

# 影响扫频激光光源瞬时线宽因素的研究

陈明惠 李昊 范云平 张浩 陶建峰 郑刚\*

上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093

**摘要** 在搭建的窄瞬时线宽的扫频激光光源的基础上,通过实验和数值模型对影响激光瞬时线宽的主要因素进行了研究。研究发现,扫频激光的瞬时线宽会随着色散的增加而变宽,滤波器的带宽和加载给滤波器的信号都会影响瞬时线宽,同时腔内的模式竞争能够保证更窄的激光瞬时线宽。

**关键词** 医用光学; 光学相干层析技术; 扫频激光光源; 窄瞬时线宽; 傅里叶域锁模

**中图分类号** R445.9 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1117001

## Study on Factors Influencing Instantaneous Line Width of Frequency-Swept Laser Source

Chen Minghui Li Hao Fan Yunping Zhang Hao Tao Jianfeng Zheng Gang

*School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** Based on the homemade frequency-swept laser source with a narrow instantaneous line width, the main factors influencing the laser instantaneous line width are investigated by numerical model and experiment. The research results indicate that the instantaneous line width of the frequency-swept laser increases with the increment of dispersion, and the filter bandwidth and the signal pattern loaded to the filter both influence the instantaneous line width. At the same time, the intra-cavity mode competition can ensure a narrower instantaneous laser line width.

**Key words** medical optics; optical coherence tomography; frequency-swept laser source; narrow instantaneous line width; Fourier domain mode locking

**OCIS codes** 170.1650; 170.4500; 030.1640

## 1 引 言

窄瞬时线宽的扫频激光光源在微观成像方面有着很高的利用价值<sup>[1]</sup>,具有高分辨率、高信噪比,以及高探测灵敏度等特点,在光学活检方面有着广泛的应用<sup>[2-8]</sup>。在传统的吸收光谱系统中,使用半导体、二极管等具有宽带宽的激光器作为光源会使得系统在检测吸收光谱时需要采集庞大的数据,系统容易受到背景环境变化的影响<sup>[9]</sup>。窄瞬时线宽的扫频激光光源通过降低光源扫描范围来获得极高的精细度,输出的激光强度比宽带宽的光源稳定,能够很好地降低光源的背景噪声和减少检测时间。尤其在检测气体的吸收光谱时,窄瞬时线宽的扫频光源对空气中的物质有很好的响应灵敏度,可以把背景气体、粉尘、温度等因素的影响降到最低,提高检测系统的准确性。

基于傅里叶锁模(FDML)技术,本课题组搭建了窄瞬时线宽的扫频光源。当谐振腔内的激光环腔时间与滤波器的调谐时间精确匹配时<sup>[10]</sup>,该光源处于稳定的锁模工作状态,能够输出比传统扫频光源更窄的瞬时线宽的扫频激光。通过实验直接测量的方式难以得到扫频光源的瞬时线宽,但可以利用数值模拟的方式

收稿日期: 2016-04-05; 收到修改稿日期: 2016-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(61308115)、上海市自然科学基金(13ZR1457900)、上海高校青年教师培养资助计划(zzslg12017)、医学光电科学与技术教育部重点实验室开放课题(JYG1212)

作者简介: 陈明惠(1981—),女,博士,副教授,主要从事生物医学光学方面的研究。E-mail: cmhui.43@163.com

\* 通信联系人。E-mail: gangzheng@usst.edu.cn

获得激光在谐振腔内传播的过程<sup>[11]</sup>。通过建立数值模型,详细分析了影响扫频激光光源的输出瞬时线宽的各种因素,包括光纤色散、滤波器带宽和滤波器的扫频速度以及增益介质和腔内模式竞争。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 实验平台

选用高精度和窄带宽的法布里-珀罗滤波器(FFP-TF)作为调谐滤波器,光纤长度为 6849 m,FFP-TF 的精细度为 5578,带宽为 0.018 nm,自由光谱范围(FSR)为 100.4 nm,搭建的系统如图 1 所示<sup>[12]</sup>。通过信号发生器产生正弦信号,加载到 FFP-TF 两端,通过调节滤波器的扫频频率和偏置电压来调制滤波器的扫描范围和扫描速度。采用 ThorLabs 公司的助推光学放大器(BOA)作为腔内增益介质,中心波长为 1351 nm,带宽为 100 nm。扫频激光光源的自发辐射背景光来自于腔内的 BOA。使用半导体光学放大器(SOA)作为光功率增强器件。输出的扫频激光中心波长为 1340 nm,扫频范围为 10 nm,扫频速度为 30 kHz,平均输出功率为 9.1 mW。

