

# 激光与光电子学进展

## 波长可调谐窄线宽激光器的线宽特性

冯智宇<sup>1,2</sup>, 成煜<sup>1,2\*</sup>, 苑立波<sup>1,2</sup>, 李立彤<sup>3</sup>, 黄苏梅<sup>4</sup>, 李静<sup>4</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004;

<sup>3</sup>长飞光纤光缆股份有限公司光纤光缆制备技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430073;

<sup>4</sup>大族激光科技产业集团股份有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要** 为了探究激光器线宽的综合特性,对波长可调谐窄线宽激光器的线宽进行了理论分析。搭建了基于非平衡马赫-曾德尔干涉结构的延时自外差测量系统,以研究波长可调谐窄线宽激光器的稳态及动态线宽特性。为了平衡线宽测量的速度和精度,完成了不同接收机带宽下的线宽测试。针对激光器波长连续调谐时产生的线宽展宽问题,通过控制激光器波长调谐时的步进量保持输出功率的稳定性,补偿了线宽的测量误差。该研究不仅能完善激光器线宽特性的研究,对光频域反射技术的研究也具有重要意义。

**关键词** 激光器; 窄线宽激光器; 线宽测量; 延时自外差法; 拍频法

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2114003

## Linewidth Characteristics of Wavelength-Tunable Narrow Linewidth Lasers

Feng Zhiyu<sup>1,2</sup>, Cheng Yu<sup>1,2\*</sup>, Yuan Libo<sup>1,2</sup>, Li Litong<sup>3</sup>, Huang Sumei<sup>4</sup>, Li Jing<sup>4</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

<sup>2</sup>Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, Guangxi, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Yangtze Optical Fiber and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430073, Hubei, China;

<sup>4</sup>Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

**Abstract** In order to explore the comprehensive characteristics of the linewidth of the lasers, the theoretical analysis of the linewidth of the wavelength-tunable narrow linewidth lasers is carried out. In this paper, the delayed self-heterodyne measurement system based on the non-equilibrium Mach-Zehnder interferometer structure is built to investigate the steady-state and dynamic linewidth characteristics of wavelength-tunable narrow linewidth lasers. In order to balance the speed and accuracy of linewidth measurements, linewidth tests at different receiver bandwidths are implemented. For the linewidth spreading problem arising from continuous laser wavelength tuning, the linewidth measurement error is compensated by controlling the stepping amount while maintain the stability of the output power. This study can not only improve the study of laser linewidth characteristics, but also has important significance for the study of optical frequency-domain reflectometry technology.

**Key words** lasers; narrow linewidth lasers; linewidth measurement; delayed self-heterodyne method; beat frequency method

## 1 引言

窄线宽激光器具有易与光纤集成、光束质量高、相干距离长、频率稳定性高、信噪比高等特点<sup>[1-3]</sup>,在多个

领域中得到了广泛应用,如光纤通信<sup>[2-3]</sup>、光纤传感<sup>[4-6]</sup>以及相干激光雷达<sup>[7]</sup>领域。在光频域反射(OFDR)技术中,激光器线宽会影响远距离相干探测的相干长度,且线宽越窄,相干长度越长,能测试的距离也就越长,

收稿日期: 2021-10-01; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203901)、国家自然科学基金(61975038)

