

# 基于傅里叶域模式锁定的扫频光源实验研究

樊哲 孙义斌 张立喆 江琴

北京长城计量测试技术研究所光纤传感技术中心, 北京 100095

**摘要** 扫频光源是光纤传感解调的关键部件,高质量的扫频光源可提高光纤传感系统的信噪比和解调精度。研制了一种基于傅里叶域模式锁定(FDML)的扫频光源。光源采用环形腔结构,由半导体光放大器(SOA)、光纤法布里-珀罗(FP)可调谐滤波器、隔离器、光纤耦合器和光纤延迟线组成。同时设计了基于FP腔的滤波器,对输出光谱进行平坦滤波。得到扫频范围为60 nm(1506~1566 nm),扫频速度为250 Hz,平坦度优于0.3 dB,线宽小于0.16 nm,平均输出光功率为4.53 mW的扫频光源。研制出的扫频光源结构简单、成本低廉、平坦度好,在光纤传感解调系统中作为光源有一定的实用价值。

**关键词** 激光器;扫频光源;傅里叶域模式锁定;半导体光放大器;FP腔滤波器;光纤传感解调

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.020601

## Experimental Study of Fourier Domain Mode Locking Based Swept Source

Fan Zhe Sun Yibin Zhang Lizhe Jiang Qin

Optical Fiber Sensor Technology Center, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China

**Abstract** Swept light source is a key component of fiber optic sensing demodulation. High-quality of the swept light source can improve the signal-to-noise ratio and demodulation precision of fiber sensing system. A Fourier domain mode locking (FDML) operating mode of the swept light source is reported. Semiconductor optical amplifier (SOA), fiber-optic tunable FP filter, isolator, fiber coupler and optical delay line form the swept source ring cavity. While a filter based on Fabry-Perot (FP) cavity is designed to flat the output spectrum. The swept range is 1506~1566 nm, swept speed is 250 Hz, flatness is better than 0.3 dB, full width at half maximum (FWHM) is less than 0.16 nm, the average optical output power is 4.53 mW. The swept source has the advantages of simple structure, low cost and good flatness. As the light source of optical fiber sensor demodulation system, swept source has some practical value.

**Key words** lasers; swept source; Fourier domain mode locking; semiconductor optical amplifier; FP cavity filter; fiber optic sensor demodulation

**OCIS codes** 140.3460; 140.3600

## 1 引言

光源是光纤光栅解调仪的核心器件,光源的波长范围是限制解调仪应用范围的关键参数<sup>[1]</sup>。扫频光源可以在较大光谱范围内输出连续可调谐的激光,同时能够与光纤以及各种光纤器件兼容,具有带宽宽、线宽窄、稳定性优良、噪声强度低和输出功率高等优点,应用于光纤光栅解调仪可提高光纤传感系统的信噪比和解调精度<sup>[2]</sup>。目前,扫频光源以国外的产品为主,美国MOI公司生产的SM130(光纤光栅调制解调仪表)所使用的扫频光源的输出波长范围为80 nm(1510~1590 nm),扫描频率最大可达到2 kHz,是一个大功率、高速度、多传感器的测量系统,但价格较为昂贵。国内生产的成品的扫频光源存在扫频范围窄、扫频频率低、平

收稿日期: 2014-06-02; 收到修改稿日期: 2014-06-27; 网络出版日期: 2015-01-06

作者简介: 樊哲(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感用扫频光源方面的研究。

E-mail: 18511829394@163.com

导师简介: 江琴(1982—),女,博士,工程师,主要从事光纤传感及解调设备研制等方面的研究。

E-mail: 3584736@qq.com

平坦度差等问题,极大地限制了国产光纤光栅解调仪表的性能<sup>[3]</sup>。本文研制的基于半导体光放大器(SOA)的扫频光源具有成本低、平坦度好、扫频范围和扫频频率优于国内同类型产品特点,该扫频光源主要应用于光纤传感解调系统,可提高系统的解调能力。

## 2 扫频光源的基本原理

扫频激光光源的原理示意图如图1所示。扫频激光光源<sup>[4]</sup>一般由光学谐振腔和耦合输出激光部分组成,光学谐振腔包括增益介质和光学调谐滤波器。增益介质的放大自发辐射光或荧光背景通过调谐滤波器在激光谐振腔内振荡多次,当受激辐射所提供的增益超过损耗,在腔内得到放大,建立并达到稳态振荡,从而依次输出扫频激光。影响扫频光源输出光谱性能的关键技术<sup>[5]</sup>是谐振腔的结构、锁模方式和对输出光谱的平坦滤波。

