

# 平面弯曲波导耦合器的特性分析\*

韩秀友<sup>1,2</sup> 庞拂飞<sup>1,2</sup> 蔡海文<sup>1</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup> 方祖捷<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 根据耦合模理论和弯曲波导耦合器的结构特点, 对平面弯曲波导耦合器的特性进行了分析, 结果表明弯曲波导耦合器的弯曲半径和最小间距两个可调变量, 增加了波导器件设计的灵活性; 同时由于等效耦合长度的调制作用使得弯曲波导耦合器在波分复用/解复用中比平行直波导耦合器具有更大的复用带宽; 分析了弯曲半径和最小间距对弯曲波导耦合器复用带宽的影响, 为实际波导器件的设计制作提供了一定的理论依据。

**关键词** 集成光学; 波导耦合器; 弯曲波导; 等效耦合长度; 波分复用

**中图分类号** TN265 **文献标识码** A

## 0 引言

波导耦合器是平面光波导器件中一个基本的结构单元, 具有功率分配、开关、滤波等功能, 以它为基础可以构成各种光波导器件, 如马赫-曾德干涉仪、星型耦合器等, 在光通信、光传感等领域得到广泛的应用<sup>[1~7]</sup>。传统的光波导耦合器由两个互相平行的直波导组成, 当光从一个波导输入后, 随着传播距离的增加, 光波能量耦合到相邻的波导中, 在用于波分复用时, 不同的信道对应不同的耦合比, 从而实现对光波的复用和解复用。波分复用技术要求波分复用耦合器的耦合系数在波分复用的波段范围内随波长具有较好的线性变化关系<sup>[8]</sup>, 这样才能保证信道间隔的均匀性。虽然平行直波导耦合器在一定的波长范围内可以实现波分复用/解复用功能, 但是其耦合系数随波长线性变化的范围比较窄, 同时对于一定的波导材料, 在波导参数和间距固定的条件下, 其输出耦合比主要由耦合区长度决定, 为了对某一信道实现复用或解复用必须严格控制耦合区的长度, 这对器件制作的提出了严格的要求。平面弯曲波导耦合器具有弯曲半径和最小间距两个可设计变量, 对输出耦合比有较灵活的可调性, 但还未见到将其用于波分复用/解复用的研究报道。

本文根据耦合模理论和弯曲波导耦合器的结构特点, 从耦合相位随波长线性变化的角度分析了正方形截面弯曲波导耦合器的耦合特性, 与直波导耦合器进行了比较, 对弯曲半径和最小间距对弯曲波导耦合器复用带宽的影响进行了数值分析, 为器件的设计制作提供了一定的理论依据。

## 1 弯曲波导耦合器的输出特性

根据耦合模理论, 在弱导近似和弱耦合的条件下, 正方形截面平行直波导耦合器的耦合系数为<sup>[9]</sup>

$$\kappa(d) = \frac{2U^2 W^2 \exp(-Wd)}{\beta V^2 (2 + Wa)} \quad (1)$$

式中  $U = (n_1^2 k^2 - \beta^2)^{1/2}$ ,  $W = (\beta^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$ ,  $V = ka(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\beta$  为轴向传播常数,  $n_1, n_2$  分别为波导芯层和包层的折射率,  $a$  为正方形波导截面的边长,  $d$  为两波导之间的间距。平行直波导耦合器的分束比为

$$\eta_s = \sin^2(\kappa L) \quad (2)$$

式中  $\kappa$  为耦合系数,  $L$  为耦合区的长度。

考虑一个截面为正方形的对称弯曲波导耦合器结构, 如图 1。弯曲波导曲率半径为  $R$ , 两波导间距沿  $z$  轴方向而增大, 变化关系为  $d(z) = d_0 + z^2/R$ 。同时, 两波导模场的方向也随  $z$  轴而分开, 模场矢量与  $z$  轴之间的夹角为  $\theta = \tan^{-1}(z/R)$ 。根据耦合系

