

基于色散调谐宽带扫频光纤激光器及其在 光纤光栅解调中的应用

梅佳伟 肖晓晟 许明睿 桂丽丽 杨昌喜

(清华大学精密仪器与机械学系,精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京 100084)

摘要 报道了一种基于色散调谐技术的宽带扫频掺铒光纤激光器。通过在主动锁模光纤激光器腔内引入较大色散,利用锯齿波电信号调制电光调制器的调制频率,可以实现激光器扫频输出。应用扫频激光器可将光纤光栅反射中心波长的变化转变为时域上信号间隔变化,适用于光纤光栅传感解调。搭建了扫频光纤激光器,利用掺铒光纤作为增益介质,研究了扫频范围的影响因素。通过优化实验参数,实验得到的扫频带宽达到 43 nm,接近增益带宽,扫频速度为 50 Hz。利用搭建的扫频激光器进行了光纤光栅传感解调,灵敏度约为 0.68 ms/nm,验证了解调原理。

关键词 激光技术;扫频激光器;色散调谐;光纤光栅传感;时域解调

中图分类号 TN24 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1114003

Wavelength-Swept Fiber Laser Based on Dispersion Tuning and Its Application on the Demodulation of Fiber Bragg Grating

Mei Jiawei Xiao Xiaosheng Xu Mingrui Gui Lili Yang Changxi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A large swept-range wavelength-swept Er-doped fiber laser based on dispersion tuning is reported. By introducing large dispersion in the cavity of the active mode-locked laser, the output wavelength can be swept through changing modulation frequency. The laser can be applied to fiber Bragg grating (FBG) sensing. When the output light of the wavelength-swept laser is reflected by FBG, the variation of FBG central wavelength induced by strain can be converted into different time delays of signals. The output characteristics of the wavelength-swept laser are experimentally studied. The wavelength-swept range is 43 nm approximating the gain bandwidth of Er-doped fiber, while the sweep rate is 50 Hz. The principle of this demodulation technique is demonstrated and the sensitivity is about 0.68 ms/nm.

Key words laser technique; wavelength-swept laser; dispersion tuning; fiber grating sensor; wavelength-to-time demodulation

OCIS codes 140.3500; 060.3735; 280.4788

1 引 言

随着光纤通信技术的迅速发展,光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种新型的实现应变和温度传感的传感器件已经得到越来越多的关注。相比于传统的电学、光学应变传感器,光纤光栅具有独特优

点,如灵敏度高、因传感信号为波长编码而不受电磁干扰、易于复用并可实现准分布式传感,目前在民用结构、航空航天、船舶航运、石油化工和医学等领域已得到广泛的应用^[1]。

光纤光栅的解调技术一直是实现传感的难点也

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-06-26

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAF06B02)资助课题。

作者简介: 梅佳伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器和光纤传感方面的研究。E-mail: mjw503@gmail.com

导师简介: 杨昌喜(1963—),男,教授,主要从事光纤超短脉冲的产生及传输、光纤传感和非线性光纤光学等方面的研究。

E-mail: cxyang@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

是研究热点,为了解调光纤光栅的波长变化,人们提出了很多解调方案,例如:匹配光栅滤波法^[2]、CCD解调法^[3]以及法布里-珀罗解调方案^[4]等,近来扫频激光器也被应用到光纤光栅解调中^[5],通过将光纤光栅的中心波长的变化转变为时域变化,可以实现快速解调并满足多光纤光学复用的要求。2006年MIT小组^[6]报道了一种利用傅里叶域锁模技术的扫频激光器,使腔长和光纤法布里-珀罗调谐滤波器的扫频速度匹配,可获得高速扫频,浙江大学陈明惠等^[7]也报道了利用光栅旋转多面镜作为扫频滤波器实现了激光器的傅里叶域锁模,但是由于腔内存在机械结构的滤波器,限制了扫频速度的进一步提高。2006年 Yamashita 等^[8]提出了一种新型的基于半导体光放大器的扫频光纤激光器,采用的原理是在腔内引入较大的色散,使不同波长对应的基频不同。通过改变主动锁模的调制频率便可以实现波长的调谐,利用电学方式控制调制频率的连续变化可以实现扫频输出,由于系统中无机械结构,扫频输出的速度仅由电子系统和腔长决定,因此可实现 200 kHz 的高速扫频输出。2009年 Nakazaki 等^[9]利用该激光器实现了光纤光栅传感。同年, Yamashita 等^[10]报道了一种基于掺铒光纤的色散调谐扫频激光器,扫频带宽为 20 nm,相比于掺铒光纤的增益带宽,扫频带宽较小。而扫频激光器的扫频带宽的大小决定了光纤光栅的复用数量以及测量范围。为此,本文报道了一种宽带的色散调谐扫频激光器,理论分析了调制频率对单波长扫频范围和工作状态的影响,并实验研究了其输出特性。