通信作者: \*chengyu\_tom@163.com

因此,激光器的性能对于 OFDR 显得尤为重要<sup>[8]</sup>。

传统的线宽测量方法有光谱仪直接测量法和法布里-珀罗(F-P)干涉法<sup>[9]</sup>。其中,光谱仪的波长分辨率一般为 1 GHz 以上,F-P 干涉法的波长分辨率为 MHz 量级且响应速度较慢,两种方法均难以测量 kHz 量级甚至更窄的线宽。为了解决该问题:Okoshi 等<sup>[10]</sup>提出采用延时自外差法测量半导体激光器的线宽;Iiyama 等<sup>[11]</sup>通过改进自外差法提出了反射式延迟自外差法,优化了实验结构,提高了测量分辨率;Dawson 等<sup>[12]</sup>演示了一种具有循环延迟的自外差干涉计,采用掺铒光纤放大器补偿光纤的部分损耗;Chen 等<sup>[13]</sup>研究了用于超窄线宽测量的 Voigt 轮廓拟合方法,该方法可滤除  $1/f$  频率噪声( $f$  为信号频率)引起的频谱展宽效应,并从测量频谱中提取出洛伦兹线形;Deng 等<sup>[14]</sup>在损耗补偿循环延迟自外差干涉计中,提出了一种基于马赫-曾德尔电光调制器(MZM)的线宽测量方法;王巍等<sup>[15]</sup>提出了基于迈克耳孙干涉仪的延时自零差实验系统,该系统可实现对窄线宽激光器线宽的测量;Shehzad 等<sup>[16]</sup>提出了一种中红外量子级联激光器(QCL),通过电流反馈实现激光锁频,再基于自零差法的系统减小激光器线宽;高静等<sup>[17]</sup>提出了一种基于短光纤循环延迟自外差技术的亚赫兹激光器线宽测量方法,采用延迟长度为 2 km 的循环延迟自外差干涉仪实现了一系列不同延迟时间拍频信号的同时测量。

已有研究大多集中在激光器的稳态线宽上,对激光器线宽的综合性能研究以及不同时间状态和不同波长下的线宽研究较少。因此,本文除了讨论了稳态线宽外,还对线宽的动态特性以及波长对线宽测量值的影响进行了研究。为了平衡线宽测量的速度和精度,还通过实验探究了不同接收机带宽对线宽测量值的影响。

## 2 基本原理

### 2.1 实验原理

激光器输出的辐射光场可定义为一个相位有波动且幅值稳定的准单色电磁场<sup>[18-21]</sup>,可表示为

$$E(t) = E_0 \exp\{j[\omega_0 t + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中: $E_0$ 为振幅; $\omega_0$ 为平均光频率; $\phi(t)$ 为导致谱线展宽的随机相位波动过程,即从时间  $t$  到  $t + \tau$  的随机相位变化。对于自外差非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉系统,激光器输出光场经耦合器一分为二。一束光经延迟光纤实现延时,输出光信号可表示为

$$E_1(t) = E_0 \exp\{j[\omega_0(t - \tau_d) + \phi(t - \tau_d)]\}, \quad (2)$$

式中, $\tau_d$ 为延迟时间。另一束光经移频器将光频移到中高频,输出光信号可表示为

$$E_2(t) = \alpha E_0 \exp\{j[(\omega_0 - \Omega)t + \phi(t)]\}, \quad (3)$$

式中: $\Omega$ 为调制器的移频量; $\alpha$ 为两束光的振幅比,由分光比决定。两束光分别经延时和调制后,在耦合器处得到拍频信号,经光电探测器的光敏面输出光电流。根据 Wiener-Khinchin 定理,对光电流进行傅里叶变换后就能得到拍频信号的功率谱密度函数<sup>[19-20]</sup>,可表示为

$$S_E(\omega, \tau_d) = P_0^2 \cdot \frac{2/\tau_c}{(2/\tau_c)^2 + (\omega - \Omega)^2}. \quad (4)$$

可以发现,当  $(\omega - \Omega)^2$  趋于 0 时,光功率谱密度可以取最大值,拍频信号功率谱密度的半峰全宽<sup>[19,21]</sup>可表示为

$$\Delta f_s = \frac{\Delta \omega_s}{2\pi} = \frac{2}{\pi \tau_c}. \quad (5)$$

从式(5)可以发现,该方法测得的拍频谱线宽为激光器线宽  $\Delta\nu$  的 2 倍。

### 2.2 实验装置

采用光纤延时自外差法测量激光器线宽,搭建的实验系统如图 1 所示。波长可调谐激光器(WTL)输出的光信号经隔离器(ISO)后能避免输出的光被器件反射进激光器。光束进入分光比为 50:50 的光耦合器 1(OC 1)后再进入 M-Z 干涉系统。光束经耦合器输出后分为两路:一路光经 60 km 单模光纤的光纤延迟线(OFD)实现延时;另一路光经声光移频器(AOM)实现 80 MHz 的移频。两路光束在光耦合器 2(OC 2)处产生拍频干涉,两路光束携带的信号频率不同,因此产生的拍频信号也被称为差频。OC 2 处的拍频信号相