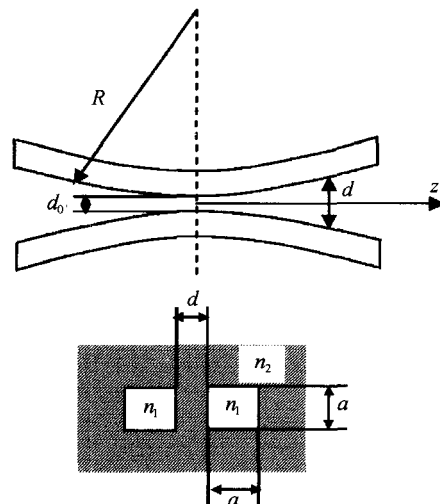


图 1 方形截面弯曲波导耦合器  
Fig. 1 Structure of square section curved waveguide coupler

\*上海市科委光科技资助项目 (022261009)

Tel: 021-69918685 Email: hanxiuyou@163.com

收稿日期: 2005-04-12

数的计算公式<sup>[10]</sup>,两波导电场矢量点乘结果为  $E_1 \cdot E_2 = |E_1| |E_2| \cos(2\theta)$ . 由于波导间距和模场矢量夹角随  $z$  轴的变化,两波导间的耦合系数不再是一个常数,而是沿着  $z$  轴方向发生变化.

$$\kappa(z) = \frac{2U^2 W^2 \exp[-W(d_0 + z^2/R)]}{\beta V^2 (2 + Wa)} \cos(2\theta) = \frac{2U^2 W^2 \exp[-W(d_0 + z^2/R)]}{\beta V^2 (2 + Wa)} \frac{R^2 - z^2}{R^2 + z^2} \approx \kappa_0 (1 - 2z^2/R^2) \exp(-Wz^2/R) \quad (3)$$

式中  $\kappa_0 = \kappa(d_0)$  是间距为  $d_0$  的平行直波导耦合器的耦合系数.

忽略波导的损耗,弯曲波导耦合器的分束比可表示为

$$\eta_c = \sin^2(\Phi) \quad (4)$$

式中

$$\Phi = \kappa_0 \int_{-\infty}^{\infty} (1 - 2z^2/R^2) \exp(-Wz^2/R) dz = \kappa_0 L_{\text{eff}} \quad (5)$$

定义  $L_{\text{eff}}$  为耦合器等效耦合长度,积分可得

$$L_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\pi R}{W}} \left(1 - \frac{1}{WR}\right) \quad (6)$$

在满足弱导 ( $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2 \ll 1$ ) 和弱耦合 (两波导的最小间距  $d_0$  相对于最长的人射波长  $\lambda_{\text{max}}$  足够大,一般  $d_0 > 1.5\lambda_{\text{max}}$  即可认为弱耦合) 的条件下,根据式(4)、(5)可以计算弯曲波导耦合器的分束比. 在  $R=8.5 \text{ m}, d_0=4.2 \mu\text{m}$  时,积分长度分别取为 15, 25, 30 mm, 弯曲波导耦合器的分束比随波长变化的关系曲线如图 2. 在计算过程中取  $a=7 \mu\text{m}, n_1=1.510, n_2=1.506$ , 以满足弱导条件 ( $\Delta=0.0026$ ), 同时保证波导单模传输<sup>[11]</sup>, 以下的分析中采用相同的结构参数. 从图 2 可以看出弯曲波导耦合器与直波导耦合器类似, 分束比随波长呈现周期性变化, 但是随着耦合区长度的增大, 分束比不再改变.

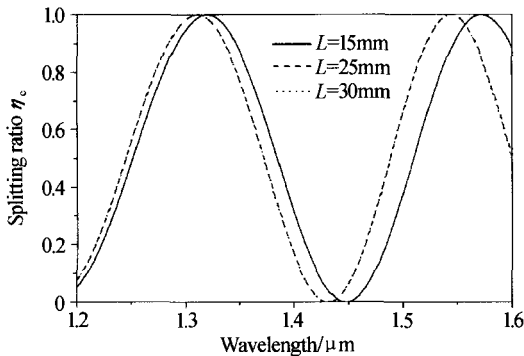


图 2 不同耦合区长度下弯曲波导耦合器输出分束比随波长变化的关系曲线  
Fig. 2 Splitting ratio of CWC versus wavelength for different coupling length

