

文章编号: 0253-2239(2010)08-2219-05

基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统

乔学光^{1,2} 丁 锋^{1*} 贾振安¹ 宋 娟¹

(¹ 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065; ² 西北大学, 陕西 西安 710069)

摘要 利用光纤超荧光光源在 1530 nm 附近具有较好的线性边带做边沿滤波器进行滤波解调, 并对边沿滤波和光源的工作原理进行了深入分析。由于光源波长检测灵敏度对系统解调灵敏度起决定作用, 所以系统光源采用了双程后向结构, 在线性边带的下降沿 2.5 nm 范围内功率随波长变化的灵敏度为 $-14.7 \mu\text{W}/\text{nm}$, 线性拟合度达到了 0.9995。系统采用全光结构, 提高了解调速度。通过对地震检波的模拟测量, 解调检测波长灵敏度可达 $-1.27 \text{ pm}/\text{mV}$, 应变分辨力为 $1.06 \mu\epsilon$ 。实验表明, 该解调系统具有操作简单、灵敏度高、稳定性好、性价比高且反应速度快, 可以实现对地震信号的实时检测。

关键词 光纤光学; 地震检波解调; 边沿滤波; 光纤光源

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2219

High Precision Optical Fiber Bragg Grating Demodulation System Based on the Source Filtering for Seismic Detection

Qiao Xueguang^{1,2} Ding Feng¹ Jia Zhen'an¹ Song Juan¹

¹ Key Laboratory of Photoelectricity Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China
² Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract The filtering demodulation is realized by using the good linear sideband near 1530 nm of the super-fluorescent fiber source. The light source of system adopts double-pass backward configuration, because the detecting sensitivity of light source decides the whole system's sensitivity. When the linear sideband is 2.5 nm, the sensitivity of power is $-14.7 \mu\text{W}/\text{nm}$, and the degree of fitting is 0.9995. The system uses all-optical structure to improve the demodulation speed. By the way of computer simulation, its detection sensitivity for the wavelength and strain separately are $-1.27 \text{ pm}/\text{mV}$ and $1.06 \mu\epsilon$. The results show that this demodulation system has high sensitivity, good stability, quick demodulation speed, and it can realize real-time detection of seismic wave.

Key words fiber optics; seismometer demodulation; edge filtering; fiber light source

1 引 言

光纤 Bragg 光栅 (FBG) 以其具有良好的可靠性、抗电磁干扰、抗腐蚀以及能在复杂的化学环境下工作等优势, 在传感领域的应用越来越引起人们的重视^[1]。光纤光栅地震检波器在地震勘探中也得以应用, 然而如何将调制了地震波信息的信号进行解

调依然是光纤传感器在地震勘探中有效使用的技术关键。目前已有的解调方法有: 匹配光栅法^[2]、可调法布里-珀罗 (F-P) 滤波法^[3]、可调谐窄带光源法^[4]和非平衡马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉仪检测法^[5]等。对地震波信号测量要同时满足高分辨率、快速动态测量且成本不高的实用化波长检测方案依然是目前

收稿日期: 2009-09-09; 收到修改稿日期: 2009-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (60727004, 60654001)、国家 863 计划 (2007AA03Z413, 2006AA06Z210)、教育部科技创新工程重大项目 (Z08119) 和中石油创新基金 (2008D-5006-03-08) 资助课题。

作者简介: 乔学光 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探、油气管线检测等方面的研究。E-mail: xgqiao@xsyu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: dingfeng_ty@163.com

面临的主要难题。

边沿滤波器法适用于动态和静态检测。该方法的优点是系统响应速度快,成本低,操作简单,而且后续的电路处理非常简单,这样可以有效地抑制噪声。目前有许多光学器件具有线性边沿滤波特性,如波分耦合器^[6]、长周期光栅^[7]、高双折射光纤环形镜^[8]和 Bragg 光纤光栅^[9]等。本文利用光源做边沿滤波器件进行地震波信号的解调。虽然本解调方法已有报道,但对本方案的主要器件光源的斜边仅限于利用原有的平坦光源,而加以改进的却没有。本文对光源进行了深入分析并设计了专门应用于本解调的光源,其波长检测灵敏度比现有的用于此种解调方法的光源的灵敏度都高,从而保证了系统具有高的灵敏度。用等强度梁结构的光纤布拉格光栅地震检波器对地震信号进行模拟检测,用边沿滤波法进行解调,建立了用于地震勘探的地震检波解调系统。

