

# 一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器

吴万青 徐 峰 陈 博 许海峰 黎 珉 史苗苗 陶大时 俞本立

(安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘要** 通过分析非对称双芯光子晶体光纤耦合理论,提出了一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器。理论分析显示,该耦合器的耦合比在一个较宽的波长范围内变化较小,具有波长响应平坦特性。通过有限元法模拟分析了该耦合器两芯间空气孔的尺寸以及光的偏振对其耦合特性的影响,结果表明,该非对称光子晶体光纤耦合器在 1.3~1.8  $\mu\text{m}$  的波长范围内,其 50% 耦合比变化在  $\pm 4\%$  以内,具有较好的波长平坦耦合响应特性,适合光纤通信等领域对宽带耦合器的需求。

**关键词** 光学器件;双芯光子晶体光纤;有限元法;耦合比

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3527

## An Asymmetric Dual-Core Photonic Crystal Fibers Coupler

Wu Wanqing Xu Feng Chen Bo Xu Haifeng Li Min Shi Miaomiao  
Tao Dashi Yu Benli

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

**Abstract** A broad-band optical fiber coupler with asymmetric dual-core photonic crystal fiber is proposed based on theoretic analysis. Analysis of numerical simulation shows that coupling ratio of the coupler is flattened in a wider range of wavelength. The influence of the size of air hole between the two the core of the coupler and the polarization of propagating light on the characteristic of coupling by using the finite element method is simulated and analyzed. The results show that the optical fiber coupler with asymmetric dual-core photonic crystal fibers has a 50% coupling ratio with a  $\pm 4\%$  dependence on the wavelength over 1.3  $\mu\text{m}$  ~ 1.8  $\mu\text{m}$ , so it is suitable for optical fiber communications and other fields of broad-band couplers with the demand.

**Key words** optical devices; dual-core photonic crystal fibers coupler; finite element method; coupling ratio

## 1 引 言

近年来,由于光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)具有独特性能而被人们广泛研究。光子晶体光纤是由一种单一介质(通常为石英玻璃)构成,在二维方向上呈现周期性紧密排列(如周期性六角形等),而在光纤轴向基本保持不变的波长量级空气孔所构成的微结构包层的新型光纤。光子晶体光纤可分为两种,一种是与传统单模光纤导光原理类

似的全内反射光子晶体光纤(TIR-PCF)<sup>[1]</sup>;另一种是基于光子带隙效应导光的带隙型光子晶体光纤(PBG-PCF)<sup>[2]</sup>。

多芯光子晶体光纤因其具有的光耦合特性可设计成光纤耦合器,如双芯光子晶体光纤耦合器<sup>[3~6]</sup>。双芯光子晶体光纤耦合器与传统光纤耦合器相比具有诸多不同的耦合特性<sup>[7]</sup>。非对称双芯光子晶体光纤耦合器因其能实现波长平坦耦合特性近来成为研

**收稿日期**: 2008-10-12; **收到修改稿日期**: 2008-11-15

**基金项目**: 安徽省高等学校青年教师科研“资助计划”(05010209)资助课题。

**作者简介**: 吴万青(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信、新型光纤和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: wwq0922@foxmail.com

**导师简介**: 俞本立(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术、光传感等方面的研究。

E-mail: benliyu@ahu.edu.cn

究热点。

本文基于耦合理论,设计了一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器,并通过数值模拟对其耦合特性进行了分析。数值模拟结果表明当选择了合适的结构参数,该耦合器在一个较宽波长范围内呈现出波长平坦耦合特性。

## 2 双芯光子晶体光纤耦合器的设计与数值模拟分析

### 2.1 耦合理论

所设计的非对称双芯光子晶体耦合器是由在二维方向上呈周期性排列的空气孔晶体中构造出两缺陷,即图 1(a)中双芯耦合器的两芯 A 和 B,它们由一孔径为  $d=0.9 \mu\text{m}$  的空气孔隔离。纤芯 B 周围 5 个空气孔的直径( $d_2$ )均为  $2 \mu\text{m}$ ,其他空气孔的直径( $d_1$ )都为  $2.4 \mu\text{m}$ 。所有空气孔中心间距( $\Delta$ )为  $5 \mu\text{m}$ 。空气孔以外其他部分都是纯二氧化硅,折射率为 1.45。A,B 两个纤芯中心的间距为  $D=2\Delta$ 。该双芯非对称光子晶体光纤耦合器(Asymmetric dual-core photonic crystal fiber coupler, ADCPCF)根据光纤耦合理论可等效为两个不同结构的 PCF(图 1 中 PCF-A 和 PCF-B)<sup>[8]</sup>,光在其中传输均满足无损耗单模传输条件<sup>[9]</sup>。

