

# 基于正三角型三芯光纤的波分解复用器

解清明 季敏宁 毛艳萍 刘珍

上海大学光纤研究所, 上海 201800

**摘要** 设计了基于正三角排列三芯光纤的新型波分解复用器, 比起基于多芯光子晶体光纤的波分解复用器, 该波分解复用器有着容易制作、且易于与常规光纤对接的优点。通过设计使两个非对称平行纤芯在某波长处的传播常数(或有效折射率)匹配, 此时两个纤芯就可完全耦合, 从而实现滤波。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纤芯端口输出, 从而实现波分解复用的功能。利用全矢量光束传播法仿真发现, 长度为 10.25 mm 的正三角排列三芯光纤可以实现波长为 1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  光波的解复用。

**关键词** 光学器件; 三芯光纤; 波分解复用器; 耦合模理论; 光束传播法

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.062303

## Wavelength-Division Demultiplexer Based on Equilateral Three-Core Fiber

Xie Qingming Ji Minning Mao Yanping Liu Zhen

*Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China*

**Abstract** A novel wavelength-division demultiplexer based on equilateral three-core optical fiber is proposed. Compared to the wavelength-division demultiplexer based on photonic crystal fiber, it has the advantage of being easier to make and to link with conventional optical fiber. Two parallel mismatched cores are designed to be phase-matched (or index-matched) at certain wavelength. Then the light in the two cores will be fully coupled, which will lead to filtering. By selecting a suitable fiber length, different wavelengths of the input light can be output at different cores end of the optical fiber to achieve the function of wavelength-division demultiplexer. Numerical simulation by beam propagation method demonstrates that a 10.25 mm long wavelength-division demultiplexer based on equilateral triangle arrangement three-core optical fiber can separate 1.31  $\mu\text{m}$  wavelength light from 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength light.

**Key words** optical devices; three-core optical fiber; wavelength-division demultiplexer; coupled mode theory; beam propagation method

**OCIS codes** 230.1360; 230.7408

## 1 引言

光波复用/解复用器件(MUX/EMUX)是波分复用器(WDM)中的关键器件, 它们影响着整个系统的性能, MUX在发送端将多个波长复用到一根光纤中, EMUX在接收端将多个波长分离出来。通常可将波分复用/解复用器分为三类: 稀疏型、密集型和致密型。光波分复用/解复用器的种类很多, 按照其制造的方法可以分为熔锥光纤型<sup>[1]</sup>、介质膜干涉型、光栅型和波导型等。

早在 20 世纪 70 年代末, 国外就提出了用多芯单模光纤制作高密度光缆的设想。直到 1994 年 7 月法国电信公司制作了 100 多千米四芯单模光纤, 初步证实了所提出的多芯单模光纤能够同时解决降低光纤光缆的制造成本和开发高密度大芯数光缆<sup>[2]</sup>两大难题, 与用普通单芯光纤的情况相比, 光缆密集度提高了很多倍。

收稿日期: 2013-11-25; 收到修改日期: 2014-01-20; 网络出版日期: 2014-05-16

基金项目: 上海市教委创新基金项目(09YZ31)

作者简介: 解清明(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事多芯光纤和波分解复用器等方面的研究。

E-mail: mingxie0711@126.com

导师简介: 季敏宁(1964—), 男, 教授, 主要从事特种光纤和光纤偏振光学等方面的研究。E-mail: jmn2001@shu.edu.cn

随着研究的深入,发现多芯光纤可以利用光的消逝场在纤芯之间的耦合作用,实现对光功率、波长、模式和偏振态等多种选择功能<sup>[9-10]</sup>。与常规光纤相比,多芯光纤由于自身的特殊结构,可构造新器件,如用作应力传感<sup>[7]</sup>、多芯光纤激光器<sup>[8]</sup>、图像放大器<sup>[9]</sup>、光学干涉测量、特殊光场发生器、光的定向耦合<sup>[10]</sup>和转换器、窄带通滤波器<sup>[11]</sup>的设计等。