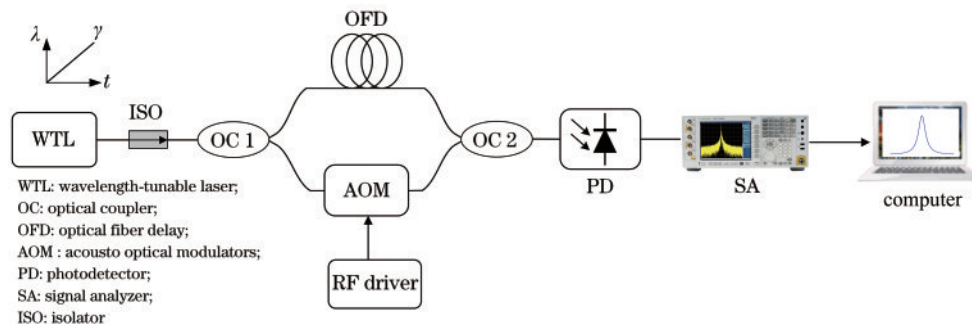


图 1 光纤延时自外差测量激光器线宽的实验系统

Fig. 1 Experimental system for the optical fiber delay self-heterodyne linewidth measurement

当于两个相同且独立的激光源干涉得到的混频信号,混频信号经光电探测器(PD)转换成电信号,最后将转换后的电信号送入信号分析仪(SA)进行分析。

实验采用的 WTL(Agilent 81640A)波长调谐范围为 1510~1640 nm,AOM 的射频频率为 80 MHz,由射频驱动(RF driver)对调制器进行驱动。AOM 中激光束和声波的相互作用产生仅包含一个衍射级的光束,该衍射光束的光频变化等于声波的频率,从而将光频移到中高频,避免零频处的高频干扰。PD 的 3 dB 带宽为 200 MHz,饱和功率为 95  $\mu$ W,因此在实验前必须检测 OC 2 的输出,避免功率超出探测器的饱和功率,导致实验结果不准确。SA 为 MXA Signal Analyzer N9020A,带宽为 20~3.6 $\times 10^9$  Hz。

### 3 分析与讨论

采用延迟自外差法进行激光器线宽特性研究,两路光束产生的拍频信号经光探测器输出得到电信号,对采集到的时域信息进行傅里叶变换,得到光电流的功率谱曲线,并对比原始数据与洛伦兹拟合后的数据。

#### 3.1 稳态线宽特性

信号分析仪采集到的光电流功率谱曲线如图 2 所示。可以发现,视频带宽(VBW)为 3 MHz 时,光电流的功率谱曲线上出现了两个主峰。其中,零频处的主峰 1 为信号分析仪的零频基线,反映的是信号分析仪