2 调谐原理

环形激光器中,对于 N 次主动谐波锁模,其调制频率满足

$$f_N = Nf_0 = \frac{Nc}{n(\lambda)L}, \quad (1)$$

式中 f_0 为激光器的基频, N 为正整数,表示谐波锁模阶次, c 为光速, $n(\lambda)$ 为激光腔介质在不同波长下的有效折射率, L 为腔长。

当腔内存在平均色散 D 时,不同的波长具有不同的基频,忽略高阶色散后 $D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = \frac{1}{c} \frac{dn}{d\lambda}$, 对(1)

式两端进行求导,可得波长和调制频率的关系为

$$\frac{d\lambda}{df_N} = -\frac{n^2L}{Nc^2D}, \quad (2)$$

从(2)式可以得出改变调制频率可以实现波长调谐。

当腔内为反常色散时(色散参量 $D > 0$),激光器输出波长随调制频率的增大而减小;当腔内为正常色散时(色散参量 $D < 0$),输出波长随调制频率的增大而增大^[11]。

需要注意的是激光器的单波长调谐范围除了受增益光纤的增益带宽 $\Delta\lambda_{\text{gain}}$ 的限制外还受调制频率的影响^[12]。下面讨论调制频率对单波长调谐范围的影响,假设激光器腔内存在色散,同一调制频率下可能会存在不同的谐波锁模阶次。假设同一调制频率下存在 N 次谐波锁模和 $(N+1)$ 次谐波锁模,那么由(2)式可得其波长间隔

$$\Delta\lambda_N = \lambda_{N+1} - \lambda_N = \frac{n^2Lf_N}{c^2D} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right) = \frac{n^2Lf_N}{c^2D} \frac{1}{N(N+1)}, \quad (3)$$

当 N 较大时有近似关系 $f_N \approx Nf_0$, 则有

$$\Delta\lambda_N \approx \frac{n}{cD} \frac{1}{(N+1)}, \quad (4)$$

随着调制频率的增加即 N 的增加,相邻谐波阶次的波长间隔 $\Delta\lambda_N$ 和 $(N+1)$ 成反比。意味着当 N 足够大满足 $\Delta\lambda_N < \Delta\lambda_{\text{gain}}$ 时,激光器会出现多波长输出。因此为了使单波长调谐范围覆盖整个增益带宽,需要使调制频率小于临界值 $f_{\text{lim, single}}$, 使 $\Delta\lambda_N \geq \Delta\lambda_{\text{gain}}$ 。

3 扫频激光器实验

图 1 为该扫频激光器的实验装置图。此激光器的结构与一般主动锁模光纤激光器的结构相似,采用环形腔结构,980 nm 半导体激光器(LD)作为抽运源,通过波分复用耦合器(980/1550 nm, WDM)耦合进激光腔,增益介质为 40 cm 长的掺铒光纤(Er110-4/125, EDF),所用的主动锁模器件为 LiNbO₃ 电光调制器(10 GHz 带宽, PD-ISO),信号发生器(Agilent N5181A)输出的微波射频(RF)信号 pump (LD 980 nm)

