birefringence crystal and a birefringence crystal which is used as an analyzer. With the electrically controlled birefringence crystal, the splitting and coupling between the signal light and the local oscillation light are realized by means of four internal double reflections and the electro-optic modulation. By adjusting the control voltage of the electrically controlled birefringence crystal and the double refraction effect of the analyzer, four-route signal-local mixed lights with a 90° phase shift are obtained. This hybrid exhibits the advantages of simple and compact structure, low loss and stable performance, which is applicable to the spatial coherence communication system.

Key words optical devices; coherent optical communication; 90° optical hybrid; double refraction; double reflection; electro-optic effect

OCIS codes 230.0250; 230.2090; 060.2605; 060.4510

1 引言

相干光通信具有灵敏度高、中继距离长、传输容量大等优点,是空间激光通信的主要技术之一^[1-3]。光学桥接器是相干光通信接收端的核心器件之一,具有合成信号光与本振光并产生固定相移的作用。光学桥接器主要有两输出 90°相移、两输出 180°相移、四输出 90°相移三种类型。2×2 的 90°桥接器用于科斯塔斯锁相环路接收机,2×2 的 180°桥接器用于平衡锁相环路接收机,2×4 的 90°桥接器可同时产生两组相差为 90°的 180°相移输出,既可进行平衡锁相又可进行科斯塔斯锁相,故 2×4 的 90°桥接

器得到广泛研究^[4]。目前,2×4 的自由空间型 90°光学桥接器主要有利用波片、非偏振分束器与偏振分束器实现的^[5-8],利用双折射晶体与相位补偿板实现的^[9]及利用双折射晶体与电光晶体实现的^[10-11]。利用双折射晶体实现的光学桥接器主要包括两对双折射光学平板与一块检偏双折射晶体,分别用于实现信号光与本振光的分束和耦合及 4 路信号/本振混合光的输出,90°相移由相位补偿板或电光晶体获得。本文在此基础上考虑单块晶体 2×2 光开关^[12]的集成原理,设计了一种具有集成结构的 2×4 的 90°光学桥接器。利用晶体的全内双反射现象和电光效应使信号光和本振光在一块晶体内实现分束与耦

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-05-17; 录用日期: 2018-06-04

* E-mail: zhesongkeke@163.com

合,将两对双折射光学平板简化为一块具有电光效应的双折射晶体,同时通过调节该晶体上的控制电压获得了 90° 相移,通过另一块双折射晶体获得了4路混合光输出,实现了 2×4 的 90° 光学桥接器的功能。该桥接器仅由两块晶体构成,结构简单紧凑、损耗小、性能可靠,适用于空间相干光通信的接收端。

2 2×4 集成结构 90° 光学桥接器的设计

图1所示为 2×4 集成结构 90° 光学桥接器的结构示意图,其中 xyz 为坐标系, E_s 为信号光, E_L 为本振光, T 为两束输入光束之间的距离。 P_1 为电控双折射晶体(铌酸锂),其被切割成平行六面体,晶体宽度(两个反射面之间的距离)为 h 。晶体光轴 c 轴沿 MN 方向(即 z 轴方向),垂直于输入(输出)面,与反射面法线成 θ 角度。在两个电极面上(垂直于 x 轴的两个面),沿光轴方向镀有三对电极,第一对

电极上施加控制电压 V_1 ,用于调节光束的相位以获得 90° 相移,第二、三对电极上施加半波电压 $V_{\lambda/2}$,用于调节光束的偏振态。 P_2 为检偏双折射晶体(方解石),主截面与 P_1 主截面成 45° 。信号光和本振光均为线偏振光,沿 z 轴垂直入射到晶体 P_1 上,经过第一次全内双反射后均分成两束正交偏振光: o 偏振(x 轴方向振动)和 e 偏振(y 轴方向振动),晶体中 o 光和 e 光的分离角为 β ;经第二次全内双反射后,4束光均沿光轴方向传输,其中信号 o 光和本振 e 光重叠在一起,信号 e 光在半波电压作用下变为 o 光,本振 o 光在半波电压作用下变为 e 光;经过第三次和第四次全内双反射后,两束信号 o 光分别与两束本振 e 光合并,形成两束信号/本振混合光输出 E_{h1} 、 E_{h2} ;该输出由晶体 P_2 双折射后分成4束信号/本振混合光 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 。通过调节第一对电极上的控制电压可以获得 90° 相移,从而实现 2×4 的 90° 光学桥接器功能。

