

# 基于混合导光型光子晶体光纤的波分解复用器研究

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** 设计了一种基于混合导光型光子晶体光纤的波分解复用器,该波分解复用器同时具有折射率导光型光子晶体光纤和带隙导光型光子晶体光纤的特点,可用于稀疏型波分复用系统中。设计的稀疏型波分解复用器由一段三芯光子晶体光纤组成,通过填充不同折射率的材料,形成了混合导光型光子晶体光纤。根据耦合模原理,在临近的波导中,当传播常数相等时,模式之间发生强烈耦合,能量在波导之间交替。由于填充的材料折射率不同,使得光功率在两个不同的波长上发生耦合,构成了两个不同响应波长的光滤波器。通过选择合适的光纤长度,使得在光纤的输出端,不同波长的光从不同的波导输出,实现波分解复用的功能。采用全矢量有限元法分析了光纤传输特性,计算了不同波长光的耦合长度。采用光束传播法仿真发现,长度为 4.3 mm 的光纤能实现波长为 1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  光的解复用。

**关键词** 光纤光学; 波分复用; 有限元法; 光束传播法

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.1088

## A Novel Wavelength-Division Demultiplexer Based on Hybrid 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 novel wavelength-division demultiplexer which is based on photonic crystal fibers (PCFs) with hybrid light-guiding mechanism has been proposed. Different from the traditional PCFs, hybrid light-guiding PCFs share the properties of both the index-guiding PCFs and the bandgap-guiding PCFs. The proposed wavelength-division demultiplexer can be used in the coarse wavelength-division multiplexing system. The proposed wavelength-division demultiplexer consists of three cores. High-index materials are filled into the circle of air holes around the three cores. Because the material's indices are different, the PCF operates by a hybrid light-guiding mechanism. According to the coupled-mode theory, the coupling happens when the propagation constants of two adjacent cores are equal at a particular wavelength  $\lambda_0$ . There are two corresponding wavelengths, so two beams of light with different wavelengths can put out in different cores if choosing the appropriate parameters of PCFs. By full-vectorial finite element method (FEM), the properties of PCF are analyzed and the coupling lengths for different-wavelength lights were calculated. Numerical simulations by beam propagation method demonstrate that it is possible to obtain a 4.3 mm-long wavelength-division demultiplexer which can separate two lights with wavelength 1.31  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Key words** fiber optics; wavelength division multiplexing; finite element method; beam propagation method

**收稿日期**: 2008-08-25; **收到修改稿日期**: 2008-10-16

**基金项目**: 江苏省自然科学基金(BK2008089)资助课题。

**作者简介**: 文 科(1977-),男,博士研究生,主要从事光子晶体光纤和光纤传感等方面的研究。

E-mail: wenke.77@163.com

**导师简介**: 王 荣(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光码分多址(OCDMA)、光子晶体光纤和自动交换光网络(ASON)等方面的研究。E-mail: wr-njice@163.com

## 1 引 言

光波分复用/解复用器是一种具有波长选择性的特殊耦合器。通常可将波分复用/解复用器分为三类:稀疏型复用/解复用器、密集型复用/解复用器和致密型复用/解复用器。常见的光波分复用/解复用器有光栅复用/解复用器和熔锥光纤型复用/解复用器。采用普通光纤布拉格光栅制作的复用/解复用器,需结合光环形器和光带通滤波器,结构复杂;熔锥光纤型复用/解复用器结构简单,但尺寸偏大。

光子晶体光纤(PCF)最早由 J. C. Knight 等<sup>[1]</sup>于 1996 年提出。它是一种带有线缺陷的二维光子晶体。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线缺陷,利用其局域光的能力,将光限制在纤芯中传播。PCF 按其导光机制可以分为两类:折射率导光 PCF,通过全内反射导光;另一类是光子带隙导光 PCF,通过光子带隙效应导光<sup>[2~7]</sup>。最近,Cerqueira 等<sup>[8]</sup>报道了一种混合导光 PCF,该种光纤同时利用全内反射效应和带隙效应导光,因此同时具备了折射率导光型 PCF 和带隙导光型 PCF 的特性。近两年来,填充型 PCF 得到了广泛的研究。在填充型 PCF 方面,Christiano 等<sup>[9]</sup>成功地在—根 PCF 中填充了两种不同的液体。利用 PCF 独特的导光机制,可以设计耦合长度小、结构简单的全光纤型耦合器<sup>[10,11]</sup>。

本文设计了一种基于混合导光型 PCF 的光波分解复用器。它由一段三芯 PCF 构成,通过填充不同折射率材料,形成了混合导光型 PCF,同时具备了折射率导光型和带隙导光型 PCF 的特点。由于填充材料折射率的不同,构成了两个不同响应波长的光滤波器,从而实现波分解复用的功能。通过有限元法,分析了该波分解复用器的传输特性。通过光束传播法对该波分解复用器的分析发现,长度为 4.3 mm 的光纤能实现波长为 1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  光的分束。

