

波分复用双芯光子晶体光纤耦合器的设计

汪徐德¹, 周正¹, 罗爱平², 徐文成²

(1. 淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000; 2. 华南师范大学光子信息科技实验室, 广东 广州 510006)

摘要:在双芯 PCF 的基础上设计一种新型定向耦合器, 根据波导间相互耦合原理, 采用时域有限差分法分析了该器件的光传输特性。并数值计算了双芯 PCF 的结构参量对耦合性能的影响, 发现其耦合长度随着空气填充率 d/Λ 的减小而增大, 随着传输波长 λ 的增大而减小。并基于双芯 PCF 结构, 以常用通信波长为例, 设计出 $0.85/1.55 \mu\text{m}$, $0.98/1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.3/1.55 \mu\text{m}$ 的超微型波分复用器件, 通过调节双芯 PCF 的结构参量得到合适的耦合长度, 实现了不同波长的解复用。研究表明双芯 PCF 耦合器在波分复用等方面具有很大的应用价值。

关键词: 双芯光子晶体光纤; 光纤耦合器; 耦合长度; 耦合比

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.011

Design of twin core photonic crystal fiber coupler using WDM

WANG Xu-de¹, ZHOU Zheng¹, LUO Ai-ping², XU Wen-cheng²

(1. School of Physics and Electronic Information, HuaiBei Normal University, Huaibei 235000, China;

2. Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A novel directional coupler is designed based on twin core PCF. The optical properties of the device have been demonstrated by finite difference time domain according to the waveguides directional coupling principle. We also study the influence of the structural parameters of the twin core PCF's cladding. It is found that the coupling length increases with the increasing of d/Λ and decreases with the increasing of wavelength. On the basis of this structure, ultra-compact WDM is designed in details as examples for $0.85/1.55 \mu\text{m}$, $0.98/1.55 \mu\text{m}$ and $1.31/1.55 \mu\text{m}$. By tailoring other structural parameters, two wavelengths can be separated completely. The results indicate that these properties enable such devices to find great potential applications in wavelength division multiplexing.

Key words: twin core photonic crystal fiber; fiber coupler; coupling length; coupling ratio

1 引言

光子晶体光纤(PCF)又称多孔光纤(HF)或微结构光纤(MOF),是一种具有由沿光纤轴向上周期性紧密排列的空气孔构成的微结构包层的光纤,是基于光子晶体技术发展起来的新一代光纤。它具有传统光纤所不可比拟的光学性质,如无截止单模传输、可控色散、灵活非线性以及高双折射等。自问世以来,基于PCF的光器件的研究引起了人们的广泛关注,人们通过调整PCF的结构和尺寸,并利用其独特的光传输特性,设计出各种用途的光学器件,如:PCF激光器、PCF放大器、光开关、PCF传感器以

及定向耦合器等^[1-2]。

光纤耦合器是光纤光学领域、光纤通信领域中一种重要的光无源器件,它能实现光功率分配和光波长分离,因而得到广泛应用。然而传统双纤熔融型光纤耦合器的制作对工艺的要求较高,制作过程比较繁琐,制造质量较高的双芯光纤非常困难,光子晶体光纤的出现为制造双芯光纤提供了新的途径。

基金项目: 淮北师范大学青年科研项目(No. 2011xqxm35)资助。

作者简介: 汪徐德(1980-),男,讲师,主要从事光子晶体光纤特性及其器件研究。E-mail: wangxudemail@126.com

收稿日期: 2011-03-04; **修订日期:** 2011-03-23

光子晶体光纤的出现为探索新的双芯耦合机制和设计出具有更高性能的耦合器件带来了可能,基于双芯 PCF 的定向耦合器的研究引起了人们的密切关注,有关双芯 PCF 的实验和理论方面的研究已有不少报道;Mangan 等人实验地演示了双芯 PCF 的耦合现象^[3];Roberts 等人给出了用来研究 PCF 的耦合现象的建模工具^[4];清华大学研究小组设计出了短耦合长度和高消光比的新型偏振分束器^[5]。双芯 PCF 可以通过模场耦合使光能量在相互靠近的两个纤芯间发生转移,因其双芯间距很小,可以实现很短的耦合长度,而且结构紧凑且灵活可调。在光纤耦合器及光纤滤波器等方面有重要的应用价值,可以实现很多光信号处理功能,例如滤波、波复用和解复用器、偏振分裂器和光开关等。

