

# 波长扫描激光器光谱线宽的动态测量技术研究

王 哲 王 智 刘岚岚 王 甫 余贻碌 吴重庆

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 波长扫描激光器是光纤传感和光学相干层析技术中的关键部件,其动态输出光谱特性决定了传感与成像系统的分辨率水平。采用改进的外差法和电光调制器(EOM)法对自制的波长扫描激光器的输出光谱进行动态测量,得到光谱线宽(反映光源的相干性)及其与波长扫描频率的关系。结果表明,输出光谱线宽随着波长扫描频率增大而增加,EOM法比外差法测得的光谱线宽略大,波长扫描频率为60 kHz时,外差法测量激光器输出光谱线宽在4.9 pm,EOM法测得为37 pm。

**关键词** 激光器;光谱线宽;动态测量;可调谐环形腔激光器;半导体光放大器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0608005

## Dynamic Measurement of Linewidth of the Wavelength-Swept Lasers

Wang Zhe Wang Zhi Liu Lanlan Wang Fu Yu Kuanglu Wu Chongqing

*Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

**Abstract** Wavelength-swept laser is the key component for optical fiber sensing and optical coherence tomography, and its output spectral characteristics determine the resolution of the sensing and imaging systems. An improved heterodyne method and a direct measurement method by fast synchronous time gating with an electro-optic modulator (EOM) are proposed to dynamically measure the output spectra of a self-made prototype of a ring cavity wavelength swept laser. The spectral linewidth, hence the coherence length of the laser source, are obtained to show its increasing dependence on the wavelength-swept frequency. The linewidth measured by the EOM method is greater than that of the heterodyne method due to the modulation, and the respective linewidth are 37 pm and 4.9 pm while the wavelength-swept frequency is 60 kHz.

**Key words** lasers; spectral linewidth; dynamic measurement; tunable ring laser; semiconductor optical amplifier

**OCIS codes** 120.2230; 120.1920; 060.2300; 060.2920; 060.4080

## 1 引言

基于半导体光放大器的可调谐光纤环形腔激光器通过快速调谐方式可实现波长扫描连续输出<sup>[1]</sup>,从而实现波长扫描激光器或傅里叶域锁模激光器(FDML)<sup>[2]</sup>,它具有调谐速度快,调谐范围大,输出光谱线宽窄等特点,因而被视作波长扫描光学层析成像技术(SSOCT)理想的光源<sup>[3]</sup>,它的输出特性直接影响光学层析(OCT)成像的质量,比如激光器的波长扫描速度直接决定SSOCT的成像速度,波长扫描范围决定了成像分辨率,瞬时光谱线宽决定成像的纵向分辨率等等<sup>[4]</sup>,所以波长扫描/傅里叶域锁模激光器输出特性的测量对评估激光器工作性能和应用价值具有十分重要的意义。

通常,激光器输出光谱线宽可以通过光谱分析仪直接测量,但是受制于光谱分析仪的分辨率极限,一般仅能用于测量光谱线宽大于数十皮米,对于更窄线宽的激光器光谱,则需要采用其他方法。T Okoshi等<sup>[5]</sup>首

收稿日期: 2015-01-23; 收到修改稿日期: 2015-02-25

基金项目: 第47批留学回国科研启动基金、北京市自然科学基金(4132035)

作者简介: 王 哲(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感方面的研究。E-mail: 12121718@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,博士,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

次提出外差法,通过延迟和非延迟光波之间的拍频信号确定激光器线宽,具有一定的系统稳定性;俞本立等<sup>[6]</sup>通过光纤延时外差法,利用光纤延时线长度与外差光电流谱线上的附加波动关系,测得了 200 kHz 的光谱线宽,但是实测包络谱线反映的是平均线宽;2009年 Benjamin R Biedermann 等<sup>[7]</sup>通过外差法讨论了傅里叶域锁模激光器的噪声和相干特性,观测到激光器输出的光谱线宽达到 20 pm。上述方法都是利用互相关函数理论对激光的相干长度进行测量,得到的仅是一个波长扫描周期内的平均光谱线宽。2010年 Benjamin R Biedermann 等<sup>[8]</sup>利用电光调制器(EOM)方法实现了对激光器输出的直接动态测量,与谐振腔内可调谐滤波器同步的电光调制器使 1.6 ns 时间窗口内的激光进入光谱分析仪,测得吉赫兹量级的光谱线宽,但是这种方法展宽了输出光谱,实测结果较外差法偏大。

