

一种高速宽带扫频光源的研究

汪鹏飞^{1,2}, 童杏林^{1,2*}, 邓承伟², 熊巧^{1,2}, 金春姣²

¹ 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

² 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 针对现有扫频光学相干层析成像中扫频范围不足的问题, 提出了一种基于量子点半导体光放大器(QD-SOA)与量子阱半导体光放大器(QW-SOA)并联的傅里叶域锁模(FDML)高速宽带扫频光源。研究了两种 SOA 的输出特性, 并将中心波长为 1310 nm 的 QW-SOA 与中心波长为 1280 nm 的 QD-SOA 并联置于光纤环形腔内, 结合 FDML 技术, 研制了一种高速宽带扫频光源。该扫频光源的扫频范围为 318 nm, 半峰全宽为 110 nm, 扫频速率为 101 kHz, 光源平均输出光功率为 7.8 mW, 瞬时线宽低于 0.1 nm。

关键词 成像系统; 光学相干层析成像; 扫频光源; 傅里叶域锁模; 量子点半导体光放大器; 扫频范围

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.201101

High-Speed Broadband Swept Source

Wang Pengfei^{1,2}, Tong Xinglin^{1,2*}, Deng Chengwei², Xiong Qiao^{1,2}, Jin Chunjiao²

¹ School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

² National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract Aiming at the problem of insufficient sweep range of the swept source used in the existing swept source optical coherence tomography (SS-OCT), a Fourier domain mode-locking (FDML) high-speed broadband swept source based on a quantum dot semiconductor optical amplifier (QD-SOA) and a quantum well semiconductor optical amplifier (QW-SOA) in parallel is studied. The output characteristics of two types of SOA are studied, and the QW-SOA with a center wavelength of 1310 nm and the QD-SOA with a center wavelength of 1280 nm are placed in parallel in the fiber annular cavity. A high-speed broadband swept source is developed combined with FDML. The sweep range is 318 nm, the full width at half maximum is 110 nm, the sweep speed is 101 kHz, the average output optical power is 7.8 mW, and the instantaneous linewidth is less than 0.1 nm, respectively.

Key words imaging system; optical coherence tomography; swept source; Fourier domain mode-locking; quantum dot semiconductor optical amplifier; sweep range

OCIS codes 140.3600; 140.5965; 140.5960

1 引言

光学相干层析成像(OCT)^[1]对被测样品无损害的成像方式, 以及其介于显微镜成像与超声波成像之间的成像分辨率和成像深度, 弥补了医学成像上相关需求的空白^[2-4]。OCT 研究的重点是提高分辨率、增大数据采集速度、优化对组织的穿透深度以及增强对比度^[5-6]。特别是当扫频 OCT(SS-OCT) 被提出后^[7-8], 在理论与实验上均已证明了相对于传

统的使用宽带光源的 OCT 系统, SS-OCT 的性能更具优越性^[9-10], 并且扫频光源还可用于吸收光谱、活性介质增益光谱的精确测量和光纤光栅的解调等^[11], 这些优势共同推动了扫频光源研究的热潮。由于传统量子阱半导体光放大器(QW-SOA)的自发辐射光谱带宽有限, 故而 OCT 系统最终成像轴向分辨率的光谱带宽一直难以得到突破。

本文利用近年来逐渐成熟并商用的量子点半导体光放大器(QD-SOA), 并将其与传统 QW-SOA

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-04-19; 录用日期: 2019-04-25

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(2015AA043505)、国家自然科学基金(61575148)

* E-mail: tongxinglin@whut.edu.cn

并联置于基于傅里叶域锁模(FDML)技术搭建的扫频光源光纤环形腔内,通过实验研究了新型 QD-SOA 在不同电流驱动下的光谱特性,基于此完成了滤波器扫频范围的选定,并利用 QD-SOA 与 QW-SOA 中心波长和增益范围的差异,实现了对扫频范围的有效拓展,给出了所研制的高速宽带扫频光源的输出光谱图和验证扫频速度的扫频光谱时序图。

