

文章编号: 0253-2239(2010)s100310

基于 8 字型腔的自调 Q 多波长锁模光纤激光器

叶 雯 陈 滔 张 乐 刘 伟 沈永行

(浙江大学光电信息工程学系 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 报道了用 8 字型腔光纤结构实现的自调 Q 多波长锁模光纤激光器的实验研究。获得了腔长为 106.5 m、重复频率为 1.79 MHz、最短脉冲宽度为 1.6 ns 的连续锁模。自调 Q 脉冲的重复频率和抽运功率及偏振控制器的方向有关。对系统略做调整, 还可得到中心波长为 1612 nm、波长间隔为 3.3 ± 0.2 nm 的多波长激光振荡, 调节偏振控制器的方向, 可以获得单波长、双波长和三波长的激光输出。

关键词 光纤激光器; 多波长; 被动锁模; 双包层; Er/Yb 共掺

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100310

Self-Q-Switched and Multi-Wavelength Mode-Locked Fiber Laser Based on Figure-of-Eight Cavity

Ye Wen Chen Tao Zhang Le Liu Wei Shen Yonghang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A self-Q-switched and multi-wavelength mode-locked fiber laser which is based on the figure-of-eight cavity is proposed. Multi-wavelength mode-locked with the shortest pulse width of 1.6 ns and the repetition rate of 1.79 MHz are obtained when the total length of the cavity is 106.5 m. The repetition rate of the Q-switched pulse changes with the input pump power and adjustment of the polarization controllers. As we change the length of the cavity, a multi-wavelength fiber laser oscillation which operates around 1612 nm with the line space of 3.3 ± 0.2 nm is generated. Single line, dual and triple line can be obtained by adjusting the polarization controllers.

Key words fiber lasers; multi-wavelength; passively mode-locking; double-clad; Er/Yb co-doped

OCIS codes 060.4370; 140.3510; 140.3540; 140.4050

1 引 言

多波长超快脉冲技术在光学传感、光信号处理、高速光信号传输和微波光电子技术等方面有着广泛的应用。产生多波长锁模的方法有很多, 例如多通道间的四波混频^[1]、腔内置多增益介质^[2]和增益光谱整形^[3]等。目前, 多波长锁模光纤激光器引起了越来越广泛的关注。1992 年, 英国南安普顿大学的 V. J. Matsas 等^[4]首次偶然发现了双波长锁模现象。1993 年, 英国帝国理工学院 D. U. Noske 等^[5]首次用 8 字型腔结构实现了稳定的双波长锁模。

2006 年, 新加坡南洋理工大学 Gong 等^[6]通过非线性偏振旋转光纤环结构中加入两段保偏光纤实现了 1558 nm 和 1570 nm 的皮秒脉冲双波长锁模。同年, 上海交通大学激光物理和激光技术实验室张祖兴等^[7]用非线性偏振旋转光纤环结构实现单波长、双波长和三波长锁模。2009 年, 湖南大学微纳光电器件及应用教育部重点实验室杨华课题组用相同结构实现双波长锁模并且用数值模拟验证了实验结果, 同时指出波长间隔和腔的双折射和增益有关^[8]。同年, 华南师范大学光电子材料与技术研究

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-10-25

作者简介: 叶 雯(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事短脉冲光纤激光器等方面的研究。

E-mail: hollowfiber.ye@yahoo.com.cn

导师简介: 沈永行(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型光电子器件, 可调谐中红外激光器, 高稳定窄频光纤激光器和高稳定光纤光栅和特种光纤传感器等方面的研究。E-mail: physyh@zju.edu.cn

所徐文成课题组同样用非线性偏振旋转技术实现了 43.4 nm 调谐范围内的双波长和三波长锁模^[9]。

本文报道了用 8 字型腔光纤结构实现的自调 Q 多波长锁模的纳秒脉冲激光器的研究。获得了腔长为 106.5 m, 重复频率为 1.79 MHz, 最短脉冲宽度为 1.6 ns 的连续锁模脉冲。实验还发现了自调 Q 现象, 其重复频率与抽运功率和偏振控制器的方向有关。当对系统略做调整, 去掉系统中的 90 m 普通光纤时, 发现可以产生中心波长为 1612 nm 的多波长激光, 调节偏振控制器的方向, 可以得到单波长、双波长和三波长的激光振荡, 其波长间隔为 3.3 ± 0.2 nm。