本文主要探讨了双芯 PCF 的结构参量对耦合长度的影响,在双芯 PCF 耦合器的基础上,设计出 $1.3/1.55 \mu\text{m}$, $0.98/1.55 \mu\text{m}$ 和 $0.85/1.55 \mu\text{m}$ 的超微型波分复用器件,并从数值分析中可以看出双芯 PCF 耦合器相对于传统双纤熔融型光纤耦合器来说,更适宜设计出超短型波分复用和解复用器件。

2 双芯光子晶体光纤耦合器的模型

图 1 为设计的双芯 PCF 耦合器的剖面图,空气孔直径为 d ,孔间距为 Λ 。横轴方向上的两个纤芯分别是通过移除纤芯位置的两个空气孔而形成,中间由一个气孔隔开而形成双芯。对于每个单独的纤芯来说,其模场被纤芯周围的空气孔束缚,当光从该耦合器某纤芯入射,沿纤芯轴向传输时,将在两芯间耦合,图 2 为双芯光子晶体光纤相互耦合时模场等高线分布图,由图 2 可以看出,光波模场被空气孔严格地限制在两纤芯传播,并且由于双芯 PCF 两纤芯相邻,能量则在两纤芯间发生耦合。本文选取的 PCF 的双芯是平行 x 轴放置的,因此 x 偏振的耦合长度比 y 偏振的要短。为简单起见,以下我们在数值分析中只分析 x 偏振模的耦合特性。

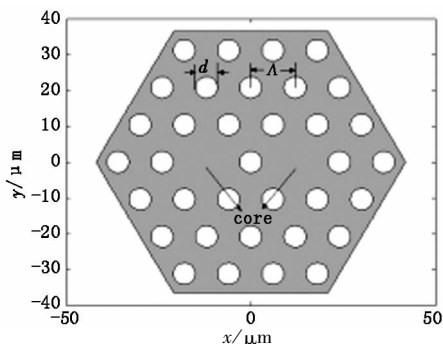


图 1 双芯光子晶体光纤耦合器剖面图

Fig. 1 cross section of the designed twin core PCF

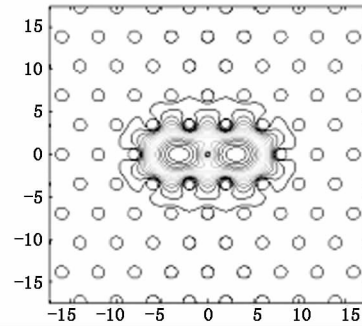


图 2 光场在双芯 PCF 中耦合模场分布图

Fig. 2 transverse field profile of light coupling

in twin core PCF

3 耦合器的工作原理

在双芯光子晶体光纤的耦合器的耦合区中,两臂光纤中的光场将各自保持相互独立时的场分布和传输系数。在耦合器的耦合区中,两臂光纤中的光场发生能量耦合,设两波导中的光场复数振幅为 $A_1(z)$ 和 $A_2(z)$,在光纤耦合器中,两臂光场的演化规律可用以下的耦合方程组表示^[6]:

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2 \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_1, A_2 分别是在光纤耦合器中两臂光纤中的模场振幅; β_1, β_2 是两根光纤在孤立状态下的传播常数。耦合区中的耦合项为右边第二项中 C_{ij} ($i \neq j$) 为互耦合系数。实际上,自耦合系数 C_{ij} 相对于相互耦合系数可以忽略,且耦合系数近似有 $C_{12} = C_{21} = C$ 。设入射条件为 $A_1(z) = A_1(0)$, $A_2(z) = A_2(0)$,考虑到实际工程上耦合器的两臂光纤是采用相同特性的光纤,所以 $\beta_1 = \beta_2$ 。方程组(1)的解为:

$$\begin{cases} A_1(z) = [A_1(0) \cos(Cz) + iA_2(0) \sin(Cz)] \exp(i\beta z) \\ A_2(z) = [A_2(0) \cos(Cz) + iA_1(0) \sin(Cz)] \exp(i\beta z) \end{cases} \quad (2)$$