本文利用多芯光纤纤芯间的耦合作用实现对波长的选择性原理,设计了基于正三角型排列三芯光纤的波分解/复用器,并与线型排列三芯光纤的波分解/复用器进行了比较。通过调节各个纤芯的参数,实现输入纤芯与两个输出纤芯在不同波长处传播常数的匹配,而两输出纤芯在此波长处传播常数不匹配,从而实现不同波长的光波在出射端的分离。利用全矢量光束传播法(BPM)仿真发现,在 10.25 mm 处可以实现波长 1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  的解复用。

## 2 结构和原理

图 1 为所设计的正三角型三芯光纤的波分解复用器的横截面图,其中 1 和 2 两芯子为输出端口,3 芯子为输入端口。与线型三芯光子晶体光纤波分解复用器<sup>[12]</sup>(图 2)最大的区别在于:由于线型排列的三芯光纤中 1 和 2 两芯子距离较远且中间隔有 3 芯子,故 1 芯子与 2 芯子在波长 1.33  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  处的耦合可以忽略不计,而正三角型三芯光纤 1 芯子与 2 芯子之间的耦合不能忽略不计,要尽量减小它们之间的耦合作用。

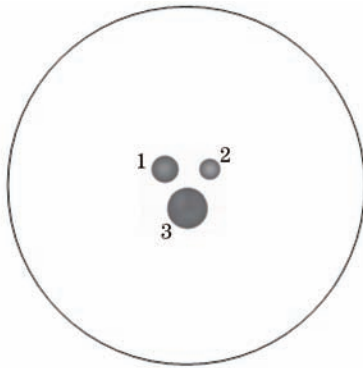


图 1 正三角型排列的三芯光纤

Fig.1 Equilateral three-core fiber

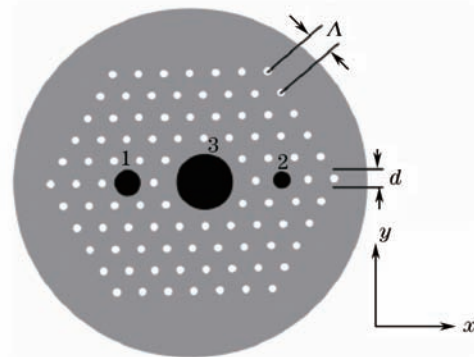


图 2 线型排列的三芯光纤

Fig.2 Linear three-core fiber

图 1 中包层由纯二氧化硅组成,其折射率近似为 1.45,为简便起见,这里忽略其材料色散的影响。1 芯子的半径为 2  $\mu\text{m}$ ,与包层的折射率差为 0.0138;3 芯子的半径为 3.1  $\mu\text{m}$ ,与包层的折射率差为 0.0011;2 芯子的半径为 1.55  $\mu\text{m}$ ,与包层的折射率差为 0.0165。且三个芯子的排列为正三角型,纤芯之间的距离为  $20\sqrt{3}=6.667 \mu\text{m}$ 。由于 1 和 2 芯子的折射率大于 3 芯子的折射率,其中传输的光束束缚得较好,而 3 芯子中传输的光则束缚力较弱,会向上边的两芯子扩张。通过计算可知,波长大于 0.8  $\mu\text{m}$  时,三个芯子都能满足单模传输条件。

由文献[13]知,非对称双芯光纤的两芯子在某一波长处有效折射率匹配,则在此波长的光波经过耦合长度  $L_c$  后可以从一个芯子完全耦合到另一个芯子。若初始光功率为  $P_1=1$ ,从一个芯子注入,经过一段长度  $z$  之后,两芯子的光功率分别为

$$P_1 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), P_2 = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (1)$$

