

文章编号: 0258-7025(2010)06-1532-05

# 采用双芯光纤的增益平坦滤波器

林淦斌 邹毅 董小鹏

(厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要** 对现有放大自发辐射(ASE)光源与掺铒光纤放大器(EDFA)增益平坦的方法做了分析和讨论,采用双芯光纤和光纤波分复用(WDM)耦合器组合的方法设计了一种新的增益平坦滤波器。由于双芯光纤的传输谱特性可以通过弯曲、扭转以及拉伸等方式调节,从而这种全光纤的增益平坦滤波器具有实现简便、可调谐性好等优点,平坦化后的出射光谱在 1527.36~1561.04 nm 的带宽内只有 $\pm 0.5$  dB 的起伏。结果表明,采用双芯光纤与其他器件一同制作的滤波器,在光通信与光纤传感领域有较大的应用前景。

**关键词** 光通信;增益平坦滤波器;双芯光纤;掺铒光纤放大器;光纤波分复用耦合器;放大自发辐射

**中图分类号** TN253;TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1532

## Gain Flattening Filter with Twin-Core Fiber

Lin Ganbin Zou Yi Dong Xiaopeng

(Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** Methods related to the design of gain flattening filters for amplified spontaneous emission (ASE) and erbium-doped fiber amplifier (EDFA) are reviewed. A novel scheme to realize the gain flattening filter by using a piece of twin-core fiber and a wavelength division multiplexing (WDM) coupler is proposed and verified experimentally. The spectrum of the twin-core fiber can be adjusted by bending, twisting and stretching to meet the filter requirement. The flexibility and tunable properties make the proposed all-fiber device a good candidate for gain flattening filter. The experimental results show that the ASE spectrum can be flattened in the wavelength region of 1527.36~1561.04 nm with ripples within  $\pm 0.5$  dB. The results show the filters with twin-core fiber may offer great potential for optical communications and sensing applications.

**Key words** optical communications; gain flattening filter; twin-core fiber; erbium-doped fiber amplifier; fiber wavelength division multiplexing coupler; amplified spontaneous emission

## 1 引言

掺铒光纤放大器(EDFA)是 20 世纪光通信领域重大的突破与进展之一,以其高功率增益、低噪声和较低的信道串扰成为波分复用(WDM)系统的关键部件。但是 EDFA 自身增益谱线不平坦并且带有小波纹的特点导致了当多级 EDFA 连续使用时某些波段的增益将远超其他部分,引起误码率的提高,影响整个 WDM 系统的性能。因而对 EDFA 实现增益平坦化有着重要的意义。

当前主要使用的平坦方法有两类:一类为优化 EDFA 的设计,改良它的输出谱线<sup>[1~3]</sup>,但现有的这种方法输出的 EDFA 光谱的平坦度还不够理想;另一类是设计一个具有互补特性滤波器来补偿增益,达到增益平坦的目的。本文主要对后一类平坦方法进行研究和讨论。目前主要的互补式增益平坦滤波器有:

1)利用长周期光纤光栅<sup>[4~6]</sup>。这种滤波器具有输出光谱的平坦度好、带宽大、无背向反射、成本低

收稿日期: 2009-09-15; 收到修改稿日期: 2009-10-22

作者简介: 林淦斌(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信、特种光纤等方面的研究。E-mail: linganbin@163.com

导师简介: 董小鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: xpdong163@163.com(通信联系人)

的优点,但是由于紫外写入的长周期光纤光栅具有一定的双折射,其传输谱与入射光的偏振态有关;另外,通常需要级联多段才能获得较理想的光谱特性,在使用的时候存在着诸多不便。

2)利用光纤布拉格光栅<sup>[7]</sup>。这种类型的滤波器可以获得较好的平整度,但是制作工艺和过程均比较复杂,制作相对较难,且传输光谱易受温度影响,稳定性较差。

3)利用介质薄膜滤波器<sup>[8]</sup>。该滤波器是基于光的干涉现象,优点在于利用一片多层的薄膜就可以得到所需要的损耗曲线而且插入损耗较低,缺点在于每层膜的厚度必须精确控制,对设备的要求极高,制作成本高。