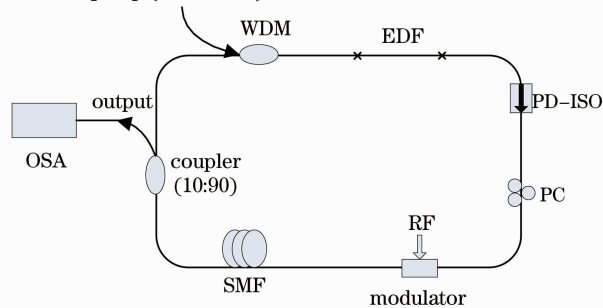


图 1 基于色散调谐的扫频激光器装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning

号经由微波放大器放大后作为主动调制频率信号。由于调制器对偏振敏感,需要在腔内放入偏振控制器来控制腔内的偏振态。为了引入较大色散,腔内放入了 1 km 的单模光纤(SMF),其色散参量标准值为 17 ps/(nm·km)。光隔离器是为了保证激光的单向运转,激光通过光耦合器的 10% 输出端输出,利用光谱仪(Agilent 86142B,分辨率为 0.06 nm)记录输出光谱,OSA 为光谱分析模块。腔长为 1032.5 m,对应的基频为 193.7 kHz。

考虑掺铒光纤的增益带宽为 47 nm,令相邻谐波锁模阶次的波长间隔 $\Delta\lambda_N = \Delta\lambda_{\text{gain}}$,根据(3)式,可以得到 $N = 6131$, $f_{\text{lim, single}} = Nf_0 = 1211.8$ MHz,当调制频率小于 $f_{\text{lim, single}}$ 时,即可实现整个增益带宽内的单波长调谐。图 2 是不同调制频率下的单波长调谐范围示意图,当调制频率达到 1.25 GHz 时,激光器输出双波长,考虑到色散误差,基本和理论预期相符。在出现双波长之前,单波长调谐范围存在一定的波动,这是由于偏振所致损耗的影响。

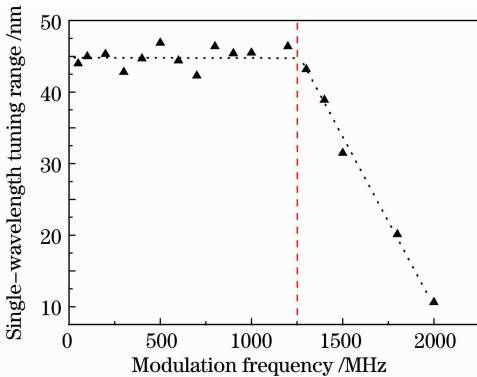


图 2 单波长调谐范围随调制频率的变化关系

Fig. 2 Relationship between single-wavelength tuning range and modulation frequency

当调制频率小于 $f_{\text{lim, single}}$ 时,整个增益带宽内均可实现单波长调谐。但是当调制频率较小时,此时由(2)式可知波长对调制频率较为敏感,而环境温度的变化或者外界振动都会产生腔长的抖动,从而造成较大的波长漂移;当调制频率较大时,输出脉冲重频较高,所以在抽运功率不变的情况下,单脉冲能量较小,不利于后续的解调信号的采集处理。因此在选择调制频率时需要平衡二者的影响。

实验中将调制频率选择在 500 MHz 频率段,抽运功率为 480 mW。信号发生器的输出正弦微波频率设定为 500.000 MHz,对应的谐波锁模阶次 N 为 2581,输出中心波长为 1573.1 nm,当微波频率增加到 500.008 MHz 时,波长减小到 1526.2 nm,静态

调谐光谱图如图 3 所示,瞬时线宽的测量值为 0.06 nm。图 4 为实验中测量的波长随调制频率变化关系的数据点,实线是线性拟合结果,线性度达到 0.9998。调谐范围约为 46.9 nm,近似等于掺铒光纤的增益带宽。波长随调制频率的变化率为 -0.591 nm/kHz,由(3)式可推导出腔内的色散参量 D 为 16.6 ps/(nm·km),与实验中所用单模光纤的标称色散参量大致相符。利用函数发生器输出的