2 实验装置

多波长锁模光纤激光器的实验装置如图 1 所示。系统由一非线性放大环镜(NALM)构成 8 字型腔。环镜由一段 5 m 的 Er/Yb 共掺的双包层保偏光纤、一个偏振控制器, 一段 90 m 普通光纤构成。其中, Er/Yb 共掺双包层保偏光纤用来产生增益, 并且利用其双折射效应产生多波长激光振荡, 偏振控制器用来调节光在光纤中传输时的偏振态, 90 m 普通光纤用来提供色散, 进而抑制保偏光纤的偏振模色散效应对系统产生的影响, 使系统更易实现锁模。NALM 由 3 dB 光纤耦合器与 8 字型腔的左腔链接, 左腔由一光纤隔离器和一偏振控制器以及一个 20:80 的光纤输出耦合器构成。其中, 光纤隔离器是用来阻隔反向光以防止脉冲激光对系统的损伤。系统采用 975 nm 的半导体激光器作为抽运源, 通过一个 $(2+1) \times 1$ 的多模波分复用器耦合进入 NALM。激光腔总长为 106.5 m。

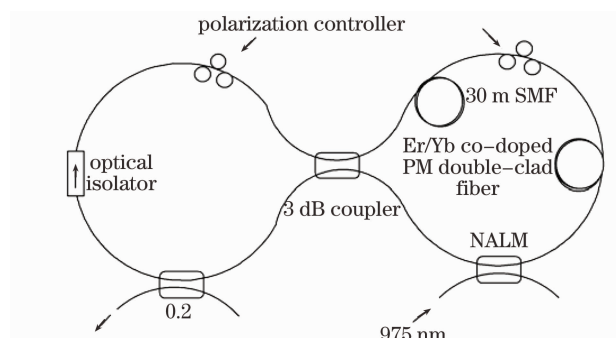


图 1 自调 Q 多波长锁模光纤激光器系统图

Fig. 1 Experimental setup of self-Q-switched and multi-wavelength mode-locked fiber laser

3 实验结果和分析

当抽运功率 $p=772$ mW 时, 能观察到稳定的调

Q 锁模激光输出, 其重复频率 f 随着抽运功率和偏振控制器方向的改变而改变。当偏振控制器固定, 在不同的抽运功率下得到了不同的重复频率, 由图 2 可见当抽运功率 p 分别为 1.324 W 和 1.463 W 时, 调 Q 锁模的重复频率 f 分别为 500 Hz 和 1250 Hz, 由此可得, 调 Q 锁模的重频是随着抽运功率的增加而增加的。其原因是, 抽运功率增加, 使得腔内的增益也相应增加, 这样就缩短了腔内储能的时间, 使得调 Q 锁模的重复频率也随之增加。实验还发现, 当抽运功率一定, 调 Q 锁模的重复频率随着偏振控制器方向的改变而改变。图 3 给出了当抽运功率为 1.324 W 时, 改变系统中偏振控制器的方向, 得到了图 3(a) 最高重复频率 $f_{\max}=1250$ Hz 和图 3(b) 最低重复频率 $f_{\min}=500$ Hz 的输出调节偏振控制即时调节腔内的损耗, 这样改变了腔内储能时间, 进而改变调 Q 锁模的重频。调 Q 锁模的脉冲宽度也是一个重要的参数, 为了研究其脉宽 Δt 的变化, 分别测得了在不同抽运功率下的单个脉冲的波型图, 图 4(a), (b) 分别给出了当抽运功率为 1.324 W 和 1.462 W 时的脉宽, 分别为 $40 \mu\text{s}$ 和 $32 \mu\text{s}$ 。实验表明, 脉冲宽度随着抽运功率的增加而减小。从理论上讲, 调 Q 脉冲的形成分为 4 个阶段: 1) $t < 0$, 为储能阶段; 2) $0 \leq t \leq t_m$ 为脉冲上升阶段(前沿), 其中 t_m 为脉冲上升的时间; 3) $t_m \leq t \leq t_f$ 为脉冲下降阶段(后沿), t_f 为脉冲熄灭的时间; 4) $t > t_f$ 为脉冲熄灭阶段。利用速率方程及其近似解可以数值计算出调 Q 脉冲的宽度 $\tau_p = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$, 其中 $\Delta\tau_1$ 为脉冲前沿时间, $\Delta\tau_2$ 为脉冲后沿时间, 当抽运功率增大时, 腔内净增益系数越大, 腔内光子数的增长及反转集居数的衰减就越迅速, 因此脉冲的建立及熄灭过程也就越短, 表现为脉宽就越窄。调 Q 锁模的产生原理可以解释如下: 系统中两个偏振控制器相当于饱和和吸收体, 当等效饱和和吸收体满足了被动调 Q 锁模的条件时, 就产生了自调 Q 现象。