4)利用级联马赫-曾德尔干涉仪<sup>[9,10]</sup>。具有较好的输出光谱,但是制作工艺要求高,温度稳定性较差,实用化困难。

本文参考已有使用 2 个光纤 WDM 耦合器组合构筑环形腔<sup>[11]</sup>的方法,提出一种新型的增益平坦滤波器的设计方案:利用双芯光纤的传输特性,在双芯光纤参数一定的情况下,通过选取适当长度的光纤来调谐其光谱特性与已有的光纤 WDM 耦合器组合,实现出射光谱与放大自发辐射(ASE)光源光谱的互补,达到增益平坦的目的。由于在使用 2 个光纤 WDM 耦合器组合构筑环形腔来实现增益平坦滤波器的方法中,光纤 WDM 耦合器在制作完成后各项参数就被固定而无法改变,要想找到 2 个完全符合设计要求的光纤 WDM 耦合器是非常困难的。在设计中采用双芯光纤,因为其具有可调谐性,使用时更具有灵活性。

## 2 新型增益平坦滤波器的工作原理

新型增益平坦滤波器结构图如图 1 所示。

对于一个单模光纤耦合器来说,当仅有一端输入幅度为 1 的光信号时,耦合器其中一个输出端的出射光功率可以写成  $P(z) = \cos^2(Cz)$ ,它是耦合

系数  $C$  和耦合区长度  $z$  的函数,其中  $C$  又与入射光的波长  $\lambda$  有关,可以表示为  $C(\lambda)$ 。当耦合长度  $z$  固定时,它的光谱特性就由  $C(\lambda)$  决定,即光谱特性是波长  $\lambda$  的函数,并且呈现出正弦式的周期变化。即耦合器的输出<sup>[11]</sup>

$$T_{xy}(\lambda) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{2\pi}{\Delta\lambda} (\lambda - \lambda_0) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $\Delta\lambda$  是振荡周期,  $\frac{2\pi\lambda_0}{\Delta\lambda}$  表示初始相位参数,  $T_{xy}(\lambda)$  是如图 1 所示耦合器两端口  $x$  和  $y$  之间的传输函数。

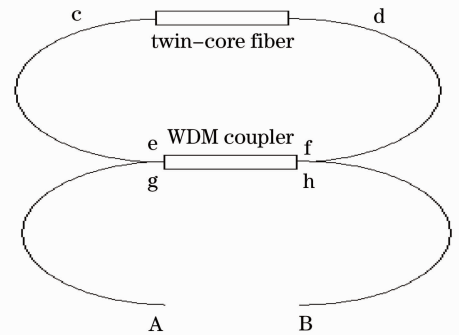


图 1 新型增益平坦滤波器结构图

Fig. 1 Structure of the novel gain flattening filter

实验所用的双芯光纤的结构参数是自行设计的,与相关单位合作,通过将两根常规的单模光纤预制棒包层部分研磨后进行拼接,然后通过拉丝制成的。当双芯光纤内的两根纤芯距离足够近时,光纤具有和耦合器相似的特性,即在各纤芯内传输的模式将发生耦合。因此,将双芯光纤如图 2 所示连接时,如果在出射端通过常规单模光纤与双芯光纤位于中心的纤芯对准,即只选取双芯光纤其中一个纤芯的输出,其出射传输函数应具有和(1)式相同的表现形式<sup>[12]</sup>。将双芯光纤和耦合器按照图 2 的方式进行连接,可以得到总的传输函数<sup>[11]</sup>为

$$T_{A-B} = T_{gh} + (1 - T_{gh})^2 \cdot T_{cd} \cdot \frac{1}{1 - T_{gh} \cdot T_{cd}}, \quad (2)$$