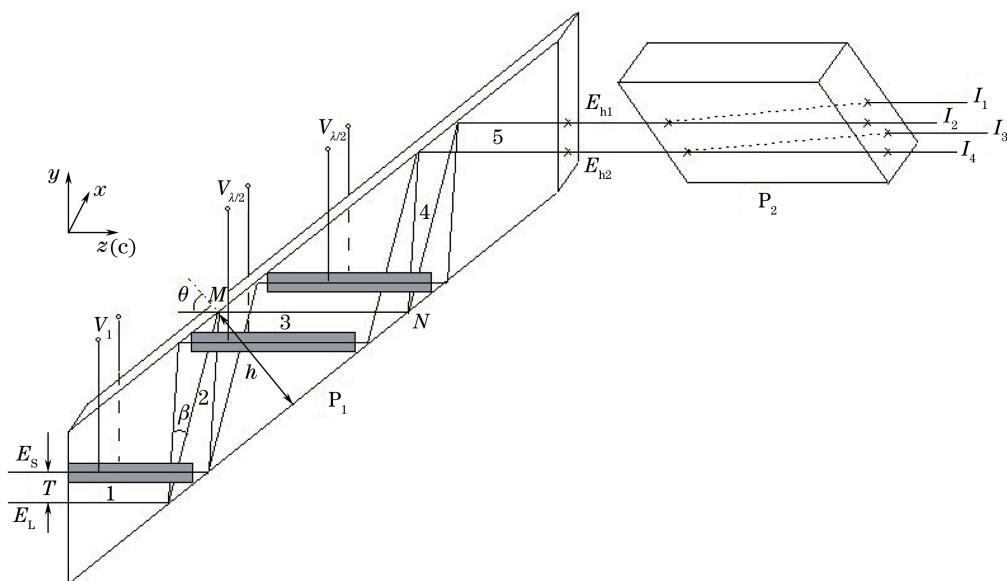


图1 2×4 集成结构 90° 空间光学桥接器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of integrated 2×4 free-space 90° optical hybrid with integrated structure

2.1 器件原理

令信号光 E_s 为 x 方向振动的线偏光,本振光 E_L 为与 x 轴成 45° 方向振动的线偏光,其表达式分别为

$$E_s = A_s \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s0}]\}, \quad (1)$$

$$E_L = A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0}]\}, \quad (2)$$

式中 A_s 、 A_L 、 ω_s 、 ω_L 、 φ_{s0} 、 φ_{L0} 分别为信号光和本振光的振幅、角频率、初始相位; $\varphi_s(t)$ 为信号光的相位调制函数, t 为时间。信号光和本振光在晶体 P_1 中有5段路径4次全内双反射,其中第1、3、5段路径

是沿光轴传输,此外共有3段路径经过电场。根据铌酸锂晶体的横向电光效应,在 x 轴方向加电场 E ,晶体将由单轴晶变成双轴晶,感应主轴 x' 、 y' 绕 z 轴旋转了 45° ,如图2所示。此时晶体相当于一个电控波片,当施加半波电压 $V_{\lambda/2}$ 时为 $\lambda/2$ 波片, x (y)方向振动的线偏光经过电场区,振动方向将转动 90° ;当施加半波电压一半的电压时,晶体相当于 $\lambda/4$ 波片, x (y)方向振动的线偏光经过电场区将变成圆偏光。当信号光在晶体 P_1 中经过第一段路径到达第一反射点时,由于电场作用,信号光分成 x'