本文采用改进的外差法和 EOM 方法,对自行研制的波长扫描激光器输出光谱进行动态测量,并研究波长扫描频率对光谱线宽的影响。

## 2 波长扫描激光器

自行研制的波长扫描激光器系统结构如图 1 所示,由半导体光放大器(SOA)、两个光隔离器、法布里-珀罗可调谐滤波器(FFT-TF)、光耦合器组成环形腔可调谐激光器。SOA(InPhenix, Inc.)载流子寿命小于 500 ps,最大驱动电流 350 mA<sup>[9]</sup>。可调谐滤波器为 Micron Optics 公司生产的宽带法布里-珀罗可调谐滤波器,当驱动电压为 18 V 时波长调谐范围可达 80 nm,滤波器由双通道直接数字频率合成(DDS)信号发生器和大功率放大器驱动,可实现幅度、频率、占空比可调的多种信号驱动方式(正弦、三角、锯齿、方波等)。两个光隔离器用于保证激光在环形腔内的单向传播,经过一个分光比为 7:3 的光耦合器输出。

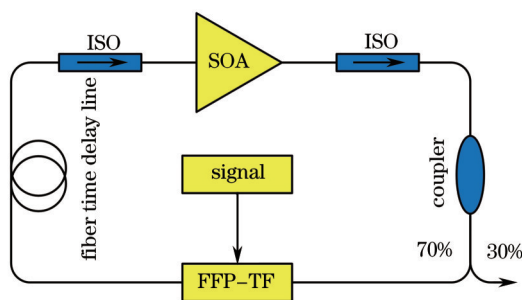


图 1 波长扫描激光器系统结构  
Fig.1 System structure of wavelength-swept laser

## 3 外差法

### 3.1 外差法的测量基础

如果两束光  $E_1(r_1, t_1)$  和  $E_2(r_2, t_2)$  在  $P$  点相遇,假定偏振态相同, $P$  点干涉光强为  $I = \langle EE^* \rangle = I_1 + I_2 + 2 \text{Re} \langle E_1 E_2^* \rangle$ ,定义互相干函数  $\Gamma_{12}(\tau) = \langle E_1(r_1, t) E_2^*(r_2, t + \tau) \rangle$ ,归一化互相干函数(NCCF)为互相干度:  $\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)}} = |\gamma_{12}(\tau)| e^{i\delta}$ ,  $\tau$  为某一路光的延迟时间,  $\delta$  为互相干光束之间的相位差,所以两路相干光产生的干涉光强有<sup>[11]</sup>:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)| \cos \delta, \begin{cases} |\gamma_{12}(\tau)| = 1, \text{ fully coherent} \\ 0 < |\gamma_{12}(\tau)| < 1, \text{ partially coherent} \\ |\gamma_{12}(\tau)| = 0, \text{ incoherent} \end{cases} \quad (1)$$

干涉光强随两路光相位差变化,若  $I_1 = I_2$ ,在完全不相干条件下,无论两路光相位差如何变化,干涉光强不变且为单路光强的 2 倍。实验中不断改变延迟线长度,通过示波器在时域上记录干涉光强首次为单路脉冲光强的 2 倍时的长度值就可以得到输出激光的相干长度。