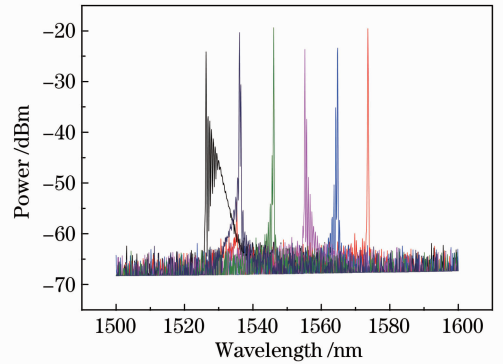


图 3 静态调谐光谱图

Fig. 3 Spectra of wavelength tuning

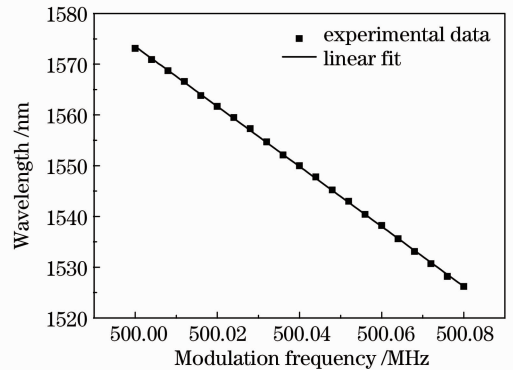


图 4 波长随调制频率的变化关系(实线为线性拟合)

Fig. 4 Relationship between output wavelength and modulation frequency (the solid line is the linear fit line)

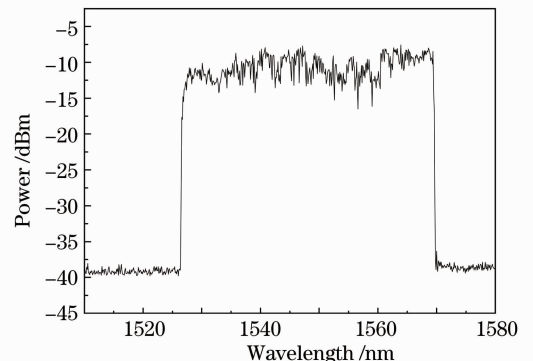


图 5 扫频峰保持谱

Fig. 5 Peak-hold spectrum of wavelength sweeping

锯齿波信号对电光调制器的调制频率进行频率调制,锯齿波频率为 50 Hz,调制带宽为 35 kHz,被调制的信号发生器的中心频率为 500.04 MHz,从而实现激光器扫频输出,扫频速度等于锯齿波的频率即 50 Hz,用光谱仪记录波长的扫描过程,图 5 为峰保持谱,扫频带宽约为 43 nm,整个扫频范围内光谱显得不够平坦,这是因为在偏振敏感腔内不同波长的偏振损耗不同。

4 光纤光栅解调实验

当光纤光栅感受到应变或者温度变化时,其反射谱的中心波长会发生变化,通过解调其中心波长的变化可以测量出应变或温度变化的大小。应用扫频激光器解调光纤光栅中心波长变化时,可以将反射光波的中心波长的变化转化成时域上的变化,从而实现快速解调^[5]。

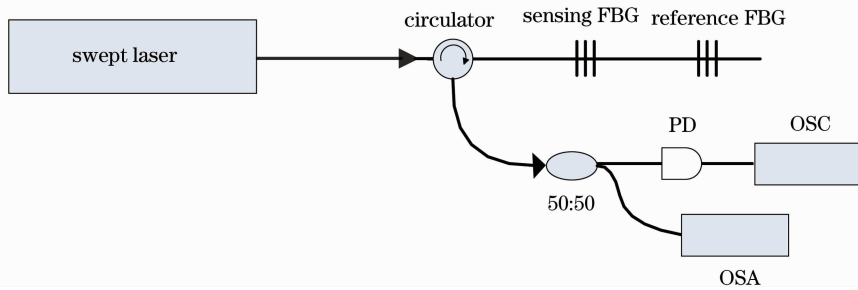


图 6 应用扫频激光器的光纤光栅解调装置图

Fig. 6 Schematic diagram of FBG demodulation using wavelength-swept laser

传感和参考光纤光栅的中心波长分别为 1534.05 nm 和 1558.13 nm, 3 dB 带宽分别为 0.23 nm 和 0.26 nm。扫频激光器的扫频速度为 50 Hz。图 7 是示波器上两根光纤光栅反射的时域信号,其中图 7(a)、(b)是不同应变下的时域信号,可以明显地看到传感信号对应的脉冲和参考信号对应的脉冲在时域上的时间差发生了变化。图中传感信号和参考信号的时域脉冲宽度由光纤光栅的带宽决定,脉宽越窄时域分辨率越高,解调精度也越高。图 8 是不同的应变下的时间差与光纤光栅中心波长变化关系的数据点,实线是线性拟合结果,线性度达到 0.9995,基本呈线性关系,灵敏度为 0.68 ms/nm,实验上验证了解调的基本原理。