式中  $C = \frac{(2\Delta)^{1/2}}{\rho} \frac{U^2 K_0(Wd/\rho)}{V^3 K_1^2(W)}$  为耦合系数,  $F = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}}$  为光功率因子。这里  $\Delta$  为光纤相对折射率差,  $\rho$  为光纤的半径,  $d$  是两纤芯中心间距,  $U$  和  $W$  是光纤的纤芯和包层参量,  $V$  是孤立光纤的归一化频率,  $K_0$  及  $K_1$  是零阶和一阶修正的第二类 Bessel 函数。

由文献[14]知,失配度  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  越小,  $C$  越大,  $F$  系数越大,两芯子之间参与耦合的功率越多,耦合效果越好。所以为了更好地实现滤波,光功率因子在某波段要尽可能的大。

因此当临近的两根光纤在某一波长上的传播常数满足匹配条件,即  $\beta_1(\lambda_1) = \beta_2(\lambda_1)$  时,则在此波长处可以

实现完全耦合,此时耦合长度为

$$L_c = \frac{\pi}{2C}. \quad (2)$$

通过设计使1纤芯和3纤芯的传播常数在 $\lambda_1$ 处满足匹配条件且耦合长度为 $L_c^1$ ,而右边纤芯与下面纤芯的传播常数在 $\lambda_2$ 处满足匹配条件,耦合长度为 $L_c^2$ .则经过长度为 $L = mL_c^1 = nL_c^2$  ( $m$ 和 $n$ 均为正整数)后,就可以实现 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 光波的分离。

### 3 仿真及结果分析

在常规光纤中,纤芯的有效折射率随纤芯半径的变化并不是很明显,要想使两芯子的有效折射率在某波长处完全匹配难度较大,故这里利用两纤芯在某波长(相对其他波长)处有效折射率差相对较小,光功率因子相对较大,两芯子之间参与耦合的功率较多,耦合效果更好。由仿真可得到芯子折射率随波长的变化,如图3所示。分析图3,可以得到芯子对不同波长的有效折射率,如表1所示。

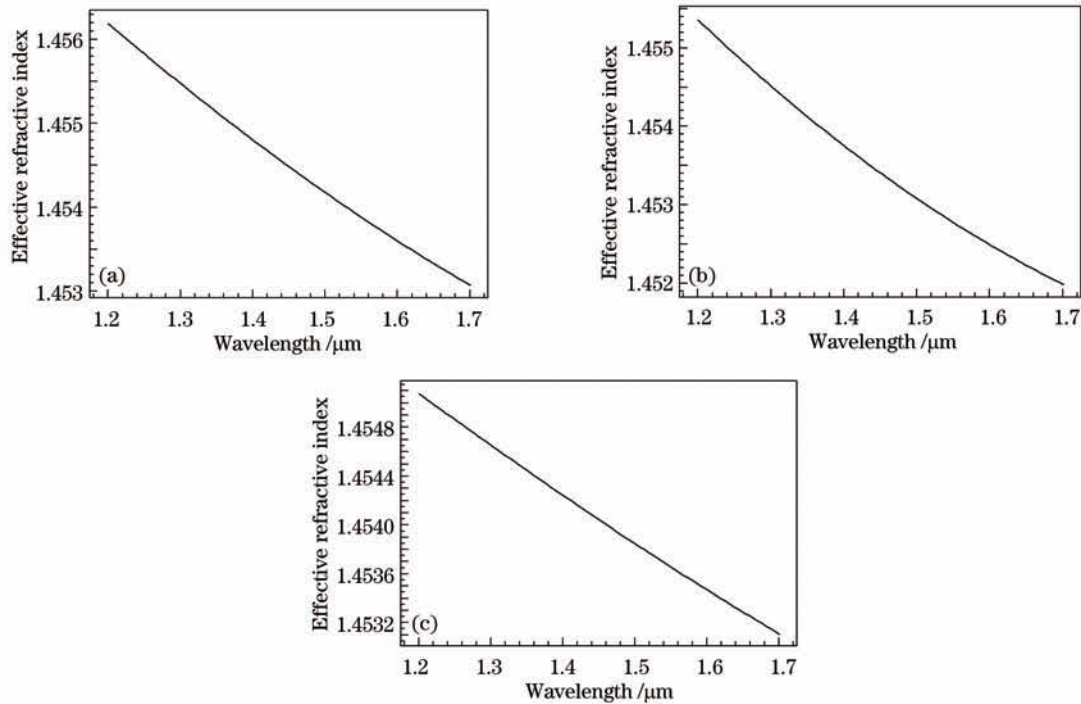


图3 芯子折射率随波长的变化。(a) 1芯子; (b) 2芯子; (c) 3芯子

Fig.3 Effective refractive index versus wavelength. (a) 1 core; (b) 2 core; (c) 3 core