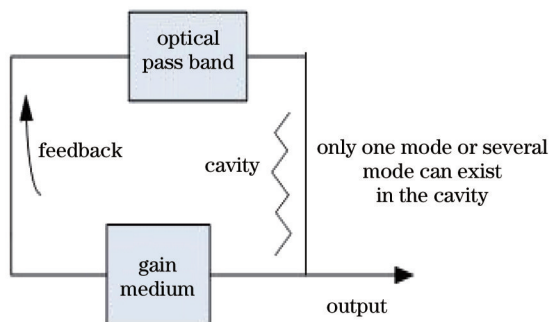


图1 扫频光源原理示意图

Fig.1 Swept source schematic diagram

本实验选择了环形谐振腔<sup>[6]</sup>,相比线性谐振腔,环形谐振腔腔长较长,能够获得稳定、线宽窄、频率高、输出功率高的输出光。

锁模方式是扫频光源的核心技术,传统锁模方式包括主动锁模和被动锁模<sup>[7]</sup>。主动锁模是通过外界信号周期性地调制谐振腔参量,实现腔体纵模之间相位锁定的一种锁模技术。被动锁模是利用光纤或者其他元件中的非线性光学效应对输入脉冲强度的依赖性,实现各纵模相位锁定。主动锁模扫频光源具有脉冲形状对称、重复速率高和中心波长可调等优点。但其脉宽和峰值功率容易受到外界环境、谐振腔内偏振态起伏、超模噪声等因素影响,需要很多复杂的措施来提高系统的稳定性。被动锁模扫频光源由于不需要任何外界的有源调制器件,因此腔体结构简单,可以实现全光纤集成。缺点是其稳态锁模脉冲重复速率取决于腔体长度,通常难以获得高速率锁模脉冲输出。

为了克服上述缺点,MIT小组提出了傅里叶域锁模技术<sup>[8]</sup>,该技术对腔内的激光频率直接进行调制编码,与传统方式相比,扫频速度不再受到激光在腔内建立时间的限制,大大提高了激光扫描频率。

傅里叶域锁模(FDML)光纤激光器的结构如图2所示<sup>[9]</sup>,通过在激光器谐振腔内加入一定长度的光纤作为延迟线,减小腔基频 $f_{\text{cavity}}$ ,使可调谐滤波器的调谐频率 $f_{\text{drive}}$ 刚好和激光器腔基频 $f_{\text{cavity}}$ 相等。这样每个波长在腔内循环一周再次到达滤波器时,刚好滤波器调谐到这个波长使其通过。每个波长在新的扫描周期无需

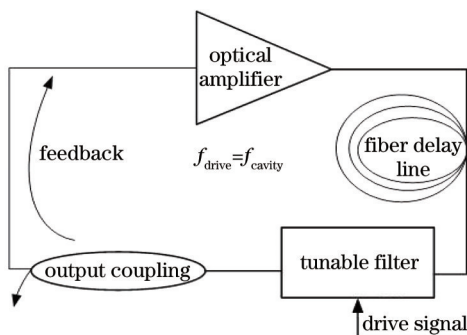


图2 傅里叶域锁模光纤激光器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of Fourier FDML fiber laser

重新由放大自发辐射(ASE)建立激光振荡,而是以上一个周期的该波长作为“种子”形成激光输出。所有波长一系列地“存贮”在腔内,在滤波器的一个调谐周期内,不同的波长以一定次序依次通过。这样,扫频速度不再像原来短腔激光器那样受限于激光振荡建立的时间,而只受限于滤波器的调谐速度。由于滤波器调谐速度的限制,一般需要在腔内加入一定长度的光纤延迟线以满足傅里叶域锁模的条件,虽然激光器腔长变长了,但扫描的速度大大增加。