扫频激光器的扫频带宽决定了光纤光栅的复用数量以及测量范围,而掺铒光纤的增益带宽限制了扫频范围的增加。为了进一步提高扫频带宽可选用大增益带宽的增益介质,如半导体光放大器等。解调的精度受光纤光栅带宽的影响,带宽越小,时域脉冲的脉宽越窄,时间测量精度越高。另外扫频激光

器将扫频激光器应用到光纤光栅解调的实验装置图,将扫频激光器的输出光入射到光纤光栅中,反射光经环形器被光电探测器(最大探测带宽 10 GHz)接收,用示波器(Agilent 80204B)记录时域信号,OSC 表示时域信号检测通道。具体原理如下:实验中采用两根光纤光栅,一根用于传感,另一根用作参考,以消除温度等误差;当扫频激光器的输出中心波长和光纤光栅的反射中心波长一致时,光纤光栅对输出光反射率最大,经环形器被光电探测器探测,在时域上会出现一脉冲信号;当传感光纤光栅感受到应变变化时,其反射谱中心波长会发生移动,从而使探测器接收到的传感光纤光栅反射的脉冲信号与参考光纤光栅反射的脉冲信号在时域上的时间差会发生变化;当扫频激光器扫频方式是线性时,时间差和应变便是线性对应的,测量出时间差便可实现光纤光栅的解调。

器的稳定性也限制了解调精度,比如波长飘移或时域抖动均增加了解调误差。基于色散调谐扫频激光器的稳定性受诸多因素的影响。1)温度扰动或振动对腔长的影响,由理论推导可知输出中心波长和腔长、调制频率有关,环境温度扰动或振动都会改变腔长,从而使输出波长发生漂移,防震平台的使用以及增加温控装置有利于中心波长的稳定;2)由于系统含有对偏振敏感的电光调制器,即使使用偏振控制器控制腔内偏振,还是会因为环境的扰动和波长的调谐出现偏振态的波动从而影响时域稳定性,可考虑在腔内采用全保偏光纤,消除偏振影响。3)系统本征时域抖动,由主动锁模理论可知,在扫频过程中,每个波长的激光建立都要经历一个非稳态的弛豫振荡过程,所以时域上必然会出现扰动,为了提高解调的稳定性需要降低激光建立时间或者降低扫频速度,以便在每个波长的驻留时间内获得稳定的激光输出。电学扫频方式使该系统具有了高速扫频的潜在优点,但目前实验中扫频速度较低,这和长腔长

