

文章编号: 0258-7025(2008)12-1962-04

基于谐振耦合现象的三芯光子晶体光纤 偏振分束器

文科 王荣 汪井源 李建华

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 设计了一种三芯光子晶体光纤(PCFs)偏振分束器。利用光纤的谐振现象,实现了偏振状态的分离。当三芯光子晶体光纤中三个超模式的模式折射率满足一定条件时,将产生谐振现象。通过选择合适的光纤结构参数,可使某一偏振方向的光接近谐振条件,而另一偏振方向的光远离谐振条件。在光纤的输出端,由于耦合的程度不同,两个偏振光的功率集中在不同的纤芯区,从而达到分离偏振光的目的。应用有限元法(FEM)计算了三芯光子晶体光纤中的模式折射率,选择了合适的光纤结构参数。应用全矢量光束传播法(BPM)分析了这种光纤偏振分束器的性能。结果表明,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 工作波长上,长度为 $1.039\ \text{mm}$ 的光纤即能实现偏振状态的隔离,隔离度达到 $-36.98\ \text{dB}$,隔离度 $< -11\ \text{dB}$ 的带宽可达到 $24\ \text{nm}$ 。

关键词 光纤光学;光纤偏振分束器;有限元法;三芯光子晶体光纤

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1962

Polarization Splitter Based on Resonant Tunneling Phenomenon in Three-Core Photonic Crystal Fibers

Wen Ke Wang Rong Wang Jingyuan Li Jianhua

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract A polarization splitter based on resonant tunneling phenomenon in three-core photonic crystal fibers (PCFs) is presented. The supermodes in three-core PCFs will be resonant if their effective refractive indices satisfy some conditions. Choosing the appropriate parameters of PCFs, one polarization light will be close to the resonant condition and the other will be far away from the resonant condition. In the end of PCFs, the light power of the two polarizations can be confined in different cores. Full-vector finite element method (FEM) is applied to calculate the effective refractive indices in three-core PCFs. Full-vector beam propagation method (BPM) is employed to analyze the performance of the splitter. Numerical simulations demonstrate that it is possible to obtain a 1.039-mm -long polarization splitter for $1.55\text{-}\mu\text{m}$ light, and the extinction ratio can reach $-36.98\ \text{dB}$. In this case, the bandwidth with the extinction ratio better than $-11\ \text{dB}$ is $24\ \text{nm}$.

Key words fiber optics; optical fiber polarization splitter; finite element method; three-core photonic crystal fibers

1 引言

光纤偏振分束器是集成光学中的一种重要器件,其主要功能是将一束线偏振光分离为相互正交的两束光。该器件的机制有基于双折射棱镜的,也有基于偏振薄膜的,例如, Tol 等^[1~3]设计了基于非

对称 Y 型半导体波导的偏振分束器; Miliou 等^[4]通过在离子交换波导上引入压力实现了在 $1300\ \text{nm}$ 工作波长上的偏振隔离。近几年来,随着光子晶体光纤(PCFs)的发展,出现了基于光子晶体光纤的偏振分束器。光子晶体光纤最早由 Russell 等^[5~12]在

收稿日期:2008-03-21; 收到修改稿日期:2008-04-30

基金项目:中国博士后科学基金(20070420199)和江苏省博士后科研资助计划(0702014B)资助项目。

作者简介:文科(1977—),男,湖南人,博士研究生,主要从事光子晶体光纤、光纤传感方面的研究。

E-mail: wenke.77@163.com

导师简介:王荣(1962—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事全光网络设计、光子晶体光纤和光码分多址(OCDMA)接入方面的研究。E-mail: wr-njice@163.com

1992 年提出。它是一种二维光子晶体, 光纤包层由规则分布的空气孔组成; 纤芯由石英或空气孔构成缺陷, 利用其局域光的能力, 将光限制在纤芯中传播。目前光子晶体光纤偏振分束器的设计主要基于两种机制: 1) 在双芯光子晶体光纤中打破光纤的对称结构, 在纤芯中产生较高的双折射^[13,14]; 2) 利用三芯光纤的谐振现象, 使一个偏振方向产生谐振, 另一个偏振方向不产生谐振, 达到偏振模式分离的目的^[15]。利用高双折射现象设计的偏振分束器, 长度较短, 隔离度较低; 利用三芯光纤的谐振现象所设计的偏振分束器长度较长, 隔离度较高。

