

# 傅里叶域锁模扫频激光光源

陈明惠 丁志华 吴彤 王川 洪威

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 报道了一种傅里叶域锁模(FDML)的扫频激光光源。扫频激光光源由激光谐振腔和光功率增强单元组成,激光谐振腔主要包含增益介质、调谐滤波器和延迟线。增益介质采用了两个串联的半导体光放大器,调谐滤波器则采用了基于利特罗结构的光栅旋转多面镜。研制的 FDML 扫频激光光源的中心波长为 1290 nm,扫频速度为 14.8 kHz,扫频范围为 108 nm,半峰全宽为 61 nm,输出平均功率达 3 mW。扫频光源是光学频域成像系统的关键部件,该扫频光源的研制将有力推动光学频域实时成像技术的发展。

**关键词** 激光器;光学相干层析技术;光学频域成像;扫频光源;傅里叶域锁模;调谐滤波器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0614002

## Fourier-Domain-Mode Locking Swept Laser Source

Chen Minghui Ding Zhihua Wu Tong Wang Chuan Hong Wei

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A Fourier-domain mode locking (FDML) swept laser source is reported. The swept laser source is composed of a laser resonator and a power amplification unit. The laser resonator includes gain medium, tunable filter and delay line. Serial implementation of two semiconductor optical amplifiers is adopted in the laser as gain amplification. The tunable filter consists of polygon scanner and grating in Littrow configuration. The tuning speed of the developed swept laser centered at 1290 nm is 14.8 kHz with an average output power of 3 mW. The tuning range is 108 nm with 3 dB bandwidth of 61 nm. Swept laser source is one key element in optical-frequency-domain imaging system, and the development of this FDML swept laser source will promote the development of real time optical-frequency-domain imaging technology.

**Key words** lasers; optical coherence tomography (OCT); optical-frequency-domain imaging; swept laser source; Fourier-domain mode locking; tunable filter

**OCIS codes** 140.3460; 170.4500; 230.6080; 070.2615

## 1 引 言

20 世纪 90 年代初发展起来的一种高分辨无损光学成像技术——光学相干层析技术(OCT),利用光在组织中的单次后向散射光子保留光源相干性的特点,通过低相干光源的相干门把其他散射光排除在外,从而获得生物样品内部信息<sup>[1]</sup>。时域 OCT 技术发展不到 10 年之后,出现了基于扫频激光光源的光学频域成像(OFDI)技术<sup>[2,3]</sup>。作为第二代的

OCT, OFDI 技术优势的发挥,很大程度取决于关键部件——扫频激光光源的性能,包括扫频线性度、扫频速度、瞬时线宽、调谐范围和输出功率等。

出现至今十几年来,用于 OFDI 的扫频激光光源得到极大关注并迅速发展<sup>[4]</sup>。扫频激光光源的核心是激光谐振腔,激光谐振腔通常由增益介质和调谐滤波器组成。目前采用的增益介质主要有半导体光放大器(SOA)<sup>[5,6]</sup>、超辐射发光二极管<sup>[2]</sup>、锥形芯

收稿日期: 2010-12-12; 收到修改稿日期: 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60978037, 60878057)资助课题。

作者简介: 陈明惠(1981—),女,博士研究生,主要从事生物医学光子学方面的研究。E-mail: cmhui43@gmail.com

导师简介: 丁志华(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事生物医学光子学方面的研究。

E-mail: zh\_ding@zju.edu.cn (通信联系人)

