

# 相干光通信中的光学桥接器

万玲玉 谷巍 王戎丞 马雪梅

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

**摘要** 相干光通信技术是提高接收机灵敏度,发展大容量高码率激光通信系统的重要手段,光学桥接器将信号激光和本振激光链接到光电探测器进行相干探测处理,是相干光通信系统的关键器件之一。对近 20 多年来发展的光学桥接器进行了总结和分类,介绍了不同光学桥接器的原理、构造和性能,分析了光学桥接器的关键技术。

**关键词** 光通信;相干通信;光学桥接器;相移

**中图分类号** TN929.13

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP48.010604

## Optical Hybrids in Coherent Laser Communication

Wan Lingyu Gu Wei Wang Rongcheng Ma Xuemei

(College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract** Coherent optical communication is an important technique which improves the sensitivity of receiver and develops a large-capacity and high-rate laser communication system. An optical hybrid is one of the key components of coherent receiver, which mixes the signal with the local oscillator beams and bridges them to detector for information processing. In this paper, the optical hybrids developed in recent twenties years are surveyed. The principles, configurations and properties of different optical hybrids are introduced and the key techniques are analyzed.

**Key words** optical communication; coherent communication; optical hybrid; phase shift

**OCIS codes** 060.1660; 230.0230; 130.0130; 250.0250

## 1 引言

相干通信体制和目前实用的强度调制/直接检测<sup>[1]</sup>的非相干通信体制相比具有接收灵敏度高、中继距离长、波长选择性好、通信容量大、应用灵活等优点,是大容量、高码率激光通信系统的重要研究方向,特别是在星间激光通信系统中有重要应用。经过几十年的研究,德国首先制造了轻量化、高码率的星间相干激光通信终端,成功实现了低轨卫星之间的 5.6 Gb/s 激光通信,为实现高轨中继卫星与低轨观察卫星之间的通信奠定了基础。作为相干光通信终端的核心器件之一,光学桥接器将信号激光和本振激光链接到光电探测器,并使之产生所需的相位关系,以便后续的相干探测信息处理,其性能在很大程度上影响着相干接收性能。

光学桥接器有两输入两输出( $2 \times 2$ ), $90^\circ$ 相移,两输入两输出, $180^\circ$ 相移和两输入四输出( $2 \times 4$ ), $90^\circ$ 相移几种类型。一般情况下, $180^\circ$ 相移桥接器用于平衡锁相环路接收机, $90^\circ$ 相移桥接器用于科斯塔斯锁相环路接收机,对于 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 相移桥接器,可以同时实现相差 $90^\circ$ 的两组 $180^\circ$ 相移的输出,可进行平衡接收及科斯塔斯锁相,由于平衡接收机能产生与理想接收机的相同性能,因而 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 光学桥接器被广泛研究<sup>[2~20]</sup>。针对光纤通信系统和空间激光通信系统,人们发展了多种 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 光学桥接器。由于在空间应用中,系统不仅需要探测通信信息,还需要探测位置信息,通常需要自由空间传播型的桥接器,因此我们将光学桥接器归为非自由空间传播型和自由空间传播型进行介绍。

## 2 非自由空间传播型的光学桥接器

针对光纤通信系统开发的光学桥接器基本都属于非自由空间传播型,大多采用光纤和波导器件实现,可

**收稿日期:** 2010-08-02; **收到修改稿日期:** 2010-09-09

**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,副教授,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

分为如下几种类型。

## 2.1 3 dB 耦合器型光学桥接器

3 dB 耦合器型光学桥接器<sup>[2~10]</sup>是光纤通信系统中用光学桥接器中开发最多的一种,主要由 3 dB 耦合器和两个偏振分束器(PBS)组成,如图 1 所示,其中 3 dB 耦合器可采用光纤型或者波导型,线偏振的信号光和圆偏振的本振光由 3 dB 耦合器进行分光耦合,两臂之间产生  $90^\circ$  的相位差,混合后通过两个 PBS 进行偏光分离,分离过程中产生  $180^\circ$  的相位差,最后输出相对相移关系为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  的四束相干光束  $E_1, E_2, E_3, E_4$ 。该光学桥接器的性能主要取决于 3 dB 耦合器的性能,其分光比和两臂之间的相位差是关键,采用光纤或者波导耦合器实现的桥接器存在易受环境和温度影响,相位输出性能不够稳定的缺点,实验显示随环境振动和温度变化有较大的相位抖动和漂移现象,因此,提高其相位稳定性是此类光学桥接器的关键问题。