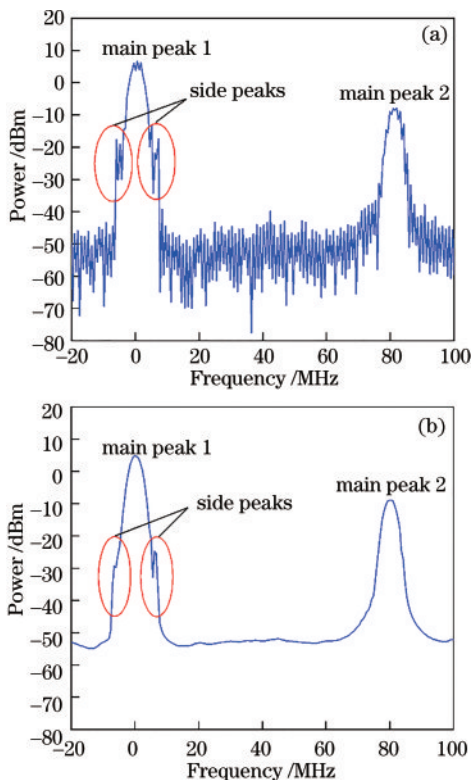


图 2 光电流的功率谱曲线。(a) VBW 为 3 MHz;

(b) VBW 为 51 Hz

Fig. 2 Power spectrum curve of photocurrent. (a) VBW is 3 MHz; (b) VBW is 51 Hz

自带的频率噪声。采用延时自零差法测量激光器线宽容易受零频处主峰的干扰,因此,使用声光调制器对光频进行调制,分析移动到 80 MHz 处的主峰 2 可以得到更准确的线宽值。观察零频处的功率谱曲线发现,主峰 1 两侧各有一个由强度噪声引起的次峰,两个次峰和主峰 1 之间的频率间隔就是激光器的弛豫振荡峰值频率;次峰的峰值越高,弛豫振荡峰值相对强度噪声(RIN)越大;次峰离主峰的频率越远,表明激光器的 RIN 峰值频率越高。为了更清晰地看到主峰的功率大小,调整信号分析仪的 VBW 能消除频谱底噪,更方便地观察实验数据,同时不会对测量结果产生影响,如图 2(b)所示。

在稳态线宽实验中,设置波长可调谐激光器的中心波长为 1550 nm,分别对功率谱不同衰减点处的谱宽进行测量,得到对应的激光器线宽测量值。同时,对信号分析仪采集到的数据点进行洛伦兹拟合,得到稳态线宽测量值。信号分析仪采集到的功率谱和拟合的洛伦兹曲线如图 3 所示。

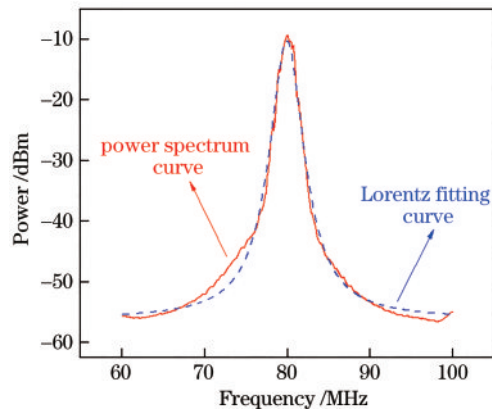


图 3 信号分析仪采集的功率谱及洛伦兹拟合曲线

Fig. 3 Power spectrum and Lorentz fitting curve collected by signal analyzer

对比信号分析仪采集得到的谱线和洛伦兹拟合曲线-3 dB、-10 dB 以及 -20 dB 衰减处的谱宽,得到激光器的稳态线宽如表 1 所示。可以发现,洛伦兹拟合线宽与信号分析仪直接测量的线宽接近。由于 -3 dB 和 -10 dB 衰减处的数据波动较大,易受噪声影响且不易观察,因此,用 -20 dB 衰减处的谱宽计算线宽,得到激光器的稳态线宽约为 232.24 kHz。

表 1 稳态线宽的测量结果

Table 1 Measurement results of steady-state linewidth

Line width /dB	$\Delta\nu$ /kHz	
	Measurement of SA	Lorentz fitting value
-3	725.00	720.80
-10	408.33	467.13
-20	212.00	232.24