2 原理介绍

FDML 作为一种新型的光纤环形腔激光器锁模机制,最早由哈佛大学的 Huber 等^[12]在 2006 年提出,其目的是解决短腔扫频光源扫频速度的提升受限于单次环形腔极限的问题。对于最初的短腔扫频光源,随着光纤环形腔内可调谐滤波器调谐速度的增加,当调谐速度达到单次往返极限时,扫频光功率将急剧衰减至不可用程度,单次环形腔极限与扫频速度的关系可表示为^[12]

$$f_{\text{sweep}} \approx \frac{\log_2(G\rho) \Delta\lambda \eta c}{\log_2\left(\frac{P_{\text{sat}} \Delta\lambda_{\text{tr}}}{\Delta\lambda P_{\text{ASEtotal}}}\right) L n_{\text{ref}} \Delta\lambda_{\text{tr}}}, \quad (1)$$

式中: f_{sweep} 为最大调谐频率; G 为增益介质的小信号增益; ρ 为经一次往返后反馈的能量比例; $\Delta\lambda$ 为透过峰带宽;转换因子 $\eta = 1/\pi$; c 为真空中光速; P_{sat} 为透过峰饱和光功率; $\Delta\lambda_{\text{tr}}$ 为滤波器可调谐范围; P_{ASEtotal} 为整个光谱集成功率; L 为环形腔长度; n_{ref} 为介质折射率。

当扫频速率继续提升至 f_{sweep} 以上时,无法充分形成激光,导致光功率随着扫频速率的提升而衰减。当透过峰在环形腔中绕行一圈,并经半导体光放大器(SOA)的增益放大,再次到达滤波器时,滤波器的透过峰位置已严重偏离上一时刻的透过峰位置,表现为光功率极其微弱。此时的扫频光源已不能视为激光器,只能视为滤波器对背景光的简单波长选择。

FDML 技术解决了这一问题,使环形腔扫频光源的扫频速度得以突破单次往返极限,其实现手段主要是在环形腔中加入长距离光纤,使透过峰在环形腔中往返一圈的时间与滤波器调谐周期匹配,产生 FDML 效应,该方案的简化原理图如图 1 所示。

FDML 的原理是:使光在环形腔中往返一圈的时间(对应于腔基频)与滤波器调谐周期相等或滤波器调谐频率为腔基频的整数倍。腔基频 f_{base} 和滤波器调谐频率 f_{sweep} 需满足^[13]

$$f_{\text{sweep}} = k f_{\text{base}} = k \frac{c}{n_{\text{ref}} L}, \quad (2)$$

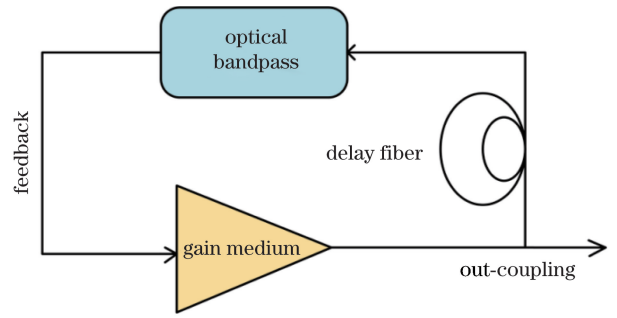


图 1 FDML 扫频光源简化原理图

Fig. 1 FDML sweep source simplification schematic

式中: k 为正整数,表示滤波器的一个调谐周期与光在环形腔绕行一圈的时间严格匹配,这对调谐频率的要求非常高。当光透过峰离开可调谐滤波器,绕行一圈再次到达可调谐滤波器时,滤波器的透过峰中心波长正好与上一时刻离开滤波器时的透过峰中心波长一样。这样扫频光源的高速扫频输出可以看成是一种准静态操作,突破了单次环形腔极限。

