

基于级联多模布拉格光栅和高精细度滤波器的可调谐双波长窄线宽掺铒光纤激光器的

潘洪刚¹, 童峥嵘², 张爱玲², 宋殿友¹, 薛玉明¹

- (1. 天津理工大学 电子信息工程学院 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384;
2. 天津理工大学 计算机与通信工程学院 智能计算及软件新技术重点实验室 薄膜电子与通信器件
重点实验室, 天津 300384)

摘要: 提出了一个基于级联多模布拉格光栅和新型的高精细度滤波器的可调谐双波长窄线宽掺铒光纤激光器的结构。环形滤波器由两个耦合器和一段经过泵浦的掺铒光纤组成, 由于掺铒光纤产生增益, 滤波器产生高精细度的频率响应, 能够滤掉掺铒光纤激光器的不需要的纵模, 从而起到窄化激光器线宽的作用。实验过程中, 由多模光栅的选频特性产生六种窄线宽双波长的组合, 激光器的线宽由不加滤波器的 0.14~0.16 nm 被压窄到 0.05 nm。

关键词: 多模布拉格光栅; 高精细度滤波器; 双波长; 掺铒光纤激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-3912-06

Switchable narrow line-width dual-wavelength erbium-doped fiber laser using cascaded multi-mode Bragg gratings and high finesse filter

Pan Honggang¹, Tong Zhengrong², Zhang Ailing², Song Dianyou¹, Xue Yuming¹

- (1. Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2. Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices and Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A switchable narrow line-width dual-wavelength erbium-doped fiber laser using cascaded multi-mode Bragg gratings incorporating a novel high-finesse ring filter was proposed and demonstrated. The ring filter was a ring filter composed of two optical couplers and a section erbium-doped fiber. Thanks to the gain generated by the erbium-doped fiber, the ring filter has a high finesse spectral. The incorporation of the ring filter led to the suppression of undesirable modes in the dual-wavelength erbium-doped fiber laser (EDFL). An experiment was carried out, in which six kinds of narrow line-width dual-wavelengths combination were generated. And 3 dB linewidth of each wavelength of 0.14 nm to 0.16 nm without the filter was narrowed to 0.05 nm with the high finesse filter.

Key words: multi-mode Bragg gratings; high finesse filter; dual-wavelength; erbium-doped fiber laser

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-05-11

基金项目: 天津理工大学育苗基金(LGYM201107)

作者简介: 潘洪刚(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: phg022@163.com

通讯作者: 童峥嵘(1971-), 女, 教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: tjtongzhenrong@163.com

0 引言

窄线宽双波长光纤激光器的应用非常广泛,诸如光微波、光通信等^[1-2]。但是,光纤激光器中产生稳定低双波长振荡,需要注意两个问题,第一、包括掺铒光纤在内的掺稀土光纤,是均匀展宽介质,模式竞争会多波长难以同时稳定振荡,解决这个办法可以有单一的增益介质变成多种介质相混合,应用掺铒光纤和半导体光放大器相结合^[3],也可以在激光腔内加入未泵浦的掺铒光纤,应用掺铒光纤作为可饱和吸收抑制不需要的模式,从而起到滤波器的作用^[4];第二、激光器结构中需要额外滤波器对纵模进行抑制,比如在参考文献[5]加入一个萨哥纳克光纤环境,起到了很好的抑制纵模的作用,同样地道理,参考文献[6]中由光纤布拉格光栅构成的法布里-珀罗滤波器,也是为了滤掉多余的模式;这些结构的应用,起到了限定振荡模式的租用,但是从实验结果看获得稳定的双波长振荡,仍然是十分困难地一件事。参考文献[7]中提出了一个单纵模环形激光器的结构,采用一段带泵浦的掺铒光纤,进行增益滤波,实现双波长的单纵模激光振荡,并能产生 10~50 GHz 的微波,但其缺点是结构过于复杂,并且调试困难。参考文献[8]中采用保偏布拉格光栅选频,实现激光的双波长振荡,并在此基础上加上高精细度的掺铒光纤滤波器,得到了室温下单峰最大输出功率 5.27 mW 和 1.02 mW,波长间隔为 0.16~0.32 nm 可调谐双波长窄线宽连续激光输出,但其波长虽然可调谐,但是谐振波长过于依赖于偏振,具有不稳定特点,工作中^[9]采用多模布拉格光栅作为选频率元件实现了双波长振荡,并利用泵浦的掺铒光纤作为滤波器,实现了窄线宽的双波长的激光振荡,但不能实现输出波长的可调谐;为了达到波长可调谐的目的,需要在谐振腔中加入其他的选频器件并实现波长调谐机制。