方向和 y' 方向振动的两束光, 它们之间将产生 δ 的相位差, 全内双反射后分成 x 方向和 y 方向振动的两束光, 即 o 光 E_{So} 和 e 光 E_{Se} :

$$\begin{bmatrix} E_{So} \\ E_{Se} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_{So} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_x + \varphi_{So1f}]\} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_{Se} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_y + \varphi_{Se1f}]\} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 A_{So} 、 A_{Se} 为信号 o 光和 e 光的振幅; φ_x 、 φ_y 为信号光经过第一段路径后在 x 方向和 y 方向产生的相位延迟; φ_{So1f} 、 φ_{Se1f} 分别为信号 o 光和 e 光经第一次全反射后产生的相位延迟。根据铌酸锂晶体的横向电光效应可得

$$\delta = \varphi_{x'} - \varphi_{y'} = \frac{2\pi}{\lambda} \gamma_{22} n_o^3 \frac{l_1}{d} V_1 = \frac{\pi V_1}{V_{\lambda/2}}, \quad (4)$$

$$A_{So} = A_S \sqrt{1 + \cos \delta}, \quad (5)$$

$$A_{Se} = A_S \sqrt{1 - \cos \delta}, \quad (6)$$

$$\tan \varphi_x = \frac{\sin \delta}{\cos \delta + 1}, \quad (7)$$

$$\tan \varphi_y = \frac{\sin \delta}{\cos \delta - 1}, \quad (8)$$

式中 λ 为信号光波长; γ_{22} 为铌酸锂晶体的电光系数; n_o 为 o 光的主折射率; d 为晶体厚度; l_1 为第一段路径的长度。

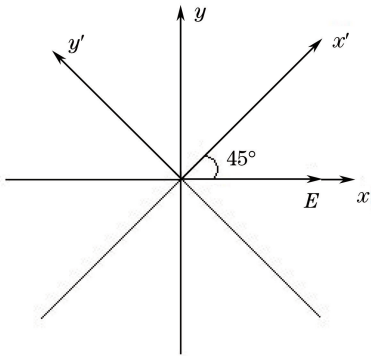


图 2 铌酸锂晶体 x 方向加载电场时的感应主轴方向

Fig. 2 Direction along electrically induced principal axis of LiNbO_3 crystal when electrical field is loaded along x -direction

本振光经过第一段路径和第一次全内双反射后分成两束正交偏振光: o 光 E_{Lo} 和 e 光 E_{Le} , 其表达式为

$$\begin{bmatrix} E_{Lo} \\ E_{Le} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{Lo1f}]\} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{Le1f}]\} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 φ_{L1} 为本征光经过第一段路径产生的相位延迟; φ_{Lo1f} 、 φ_{Le1f} 分别为本振 o 光和 e 光第一次全反射产生的相位延迟。

4 束光经过第二段路径和第二次全内双反射后分别产生相位延迟 φ_{So2} 、 φ_{Se2} 、 φ_{Lo2} 、 φ_{Le2} 和 φ_{So2f} 、 φ_{Se2f} 、 φ_{Lo2f} 、 φ_{Le2f} 。经过第三段路径时, 由于光束互相平行并沿光轴传输, 信号 e 光在半波电压作用下产生 π 相位延迟, 变为 o 光 E_{Seo} , 全反射引起相位延迟 φ_{So3f} ; 本振 o 光在半波电压作用下变为 e 光 E_{Loe} , 全反射引起相位延迟 φ_{Le3f} ; 信号 o 光和本振 e 光重叠在一起产生 φ_3 相位延迟, 全反射后再分开, 分别产生 φ_{So3f} 和 φ_{Le3f} 的相位变化, 此时 4 束光的表达式分别为

$$E_{So} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{So} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_x + \varphi_{So1f} + \varphi_{So2} + \varphi_{So2f} + \varphi_3 + \varphi_{So3f}]\}, \quad (10)$$