3 方案设计与系统搭建

所提方案在传统的 FDML 扫频光源光路的基础上进行了优化,主体光路结构不变。为了得到超过 100 kHz 的高速扫频光输出,滤波器的调谐频率应该超过 50 kHz,考虑到光纤的纤芯折射率,用于 FDML 的延时光纤长度应该在 4 km 左右。为了拓宽可用扫频范围,将 QW-SOA 与 QD-SOA 利用两个一分二(分光比为 50:50)的光耦合器并联置于光纤环形腔内,所设计的高速宽带扫频光源系统结构如图 2 所示。

图 2 中环形腔内上下并联放置了两个 SOA,上方为传统的 QW-SOA(IPSAD1301, INPHENIX, 美国),下方为新型 QD-SOA(SOA-1250, INNOLUNE, 德国)。SOA 的两端各连接一个 1310 nm 波段的双级光隔离器(ISO)。双级 ISO 是光隔离器的一种,但相较于普通单级的 40 dB 隔离度,双级 ISO 的隔离度高达 60 dB,可以更好地保证光纤环形腔中光的单向传输,从而极大地消除了激光噪声的干扰。SOA 不可避免地存在一定的偏振相关增益,为了使腔内激光功率得到最优化,可在 SOA 两端各连接一个偏振控制器(PC)以调整光偏振态。使用的高速光纤法布里-珀罗可调谐滤波器(FFP-TF)为 Lambda Quest F-P(LQ F-P),该型滤波器可实现高速波长扫描,且透过峰 3 dB 带宽不超过 0.1 nm。F-P 滤波器的驱动信号由 DG1022Z 型函数信号发生器提供。该方案中加入了光

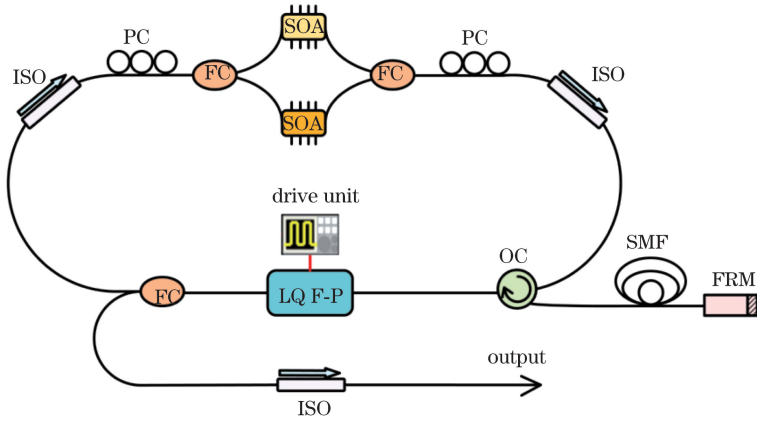


图2 高速宽带扫频光源系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of high-speed broadband swept source

环形器使环形腔中单向传输的光经环形器后进入 2 km 单模光纤(SMF 28e+, Corning, 美国),再由法拉第旋转镜反射,被反射的光再一次进入 2 km 单模光纤,后经环形器输送回环形腔中。光子在一个渡越周期内,两次经过 2 km 单模光纤,使实际光程为 4 km,在效果上等同于使用了 4 km 延时光纤的传统 FDML 结构的扫频光源。光路中的作为耦合输出使用的一分二光纤耦合器(FC)的输出端分光比为 80:20,其中 80%的光返回环形腔内,20%的光离开环形腔。Corning 公司的 SMF 28e+ 型光纤在 1310 nm 波长处的色散为零,是 FDML 方案中长距离延时光纤的理想选择。以该方案搭建的基于 QW-SOA 与 QD-SOA 并联的高速宽带扫频光源实物如图 3 所示。