片放大器<sup>[7]</sup>和掺铒光纤放大器<sup>[8]</sup>,其中 SOA 应用最为广泛。调谐滤波器主要有声光可调滤波器<sup>[9]</sup>,光纤法布里-珀罗调谐滤波器<sup>[10,11]</sup>、法布里-珀罗电光调制器<sup>[12]</sup>、光栅/扫描振镜调谐滤波器<sup>[13]</sup>、光栅/旋转多面镜调谐滤波器<sup>[5,14,15]</sup>、光栅/微电机系统扫描振镜调谐滤波器<sup>[16]</sup>和超结构光栅分布式布拉格反射器<sup>[17]</sup>,其中研究最多的是光栅/扫描振镜调谐滤波器、光栅/旋转多面镜调谐滤波器和光纤法布里-珀罗调谐滤波器。法布里-珀罗调谐滤波器在高速调谐时,前后向扫描的光谱形状差异影响 OFDI 的成像质量。光栅/扫描振镜调谐滤波器的波长扫描速度受振镜转动速度的限制。光栅/旋转多面镜调谐滤波器在同样驱动频率下,其扫频速度比振镜滤波器提高了  $n/2$  倍( $n$  是多面镜的面数),且可以实现线性扫描。根据激光谐振腔中光子渡越时间与调谐滤波器调谐周期的可比性,可将扫频光源的谐振腔分为短腔和长腔两大类。传统短腔谐振的扫频激光光源,在调谐滤波器的滤波窗口期间内,被滤波器滤出的色光在短腔内多次谐振增益放大后形成激光,激光建立时间被限制在与滤波器分辨率相对应的滤波器开启时间以内。因此,增益介质的有限增益限制了激光调谐速度,扫频光源的瞬时线宽、输出功率和扫频速度之间存在权衡问题。本课题组研制了基于法布里-珀罗调谐滤波器<sup>[11]</sup>和光栅/旋转多面镜调谐滤波器<sup>[15]</sup>的短腔扫频激光光源。2006 年, R. Huber 等<sup>[18]</sup>提出了不同于传统短腔的傅里叶域锁模(FDML)长腔谐振技术。不同于传统短腔谐振的扫频激光光源,FDML 扫频光源采用了光子渡越周期与调谐周期相匹配的长腔谐振技术。FDML 扫频光源只受限于滤波器的调谐速度,因此可以实现更高速的扫频,目前已报道的扫频速度最高可达到几百千赫兹<sup>[19]</sup>。

本文报道了一种基于光栅/多面镜调谐滤波器的双 SOA 串联型 FDML 快速线性扫频激光光源。在谐振腔内采用不同于短腔<sup>[15]</sup>的长于 10 km 光纤,光子渡越周期与调谐周期相匹配。调谐滤波器由光纤准直镜、旋转多面镜和光栅组成,采用了利特罗布局,结构紧凑,易于调节。自准直镜来的准直光直接照射在旋转多面镜上,再反射到衍射光栅,被衍射的色散光谱按原路返回。增益介质采用串联的双 SOA,用于获得更大的增益系数,以弥补长光纤谐振腔的损耗。FDML 技术实现了各色光在长光纤谐振腔内的同时谐振,有利于扫频激光光源各项性能的提高。

## 2 方法与系统

图 1 所示为双 SOA 串联型 FDML 扫频激光光源的结构示意图,由串联连接的两个 SOA、偏振控制器(PC)、光纤循环器,调谐滤波器、延迟线和输出光纤耦合器(FC)(60%输出)组成的激光谐振腔,以及由两端带光隔离器(ISO)的提升级 SOA 的光功率增强单元构成。FDML 扫频激光光源的谐振条件是激光通过环形谐振腔所需时间刚好与调谐滤波器的调谐周期相匹配,即

$$\frac{n}{f_{\text{filter}}} = \frac{L_{\text{cavity}}}{V}, \quad (1)$$

式中  $n$  是谐波次数,  $f_{\text{filter}}$  是调谐滤波器扫描频率,  $L_{\text{cavity}}$  是激光谐振腔的腔长,  $V$  是在光纤中的光速。这种基于长光纤延迟线的 FDML 技术,某色光经长腔传播到滤波器时,滤波器刚好调谐到使该波长的光通过的窗口,使各色光谱同时在激光谐振腔振荡,从而得到了准连续模式输出。因此,激光光源扫频速度不再受各色光谱在腔内建立激光谐振的时间限制,而只受限于光栅/多面镜调谐滤波器的扫描速度。长腔内激光谐振的模式竞争同时也提高了扫频激光光源的瞬时线宽。

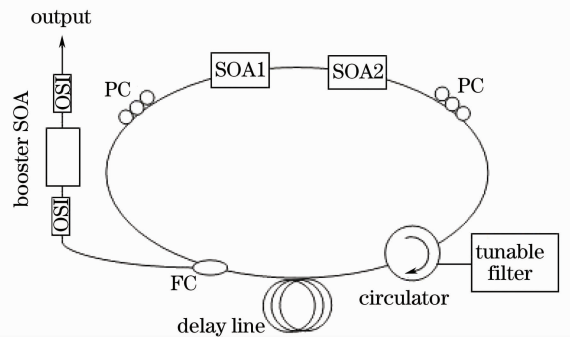


图 1 基于串联双 SOA 型 FDML 扫频激光光源  
Fig. 1 Serial double-SOA configuration based on FDML swept laser source