### 3.2 接收机带宽对线宽测量值的影响

信号分析仪的分辨率带宽(RBW)即为接收机带宽,是信号分析仪的最小可分辨间隔,以区别两个频率相近的信号。一般来说, RBW 越小,系统的采样点数量就越多,信号的还原程度越高,测量结果也越准确。但采集点的数量不能无限制增加,原因是采集点的数量过多会增加硬件的资源压力,导致时间窗口的宽度增加。RBW 设置太大,会导致扫描时间过短,从而引起信号失真;而 RBW 设置过小,会导致扫描时间过长。激光腔输出的光频率在实际过程中会存在漂移,即频率抖动,频率抖动越剧烈,本征线宽展宽越大,且会影响测量速度。为了得到准确的线宽值,通过隔离外部环境噪声对激光器的影响,并在一定时间内对输出光场进行积分运算,将光谱线的半高全宽充当线宽的本征值,保证得到的数据匹配测量仪器参数,并符合工程应用需求。为了探究 RBW 对线宽测量结果的影响,得到准确的测量值,同时平衡测量速度与测量精度,得到不同 RBW 的线宽测量结果如图 4 所示。可以发现:当 RBW 为 5 kHz 时,测量的线宽最小,但时间窗口最宽,存在的频率抖动最多,测量速度也最慢;当 RBW 为 51 kHz 时,测量的线宽最大,但时间窗口最窄,光频随时间的漂移最小,存在的频率抖动最少,得到的数值也最准确。因此,本系统在 RBW 为 51 kHz 既具备较快的测量速度,又能得到准确的测量数据,即激光器的线宽为 221 kHz。

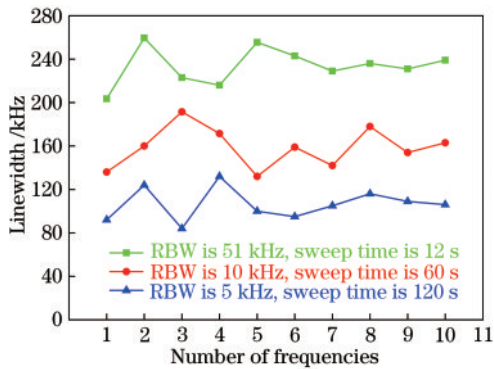


图 4 不同 RBW 的线宽测量结果

Fig. 4 Linewidth measurement results for different RBW

### 3.3 动态线宽特性

线宽的动态特性是线宽真实值随时间变化的特性。理论上,本征线宽反映的是从激光腔发射出来的光学频率的最小扩散,不考虑光频随时间的漂移。但实际上,激光器线宽的测量是在一定时间范围内完成的,只能采用极小时间内的测量结果表征本征线宽。而激光器在时域上除了受自发辐射产生的相位噪声影响外,还会受到外部技术噪声的影响(如机械振动导致的噪声),因此激光器输出的光学频率在时域上是不稳定的,总会存在一定的频率抖动,且时间窗口越长,频率抖动越多,动态线宽的测量结果如图 5 所示。可以

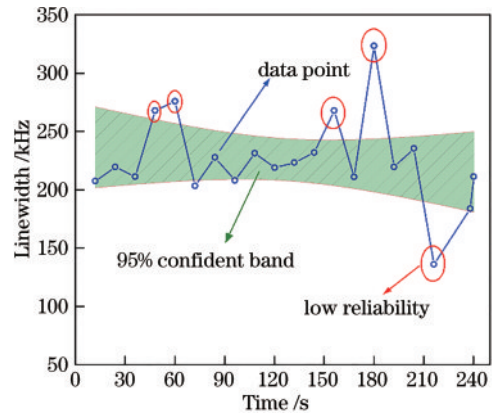


图 5 动态线宽的测量结果

Fig. 5 Measurement results of dynamic linewidth

发现,随着时间的增加,激光的频率抖动会逐渐增多,因此 150 s 以后线宽的测量误差较大,不可当作线宽的本征值。动态线宽的波动范围在 200~260 kHz 内,置信区间为图 5 中的阴影部分,圆圈表示测量结果中置信概率小于 95% 的数据点。在激光器应用中,线宽越小,意味着光谱的纯净度越高,激光的单色性越好,对应的相干性也就越强。

