

500 kHz 高速扫频光源的研制

陆龙钊^{1,2}, 张大鹏², 徐雨薇², 卢建南², 孙先胜², 王兴龙², 许克昫^{2*}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²珠海光库科技股份有限公司, 广东 珠海 519080

摘要 基于半导体光放大器和高速光纤法布里-珀罗滤波器, 搭建了一个用于产生高速扫频激光的短环形腔。滤波器从长波到短波扫描时, 关闭半导体光放大器的偏置电流, 可以获得 50% 占空比的扫频激光。借助交织器, 可以获得占空比为 100% 的扫频激光。再利用二级半导体光放大器, 可以进一步提高扫频激光的输出功率。经测试, 本扫频激光的扫描频率为 500 kHz, 中心波长为 1550 nm, 扫描范围达到 67 nm, 有效相干长度为 6.5 mm, 平均输出功率大于 20 mW。

关键词 激光光学; 扫频光源; 光纤法布里-珀罗滤波器; 环形腔; 相干长度

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0436001

Development of 500 kHz High-Speed Swept Source

Lu Longzhao^{1,2}, Zhang Dapeng², Xu Yuwei², Lu Jiannan², Sun Xiansheng²,
Wang Xinglong², Hsu Kevin^{2*}¹School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Advanced Fiber Resources (Zhuhai), Ltd., Zhuhai, Guangdong 519080, China

Abstract Based on a semiconductor optical amplifier (SOA) and a high-speed fiber Fabry-Perot filter, we built a short ring cavity for producing high-speed swept laser. During the filter sweeping from the long wavelength to the short wavelength, if the bias current of the SOA was switched off, we could acquire a swept laser with a duty cycle of 50%. With the help of an interleaver, the swept laser with a duty cycle of 100% could be obtained. Furthermore, after a second SOA was applied, the output power of the swept laser was further improved. Finally, it was experimentally demonstrated that the swept laser featured a swept frequency of 500 kHz, a center wavelength of 1550 nm, a sweep range of 67 nm, an effective coherence length of 6.5 mm, and an average output power of greater than 20 mW.

Key words laser optics; swept source; fiber Fabry-Perot filter; ring cavity; coherence length

OCIS codes 140.3600; 140.3560; 140.5960

光学相干层析成像技术(OCT)是一种基于低相干光干涉原理, 具有非侵入、非接触、分辨率高、成像速度快等优点的光学成像技术。该技术自 1991 年提出至今, 已经从第一代的时域 OCT 发展到现在的傅里叶域 OCT。其中, 后者包括了基于宽带光源的谱域 OCT 和基于扫频光源的扫频 OCT^[1-2]。近年来, 傅里叶域 OCT 在生物医学和工

业检测领域得到了快速的发展和广泛的应用^[3-6]。作为扫频 OCT 的核心器件, 扫频光源一般由增益介质、谐振腔和可调滤波器组成, 如基于光纤法布里-珀罗(FP)滤波器和环形腔制作的傅里叶域锁模(FDML)扫频光源^[7]、基于微机电系统(MEMS)FP可调滤波器和直腔制作的外腔扫频光源^[8]以及基于声光可调滤波器和环形腔制作的扫频光源^[9]等。此

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: “珠江人才计划”引进领军人才项目(2016LJ06D531)

* E-mail: kevinhsu@fiber-resources.com

外,基于短环形腔和光纤 FP 滤波器也是制作扫频激光的一种方案。该方案最早由 Huber 等^[10]提出,近年来 Jun 等^[11]结合交织器的技术,利用 51 cm 的环形腔最终实现 300 kHz 的扫频激光输出。然而,由于腔长难以缩短,基于短环形腔技术制备超高速扫频激光存在很大的困难。本文搭建了腔长仅为 38 cm 的环形腔,配合 250 kHz 高速振动的光纤 FP 滤波器,最终制备出扫描频率高达 500 kHz 的扫频激光。

光纤 FP 滤波器是环形腔中的核心器件^[11],它的振动频率决定了扫频激光的实际扫描频率。本研究采用压电陶瓷作为驱动器^[12],通过优化机械结构最终制作出的光纤 FP 滤波器能支持高达 250 kHz 的扫描振动。图 1 给出了滤波器在峰-峰值电压为 $2V_{pp}$ 时的机械频率响应。从图中可以看出,该滤波器在 300 kHz 范围内存在三个共振峰,其中,250 kHz 的共振峰可以用于制作 500 kHz 的扫频光源。

本扫频光源包括电路和光网络两大部分^[12]。其中,光网络主要包括环形腔、交织器和二级半导体光放大器(SOA)。环形腔由一个光纤 FP 滤波器、一个 SOA 和两个光隔离器组成。光纤 FP 滤波器后的隔离器具有 20% 的反射输出功能。在滤波器的高速扫描下,由于四波混频效应,从长波到短波的扫描激光在 SOA 中获得的增益相对较小^[10]。因此,本工作选择关闭从长波到短波扫描时 SOA 的偏置电流,使环形腔输出占空比为 50% 的扫频激