$$E_{Se} \rightarrow E_{Seo} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{Se} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_y + \varphi_{Se1f} + \varphi_{Se2} + \varphi_{Se2f} + \varphi_{So3f}]\}, \quad (11)$$

$$E_{Lo} \rightarrow E_{Loe} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{Lo1f} + \varphi_{Lo2} + \varphi_{Lo2f} + \varphi_{Le3f}]\}, \quad (12)$$

$$E_{Le} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{Le1f} + \varphi_{Le2} + \varphi_{Le2f} + \varphi_3 + \varphi_{Le3f}]\}. \quad (13)$$

经过第四段路径和第四次全内反射后, 两束信号 o 光将分别与两束本振 e 光合并, 变为两束信号/本振混合光 E_{h1} 、 E_{h2} , 经第五段路径输出分别产生相位延迟 φ_{So41} 、 φ_{Le41} 、 φ_{So42} 、 φ_{Le42} 、 φ_{So41f} 、 φ_{Le41f} 、 φ_{So42f} 、 φ_{Le42f} 和 φ_{h51} 、 φ_{h52} 。两束混合光的表达式分别为

$$E_{h1} = E_{Seo} + E_{Le} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{Se} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_y + \varphi_{Se1f} + \varphi_{Se2} + \varphi_{Se2f} + \varphi_{So3f} + \varphi_{So41} + \varphi_{So41f} + \varphi_{h51}]\} + \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{Le1f} + \varphi_{Le2} + \varphi_{Le2f} + \varphi_3 + \varphi_{Le3f} + \varphi_{Le41} + \varphi_{Le41f} + \varphi_{h51}]\}, \quad (14)$$

$$E_{h2} = E_{So} + E_{Loe} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{So} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{S0} + \varphi_x + \varphi_{So1f} + \varphi_{So2} + \varphi_{So2f} + \varphi_3 + \varphi_{So3f} + \varphi_{So42} +$$

$$\varphi_{\text{So42f}} + \varphi_{\text{h52}} \} + \frac{\sqrt{2}}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{L01f} + \varphi_{L02} + \varphi_{L02f} + \varphi_{L03f} + \varphi_{L042} + \varphi_{L042f} + \varphi_{\text{h52}}]\} \quad (15)$$

第二块晶体的主截面与第一块晶体的主截面成 45° , 故两束混合光垂直入射到晶体 P_2 时发生双折射, 分成 4 束混合光 E_1, E_2, E_3, E_4 输出, 产生的相位延迟分别为 φ_{o6} 和 φ_{e6} 。 E_1, E_2, E_3, E_4 的表达式分别为

$$E_1 = \frac{1}{2} A_{\text{Se}} \exp\{i[\omega_S t + \varphi_S(t) + \varphi_{\text{So}} + \varphi_y + \varphi_{\text{Se1f}} + \varphi_{\text{Se2}} + \varphi_{\text{Se2f}} + \varphi_{\text{So3f}} + \varphi_{\text{So41}} + \varphi_{\text{So41f}} + \varphi_{\text{h15}} + \varphi_{o6}]\} + \frac{1}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{L01f} + \varphi_{L02} + \varphi_{L02f} + \varphi_3 + \varphi_{L03f} + \varphi_{L041} + \varphi_{L041f} + \varphi_{\text{h51}} + \varphi_{o6}]\} \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} A_{\text{Se}} \exp\{i[\omega_S t + \varphi_S(t) + \varphi_{\text{So}} + \varphi_y + \varphi_{\text{Se1f}} + \varphi_{\text{Se2}} + \varphi_{\text{Se2f}} + \varphi_{\text{So3f}} + \varphi_{\text{So41}} + \varphi_{\text{So41f}} + \varphi_{\text{h51}} + \varphi_{e6}]\} - \frac{1}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{L01f} + \varphi_{L02} + \varphi_{L02f} + \varphi_3 + \varphi_{L03f} + \varphi_{L041} + \varphi_{L041f} + \varphi_{\text{h51}} + \varphi_{e6}]\} \quad (17)$$