## 2.2 波导集成型

### 2.2.1 平面光波导集成光学桥接器

平面光波导能将光波束缚在光波长量级尺寸的波导芯层中,长距离无辐射的传输,结合定向耦合器和相移器可制成光学桥接器<sup>[11,12]</sup>。图 2 是基于平面光波导和相移器实现的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器,主要由 4 个定向耦合器(DC)和 2 个相移器(PS)构成,其中相移器 PS1, PS2 连续可调,DC1 将从端口 A 输入的信号光进行 1:1 分光,由相移器 PS1 调节端口 R 与 T 之间的相位差,DC2 将从 D 端口输入的本振光进行 1:1 分光,由相移器 PS2 调节端口 S 与 U 之间的相位差。从 R, T 输出的信号光和从 S, U 输出的本振光分别由耦合器 DC3, DC4 进行分光耦合,最后从端口 W, X, Y, Z 输出 4 束信号/本振相干光,当合适调节相移器 PS1, PS2 使得 R 和 T 同相位、S 和 U 相位相差  $90^\circ$  时,输出 X, Y, Z 具有相对于 W 分别为  $180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$  的相移,实现  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  光桥接。该光学桥接器相位连续可调,但也面临因外界参量的变化而引起相位输出变化,相位稳定性不高的问题,实验通过反馈回路自动控制 PS, 可取得较好的结果,但因此增加了系统的复杂性。

### 2.2.2 多模干涉耦合器光学桥接器

基于多模波导自映像效应制成的多模干涉(MMI)耦合器<sup>[18,19]</sup>应用于多种光纤通信器件,利用多模干涉耦合器实现的光学桥接器<sup>[10,13~15]</sup>如图 3 所示,主要由输入波导、多模干涉耦合器和输出波导组成,从输入波导入射的光在多模干涉区激发多个模式进行模式干涉,最终形成输入场的多个自映像由输出波导出射。将具有相同工作波长的本振光与信号光分别从输入波导的任意两端口入射,经模式干涉形成的自映像由输出波导输出,根据输入波导  $i$  与输出映像  $j$  间的相位关系在合适的设计下可实现  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  光学桥接器。输入波导  $i$  与输出映像  $j$  间的相对相位关系<sup>[16,17]</sup>如表 1(此时忽略了常相位因子  $\phi_0$ )所示。由表 1 可知,当信号光与本振光从输入波导 1 和 2, 1 和 3, 2 和 4, 或者 3 和 4 等波导输入时,经模式干涉后,其输出波导的相干光之间的相对相移满足  $90^\circ$  的倍数,即  $-135^\circ, -45^\circ, 45^\circ$  和  $135^\circ$ , 从而实现  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  光学桥接器功能。

基于自映像多模干涉耦合器实现的光学桥接器具有结构紧凑、插入损耗低、频带较宽、受工作波长和环境温度影响小、工艺简单以及对偏振不敏感等优点,具有很大的应用潜力。

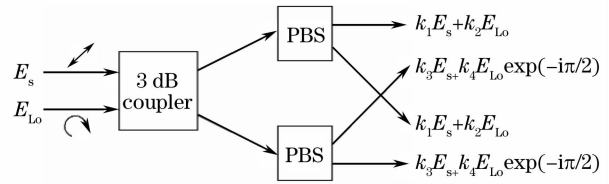


图 1 3 dB 耦合器型的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器

Fig. 1 Diagram of 3 dB coupler of optical  $2 \times 4$   $90^\circ$  hybrid

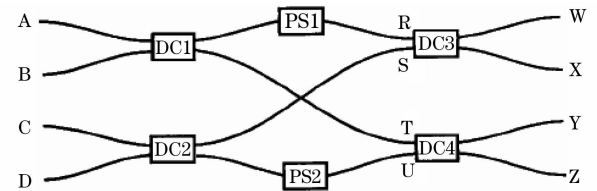


图 2 波导集成型的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器

Fig. 2 Waveguide and electrode arrangement of the optical  $2 \times 4$   $90^\circ$  hybrid