由式(5)可知分束比同时是弯曲半径和最小间

距的函数,图 3 给出了不同的弯曲半径和最小间距情况下,弯曲波导耦合器输出分束比随波长变化的关系曲线. 从图 3 可以看出通过改变弯曲半径和最小间距可以实现对某一波长输出强度的调谐,例如,对于中心波长分别为  $1.32 \mu\text{m}$  和  $1.48 \mu\text{m}$  的光波,在  $R=13.9 \text{ m}, d_0=3.53 \mu\text{m}$  时,输出强度均为 1, 在  $R=3.8 \text{ m}, d_0=3.24 \mu\text{m}$  时,输出强度分别为 1 和 0, 因此可以通过设计弯曲半径和最小间距可以实现光波的复用/解复用功能. 弯曲波导耦合器具有弯曲半径和最小间距两个可调变量,这大大增加了波导耦合器设计的灵活性.

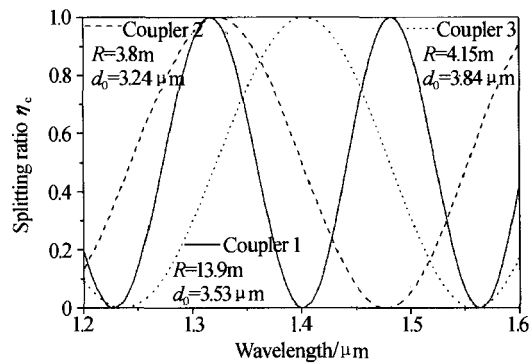


图 3 不同弯曲半径和最小间距下弯曲波导耦合器输出分束比随波长变化的关系曲线  
Fig. 3 Splitting ratio of CWC versus wavelength for different radius and minimum space

## 2 弯曲波导耦合器的波分复用/解复用特性

根据文献[8]的分析可知,耦合器用于波分复用/解复用时,只有在耦合系数随波长具有线性变化关系的范围内,才能保证信道间隔的均匀性,线性变化的区域越大,所能容纳的波分复用/解复用的波段范围就越大. 从式(2)和(4)可以看出波分复用/解复用信道等间隔的条件可以等价于耦合相位  $\Phi$  随波长具有线性变化的关系,因此可以利用耦合相位  $\Phi$  随波长变化的特性来衡量弯曲波导耦合器波分复用/解复用功能. 图 4 给出了平行直波导耦合器和弯曲波导耦合器的耦合相位  $\Phi$  随波长变化的关系曲线,其中平行直波导耦合器间距  $d=3 \mu\text{m}$ , 弯曲波导耦合器的最小间距和弯曲半径分别为  $d_0=3 \mu\text{m}$  和  $R=8 \text{ m}$ . 从图 4 可以看出,二者的耦合相位  $\Phi$  随波长都有一个线性增长区,而后增长速率逐渐减小,即曲线斜率逐渐减小. 但是与直波导耦合器相比,弯曲波导耦合器的  $\Phi$  随波长具有较大的线性变化区域 ( $\Delta\lambda_c \cong 1.69 - 1.2 = 0.49 \mu\text{m}, \Delta\lambda_s \cong 1.45 - 1.2 = 0.25 \mu\text{m}$ ), 因此具有较大的复用带宽.

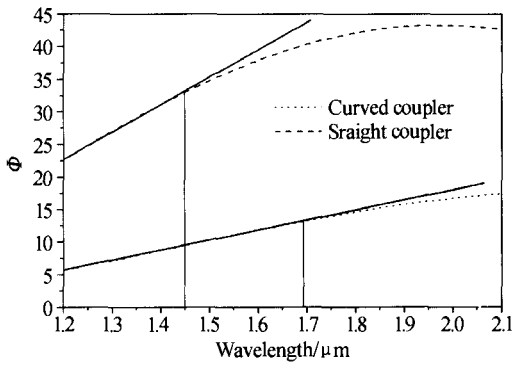


图4 相位因子  $\Phi$  随波长变化的关系曲线  
Fig. 4 Phase factor  $\Phi$  versus wavelength

由式(5)可以看出弯曲波导耦合相位正比于平行直波导耦合器的耦合系数与等效耦合长度  $L_{eff}$  的乘积,图5给出了根据式(6)计算的等效耦合长度  $L_{eff}$  随波长变化的关系曲线. 从图5可以看出,  $L_{eff}$  随着波长的增大而增大,在短波长区域,曲线斜率为一常数,在长波长区域内斜率增大,这在一定范围内恰好补偿了  $\Phi_c$  曲线斜率在长波长区域内的减小,使  $\Phi_c$  在较长的波长范围内仍能满足随波长线性增长的关系,从而使得弯曲波导耦合器在用于波分复用/解复用时,比平行直波导耦合器具有更大的复用带宽.

