

宽带快速线性扫频激光光源的研制

陈明惠 丁志华 陶渊浩 吴彤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 报道了一种基于光栅多面镜调谐滤波器的宽带快速线性扫频激光光源。调谐滤波器由光栅和旋转多面镜组成,采用了非望远镜型利特罗布局,以简化滤波光学系统。在激光谐振腔中采用了自发辐射光谱范围互为拓展的双半导体光放大器,并将二者并联使用以确保宽光谱范围。研制的扫频激光光源的中心波长为 1312 nm,扫频光谱范围为 170 nm,半峰全宽为 116 nm,对应于多面镜 695 r/s 的转速,扫频速度达到 50 kHz,相应的激光输出平均功率为 2 mW。该宽带快速线性扫频激光光源,尤其适用于高分辨扫频光学相干层析成像系统,轴向分辨率能达到 6.5 μm 。

关键词 医用光学;光学相干层析成像;扫频激光光源;调谐滤波器;旋转多面镜

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0204001

Development of Broad-Band High-Speed Linearized Swept Laser Source

Chen Minghui Ding Zhizhua Tao Yuanhao Wu Tong

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

Abstract A broad-band high-speed linearized swept laser source based on grating/polygon mirror tunable filter is reported. In order to facilitate the filtering system, the tunable filter consists of polygon scanner and grating in Littrow telescope-less configuration. Parallel implementation of two semiconductor optical amplifiers with different wavelength ranges is adopted in the laser resonator for broad-band light amplification. Center wavelength of the developed swept laser source is 1312 nm with a turning range of 170 nm and 3dB bandwidth of 116 nm. A repetition frequency up to 50 kHz with an average output power of 2 mW is realized while the polygon is scanned at a speed of 695 r/s. This high-speed broad-band linearized swept laser source is especially applicable to high resolution swept source based optical coherence tomography, of which the axial resolution can reach to 6.5 μm .

Key words medical optics; optical coherence tomography; swept laser source; tunable filter; polygon scanner

OCIS codes 170.3890; 170.4500; 230.6080; 140.3460; 070.2615

1 引言

新型激光技术的广泛运用,促进了生物医学光学成像技术的发展^[1]。扫频激光光源是一种光谱时间编码的光源,在扫频光学相干层析成像(SSOCT)或者称为光学频域成像(OFDI)中具有重要应用。SSOCT可以非侵入性无损获取生物组织内部断层结构乃至生理功能信息,是新一代的相干层析成像(OCT)技术^[2~5]。光源的扫频速度决定成像速度,光谱调谐范围决定轴向分辨率,瞬时线宽限制了成

像深度,而光功率与系统灵敏度密切相关。因此,为确保 SSOCT 的成像质量,期望中的扫频激光光源需满足快速、宽调谐范围、窄瞬时线宽、合适的输出功率和线性扫频的要求。

基于扫频激光光源的 SSOCT 研究始于 1997 年,美国 MIT 的 S. R. Chinn 等^[6]报道了用于 SSOCT 的外腔型扫频激光光源,其中心波长为 840 nm,扫频范围为 25 nm,扫频速度为 10 Hz,峰值光功率为 35 mW。十几年来,基于不同调谐滤波方法的扫频

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-07-19

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: zhding@zju.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:040090225)

激光光源相继出现^[7],如采用光纤法布里-珀罗调谐滤波器、光栅与扫描振镜或者旋转多面镜调谐滤波器的扫频激光光源。美国 MIT 的 R. Huber 等^[8~10]、加州大学的 M. Y. Jeon 等^[11]以及陈明惠等^[12]都采用了压电陶瓷激励的光纤法布里-珀罗调谐滤波器,实现了基于正弦驱动信号的高速、双向波长扫描(短波到长波的前向扫描和长波到短波的后向扫描),但前向和后向扫描的光谱形状存在差异,影响了 SSOCT 的成像质量。三角波驱动可以实现低速的线性波长扫描,但高速的线性波长扫描难以实现。哈佛大学的 S. H. Yun 等^[13]以及美国 MIT 的 V. J. Srinivasan 等^[14]采用光栅扫描振镜滤波器来实施调谐滤波,但波长扫描速度受振镜转动速度的限制。S. H. Yun 等^[15]采用光栅旋转多面镜作为调谐滤波器,并采用了望远系统布局。由于多面镜面数较多,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),而望远系统布局可用于调节光栅色散角度范围与多面镜尺度及扫描角度范围匹配,进而实现了单向、高速、线性的波长扫描。为进一步拓展滤波器的调谐范围,该小组又采用了双望远系统布局,将自由光谱范围提高 4 倍^[16]。但望远系统布局的调谐滤波器,光学系统结构复杂,光路调节困难,因而光源的稳定性较难保证。