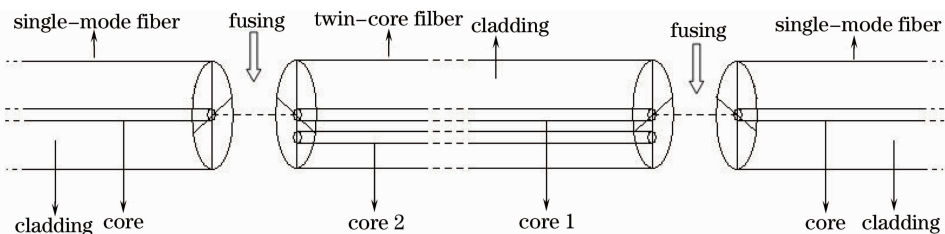


图 2 双芯光纤与普通单模光纤连接示意图

Fig. 2 Connection between the twin-core fiber and single-mode fiber

由于 980 nm 半导体激光器抽运掺铒光纤得到的 ASE 光谱与 EDFA 的静态增益曲线基本相同, 为了验证提出的增益平坦方案的有效性, 实验上通过对一个 ASE 光源输出光谱的平坦来说明采用双芯光纤进行增益平坦的可行性。另一方面, 在许多传感应用中, ASE 光源输出光谱的平坦化也具有实用性。在实验室用一只输出功率为 150 mW 的 980 nm 半导体激光器抽运一段(约 3 m)高掺铒光纤获得了 ASE 光源, 其典型的输出谱线如图 3 所示。其光谱强度在 1530 nm 处有一个峰值, 与其后平坦部分的光谱相比有大约 7 dBm 的差别。因此, 要使该 ASE 光源输出光谱平坦, 设计的增益平坦滤波器传输曲线在 1530 nm 波长附近需有大约 -7 dBm 的衰减, 而对 ASE 光源在其他波长处的输出基本不产生影响。

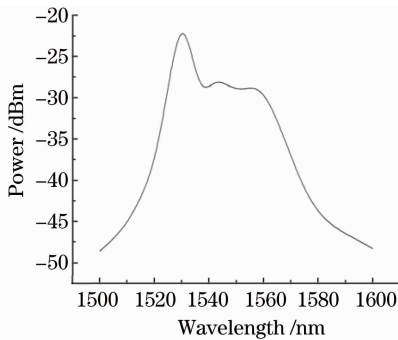


图 3 实验测得的 ASE 光源出射光谱

Fig. 3 Measured spectrum of ASE light source

首先选择一个通过熔融拉锥工艺制作的光纤波分复用耦合器, 其输出光功率与波长的变化关系可由(1)式表示, 实验获得的传输曲线如图 4 曲线 C

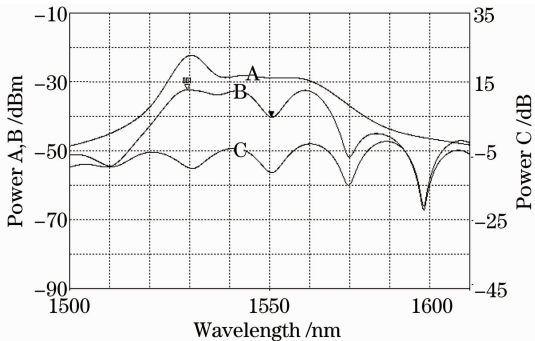


图 4 实验测量的 ASE 光源光谱(曲线 A), 光纤 WDM 耦合器输出光谱(曲线 B); 对光源光谱归一化后的光纤 WDM 耦合器传输谱(曲线 C)

Fig. 4 Spectra of fiber WDM coupler in the experiment; curve A is the spectrum of ASE; curve B is the spectrum of the ASE after fiber WDM coupler; curve C is the spectrum of the fiber WDM coupler

所示。通过工艺控制可使该耦合器传输曲线在 1530 nm 波长处为波谷, 且传输曲线的振荡周期为 20 nm。然后, 选取一段适当长度的双芯光纤与其按图 1 方式连接, 实现 ASE 光源输出谱的平坦。从图 4 可以看出, 单个光纤 WDM 耦合器在 1530 nm 波长处可以将 ASE 光源的峰值削弱, 但是在 1550 nm 波长处也引入了一个低谷, 造成新的不平坦。因此, 采用单只 WDM 耦合器不能使 ASE 光源在全波长范围平坦。