本文应用全矢量有限元法(FEM)分析了三芯光纤中的谐振现象, 设计了一种具有较短长度、较高隔离度的偏振分束器。通过运用全矢量光束传播法(BPM)对偏振分束器的分析发现, 该偏振分束器在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 光在光纤中传播 1.039 mm 后即能实现偏振状态的隔离, 隔离度达到 -36.98 dB , 隔离度 $< -11 \text{ dB}$ 的带宽为 24 nm 。

2 偏振分束器结构及原理

图 1 为偏振分束器的横截面。包层由圆形空气孔组成, 直径为 $d_1 = 0.8 \mu\text{m}$, 空气孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$; 纤芯 A, B, C 可视为三个独立的并行波导, 纤芯周围大空气孔直径 $d_2 = 1.8 \mu\text{m}$, A 波导和 C 波导缺失一个空气孔, B 波导中引入椭圆形空气孔, 椭圆短轴直径为 a , 长轴直径为 b , 椭圆率 $\eta = b/a$ 。A 波导, C 波导为输入/输出波导, B 波导为谐振通道。

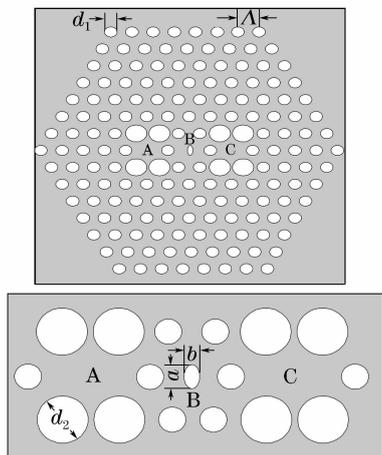


图 1 三芯光子晶体光纤偏振分束器横截面结构

Fig. 1 Cross-section of the proposed polarization splitter in three-core PCFs

根据超模理论, 三个单模光纤所构成的三芯光纤耦合器支持三种超模式^[11]: 两个对称模式和一个

反对称模式。以模式电场的 y 分量 $E_y(x, y)$ 为例, 其场结构如图 2 所示。如果三种超模式的有效折射率 $n_{\text{eff}1}, n_{\text{eff}2}, n_{\text{eff}3}$ 满足

$$n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}3} = n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}2}, \quad (1)$$

即

$$2n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2} = 0, \quad (2)$$

则在三芯光纤耦合器中将产生谐振现象, 全部光波功率在 A 波导和 C 波导之间周期性交换, 交换周期即为耦合长度, 可以计算为

$$L_c = \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}3})}. \quad (3)$$

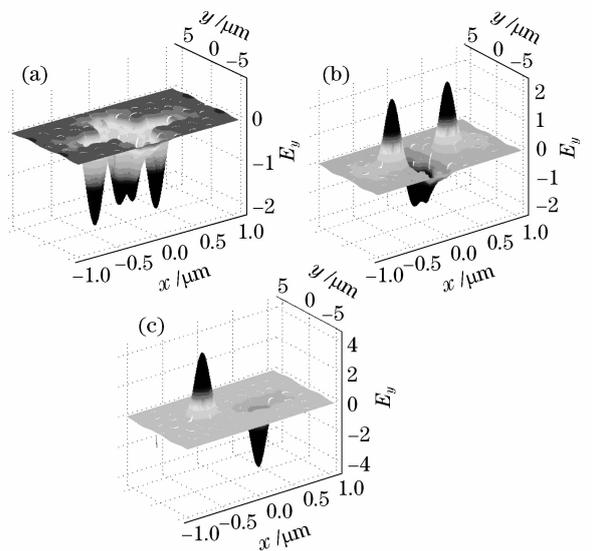


图 2 超模式电场 y 分量场结构。(a) 模式 1(偶模); (b) 模式 2(偶模); (c) 模式 3(奇模)

Fig. 2 Electric field component of y -polarization light.