### 3 扫频光源的设计

扫频光源采用了FDML的工作模式和环形腔结构,其基本结构如图3所示。SOA、隔离器、光纤FP可调谐滤波器和光纤耦合器构成扫频光源的环形腔。SOA作为增益介质,在直流驱动电流的驱动下产生一个自发辐射谱,通过隔离器和光纤法布里-珀罗(FP)可调谐滤波器进行滤波和选频。选频之后经过光纤耦合器分为两路光,一路光作为输出,另一路光通过隔离器重新回到半导体光放大器内,此时SOA作为一个增益元件,对FP可调谐滤波器滤波选频后的光信号进行放大。当SOA的增益和环形腔内的损耗平衡时,建立起稳定的激光振荡,从而形成稳定的频率可调谐的激光输出。光纤延迟线用于减小谐振腔的基频,使得谐振腔基频和FP可调谐滤波器的频率匹配,实现傅里叶域模式锁定。耦合输出部分的可调平坦滤波器起到对输出光谱平坦滤波的作用。

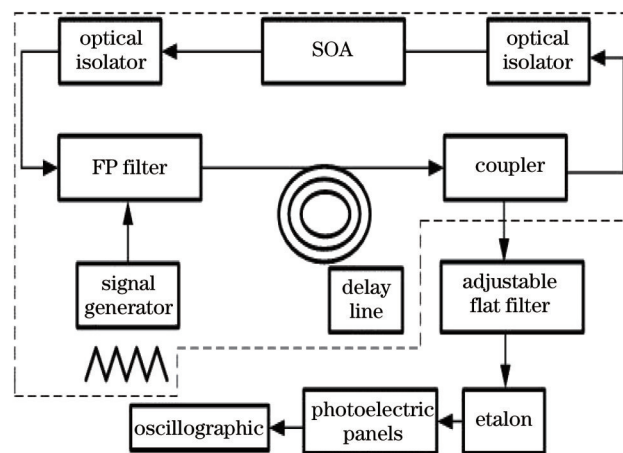


图3 扫频光源结构(虚线框内为光源部分)

Fig.3 Swept source structure (dashed box as a light source part)

扫频光源的锁模过程是:SOA自发辐射光进入FP腔进行窄带滤波,输出满足当前腔长的模式,其余模式被滤除,腔内循环过程中,输出的模式再次进入SOA被放大,最后通过耦合器输出部分能量,其余的继续在腔内循环放大输出。FP腔的腔长随着驱动信号的周期变化而变化,使得允许通过的模式不断变化,实现可调谐输出的功能。每个模式在每次循环到达FP腔时,正好对应FP腔的腔长变化到允许该模式通过,每个模式被精确锁定。光纤FP可调谐滤波器在某个特定的波长保持时间 $\tau_{\text{gate}}$ 的计算公式为

$$\tau_{\text{gate}} = \frac{\Delta\lambda}{\eta \cdot f_{\text{drive}} \cdot \Delta\lambda_{\text{lg}}}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{lg}}$ 为滤波器的调谐带宽(nm), $\Delta\lambda$ 为FP可调谐滤波器的单线线宽(nm), $f_{\text{drive}}$ 为FP可调谐滤波器的驱动频率(Hz), $\eta = \pi$ 为三角波扫描的双向性和非线性的因数。

各种各样的因素会引起扫频周期和光在激光腔内传播一周的时间不完全匹配,但要求其差值必须小于 $\tau_{\text{gate}}$ 。为了达到锁模的效果,在扫频光源的环形腔内引入了一段光纤延迟线,使得不同波长的光在共有的腔内周期性传播。

传统的基于薄膜滤波技术的增益平坦滤波器,可工作于透射模式或反射模式。一般由两个以上的FP腔构成,其腔之间通过介质反射层隔离,每个腔包括多层结构,生产工艺较复杂,插入损耗相对较大<sup>[10]</sup>。本实验设计制作的FP滤波器,采用公母式的连接方式将多个FP腔连接起来,公口和母口的光纤端面构成一个FP腔,通过控制两端面的距离和相对倾斜程度达到平坦滤波的效果。

## 4 实验结果

本结果所用的 SOA 在电流驱动为 250 mA, 温度控制为 20 °C 的条件下的自发辐射光谱如图 4 所示。其峰值波长为 1510 nm, 峰值功率达到 22 dBm, 波长范围为 200 nm (1408~1608 nm), 3 dB 带宽为 71.4 nm。两端输出光功率相近,  $P_{ASE.IN}=2.19$  mW,  $P_{ASE.OUT}=2.08$  mW。