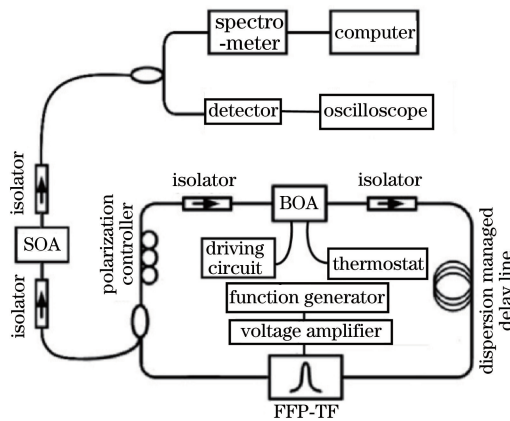


图 1 基于 FFP-TF 的窄瞬时线宽扫频激光光源结构图<sup>[12]</sup>

Fig. 1 Structural chart of frequency-swept laser source with narrow instantaneous line width based on FFP-TF<sup>[12]</sup>

### 2.2 瞬时线宽的影响因素

影响扫频激光光源的瞬时线宽的因素主要有:腔内光纤色散、加载给滤波器的信号、增益介质和 FDML 谐振腔内的模式竞争<sup>[13-14]</sup>。

#### 2.2.1 腔内色散对瞬时线宽的影响

基于 FDML 技术的扫频光源激光在谐振腔内传播时遵循一定的变化规律<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_z A = [g(1 - i\alpha) - a - iD_2(z)\partial_t^2 + D_3(z)\partial_t^3 + i\gamma(z)|A|^2]A, \quad (1)$$

式中  $\sigma_z$  为激光在谐振腔中的振幅变换函数; $\alpha$  为激光的相角; $A$  为光波的振幅; $|A|^2$  为瞬时光功率; $t$  为光波在光场中移动的滞后时间; $\partial_t$  为光波速率变化;以腔内增益介质 BOA 为起点, $z$  为激光在环形谐振腔内传播的距离; $D_2$ 、 $D_3$  和  $\gamma$  分别为第二、第三阶色散和自相位调制系数,其值分别为  $-2.7603 \times 10^{-28} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $1.2183 \times 10^{-41} \text{ s}^3 \cdot \text{m}^{-1}$  和  $0.00136 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $g$  和  $a$  分别为激光的增益系数和损耗系数,对于单模光纤而言,增益系数为零,损耗系数可以看成是一个常数。基于 FFP-TF 窄瞬时线宽的扫频激光光源,虽然采用的是单模光纤(SMF),但 6849 m 的延迟线仍然是引起色散的因素之一。光在环形谐振腔中传输时,随传输距离的增加,会产生脉冲展宽的物理效应。输出的光脉冲的宽度随着传输距离的增加而变大,振幅随着传输距离的增加而降低。

搭建的扫频激光光源系统均使用 SMF,SMF 中只有主模式传输,其模间色散很小,总色散包括材料色散、波导色散、波长色散和偏振模色散。扫频光源采用 BOA 为腔内增益介质,激光在环形腔光纤中的双折射参量很小,波长色散是造成时延的主要原因<sup>[15]</sup>。不同波长的光波从 FFP-TF 开始,传播一圈返回滤波器时,色散会导致光波绕环腔一周的时间与滤波器的调谐周期不相匹配,每个波长的光波在长光纤中都有不同的色散系数和对应的延迟时间,这个时间差为相对延迟时间  $\tau(\lambda)$ :

$$\tau(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^2 \cdot k \cdot L, \quad (2)$$