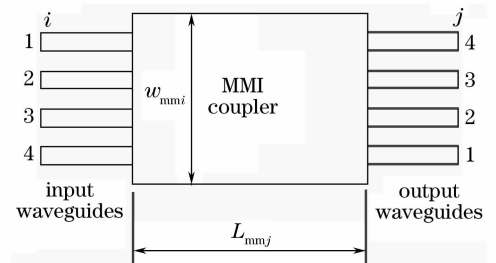


图 3 基于多模干涉耦合器实现的光学桥接器

Fig. 3 Realization of an optical hybrid based on multimode interference couplers

表 1  $4 \times 4$  MMI 耦合器输出像的相对相位值  
Table 1 Relative phase shift of output images of  $4 \times 4$  MMI coupler

	$i1$	$i2$	$i3$	$i4$
$j1$	$\pi$	$3\pi/4$	$-\pi/4$	$\pi$
$j2$	$3\pi/4$	$\pi$	$\pi$	$-\pi/4$
$j3$	$-\pi/4$	$\pi$	$\pi$	$3\pi/4$
$j4$	$\pi$	$-\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi$

### 2.3 混合型光学桥接器

为克服光纤耦合型桥接器环境适应能力差,相位输出不够稳定的缺点,H. Hertz 等<sup>[20]</sup>利用介质膜分束器和方解石棒综合设计了一个结构紧凑的  $2 \times 4$   $90^\circ$  光学桥接器,其原理和 2.1 节所述的 3 dB 耦合型桥接器相同,仅是介质膜分束器代替 3 dB 耦合器。如图 4 所示,信号光和本振光利用介质膜分束器的反射和透射进行分光合成,合成后通过方解石棒进行偏光分离,最后从端口 X, Z, Y, W 输出四束相对相位差为  $90^\circ$  的信号/本振相干光。该桥接器结构紧凑、相位输出稳定,是相干光通信系统的较好选择,但对介质膜分束器有较高的分光 and 相位要求。

以上所述的光学桥接器基本都是针对光纤通信系统开发,在空间激光通信系统中,在探测通信信号的同时需要探测位置信号,因此需要自由空间传播式的光学桥接器,大部分适用于光纤通信系统的光学桥接器都不适合空间应用,因此需要发展自由空间传播型的空间光桥接器。

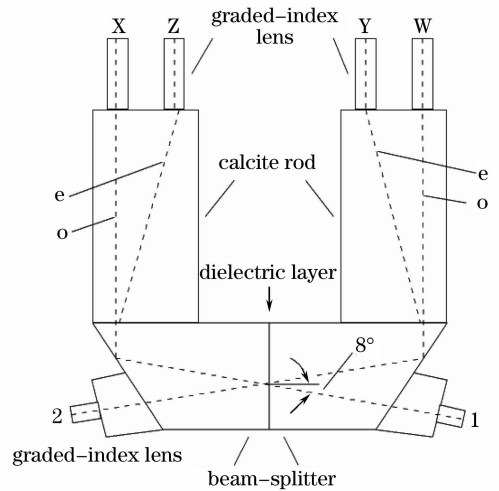


图 4 紧凑结构  $2 \times 4$   $90^\circ$  光桥接器  
Fig. 4 Compact optical  $2 \times 4$   $90^\circ$  hybrid