文中提出了一种基于掺铒光纤环形滤波器和级联多模光纤光栅的双波长激光器,该结构完全由光纤组成,结构简单、造价低,用多模光纤布拉格光栅作为谐振腔的选频元件,在室温下可以稳定输出六种窄线宽双波长激光组合,实验中引入了环线掺铒光纤滤波器,使得双波长输出的线宽得到了窄化。

1 实验结构和原理

图 1(a)为未加滤波器的双波长激光器结构图,实验中 980 nm 的 LD 通过 WDM 泵浦长为 8 m 的掺铒光纤,级联多模光纤布拉格光栅(MM-FBG)作为选频元件,通过一个光环形器(Circulator)连接到激光器中,其透射谱分别如图 2(a)、(b)所示,对应的中心波长、透射率和 3 dB 带宽如表 1 所示,级联多模光栅会产生谐振波长,光环形器同时确保激光器中的光单向运转,通过调整偏振控制 PC,四个谐振波长中,选出两种波长(共有六种双波长组合)的光被反射在环中持续振荡,由于滤波器的滤波作用,线宽不断变窄;调整 PC 状态,光纤布拉格光栅的反射能量会发生变化,反射能量较大的波长会被选出来形成稳定振荡。特别是,由于光纤光栅强的偏振敏感特性,当两个波长所对应的反射能量近似相等时,多模光纤布拉格光栅的两个不同偏振方向的反射模在波长上会产生分离,能够利用偏振梳孔效应克服掺杂光纤均匀增益展宽引起的模式竞争,从而实现常温下双波长的输出,偏振分束(PBS)的另一端将光信号引

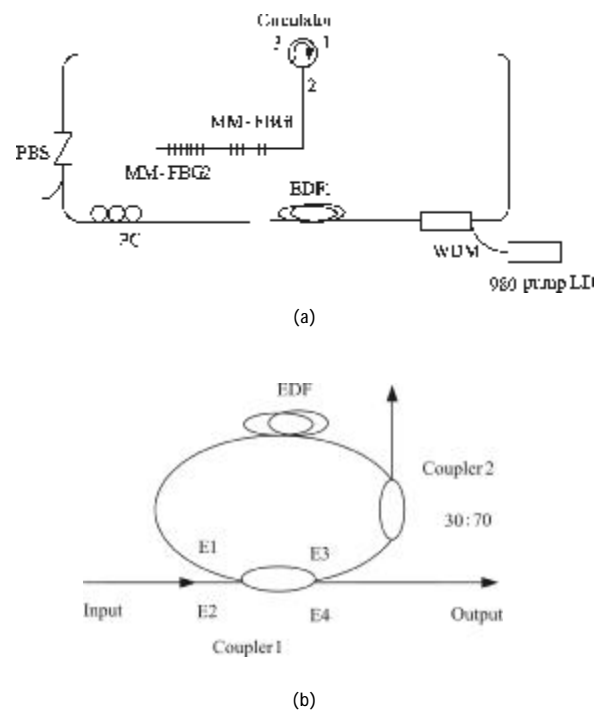


图 1 波长可调谐双波长激光器原理图(a)和高精细度环形滤波器原理图(b)

Fig.1 Schematic of wavelength switchable dual-wavelength laser (a) and the high finesse ring filter (b)

出,用光谱仪 (Anritus MS9710C, resolution:0.05 nm) 进行测量,整个激光器的腔长是 15 m,对应的腔基频是 13.61 MHz。