继续增加抽运功率至 862 mW, 调节偏振控制器, 发现了连续锁模现象。实验测得输光光转换效率仅为 1.131%。为了研究连续锁模的光谱特性, 用光谱分析仪分别测得了抽运功率为 1.065 W 和 1.855 W 时的光谱图如图 5 所示。可见, 从 1590 nm 到 1630 nm 均有锁模, 并且是等间隔的多波长锁模。系统的锁模特性可以解释如下: 3 dB 的光纤耦合器将入射光分成强度相等的两束光, 光在 NALM 中沿相反方向传输, 能提供放大的 Er/Yb 共掺保偏的双包层光纤放在靠近耦合器的一段, 这样, 一束光

在刚进入环境的时候就被放大,而另外一束在离开环境时被放大,因此两束光在 NALM 中获得了不同的相移,非线性相移不是一个恒定的值,而是随着脉冲色散形状的改变而改变的,只要调节两个偏振控制器,使脉冲中央能量较强部分的相移接近 π ,使得这部分能量被透射,而边沿部分由于其功率较低,所得相移较小,从而被反射。综合的结果是,从 NALM 输出的脉冲要比输入的脉冲窄,因而从功能上讲,NALM 的作用与快速可饱和吸收体类似。多波长激光产生的原因是系统中的 Er/Yb 共掺双包层保偏光纤的双折射效应,其波长间隔由下式决定:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n L}, \quad (1)$$

式中 λ 是中心频率, Δn 是双折射率, L 是 Er/Yb 共掺双包层保偏光纤的长度。

用带宽为 65 GHz 的光电探测器和带宽为 12.5 GHz 的示波器测得系统的重复频率约为 1.79 MHz,其波形图如图 6 所示。为了验证连续锁模的重复频率和腔长的关系,将系统中的单模光纤 (SMF) 的长度 l_{SMF} 选取 30, 40, 50, 90 和 150 m, 并分别测得其相应的重复频率值,其结果如表 1 所示。当腔长固定,增大和减小抽运功率,发现锁模的重复频率没有改变,由此可见重复频率由腔长决定,验证了其脉冲为连续锁模输出。实验中发现,当 $l_{\text{SMF}} = 90$ m 时,系统是最稳定的。

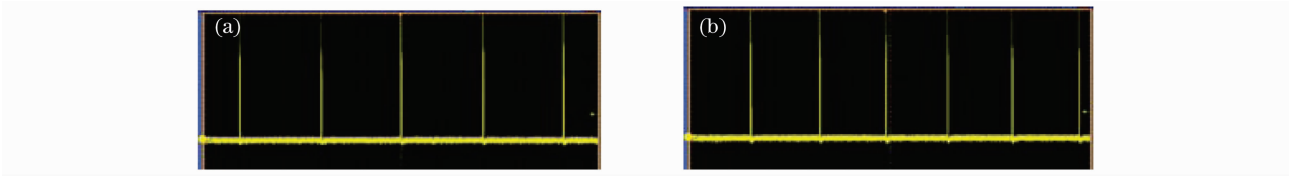


图 2 调 Q 锁模的脉冲波形图 ($x: 1$ ms/div, $y: 90$ mV/div)