表1 有效折射率表

Table 1 Effective refractive index table

Wavelength	1 core	3 core	2 core
1.31 $\mu\text{m}$	1.45541	1.45461	1.45444
1.55 $\mu\text{m}$	1.45388	1.45366	1.45278

由表1可得有效折射率差为

$$\Delta n_{1.31}^1 = 8 \times 10^{-4} > \Delta n_{1.55}^1 = 2.2 \times 10^{-4}, \quad (3)$$

$$\Delta n_{1.31}^2 = 1.7 \times 10^{-4} < \Delta n_{1.55}^2 = 8.8 \times 10^{-4}, \quad (4)$$

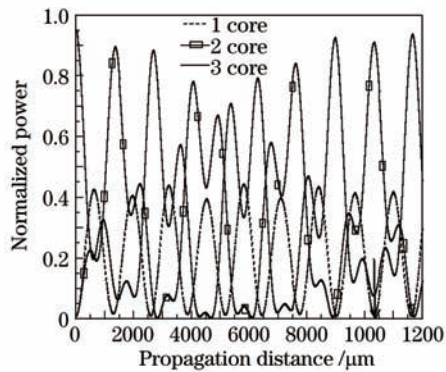
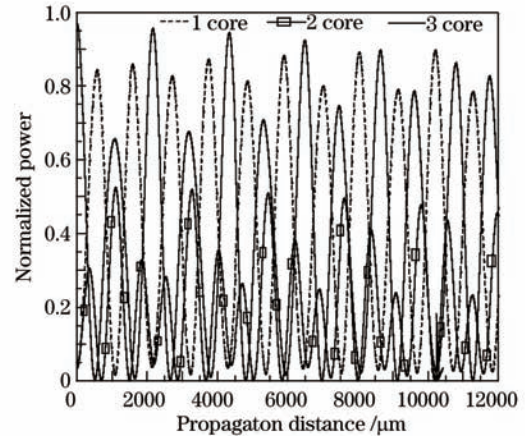
$$\Delta n_{1.31} = 9.7 \times 10^{-4}, \Delta n_{1.55} = 1.1 \times 10^{-3}, \quad (5)$$

式中 $\Delta n_{1.31}^1$ 、 $\Delta n_{1.55}^1$ 分别为1芯子与3芯子在波长为1.31  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ 处的有效折射率差, $\Delta n_{1.31}^2$ 、 $\Delta n_{1.55}^2$ 分别为2芯子与3芯子在波长为1.31  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ 处的有效折射率差, $\Delta n_{1.31}$ 、 $\Delta n_{1.55}$ 分别为1芯子与2芯子在波长为1.31  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ 处的有效折射率差。

