

激光与光电子学进展

基于光自注入法的光纤激光器线宽优化

潘聪逸, 刘王云*, 范照晋

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 光纤激光器的线宽是反映激光雷达空间分辨率与激光精密测量系统测量精度的重要指标,在工程实践中具有重要的应用价值。基于线宽测量与光自注入反馈法的基本理论对比加入优化结构前后光纤激光器的线宽,并通过实验探究光自注入双腔反馈结构对光纤激光器线宽特性的优化作用。搭建复合环形光纤激光器与自注入双腔反馈线宽优化结构,并采用延迟自外差法对输出光的线宽进行测量。实验结果表明,光自注入双腔反馈结构可以将光纤激光器的平均线宽从 1.782 kHz 进一步压缩到 1.319 kHz,实现更窄线宽的激光输出。

关键词 激光器; 单模激光器; 掺铒激光器; 线宽测量; 自反馈

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914002

Optical Fiber Laser Linewidth Optimization Based on Light Self-Injection Method

Pan Congyi, Liu Wangyun*, Fan Zhaojin

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The fiber laser linewidth is an important index reflecting the spatial resolution of laser radar and the measurement accuracy of laser precision measurement systems, and it has important application value in engineering practice. In this paper, based on the basic theory of linewidth measurement and the optical self-injection feedback method, the linewidth of the fiber laser before and after adding the optimized structure is compared, and the optimization effect of the optical self-injection dual-cavity feedback structure on the linewidth characteristics of the fiber laser is explored through experiments. A composite ring fiber laser and a self-injection dual-cavity feedback linewidth optimization structure are built, and the linewidth of the output light is measured by the delayed self-heterodyne method. The experimental results show that the optical self-injection dual-cavity feedback structure can further compress the fiber laser's average linewidth from 1.782 kHz to 1.319 kHz, and achieve a narrower linewidth laser output.

Key words lasers; single-mode laser; erbium-doped laser; linewidth measurement; self-feedback

1 引言

自 1960 年第一台红宝石激光器诞生以来,激光器就因其在指向性、单色性和相干性上的独特优势得到了人们的广泛关注,不仅为生物、物理、化学等基础学科提供了新的发展方向,也极大促进了各类学科之间的交叉融合,被广泛应用于通信^[1-3]与大气测量领域。

Suzuki 等^[4]在分布反馈型环形光纤激光器中引入一个相移为 $\lambda/4$ (λ 为输出光的波长) 的保偏光纤布拉格光栅 (FBG), 实现了 6 kHz 线宽的激光输出。代志勇等^[5]利用带有保偏 FBG 的法布里-珀罗标准具和可饱和吸收体实现了 1550.4 nm 波长处激光的稳定单纵

模输出,输出线宽为 2.0 kHz。Shi 等^[6]根据光纤激光器的非线性效应,实现了受激拉曼散射,并研制了输出波长为 1109.54 nm、线宽小于 2.5 kHz 的单模拉曼分布反馈光纤激光器。赵冉冉等^[7]设计了一种基于有源环形滤波器的窄线宽掺铒光纤激光器,实现了输出线宽小于 3.4 kHz 的单纵模激光输出。白燕等^[8]结合未泵浦的保偏掺铒光纤和 FBG 实现了激光器的单纵模运转和超窄线宽输出,在室温下获得了中心波长为 1942.03 nm、线宽约为 3 kHz 的单纵模掺铒光纤激光器。胡杰等^[9]基于随机分布光阵列制作了一种起振阈值为 24.5 mW、线宽为 1.33 kHz 的随机光纤激光器。高静等^[10]基于短光纤循环延迟自外差技术提出了一种

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-18; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 省部级项目(2019JQ-316)

通信作者: *312229964@qq.com

能有效减少 $1/f$ 频率噪声的线宽测量方法,实验测得的激光平均线宽为 944 Hz。崔明斌等^[11]对常见的线宽测量方法进行了总结,并详细分析与讨论了可应用于窄线宽可调谐激光器的线宽测量方法。