### 3.2 改进的外差法系统

外差法利用两束具有一定频差的激光经光耦合器在光电二极管(PD)上拍频产生信号,其实验装置如图

2所示。激光器输出直流光进入EOM,可编程脉冲发生器(PPG)输出50 MHz的方波信号驱动EOM,因而激光被调制成脉宽为20 ns的脉冲光,掺铒光纤放大器(EDFA)用于放大脉冲光信号,1×2和3×3耦合器组成马赫-曾德尔干涉仪(MZI),其中一个干涉臂(后文称上臂)利用压电陶瓷(PZT)对信号光进行相位调制(PM),另一干涉臂(后文称下臂)接入不同长度的光纤延迟线改变这路信号的延迟时间,两路信号经3×3耦合器干涉输出至示波器。由于MZI对环境温度变化和振动等因素十分敏感,上下两路光的相位差在不断变化,使得干涉光功率不稳定,所以在3×3耦合器右端上下两路接入一块反馈控制电路板用于调制相位调制器。两路光信号首先各通过PD和取样电阻转换成电压信号并分别输入到差分电路中,差分电路采用平衡探测方式将两路输入信号做差,再将差值信号依次通过滤波、积分、反向比例控制电路处理后变为反馈电信号,实时调制相位调制器中的PZT,补偿因环境因素引起的相位抖动使干涉光功率稳定<sup>[10]</sup>。改变接入的光纤延迟线长度,可得到不同的干涉输出波形,对示波器采集到的实验数据进行处理得到不同延迟线长度对应的 $|\gamma_{12}(\tau)|$ ,从而估计相干长度和光谱线宽。

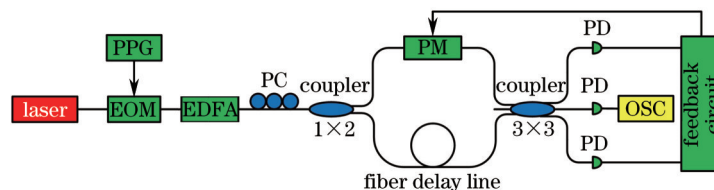


图2 改进的外差法测量系统

Fig.2 Measurement system based on improved heterodyne

### 3.3 外差法测量的实验分析

根据可调谐滤波器的工作方式,光纤环形激光器可工作在三种不同状态<sup>[9]</sup>: 1) 当滤波器直流驱动时,滤波器通带中心波长不变,环形腔为固定波长的单波长激光器。2) 当滤波器透过波长的扫描频率较低,且与环形腔腔长不匹配时,滤波器的滤波窗口随时间变化,环形腔为波长扫描激光器。3) 当滤波器透过波长的扫描频率与激光在环形腔内的环形频率一致或是其整数倍时,环形腔为傅里叶域锁模激光器<sup>[11-12]</sup>。

#### 3.3.1 固定波长工作时的光谱线宽

激光器工作在1)状态下时,激光器输出某一固定波长的激光,经调制器后输出峰值功率约50 μW、脉宽20 ns的矩形脉冲光信号。图3是不同延时线长度下,示波器显示的光脉冲经MZI后的输出,图中黑色波形代表干涉光信号,黄色代表上臂脉冲光,红色代表下臂脉冲光。图3(a)延时线长度为0, MZI上下两干涉臂长度相同,相同功率的光信号完全重合,干涉光功率值(减去基座直流光功率,下同)约为200 μW,近似为单路光信号功率的4倍,表明此时两路光完全相干。图3(b)延时线长度为50 cm,此时干涉光功率值为174 μW,大约是单路光功率的3.5倍,计算得到 $|\gamma_{12}(\tau)|$ 约0.91,此时两路光部分相干。图3(c)延时线为150 cm,计算得到 $|\gamma_{12}(\tau)|$ 约0.79,两路光仍部分相干。图3(d)延时线长度为450 cm,此时干涉光功率约110 uW,约为单路光功率的2倍, $|\gamma_{12}(\tau)|$ 值为0.15,可认为两路光基本不相干。