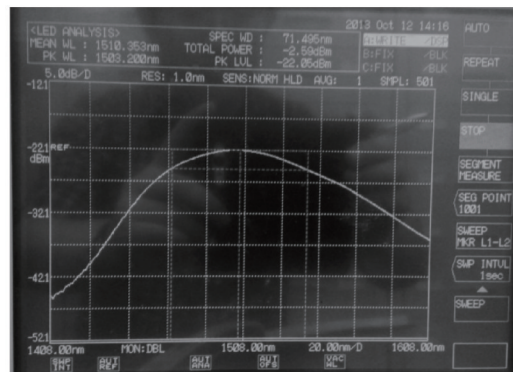


图 4 SOA 自发辐射光谱

Fig.4 Spontaneous radiation spectrum of SOA

实验中, SOA 的驱动电流根据环形腔内部结构的不同, 在 50~300 mA 内调整, 温度驱动为 20 °C, 光纤 FP 可调谐滤波器加载峰值为  $\pm 10$  V, 频率为 250 Hz 的三角波信号。耦合器的分光比有 2:98、5:5 和 1:9 三种比例。光纤延迟线的长度有 0.57、1.20、1.94、2.51 km。

当耦合器分光比为 2:98, 其中 2% 作为反馈光时, 驱动电流大于 250 mA, 不加光纤延迟线, 环形腔内满足增益大于损耗, 得到比较稳定的输出光谱, 但由于反馈回路光比例低, 输出光谱能量低, 输出光谱范围窄; 2% 作为输出光时, 由于反馈回路的光能量过大, 加入 2.51 km 光纤延迟线, 驱动电流大于 100 mA, 输出光谱出现削波现象, 因此驱动电流要在 50~100 mA 范围内。反馈回路的光能量过大制约着驱动电流的调整范围, 输出光谱能量低, 输出光谱范围窄。

耦合器分光比为 5:5 时, 反馈回路的光和输出光 1:1 的情况下, 加入光纤延迟线, 驱动电流在 150~250 mA 范围内可输出稳定光谱, 但波长范围仅包括 C 波段, 驱动电流大于 250 mA, 输出光谱出现削波现象。

耦合器分光比为 1:9, 10% 作为反馈光时, 只有在驱动电流大于 200 mA 的条件下, 才能得到稳定的输出光谱, 但同样存在能量低、波长范围窄的问题; 10% 作为输出光时, 在驱动电流为 200 mA, 光纤延迟线为 1.20 km 条件下, 得到扫频范围为 1506~1566 nm, 扫频速度为 250 Hz, 平坦度小于 1 dB, 线宽为 0.16 nm, 平均输出光功率为 4.53 mW 的输出光谱, 如图 5 所示。