Fig. 2 Pulse trains from the self-Q-switched fiber laser ($x: 1$ ms/div, $y: 90$ mV/div)

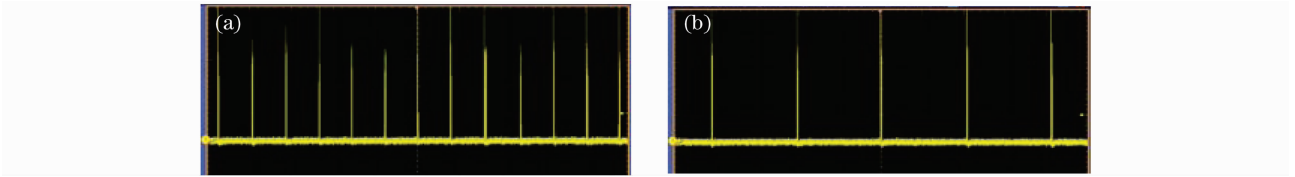


图 3 $p=1.324$ W 时调节偏振控制器得到调 Q 锁模不同的脉冲波形图

Fig. 3 Different trains of pulse from the Q-switched fiber laser when the polarization controllers are adjusted and $p=1.324$ W

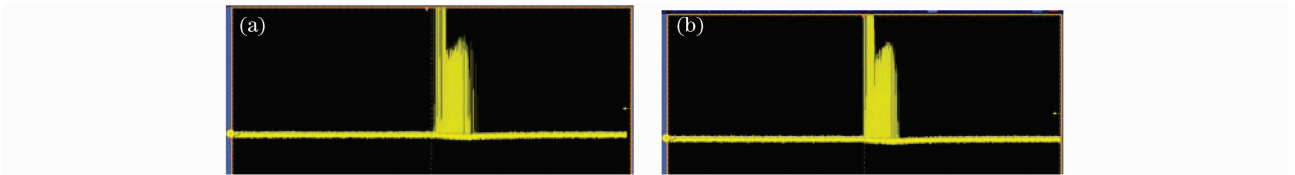


图 4 调 Q 锁模的单脉冲波形图

Fig. 4 Single pulse waveform from the Q-switched mode-locked fiber laser

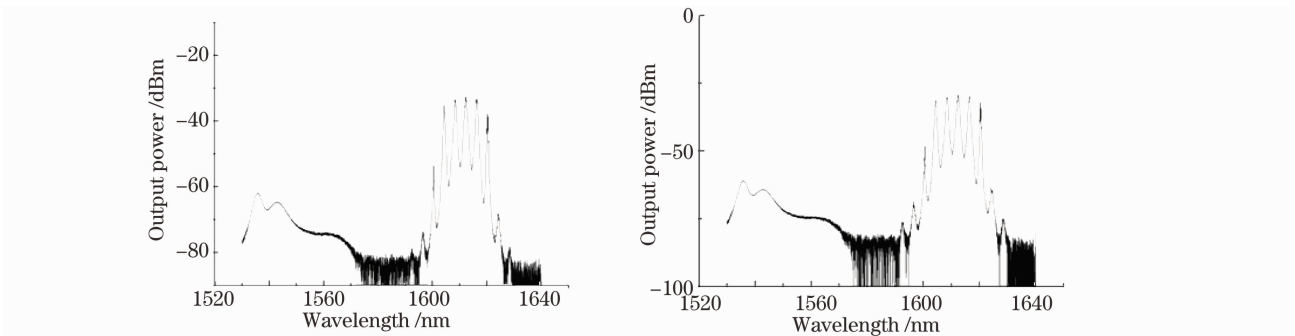


图 5 连续锁模的光谱图

Fig. 5 Spectrum of the continuous mode locked pulse

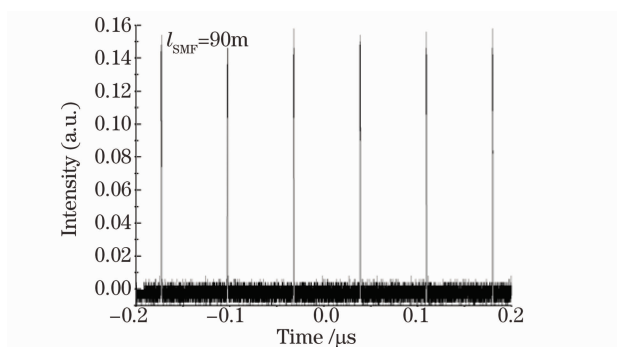


图 6 连续锁模的脉冲波型图

Fig. 6 Pulse trains pulse from the continuous mode locking

由于系统中保偏光纤的存在,使得环境中两个方向的光相位差很难稳定,因此脉冲宽度会很宽,又由于光纤腔长较长,使得光纤中光的非线性效应和色散都比较强,很容易引起光谱展宽现象。为了研究连续锁模的脉冲宽度,在抽运功率为1.324 W