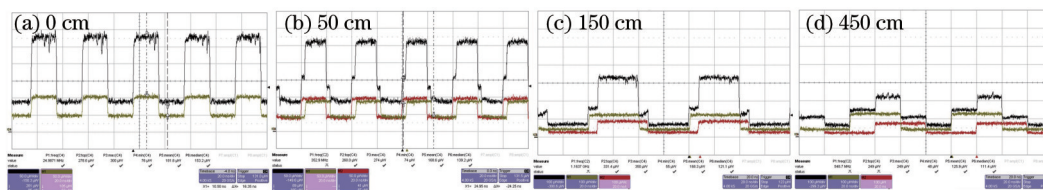


图3 不同延时线长度下光脉冲干涉图样

Fig.3 Optical pulse interference image with different delay lengths

图4(a)是当滤波器两端未接电信号时,激光器输出固定波长激光的光谱图。此时光谱仪测出的光谱线宽为15 pm,这恰好是实验所用光谱分析仪波长分辨率极限,所以光谱线宽的真实值应该比这一数值小。图4(b)是在不同延时线长度L下实验得到的 $|\gamma_{12}(\tau)|$ 和拟合曲线,可以看出,随着延时线长度增大, $|\gamma_{12}(\tau)|$ 值不断减小且在延时线大于300 cm之后稳定在0.15附近。由此可以得出激光器输出的激光相干长度约300 cm,

对应的光谱线宽为 0.75 pm(93.7 MHz)。

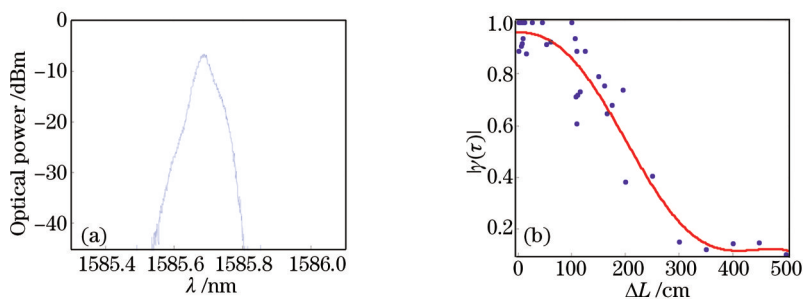


图4 (a) 固定波长工作状态下的输出光谱; (b) 不同延时线长度下的互相干度的模

Fig.4 (a) Output spectrum in single wavelength operation; (b) mode of NCCF with different delay lengths

### 3.3.2 波长扫描工作时的光谱线宽

激光器工作在 2) 状态下, 滤波器透过波长扫描周期与激光环行周期不一致, 激光器输出一系列频率分布的光谱, 图 5(a) 是滤波器两端接入频率为 10 kHz, 电压幅度为 620 mV 的正弦信号时激光器输出光谱图, 图 5(b) 是滤波器两端接入频率为 60 kHz, 电压幅度为 220 mV 正弦信号时激光器输出光谱图。

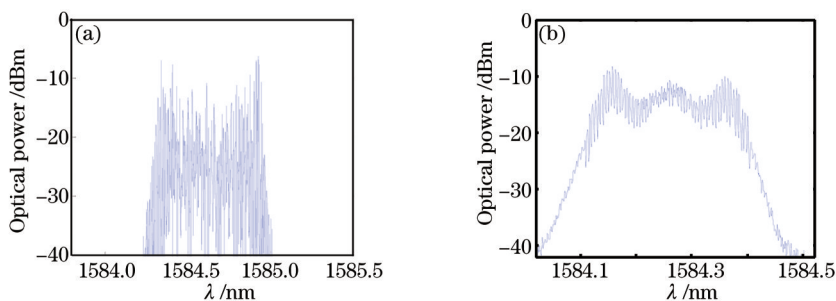


图5 不同滤波器驱动频率下的激光器输出光谱图。(a) 10 kHz; (b) 60 kHz

Fig.5 Output spectrum of laser with different driving frequencies of FFP-TF. (a) 10 kHz; (b) 60 kHz