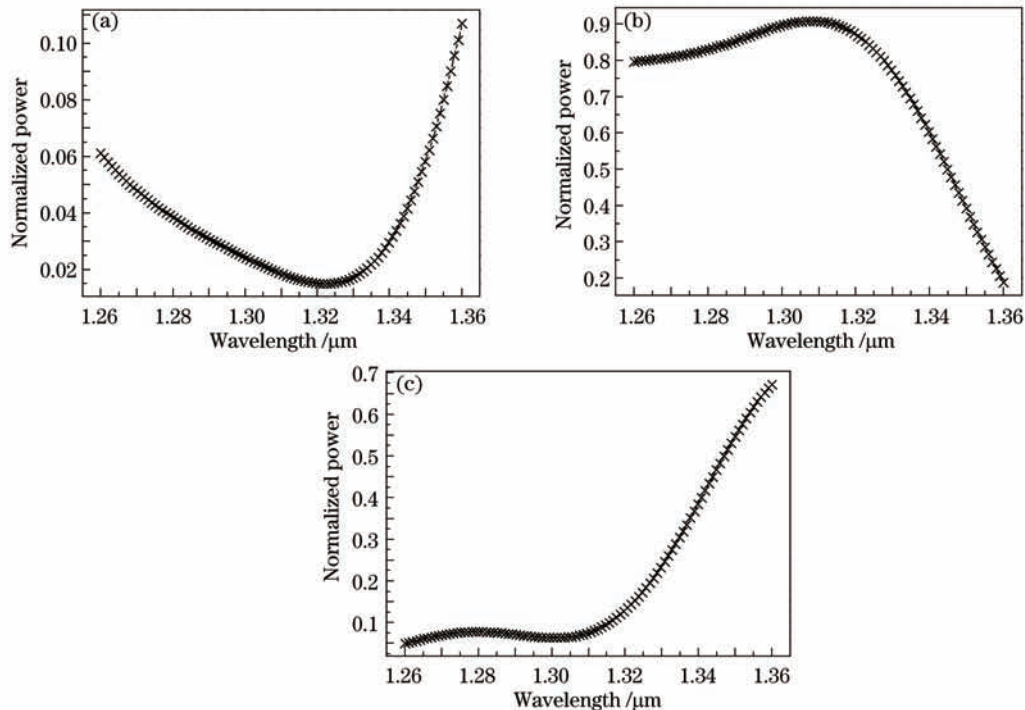
由(3)~(5)式可知,在波长为1.31  $\mu\text{m}$ 处,2芯子与3芯子的有效折射率差相对于1芯子与3芯子的有效

折射率差较小;在波长  $1.55\ \mu\text{m}$  处,2芯子与3芯子的有效折射率差相对于1芯子与3芯子的有效折射率差较大;而2芯子与1芯子的有效折射率差在  $1.31\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  处均相对较大。因此有可能将3芯子中波长为  $1.31\ \mu\text{m}$  的光耦合到2芯子,而波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  的光耦合到1芯子,从而实现两波长的空间分离。

将波长分别为  $1.55\ \mu\text{m}$  和  $1.31\ \mu\text{m}$  的两种光波以 1:1 的功率比从 3 芯子注入,利用光束传播法(BPM)可得在两波长处光功率随光纤长度的变化图,如图 4 和图 5 所示。

图4 输入波长  $\lambda = 1.31\ \mu\text{m}$  的传输特性Fig.4 Transmission characteristics at  $\lambda = 1.31\ \mu\text{m}$ 图5 输入波长  $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$  的传输特性Fig.5 Transmission characteristics at  $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$ 

由图 4 和图 5 可知,在光纤长度为  $L=10.25\ \text{mm}$  处,3 芯子注入的波长为  $1.31\ \mu\text{m}$  的光,其总功率的 91% 已耦合到 2 芯子中,而泄露到 1 芯子的光功率约为总功率的 1.8%——这是由于 2 的纤芯较小,与 1 的纤芯相比,它对光的束缚能力偏弱,因而有部分光耦合到了邻近的 1 芯子中;同样,3 芯子注入的波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  的光,其总功率的 90% 已耦合到 1 芯子中,而泄露到 2 芯子的光功率几乎为零。由此可知,在长度为  $10.25\ \text{mm}$  的正三角型排列三芯光纤出口处,原来从 3 芯子中注入的混合波,其波长为  $1.31\ \mu\text{m}$  的光几乎全部集中到 2 芯子,而波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  的光则完全集中在 1 芯子输出,从而实现了  $1.31\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$  光波的分离。