时,分别测得了环境中 SMF 的长度为 30, 40 和 90 m 时的单脉冲波型图,脉冲宽度分别为 1.6, 2 和 6 ns, 如图 7 所示。发现在相同的抽运功率下,腔长越长,脉冲宽度越宽。这和光的非线性效应及色散有关,相同抽运功率下,腔长越长,其非线性效应和色散现象越明显,脉冲宽度就越宽。

表 1 腔长和重频的关系

Table 1 the relation between the length of the cavity and the repetition rate of the laser

Length of the SMF in NALM /m	Total cavity length /m	Repetition rate /MHz
30	46.5	3.85
40	56.5	3.125
50	65.5	2.78
90	105.5	1.79
150	165.5	1.25

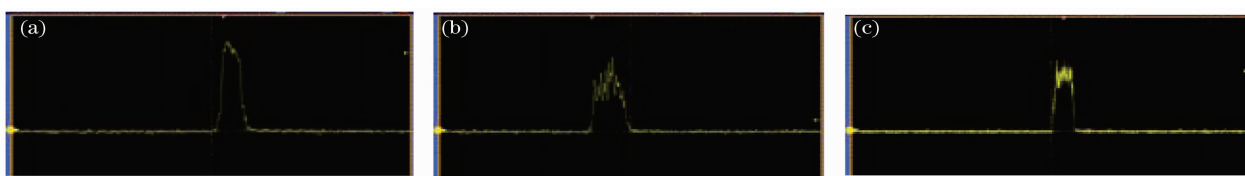


图 7 $p=1.324$ W 时连续锁模的单脉冲波型图

Fig. 7 Single pulse of the continuous mode locking when $p=1.324$ W

继续测得在同样腔长的情况下,脉宽和抽运功率的关系。图 8 是当系统中 SMF 为 90 m 时,即总腔长为 106.5 m 时,抽运功率分别为 1.324, 1.463 和 1.855 W 时的单脉冲波型图,其脉冲宽度分别为

5.8, 6.4 和 8 ns。发现脉冲宽度随着抽运功率的增加而变宽,这是因为抽运功率越大,其非线性效应和色散现象就越明显,使得脉冲宽度变宽。

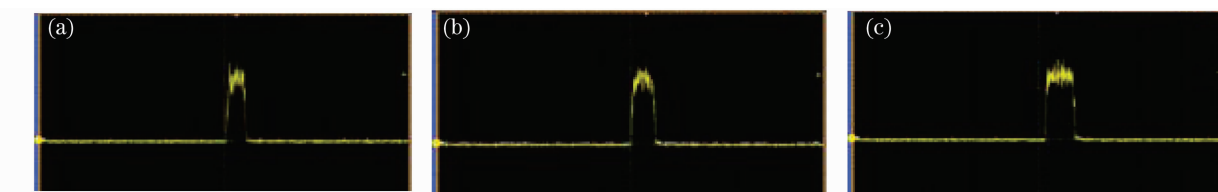


图 8 $l_{SMF}=90$ m 时不同抽运功率下的单脉冲波型图

Fig. 8 Single pulse of continuous mode locking at different pump powers when $l_{SMF}=90$ m