式中  $L$  为光纤的长度,  $\lambda_0$  为光纤零色散波段,  $k = 0.086 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-2}$  为光纤的色散斜率,  $\lambda$  为光波长。不同类型的单模光纤对应着不同的零色散波段, 这些波段的激光在环形腔中传播时, 光信号只受到光纤衰减的限制。此处选用的延迟线零色散波段在 1310 nm 左右, 确保了该波段光受到的色散影响可以减少到最小, 保证了光源最终能输出窄瞬时线宽的光。搭建的扫频光源波长范围为 1335~1345 nm, 谐振腔长度为 6849 m, 该波段光每千米损耗为 0.3 dB~0.4 dB, 激光的波长与相对延迟时间的关系如图 2 所示。由图可知, 光波在 1335~1345 nm 范围内扫频时, 激光环绕谐振腔一周的时间差在 0.368~0.722 ns 范围内变化, 1310 nm 光波的相对延迟时间最小; 波长越长相对延迟时间越大, 波长为 1400 nm 的相对延迟时间高达 4.75 ns。

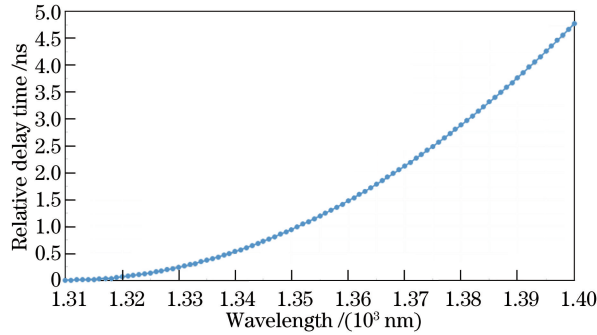


图 2 波长与相对延迟时间关系图

Fig. 2 Relationship between wavelength and relative delay time

在色散较大的情况下, 色散引起的时延导致部分光波没有来得及到达 FFP-TF, FFP-TF 输出的光波不是一个完整的高斯型光波, 这会造成一部分光谱被削掉, 引起扫频激光光源瞬时线宽变宽。

### 2.2.2 FFP-TF 对瞬时线宽的影响

采用的 FFP-TF 精细度为 5578, 带宽为 0.018 nm, FSR 为 100.4 nm。在没有色散的情况下, 扫频激光光源的平均瞬时线宽主要取决于 FFP-TF 的带宽。受 FFP-TF 制造工艺的影响, 在激光光源扫频的一个周期内, 不同时刻激光输出的瞬时线宽也不同。滤波器的带宽越窄就越容易受色散和增益介质的影响。FFP-TF 的透射率  $T(\lambda_1)$  表示为<sup>[16]</sup>

$$T(\lambda_1) = \frac{1}{1 + (2F/\pi)^2 \sin^2 [\pi(\lambda_1 - \lambda_2) / \Delta\lambda_1]}, \quad (3)$$

式中  $F$  为滤波器的精细度, 滤波器带宽越窄, 精细度越高;  $\lambda_1$  为某一时刻到达滤波器的光波波长;  $\lambda_2$  为某一时刻滤波器的透射窗口允许透射的波长,  $\Delta\lambda_1$  为滤波器的 FSR。

将搭建的扫频光源平台滤波器参数代入(3)式, 得到滤波器的透射率与  $\lambda_1 - \lambda_2$  之间的关系, 如图 3 所示。当  $\lambda_1 = \lambda_2$  时, 滤波器的透射率为 100%, 这个波长的光能够几乎无损耗的通过滤波器, 而其他波长的透射率根据艾里函数衰减。

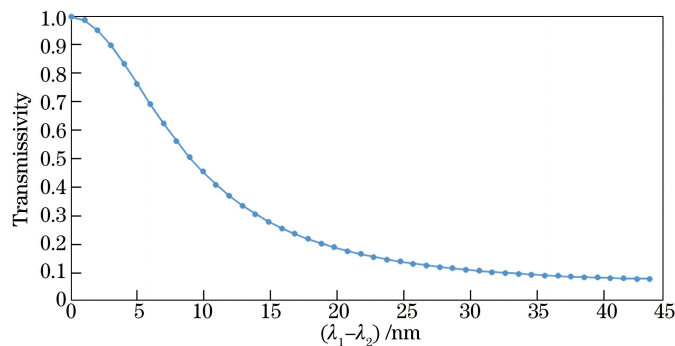


图 3 FFP-TF 透射率与波长差的关系图

Fig. 3 Relationship between transmissivity of FFP-TF and wavelength difference

光源的输出光谱带宽越窄,其瞬时线宽就越窄,因此可以通过观测光源输出光谱的变化情况来研究光源瞬时线宽的变化。在 30 kHz 的扫频速度下,用信号发生器给 FFP-TF 加载正弦波信号。当直流(DC)偏置电压一定时,信号发生器加载给 FFP-TF 的信号峰峰值对透射光谱的影响见表 1。