综上所述,目前研究的光纤激光器输出线宽仍在 2~3 kHz 范围内,且随着大气探测、激光雷达成像及激光散射等技术的不断发展,需要光源具有更窄的线宽,以满足成像系统在空间分辨率上的要求。因此,本文研究了一种结构简单、易于搭建的优化结构,可实现线宽小于 2 kHz 的激光输出。在复合环形光纤激光器的基础上,搭建了光自注入双腔结构的线宽优化系统,并通过延迟自外差法对输出激光的线宽特性进行测量,探究了光自注入反馈法对光纤激光器输出光线宽及输出功率的影响。

2 基本原理

2.1 延迟自外差法的基本原理

常见的线宽测量方法有零频自外差法与延迟自外差法两种。相比零频自外差法,延迟自外差法在结构上增加了一个声光移频器(AOM),使延迟自外差系统可以将输出光的频率信号从频谱仪的零频中分离出来。延迟自外差法的基本结构如图 1 所示。其中:FDL 为光纤延迟线;EODS 为光电探测系统。延迟自外差法的测量精度在 kHz 量级,是目前使用最广泛的线宽测量方法。

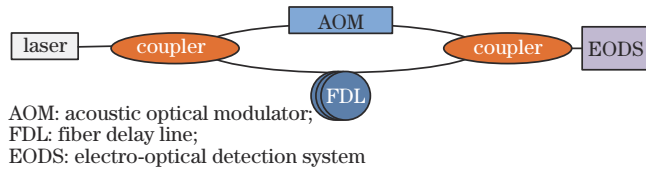


图 1 延迟自外差测量系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of delayed self-heterodyne measurement system

当单纵模输出激光通过一个分光比为 50:50 的耦合器后,待测光被分为两路信号 $E_1(t)$ 与 $E_2(t)$,可表示为

$$E_1(t) = E_1 \exp\{j[\omega_{L0}t + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 \exp\{j[\omega_{L0}t + \phi(t)]\}, \quad (2)$$

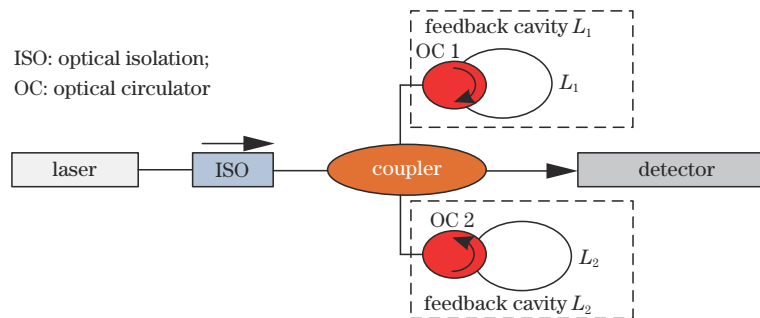


图 2 光学自注入双腔反馈的基本结构

Fig. 2 Basic structure of optical self-injection dual-cavity feedback

式中: $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 分别为两路信号的光振幅; ω_{L0} 为激光的本振频率; ϕ 为信号光的相位。两路信号分别经过延迟时间为 τ 的单模光纤延迟线与频移量为 ω_0 的声光移频器后再由相同的耦合器合束进入光电探测器。受光电探测器响应频率的限制,信号光的中频信号被保留,输出信号可表示为

$$I(t) = 2\alpha E_1(t)E_2(t) \cos[\omega_0 t - \omega\tau + \phi(t) - \phi(t + \tau)], \quad (3)$$

式中: α 为光电探测器的转换效率; ω 为延迟光纤的频移量。当延迟时间远大于待测激光的相干时间时,功率谱密度可表示为

$$S(\omega) = \frac{4\alpha E_1(t)E_2(t)\tau_c}{1 + (\omega - \omega_0)^2 \tau_c^2}, \quad (4)$$

式中, τ_c 为激光器的相干时间。取光纤延迟线长度无限长且光电探测器转换效率为 1 时,功率谱密度可用洛伦兹标准线形表示为

$$S(\omega) = \frac{E_1(t)E_2(t)\Delta\nu}{4\pi(\Delta\nu^2 + \nu^2)}, \quad (5)$$