(a) model1 (even); (b) mode2 (even); (c) mode3 (odd)

从图 1 可以看到, 由于在纤芯区域破坏了圆对称结构, 所以 A 波导和 C 波导中 x 方向的模式折射率大于 y 方向的模式折射率, 而 B 波导中 x 方向的模式折射率小于 y 方向的模式折射率。通过选择合适的光纤结构参量, 可以使得 y 方向偏振光的模式折射率接近谐振条件, 而 x 方向偏振光的模式折射率远离谐振条件, 即

$$(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}3})_{y\text{-pol}} \approx (n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}2})_{y\text{-pol}}, \quad (4)$$

$$(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}3})_{x\text{-pol}} \ll (n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}2})_{x\text{-pol}}, \quad (5)$$

式中下标 $y\text{-pol}$ 和 $x\text{-pol}$ 分别表示 y 偏振方向和 x 偏振方向。此时大部分 y 偏振方向的光功率在 A 波导和 C 波导之间周期性交换; x 偏振方向的光功率只有非常小的一部分在 A 波导和 C 波导周期性交换, 大部分光功率被有效地束缚在 A 波导中。若光从 A 波导入射, 选择光纤长度为

$$L_c = \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}3})_{y\text{-pol}}}, \quad (6)$$

则在光纤的输出端, A 波导中 x 偏振方向光的强度将远远大于 y 偏振方向的光; C 波导中 y 偏振方向光的强度将远远大于 x 偏振方向的光, 从而实现偏振分离。

为了找到合适的结构参量, 满足(4)和(5)式, 采用全矢量有限元法, 在图 1 所示的结构中, 保持 B 波导中椭圆形空气孔的椭圆率 $\eta = 2$ 不变, 通过改变短轴直径 a 来达到谐振的目的。图 3 是三个超模式的 y 偏振光的折射率随短轴长度 a 的变化关系。从图 3 中可以看到, 当 $a \approx 0.302 \mu\text{m}$ 时, 可满足(4)式。

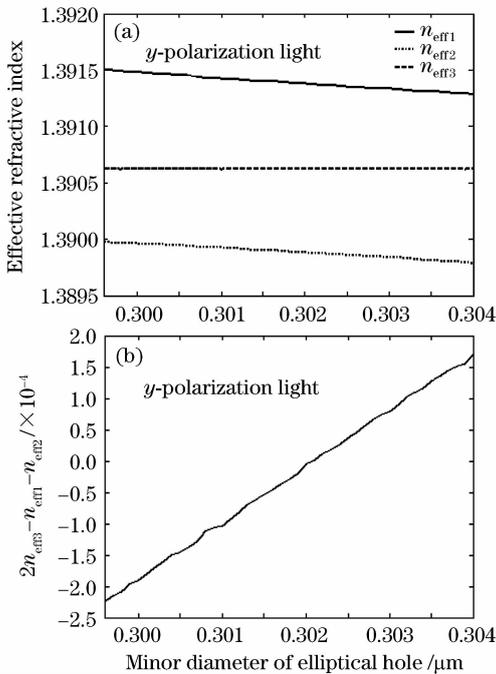


图 3 (a) 超模式有效折射率随椭圆短轴直径的变化;

(b) $2n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2}$ 随椭圆短轴直径的变化

Fig. 3 (a) Effective refractive indices of supermodes versus minor diameter of the elliptical hole; (b) value of $2n_{\text{eff}3} - n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}2}$ for y -polarization light versus minor diameter of the elliptical hole

3 仿真结果及性能分析

为了分析偏振分束器的性能, 采用全矢量光束传播法对偏振分束器进行数值仿真。假设入射场为线偏振光, 光线沿 z 方向传播, $z = 0$ 时, 光场集中在 A 波导中。图 4 是 A 波导和 C 波导中归一化光功率的变化情况。可以看到, 在传输过程中, y 方向的偏振光在 A 波导和 C 波导中产生了强烈的耦合, 而 x 方向的偏振光耦合比较弱, 其光功率几乎全部限制在 A 波导中。当光纤长度为 1.039 mm 时, x 方