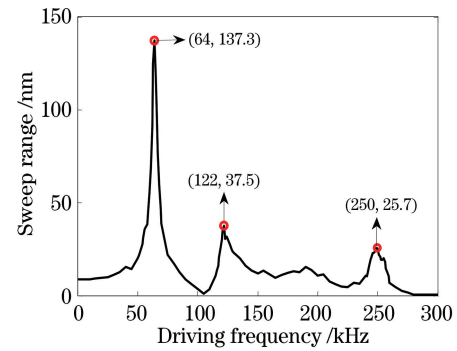


图 1 光纤 FP 滤波器在 $2V_{pp}$ 扫描振幅下的机械频率响应

Fig. 1 Mechanical frequency response of the fiber FP filter at scan amplitude of $2V_{pp}$

光。该扫频激光经过交织器错位叠加后,占空比变为 100%。最后再通过二级 SOA 放大,进一步提高扫频激光的输出功率。图 2 给出了扫频激光通过二级 SOA 放大后的输出特性。其中,图 2(a)是光谱仪的测试结果,从图中可以看出,扫频激光的中心波长为 1550 nm,扫频范围约 67 nm。图 2(b)是示波器的测试结果,图中上方曲线是滤波器两端的电压信号,下方是扫频激光通过光电探测器探测得到的信号,从图中可以看出,滤波器的振动频率为 250.1 kHz,扫频激光的扫描频率为 500.3 kHz。值得一提的是,由于控制电路的驱动能力有限,滤波器的峰-峰值电压只能达到约 $5V_{pp}$,这限制了扫频激光的扫频范围。

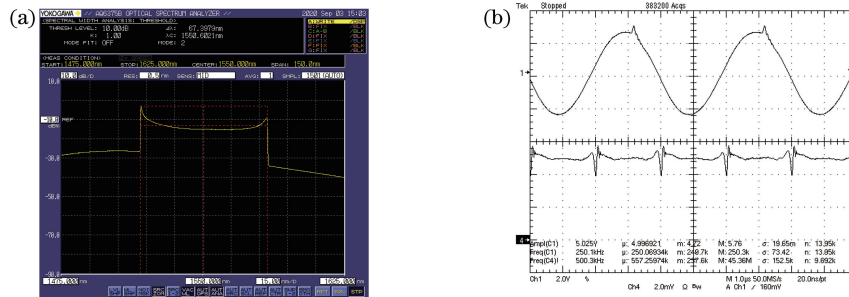


图 2 扫频激光的输出。(a)光谱特性;(b)时域特性

Fig. 2 Output of the swept laser. (a) Spectral characteristic; (b) time-domain characteristic

本研究采用两种方案测试扫频激光的相干长度^[12]。第一种方案是基于可调马赫-曾德尔干涉仪(MZI),通过测试干涉条纹幅值随 MZI 光程差的变化,可得扫频激光的相干长度。从零光程开始,当干涉条纹的幅值下降到一半时,可调 MZI 的光程差即为扫频激光的相干长度。图 3 给出了基于该方案测试扫描周期中心时刻干涉条纹幅值下降至一半的结

果。图 3(a)为对应零光程差附近的干涉条纹,图 3(b)为幅值下降一半的干涉条纹,其中对应光程差为 6.2 mm。因此,扫描周期中心时刻的相干长度约为 6.2 mm。实际上,扫频激光的相干长度是瞬时的^[13]。在扫描周期内,中心时刻的扫描速度最快,对应的相干长度最小。

第二种方案是基于 OCT 成像测试平台^[12],通

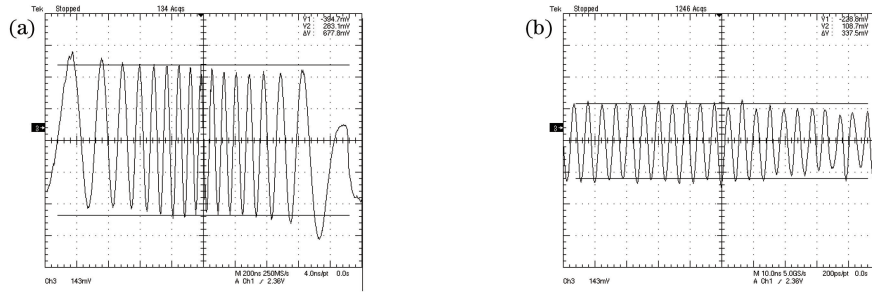


图 3 基于可调 MZI 和示波器对扫频激光相干长度的测试。(a)零光程差附近的干涉条纹;(b)幅值下降一半的干涉条纹
Fig. 3 Coherence length of swept laser tested by adjustable MZI and oscilloscope. (a) Interference fringe at near-zero MZI optical path-length difference; (b) interference fringe with 50% amplitude fall-off