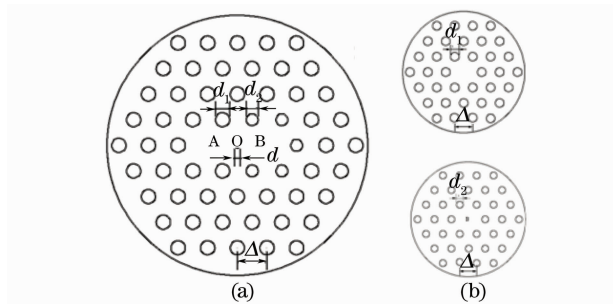


图 1 (a)双非对称芯光子晶体光纤耦合器的横截面;  
(b)两等效光子晶体光纤 A 和 B

Fig. 1 (a)Cross section of the ADCPCF-Coupler;  
(b)Cross section of the uncoupled two PCFs (A and B)

当光从该耦合器某纤芯入射,沿纤芯轴向传输时,将在两纤芯间耦合。根据光纤耦合理论对两平行无损耗非对称光子晶体光纤耦合器进行分析后,可得两纤芯中光功率沿轴向传输的变化可表示为<sup>[10]</sup>

$$I_1 = 1 - \frac{k_{21}^2}{k_c^2} \sin^2(k_c L), \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{k_{21}^2}{k_c^2} \sin^2(k_c L), \quad (2)$$

式中  $k_c$  是有效耦合系数, $L$  是沿轴向传播长度, $k_{12}$

与  $k_{21}$  为分别为 A 芯和 B 芯的耦合系数。而  $k_{12}$ ,  $k_{21}$  和  $k_c$  的相互关系由下式定义

$$k_c = \sqrt{k^2 + \delta_a^2}, \quad \delta_a = \frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2) \quad (3)$$

$$k = \sqrt{k_{12}k_{21}},$$

其中  $\beta_1$  与  $\beta_2$  分别为两纤芯中基模的传播常数, $\delta_a$  为两芯间的不对称量。

由(2)式可知,振幅系数  $k_{21}^2/k_c^2$  为两芯间能量转换的最大极限值。要使两芯间光完全耦合,就须使  $\beta_1 = \beta_2$ ,同时  $k_{12} = k_{21}$ (即对称双芯结构),设此时耦合器长度为  $L_0$ ;反之可得,如果  $\beta_1 \neq \beta_2$ ,则光能量不能全部从一芯耦合到另一芯,此时最大耦合比小于 100%。图 2 中的曲线 I 表示对称双芯耦合器的耦合比随耦合长度的变化。图 2 中曲线 II 与 III 分别为非对称耦合器在  $1.55 \mu\text{m}$  和  $1.6 \mu\text{m}$  时的耦合比随波长的变化曲线,可看出在最大耦合长度处,曲线 II 和 III 的耦合比都接近 50%,且此处耦合比变化缓慢。由此可知,可通过对耦合器结构参数的合理设计,实现波长平坦耦合器。

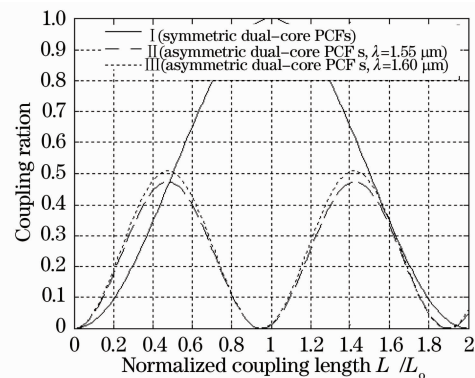


图 2 耦合比随归一化耦合长度的变化关系曲线

Fig. 2 Coupling ratio as a function of  $L/L_0$ .