图6 芯子在  $\lambda = 1.31\ \mu\text{m}$  附近的传输特性。(a)1芯子;(b)2芯子;(c)3芯子Fig.6 Transmission characteristics of core near  $\lambda = 1.31\ \mu\text{m}$ . (a) 1 core; (b) 2 core; (c) 3 core



再考虑其带宽特性,在光纤长度为 $L=10.25$  mm处,分别考察光波波长在 $1.26\sim 1.36$   $\mu\text{m}$ 和 $1.50\sim 1.60$   $\mu\text{m}$ 范围内变化时的情况,由仿真得到图6和图7所示的结果。

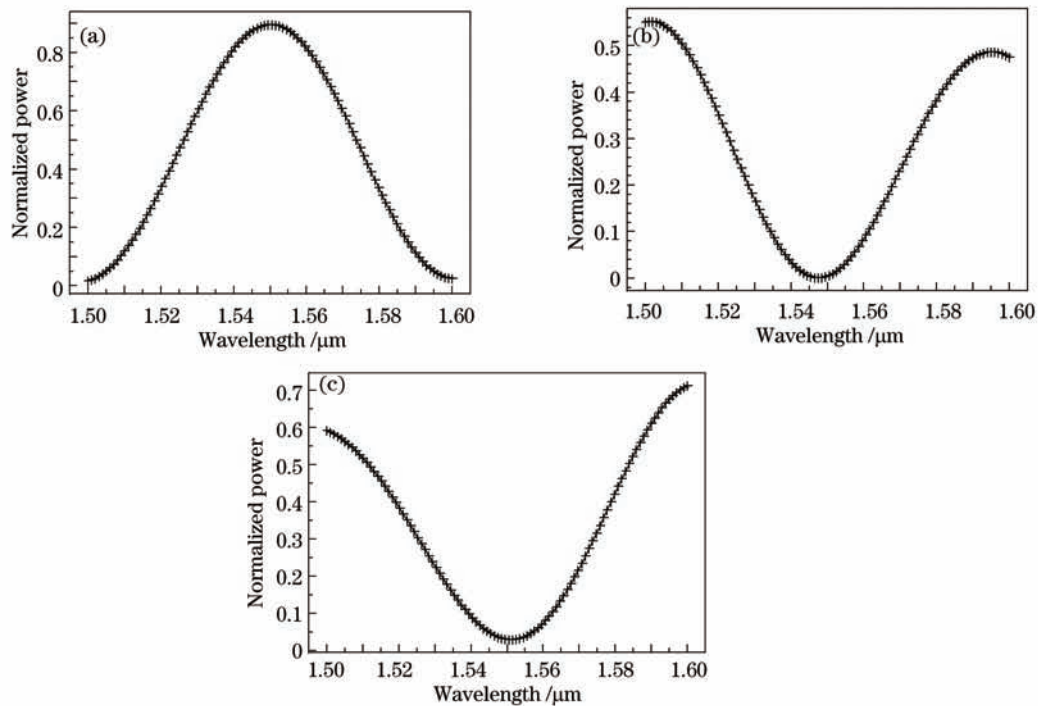


图7 芯子在 $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$ 附近的传输特性。(a)1芯子;(b)2芯子;(c)3芯子

Fig.7 Transmission characteristics of core near  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$  .(a) 1 core; (b) 2 core; (c) 3 core

由图6和图7可得,在长度 $L=10.25$  mm处,当输入光波的波长在 $1.31$   $\mu\text{m}$ 附近时,1芯子输出功率在小于总功率的2%处的带宽为 $29$  nm( $1305\sim 1334$  nm),2芯子输出功率在大于总功率的90%处的带宽为 $12.3$  nm( $1302\sim 1314.3$  nm);当输入光波的波长在 $1.55$   $\mu\text{m}$ 附近时,1芯子输出功率在大于总功率的90%处的带宽为 $2.5$  nm( $1549\sim 1551.5$  nm),而2芯子输出功率在小于总功率的2%处的带宽为 $12$  nm( $1541\sim 1553$  nm)。