假设光功率由耦合器的一臂光纤注入,初始条件为 $A_1(0) \neq 0, A_2(0) = 0$,则耦合器两端输出的功率为:

$$\begin{cases} P_1(z) = |A_1(z)|^2 = \cos^2(Cz) |A_1(0)|^2 \\ P_2(z) = |A_2(z)|^2 = \sin^2(Cz) |A_1(0)|^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, z 为耦合区的有效相互作用长度,也可近似为熔融拉伸长度。上式表明沿 z 方向传输功率在两个纤芯之间周期性地变化,当 $Cz = \frac{\pi}{2}$ 时, $P_1(z) = 0$,而

$P_2(z) = |A_1(0)|^2$,即在 $z = \frac{\pi}{2C}$ 处,纤芯 1 中的功率

全部耦合到纤芯 2 中。

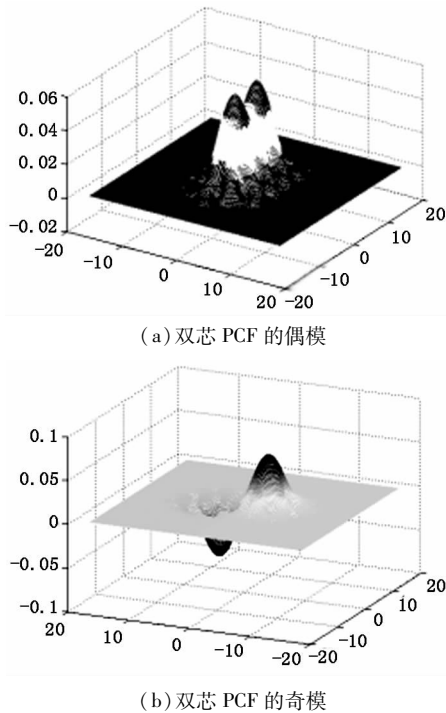


图 3 双芯 PCF 的偶模和奇模
Fig. 3 mode fields of even supermodes (a) and odd supermodes (b)

双芯 PCF 的耦合行为可以用两个纤芯相互作用模场形成的对应 x 偏振和 y 偏振的对称模(偶模)与反对称模(奇模)的叠加来描述^[7],如图 3(a)和图 3(b)所示,具有不同传播常数的奇偶超模叠加的结果使得光能量沿传播长度在两纤芯间周期性地转移,从模式理论角度来定义,耦合长度就是奇模和偶模产生“拍”的长度的一半,耦合长度 L_C ^[8-9]为:

$$L_C = \frac{\pi}{|\beta_{\text{even}}^i - \beta_{\text{odd}}^i|} = \frac{\lambda}{2|n_{\text{even}}^i - n_{\text{odd}}^i|} \quad (i = x, y) \quad (4)$$

式中, λ 为真空中的波长, n_{even}^i 和 n_{odd}^i 分别为 i 偏振态偶超模和奇超模的等效折射率。根据上两式计算出耦合长度,对于不同偏振态,对称模与反对称模的有效折射率不同,从而耦合长度也不同。由于光耦合只能发生在两芯的同偏振 HE_{11} 模之间,因此可定义耦合器的耦合系数 C 为^[10]:

$$C_i = \frac{\beta_{\text{even}}^i - \beta_{\text{odd}}^i}{2} \quad (i = x, y) \quad (5)$$