洛伦兹线形的半峰全宽 $\Delta\nu$ 与激光器的本征线宽 ν 可表示为

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi\tau} = |\omega - \omega_0|, \quad (6)$$

$$\nu = \omega / (2\pi). \quad (7)$$

根据文献[12]得到功率谱在 x (单位为 dB) 处的线宽为

$$\delta(x) = 2\sqrt{10^{0.1x} - 1} \Delta\nu, \quad (8)$$

式中, $\delta(x)$ 为功率谱线宽。计算得到功率谱为 10 dB 时对应的线宽为 $6\Delta\nu$,即在 10 dB 功率谱处的测量线宽为激光器实际线宽的 6 倍。

2.2 双腔反馈法的基本原理

光自注入双腔反馈法的基本结构如图 2 所示。可以发现,双腔反馈线宽优化结构主要由一个 1×3 耦合器与两个型号相同的环形器构成。

两个环形器分别在耦合器两侧构成反馈腔结构,其中, L_1 、 L_2 分别为两个反馈腔的腔长。激光在两个反馈腔中的自由光谱范围(FSR)满足

$$X_{FSR1} = c / (nL_1), X_{FSR2} = c / (nL_2), \quad (9)$$

式中： n 为腔内介质的群折射率； c 为真空中的光速。由双腔结构产生的游标效应可知，当两个反馈腔的长度近似相等时，出射光的自由光谱范围满足

$$X_{\text{FSR}} = c / (n\Delta L)。 \quad (10)$$

光纤激光器通过自注入双腔结构优化后的线宽^[13]可表示为

$$\Delta f = \frac{\Delta f_0}{[1 + (1 - R_{\text{in}}) \frac{\tau_e \sqrt{\gamma \epsilon R_e}}{\tau_{\text{in}} R_{\text{in}}} \sqrt{1 + t^2} \cos(\omega \tau_e + \arctan p)]^2}, \quad (11)$$

式中： Δf_0 为加入线宽优化结构前的激光线宽； $\tau_e = 2nL_i/c$ 为激光经过反馈腔回到腔内的时间； $L_i(i=1,2)$ 为单路反馈腔的腔长； τ_{in} 为光在腔内往返的时间； R_{in} 为光纤激光器输出端面的反射率； R_e 为腔外反射率； p 为线宽增强因子； ϵ 为由腔外噪声引起的线宽变化修正因子； γ 为光纤激光器输出端口的隔离度。可以发现，激光线宽与反馈腔长成反比，即随着反馈腔腔长的增加，输出光的线宽会不断被压窄。结合式(10)可知，

将反馈双腔的腔长调整为近似相等，就能达到增大输出光自由光谱范围和压窄线宽的目的。为了精确控制双腔反馈中两个反馈腔的腔长，选用型号相同的两个光纤环形器的两臂搭建腔长为 2 m 的反馈腔。

