

低增益低噪声的增益钳制双向掺铒光纤放大器的优化设计

陈文嘉, 成纯富*, 欧艺文

(湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘要: 双向掺铒光纤放大器(Bi-EDFA)是空域有源光纤腔衰荡传感系统的关键器件,其增益特性和噪声特性直接影响传感系统的稳定性。设计了适用于空域有源光纤腔衰荡传感系统的低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA,并应用 Optisystem 仿真软件对其进行优化。仿真结果表明:通过优化设计,可获得增益系数、噪声系数分别为 15.35 dB、3.52 dB,且能保持增益钳制的 Bi-EDFA。

关键词: 空域有源光纤腔衰荡传感系统; 双向掺铒光纤放大器; 增益钳制; 低增益; 低噪声

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)10-0014-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal design of low-gain and low-noise gain-clamped bidirectional erbium-doped fiber amplifier

CHEN Wenjia, CHENG Chunfu*, OU Yiwen

(School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The bidirectional erbium-doped fiber amplifier(Bi-EDFA) is a key component of the spatial domain active fiber cavity ring-down sensing system, and its gain characteristics and noise characteristics directly affect the stability of the sensing system. A low-gain and low-noise gain-clamped Bi-EDFA suitable for spatial active fiber cavity ring-down sensing systems is designed and optimized by Optisystem simulation software. The simulation results show that by optimizing the design, a Bi-EDFA with gain coefficient and noise coefficient of 15.35 dB and 3.52 dB respectively can be obtained, and the gain can be clamped.

Key words: space domain active fiber cavity ring-down sensing system; bidirectional erbium-doped fiber amplifier; gain clamped; low-gain; low-noise

0 引言

时域无源光纤腔衰荡传感技术是由传统腔衰荡传感技术发展而来,该传感技术因具有稳定性好、易于实现准分布式传感和无需腔模式匹配等优点被广泛关注和研究^[1-2]。典型的光纤腔是由 2 个光纤耦合器取代高反射率镜片构成的传统衰荡腔。由于光纤腔无需调腔,大大提高了传感系统的稳定性,但也存在因

耦合器分光比不够高使腔内的固有损耗较大而导致灵敏度低的问题。降低腔内的固有损耗的方法有 2 种:一是采用直接降低固有损耗法,即使用具有低插入损耗的器件来降低腔内损耗,提高灵敏度,但这种方法降低的固有损耗非常有限^[3-4];二是采用有源光纤腔法,即在光纤腔内引入掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿腔内固有损耗,实现灵敏度的大幅度提升^[5-7]。这种时域有源光纤腔衰荡传感技术已成功应用于痕量气体的检测、原子与分子等吸收光谱的测量、医学诊断的测量和结构健康的监测,应用前景十分广泛^[8-9]。但是,在灵敏度提升的同时,这种时域有源光纤腔衰荡传感技术也存在因 EDFA 带来的增益不稳定和自发辐射噪声大而导致传感系统稳定性较差和精度不够高的问题^[10],尽管人们采用增益钳制的 EDFA 和自适应滤波器等方法克服这些问题,但传感系统的稳定性和测量精度仍然十分有限^[10-11],其主要原因是时域

收稿日期:2021-02-19。

基金项目:国家自然科学基金(61805075、61475044)资助。

作者简介: 陈文嘉(1998—),男,贵州盘县人,硕士研究生,主要研究方向为空域有源光纤腔衰荡传感技术、分布式光纤传感技术等。参与了“基于频移干涉光纤腔衰荡的高灵敏多点式光纤磁场传感方法研究”、“高亮度高平坦度超连续谱光源的宽带光纤腔衰荡传感方法及其应用研究”等项目。

* **通信作者:** 成纯富(1976—),男,博士,副教授,研究方向为新型光纤传感技术及其应用、FPGA 开发与设计等。



有源光纤腔衰荡传感技术采用的是脉冲光,且 EDFA 的大增益所带来的高自发辐射噪声的影响导致经 EDFA 放大的脉冲光不断波动,无法保证衰荡腔内功率的稳定性。此外,时域有源光纤腔衰荡传感系统需要调制的脉冲激光作为光源,但系统中使用了高速光电探测器和高速示波器,这些仪器使得传感系统的成本较高^[12]。因此,急需发展低成本、高稳定的新型光纤腔衰荡传感技术。

2011 年, YE F 等人^[13]将频移干涉技术引入到光纤腔衰荡传感技术中,提出了空域无源光纤腔衰荡传感技术,该技术采用低成本的连续光激光器、低速光电探测器和低速数据采集卡,降低了传感系统的成本,且采用的差分探测有效消除了直流噪声的干扰,改善了传感系统的稳定性,因此该技术得到了快速的发展,并成功地应用于弯曲损耗的测量^[13]、气体浓度与成分的同步检测^[14]、压力测量^[15]以及磁场检测^[16]等领域;但是,该技术也存在因腔内固有损耗大而导致灵敏度不够高的问题。而空域有源光纤腔衰荡传感技术在空域无源光纤腔衰荡技术的基础上,通过在衰荡腔内加入双向 EDFA(Bi-EDFA)来补偿顺时针和逆时针传输的 2 束连续光在衰荡腔内所形成的固有损耗,从而大大提高传感系统的灵敏度。尽管 Bi-EDFA 的特性已有一些研究^[17-19],但大部分 Bi-EDFA 的增益大、自发辐射噪声也较大,且主要应用于光通信系统。而适用于空域有源光纤腔衰荡传感系统的 Bi-EDFA 至今仍未见研究报道。

为此,本文设计基于线性腔的增益钳制 Bi-EDFA,并通过优化,获得适合于空域有源光纤腔衰荡传感系统的低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA。