由于 ASE 光源的总输出带宽为 40 nm 左右, 在 1530 nm 附近有个峰值, 所以选用的双芯光纤需在 1530 nm 附近处于波谷位置, 并且振荡周期为 40 nm。由(1)式, 光纤 WDM 耦合器 g 至 h 端的传输函数为

$$T_{g-h} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{2\pi}{20} (\lambda - 1535) \right] \right\}, \quad (3)$$

而设计的双芯光纤传输函数需为

$$T_{c-d} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{2\pi}{40} (\lambda - 1540) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为光波长。将(3), (4)式代入(2)式整理后可以得到组合后的滤波器传输函数

$$T_{A-B} = T_{g-h} + (1 - T_{g-h})^2 \cdot T_{c-d} \cdot \frac{1}{1 - T_{g-h} \cdot T_{c-d}} = \frac{2\sin[(3\pi/20)\lambda] - 2\sin[(\pi/20)\lambda] + 4}{\sin[(\pi/20)\lambda] - 2\cos[(\pi/10)\lambda] + \sin[(3\pi/20)\lambda] + 6} \quad (5)$$

根据(3)~(5)式, 可以分别仿真光纤 WDM 耦合器、双芯光纤以及它们组合后的传输谱线, 如图 5~7 所示。可见, 只要合理选择 WDM 耦合与双芯光纤的参数, 就可以获得在 1530 nm 波长有一定下陷, 但在 1530~1570 nm 范围内平坦的滤波器传输曲线。

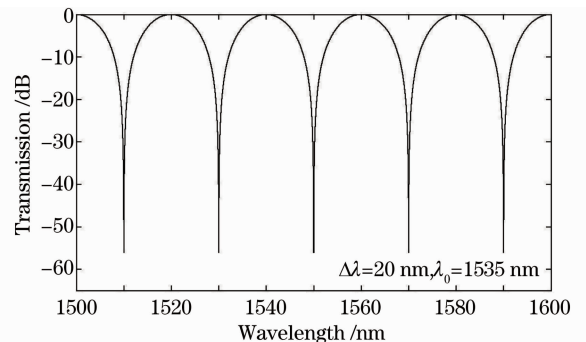


图 5 光纤 WDM 耦合器传输特性仿真图

Fig. 5 Theoretical transmission of the fiber WDM coupler

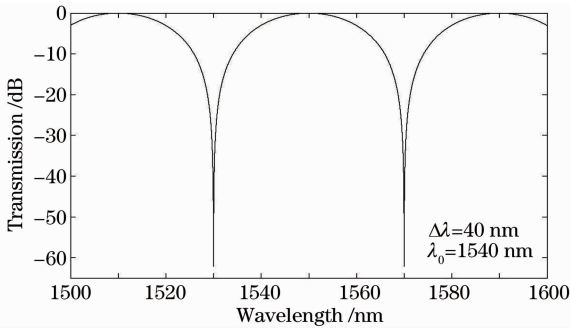


图 6 双芯光纤传输特性仿真图

Fig. 6 Theoretical transmission of the twin-core fiber

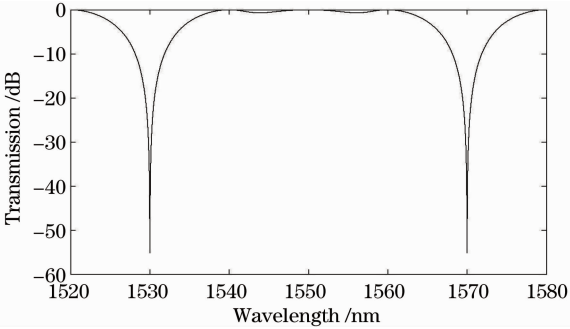


图 7 实验所设计的增益平坦滤波器  
传输特性仿真图

Fig. 7 Theoretical transmission of the gain flattening  
filter in this experiment

### 3 实验测量与分析

在满足设计需要的光纤 WDM 耦合器确定后，下一步就是要选定一段具有如图 6 所示传输谱线的双芯光纤。实验所用的双芯光纤在电镜下的横截面图如图 8 所示。设计的双芯光纤芯径均为  $10\ \mu\text{m}$ ，芯子中心距离  $16\ \mu\text{m}$ ，双芯光纤外径为  $125\ \mu\text{m}$ 。在实际制作时，由于工艺条件的限制，拉丝后测量得到的双芯光纤两芯子直径略有差别，分别为  $12.2\ \mu\text{m}$  与  $11.4\ \mu\text{m}$ ，两纤芯间距为  $14.86\ \mu\text{m}$ 。