2.3 单纵模光纤激光器线宽测量实验设计

基于复合环形掺铒光纤激光器与光自注入双腔反馈结构搭建的线宽测量系统如图 3 所示。整个系统由光源系统、线宽优化系统以及线宽测量系统三部分组成。

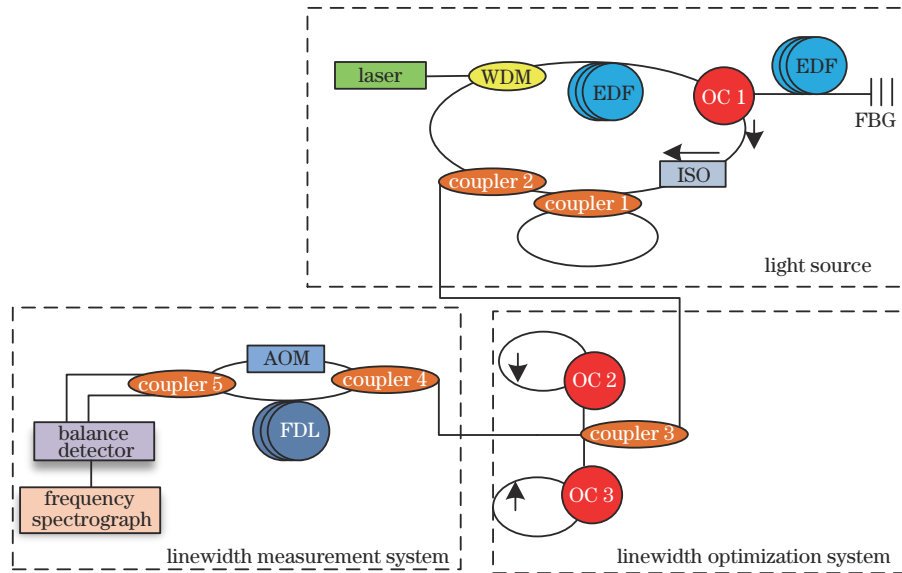


图 3 光纤激光线宽的优化及测量系统

Fig. 3 Optimization and measurement system of fiber laser linewidth

光源系统由波长为 980 nm 的半导体激光器、1550 nm/980 nm 波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、环形器(OC 1)、FBG、2×2耦合器(coupler 1)以及 1×2耦合器(coupler 2)构成。其中：未泵浦的EDF与FBG构成选模包，可达到抑制烧孔效应以及滤波选模的目的；基于2×2耦合器使次级环腔与主环腔产生游标效应以达到抑制跳模、增大输出光自由光谱范围的目的；通过级联2:8耦合器与优化系统，出射待优化的单纵模激光。

线宽优化系统为一个 3:4:3 的 1×3 耦合器(coupler 3)和两个环形器(OC 2、OC 3)搭建的双腔反馈结构。待优化的单纵模激光通过耦合器分成三路，分别在 OC 2、OC 3 中实现光自注入双腔反馈，以达到压窄线宽、抑制跳模、改善旁瓣干扰的目的。优化后的

激光通过 50:50 的 1×2 耦合器(coupler 4)分别与频率为 40 MHz 的 AOM 以及 50 km 长的光纤延迟线相连，通过 2×2 耦合器(coupler 5)合束后由平衡探测器进行光电转换，并通过 N9322C 型频谱仪测量显示出来，频谱仪的测量精度为 10 Hz。

2.4 实验结果与分析

搭建实验平台后，通过频谱仪测量得到优化前后的频谱，如图 4 所示。可以发现：零频处的信号为频谱仪自身存在的直流信号；加入双腔反馈优化结构后，输出频谱的边模抑制比从 51 dB 提升至 57 dB。原因是双腔反馈结构产生的游标效应使各模式的纵模间隔变大，提升了输出光的单纵模特性。此外，线宽优化结构的损耗会使一些原本夹杂在输出光中的微弱信号消失。

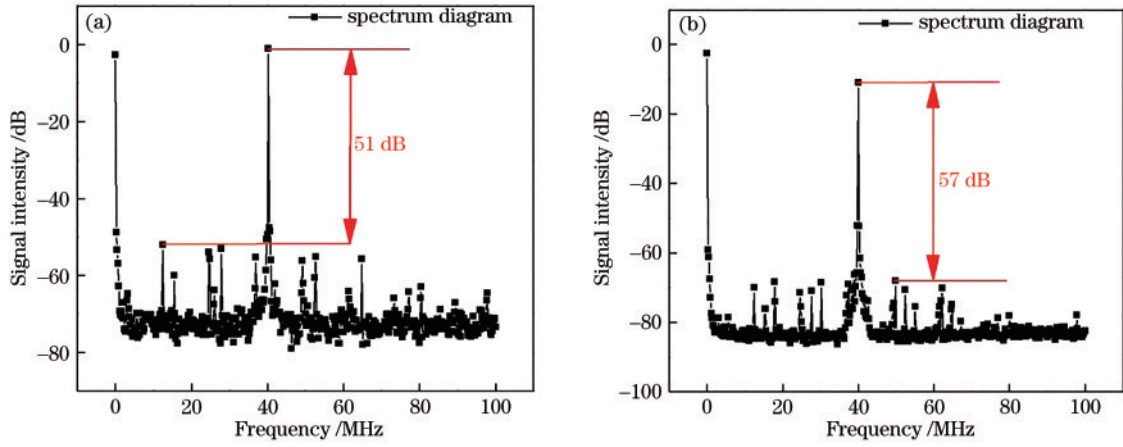


图 4 优化前后的频谱。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 4 Spectrum before and after optimization. (a) Before optimization; (b) after optimization