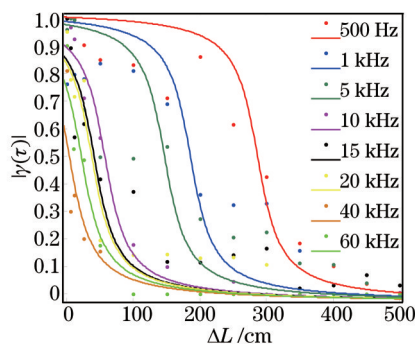


图6 不同驱动频率下, 不同延时线长度对应的  $|\gamma(\tau)|$  值

Fig.6 Mode of NCCF with different delay lengths in wavelength-swept operation

设置不同的滤波器驱动频率, 实验测得输出激光的相干长度也不同。图 6 是不同滤波器驱动频率下, 不同延时线长度对应的  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值。计算结果通过拟合曲线可以看出, 随着滤波器驱动频率的增大,  $|\gamma_{12}(\tau)|-L$  曲线整体向下移动, 实验测得相干长度变小, 光谱线宽变大。滤波器驱动频率若为 100 Hz, 当延时线长度为 300 cm 时  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值为 0.4, 为 350 cm 时  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值为 0.09, 趋近于 0, 可知相干长度在 350 cm 左右, 对应光谱线宽为 0.68 pm; 对于滤波器驱动频率为 60 kHz 时, 当延时线长度为 25 cm 时  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值为 0.48, 为 50 cm 时  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值为 0.17, 趋近于 0, 可以推断相干长度约 50 cm, 对应的光谱线宽为 4.9 pm(6.1 GHz)。

这一现象的原因是由于滤波器扫描波长频率与激光环行频率失配造成的, 在激光器工作在 1) 状态下, 滤波器透过波长窗口始终维持恒值, 所以波长为  $\lambda_1$  的激光绕环形腔一圈后经过滤波器仍能完好无损地通过; 当滤波器工作在 2) 状态下, 其波长扫描频率与激光环形频率不一致, 原来波长为  $\lambda_1$  的激光再次经过滤波

器时,滤波器的透过波长为  $\lambda_2$ ,光谱尖峰就会被削减,造成输出的线宽变大。随着滤波器扫描波长频率增加,这种失配效果会更严重,所以输出激光线宽会更大。

通过外差法测量光谱线宽虽然普遍,但是也具有一些局限性。首先,互相关度  $\gamma(\tau)$  的相位会随着延迟时间  $\tau$  和波长变化,严格意义上说需要扫描周期内每个波长都要测一遍,而这些波长所对应的相干长度间隔在厘米量级上,所以需要的测量点过多。其次,一个扫描周期内的光谱线宽并不时时相同,这种方法只是测量一个扫描周期内的平均线宽。另外,由于空气扰动,室内温度不断变化等原因,相位调制仪内部PZT压电陶瓷相位始终无法稳定,研制的反馈电路只能缓和并不能完全消除其影响,所以干涉图样不稳定,出现上下抖动的现象;另外因光路损耗,不相干光叠加之后光强会小于两路光强之和,这些因素一定程度上影响了测量结果的准确性,导致计算得到的  $|\gamma_{12}(\tau)|$  值存在误差。

## 4 EOM方法

### 4.1 测量系统

图7是利用EOM直接测量波长扫描激光器的实验装置图,信号源产生两路时时同步的电信号,一路正弦波信号驱动激光器内部可调谐滤波器,另一路是占空比为前一路电信号0.1%的脉冲信号用于调制EOM,使EOM变成一个时间宽度很窄的光开关,截取这段时间内的激光,并分别通过光谱仪和示波器进行观察测出光谱线宽。

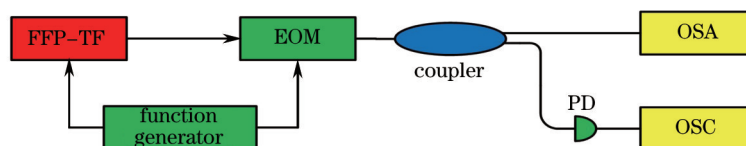


图7 EOM方法测量光谱线宽实验系统

Fig.7 Experiment system of spectral linewidth based on EOM

EOM法可以直接通过电光调制器测出一段时间内平均光谱线宽,由于这一时间段在纳秒量级,所以可以看做是这一时间的瞬时光谱线宽,这种方法方便直接,不需要过多测量点,测量系统比较稳定。