谐振腔内串联的两个 SOA(Inphenix Inc., 小信号增益 22.2 dB)的驱动电流都是 300 mA。延迟线为 13.763 km 的单模光纤,有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.4677$ ,损耗为 0.35 dB/km。PC 用来调节激光谐振腔的光偏振态,通过调节腔内光偏振态。提升级 SOA 的注入电流在 250 mA,主要用来增大输出光功率。ISO 是用来避免提升级 SOA 的自发辐射光对腔内扫频激光的影响以及 OFDI 系统的反射光的影响。将相关参数(光纤中光速  $V = 2.04 \times 10^8$  m/s,腔长  $L_{\text{cavity}} = 13.784$  km)代入(1)式,可以求得对应于基波( $n=1$ )的理论谐振频率为 14.8283 kHz。

如图 2 所示,调谐滤波器由光纤准直镜、衍射光栅和旋转多面镜构成,并采用了利特罗布局,使得衍射光栅工作在自准直状态。宽带光通过光纤准直镜准直后照射到旋转多面镜,并经多面镜的某一反射面反射到光栅平面,在此发生宽带光的色散,其中满足利特罗条件(衍射角等于入射角)的衍射光谱成分,将按原光路返回到准直镜。图 2(a)是中心波长  $\lambda_0$  衍射角等于入射角  $\alpha_0$  的时刻,这时有且只有  $\lambda_0$  返回到准直镜。当多面镜旋转时,经多面镜同一反射面反射到光栅的入射角发生连续改变,满足利特罗条件的时序光谱依次回到准直镜,完成周期性的连续调谐。图 2(b)展示的是波长  $\lambda_n$  满足利特罗条件衍射角等于入射角  $\alpha_n$  时的状态。

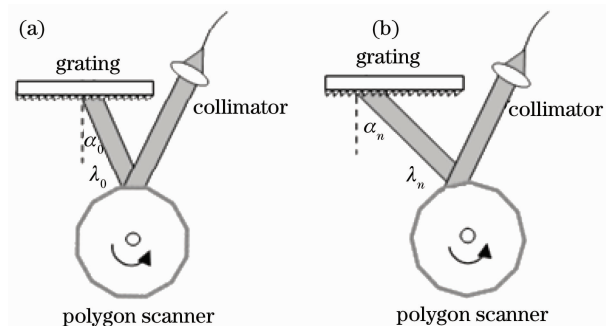


图 2 利特罗结构的光栅/多面镜调谐滤波器。(a)中心波长  $\lambda_0$  返回,(b)调谐波长  $\lambda_n$  返回

Fig. 2 Schematic diagram of grating/polygon tunable filter of Littrow configuration. (a) central wavelength  $\lambda_0$  returned, (b) long wavelength  $\lambda_n$  returned

实验中准直镜( $f = 2.0 \text{ mm}$ ,最佳准直距离:  $1 \sim 20 \text{ cm}$ )放置在离旋转多面镜  $12 \text{ cm}$ ,工作在保持较好的准直距离内。多面镜控制器由外接函数发生器提供的周期性 TTL 信号来驱动多面镜旋转,多面镜转速可以通过函数发生器任意调节。光栅(Newport Inc.,  $400 \text{ lp/mm}$ ,  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ )放置在离旋转多面镜(Lincoln Laser Inc., 72 面,面长为  $2.77 \text{ mm}$ ,面厚度为  $6.35 \text{ mm}$ )的反射面很靠近的位置(大约  $3 \text{ cm}$ ),以减少因多面镜转动导致的衍射光斑在光栅上的移动量。

### 3 实验结果

由于条件限制,本实验中串联使用的两个 SOA 的自发辐射光谱范围并不完全一致,而是如图 3 所示。两个 SOA 的中心波长分别是  $1259 \text{ nm}$  和  $1304 \text{ nm}$ ,光谱范围分别是  $1200 \sim 1345 \text{ nm}$  和  $1240 \sim 1380 \text{ nm}$ ,半峰全宽分别是  $69 \text{ nm}$  和  $67 \text{ nm}$ 。两个 SOA 的自发辐射光谱范围重叠部分为  $1240 \sim 1345 \text{ nm}$ 。虽然两个 SOA 串