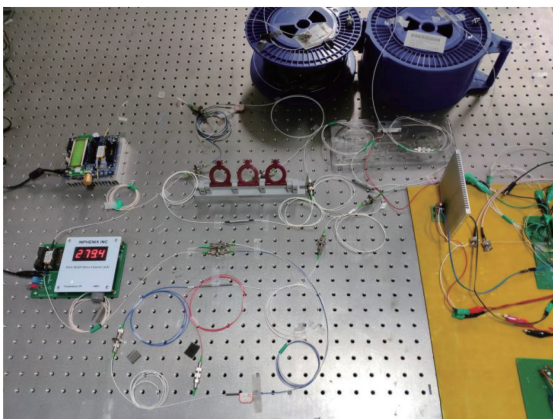


图3 系统实物图

Fig. 3 System physical map

4 实验结果与分析

SOA 增益带宽的叠加在理论上具有可信性,但在实际操作中需要结合其自发辐射背景光的光谱中心波长和增益范围等诸多因素综合考虑,因此对本

研究用到的 QW-SOA 与 QD-SOA 的特性进行了相关研究和分析。目前针对传统 QW-SOA 输出特性的研究已经非常成熟,故这里只给出实验中使用的 QW-SOA 自发辐射背景光的输出光功率以及中心波长随驱动电流的变化关系,如图 4 所示。

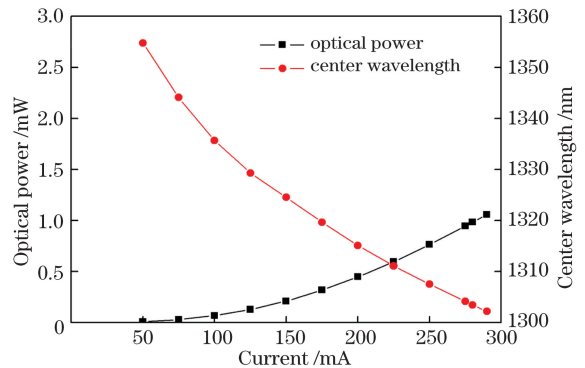


图4 QW-SOA 输出特性

Fig. 4 QW-SOA output characteristics

QW-SOA 的输出光功率的变化趋势与驱动电流呈正比,当工作电流为 280 mA 时,光功率为 1.06 mW,中心波长与驱动电流呈正比,中心波长在整个电流调谐范围内从 1355 nm 减小到 1302 nm。自发辐射背景光的谱形与常用 QW-SOA 一致,在工作电流超过 100 mA 后,可以从光谱仪上看出谱形在电流调节过程中始终保持高斯分布状。

着重对 QD-SOA 的输出特性进行研究,目的是选择合适的增益范围作为 F-P 可调谐滤波器的波长选择范围,图 5 为 QD-SOA 在不同工作电流条件下的输出光谱图。

有别于 QW-SOA 一般不超过 300 mA 的驱动电流,QD-SOA 可以在 900 mA 的工作电流下稳定工作,并且谱形变化情况也与 QW-SOA 不同。得益于量子点尺寸的不均匀分布,以及成分分布和状

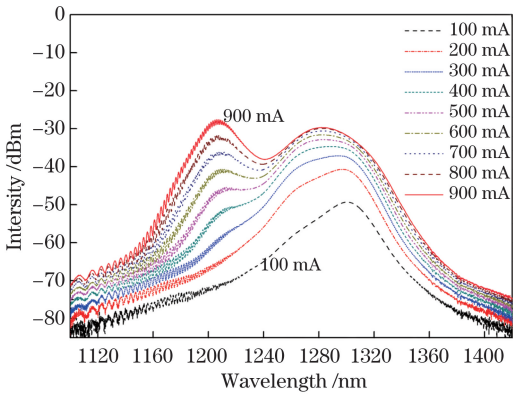


图5 QD-SOA 输出特性

Fig. 5 QD-SOA output characteristics

态填充效应, QD-SOA 具有更宽的增益范围。但 QD-SOA 在低波长区域的光谱上出现了波纹, 这主要与器件的制作有关。每个 QD-SOA 都有一定的个体差异性, 波纹区域容易在偏离各型号 SOA 标注的中心波长较大时出现, 而选择使用的波长区域为各自中心波长附近, 故基本不受波纹影响。从图5