### 4.2 测量结果

图8是滤波器两端接入幅度为200 mV,频率从10~40 kHz的正弦信号时,用EOM方法测得的激光输出光谱。从图中可以看出,频率从10~25 kHz时输出光谱范围在不断变大,两个脉冲的尖峰逐渐拉开距离,而25~40 kHz时光谱范围则不断变小,两个脉冲尖峰逐渐靠拢。这种现象的主要原因是由于滤波器透过波长的扫描频率与环形腔内激光环行频率不一致,滤波器扫描的光谱范围与SOA增益谱之间有一相对速度,当滤波器扫描的光谱范围扫过SOA增益谱的边缘时会在扫描的往返两个阶段形成一个脉冲上升沿和下降沿,当滤波器扫描的光谱范围从SOA边缘处扫过增益谱中心处时,滤波器扫描往返两个阶段各遇到一次SOA增益峰从而形成两个脉冲,图8(b)也是这样。

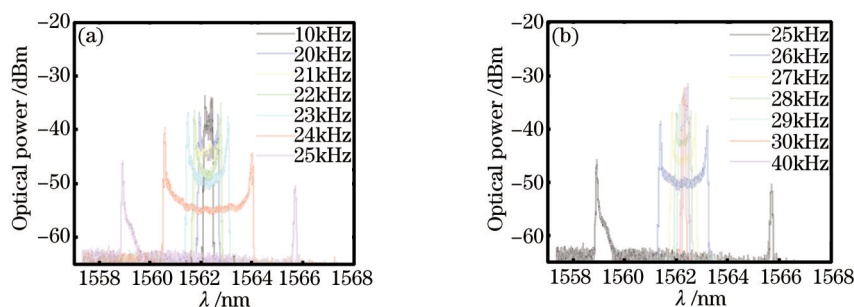


图8 EOM法测得滤波器驱动频率不同时激光器输出光谱图。(a) 10~25 kHz; (b) 25~40 kHz

Fig.8 Output spectrum of laser with different driving frequencies of FFP-TF by using EOM methods. (a) 10~25 kHz; (b) 25~40 kHz

图9(a)是滤波器波长扫描频率为60 kHz时的电光调制器输出的光功率图,光开关窗口是17 ns。光谱仪测得此时激光输出线宽为37 pm,数值比之前通过外差法要大。图9(b)是在不同滤波器透过波长扫描频率下

分别用外差法(图中红线所示)和EOM法(图中蓝线所示)测得的光谱半峰全宽(FWHM)值,可以看出在外差法下,随着滤波器透过波长扫描频率的增加,激光器输出线宽逐渐增大,而EOM方法下未观察到这一趋势,并且EOM方法测得的光谱线宽值比外差法测得的偏大。

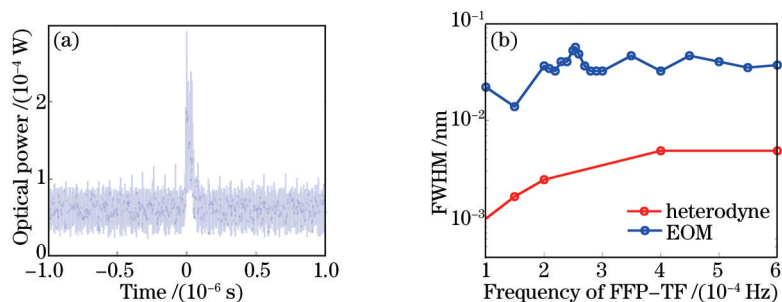


图9 (a) EOM法下调制器输出光强;(b)两种方法下测得的光谱线宽

Fig.9 (a) Output power of modulator by using EOM methods; (b) spectral linewidth measured by using both methods