其中, β_{even}^i 和 β_{odd}^i 分别为耦合器的 i 偏振方向的奇模和偶模的传播常数,它们都依赖于 PCF 的结构。

4 双芯光子晶体光纤波分复用器件的设计及数值分析

在图 1 所示的双芯 PCF 中,影响 PCF 的结构参

数主要有两个,包层空气孔间距 Λ 和空气孔直径 d 。下面分别通过调节这些参数来考察双芯 PCF 的耦合特性。

图 4 给出了孔间距 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, d/Λ 分别为 0.48, 0.50, 0.54, 0.56, 0.58 时耦合长度随波长的变化。由图 4 可以看出,当孔间距 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$ 不变的情况下, d/Λ 分别从 0.48 变化到 0.58 逐渐增大时,耦合长度增加,其原因是当 d/Λ 增大时,包层的空气孔直径增大,包层对光的束缚能力增强,光纤的模场更加集中于芯区,因而光在两芯之间的耦合变得困难,从而使耦合长度变长。光纤结构参数确定时,随着波长的增大,其归一化频率 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 变小,渗透到包层的光功率越多,模场由芯区向外扩展,导模间的相互渗透就越强烈,双芯之间的耦合变得更加容易,因此耦合长度随波长增大而变短。从图 4 还可以看出,随着 PCF 的结构参数的改变,双芯 PCF 的耦合长度发生改变,我们可以灵活地通过调整双芯 PCF 的结构参数来实现特定耦合长度的定向耦合器的制作,而传统熔融型双纤耦合器,由于采用熔融拉锥技术,耦合长度不易调整。

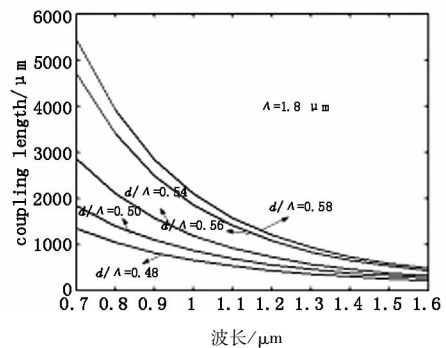


图 4 孔间距 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, d/Λ 变化时耦合长度随波长的变化
Fig. 4 the coupling length versus wavelength with different d/Λ

图 5 反映了耦合长度随空间距 Λ 变化关系,当 d/Λ 和工作波长 λ 确定时,耦合长度随着波长的减小而增大,这是因为相比于长波长光波,短波长的光更易束缚在纤芯,从而导致能量完全从一个纤芯耦合到另一个纤芯的长度增大。因此对于不同波长的光波,其耦合长度不同,根据这个原理,我们可以设计一个双芯 PCF 耦合器用以分开两个不同的波长的光波 λ_1 和 λ_2 。当光波 λ_1 的能量完全处在直通臂中时,与此同时,光波 λ_2 的能量正好完全处于耦合臂,两个光波则可以完全分开。光波 λ_1 的耦合长度 L_{λ_1} 和光波 λ_2 的耦合长度 L_{λ_2} 应该满足以下条件:

L_{λ_1} 比 L_{λ_2} 为奇数比偶数, 或 L_{λ_1} 比 L_{λ_2} 为偶数比奇数^[11]。因而双芯 PCF 可以方便地调整其结构参量得到不同的耦合长度, 从而设计出合适的波分复用器件。

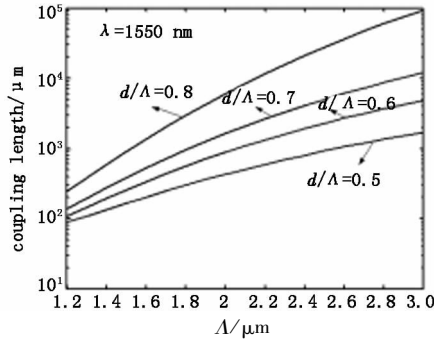


图5 工作波长 λ 确定时, 耦合长度随孔间距 Λ 变化关系

Fig. 5 the coupling length versus hole pitch with different d/Λ

为了进一步阐明双芯 PCF 定向耦合器优越的波分性能, 考虑到目前光纤通常用的光波波长, 我们具体研究 $1.3 \mu\text{m}$, $0.98 \mu\text{m}$, $0.85 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 光波间的分束情况。