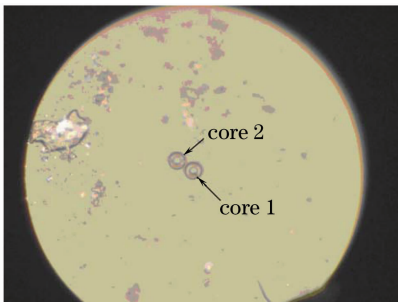


图 8 实测双芯光纤横截面实物图

Fig. 8 Cross-section of the twin-core fiber in  
the experiment

由于双芯光纤与耦合器具有相类似的特性，其出射光功率随波长的变化也可由(1)式给出。当双芯光纤的基本参数选定后，其光谱特性仅与长度有关，且光谱幅度的振荡周期与长度成反比，即长度越长，振荡周期越短，长度越短，振荡周期越长。根据双芯光纤长度与光谱特性关系，通过计算得出当双芯光纤长度为 12 cm 时，其振荡周期为 40 nm。实际测量中，双芯光纤实际长度为 10 cm 时对应的振荡周期为 46 nm，基本符合预期的双芯光纤长度与振荡周期的关系。由于双芯光纤制作工艺不够完善，内部存在一定的双折射，其输出谱线振幅随波长变化存在一定的不均匀性。实验中通过对双芯光纤扭转提高输出光谱的对比度<sup>[13]</sup>。图 9 是实验所用的 10 cm 长双芯光纤经过适当调整和扭转后得到的光谱特性。

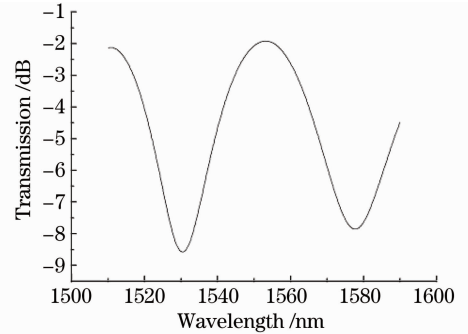
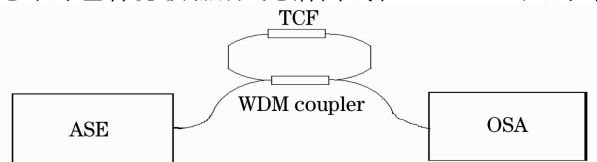


图 9 实验所用的 10 cm 长双芯光纤传输光谱

Fig. 9 Measured spectrum of the 10 cm twin-core fiber

将调谐后的双芯光纤固定，与光纤 WDM 耦合器连接后组成增益平坦滤波器，按照图 10 所示的系统框图搭建实验系统，其中 ASE 光源为实验室自制，测量所用的光谱仪 (OSA) 型号为 AQ6317B。ASE 光源通过该全光纤滤波器后得到最终的光谱特性，如图 11 所示。其中曲线 A 为 ASE 光源出射光谱，曲线 B 为光源经过滤波器后平坦化的出射光谱，曲线 C 为增益平坦滤波器的传输特性谱线。从图中可看出 ASE 光源输出经 WDM 耦合器与双芯光纤的组合滤波器后，光谱曲线在 1530 nm 处的峰



TCF: the 10 cm twin-core fiber after adjusting;  
WDM coupler: fiber WDM coupler with transmission  
curve in the trough at 1530 nm and period of 20 nm