表 1 光源输出光谱带宽在不同的电压峰峰值下的输出情况

Table 1 Output spectral bandwidth of light source under different peak-to-peak values of voltage

Peak-to-peak value /V	DC offset voltage /V	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm
7-9	8	1334	8
6-10	8	1336	10
5-11	8	1336	12
4-12	8	1335	14

由表 1 可知,当直流偏置电压固定时,光源输出光谱的中心波长基本没有变化,但加载给滤波器的信号峰峰值越小,滤波器的透射光谱带宽也越窄。这意味着光源输出扫频光的瞬时线宽随着带宽的减小而变窄,但输出的光功率会变大。此处的 FFP-TF 滤波器,带宽为 0.018 nm,扫频激光光源的输出瞬时线宽太窄,无法用器件进行直接的测量。为了进一步研究,在保证其他参数不变的情况下,给滤波器加载不同的扫频频率(即函数发生器的驱动频率),并在光谱仪上观察输出光谱的变化情况,如表 2 所示。

表 2 在不同扫频频率下扫频光源的输出情况

Table 2 Output of frequency-swept source under different sweeping frequencies

Frequency of function generator /kHz	Repetition rate of swept source /kHz	Center wavelength /nm	Spectral bandwidth /nm
30	60	1335	10
45	90	1334	8
60	120	1334	6
75	150	1335	5

由表 2 可知,光源的输出中心波长不会随扫频频率的变化而变化,但光谱输出带宽会随着扫频频率的增加而减小,即光源的输出光的瞬时线宽会随着带宽的减小而变窄。

### 2.2.3 增益介质对瞬时线宽的影响

在实际工作中,光源输出的平均瞬时线宽与滤波器的带宽会有一些偏差,扫频光源最终得到的平均瞬时线宽比滤波器的瞬时线宽要宽。造成这个现象的原因有两个:一个是谐振腔内的色散,另一个是腔内的 BOA 和腔外的 SOA。不同的增益介质对不同波长光波的增益系数不一样,SOA 对 1325 nm 波段的光波增益系数最大,BOA 对 1350 nm 波段的光波增益系数最大。激光通过 BOA 的自发辐射过程产生,BOA 对系统的影响主要有增益光谱和饱和增益现象,增益光谱的表达式为

$$G(\lambda_3) = g_0 \left[ 1 - 2 \left( \frac{\lambda_3 - \lambda_4}{\Delta\lambda_3} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{P}{P_{SA}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

式中  $g_0$  为 BOA 的小信号增益,这里取 25 dB; $\lambda_3$  为某一时刻到达 BOA 的光波波长; $\lambda_4$  为某一时刻 BOA 透射的波长; $\Delta\lambda_3$  是 BOA 的增益带宽,最大为 100 nm; $P_{SA}$  是 BOA 的饱和增益功率; $P$  是瞬时输出功率。由

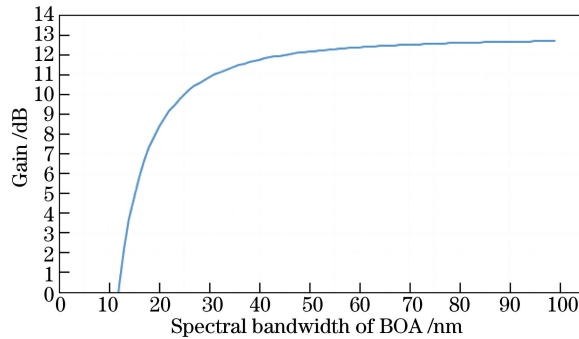


图 4 增益与 BOA 的光谱带宽关系

Fig. 4 Relationship between gain and spectral bandwidth of BOA

(4)式可见,增益介质的增益带宽对光源的输出光谱带宽也会带来影响,BOA 光谱带宽与增益的关系如图 4 所示。

SOA 在额定工作电流 250 mA 下,BOA 在 327 mA 工作电流下,光谱带宽均为 100 nm。当 SOA 和 BOA 组合起来使用时,扫频激光光源的输出光谱带宽和瞬时线宽均会变宽。