## 3 自由空间传播型的光学桥接器

现有方案中,空间光桥接器主要采用波片和分束器实现。

### 3.1 $2 \times 2$ 的空间光桥接器

1983 年,W. R. Leeb<sup>[21]</sup>提出了空间光桥接器的实现方案, $2 \times 2$  的  $90^\circ$  和  $180^\circ$  空间光桥接器如图 5 和图 6 所示。 $2 \times 2$  的  $90^\circ$  空间光桥接器主要由四分之一波片(QWP)、非偏振分束器(NPBS)和偏振分束器(PBS)构成,本振光经四分之一波片变成圆偏振光和  $45^\circ$  偏振的信号光通过 NPBS 进行分光合成,合成后一路被挡板吸收,另一路通过 PBS 进行偏光分离,由于信号光和本振光的 s 偏振分量之间的相位差为 0, p 偏振分量之间的相位差为  $90^\circ$ ,因此从端口 A, B 可得到相对相位差为  $90^\circ$  的相干光。 $2 \times 2$  的  $180^\circ$  空间光桥接器仅由起偏器和偏振分束器构成,利用相互垂直的偏振分量在偏光分离时的相位性质实现。

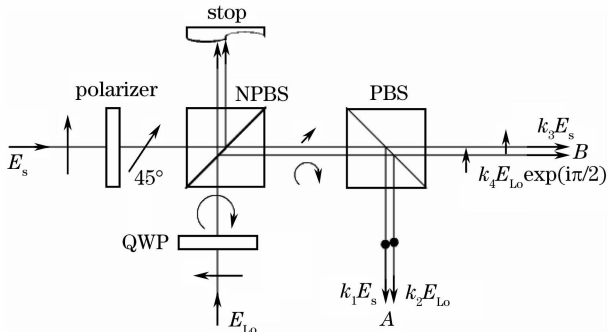


图 5  $2 \times 2$  的  $90^\circ$  空间光学桥接器  
Fig. 5 Space optical hybrid of  $2 \times 2$   $90^\circ$

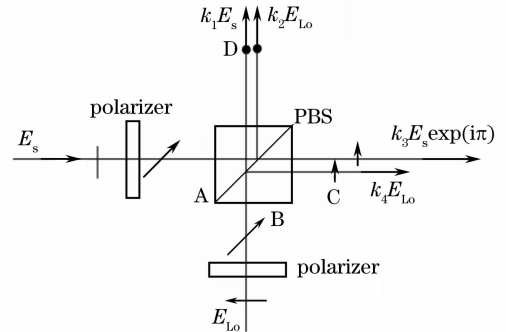


图 6  $2 \times 2$  的  $180^\circ$  空间光学桥接器  
Fig. 6 Space optical hybrid of  $2 \times 2$   $180^\circ$

### 3.2 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 空间光桥接器<sup>[22~24]</sup>

在 Leeb 方案的基础上, R. Garreis 等<sup>[22]</sup> 提出了两种  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光桥接器, 可称为非偏振分束器和偏振分束器方案<sup>[23,24]</sup>, 其原理和 2.1 所述的 3 dB 耦合型桥接器类似。非偏振分束器方案在德国的 TerraSAR 系统<sup>[25]</sup> 中被应用。

#### 3.2.1 非偏振分束器空间光桥接器方案

非偏振分束器方案主要由一个 NPBS 和两个 PBS 组成, 其中 NPBS 实现 3 dB 耦合器的功能, 分光耦合信号光与本振光并产生  $90^\circ$  的相位差, 联立四分之一波片 (QWP) 和 PBS 偏光分离时的相位性质产生所需的相移关系, 如图 7 所示。反射的信号光与透射的本振光合成后被 PBS1 分离, 透射的信号光与反射的本振光合成后被 PBS2 分离, 最后输出四束信号/本振相干光。这里对 NPBS 有较高的要求, 理想情况下需要透射/反射为 50/50 分光, 反射和透射间产生  $90^\circ$  相位差, 方能实现  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光桥接器功能。

#### 3.2.2 偏振分束器空间光桥接器方案

将分光耦合用的 NPBS 换成 PBS 即为偏振分束器方案, 同时增加两个半波片进行偏振方向调节, 如图 8 所示, 经 PBS 分光合成后的本振光和信号光分别经 HWP 转动  $45^\circ$  偏振方向后才被 PBS1, PBS2 进行偏光分离, 输出四束信号/本振相干光, 同样的, 只有当 PBS 满足 50/50 的透射/反射分光合成, 并产生  $90^\circ$  相位差时, 才能实现  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光桥接器功能。