对于相同结构的双芯 PCF, 短波长的耦合长度要大于长波长, 意味着短波长的能量需要更长的传输距离才能从一个纤芯完全转移到另一个纤芯, 两个波长耦合长度的不同为实现波长解复用提供了可能。为了更便于观察, 图 6 给出了不同波长的耦合长度 L_λ 与 $1.55 \mu\text{m}$ 耦合长度的比值, 我们可以根据耦合长度的比值, 来选择合适的双芯 PCF 的结构用以设计波分复用器件。

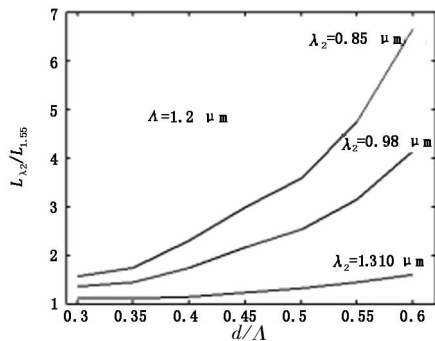
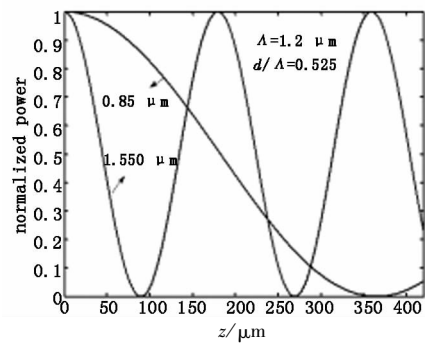


图6 不同波长的耦合长度 L_λ 与 $1.55 \mu\text{m}$ 耦合长度的比值随 d/Λ 的变化曲线

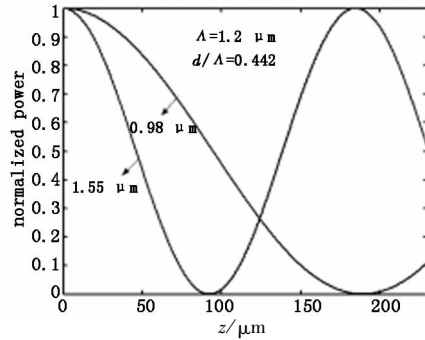
Fig. 6 coupling-length ratios versus hole pitch with different wavelengths

图 7 分别是 $0.85/1.55 \mu\text{m}$, $0.98/1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.3/1.55 \mu\text{m}$ 的双芯 PCF 耦合器用于波长解复用时的能量转换图, 其中孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 其空气填充率分别为 $d/\Lambda = 0.525$, $d/\Lambda = 0.442$, $d/\Lambda =$

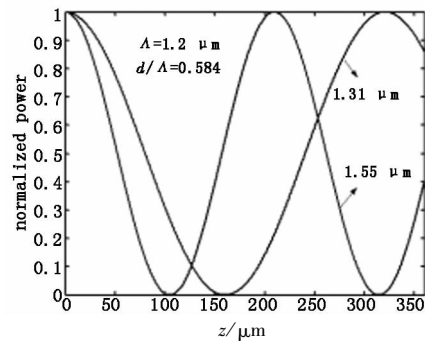
0.584 , 其耦合长度比 $L_{0.85 \mu\text{m}} : L_{1.55 \mu\text{m}} = 1:4$, $L_{0.98 \mu\text{m}} : L_{1.55 \mu\text{m}} = 1:2$, $L_{1.31 \mu\text{m}} : L_{1.55 \mu\text{m}} = 3:2$, 两束光完全分开时的光纤长度分别为 $365 \mu\text{m}$, $182 \mu\text{m}$, $315 \mu\text{m}$ 。即两个不同波长的光波, 初始由同一个芯输入耦合器, 当它们的耦合长度比满足奇数: 偶数或者偶数: 奇数时, 两个波长的光波将在不同的芯输出, 完成波分功能, 反之, 如果两个波长的光波初始由两个不同的芯输入耦合器, 则由同一个芯输出, 完成两波长的合波功能。通过数值模拟可以发现, 利用双芯 PCF 作为耦合器, 其长度要远远小于常规耦合器的长度, 更有利用实现器件的微型化。