$$E_3 = \frac{1}{2} A_{\text{So}} \exp\{i[\omega_S t + \varphi_S(t) + \varphi_{\text{So}} + \varphi_x + \varphi_{\text{So1f}} + \varphi_{\text{So2}} + \varphi_{\text{So2f}} + \varphi_3 + \varphi_{\text{So3f}} + \varphi_{\text{So42}} + \varphi_{\text{So42f}} + \varphi_{\text{h52}} + \varphi_{o6}]\} + \frac{1}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{L01f} + \varphi_{L02} + \varphi_{L02f} + \varphi_{L03f} + \varphi_{L042} + \varphi_{L042f} + \varphi_{\text{h52}} + \varphi_{o6}]\} \quad (18)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} A_{\text{So}} \exp\{i[\omega_S t + \varphi_S(t) + \varphi_{\text{So}} + \varphi_x + \varphi_{\text{So1f}} + \varphi_{\text{So2}} + \varphi_{\text{So2f}} + \varphi_3 + \varphi_{\text{So3f}} + \varphi_{\text{So42}} + \varphi_{\text{So42f}} + \varphi_{\text{h52}} + \varphi_{e6}]\} - \frac{1}{2} A_L \exp\{i[\omega_L t + \varphi_{L0} + \varphi_{L1} + \varphi_{L01f} + \varphi_{L02} + \varphi_{L02f} + \varphi_{L03f} + \varphi_{L042} + \varphi_{L042f} + \varphi_{\text{h52}} + \varphi_{e6}]\} \quad (19)$$

在晶体 P_1 中, 由于两个反射面平行, o 光(e 光)的第二段路径和第四段路径长度相等, 有

$$\varphi_{\text{So2}} = \varphi_{L02} = \varphi_{\text{So41}} = \varphi_{\text{So42}} \quad (20)$$

$$\varphi_{\text{Se2}} = \varphi_{L02} = \varphi_{L041} = \varphi_{L042} \quad (21)$$

$$\varphi_{\text{So1f}} = \varphi_{\text{So2f}} = \varphi_{L01f} = \varphi_{L02f} = \varphi_{\text{So3f}} = \varphi_{\text{So41f}} = \varphi_{\text{So42f}} \quad (22)$$

$$\varphi_{\text{Se1f}} = \varphi_{L01f} = \varphi_{L03f} \quad (23)$$

$$\varphi_{\text{Se2f}} = \varphi_{L02f} = \varphi_{L041f} = \varphi_{L042f} \quad (24)$$

因此, 从晶体 P_2 输出的 4 束光的光强分别为

$$I_1 = \frac{1}{4} \{ |A_{\text{Se}}|^2 + |A_L|^2 + 2|A_{\text{Se}}||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + 0] \} \quad (25)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} \{ |A_{\text{Se}}|^2 + |A_L|^2 + 2|A_{\text{Se}}||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + \pi] \} \quad (26)$$

$$I_3 = \frac{1}{4} \{ |A_{\text{Se}}|^2 + |A_L|^2 + 2|A_{\text{Se}}||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + (\varphi_x - \varphi_y) + 2\varphi_3 + 0] \} \quad (27)$$

$$I_4 = \frac{1}{4} \{ |A_{\text{Se}}|^2 + |A_L|^2 + 2|A_{\text{Se}}||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + (\varphi_x - \varphi_y) + 2\varphi_3 + \pi] \} \quad (28)$$

$$\varphi = \varphi_{\text{So2}} - \varphi_{\text{Se2}} - \varphi_{L1} + 2\varphi_{\text{So1f}} - \varphi_{\text{Se1f}} - \varphi_{\text{Se2f}} \quad (29)$$