## 2 光波分解复用器结构和原理

图 1 是设计的光波分解复用器横截面结构。光纤的包层由在纯二氧化硅材料内按正规三角形晶格排列的空气孔形成,空气孔的直径  $d=1.67 \mu\text{m}$ ,孔间距  $\Lambda=3.15 \mu\text{m}$ ,纯二氧化硅材料的折射率为 1.444。光纤通过缺失三个空气孔形成三个独立的纤芯。纤芯 B 和纤芯 C 周围的第一圈空气孔分别填充高折射率材料。PCF 的特性主要由纤芯周围的第一圈空气孔来决定<sup>[12]</sup>。纤芯 B 和纤芯 C 周围的

第一圈空气孔,由于填充了高折射率材料,因此包层有效折射率高于纤芯,其导光机制为带隙导光;纤芯 A 的  $x$  方向填充了高折射率材料,包层有效折射率高于纤芯,而  $y$  方向包层有效折射率低于纤芯,因此纤芯 A 是混合导光型。

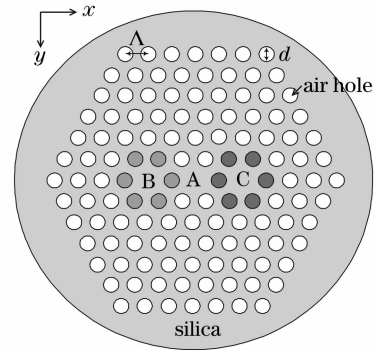


图 1 光波分解复用器横截面

Fig. 1 Cross section of the proposed wavelength-division demultiplexer

光波分解复用器是有波长选择性的耦合器,因此其机制也是基于光纤的消逝场耦合的模式理论。根据耦合模理论,当临近的两根光纤在某一波长上的相位传播常数满足匹配条件

$$\beta_1(\lambda_0) = \beta_2(\lambda_0), \quad (1)$$

时,两根光纤中的光将产生能量耦合。耦合长度为

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_e^i - \beta_o^i|}, \quad i = x, y \quad (2)$$

式中  $\beta_e^i$  和  $\beta_o^i$  分别表示  $i$ -偏振方向的偶模和奇模。在图 1 所示的光波分解复用器横截面中,由于采用了非对称结构,因此纤芯的传播常数只可能在某一波长处满足匹配条件,使得特定波长的光产生耦合。通过控制填充材料的折射率,可以控制耦合波长。在纤芯 B 和纤芯 C 中填入不同折射率的材料,当具有两个波长的混合光从纤芯 A 入射时,经过一定长度的传播,某一波长的光将耦合到纤芯 B 中,另一波长的光将耦合到纤芯 C 中。在本文所设计的光波长分束器中,纤芯 B 和纤芯 C 周围分别填充折射率为 1.63 和 1.71 的高折射率材料。

## 3 仿真及结果分析

在仿真中,我们采用平面波扩展法分析 PCF 的带隙特性,采用全矢量有限元法分析 PCF 的传输特性。图 2 是计算得到的基模模式色散曲线。浅色阴影部分表示填充材料折射率 1.63 时的带隙;深色阴影部分表示填充材料折射率 1.71 时的带隙,从实际通信中使用的波长范围考虑,选择第二带隙进行分

析;实线表示纤芯 A 中基模有效折射率;点线表示纤芯 B 中基模有效折射率;虚线表示纤芯 C 中基模有效折射率。根据超模式理论,每个纤芯可以当作独立波导来分析。在波长  $\lambda_1 = 1.31 \mu\text{m}$  ( $\lambda/\Lambda = 0.416$ ) 处,纤芯 A 的模式有效折射率与纤芯 B 的模式有效折射率相等,因此波长为  $\lambda_1 = 1.31 \mu\text{m}$  的光,在纤芯 A 与纤芯 B 中将产生能量耦合,经计算其耦合长度为  $L_{C1} = 580 \mu\text{m}$ 。同样,波长  $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$  ( $\lambda/\Lambda = 0.492$ ) 的光,在纤芯 A 与纤芯 C 中将产生能量耦合,其耦合长度为  $L_{C2} = 420 \mu\text{m}$ 。

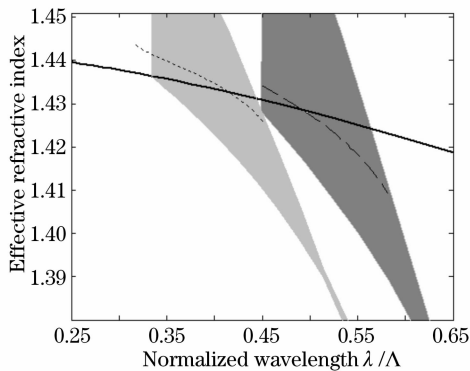


图 2 PCF 带隙及模式有效折射率曲线

Fig. 2 Band gap of photonic crystal fiber and modal dispersion curves for the fundamental mode