现有空间光桥接器的关键在于用于分光合成的 NPBS 和 PBS, 不仅需要进行 1:1 分光还需要满足特定的相位条件, 总所周知, 分束器的相位是很难加以控制的, 尽管可通过旋转四分之一波片光轴的方法<sup>[21,22,26]</sup> 进行调节, 但会引起分光比变化, 当所需的相位条件偏离太大时, 相位调节引起的分光比变换太大不利于后面的平衡接收。因此, 发展其他新型的性能更好的空间光桥接器仍然是空间相干光通信的一个重要课题。

## 4 其他新型空间光桥接器

由于现有的空间光桥接器方案中对用于分光耦合的分束器有严格的相位条件要求, 但并无有效的方法对分光元件进行相位的控制, 因此发展新的空间光桥接器方案成为需要。刘立人等<sup>[27~29]</sup> 综合利用晶体的双折射效应和电光效应, 提出了不同的新型空间光桥接器方案, 为空间相干激光通信系统提供了新的选择。

## 5 结 论

作为相干光通信系统中的关键器件, 光学桥接器一直是国内外研究的重点, 如何有效实现接收通道中的  $90^\circ$  和  $180^\circ$  相移是研发高性能光学桥接器的技术核心和难点, 针对光纤通信系统开发的光学桥接器种类较多, 有相对成熟的技术方案, 但仍存在相位精度和稳定性难以进一步提高的问题, 多模干涉耦合光学桥接器技术是未来高性能光学桥接器的重要发展方向, 自由空间型的光学桥接器的种类则较少, 低损耗、高探测效率的具有稳定相位输出的空间光桥接器还有待进一步研究。