EOM方法测得的线宽值偏大的主要原因有:

1) 输入电光调制器的脉冲信号会调制激光器的输出激光,其上升下降沿会使光谱发生展宽,这是线宽偏大的主要原因。

2) 由于加载滤波器两端的信号是正弦信号,在正弦信号零点处的电压变化率比极值处的大得多,一个扫描周期内零点处透过波长的变化速率比极值处的要大,因此输出的光谱线宽在扫描中心处的光谱线宽比其他地方要大。

可以采取多种措施来提高EOM法测量输出光谱线宽的准确性。首先,可以减小调制电光调制器的脉冲信号脉宽,即减小其调制的输出激光的时间长度,使测量结果更能与瞬时光谱线宽值接近;其次,可以采用三角信号来驱动滤波器,使其透过波长窗口变化率保持一致,这样一个扫描周期内激光器输出的光谱线宽值较为固定。

## 5 结 论

分别采用外差法和EOM法对波长扫描激光器的输出光谱线宽进行测量。两种方法测得的数据存在误差,外差法需要极多测量点,受外界环境影响较大,实验现象不稳定,不能直接反映激光输出线宽的大小;EOM方法更为直观便捷,但受制于调制器偏置信号的影响,测得的结果偏大。为了对波长扫描激光器运行机制有更为深入的认识,需要对激光器工作在傅里叶域锁模工作条件下时的输出特性进行更多的测量研究。

## 参 考 文 献

- 1 L Xu, B C Wang, V Baby, *et al.*. Optical spectral bistability in a semiconductor fiber ring laser through gain saturation in an SOA[J]. *Photonics Technology Letters*, 2002, 14(2): 149-151.
- 2 Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. *Opt Express*, 2006, 1(5): 3225-3237.
- 3 Deng Yixin. Theory Study of Fourier Domain Mode-Locked Fiber Laser[D]. Tianjin: Nankai University, 2011, 16  
邓一鑫. 傅里叶域锁模光纤激光器理论研究[D]. 天津: 南开大学, 2011, 16.
- 4 Michael A Choma, Marinko V Sarunic, Changhuei Yang, *et al.*. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Opt Express*, 2003, 11(18): 2183-2189.
- 5 T Okoshi, K Kikuchi, A Nakayama. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(16): 630-631.
- 6 Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai, *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(4): 351-354.  
俞本立, 钱景仁, 杨瀛海, 等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, 28(4): 351-354.
- 7 Benjamin R Biedermann, Wolfgang Wieser, Christoph M Eigenwillig, *et al.*. Dispersion, coherence and noise of Fourier domain mode locked (FDML) lasers[C]. *Opt Express*, 2009, 17(12): 9947-9961.

- 8 Benjamin R Biedermann, Wolfgang Wieser, Christoph M Eigenwillig, *et al.*. Direct measurement of the instantaneous linewidth of rapidly wavelength-swept lasers[J]. Opt Letters, 2010, 35(22): 3733-3735.
- 9 Chen Yingchuan. Research of SOA Based Wavelength-Swept Fiber Ring Laser[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 9-12.  
陈颖川. 基于 SOA 的光纤环形腔扫描激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 9-12.
- 10 Zhihao Wang, Zhengyong Li, Lanlan Liu, *et al.*. Laser coherence measurement based on optical pulses interference[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(s2): s20301.
- 11 Liu Yingfeng, Wang Zhi, Liu Lanlan, *et al.*. Spectral characteristics of the SOA-based tunable ring laser with non-uniform injection [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s102010.  
刘英峰, 王 智, 刘岚岚, 等. 半导体光放大器非均匀注入的环形腔激光器光谱特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s102010.
- 12 Liu Simin. Principles and Application of Coherent Optics[M]. Tianjin: Nankai University Press, 2001: 5-18.  
刘思敏. 相干光学原理及应用[M]. 天津: 南开大学出版社, 2001: 5-18.

栏目编辑: 韩 峰