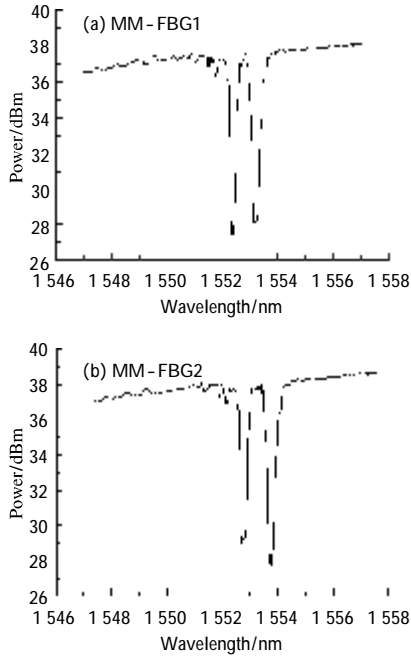


图 2 多模光栅透射谱
Fig.2 Transmission spectrum of MM-FBGs

表 1 多模布拉格光栅的透射谱数据

Tab.1 Information of transmission spectrum of MM-FBGs

	Rength /nm		3 dB Bandwidth /nm		Transmissivity /dB	
MM-FBG1	1552.5	1553.3	0.19	0.2	19	18
MM-FBG2	1552.9	1553.8	0.21	0.2	17	18

抑制边模的产生,降低输出激光的线宽,是实现激光器窄线宽振荡的关键环节,因此在图 1(a)结构的基础上引入了一个环形光纤滤波器(图 2(b)),耦合器的分光比,随波长的不同而不同,在 1550 nm 波长处的分光比为 1:1,在 980 nm 波长处的分光比却为 1:9,此时有 10%的泵浦功率注入环中,为环形滤波器提供增益。

环形滤波器的能量传输公式如下表示。输入的光波场由 E_1 和 E_2 表示,输入光注入的光耦合器 (Coupler 1),两个输出端口的光可以表示为:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-r} & i\sqrt{r} \\ i\sqrt{r} & \sqrt{1-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: r 为滤波器纵耦合器的耦合因子,这里 $r=0.5$ 。环形滤波器中的光波场 E_4 为:

$$E_4 = i\sqrt{r} E_1 + \sqrt{1-r} E_2 \quad (2)$$

激光由图 1(b)中 E_1 端口进入所采用的环形滤波器,由于受到了泵浦源的泵浦作用,光经过 EDF1 后,得到一个弱的增益 g ,同时光经过光纤会产生一个延时 τ ,然后由 E_2 端口送入耦合器由 E_4 端口经过耦合器 (Coupler2) 输出到激光器中。用公式表示为:

$$E_2 = g e^{i\omega\tau} E_4 \quad (3)$$

式中: ω 是光波场的角频率。经过进一步的推导运算^[9],可以得到滤波器 output1 的传输函数的传输函数 T :

$$T = \frac{|E_4|^2}{|E_1|^2} = \frac{r}{1+g^2(1-r)-2g\sqrt{1-r}\cos\omega\tau} \quad (4)$$

所采用结构中,环形滤波器单模光纤和掺铒光纤共长 1 m。调谐滤波器的腔长可改变其自由频谱范围,自由频谱范围与滤波器的时延的关系为:

$$FSR = \frac{1}{\tau} \quad (5)$$

根据已选择的参数,可以仿真得到环形滤波器的传输函数谱形,如图 3 所示。

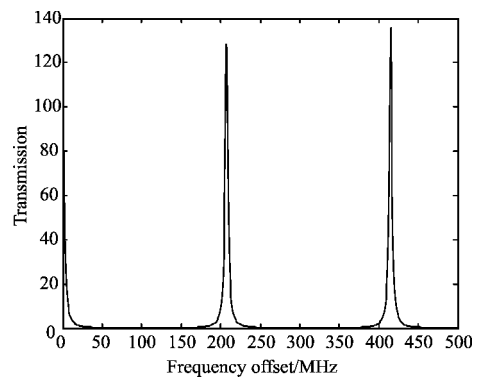


图 3 环形光纤滤波器的传输函数频谱
Fig.3 Transmission of the high fineness ring filter

精细度指相邻两个通带之间的间隔与 1 个通带频谱宽度之比,可表示为:

$$N = \frac{FSR}{\Delta f} \quad (6)$$

通过计算可知滤波器的精细度与铒纤增益以及耦合器的耦合比有关,由参考文献[9]可计算出滤波器的 3dB 带宽为:

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau} \arccos\left[\frac{4g\sqrt{1-r}-1-g^2(1-r)}{2g\sqrt{1-r}}\right] \quad (7)$$

式中: τ 为光通过滤波器的时延; g 指的滤波器中增益的大小,仿真时取为 1.2; r 为 0.5。调谐滤波器的腔长,时延相应发生变化,滤波器的 3 dB 带宽也会发生变化。实验中滤波器腔长 1 m,计算得时延 $\tau=0.048$ ps,FSR=207.47 MHz,由此计算得滤波器 3 dB 带宽为 10.871 6 MHz。图 4 包含了三个变量之间的关系,分别为滤波器的精细度、耦合器的耦合比、铒纤增益的大小。当耦合器的耦合比一定时,随着铒纤有效增益 g 的增加,滤波器的精细度将会增加。当铒纤增益 g 大小不变时,当耦合比从 0.6 减小到 0.4,滤波器精细度的曲线整体向上移动。

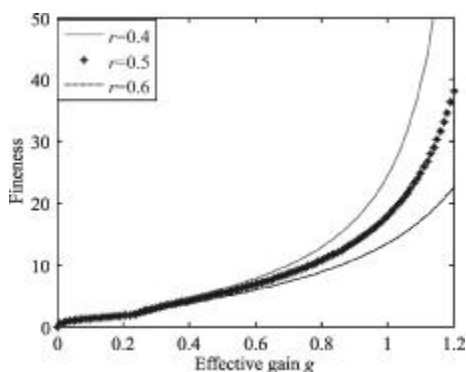


图 4 环形滤波器的精细度和有效增益 g 关系曲线
Fig.4 Fineness vs effective gain in the ring filter

图 5 为基于级联多模光纤光栅和高精细度滤波器的可调谐双波长窄线宽掺铒光纤激光器,实验中 980 nm 的 LD 通过 WDM 和耦合器(Coupler 1)同时泵浦两端掺铒光纤 EDF1 和 EDF2。长为 8 m 的掺铒光纤(EDF1)作为增益介质,2×2 的 3 dB 耦合器(Coupler 1)经过 WDM 将光信号引出,用光谱仪测量。一段 0.8 m 长的 EDF(EDF2)和 Coupler 1 以及一个 30:70 的 1×2 耦合器(Coupler 2)连接成环(环长约

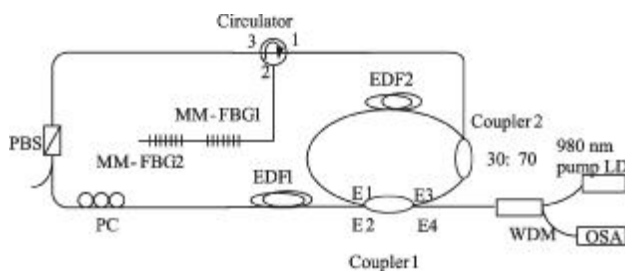


图 5 基于高精细度环形滤波器的可调谐双波长掺铒光纤环形激光器原理图
Fig.5 Narrow line-width switchable dual-wavelength EDF ring laser with the high fineness ring filter

1 m)构成滤波器,对谐振波长进行滤波,滤波后 70% 的光进入激光器谐振腔。环形滤波器的基本原理是进入滤波器的光经过耦合器和 EDF 后产生了延时和增益^[6]。滤波器的频率响应是无限冲激响应,具有梳状谱特点,激光器的环线腔同样具有梳状谱,根据维纳效应,它可以有效地限制两个传输峰中不需要的模式,进而压窄激光器的线宽。