2 边沿滤波的工作原理

图 1 为基于边沿滤波器的线性解调原理示意图,图中的斜线是边沿滤波器的传递函数曲线。光功率的变化量与波长的漂移量成线性关系,即

$$P(\lambda) = k\lambda + B. \quad (1)$$

式中 k, B 为边沿滤波器的斜率和截距,都可通过实验测定,且为常数。反射率为 R_0 的 Bragg 光栅反射光谱可近似为高斯分布^[10,11]:

$$R(\lambda, \lambda_B) = R_0 \exp[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_B)^2 / \Delta\lambda_B^2]. \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 中心波长 λ_B 的半峰全宽。被 FBG 反射的光强为滤波函数与反射谱的卷积,即

$$I(\lambda_B) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_0 (k\lambda + B) \exp[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_B)^2 / \Delta\lambda_B^2] d\lambda. \quad (3)$$

因 $R(\lambda, \lambda_B)$ 的光谱线宽远小于该线性波长范围,由

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\pi/a}, \text{ 有}$$

$$I(\lambda_B) = BR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} + kR_0\lambda_B \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}}. \quad (4)$$

由(4)式可知,反射的光强 $I(\lambda_B)$ 与 FBG 的中心波长 λ_B 成线性关系。因此,通过测量反射光强 $I(\lambda_B)$ 即可求得 FBG 的中心波长 λ_B 的值。

当 FBG 受到应变或温度影响,即布拉格波长由 λ_1 变到 λ_2 时,中心波长变化量 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 与反射光强变化量 ΔI 之间的关系可表示为

$$\Delta I(\Delta\lambda) = kR_0 \sqrt{\frac{\pi\Delta\lambda_B^2}{4\ln 2}} \Delta\lambda. \quad (5)$$

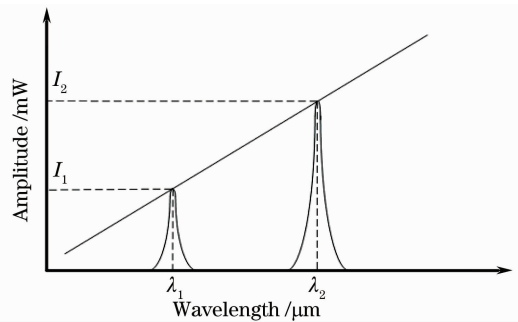


图 1 边沿滤波器的线性解调原理

Fig. 1 Principle of linear demodulation based on edge filter

3 实验结果及分析

掺铒光纤(EDF)光源主要由光抽运功率、掺铒光纤长度和工作方式决定。掺铒光纤越长,输出功率的谱线在长波方向将抬起,在短波方向将有所降低,从而实现宽带平坦的光源;掺铒光纤越短,在长波方向也就有所降低,但在 1530 nm 附近的峰值会更凸起,这样在两边形成的线性边带更陡,光强随波长变化的灵敏度也就更高,也就是本解调方法所希望的。

为获得高的输出光功率和稳定性^[13],解调系统中的超荧光光源采用双程后向结构。因为在光路中加入了光纤环形镜,而光纤环形镜能反射 C 波段光,所以这部分光同样会返回放大部分,并与前向的 C 波段放大自发辐射(ASE)一起参与放大过程,从而实现了二次抽运。这样可以提高光源的稳定性和平坦度。光源结构图如图 2 所示。实验用 980 nm 激光二极管做抽运光源,掺铒光纤的质量浓度大于 $1.9 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$,光纤数值孔径为 0.20,模场直径为 $6.8 \mu\text{m}$,截止波长为 960 nm,980 nm 峰值吸收为 8.6 dB/m,1530 nm 附近峰值吸收为 14.2 dB/m。对不同长度(1,3,5,7,9,13,15 m)的掺铒光纤和不同抽运光功率激励下光源的输出光谱进行比较,发现,光纤长度为 7 m 时输出的斜边线性度最好,故本实验的光源选用掺铒光纤长度为 7 m。为了使光源输出的光信号具有稳定性,利用单片机做了专用的高灵敏度温控装置来保证光谱的恒定性。

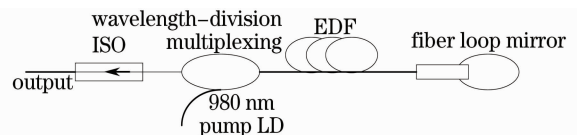


图 2 双程后向放大自发辐射光源结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the DoublePass Backward-Output pumped ASE source