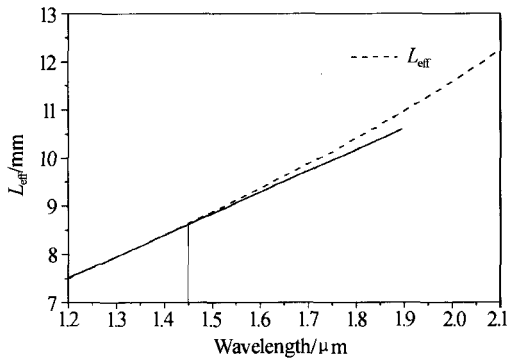


图5 等效耦合长度  $L_{eff}$  随波长变化的关系曲线  
Fig. 5 Effective coupling length  $L_{eff}$  versus wavelength

### 3 弯曲半径和最小间距对弯曲波导耦合器复用带宽的影响

从以上的分析可以看出,在用于波分复用/解复用时,耦合相位  $\Phi$  随波长线性变化的范围是决定耦合器复用带宽的重要因素,图6和图7分别给出在不同的弯曲半径和最小间距下弯曲波导耦合器耦合相位  $\Phi$  随波长变化的关系曲线. 从图6可以看出,在最小间距一定的条件下,弯曲半径越小耦合相位  $\Phi$  随波长线性变化的范围就越大,相应的耦合器的复用带宽越宽,比如  $R=3\text{ m}$ ,  $\Delta\lambda_c \cong 1.83 - 1.2 = 0.63\ \mu\text{m}$ ,  $R=9\text{ m}$ ,  $\Delta\lambda_c \cong 1.69 - 1.27 = 0.42\ \mu\text{m}$ . 从图7可以看出,随着最小间距的增大,耦合相位  $\Phi$  随波长线性变化的范围发生漂移,例如  $d_0 = 5\ \mu\text{m}$  时  $\Phi$  随波长线性变化的范围是从  $1.42\ \mu\text{m}$  到  $1.88\ \mu\text{m}$ ,

在小于  $1.42\ \mu\text{m}$  的范围内不再是线性变化. 因此在实际应用中,根据波分复用范围的不同,可以合理选取弯曲波导耦合器的弯曲半径和最小间距,以实现对不同信道的复用或解复用.

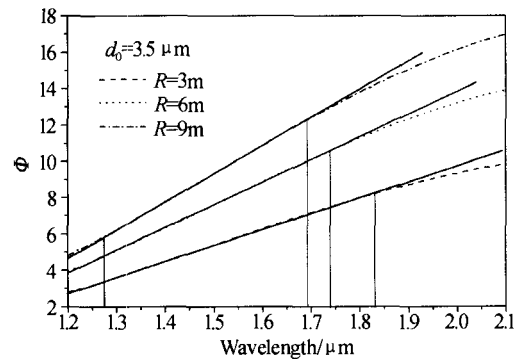


图6 不同弯曲半径下  $\Phi$  随波长变化的关系曲线  
Fig. 6  $\Phi$  versus wavelength for different radius

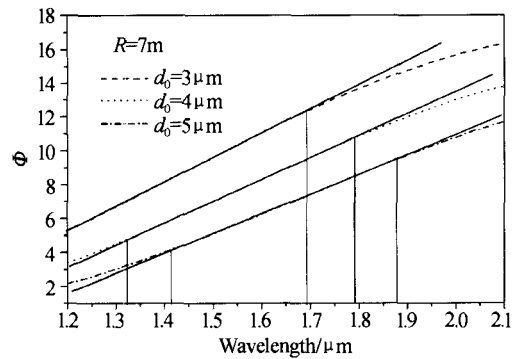


图7 不同最小间距下  $\Phi$  随波长变化的关系曲线  
Fig. 7  $\Phi$  versus wavelength for different minimum space