2 实验结果及分析

当 980 nm 泵浦源的功率调整到 150 mW 时,在不加滤波器之前,通过调整 PC,开始出现激光。当改变 PC 的偏振态时,腔内光的偏振态和级联多模光栅反射率将发生变化,PC 为不同的波长提供不同的偏振态,偏振态不同就会选出不同的波长。通过调整 PC,不同波长在腔内的损耗将会发生变化,当级联多模光栅的某一个或两个谐振波长有较高的反射率或者较低的腔损耗的时候,将会发生稳定地振荡,尤其当两个波长有相同反射率的时候,双波长振荡就会产生。这样,通过调整 PC,激光器就会产生双波长的状态。在实验过程中,弯曲或者挤压光纤会导致激光器输出特性的变化,这是因为偏振态发生了变化,当没有外界振动影响的时候输出激光是很稳定的,一共可以获得六种双波长组合,图 6 所示是在没加高精细度滤波器之前,1 552.9 nm、1 553.3 nm 两个波长振荡时的光谱,3 dB 带宽分别为 0.15 nm 和 0.16 nm。当加上高精细度滤波器之后,980 nm 泵浦源的功率需要调整到 170 mW,才可以出现激光,图 7(a)~(f)是加上高精细度滤波器后对应的的光谱,发现光谱变得平滑了,3 dB 带宽由原来的 0.15 nm 和 0.16 nm 压窄到了 0.05 nm,也就

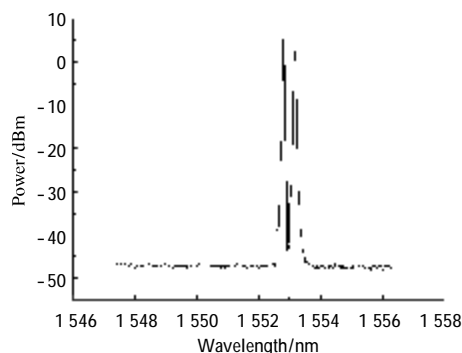


图 6 不加滤波器之前输出双波长的光谱
Fig.6 Output of laser of optical spectrometer without the filter