此处 FFP-TF 的扫频中心波长为 1310 nm,与腔内的 BOA 的中心波长相差了 40 nm,通过示波器观察扫频光源输出图像发现,一个周期内两个脉冲信号会出现聚拢或远离的现象。该现象对光源的输出光谱带宽几乎没有影响,也不会改变输出光源的瞬时线宽。但是,BOA、SOA 的自发辐射光谱的中心波长不一致,会造成最终输出光谱的中心波长在二者的中心波长之间,实验也证明了理论分析的正确性。增益介质对 FFP-TF 滤出的光波进行增益和放大的同时,也使扫频激光光源的输出平均瞬时线宽变宽,此时扫频激光光源最终输出光源的平均瞬时线宽与滤波器的带宽并不相等。

#### 2.2.4 FDML 谐振腔内模式竞争对瞬时线宽的影响

在工作状态下,搭建的傅里叶锁模扫频光源所有模式的光都存储在谐振腔内,该系统的锁模过程是:作为腔内增益介质的 BOA 辐射出背景光,光经过隔离器和长光纤,再由 FFP-TF 进行窄带滤波。不同环腔时间的背景光依次返回到 BOA 获得增益,在谐振腔内振荡形成激光后输出。不同纵模的激光被精确地锁定,所有频率的光都存储在谐振腔内,具有相同的相位。振荡形成激光后,一部分的光通过耦合器再次进入 BOA 进行增益放大,继续回到谐振腔内振荡,另一部分从耦合器的一端输出。

在谐振腔内使用 FFP-TF 作为滤波器,滤出的窄带光谱由于模式竞争会发生选模,从而获得更窄的窄带光谱。由(3)式可知,不同波长的光束在 FFP-TF 内具有不同的透射率,相当于在腔内插入法布里-珀罗(F-P)标准具来对激光进行选模。但与标准具不同的是滤波器内部的 F-P 腔的长度并不是固定不变的,而是会随着加载到滤波器两端的电压信号的变化而变化。相邻两透射率极大值的间隔即为纵模间隔,可以表示为

$$\Delta\nu_m = \frac{c}{2nd}, \quad (5)$$

式中  $c$  为光在真空中的速度; $n$  为滤波器材料的折射率,这里取  $n=1.5$ ; $d$  为滤波器的 F-P 腔长,这里取 1 cm。由(5)式计算得知,纵模间隔  $\Delta\nu_m$  为  $1.03 \times 10^9$  Hz。谐振腔的长度  $d$  越大,纵模间隔就越小,返回 BOA 窄带激光内的纵模个数就越多。以中心波长为 1350 nm 的 BOA 为例,小信号增益为 23 dB,即经过 FFP-TF 滤波后返回 BOA 带宽为 1349.991~1350.009 nm,其频率间隔可以表示为

$$\Delta\nu_d = \frac{c}{1349.991 \cdot n_1} - \frac{c}{1350.009 \cdot n_1} \quad (6)$$

当  $n_1 = 1.446$  时,由(6)式可以得到  $\Delta\nu_d$  的值为  $2 \times 10^9$  Hz,则返回 BOA 窄带宽光中的纵模数  $N = \Delta\nu_d / \Delta\nu_m = 2$ 。即只有 2 个不同纵模的激光能获得增益而继续振荡,而其他模式无法获得增益,因此形成了谐振腔内的模式竞争,扫频光源最终输出瞬时线宽比 FFP-TF 带宽更窄的扫频激光。