## 4 结 论

设计了基于正三角型排列三芯光纤的波分解复用器,分析了它与基于线型排列三芯光纤的波分解复用器的区别与联系。通过对正三角型三芯光纤的各个芯子的参数设计,使得2芯子和3芯子的有效折射率在 $1.31$   $\mu\text{m}$ 处匹配,1芯子和3芯子的有效折射率在 $1.55$   $\mu\text{m}$ 处匹配。利用全矢量光束传播法仿真发现,所设计的波分解复用器长度为 $10.25$  mm时,可以实现 $1.31/155$   $\mu\text{m}$ 的波分解复用,波长为 $1.31$   $\mu\text{m}$ 的光从2芯子输出,而波长 $1.55$   $\mu\text{m}$ 的光从1芯子输出。在 $1.31$   $\mu\text{m}$ 附近,1芯子输出功率在小于总功率的2%处的带宽为 $29$  nm,2芯子输出功率在大于总功率的90%处的带宽为 $12.3$  nm;在 $1.55$   $\mu\text{m}$ 附近,2芯子输出功率在小于总功率的2%处的带宽为 $12$  nm,而1芯子输出功率在大于总功率的90%处的带宽为 $2.5$  nm。

## 参 考 文 献

- 1 Pu Fanyun, Yu Zhenhong, Wang Nana. Study of  $1310/1550$  nm fused biconical taper WDM [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(9): 110-113.  
卜凡云, 余震虹.  $1310/1550$  nm 熔融拉锥型 WDM 的研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(9): 110-113.
- 2 Wu Guofeng. Multi-core fiber for space division multiplexing optical communications [J]. Guangxi Communication Technology, 2012, (2): 30-34.  
吴国峰. 空分复用的多芯光纤[J]. 广西通信技术, 2012, (2): 30-34.
- 3 S Matsuo, Y Sasaki, I Ishida, *et al.*. Recent progress on multi-core fiber and few-mode fiber [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013. OM31.3.
- 4 Sun Xiwen. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism

- [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17): 2484–2486.
- 5 Chen Many, Feng Suchun, Ren Guobin. Research and application of dual-core optical fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 604–610.  
陈曼雅, 冯素春, 任国斌. 双芯光纤的应用及研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(6): 604–610.
- 6 Fu Bo, Li Shuguang, Yao Yanyan, *et al.*. Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(11): 7708–7714.  
付博, 李曙光, 姚艳艳, 等. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(11): 7708–7714.
- 7 Yuan Libo, Yang Jun, Liu Zhihai. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber michelson interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1114–1117.
- 8 Makoto Yamada. Theoretical study of crosstalk characteristics for multi-core optical fiber amplifiers [C]. Anaheim: Optical Fiber Communication Conference, 2013. JTh2A.
- 9 Chavez-Pirson Alturo, Hwang Bor-Chyuan, Ngyen Dan, *et al.*. New approach to image amplification based on an optically-pumped multi-core fiber [C]. SPIE, 2006, 6289: 628909.
- 10 Wang Liwen, Lou Shuqin, Chen Weiguo, *et al.*. Design and optimization of a novel broadband and polarization-insensitive dual-core photonic crystal fiber coupler over the whole optical communication band [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 154207.  
王立文, 娄淑琴, 陈卫国, 等. 一种覆盖全通信波段的新颖宽带偏振无关双芯光纤定向耦合器的研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 154207.
- 11 Chen Mingyang, Zhang Yongkang, Rongjin Yu. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber and its application [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(5): 390–392.
- 12 Chen Mingyang, Zhou Jun, Edwin Y B Pun. A novel WDM component based on a three-core photonic crystal fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(13): 2343–2347.
- 13 B Ortega, L Dong. Characteristics of mismatched twin-core fiber spectral filter [J]. *Photon Technol Lett*, 1998, 10(7): 991–993.
- 14 Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong, *et al.*. Comb-filter based on dual-core fiber coupler [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505001.  
江微微, 赵瑞峰, 范林勇, 等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505001.