(a) $0.85/1.55 \mu\text{m}$



(b) $0.98/1.55 \mu\text{m}$



(c) $1.31/1.55 \mu\text{m}$

图7 双芯 PCF 耦合器用于波长解复用时的能量转换图

Fig. 7 the normalized power transfers in core versus the length of fiber

5 结论

本文数值分析了双芯 PCF 的耦合特性, 并且基

于双芯 PCF 的耦合特性设计出用于 $0.85/1.55 \mu\text{m}$, $0.98/1.55 \mu\text{m}$, $1.3/1.55 \mu\text{m}$ 的波分复用器件, 两束光完全分开时的光纤长度分别为 $365 \mu\text{m}$, $182 \mu\text{m}$, $315 \mu\text{m}$, 通过数值分析可以发现利用双芯 PCF 耦合器可以设计出耦合长度更短的波分复用器, 其长度仅为微米级别, 而传统的波分复用器件其长度达到几百个毫米, 因此双芯 PCF 波分复用器更有利用光器件的集成, 在光纤通信系统中有着更为广泛的应用空间。

参考文献:

- [1] Xu Yongzhao, Zhang Xia. Theoretical and experimental investigation of all-optical regeneration based on photonic crystal fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(1): 55 - 58. (in Chinese)
徐永钊, 张霞. 基于光子晶体光纤的全光再生理论和实验研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(1): 55 - 58.
- [2] Zhang Wei, Li Yigang. Large mode area double cladding Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 4(16): 418 - 420. (in Chinese)
张炜, 李乙钢. 大模场面积双包层掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器 [J]. *光电子 · 激光*, 2005, 4(16): 418 - 420.
- [3] B J Mangan, J C Knight, et al. Experimental study of dual-core photonic crystal fiber [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(16): 1358 - 1359.
- [4] Roberts P J, T J Shepherd. The guidance properties of multi-core photonic crystal fibres [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, 3: 133 - 140.
- [5] Lin Zhang, Changxi Yang. Polarization-dependent coupling in twin-core photonic crystal fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1367 - 1373.
- [6] Fu Bo, Li Shuguang. Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 11(58): 7780 - 7715. (in Chinese)
付博, 李曙光. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究 [J]. *物理学报*, 2009, 11(58): 7780 - 7715.
- [7] Lou Shuqin, Jian Wei, Ren Guobin. A novel high birefringence photonic crystal fibre [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 11(16): 1265 - 1269. (in Chinese)
娄淑琴, 简伟, 任国斌. 一种新结构的高双折射光子晶体光纤 [J]. *光电子 · 激光*, 2005, 11(16): 1265 - 1269.
- [8] Rim Cherif, Mourad Zghal, Rihab Chatta, et al. Full vector beam propagation method modeling of dual core photonic crystal fibre couplers [J]. *SPIE*, 2006: 6182.
- [9] Yu Rongjin, Xiang Yang, Chen Mingyang. Research on coupling lengths of twin-core photonic crystal fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 7(15): 775 - 777. (in Chinese)
于荣金, 向阳, 陈明阳. 双芯光子晶体光纤耦合长度研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2004, 7(15): 775 - 777.
- [10] Wu Wangqing, Xu Feng. An asymmetric dual-core photonic crystal fibers coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 12(29): 3527 - 3530. (in Chinese)
吴万青, 徐峰. 一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器 [J]. *光学学报*, 2009, 12(29): 3527 - 3530.
- [11] Kunimasa Saitoh, Yuichiro Sato. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. *Optics Express*, 2003, 11(24): 3188 - 3195.