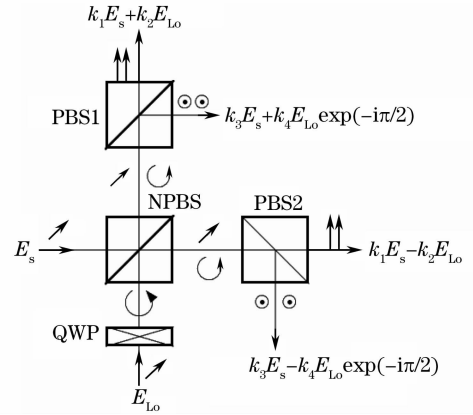


图 7 非偏振分束器空间光桥接器方案  
Fig. 7 Scheme of the space optical hybrid based on NPBS

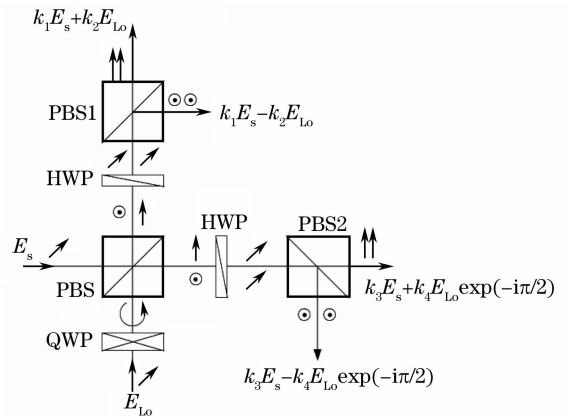


图 8 偏振分束器空间光桥接器方案  
Fig. 8 Scheme of the space optical hybrid based on PBS

## 参 考 文 献

- 1 Xu Nan, Liu Liren, Liu De'an *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
- 2 L. G. Kazovsky, L. Curtis, W. C. Young *et al.*. All-fiber 90° optical hybrid for coherent communications[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 437~439
- 3 G. Kejian, W. Yizun. An improved all-fiber 90° optical hybrid[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 1990, **3**(4): 122~124
- 4 J. Hankey, J. Urquhart, A. J. Moseley *et al.*. Balanced polarization diversity receiver using hybrid assembly techniques for optical coherent multichannel systems[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(21): 1935~1937
- 5 W. R. Leeb. Optical 90° hybrid for Costas-type receivers[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1431~1432
- 6 S. Norimatsu, N. Takachio, Y. 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
- 7 H. Tsunetsugu, M. Hosoya, S. Norimatsu *et al.*. A packaging technique for an optical 90°-hybrid balanced receiver using a planar lightwave circuit[J]. *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B*, 1996, **19**(3): 569~574
- 8 T. G. Hodgkinson, R. A. Harmon, D. W. Smith *et al.*. In-phase and quadrature detection using 90° optical hybrid receiver experiments and design considerations[J]. *IEE Proceedings*, 1988, **135**(3): 260~267
- 9 E. C. M. Pennings, Dolf Schouten *et al.*. Ultra fabrication-tolerant fully packaged micro-optical polarization diversity hybrid[J]. *J. Lightwave Technology*, 1995, **13**(10): 1985~1991
- 10 M. Seimetz, C. M. Weinert. Options, feasibility, and availability of 2×4 90° hybrids for coherent optical systems[J]. *J. Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1317~1322
- 11 P. S. Cho, G. Harston, Ch. J. Kerr *et al.*. Improvement of coherent homodyne detection performance using time-gated amplification and LiNbO<sub>3</sub> 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 LiNbO<sub>3</sub> [J]. *J. Lightwave Technology*, 1989, **7**(5): 794~798
- 13 E. C. M. Pennings, R. J. Deri, R. Bhat *et al.*. Ultracompact, all-passive optical 90° hybrid on InP using self-imaging[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **6**(5): 701~703
- 14 S. H. Jeong, K. Morito. Optical 90° hybrid with broad operating bandwidth of 94 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3505~3507
- 15 S. H. Jeong, K. Morito. Compact optical 90° hybrid employing a tapered 2×4 MMI coupler serially connected by a 2×2 MMI coupler[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4275~4288
- 16 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Analysis of general self-imaging positions in multimode interference couplers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 759~762  
孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器一般成像位置分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 759~762
- 17 Yan Chaojun. Numerical calculation of imaging positions in multimode interference couplers by the three-dimensional beam propagation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 110~114  
严朝军. 采用三维波束传输法的多模干涉耦合器成像位置的数字计算[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 110~114
- 18 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Multimode interference couplers and their applications in optical communication system[J]. *Study on Optical Communications*, 2004, (2): 67~70  
孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器及其在光通信系统中的应用[J]. *光通信研究*, 2004, (2): 67~70
- 19 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Zhang Xiaofeng *et al.*. Modeling of multimode interference mach zehnder interferometer optical switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 367~370  
魏红振, 余金中, 张小峰等. 多模干涉马赫-曾德尔光开关模型[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 367~370
- 20 H. Hertz. Compact bulk optical 90° hybrid for balanced phase diversity receivers[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(22): 1518~1519
- 21 W. R. Leeb. Realization of 90° and 180° hybrids for optical frequencies[J]. *Arch Elek überfragungv*, 1983, **37**(5/6): 203~206
- 22 R. Garreis, Carl Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers[C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 23 M. Bopp, G. Hüther, Th. Spatscheck *et al.*. BPSK homodyne and DPSK heterodyne receivers for free-space communication with Nd:Host lasers[C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 199~209

- 24 D. F. Hornbachner, M. A. Schreiblehner, W. R. Leeb *et al.*. Experimental determination of power penalty contributions in an optical costas-type phase-locked loop receiver[C]. *SPIE*, 1992, **1635**: 10~18
- 25 J. Horwath, F. David, M. Knappek *et al.*. Coherent transmission feasibility analysis[C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 13~23
- 26 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan *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
- 27 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
- 28 Liu Liren, Yan Aimin, Luan Zhu *et al.*. Free-space optical hybrid of birefringence[P]. China Patent, CN200610026338. X, 2006  
刘立人, 闫爱民, 栾竹 等. 双折射自由空间光桥接器[P]. 中国专利, CN200610026338. X, 2006
- 29 Liu Liren, Liu De'an, Yan Aimin *et al.*. Free-space optical hybrid with controlling phase shift by electric field[P]. China Patent, CN 200610026339. 4, 2006  
刘立人, 刘德安, 闫爱民 等. 电控相移空间光桥接器[P]. 中国专利, CN 200610026339. 4, 2006