由(25)~(29)式可知, 若满足

$$(\varphi_x - \varphi_y) + 2\varphi_3 = \frac{\pi}{2} + 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (30)$$

即可获得 90° 相移。

2.2 结构设计

在(30)式中, 相位 φ_3 的表达式为

$$\varphi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o \frac{h}{\cos \theta} \quad (31)$$

通过合理设计 h 和 θ , 可以使 φ_3 为 π 的整数倍。

由(7)~(8)式可得

$$\varphi_x - \varphi_y = \arctan \frac{\sin \delta}{\cos \delta + 1} - \arctan \frac{\sin \delta}{\cos \delta - 1} \quad (32)$$

当 $\delta = \pi/2 + 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时, $(\varphi_x - \varphi_y) = \pi/2 + 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, (30) 式成立。由(4)式可知, V_1 施加半波电压的一半时, $\delta = \pi/2, P_2$ 输出的 4 束光之间将产生 90° 相移。根据(5)~(6)式, $A_{\text{So}} = A_{\text{Se}} = A_S$, 故 4 束光的表达式分别为

$$I_1 = \frac{1}{4} \{ |A_S|^2 + |A_L|^2 + 2|A_S||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + 0] \} \quad (33)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} \{ |A_S|^2 + |A_L|^2 + 2|A_S||A_L| \cdot$$

$$\cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{\text{So}} - \varphi_{L0}) + \varphi + \pi] \} \quad (34)$$

$$I_3 = \frac{1}{4} \left\{ |A_S|^2 + |A_L|^2 + 2|A_S||A_L| \cdot \cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{S0} - \varphi_{L0}) + \varphi + \frac{\pi}{2}] \right\}, \quad (35)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} \left\{ |A_S|^2 + |A_L|^2 + 2|A_S||A_L| \cdot \cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S(t) + (\varphi_{S0} - \varphi_{L0}) + \varphi + \frac{3\pi}{2}] \right\}. \quad (36)$$

设使用波长为 632.8 nm, 信号光和本振光的直径为 0.6 mm。由(31)式可知, 为使 φ_3 为 π 的整数倍, 电控双折射铌酸锂晶体的光轴与反射面法线的夹角取 $\theta = 40^\circ$, 两反射面的距离取 $h = 21.2$ mm, 此时 φ_3 为 π 的整数倍, 铌酸锂晶体的尺寸为 31 mm (宽度) \times 74 mm (反射面长度) \times 2 mm (厚度)。检偏双折射方解石晶体的光轴取向为 41.85° , 此时 o 光和 e 光的分离角最大, 晶体尺寸为 30 mm \times 10 mm \times 10 mm。第一对电极的尺寸为 1 mm \times 24 mm, 对应 90° 相移驱动电压约为 167 V, 第二对和第三对电极的尺寸为 1 mm \times 27 mm, 半波驱动电压约为 296 V。

3 讨 论

设计的光学桥接器由两块双折射晶体构成, 其中第一块晶体是关键, 它既能实现信号光和本振光的耦合, 又能提供 90° 相移, 故该晶体的尺寸决定了桥接器的耦合效果和相移。晶体的尺寸主要取决于两反射面距离 h 和光轴取向 θ 。 90° 相移由(30)式决定, 令 $\varphi_3 = k\pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 由(31)式可知, 当 h 与 θ 有误差(误差分别为 Δh 、 $\Delta\theta$)时, 相位波动分别为

$$\Delta\varphi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o \frac{1}{\cos\theta} \Delta h, \quad (37)$$

$$\Delta\varphi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o \frac{\sin\theta}{\cos^2\theta} \Delta\theta. \quad (38)$$

由(37)、(38)式可得, 当 h 有 0.1 mm 的误差时, 相位波动约为 0.85° ; 当 θ 有 0.1° 误差时, 相位波动约为 0.26° 。考虑到现有高精度晶体切割技术误差会更小, 可知晶体尺寸误差对相移的影响较小。还可以通过调节第一对电极上的电压消除相位的波动, 以获得稳定的 90° 相移。