连续锁模的稳定性好,只要系统不受扰动,温度变化不大,一旦偏振控制器将系统调到稳定状态,可以一直保持直至将抽运源关闭。

实验还发现,将系统中的 90 m 普通光纤去掉之后,可以得到单波长、双波长和三波长的激光输出,中心频率为 1612 nm,波长间隔为 3.3 ± 0.2 nm,其产生原理也是基于 Er/Yb 共掺双包层保偏光纤的双折射效应,其波长间隔由(1)式决定。图 9 为单波长、双波长和三波长的光谱图^[10]。

4 结 论

对基于 8 字型光纤结构的自调 Q 多波长锁模光纤激光器进行了实验研究,系统可以工作在调 Q 锁模和连续锁模两个工作状态,调 Q 锁模的重复频率和抽运功率有关,随着抽运功率的增加而增加,此外还和偏振控制器的方向有关。当腔长为 106.5 m 时,多波长连续锁模的重复频率为 1.79 MHz,其最短脉冲宽度约为 1.6 ns。实验还发现,去掉系统中 90 m 普通光纤,可以得到可调谐多波长的激光输出,

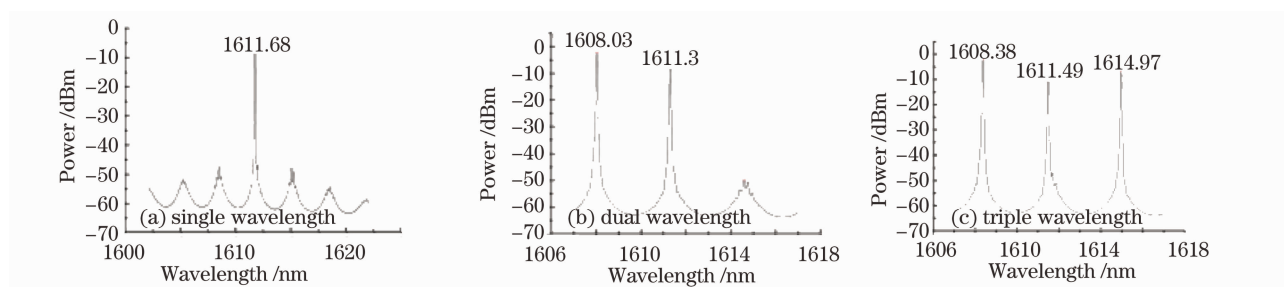


图 9 多波长激光振荡的光谱图

Fig. 9 Spectrum of the multi-wavelength laser oscillation

其中心波长为 1612 nm, 波长间隔为 3.3 ± 0.2 nm。

参 考 文 献

- 1 Y. D. Gong, M. Tang, J. Wu *et al.*. Dual-wavelength 10 GHz actively mode-locked erbium fiber laser incorporating highly nonlinear fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2547~2549
- 2 D. Pudo, L. R. Chen. Actively modelocked, quadruple-wavelength fiber laser with pump-controlled wavelength switching [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(3): 272~274
- 3 J. W. Lou, T. E. Carruthers, M. Currie. 4×10 GHz mode-locked multiple-wavelength fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 51~53
- 4 V. J. Matsaa, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Selfstarting passively mode-locked fiber ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 5 D. U. Noske, M. J. Guy, K. Rottwitt *et al.*. Dual-wavelength operation of a passively mode-locked "figure-of-eight" ytterbium-erbium fibre soliton laser [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **108**(4~6): 297~301
- 6 Y. D. Gong, X. L. Tian, M. Tang *et al.*. Generation of dual wavelength ultrashort pulse outputs from a passive mode locked fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **265**(2): 628~631
- 7 Zuxing Zhang, Li Zhan, Shouyu Luo *et al.*. Observation of two-color pulses in a passively mode-locking erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(10): 104202
- 8 Huiwen Xu, Hua Yang, Yong Chen *et al.*. Intrinsic dual-wavelength operation of a passively mode-locked fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(14): 2934~2938
- 9 Chuangxing Song, Wencheng Xu, Zhichao Luo *et al.*. Switchable and tunable dual-wavelength ultrashort pulse generation in a passively mode-locked erbium-doped fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(22): 4408~4412
- 10 W. Ye, W. Liu, T. Chen *et al.*. Erbium-ytterbium co-doped multi-wavelength double-clad fiber laser around 1612nm [J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(7): 1636~1640