联使用后的有效光谱范围变小了,但增益系数得到了很大的提高,可以弥补长长光纤谐振腔的损耗,进而提高激光输出功率。

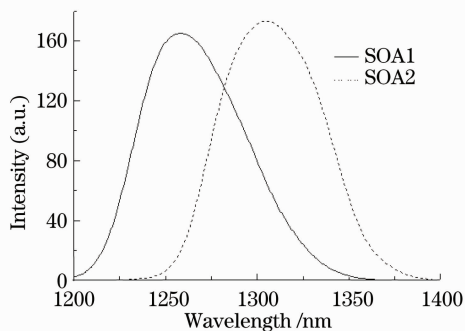


图 3 两个 SOA 的自发辐射光谱

Fig. 3 Spontaneous emission spectra of two SOA

图 4 是串联双 SOA 型 FDML 扫频激光光源的时间光谱,从图中可看出扫频激光光源占空比接近  $25\%$ 。旋转多面镜的转速是  $206 \text{ r/s}$ ,扫频激光光源扫频速度达到  $14.8320 \text{ kHz}$ 。在更高速扫描速度下,由于函数发生器输出驱动信号的频率发生漂移,以及多面镜高速旋转时的机械运动导致的扫描频率漂移,使得腔内偏离谐振频率无法得到稳定的锁模。因此,可以通过改进旋转多面镜的放置的机械设计,得到更高速旋转时稳定的扫描频率,这时便可减少光纤长度来匹配扫描速度,从而获得更高速的扫频速度的激光光源。

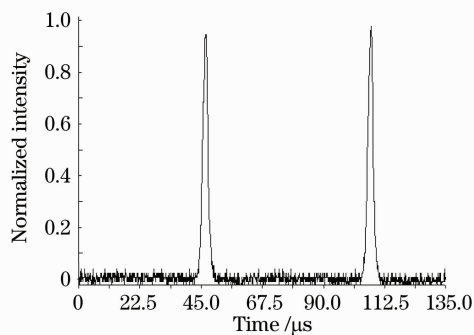


图 4 扫频激光光源在  $14.8 \text{ kHz}$  扫频速度下的时间光谱

Fig. 4 Normalized transient intensity profile of swept laser at the tuning frequency of  $14.8 \text{ kHz}$

传统的扫频激光光源平均输出光功率,随着扫频频率的减小而增大,是单调变化的。FDML 扫频激光光源输出光功率随扫频频率变化如图 5 所示,输出激光功率对扫频频率极其敏感,在谐振频率点光功率最大,无论在扫频频率比谐振频率高或低的方向,输出光功率都迅速下降,并近似对称。

功率计测得双 SOA 串联型 FDML 扫频激光光

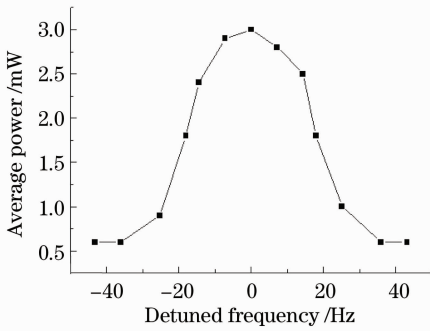


图 5 远离谐振频率 14.8 kHz 的失谐频率下的输出光功率

Fig. 5 Output power as a function of detuned frequency of 14.8 kHz

源输出平均光功率大约是 3 mW。图 6 所示是提升级 SOA 在不同的注入电流下扫频激光光源输出光功率的变化。光源输出光功率随着注入电流非线性增大。从实验中得到在注入电流增至 250 mA 的过程,得到光功率放大并且光谱没有出现形变;但在注入电流超过 250 mA 以上时,光功率虽然继续增大,但是光谱形状开始产生形变,到 300 mA 时出现明显的凹陷。这是因为提升级 SOA 在达到饱和时出现的光谱烧孔效应。

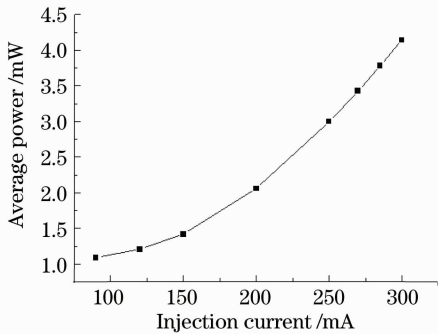


图 6 提升级 SOA 不同注入电流下的扫频激光光源输出功率

Fig. 6 Average output power at different inject currents to booster SOA

图 7 是基于利特罗结构的光栅/多面镜调谐滤波器的双 SOA 串联型 FDML 扫频激光光源的光谱。有带光功率增强单元的扫频激光光源中心波长为 1290 nm,扫频范围为 108 nm(1240~1348 nm),半峰全宽为 61 nm。从图中可看出提升级 SOA 不仅提高了光强,扩展了光谱带宽,并且对光谱形状整形使之更加对称。