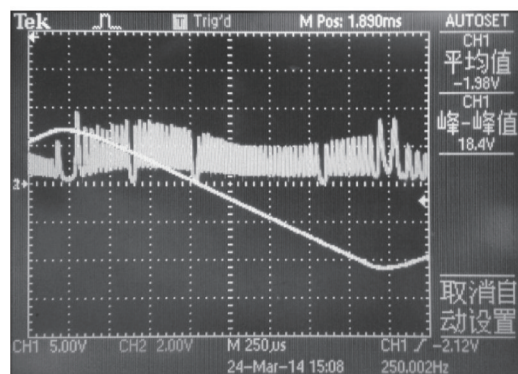


图 5 三角波驱动信号一个下降沿时间内的光谱分布

Fig.5 Spectral distribution of triangle wave driving signal a falling time

在输出端加入 FP 腔滤波器后, 增大 SOA 的驱动电流, 加入一定长度的光纤延迟线, 得到的输出光谱如图 6 和图 7 所示。

可以看到, 经过平坦滤波后, 输出光谱在其他指标变化很小的情况下, 平坦度指标明显提高, 从小于 1 dB

减小到小于 0.3 dB。

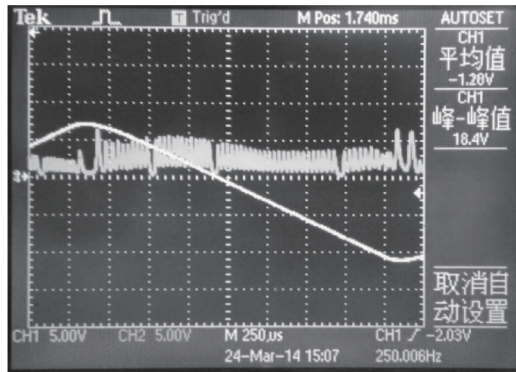


图6 平坦滤波后的输出光谱

Fig.6 Output spectrum after flat filter

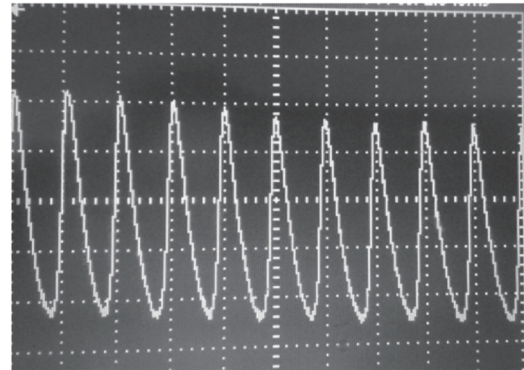


图7 输出光谱局部

Fig.7 Local of output spectrum

## 5 结 论

研制了一种基于 SOA 的扫频光源,采用了傅里叶域锁模方式提高光源的扫描速度。并且研制了基于 FP 腔的滤波器,实现了对输出光谱平坦滤波的功能,显著改善了输出光谱的平坦度。所研制的光源指标如下:扫频范围为 60 nm(1506~1566 nm),扫频速度为 250 Hz,平坦度小于 0.3 dB,线宽为 0.16 nm,平均输出光功率为 4.53 mW。

基于 SOA 的扫频光源是一项新兴并有广泛应用前景的技术。后续的研究工作可以着手于提高扫频光源的扫频范围、扫频速度和输出光谱的稳定性等方面。同时构建出合理的理论模型,分析该类扫频光源结构中,各元件参数指标对于输出光谱质量的影响,进而优化各项指标。扫频范围宽,扫频速度快,稳定度高,平坦度好的扫频光源对于光纤传感解调有着一定的现实意义和应用前景。

## 参 考 文 献

- Han Ping, Zhou Zude, Cheng Songlin. Design of high speed frequency swept light source for grating demodulator [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(6): 817-820.  
韩 屏,周祖德,程松林.光栅解调器的高速扫频光源设计[J].光电子·激光,2010,21(6):817-820.
- Chen Minghui. Development of Swept Laser Source for Optical Coherence Tomography [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
陈明惠.扫频激光光源的研制[D].杭州:浙江大学,2011.
- Zhang Lin. Research on SOA-Based Tunable Fiber Ring Laser [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.  
张 琳.基于 SOA 的可调谐环形腔光纤激光器的研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- Wu Wei, Liu Xin, Chen Ting. Tunable laser based on semiconductor optical amplifier [J]. Applied Laser, 2008, 28(1): 42-44.  
吴 薇,刘 辛,陈 婷.基于半导体光放大器的可调谐激光器[J].应用激光,2008,28(1):42-44.
- Liang Ying. Fourier Domain Model Locking Swept Laser Technology and Its Application In Fiber Sensor System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.  
梁 影.傅里叶域锁模扫频激光器技术及其在传感领域的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- Liu Yingfeng, Wang Zhi, Zhang Limei, et al.. Lasing of the tunable fiber ring laser based on semiconductor optical amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001.  
刘英峰,王 智,张丽梅,等.基于半导体光放大器的可调谐环形腔激光器的激光建立过程[J].中国激光,2012,39(12):1202001.
- Chen Yingchuan. Research of SOA Based Wavelength-Swept Fiber Ring Laser [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.  
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.
- 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.

- 9 Min Yong Jeon, Jun Zhang, Zhongping Chen. Characterization of Fourier domain mode-locked wavelength swept laser for optical coherence tomography imaging [J]. Opt Express, 2008, 16(6): 3727-3737.
- 10 Gao Fan, Chen Xueqing, Zhao Hao, *et al.*. A few kinds of technique to carry out GFF [J]. Optical Communication Technology, 2011, 4: 34-36.
- 高 凡, 陈学卿, 赵 灏, 等. 增益平坦滤波器的几种实现技术[J]. 光通信技术, 2011, 4: 34-36.

栏目编辑: 殷建芳