当 h 或 θ 有误差时, 两束输入光束之间的距离 T 会出现偏差, 影响耦合效率。 T 可表示为

$$T = \cos\theta [\tan(\theta + \beta) - \tan\theta] h. \quad (39)$$

$\beta^{[12]}$ 的表达式为

$$\tan\beta = \frac{(n_o^2 - n_e^2) \cos^2\theta \sin(2\theta)}{n_o^2 - (n_o^2 - n_e^2) \cos^2\theta \cos(2\theta)}, \quad (40)$$

式中 n_e 为 e 光的主折射率。

由(39)、(40)式可知, 当 h 有 0.1 mm 的误差时, T 约变化 0.0057 mm; 当 θ 有 0.1° 误差时, T 约变化 0.0012 mm, 可见晶体尺寸误差对耦合效率的影响不大。

现有空间光学桥接器一般包含四块尺寸、形状完全相同的晶体, 两两组成一对, 安装时要求两对晶体的端面平行, 主截面互相垂直, 否则将影响相移和耦合效率。设计的光学桥接器将这四块晶体集成为一块晶体, 晶体数量减少, 光束经过的光面减少, 其中两个面设计成全反射面。因此, 器件的能量损耗更小, 对晶体尺寸误差的敏感性更低, 安装校准更容易, 同时也降低了成本。

4 结 论

光学桥接器具有合束、分束、移相的功能, 利用晶体的双折射、双反射效应和电光效应, 设计了一种 2×4 集成结构的 90° 空间光学桥接器。该桥接器仅由一块电控双折射晶体与一块检偏双折射晶体构成。电控双折射晶体通过对光波进行 4 次全内双反射和 3 次电光调制, 实现了信号光和本振光的分束与耦合及 90° 相移的产生。检偏双折射晶体通过对光波进行双折射, 实现了信号光与本振光混合光的再分束, 得到了 4 束相移为 90° 的混合光, 实现了 2×4 的 90° 光学桥接器的功能。该桥接器的结构简单紧凑、所用单元器件少、插入损耗小、性能可靠, 适用于空间激光相干通信。

参 考 文 献

- [1] Chan V W S. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [2] Liu L R. Laser communications in spacel optical link and terminal technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 3-20.
刘立人. 卫星激光通信|链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 3-20.
- [3] Xu N, Liu L R, Liu D A, 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.
- [4] Wan L Y, Gu W, Wang R C, *et al.* Optical hybrids in coherent laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010604.
万玲玉, 谷巍, 王戎丞, 等. 相干光通信中的光学桥接器[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 010604.
- [5] Garreis R, Zeiss C. 90° optical hybrid for coherent receivers[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1522: 210-219.
- [6] Horwath J, David F, Knapek M, *et al.* Coherent transmission feasibility analysis [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5712: 13-23.
- [7] Zhou Y, Wan L Y, Zhi Y N, *et al.* Polarization-splitting 2×4 90° 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 2×4 90°自由空间光学桥接器[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3291-3294.
- [8] Zheng Y, Jiang H L, Tong S F, *et al.* Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on space coherent laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906008.
郑阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906008.
- [9] Hou P P, Zhou Y, Zhi Y N, *et al.* Free space optical 2×4 90° hybrid based on crystal birefringence[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3413-3416.
侯培培, 周煜, 职亚楠, 等. 晶体双折射自由空间 2×4 90°光学桥接器[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3413-3416.
- [10] Wan L Y, Su S D, Liu L R, *et al.* Design of a new 90° 2×4 hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal[J]. Chinese Journal of 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.
- [11] Wan L Y, Zhou Y, Liu L R, *et al.* A free-space 2×4 90° optical hybrid with electro-optic modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0723002.
万玲玉, 周煜, 刘立人, 等. 电光调制 2×4 90°相移空间光学桥接器[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0723002.
- [12] Song Z, Liu L R, Ren H X, *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.