加入线宽优化结构前后频谱仪测量结果的洛伦兹拟合曲线如图 5 所示。对比发现:加入优化结构后输出光的中心频率由 40.057 MHz 移至 40.075 MHz,但

输出激光的频谱仍然为洛伦兹线形,同时,洛伦兹拟合曲线在 10 dB 处的半峰全宽明显变窄。这表明双腔反馈结构对线宽有明显的优化作用。

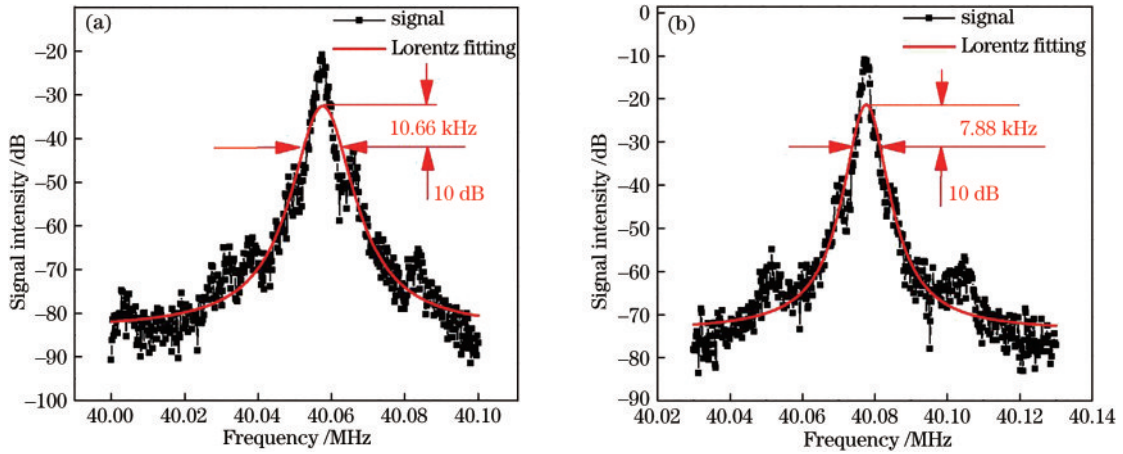


图 5 优化线宽频谱的洛伦兹拟合曲线。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 5 Lorentzian fitting curve of the optimized linewidth spectrum. (a) Before optimization; (b) after optimization

3 分析与讨论

通过光功率计、光谱仪以及频谱仪得到优化前后系统的平均输出光功率、中心波长以及输出谱线峰值功率 10 dB 处的一次线宽如表 1 所示。可以发现,优化后激光测量线宽由 10.66 kHz 降至 7.88 kHz,输出光

平均功率由 5.954 mW 降至 4.082 mW,输出光中心波长为 1550.13 nm,光谱仪的分辨率为 0.01 nm。

为了减少测量误差产生的影响,每 10 min 为间隔分别对优化前后的 10 dB 线宽重复测量 10 次,得到的测量结果与实际值如表 2、表 3 所示。可以发现,优化后激光谱线 10 dB 处的线宽测量平均值由 10.691 kHz 降

表 1 激光在 10 dB 处的线宽

Table 1 Linewidth of the laser at 10 dB

Parameter	Measure linewidth /kHz	Laser linewidth /kHz	Average power /mW	Center wavelength /nm
Before optimization	10.66	1.78	5.954	1550.13
After optimization	7.88	1.31	4.082	1550.13