## 4 结 论

研制了基于利特罗结构光栅/多面镜调谐滤波

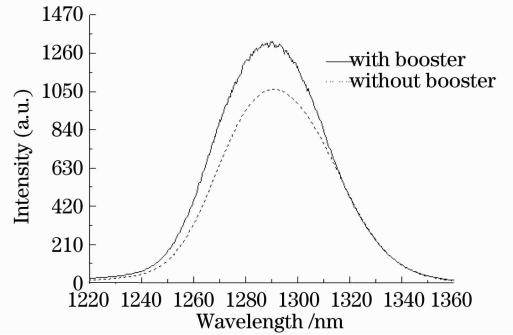


图 7 双 SOA 串联型 FDML 扫频激光光源光谱  
Fig. 7 Spectra of series FDML swept laser with or without double booster SOA

器的双 SOA 串联型 FDML 扫频激光光源。FDML 技术能确保各色光在谐振腔内同时谐振,缓解了瞬时线宽与调谐速度之间矛盾,提高了扫频激光光源的性能。扫频激光光源中心波长为 1290 nm,扫频光谱范围 108 nm,半峰全宽为 61 nm。利特罗结构光栅多面镜调谐滤波器结构简单紧凑,易于调节,能够实现激光光谱的单向、线性、快速扫描。对应于多面镜 206 r/s 的旋转速度,扫频激光光源的扫频速度达 14.8 kHz。激光谐振腔采用了双 SOA 串联连接的方式,提高了谐振腔的增益系数,使得扫频光源的平均输出功率达到 3 mW。

## 参 考 文 献

- 1 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, **254**(5035): 1178~1181
- 2 S. R. Chinn, E. A. Swanson, J. G. Fujimoto. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5): 340~342
- 3 B. Golubovic, B. E. Bouma, G. J. Tearney *et al.*. Optical frequency-domain reflectometry using rapid wavelength tuning of a Cr<sup>4+</sup>: forsterite laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(22): 1704~1706
- 4 Ding Zhihua, Chen Minghui, Wang Kai *et al.*. High-speed swept source and its applications in optical frequency-domain imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2469~2476  
丁志华, 陈明惠, 王凯等. 快速扫频光源及其在光学频域成像中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2469~2476
- 5 S. H. Yun, C. Boudoux, G. J. Tearney *et al.*. High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1981~1983
- 6 Minghui Chen, Zhihua Ding, Tong wu *et al.*. High-speed wide tuning range wavelength swept laser around 1310 nm for frequency domain OCT [C]. *SPIE*, 2008, **7280**: 72800A
- 7 Sebastian Marschall, Thomas Klein, Wolfgang Wieser *et al.*. FDML swept source at 1060 nm using a tapered amplifier [C]. *SPIE*, 2010, **7554**: 75541H
- 8 Roctest Ltd.. Tunable laser with tilted-mirrors interferometer and dynamic wavelength reference [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71952J-1
- 9 S. Y. Ryu, J. W. You, Y. K. Kwak *et al.*. Design of a prism to compensate the image-shifting error of the acousto-optic

- tunable filter [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17138~17147
- 10 R. Huber, M. Wojtkowski, K. Taira *et al.*. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3513~3528
- 11 Minghui Chen, Zihua Ding, Lei Xu *et al.*. All-fiber ring-cavity based frequency swept laser source for frequency domain OCT [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 202~205
- 12 M. Kourogi, Y. Kawamura, Y. Yasuno *et al.*. Programmable high speed (about 1 MHz) Vernier-mode-locked frequency-swept laser for OCT imaging [C]. *SPIE*, 2008, **6847**: 68470Z1
- 13 S. H. Yun, C. Boudoux, M. C. Pierce *et al.*. Extended-cavity semiconductor wavelength-swept laser for biomedical imaging [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 293~295
- 14 W. Y. Oh, S. H. Yun, G. J. Tearney *et al.*. 115 kHz tuning repetition rate ultrahigh-speed wavelength-swept semiconductor laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(23): 3159~3161
- 15 Chen Minghui, Ding Zihua, Tao Yuanhao *et al.*. Development of broad-band high-speed linearized swept laser source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0204001
- 陈明惠, 丁志华, 陶渊浩 等. 宽带快速线性扫频激光光源的研制 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0204001
- 16 Kouki Totsuka, Keiji Isamoto, Tooru Sakai *et al.*. MEMS scanner based swept source laser for optical coherence tomography [C]. *SPIE*, 2010, **7554**: 75542Q-1
- 17 T. Amano, H. Hiro-Oka, D. H. Choi *et al.*. Optical frequency-domain reflectometry with a rapid wavelength-scanning superstructure-grating distributed Bragg reflector laser [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(5): 808~816
- 18 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
- 19 R. Huber, D. C. Adler, J. G. Fujimoto. Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2975~2977