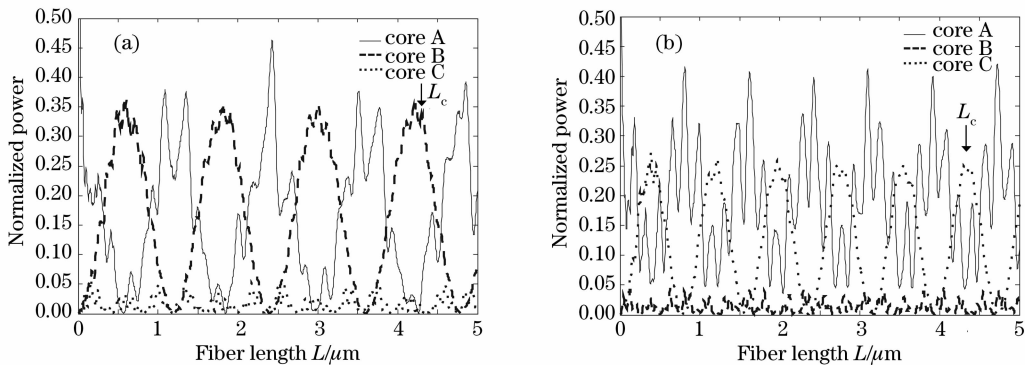


图 3 归一化光功率沿光纤的变化。(a) 波长  $\lambda_1 = 1.31 \mu\text{m}$ ; (b) 波长  $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$

Fig. 3 Normalized power as functions of fiber length. (a) wavelength  $\lambda_1 = 1.31 \mu\text{m}$ ; (b) wavelength  $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$

## 4 结 论

本文设计了一种基于混合导光型光子晶体光纤的光波分解复用器。通过在光子晶体光纤的空气孔中注入高折射率材料,形成了非对称型光纤耦合器。根据耦合模理论,在特定的波长上,纤芯的传播常数满足匹配条件,从而使得耦合器具有波长选择性。在三芯光子晶体光纤中注入两种折射率不同的材料,使得两个波长的光在纤芯间产生耦合,从而到达光解复

为了确定波分解复用器的长度,采用光束传播法进行数值计算。假设波长为  $1.31 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  的混合光从纤芯 A 入射,两束光的功率比为 1:1,各占总功率的 50%。图 3 表示各个纤芯中归一化光功率沿光纤的变化,图中实线、虚线、点线分别表示纤芯 A、纤芯 B 和纤芯 C 中光功率的变化。从图中可见,当光纤长度  $L_c = 4.3 \text{ mm}$  时,纤芯 A 中波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的光功率仅有 3.7%,波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光功率仅有 4.7%;纤芯 B 中波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的光功率有 32.4%,波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光功率有 22%;纤芯 C 中波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的光功率仅有 3%,波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光功率有 24.9%;其余的光功率在传输过程中损耗。增加光纤空气孔的圈数,可以有效地减少损耗<sup>[12]</sup>。由此可见,光纤长度为  $L_c = 4.3 \text{ mm}$  时,  $1.31 \mu\text{m}$  光的功率几乎全集中在纤芯 B 中,  $1.55 \mu\text{m}$  光的功率几乎全集中在纤芯 C 中。因此,长度为  $4.3 \text{ mm}$  的 PCF 即能实现分割  $1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$  光的功能。

仿真过程发现,纤芯之间的空气孔对于耦合长度有非常大的影响。纤芯 A 和纤芯 B 之间的空气孔不填充高折射率材料时,对于  $1.31 \mu\text{m}$  光的耦合长度  $L_{C1} = 2.6 \text{ mm}$ ;纤芯 A 和 C 之间的空气孔不填充高折射率材料时,  $1.55 \mu\text{m}$  光的耦合长度  $L_{C2} = 2.3 \text{ mm}$ 。

用的目的。仿真结果表明,长度为  $4.3 \text{ mm}$  的光纤能实现  $1.31 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$  光的解复用。

## 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**(19): 1547~1549
- 2 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Properties of index-guided PCF with air-core[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(2): 317~321

- 3 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Dispersion and polarization properties of elliptical air-hole-containing photonic crystal fibers[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(5): 913~917
- 4 Wang Jingyuan, Jiang Chun, Hu Weisheng *et al.*. Modified design of photonic crystal fibers with flattened dispersion[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2006, **38**(3): 169~172
- 5 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tiejing *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
- 6 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
- 7 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
- 8 S. Cerqueira Jr., F. Luan, C. M. B. Cordeiro *et al.*. Hybrid photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 926~931
- 9 C. J. S. de Matos, C. M. B. Cordeiro, E. M. dos Santos *et al.*. Liquid-core, liquid-cladding photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11207~11212
- 10 N. J. Florous, K. Saitoh, T. Murao *et al.*. Non-proximity resonant tunneling in multi-core photonic crystal band gap fibers: An efficient mechanism for engineering highly-selective ultra-narrow band pass splitters[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 4861~4872
- 11 K. Saitoh, N. J. Florous, M. Koshiba. Design of narrow band-pass filters based on the resonant-tunneling phenomenon in multi-core photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10327~10335
- 12 A. Bétourné, V. Pureur, G. Bouwmans *et al.*. Coexistence of total internal reflexion and bandgap modes in solid core photonic bandgap fiber with interstitial air holes[J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(21): 13783~13795