向的偏振光几乎全集中在 A 波导中, y 方向的偏振光几乎全集中在 C 波导中, 达到了偏振分离的目的。

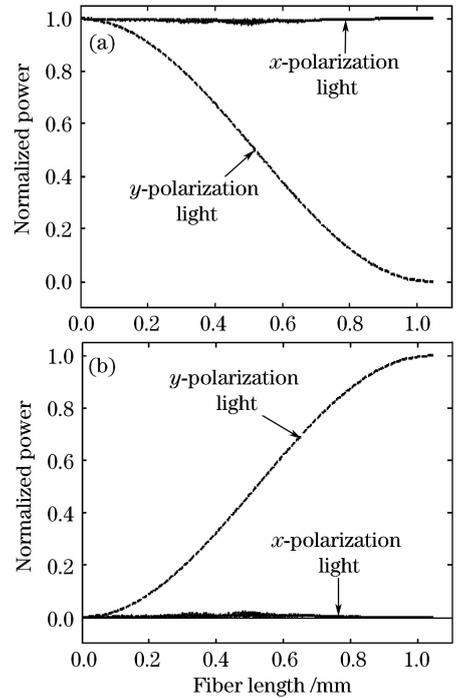


图 4 (a) A 波导中光功率随光纤长度的变化; (b) C 波导中光功率随光纤长度的变化

Fig. 4 Normalized power versus length of fiber (a) in core A and (b) in core C

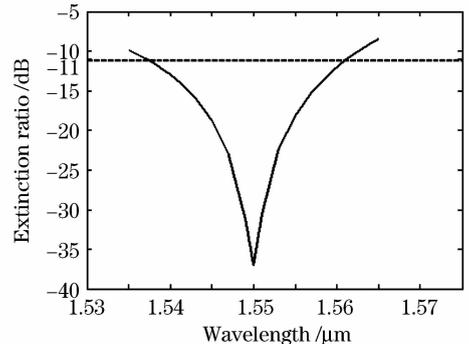


图 5 光纤长度为 1.039 mm 时隔离度随波长的变化

Fig. 5 Extinction ratio versus wavelength at a PCF length of 1.039 mm

为了计算偏振光的隔离程度, 定义隔离度 (ER) 为^[15]

$$\text{ER} = 10 \lg \frac{\text{output power of } y\text{-polarization}}{\text{output power of } x\text{-polarization}}. \quad (7)$$

图 5 是根据(7)式计算的隔离度 ER 随工作波长 λ 的变化关系, 光纤长度为 1.039 mm 。ER $< -11 \text{ dB}$ 的带宽为 24 nm , 工作波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$, 其隔离度 ER 达到 -36.98 dB 。

4 结 论

通过选择合适的结构参量,在三芯光子晶体光纤中可以产生谐振耦合现象。设计了一种基于谐振耦合现象的三芯光子晶体光纤偏振分束器,使得某一个方向的偏振光产生强烈的耦合,而另一个方向的偏振光耦合比较弱。选择合适的光纤长度,使得在光纤的输出端,两个偏振光的光功率集中在不同的纤芯区,从而达到分离偏振光的目的。设计的三芯光子晶体光纤,在1.039 mm的光纤长度上,即能实现 x 方向和 y 方向偏振光的隔离,其隔离度达到-36.98 dB,为设计超小型高隔离度全光偏振分束器提供了可能。

参 考 文 献

- 1 J. J. G. M. Van der Tol, J. W. Pedersen, E. G. Metaal *et al.*. Mode evolution type polarization splitter on InGaAsP/InP [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(12):1412~1414
- 2 J. J. G. M. Van der Tol, J. W. Pedersen, E. G. Metaal. A short polarization splitter without metal overlays on InGaAsP-InP [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(12):209~211
- 3 T. Hayakawa, S. Asakawa, Y. Kokubun. Arrow-B type polarization splitter with asymmetric Y-branch fabricated by a self-alignment process [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7):1165~1170
- 4 A. N. Miliou, R. Srivastava, R. V. Ramaswamy. A 1.3- μm directional coupler polarization splitter by ion exchange [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(2):220~225
- 5 P. St. J. Russell, J. C. Knight, T. A. Birks *et al.*. Recent progress in photonic crystal fibres [C]. Baltimore, USA, Optical Society America, OFC2000, 3:98~100
- 6 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Properties of index-guided PCF with air-core [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(2):317~321
- 7 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Dispersion and polarization properties of elliptical air-fole-containing photonic crystal fibers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(5):913~917
- 8 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion [J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(3):169~172
- 9 Jingyuan Wang, Mingyi Gao, Chun Jiang *et al.*. Design and parametric amplification analysis of dispersion-flat photonic crystal fibers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7):380~382
- 10 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tieying *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
- 11 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang 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
- 12 Fangdi Zhang, Xiaoyi Liu, Min Zhang *et al.*. A novel design for single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1550 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5):260~263
- 13 Zhang Lin, Yang Changxi. Polarization splitter based on photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(9):1015~1019
- 14 L. Rosa, F. Poli, M. Foroni *et al.*. Polarization splitter based on a square-lattice photonic-crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(4):441~443
- 15 K. Saitoh, Y. Sato, M. Koshiba. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17):3940~3946