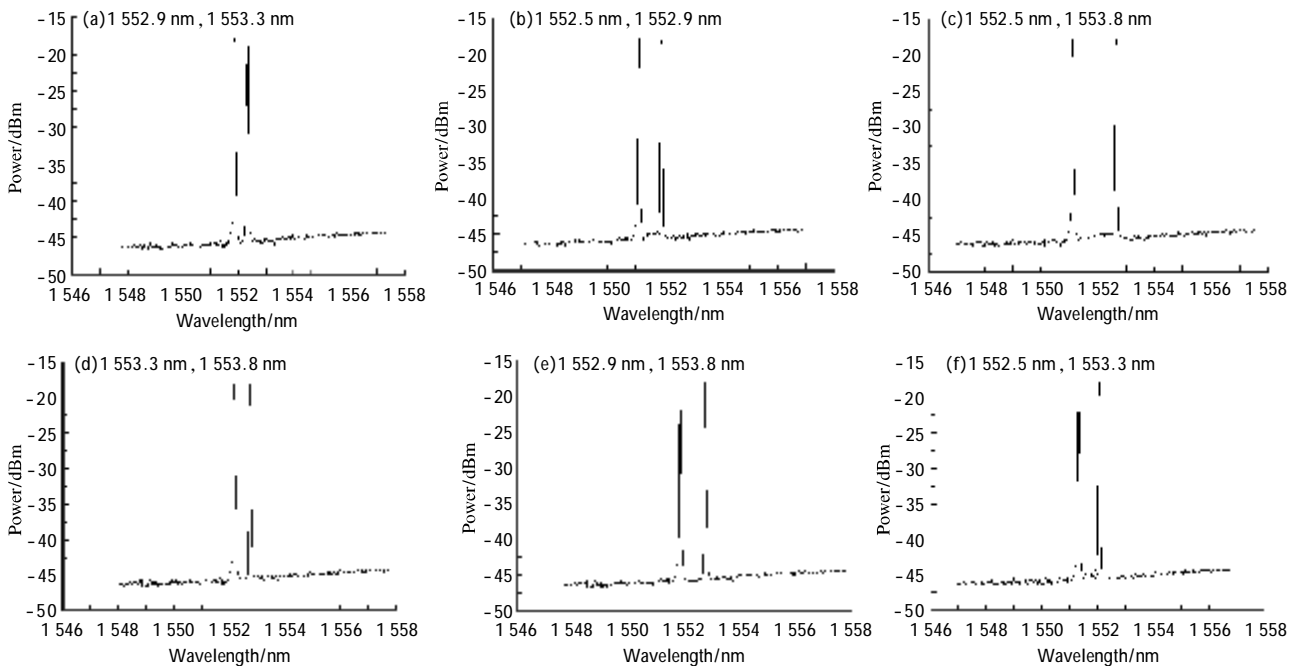


图 7 加滤波器之后激光器的输出光谱

Fig.7 Output of laser of optical spectrometer with the filter

是到达了光谱仪的分辨率极限,如果有更高分辨率的光谱仪,会监测到更好的结果,两个波长的功率由 5 dBm 和 3 dBm 降低到了 -17 dBm,这是由于高精密度滤波器的加入,使腔内的损耗变大了。图 8 选取了波长比较接近的双波长组合,加滤波器后两小时内光谱的变化,每个波长功率变化小于 0.2 dB,因此用这种方法得到的双波长激光器还是比较稳定的,可以克服掺铒光纤均匀展宽特性带了的不稳定性因素。

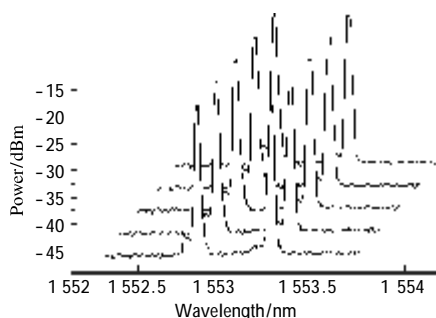


图 8 加滤波器后两小时内光谱的变化

Fig.8 Output of the laser within two hours

3 结 论

研究了一种窄线宽双波长激光器,该结构用级联的多模光纤布拉格光栅作为谐振腔的选频元件,

通过调整偏振控制器,在室温下可以稳定输出六种窄线宽双波长激光组合,实验中引入的一种用于限制振荡模式的光纤环形滤波器,使得输出激光的线宽由不加滤波器的 0.14~0.16 nm 被窄化到 0.05 nm,该激光器可应用于光纤通信、光微波、光纤传感等领域。

参考文献:

- [1] Peng P C, Tseng H Y, Chi S. A tunable dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser using a self-seeded fabrycrot laser diode[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 5(5): 661-663.
- [2] Yao Y, Chen X, Xie S. Dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a simple linear cavity and its application in microwave generation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 8(1): 187-189.
- [3] Pan S L, Zhao X F, Lou C Y. Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier [J]. Opt Lett, 2008, 33(8): 764-766.
- [4] Ryu H Y, Lee W K, Moon H S, et al. Stable single-frequency fiber ring laser for 25-GHz ITU-T utilizing saturable absorber filter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005,

- 7(9): 1824-1826.
- [5] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinalmode erbium-doped fiber ring laser[J]. Opt Express, 2008, 6(18): 14173-14179.
- [6] Fang Xiuli, Tong Zhengrong, Cao Ye, et al. Narrow linewidth ring cavity fiberlaser using F-P fiber ring filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 329-333.(in Chinese)
方秀丽, 童峥嵘, 曹晔, 等. 采用 F-P 光纤环滤波器的窄线宽环形腔光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 329-333.
- [7] Pan S L, Yao J P. A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation[J]. Opt Express, 2009, 7(7): 5414-5419.
- [8] Yang Xiufeng, Wei Fangfang, Tong Zhengrong, et al. Dual-wavelength fiber laser based on a high fineness fiber ring filter[J]. Chinese Journal of Laser, 2011, 38(4): 04020001-1-5. (in Chinese)
杨秀峰, 魏芳芳, 童峥嵘, 等. 基于高精度光纤滤波器的双波长光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 04020001-1-5.
- [9] Pan Honggang, Yang Xiufeng, Tong Zhengrong, et al. Dual wavelength fiber laser based on er-doped fiber ring filter and multimode FBG [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2317-2321. (in Chinese)
潘洪刚, 杨秀峰, 童峥嵘, 等. 基于掺铒光纤环形滤波器和多模光纤光栅的双波长激光器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2317-2321.