表 2 优化前激光线宽的测量结果

Table 2 Measurement results of laser linewidth before optimization

unit: kHz

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Measure linewidth	10.66	10.74	10.60	10.72	10.71	10.66	10.73	10.71	10.70	10.68	10.691
Laser linewidth	1.78	1.79	1.77	1.79	1.79	1.78	1.79	1.79	1.78	1.78	1.782

表 3 优化后激光线宽的测量结果

Table 3 Measurement results of laser linewidth after optimization

unit: kHz

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Measure linewidth	7.88	7.97	7.89	8.08	7.72	7.84	7.90	7.93	7.87	8.06	7.914
Laser linewidth	1.31	1.33	1.32	1.35	1.29	1.31	1.32	1.32	1.31	1.34	1.319

至 7.914 kHz, 实际线宽由 1.782 kHz 降至 1.319 kHz, 线宽压缩了 25.98%。

4 结 论

基于复合环形光纤激光器, 通过搭建光自注入双腔反馈优化结构, 研究了光自注入双腔反馈线宽优化结构对光纤激光器线宽特性的影响。实验结果表明, 光自注入双腔结构对激光器的输出特性及线宽特性具有良好的优化能力。对于平均测量线宽为 10.691 kHz 的复合环形光纤激光器, 引入光自注入双腔结构后, 其边模抑制比由 51 dB 提升至 57 dB, 输出激光的实际线宽从 1.782 kHz 降至 1.319 kHz, 线宽压缩了 25.98%。

参 考 文 献

- [1] Parvizi R, Ali N M, AzarGoshasb T. Low threshold multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser generation in conjunction with a photonic crystal fiber[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(11): 115101.
- [2] 白冰. 光纤传输系统中光纤激光器关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 10-15.
Bai B. Research on key technology of fiber lasers in optical fiber transmission systems[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 10-15.
- [3] 汪琛. 单模光纤激光器及相干光通信应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 10-14.
Wang C. Research on single mode fiber laser and applications of coherent optical communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 10-14.
- [4] Suzuki A, Takahashi Y, Yoshida M, et al. An ultralow noise and narrow linewidth 4-shifted DFB Er-doped fiber laser with a ring cavity configuration[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1463-1465.
- [5] 代志勇, 张晓霞, 彭增寿, 等. 一种新颖的自反馈光注入单频窄线宽光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(6): 813-816.
Dai Z Y, Zhang X X, Peng Z S, et al. A novel single-frequency narrow linewidth fiber laser based on self-feedback light injection[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2010, 21(6): 813-816.
- [6] Shi J D, Alam S U, Ibsen M. Sub-watt threshold, kilohertz-linewidth Raman distributed-feedback fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1544-1546.
- [7] 赵冉冉, 何巍, 祝连庆. 一种新型窄线宽掺铒光纤激光器[J]. *激光与红外*, 2015, 45(5): 492-495.
Zhao R R, He W, Zhu L Q. A novel narrow line-width erbium-doped fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(5): 492-495.
- [8] 白燕, 延凤平, 冯亭, 等. 基于保偏掺铒光纤饱和吸收体的 2 μm 波段超窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0101003.
Bai Y, Yan F P, Feng T, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2 μm band using saturable absorber based on PM-TDF[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101003.
- [9] 胡杰, 王奕斐, 邢志坤, 等. 基于随机光纤光栅的窄线宽随机光纤激光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1614002.
Hu J, Wang Y F, Xing Z K, et al. Narrow-linewidth random fiber laser based on random fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1614002.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李舒然, 林鹏, 胡志凌, 等. 光纤延迟线对激光器线宽测量的影响及修正[J]. *天津理工大学学报*, 2012, 28(3): 27-29, 45.
Li S R, Lin P, Hu Z L, et al. Effect of fiber delay line on measurement of laser linewidth and data correction[J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2012, 28(3): 27-29, 45.
- [13] 黄仕宏. 激光线宽精密测量及 1.5 μm 光纤激光线宽压缩技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 80-84.
Huang S H. Study on the precise measurement of laser linewidth and linewidth compression of 1.5-μm fiber laser [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 80-84.