过测试点扩展函数(PSF, f_{PSF})随成像深度 d 的变化得到扫频激光的相干长度。PSF 的测试结果如图 4 所示。从图中可以看出,随着成像深度的增加,PSF 的峰值逐渐下降。由于光电转换中,功率满足平方律方程,因此 PSF 下降 6 dB 的位置即为光源的相干长度。另外,因为 OCT 的样品光一般为后向散射光,故干涉信号的光程差为样品成像深度的 2 倍。图 4 的结果表明,本扫频激光的相干长度约为 6.5 mm。该数值略大于扫描周期中心时刻的瞬时相干长度,可以看作是扫频激光的有效相干长度。

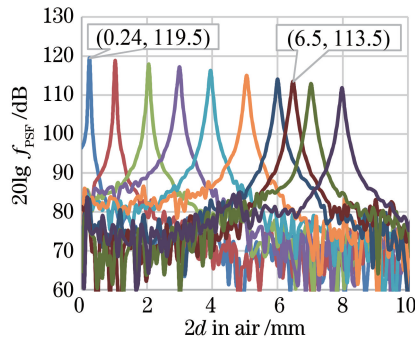


图 4 扫频激光点扩展函数幅值下降与成像深度的关系
Fig. 4 Relationship between PSF amplitude fall-off of the swept laser and imaging depth

本扫频激光系统采用的两个 SOA 均为 Aeon SAC20r。在滤波器振动频率为 250 kHz,峰-峰值电压为 $5V_{\text{pp}}$,环形腔 SOA 偏置电流为 360 mA,二级 SOA 偏置电流为 400 mA 时,扫频激光的平均功率达到了 20 mW。该功率已经能满足大多数的 OCT 应用。

本研究基于高速光纤 FP 滤波器、短环形腔和交织器,制作了扫描频率达 500 kHz 的扫频光源。基于可调 MZI 测试干涉条纹幅值变化的方案,得到扫频激光在扫描周期中心时刻的相干长度为 6.2 mm。基于 OCT 成像平台测试 PSF 峰值变化的方案,得到该扫频激光的有效相干长度约为

6.5 mm。通过二级 SOA 的放大,扫频激光的平均功率可以达到 20 mW 以上。本扫频光源结构简单、成本低廉,有望给高速扫频光源的应用领域提供一种有竞争力的新选择。

参 考 文 献

- [1] Leitgeb R, Hitzinger C K, Fercher A F. Performance of Fourier domain versus time domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 889-894.
- [2] Yasuno Y, Madjarova V D, Makita S, et al. Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for *in vivo* investigation of human anterior eye segments [J]. *Optics Express*, 2005, 13(26): 10652-10664.
- [3] Tang P J, Li Y D, Rakymzhan A, et al. Measurement and visualization of stimulus-evoked tissue dynamics in mouse barrel cortex using phase-sensitive optical coherence tomography [J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(2): 699-710.
- [4] Wei B, Yuan Z L, Tang Z L. Three-dimensional imaging of tumor tissues based on photothermal optical coherence tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0411002.
魏波, 袁治灵, 唐志列. 基于光热光学相干层析技术的肿瘤组织三维成像 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0411002.
- [5] Han T, Qiu J R, Wang D, et al. Optical coherence microscopy and its application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207004.
韩涛, 邱建榕, 王迪, 等. 光学相干层析显微成像的技术与应用 [J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207004.
- [6] Hecker S, Weber R, Graf T. Position sensing of ultrashort pulsed laser-welded seams in glass by optical coherence tomography [J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(2): 022003.
- [7] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier Domain Mode Locking (FDML): a new laser

- operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3225-3237.
- [8] Johnson B, Atia W, Kuznetsov M, et al. Coherence properties of short cavity swept lasers[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(2): 1045-1055.
- [9] Chen M H, Fan Y P, Zhang H, et al. Swept source laser based on acousto-optic tuning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2658-2664.
陈明惠, 范云平, 张浩, 等. 基于声光调谐的扫频光源[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2658-2664.
- [10] Huber R, Wojtkowski M, Taira K, et al. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles[J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3513-3528.
- [11] Jun C, Villiger M, Oh W Y, et al. All-fiber wavelength swept ring laser based on Fabry-Perot filter for optical frequency domain imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25805-25814.
- [12] Lu L Z, Zhang D P, Zeng H C, et al. Study on the fabrication of high-speed swept source based on short ring cavity [J]. 2020, 40(24): 2414001.
陆龙钊, 张大鹏, 曾厚财, 等. 基于短环形腔制备高速扫频光源的研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2414001.
- [13] von Niederhäusern T, Meier C, Duell M, et al. Instantaneous coherence length measurement of a swept laser source using a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7889: 78892R.