### 3.4 波长连续调谐时的线宽特性

激光器的波长可调谐,波长分辨率可达 0.1 pm。在 OFDR 系统中,空间分辨率与波长的扫描范围成反比,宽范围扫描是实现高空间分辨率测量的必要条件<sup>[22]</sup>。为了探究波长连续调谐时激光器的线宽特性,补偿自发辐射引起的噪声以及外部环境噪声导致的展宽,通过控制激光器连续调谐,同时保持输出功率不变,得到波长连续调谐状态下的真实线宽值,测量结果如图 6 所示。其中,  $R^2$  为相关系数。可以发现,在波长连续调谐的状态下,增大波长数值,线宽会有一定的展宽。主要原因有两种:一种是激光器的自身特性,为了实现激光器的波长连续调谐,需要利用滤波器等器件限制和选择增益谱内的纵模数<sup>[23]</sup>,这会使激光器谐振腔内的多个纵模振荡,引起光学频率的漂移;第二种是测量系统的结构特性,由于激光器在波长连续调谐状

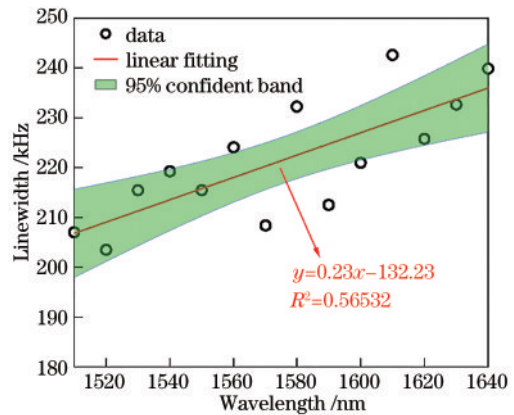


图 6 不同波长的线宽测量结果

Fig. 6 Linewidth measurement results for different wavelength

态下,RF源不同波长处的一级衍射光束会包含一部分零级衍射光束,这是采用移频器调制光学频率不可避免的问题。

在 OFDR 系统应用中,激光器线宽会对系统的测试距离产生影响,且激光器线宽越窄,对应的测试距离越长。因此,需要根据动态线宽的波动范围选择最合适的测试距离。在 1530~1550 nm 处的线宽比较稳定,因此,选取该范围内的测量结果作为线宽的真实值,约 215~220 kHz,在 OFDR 系统中对应的测试距离为 290~292 m。

## 4 结 论

在线宽理论分析的基础上,搭建了基于自外差非平衡 M-Z 干涉法的线宽测量系统,使用 60 km 长单模光纤进行延时以及 80 MHz 声光调制器进行移频,对拍频信号的光电流功率谱密度函数进行分析和洛伦兹曲线拟合,最终得到激光器的稳态线宽为 232.24 kHz,动态线宽在 200~260 kHz 范围内。通过优化信号分析仪的参数,平衡线宽测量的速度和精度,在接收机带宽为 51 kHz 时,对激光器进行线宽分析。结果表明,在波长连续调谐的状态下,激光器线宽会产生展宽。本研究对于分布式光纤传感,尤其是光频域反射技术有着重要的现实意义。