有很大关系,因为腔长越长,激光建立的时间越长,不利于扫频速度的提高。因此缩短腔长将是未来的

主要工作,可用啾啉光纤光栅等大色散介质替代单模光纤。

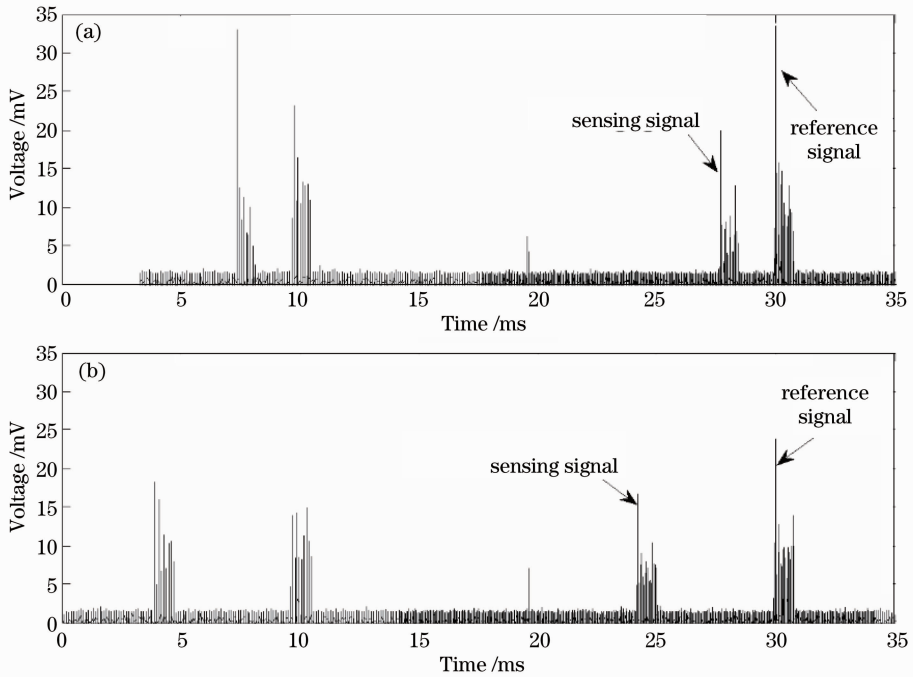


图 7 光纤光栅反射的时域信号。(a) 压力 1;(b) 压力 2

Fig. 7 Reflection signals of sensing FBG and reference FBG in the time domain. (a) Strain 1; (b) strain 2

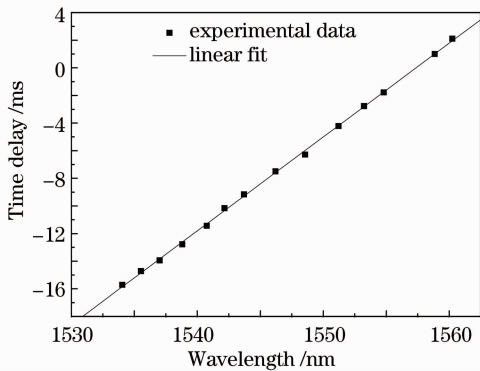


图 8 时域时间差与传感 FBG 中心波长的关系 (实线为线性拟合)

Fig. 8 Relation between time delay and central wavelength of sensing FBG(the solid line is the linear fit line)

5 结 论

本文介绍了一种基于色散调谐宽带扫频掺铒光纤激光器,并将其应用到光纤光栅应变传感系统。在介绍扫频原理的基础上分析了影响单波长扫频范围的因素,如调制频率、增益带宽。实验搭建了掺铒光纤扫频激光器,其扫频带宽达到 43 nm,接近增益带宽,扫频速度为 50 Hz。并验证了基于扫频激光器的光纤光栅传感方案,实验结果表明通过测量传感和参考脉冲信号的时间差可以解调出应变的大

小,灵敏度为 0.68 ms/nm。此扫频激光器的潜在优势是无机械结构,可实现高速扫频,从而在高速解调、光学相干成像等领域有重要的应用前景。最后分析了目前激光器存在的不足和原因,并提出了可能的解决方案。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
 - 2 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber Bragg grating sensors using two matched gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4): 487~489
 - 3 Y. Hu, S. Chen, L. Zhang *et al.*. Multiplexing Bragg gratings using combined wavelength and spatial division techniques with digital resolution enhancement [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23): 1973~1975
 - 4 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
 - 5 S. H. Yun, D. J. Richardson, B. Y. Kim. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 843~845
 - 6 R. Huber, M. Wojtkowski, J. G. Fujimoto. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3225~3237
 - 7 Chen Minghui, Ding Zhihua, Wu Tong *et al.*. Fourier-domain-mode locking swept laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 150~154
- 陈明惠,丁志华,吴彤等.傅里叶域锁模扫频激光光源[J].

- 光学学报, 2011, **31**(6): 150~154
- 8 S. Yamashita, M. Asano. Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9299~9306
- 9 Y. Nakazaki, S. Yamashita. Fast and wide tuning range wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8310~8318
- 10 S. Yamashita, Y. Nakazaki, R. Konishi *et al.*. Wide and fast wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning for dynamic sensing [J]. *J. Sensor*, 2009, 2009: 572835
- 11 Zhao Chunliu, Ma Ning, Dong Xinyong *et al.*. Wavelength tunable mode-locked fiber ring laser utilized by the dispersion of CFBG [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 822~824
赵春柳, 马 宁, 董新永 等. 利用啁啾光纤光栅色散特性实现波长可调谐的主动锁模掺铒光纤环腔激光器 [J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 822~824
- 12 S. P. Li, K. T. Chan. Electrical wavelength-tunable actively mode-locked fiber ring laser with a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 799~801

栏目编辑: 宋梅梅