本文报道了一种基于光栅多面镜调谐滤波器的

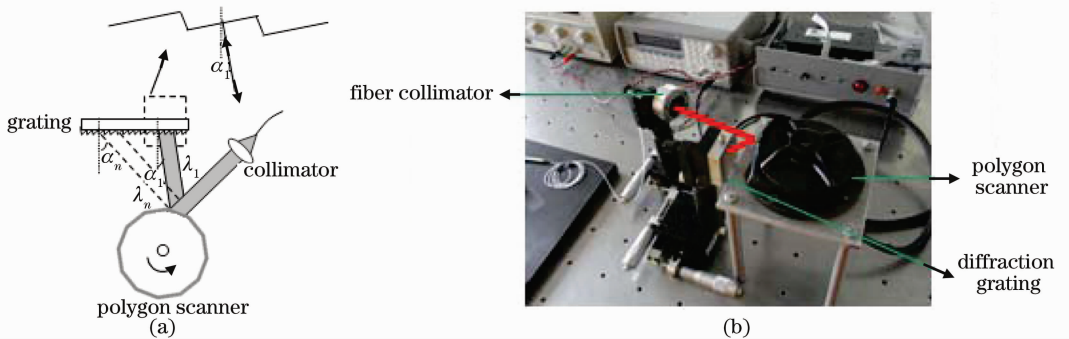


图 1 利特罗结构的光栅多面镜调谐滤波器原理图(a)与实物图(b)

Fig. 1 Schematic diagram (a) and experimental drawing (b) of grating and polygon tunable filter in Littrow configuration

光栅以自准直状态工作,这时衍射角等于入射角 α ,光栅方程可写成

$$2d\sin\alpha = m\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, m 为光栅衍射级, λ 为波长。(1)式即为利特罗装置光栅的调谐方程,当光栅常数 d 和衍射级次 m 确定时,被调谐激光波长 λ 就是角 α 的函数。当旋转多面镜时,入射到光栅的准直光

宽带快速线性扫频激光光源。调谐滤波器由光栅和旋转多面镜组成,但采用了非望远镜型利特罗布局,因而结构紧凑,并且易于调节。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。该调谐滤波器不仅不需要复杂的望远系统,而且能确保 2 倍于单望远系统型滤波器^[15]的自由光谱范围。此外,为满足激光光源的宽光谱要求,在激光光源的谐振腔中设置了并联型双半导体光放大器(SOA)。两个 SOA 的自发辐射光谱范围互为拓展,可以弥补单一 SOA 有限带宽的限制。

2 方 法

如图 1(a)所示,调谐滤波器由光纤准直镜、衍射光栅和旋转多面镜组成,采用了非望远镜型利特罗布局,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。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(从 α_1 到 α_n),满足利特罗条件的不同波长(从 λ_1 到 λ_n)回到准直镜,完成一个周期的连续调谐。

入射角和衍射角发生连续改变,这时满足利特罗条件的波长,实现连续的调谐。

(1)式对波长 λ 求导,得到自准直光栅的角色散公式为

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\alpha}. \quad (2)$$

由此得到该光栅和旋转多面镜调谐滤波器的自由光

谱范围(FSR, R_{FS})为

$$R_{FS} = 2 \frac{\Delta\alpha}{(d\alpha/d\lambda)} = 2d\Delta\alpha \cos \alpha_0, \quad (3)$$

式中 $\Delta\alpha$ 为返回到准直镜的衍射光扫描的角度范围, α_0 为中心波长的衍射角。因为反射镜的反射光线转过的角度是反射面转过的 2 倍, 所以利特罗结构返回的衍射光扫描的角度范围是旋转多面镜旋转角度范围的 2 倍。因而利特罗结构的调谐滤波器的自由光谱范围是单望远系统调谐滤波器^[15]的 2 倍。

如图 1(b) 所示, 准直镜(OFR, $f = 2.0$ mm, best collimation distance: 1~20 cm)放置在离旋转多面镜 12 cm 左右, 工作在保持较好的准直距离内。多面镜控制器外接函数发生器给周期 TTL 信号驱动多面镜旋转, 这种控制器外接法可以通过函数发生器任意调节多面镜的转速。光栅(Newport Inc., 400 lp/mm, 30 × 30 mm)放置在离旋转多面镜(Lincoln Laser Inc., 72 facets, facet length: 2.77 mm, facet thickness: 6.35 mm)的反射面很靠近的位置(大约 3 cm), 减少当多面镜转动时在光栅上衍射光斑位置移动范围。把 $d = 1/400$ mm, $\Delta\alpha = 4\pi/72$, $m = 1$, $\lambda = 1312$ nm, 代入(1)式和(3)式, 得到理论上的自由光谱范围为 835 nm。