## 参 考 文 献

- [1] 张骥,张东,刘昊炜,等.一种窄线宽的高重复频率窄脉宽主动调 Q 光纤激光器[J].中国激光,2020,47(1): 0101002.  
Zhang J, Zhang D, Liu H W, et al. Actively Q-switched fiber laser with narrow linewidth, narrow pulse width, and high repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101002.
- [2] 古建标,朱福南,刘磊,等.1550 nm 波段窄线宽高调谐带宽激光光源[J].中国激光,2019,46(9): 0901003.  
Gu J B, Zhu F N, Liu L, et al. 1550 nm laser source with narrow linewidth and high tuning bandwidth[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901003.
- [3] 梁虹,魏芳,孙延光,等.基于光纤光栅的 1310 nm 波段窄线宽混合集成外腔半导体激光器[J].中国激光,2021,48(20): 2001002.  
Liang H, Wei F, Sun Y G, et al. A 1310 nm band narrow linewidth hybrid integrated external cavity semiconductor laser based on fiber Bragg gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2001002.
- [4] Huang L H, Yang C S, Tan T Y, et al. Sub-kHz-linewidth wavelength-tunable single-frequency ring-cavity fiber laser for C- and L-band operation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(14): 4794-4799.
- [5] 马喆,王逸璇,江俊峰,等.光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J].光学学报,2021,41(13): 1306008.  
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306008.
- [6] 尚凡,戚悦,马丽娜,等.基于光纤光栅的时分复用传感阵列相位噪声研究[J].光学学报,2021,41(13): 1306011.  
Shang F, Qi Y, Ma L N, et al. Background phase noise of interferometric TDM sensing array based on fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306011.
- [7] 张雅楠,孟俊清,王明建,等.高重复频率窄脉宽单频激光器[J].中国激光,2021,48(9): 0901005.  
Zhang Y N, Meng J Q, Wang M J, et al. High repetition frequency narrow pulse width single frequency laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0901005.
- [8] Liang C S, Bai Q, Yan M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry[J]. IEEE Access, 2021, 9: 41647-41668.
- [9] 崔明斌,黄俊刚,杨修伦.激光线宽测量方法的研究综述[J].激光与光电子学进展,2021,58(9): 0900005.  
Cui M B, Huang J G, Yang X L. Review on methods for laser linewidth measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900005.
- [10] Okoshi T, Kikuchi K, Nakayama A. Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum[J]. Electronics Letters, 1980, 16(16): 630-631.
- [11] Iiyama K, Hayashi K, Ida Y, et al. Reflection-type delayed self-homodyne/heterodyne method for optical linewidth measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(5): 635-640.
- [12] Dawson J W, Park N, Vahala K J. An improved delayed self-heterodyne interferometer for linewidth measurements[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1063-1066.
- [13] Chen M, Meng Z, Wang J F, et al. Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6803-6808.
- [14] Deng S, Li M, Gao H Y, et al. A recirculating delayed self-heterodyne method using a Mach-Zehnder modulator for kHz-linewidth measurement[J]. Optical Fiber Technology, 2016, 31: 156-160.
- [15] 王巍,李东明,葛辉良,等.基于 MI 自零差法的窄线宽激光器线宽测量[J].光子学报,2014,43(S1): S106022.  
Wang W, Li D M, Ge H L, et al. Linewidth measurement of narrow linewidth laser based on the delayed self-homodyne technique using Michelson interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(S1): S106022.
- [16] Shehzad A, Brochard P, Matthey R, et al. 10 kHz linewidth mid-infrared quantum cascade laser by stabilization to an optical delay line[J]. Optics Letters, 2019, 44(14): 3470-3473.
- [17] 高静,焦东东,刘杰,等.基于短光纤循环自外差法的激光线宽测量[J].光学学报,2021,41(7): 0712002.  
Gao J, Jiao D D, Liu J, et al. Laser linewidth measurement based on recirculating self-heterodyne method with short fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0712002.
- [18] Gallion P, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser

- systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(4): 343-349.
- [19] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [20] Richter L, Mandelberg H, Kruger M, et al. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(11): 2070-2074.
- [21] 解东宏, 邓大鹏, 郭丽, 等. 窄线宽激光器线宽测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010006.  
Xie D H, Deng D P, Guo L, et al. Line-width measurement method of narrow line width lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010006.
- [22] 董毅, 谢玮霖, 冯宇祥, 等. 延迟自外差锁相控制的激光线性扫频技术及其应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306003.  
Dong Y, Xie W L, Feng Y X, et al. Laser linear sweep frequency technique based on delay self-heterodyne optical phase locking and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306003.
- [23] 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.  
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]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2414001.