超荧光光源输出的谱密度图如图 3 所示,输出光功率 6.9 mW(8.43 dBm)。可以看出光源在 1532 nm 两边均有一段类线性的部分,其输出的光功率密度随波长变化而线性变化,这一关系在一定温度范围内是基本不变的。对光源光谱的下降沿 1532~1534.5 nm 范围内进行了线性拟合,拟合曲线如图 4 所示,拟合曲线方程为: $y = -0.0147x + 22.554$,线性拟合度 $R^2 = 0.9995$,光强随波长变化的灵敏度 $K = -0.0147 \text{ mW/nm}$ 。比现有的用于此种解调方法的光源的灵敏度如文献[10]中 $K = -10.8 \mu\text{W/nm}$ 、文献[11]中 $K = -9 \mu\text{W/nm}$ 都高,从而保证了系统的测量精度。

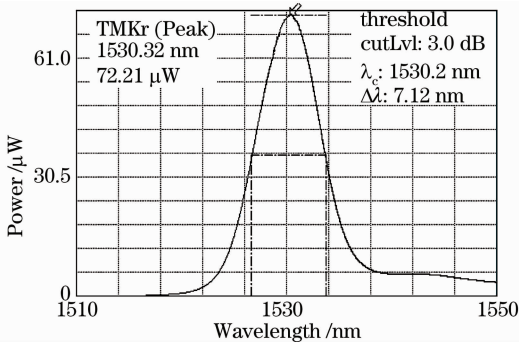


图 3 超荧光光源谱密度图

Fig. 3 Output spectrum of super-fluorescent light source

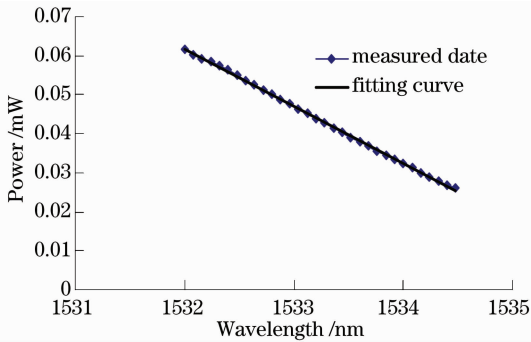


图 4 光源部分光谱拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of partial spectrum of light source

解调系统的实验装置如图 5 所示。光纤超荧光光源发出的光经过光隔离器 ISO 和 3 dB 耦合器入射到传感光纤光栅,由传感 Bragg 光栅反射后形成窄带光谱经 3 dB 耦合器到达光电探测器 PIN 并被转化为相应的电流信号,该电流信号经电流电压转换电路转化成电压信号,再经低噪声的放大滤波电路和数据采集系统最后进入计算机处理系统,经过一系列数据处理即可得到测量结果。此处光隔离器的作用是防止传感 Bragg 光栅反射后的光又传到光源而影响的光源的稳定性。为防止耦合器的不用端面的反射,将尾纤弯成直径小于 2 cm 的圈,使光通过光纤圈时

耦合进包层散射出去;即便端面反射回微弱的光,当再次经过光纤圈时也会再次耦合进包层。

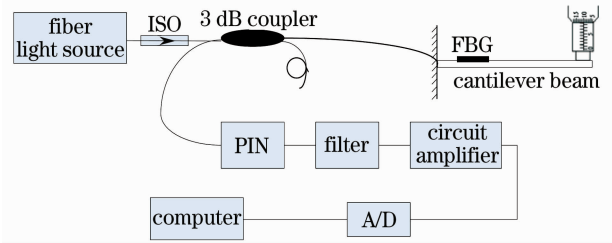


图 5 基于光纤光源的边缘滤波解调系统图

Fig. 5 Scheme of edge filter linear demodulation system based on fiber light source

实验时采用光源的波长调谐范围为 1532~1534.5 nm。选择 Bragg 中心波长为 1531.27 nm 的光栅做传感 FBG,半峰全宽 $\Delta\lambda_B = 0.28 \text{ nm}$,峰值反射率 $R_0 \approx 0.9$,粘贴后 Bragg 中心波长变为 1533.51 nm,耦合器的分光比为 1:1,放大模块的放大倍数约为 10^6 V/A 。光电探测器为中电科技第 44 所出产的 GT322D InGaAs PIN 光电二极管,光谱响应范围 800~1700 nm,其响应度为 0.94 A/W ,暗电流仅为 0.3 nA ,响应时间为 0.3 ns 。静态测量时,用螺旋测微器改变悬臂梁结构地震检波器的挠度使悬臂梁弯曲,从而光纤光栅 Bragg 波长产生蓝移或红移,进而改变了光强和电压值。利用 LabVIEW 编写的测试界面软件观测电压值,光谱仪(Anritsu 公司的 MS9710C 光谱仪,分辨力为 0.01 nm)观测波长的漂移值并记录。测得的数据曲线如图 6 所示,其拟合曲线方程为: $y = -1.2654x + 1537.2$,线性拟合度 $R^2 = 0.9987$,静态波长分辨率约为 -1.27 pm/mV 。由线性拟合度可以看出,与光源的拟合度之间有偏差,主要的误差来源于测量系统。经测量分析系统可分辨的最小稳定电压为 1 mV ,故应变的分辨力达到了 $1.06 \mu\epsilon$ 。