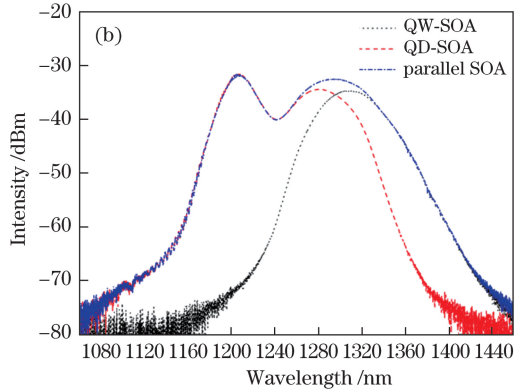
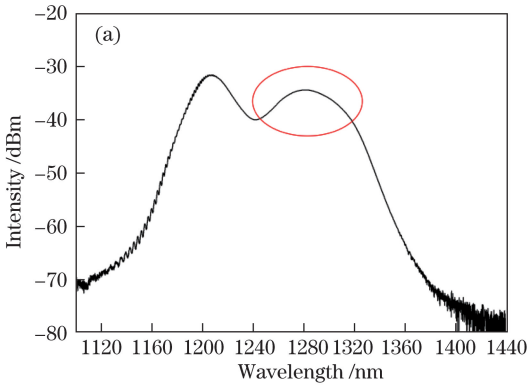


图6 并联光谱图。(a)待使用增益区域;(b) QW-SOA 并联 QD-SOA 光谱图

Fig. 6 Parallel spectra. (a) Gain area to be used; (b) spectra of QW-SOA paralleled to QD-SOA

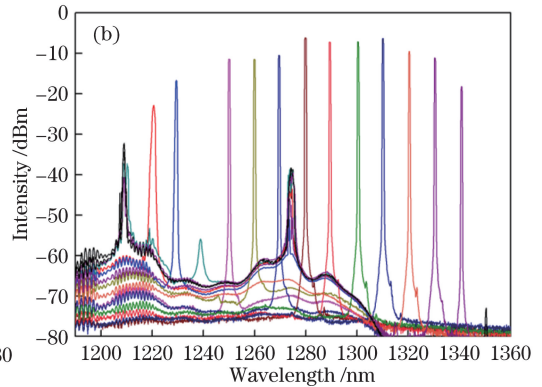
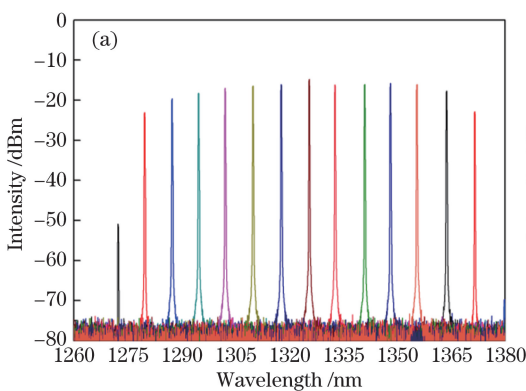


图7 不同放大器在各波长处的增益情况。(a) QW-SOA;(b) QD-SOA

Fig. 7 Gain versus wavelength for different amplifiers. (a) QW-SOA; (b) QD-SOA

特别值得注意的是, 在 QD-SOA 各波长增益图中, 除了选定的以 10 nm 为间隔的透过峰外, 在

中可以明显看出: 当驱动电流不超过 500 mA 时, 光谱基本为高斯型光谱; 但随着电流的加大, 光谱会出现两个主要增益峰, 这两个增益峰的中心波长分别为 1210 nm 和 1290 nm, 并且在两峰中间产生凹陷, 这极不利于其应用到扫频光源上。