图 10 实验测量框图

Fig. 10 Experimental setup

值基本被削平,在 1527.36~1561.04 nm 波长范围谱线的平坦度可达到 $\pm 0.5$  dB。

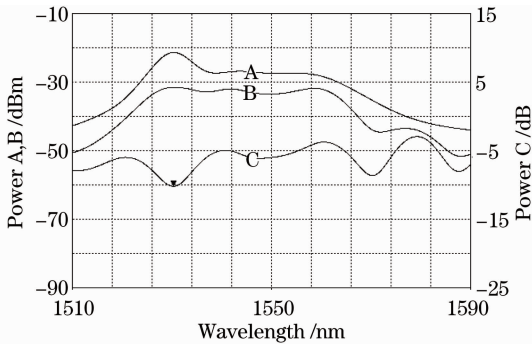


图 11 实验测得的增益平坦滤波器的传输特性和平坦化后的 ASE 光谱

Fig. 11 Spectra of ASE light source after flattening

## 4 结 论

通过理论分析和实验,证明采用双芯光纤和光纤 WDM 耦合器组合制作的平坦滤波器可以有效地抑制 ASE 光源输出谱中增益不平坦的部分,实现一种新型的全光纤增益平坦滤波器。由于双芯光纤的传输谱特性(传输峰值波长、峰值波长间隔)可以通过弯曲、扭转、拉伸以及长度等方式调节,因此,本方案与其他增益平坦滤波器的实现方法相比,具有更大的灵活性,也有可能制成动态可调的增益平坦滤波器。因此,采用双芯光纤与其他器件一同制作的滤波器,在光通信与光纤传感领域有较大的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 K. Thyagarajan, J. Kaur. A novel design of an intrinsically gain flattened erbium doped fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**(5-6): 407~413
- 2 H. S. Chung, M. S. Lee, D. Lee *et al.*. Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping [J]. *IEEE Electron. Technol. Lett.*, 1999, **35**(13): 1099~1100

- 3 Chen Guansan, Luo Cong. Optimal design of Er-doped fiber-optic amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(12): 1117~1119  
陈冠三, 罗 聪. 掺铒光纤放大器的优化设计[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(12): 1117~1119
- 4 Xie Zenghua, Chen Genxiang, Li Tangjun *et al.*. EDFA gain flattening equalizer based on long period fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 553~555  
谢增华, 陈根祥, 李唐军 等. 运用长周期光纤光栅实现 EDFA 的增益平坦化[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 553~555
- 5 P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola *et al.*. Broadband erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(10): 1343~1345
- 6 I. B. Sohn, J. G. Baek, N. K. Lee *et al.*. Gain flattened and improved EDFA using microbending long-period fiber gratings [J]. *IEEE Electron. Technol. Lett.*, 2002, **38**(22): 1324~1325
- 7 Chi Hao, Zhao Huandong, Zeng Qingji *et al.*. Erbium doped fiber amplifier using fiber Bragg gratings as gain equalizer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1248~1251  
池 灏, 赵焕东, 曾庆济 等. 光纤布喇格光栅作为增益均衡器的掺铒光纤 EDFA 放大器的增益建模和最佳设计研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1248~1251
- 8 H. J. Chen, X. L. Yang. Gain flattened erbium-doped fiber amplifier using simple equalizing film [J]. *International J. Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(12): 2107~2112
- 9 K. Inoue, T. Kominato, H. Toba. Tunable gain equalization using a Mach-Zehnder optical filter in multistage fiber amplifier [J]. *Photonics Technology Letters*, 1991, **3**(8): 718~720
- 10 Xiao Yueyu, He Sailing. Design of EDFA gain flattening filter using cascaded M-Z interferometer [J]. *J. Zhejiang University(Engineering Sci.)*, 2005, **39**(4): 487~490  
肖悦娱, 何赛灵. 级联 M-Z 型掺铒光纤放大器增益平坦滤波器的设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, **39**(4): 487~490
- 11 Do Il Chang, Dong Sung Lim, Min Yong Jeon *et al.*. A novel intra-cavity for efficient cascaded Raman generation using WDM couplers[C]. *Optical Society of America, DFC*, 2001, WDD14
- 12 G. Schiffrer. Double-core single-mode optical fiber as directional coupler[J]. *Appl. Phys.*, 1980, **23**(1): 41~45
- 13 Zou Yi. Tunable twin-core fiber and its application in fiber grating sensors and filter [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 10~31  
邹 毅. 可调谐双芯光纤及其在光纤光栅传感与滤波器中应用的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 10~31