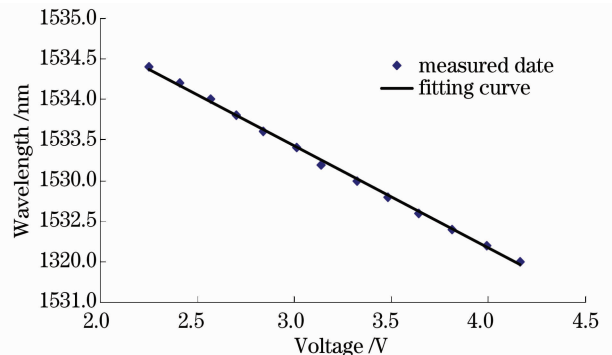


图 6 波长与电压灵敏度拟合曲线

Fig. 6 Voltage and wavelength sensitivity fitting curve

动态测量,用模拟振源,由信号发生器提供单一频率的正弦信号作微振动信号,把梁固定在模拟振源上,实验时认为模拟振源与梁同时做周期性振动。对

3~45 Hz 频率的振动信号进行了测试,用 NI 公司的 USB-6211(16 bit, 250 kS/s)型数据采集卡对光电转换输出的电信号采样,得到的数据如图 7 所示。

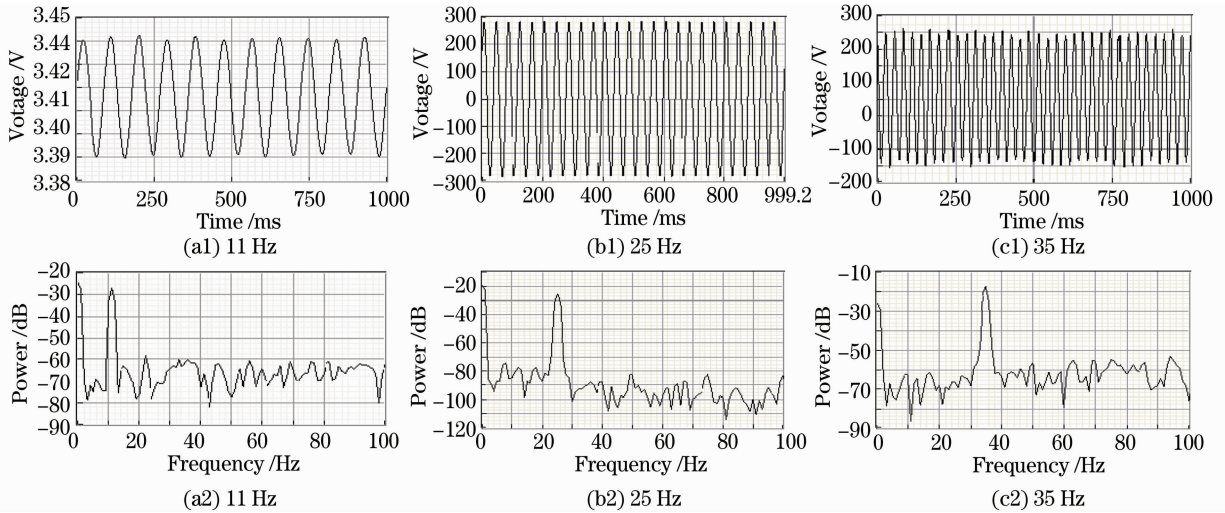


图 7 检测光强的电压值随采样时间变化的时域和频谱分布图

Fig. 7 Signal data curve and frequency distribution of light intensity voltage to sampling timing

从图 7(a1)~(c1)可以看出,检测到的电压信号基本都是正弦信号,说明设计的 FBG 地震检波解调系统用于测试微振动信号的地震勘探是可行的。图 7(a2)~(c2)给出了各个频率所对应的频谱图,频率均单一且主频强度最大,可看出系统的动态测量范围可以达到 40~50 dB。因为采用 200 kHz 的采样频率,采样点数为 100 k,这样保证了系统具有很高的测量精度和分辨率。振源的振动情况(是否为严格的正弦)对系统测量的动态结果起着决定作用。