图 2 为并联型双 SOA 扫频激光光源的结构示意图, 由并联型 SOA 和 3 dB 光纤耦合器、偏振控制器、光纤循环器、调谐滤波器以及输出光纤耦合器(60%输出)组成。两个 SOA (Inphenix Inc., small-signal gain of 22.2 dB) 的驱动电流都是 300 mA, 通过光纤耦合器(FC)并联连接。SOA 的自发辐射光经光纤循环器到调谐滤波器, 滤波选频后回到谐振腔建立激光振荡, 经光纤耦合器输出扫频激光。偏振控制器(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得到最大的扫频范围和光功率输出。

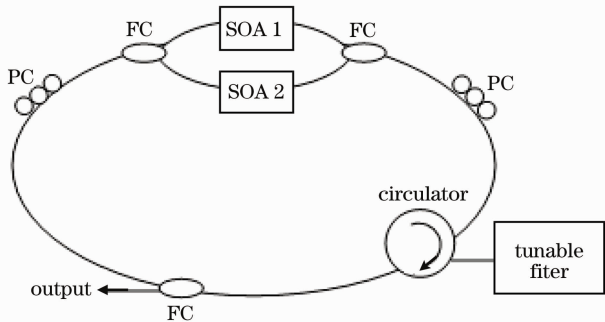


图 2 基于并联型双 SOA 的扫频激光光源

Fig. 2 Parallel SOAs configuration based swept laser source

3 实 验

两个 SOA 的自发辐射光谱如图 3 所示。两个 SOA 的中心波长分别为 1259 nm 和 1304 nm, 光谱范围分别为 145 nm (1200~1345 nm) 和 140 nm (1240~1380 nm), 半峰全宽(FWHM)分别为 69 nm 和 67 nm。两个 SOA 的自发辐射光谱范围有重叠部分 105 nm (1240~1345 nm), 短波和长波互为拓展 40 nm 和 35 nm。

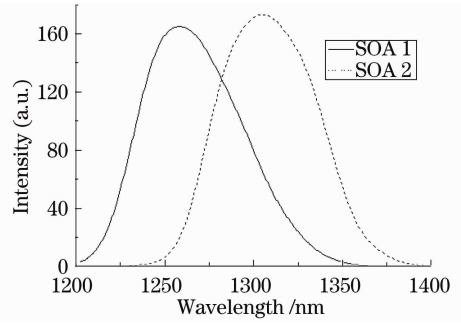


图 3 两个 SOA 的自发辐射光谱

Fig. 3 Spontaneous emission spectra of two SOAs

图 4(a) 和 (b) 分别是基于利特罗结构的光栅/多面镜调谐滤波器的单 SOA 和并联型双 SOA 扫频激光光源的光谱。旋转多面镜的转速是 695 r/s, 扫频激光光源扫频速度达到 50 kHz。单 SOA 扫频激光光源中心波长为 1309 nm, 扫频范围为 130 nm, FWHM 为 61 nm。并联型双 SOA 扫频激光光源中心波长为 1312 nm, 扫频光谱范围为 170 nm, FWHM 为 116 nm, 理论上轴向分辨率能达到 $6.5 \mu\text{m}$ 。对比图 4(a), (b) 和图 3 的光谱范围, 扫频激光光谱相比自发辐射光谱有一定的红移。这是因为激光振荡建立时, SOA 中产生四波混频, 不同波长的两三个光波相互作用将产生另一波长处的光波, 实现波长变换, 所以扫频激光光谱应产生一定频移。采用并联 SOA, 大大扩展了扫频激光光源的扫频范围, 从 130 nm 左右增至 170 nm, FWHM 从 61 nm 增至 116 nm。

图 5 是在 50 kHz 扫频速度下并联型双 SOA 的扫频激光光源的时间光谱。从图中可看出扫频光源占空比大约为 25%。要提高占空比就要提高调谐周期内衍射角的扫描范围, 并且保证多面镜旋转时, 照射到多面镜上的高斯光束的 $1/e^2$ 宽度小于多面镜的每面镜的宽度, 避免截掉光斑, 使一部分光谱成分无法回到谐振腔, 减小了激光光源的光谱扫频范围。

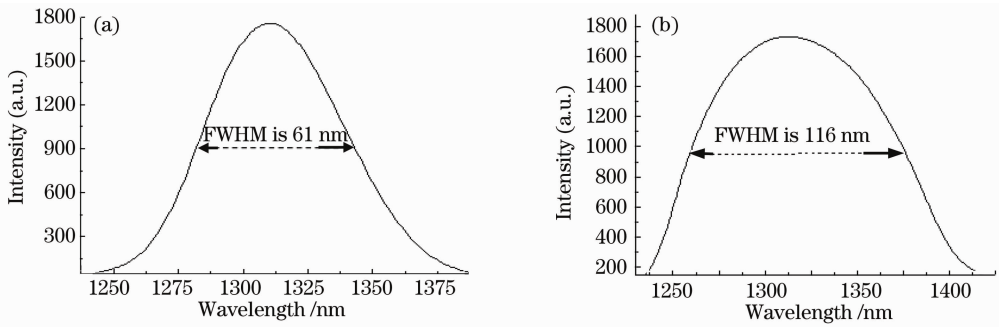


图 4 单 SOA(a)和并联型双 SOA(b)的扫频激光光源光谱

Fig. 4 Spectra of swept lasers with single SOA (a) and paralleled double SOAs (b)