为保证光谱平坦度和输出光功率, 对 QD-SOA 供滤波器波长选择用的增益范围进行选取, 划定了如图 6(a) 所示的范围, 并给出了图 6(b) 所示的 QW-SOA 与 QD-SOA 并联的自发辐射光谱图。

从图 6(b) 中可以看出: QD-SOA 的中心波长为 1260 nm, 光谱范围为 1110~1380 nm, 光谱总宽度为 270 nm, 半峰全宽 (FWHM) 为 160 nm; QW-SOA 的中心波长为 1310 nm, 光谱范围为 1210~1428 nm, 光谱总宽度为 218 nm, FWHM 为 68 nm; 并联光谱范围为 1110~1428 nm, 光谱总宽度为 318 nm, 并联光谱的 FWHM 为 192 nm。在此基础上得到了 QW-SOA 与 QD-SOA 在各波长处的增益情况, 如图 7 所示。

1210 nm 和 1273 nm 波长处, 都出现多个峰值。将该现象与图 6 结果结合起来分析后可知, QD-SOA 在

1210 nm 和 1273 nm 波长附近有明显的两个增益峰,故当透过峰远离这两个波长时,边模抑制效应有所衰减,致使 1210 nm 和 1273 nm 波长处出现由自发辐射增益产生的峰值。也正是 1210 nm 和 1273 nm 波长处增益峰值的出现,才使得环形腔内激光模式竞争效应凸显,导致 1240 nm 波长处的环形腔内增益远小于

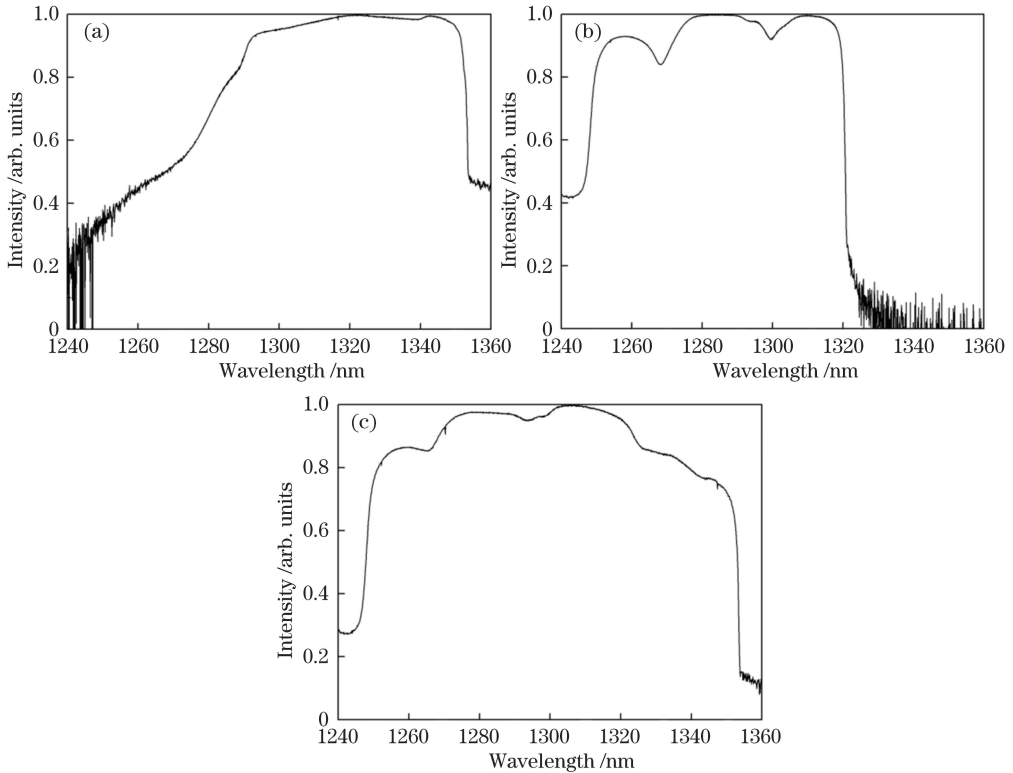


图 8 归一化光谱图。(a) QW-SOA;(b) QD-SOA;(c) QW-SOA 和 QD-SOA 并联

Fig. 8 Normalized spectra. (a) QW-SOA; (b) QD-SOA; (c) QW-SOA paralleled to QD-SOA