### 2.2 非对称双芯耦合器数值模拟

由于光耦合只能发生在两芯的同偏振  $\text{HE}_{11}$  模之间,因此可定义耦合器的耦合系数  $C$  为<sup>[11]</sup>

$$C_i = \frac{\beta_o^i - \beta_e^i}{2} \quad i = x, y, \quad (6)$$

其中  $\beta_o^i$  和  $\beta_e^i$  分别为耦合器的  $i$  偏振方向的奇模和偶模,它们都依赖于 PCFs 的结构<sup>[12~13]</sup>。从图 3 可得在  $x$  偏振方向与  $y$  偏振方向上,奇模和偶模的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  不同。此外由图 3 可看出在一定的波长范围内,奇模和偶模在  $x$  偏振方向和  $y$  偏振方向上的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  几乎重合,这表明了  $x$  偏振方向的耦合系数  $C_x$  和  $y$  偏振方向的耦合系数  $C_y$  几乎相等,如图 4 所示。所以在该双芯耦合器中不考虑光的偏振对耦合特性的影响。

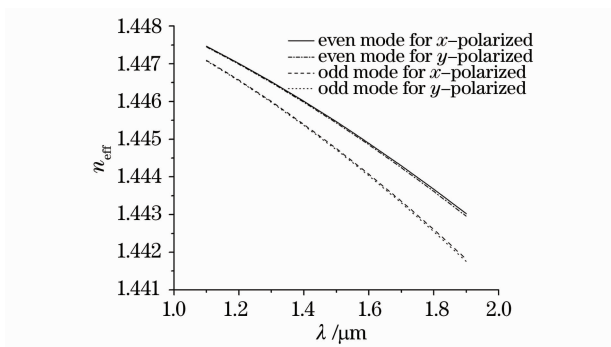


图3  $x$  和  $y$  偏振方向的奇模和偶模有效折射率随波长变化曲线

Fig. 3 Relationship between the effective indexes of the even mode and odd mode of ADCPCF-coupler for different polarization with wavelength

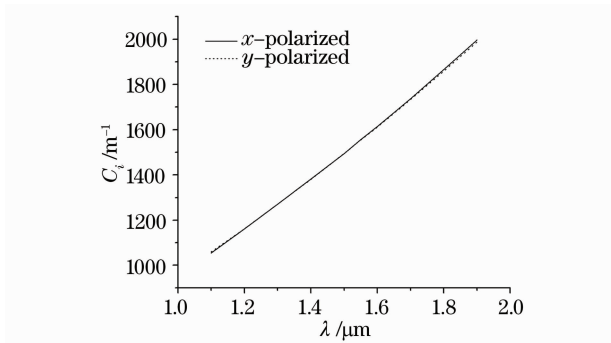


图4  $x$  和  $y$  偏振方向的耦合系数随波长变化曲线

Fig. 4 Relationship between the coupling coefficients of ADCPCF-coupler for different polarization with wavelength

通过控制两纤芯周围的空气孔  $d_1$  和  $d_2$  的大小可以控制  $\Delta\beta$  的大小,且纤芯间空气孔  $d$  的大小直接影响耦合系数  $C$ ,同时  $C$  也受到空气孔  $d_1$  与  $d_2$  的影响。为了设计一个 3 dB 耦合器,根据(1)式和(2)式可得,  $C \approx \Delta\beta/2$ 。

通过前述波长平坦耦合特性分析可知,为了获得波长平坦特性,应选择何时的光纤结构参数。通过有限元法(FEM)数值模拟,得到在不同纤芯间空气孔孔径下,  $C$  与  $\Delta\beta$  随波长的变化曲线,如图5所示。为了使耦合器具有平坦的波长响应特性,需要使两曲线能重合或接近,即意味着在不同波长下,耦合器的耦合比能在一个小范围内波动,即具有波长平坦响应特性。图5显示当纤芯间孔径为  $0.9 \mu\text{m}$  时,  $C$  与  $\Delta\beta$  随波长变化的曲线最接近重合,因此,对本文中的非对称双芯耦合器的结构参量进行优化,确定纤芯间空气孔的孔径为  $0.9 \mu\text{m}$ 。

为了获得波长平坦耦合特性,可分析该 3 dB 耦合器的耦合长度  $L$  应满足  $\sin(L \sqrt{k^2 + \partial_0^2}) \approx 1$ 。