非常快的,所以温度对本系统的影响是很小。如果温度变化幅度较大,势必也会影响光栅波长的漂移,可以通过匹配光栅反射法来消除温度的影响。

理想的滤波电路频响在通带内应有最大幅值和线性相移,而在阻带内其幅值应为零,实际的滤波电路很难达到理想的要求。由于地震波频率较低,故本解调系统在硬件电路中采用了二阶巴特沃斯低通滤波。由于没有对电路进行屏蔽,依然会受到高频信号的干扰,使用汉宁(Hanning)窗函数进行数字滤波,其窗函数为

$$\omega_{\text{HA}}(n) = \begin{cases} 0.5 + 0.5\cos(n\pi/Q), & |n| \leq Q \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

其最高旁瓣电平约比主瓣峰值低 31 dB,过渡带宽为 $8\pi/n$,这样有效地提高了系统测量精度。

所选的传感系统实际测量应变分辨率主要由 ASE 光源线性区部分的斜率,放大电路的信噪比和光电探测系统的最小可探测功率来决定的。传感光栅不可避免的受到温度的影响,但该解调系统的测量对象是振动信号,这对于缓慢变化的温度来说是

4 结 论

研究了利用光纤超荧光光源做边沿滤波器器件进行地震波信号的解调。首先对边沿滤波传感理论进行了推导,并对光源进行了研究与设计。系统光源采用双程后向结构,在线性边带的下降沿 2.5 nm 范围内,光强随波长变化的灵敏度 $-14.7 \mu\text{W}/\text{nm}$,线性拟合度达到了 0.9995。保证了系统的具有高测量灵敏度。通过对地震检波的模拟测量,解调的应变分辨力达到 $1.06 \mu\epsilon$ 。系统采用全光结构,解调精度高,稳定性好,性价比高且反应速度快,可实现对地震信号的实时检测。

参 考 文 献

- 1 Ph. M. Nellen, P. Mauron, A. Frank *et al.*. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications [J]. *Sensors and Actuators. A*, 2003, **103**(3): 364~376
- 2 P. J. Henderson, N. E. Fisher, D. A. Jackson Arrent metering using fibre-grating based interrogation of a conventional arrent transformer [C]. *12th International Conference on OFS*, 1997: 186~189
- 3 Qiao Xueguang, Wang Yu, Fu Haiwei *et al.*. High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Perot filter on large range [J]. *Acta optica sinica*, 2008, **28**(5): 852~855
乔学光,王 瑜,傅海威等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 852~855
- 4 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. A 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical

- amplification [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(5): 680~683
- 饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 680~683
- 5 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
- 肖浩, 李芳, 王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
- 6 M. A. Davis, A. D. Kersey. All fiber Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1): 75~77
- 7 Liu Bo, Tong Zhengrong, Chen Shaohua *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation using long-period grating in fiber sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 199~202
- 刘波, 童峥嵘, 陈少华等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 199~202
- 8 Zhou Guang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. A novel edge filter demodulation method using high birefringence fiber Sagnac loop mirror [J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2003, **14**(12): 1245~1249
- 周广, 赵启大, 开桂云等. 利用高双折射光纤环路的边缘滤波解调方法 [J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(12): 1245~1249
- 9 Sheng Qiuqin, Shi Kebin, Gao Limo *et al.*. Study on the method of matching detection of fiber grating vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 847~851
- 盛秋琴, 施可彬, 高立模等. 光纤光栅振动传感匹配检测方法的研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 847~851
- 10 Zhang Jian, Zhao Hong, Xiong Yanling *et al.*. A FBG sensor demodulation method based on an amplified spontaneous emission light source [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(1): 102~105
- 张剑, 赵洪, 熊燕玲等. 应用放大自发辐射光源解调光纤光栅传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(1): 102~105
- 11 Xiao Mengben, Xiong Yanling, Zhao Hong. A fiber Bragg grating strain sensor based on ASE light source demodulation technology [J]. *Journal Harbin Univ. Sci. & Tech.*, 2006, **11**(1): 30~32
- 肖孟本, 熊燕玲, 赵洪. 基于 ASE 光源解调的光纤光栅应变传感器 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2006, **11**(1): 30~32
- 12 Xu Ning. FBG dynamic demodulation and its applications [D]. Haerbin: Harbin University of Science and Technology. 2006: 34~49
- 徐宁. 光纤光栅传感技术动态解调方法及其应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学. 2006: 34~49
- 13 Guo Xiaodong, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. A novel C+L band erbium-doped fiber roadband light source with high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 609~612
- 郭小东, 乔学光, 贾振安等. 一种 C+L 波段高功率掺铒光纤宽带光源 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 609~612