可以看出, QW-SOA 对于 QD-SOA 在 1320 ~ 1350 nm 波长区间内,以及 QD-SOA 对于 QW-SOA 在 1248 ~ 1280 nm 波长区间内的互补效果很明显。QW-SOA 单独工作的扫频光谱宽度为 70 nm 左右, QW-SOA 单独工作的扫频光谱宽度不超过 80 nm,而二者并联后的扫频光谱接近 110 nm,有效地展宽了扫频光源的扫频范围。同时,分别对比图 7(a)与图 8(a)、图 7(b)与图 8(b),可以看出各自单独扫频光源的形成区域都在静态条件下测定的增益范围内,并且光谱区域出现了一定范围的缩减,但图(6)中较大的光谱重叠区域保证了在缩减情况下整个并联光谱区域内不会产生较大的凹陷。

将基于 QW-SOA 与 QD-SOA 并联的高速宽带扫频光源的输出端分别与光谱仪(AQ6370B, YOKOGAWA, 日本)和高速光电探测器(康冠, KG-APR-200M-A)连接,其中探测器另一端与数字

图 6 中开环条件下自发辐射光谱在此处的增益值。

为了验证在滤波器高速扫频时,增益介质并联对扫频光源输出扫频光谱的扫频范围依然有效,使图 2 中的 QW-SOA 与 QD-SOA 分别单独工作,再同时并联工作,将扫频光谱归一化后得到图 8 所示结果。

示波器(DPO3014, Tektronix, 美国)连接。光电探测器的带宽为 200 MHz,示波器的带宽为 100 MHz,设定的采样率为 0.1 GHz/s。研制的高速宽带扫频光源的输出光谱图和时序图分别如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可以看出,研制的高速宽带扫频光源输出光谱的 FWHM 达到了 110 nm,实际光程为 4 km 的延时光纤受绕纤过程中的误差和光纤环形腔内其他光学器件尾纤长度的影响。图 10 中波形高度的差异是由 F-P 滤波器前后向扫描过程中, SOA 增益的非线性造成的,滤波器透过峰经过 SOA 增益放大后会产生一定红移,这对于低波长到高波长的扫描更有利。最终的锁模频率为 50.523 kHz,由于 F-P 滤波器的双向扫描特性,扫频速率为锁模频率的两倍,图 10 中每 10 μ s 内一个脉冲的出现验证了 101 kHz 的扫频速率。