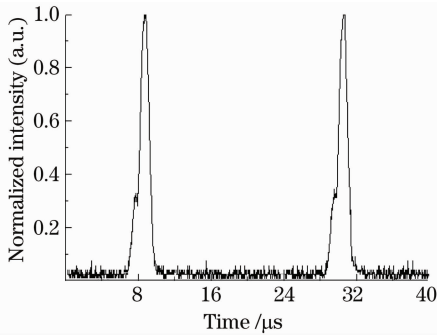


图 5 扫频激光光源在 50 kHz 扫频速度下的时间光谱

Fig. 5 Normalized transient intensity profile of the swept laser at the frequency of 50 kHz

由于两个 SOA 是通过两个 3 dB 耦合器连接的,光功率各损失 50%,所以平均输出功率并没有比单个 SOA 作为增益介质的振荡腔的激光光源强,功率计测得并联型双 SOA 扫频激光输出平均功率大约是 2 mW。从实验得到平均输出功率随着扫频频率的减小而增大,如图 6 所示,这是因为在低频时腔内光损耗会小一点。

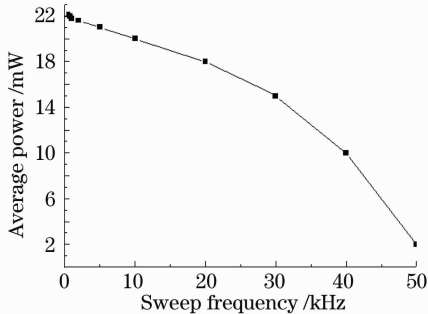


图 6 不同扫频速度下的平均输出功率

Fig. 6 Average output power versus the sweep frequency

4 结 论

基于利特罗结构的光栅多面镜调谐滤波器的并联 SOA 型宽带快速线性扫频激光光源扫频速度可达到 50 kHz,对应于多面镜的旋转速度是 695 r/s。

扫频激光光源中心波长为 1312 nm,扫频光谱范围宽至 170 nm,半峰全宽为 116 nm。扫频光源激光平均输出功率为 2 mW。激光谐振腔采用自发辐射光谱范围互为拓展的双 SOA 增益介质并联连接的方式,得到非常宽的光谱调谐范围,比单 SOA 系统的光谱调谐带宽增加了大约 40 nm,半峰全宽增加了 55 nm。利特罗结构光栅多面镜调谐滤波器无需复杂的望远系统,结构简单紧凑,易于调节,实现快速、单向、线性扫描,并且自由光谱范围是单望远系统调谐滤波器的 2 倍。该结构扫频激光光源适用于要求对样品高轴向分辨的快速成像的 SSOCT 系统中,具有一定的现实意义和应用前景。

参 考 文 献

- Li Xiangyin, Yao Minyu, Li Zhuo *et al.*. Laser Principle, Technology and Application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004
- 李相银,姚敏玉,李卓等. 激光原理技术与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- A. F. Fercher, W. Drexler, C. K. Hitzenberger *et al.*. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2003, **66**(2): 239~303
- B. Liu, M. E. Brezinski. Theoretical and practical considerations on detection performance of time domain, Fourier domain, and swept source optical coherence tomography[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2007, **12**(4): 044007
- K. Wang, Z. Ding, T. Wu *et al.*. Development of a non-uniform discrete Fourier transform based high speed spectral domain optical coherence tomography system[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 12121~12131
- Wu Tong, Ding Zhihua. Development of 20 kHz swept source optical coherence tomography system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 503~508
- 吴彤,丁志华. 20 kHz 扫频光学相干层析系统 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 503~508
- 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
- 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

- 8 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
- 9 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
- 10 C. M. Eigenwillig, W. Wieser, B. R. Biedermann *et al.*. Subharmonic Fourier domain mode locking[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 725~727
- 11 M. Y. Jeon, J. Zhang, Q. Wang *et al.*. High-speed and wide bandwidth Fourier domain mode-locked wavelength swept laser with multiple SOAs [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (4): 2547~2554
- 12 Minghui Chen, Zhihua 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
- 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 V. J. Srinivasan, R. Huber, I. Gorczynska *et al.*. High-speed, high-resolution optical coherence tomography retinal imaging with a frequency-swept laser at 850 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 361~363
- 15 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
- 16 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