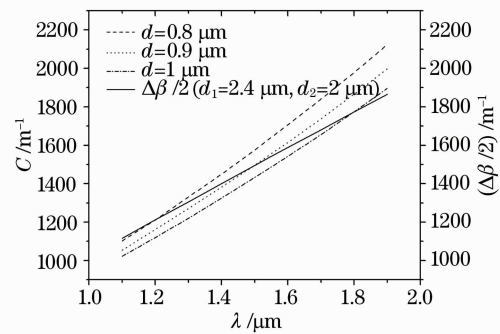


图5  $C$  和  $\Delta\beta$  随波长变曲线

Fig. 5 Variation of the coupling coefficient and the difference of propagation constant of two cores with wavelength

可计算得到满足此条件的  $L$  为  $0.75 \text{ mm}$ 。此结果与传统耦合器相比较<sup>[14,15]</sup>,也显示了双芯光子晶体耦合器具有耦合长度短的优点。

图6给出了不同耦合长度下,该耦合器耦合比随波长变化曲线。从图中可看出当  $L = 0.75 \text{ mm}$  时,当波长从  $1.3 \mu\text{m}$  到  $1.8 \mu\text{m}$  变化时,耦合比变化在  $\pm 4\%$  以内,具有较好的波长平坦响应特性。

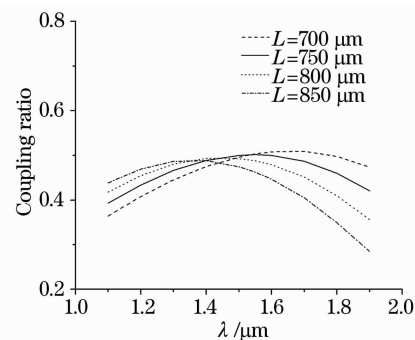


图6 不同耦合长度时耦合比随波长的变化曲线

Fig. 6 Calculated wavelength responses of ADCPCF-coupler for various coupling lengths  $L$

### 3 结 论

设计了一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器,有限元法数值模拟结果显示在  $1.3 \mu\text{m}$  到  $1.8 \mu\text{m}$  的波长范围内,其  $50\%$  耦合比变化在  $\pm 4\%$  以内,具有较好的波长平坦耦合响应特性。该结构耦合器的耦合长度比传统耦合器短,且对光的偏振不敏感。因此,可满足光纤通信等领域对宽带光纤耦合器的需求。

### 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt.*

- Lett.*, 1996, **21**: 1547~1549
- 2 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fiber [J]. *Science*, 1998, **282**: 1476~1478
- 3 B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks *et al.*. Experimental study of dual core photonic crystal fiber [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**: 1358~1359
- 4 B. H. Lee, J. B. Eom, J. Kim *et al.*. Photonic crystal fiber coupler [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**: 812~814
- 5 Y. Yue, G. Y. Kai, Z. Wang *et al.*. Broadband single-polarization single-mode photonic crystal fiber coupler [J]. *IEEE Photon Technol Lett.*, 2006, **18**: 2032~2034
- 6 Lin Xubin, Liu Yukui, Li Baojun. Theoretical Study of Silicon-Based Two-Dimensional Photonic Crystal Coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1157~1160  
林旭彬, 刘玉奎, 李宝军. 硅基二维光子晶体耦合器理论研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1157~1160
- 7 K. Saitoh, Y. Sato, M. Koshiba. Coupling Characteristics of Dual-core Photonic Crystal Fiber Couplers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**: 3188~3195
- 8 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 961~963
- 9 T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke *et al.*. Confinement losses in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1660~1662
- 10 A. W. Snyder. Coupled-mode Theory for Optical Fibers [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**: 1267~1277
- 11 A. W. Snyder, J. D. Love. Optical waveguide theory [M]. London: Chapman and Hall, 1983
- 12 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tiewing *et al.*. Novel-high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206  
方 宏, 娄淑琴, 郭铁英 等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 13 Gong Taorong, Yan Fengping, Qang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562  
龚桃荣, 延凤平, 王 琳 等. 高双折射光子晶体光纤特性分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562
- 14 A. Takagi, K. Jinguji, M. Kawachi. Broadband silica-based optical waveguide coupler with asymmetric structure [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**: 132~133
- 15 A. Takagi, K. Jinguji, M. Kawachi. Design and fabrication of broad-band silica-based optical waveguide couplers with asymmetric structure [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**: 848~855