### 3 结 论

在搭建的窄瞬时线宽的扫频激光光源平台的基础上,研究了影响瞬时线宽的各个因素。实验搭建的扫频激光光源系统引入了长达 6849 m 的长光纤,色散是影响瞬时线宽的一大因素。通过数值模拟可以发现,环形谐振腔内的色散越小,扫频激光光源输出的瞬时线宽就会越窄,成像质量就越好,在实际平台搭建中可以使用色散补偿光纤来减小色散带来的影响。滤波器的带宽与光源的瞬时线宽是正比关系,在色散一定的情况下,带宽越窄,输出的扫频光的瞬时线宽也越窄。影响瞬时线宽的因素还包括滤波器的扫频频率,当频率较低时,光源的瞬时线宽容易受到影响。此外,谐振腔内的模式竞争能够保证更窄的激光瞬时线宽。

#### 参 考 文 献

- 1 Wessels R, van Beurden M, de Bruin D M, *et al.* The value of optical coherence tomography in determining surgical margins in squamous cell carcinoma of the vulva: A single-center prospective study [J]. *International Journal of Gynecological Cancer*, 2015, 25(1): 112-128.

- 2 Zhi Z, Qin W, Wang J, *et al.* 4D optical coherence tomography-based micro-angiography achieved by 1.6-MHz FDML swept source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1779-1782.
- 3 Poddar R, Zawadzki R J, Cortés D E, *et al.* *In vivo* volumetric depth-resolved vasculature imaging of human limbus and sclera with 1  $\mu\text{m}$  swept source phase-variance optical coherence angiography[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(6): 065301.
- 4 Shimada Y, Nakagawa H, Sadr A, *et al.* Noninvasive cross-sectional imaging of proximal caries using swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) *in vivo* [J]. *Journal of Biophotonics*, 2014, 7(7): 506-513.
- 5 Ireneusz G, Liu J J, Benjamin P, *et al.* High-precision, high-accuracy ultralong-range swept-source optical coherence tomography using vertical cavity surface emitting laser light source[J]. *Optics Letters*, 2014, 38(5): 673-675.
- 6 Lu C D, Kraus M F, Potsaid B, *et al.* Handheld ultrahigh speed swept source optical coherence tomography instrument using a MEMS scanning mirror[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(1): 293-311.
- 7 Chen Xiaojie, Bai Baoping, Chen Xiaodong, *et al.* An automatic delay correction algorithm for improving imaging resolution of swept source optical coherence tomography system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1204001.  
陈效杰, 白宝平, 陈晓冬, 等. 一种提高扫频光学相干层析成像分辨率的延时自动校正算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1204001.
- 8 Shi Weisong, Gao Wanrong, Chen Chaoliang. Handheld swept source optical coherence tomography for imaging human skin *in vivo* [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1117001.  
史伟松, 高万荣, 陈朝良. 人体皮肤在体手持式扫频光学相干层析系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1117001.
- 9 Kranendonk L A, An X, Caswell A W, *et al.* High speed engine gas thermometry by Fourier-domain mode-locked laser absorption spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15115-15128.
- 10 Wieser W, Biedermann B R, Klein T, *et al.* Multi-megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second[J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14685-14704.
- 11 Todor S, Biedermann B, Wieser W, *et al.* Instantaneous lineshape analysis of Fourier domain mode-locked lasers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8802-8807.
- 12 Chen Minghui, Li Hao, Fan Yunping. Development of 30 kHz repetition rate swept laser source with narrow instantaneous linewidth[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0416001.  
陈明惠, 李昊, 范云平. 30 kHz窄瞬时线宽扫频激光光源的研制[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0416001.
- 13 Biedermann B R, Wieser W, Eigenwillig C M, *et al.* Dispersion, coherence and noise of Fourier domain mode locked lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9947-9961.
- 14 Biedermann B R, Wieser W, Eigenwillig C M, *et al.* Direct measurement of the instantaneous linewidth of rapidly wavelength-swept lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3733-3735.
- 15 Satoshi H, Yoshio H. Dynamic control of spatial wavelength dispersion in holographic femtosecond laser processing[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 478-481.
- 16 An Ying, Du Zhenhui, Xu Kexin. The instantaneous linewidth measurement of DFB laser with ultrashort delay[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(17): 174208.  
安颖, 杜振辉, 徐可欣. 超短时延测量DFB激光器的动态线宽[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 174208.