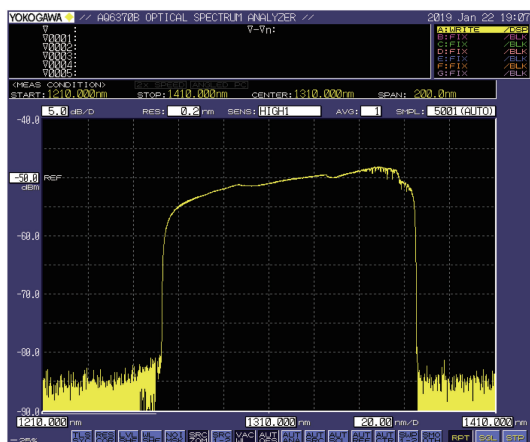


图9 高速宽带扫频光源输出光谱图

Fig. 9 Output spectrum of high-speed broadband swept source

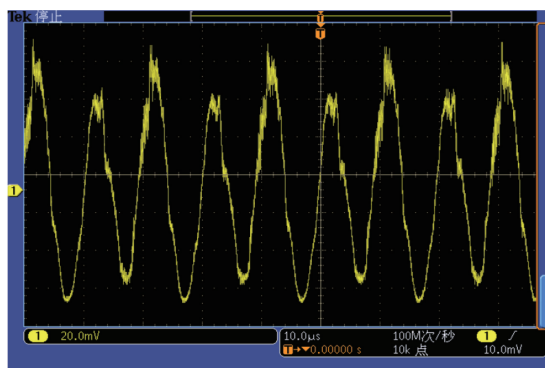


图10 高速宽带扫频光源输出光谱时序图

Fig. 10 Timing diagram of output spectrum of high-speed broadband swept source

5 结 论

提出了一种基于 QW-SOA 与 QD-SOA 并联的高速宽带扫频光源,对 QW-SOA 与 QD-SOA 的输出特性进行详细的实验研究和分析,将新型的 QD-SOA 与传统的 QW-SOA 并联置于 FDML 结构的光纤环形腔内,使可用扫频范围达到了 318 nm。对传统 FDML 结构进行优化,引入法拉第旋转镜搭配光环形器,使实际用到的延时光纤长度缩短了 2 km。最终得到的基于 QW-SOA 与 QD-SOA 并联的高速宽带扫频光源的扫频速率为 101 kHz,扫频范围为 318 nm,扫频光谱的 FWHM 为 110 nm,平均输出光功率为 7.8 mW,瞬时线宽低于 0.1 nm。在保证高速扫频的条件下,有效地拓宽了可用扫频范围和扫频光源的 FWHM。

参 考 文 献

[1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.* Optical

coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254 (5035): 1178-1181.

- [2] Yamashita S. Dispersion-tuned swept lasers for optical coherence tomography [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24 (3): 6800109.
- [3] Yu X F, Ding Z H, Chen Y H, *et al.* Development of fiber-based optical coherence tomographic imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26 (2): 235-238.
俞晓峰, 丁志华, 陈宇恒, 等. 光纤型光学相干层析成像系统的研制 [J]. *光学学报*, 2006, 26 (2): 235-238.
- [4] Yun S, Tearney G, de Boer J, *et al.* High-speed optical frequency-domain imaging [J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2953-2963.
- [5] Choma M A, Sarunic M V, Yang C H, *et al.* Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2003, 11(18): 2183-2189.
- [6] Motaghian Nezam S M R. High-speed polygon-scanner-based wavelength-swept laser source in the telescope-less configurations with application in optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1741-1743.
- [7] Akcay A C, Rolland J P, Eichenholz J M. Spectral shaping to improve the point spread function in optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1921-1923.
- [8] Potsaid B, Gorczynska I, Srinivasan V J, *et al.* Ultrahigh speed spectral / Fourier domain OCT ophthalmic imaging at 70, 000 to 312, 500 axial scans per second [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15149-15169.
- [9] Yamashita S, Asano M. Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning [J]. *Optics Express*, 2006, 14 (20): 9299-9306.
- [10] Ding Z H, Chen M H, Wang K, *et al.* High-speed swept source and its applications in optical frequency-domain imaging [J]. *Chinese Journal of 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.
- [11] Yang Y D, Kang J, Xu B, *et al.* Temperature and pressure sensing system of side hole fiber grating based on scanning laser [J]. *Acta Photonica Sinica*,

- 2016, 45(6): 0606001.
- 杨韞铎, 康娟, 徐贲, 等. 基于扫描激光器的边孔光纤光栅温度压力传感系统[J]. 光子学报, 2016, 45(6): 0606001.
- [12] 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.
- [13] Yasin Alibhai A, Or C, Witkin A J. Swept source optical coherence tomography: a review[J]. Current Ophthalmology Reports, 2018, 6(1): 7-16.