### 4 结论

本文根据耦合模理论和弯曲波导耦合器的结构特点,对正方形截面平面弯曲波导耦合器的特性进行了分析,结果表明通过改变弯曲半径和最小间距可以灵活地调谐输出分束比;同时发现由于等效耦合长度  $L_{eff}$  的调制作用使得弯曲波导耦合器耦合相位随波长线性变化的范围比平行直波导耦合器大,从而在波分复用/解复用中具有更大的复用带宽;对弯曲半径和最小间距对弯曲波导耦合器复用带宽的影响进行了分析,为实际波导器件的设计制作提供了一定的理论依据.

### 参考文献

- 1 Janz C, Keyworth B, Allegretto W, et al. Mach-Zehnder switch using an ultra-compact directional coupler in a strongly-confining rib structure. *IEEE Photon Techno Lett*, 1994, 6(8): 981~983
- 2 刘洪举,潘雷飞,崔占臣. 可调谐集成光学 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 光波导定向耦合滤波器. *光子学报*, 1994, 23(6): 592~596
- Liu H J, Pan L F, Cui Z J. *Acta Photonica Sinica*, 1994, 23(6): 592~596

- 3 肖悦娱,何赛灵. 平面波导型对称星型耦合器的优化设计. 光子学报,2002,**31**(6):701~706  
Xiao Y Y, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 701~706
- 4 严清峰,余金中. 一种新型 SOI Mach-Zehnder 干涉型光电调制器的设计. 光子学报,2003,**32**(5):555~558  
Yan Q F, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 555~558
- 5 周建忠,陈抱雪,贾洪波,等. 对偏振变动和膜厚变动脱敏的高分子波导宽带耦合器. 光子学报,2004,**33**(4):424~427  
Zhou J Z, Chen B X, Jia H B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):424~427
- 6 Franz J H, Jain V K. 光通信器件与系统. 徐宏杰,何珺等译. 北京:电子工业出版社,2002. 196~241  
Franz J H, Jain V K. *Optical Communications Components and Systems*. Translated by Xu Hongjie He Jun, et al. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2002. 196~241
- 7 黄章勇. 光纤通信用新型光无源器件. 北京:北京邮电大学出版社,2003. 184~248  
Huang Z Y. *Novel optical passive devices for optical communication*. Beijing: Publishing House of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2003. 184~248
- 8 Michel D, Shaw H J. Wavelength multiplexing in single-mode fiber couplers. *Appl Opt*, 1983, **22**(3):484~491
- 9 Kuznetsov M. Expressions for the coupling coefficient of a rectangular-waveguide directional coupler. *Opt Lett*, 1983, **8**(9):499~501
- 10 Katsunari O. *Fundamentals of Optical Waveguides*. New York: Academic Press, 2000. 125~128
- 11 Marcatili E A J. Dielectric rectangular waveguide an directional coupler for integrated optics. *Bell Syst Techn J*, 1969, **48**:2071~2103

## Performance Analysis of Planar Curved Waveguide Coupler

Han Xiuyou<sup>1,2</sup>, Pang Fufei<sup>1,2</sup>, Cai Haiwen<sup>1</sup>, Qu Ronghui<sup>1</sup>, Fang Zujie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-04-12

**Abstract** Based on coupled mode theory and the structure of curved waveguide coupler (CWC), the performance of planar CWC was analyzed. The result shows that the two variables, bending radius and minimum space, increase the flexibility of waveguide device design. By the modulation of effective coupling length, CWC can accommodate wider multiplexing bandwidth than parallel straight waveguide coupler (SWC) in wavelength division multiplex (WDM). The effect of bending radius and minimum space on the multiplexing bandwidth of curved coupler was studied numerically, which provided a certain theoretical basis for design and fabrication of devices.

**Keywords** Integrated optics; Waveguide coupler; Curved waveguide; Effective coupling length; WDM



**Han Xiuyou** was born in 1977, received his M. S. degree from Hebei Normal University in 2003. Now, he is pursuing the doctoral studies at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanic, CAS. His current research interests are integrated optics, optical waveguide devices and related theory.