1 Bi-EDFA 的基本理论

为了获得低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA,本文设计了基于光纤布喇格光栅(FBG)对的线性腔结构的 Bi-EDFA,其原理图如图 1 所示。为了确保空域有源光纤腔衰荡传感系统中顺时针和逆时针的 2 束光获得相同的增益,本文选择用单根掺铒光纤(EDF)来实现双向放大;同时,为了避免 2 束光之间产生干扰,采用了环形器(CIR)和隔离器(ISO)的组合来分离这 2 路信号;此外,在各自环路上通过了 10 GHz 带

通滤波器(BPF)来抑制自发辐射噪声,并设置可调光衰减器(VOA)来调整 EDFA 的增益大小。

根据 Bi-EDFA 的工作原理及其速率方程理论,可将 Bi-EDFA 简化为 Giles-Emmanue 模型,在稳态条件下,可用微分方程^[18-19]对其进行描述:

$$\frac{dP_k^{\pm}}{dz} = \pm(\alpha_k + g_k) \frac{n_2}{n_1} P_k^{\pm}(z) \pm g_k \frac{n_2}{n_1} m h \nu_k \Delta \nu_k \mp (\alpha_k + l_k) P_k^{\pm}(z) \quad (1)$$

其中, $P_k^{\pm}(z)$ 是在带宽 $\Delta \nu_k$ 内沿着 EDF 正反向传输的光功率,正负号代表传播的方向, z 是传播距离, ν_k 是光频率, n_1 是总粒子数, n_2 为亚稳态粒子数, $m=2$ 为自发辐射正交偏振态的个数, h 为普朗克常量, α_k 为 EDF 的吸收系数, g_k 为 EDF 的发射系数, l_k 为 EDF 的本征吸收系数。通过该方程可以精确得到每个波长沿着光纤的功率分布,进而得出噪声系数、增益系数随光纤长度变化的关系。

EDFA 最重要的性能指标包括增益系数、噪声系数。增益系数 G 表示为:

$$G = 10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

其中, P_{out} 和 P_{in} 分别表示 EDFA 的输出功率和输入功率;增益系数 G 是衡量 EDFA 放大能力的参数,影响 G 的因素有很多,例如:EDF 长度、泵浦功率和 FBG 对的反射率等。

噪声系数 NF ^[18-19]表示为:

$$NF = \frac{SNF_{in}}{SNF_{out}} = 2n_{sp} \frac{G-1}{G} \approx 2n_{sp} \quad (3)$$

$$n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - N_1} \quad (4)$$

其中, SNF_{in} 为输入信噪比, SNF_{out} 为输出信噪比, n_{sp} 为粒子反转效率, N_1 为基态粒子数。

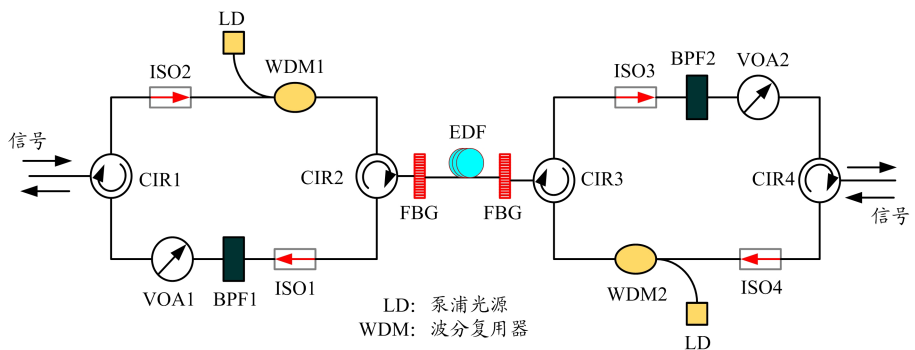


图 1 低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA 原理图

2 仿真结果与分析

为了验证所设计的增益钳制 Bi-EDFA 的钳制性能、增益特性和噪声特性,本文优化其参数,并根据图 1 应用 Optisystem 软件搭建了仿真模型。

2.1 仿真参数

本文基于低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA 原理图对 C 波段 Bi-EDFA 的增益钳制现象进行了仿真,具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 低增益、低噪声 Bi-EDFA 仿真参数

参数	符号	数值
泵浦光波长/nm	λ_p	980
信号光波长/nm	λ_s	1550
泵浦功率/dBm	P_p	20
信号功率/dBm	P_s	-30
铒纤长度/m	L	3
铒离子掺杂半径/ μm	a	2.2
铒纤数值孔径	NA	0.24
铒离子掺杂浓度/ m^{-3}	ρ	10^{25}
信号光受激吸收截面面积/ m^2	σ_s^a	4.09×10^{-25}
信号光受激辐射截面面积/ m^2	σ_s^e	3.97×10^{-25}
泵浦光受激吸收截面面积/ m^2	σ_p^a	2.70×10^{-25}

2.2 仿真结果及参数优化

图 2 为未加 FBG 对的 Bi-EDFA(未钳制)和添加了反射率为 0.95 的 FBG 对的 Bi-EDFA(增益钳制)增益特性和噪声特性对比图(右上图是有无 FBG 对的噪声系数曲线放大图)。可以看出,在信号功率为 -30~10 dBm 的范围内,未加 FBG 对的 Bi-EDFA 的增益从 30.84 dB 迅速减小到 16.98 dB,而添加了光栅对的 Bi-EDFA 的增益从 17.62 dB 缓慢减小到 17.01 dB,这表明 FBG 对起到了增益钳制的作用。增益钳制原理可解释为:在 980 nm 泵浦光的激励下,信号光经过 EDF 后得到放大;与此同时,FBG 对形成的法布里-珀罗谐

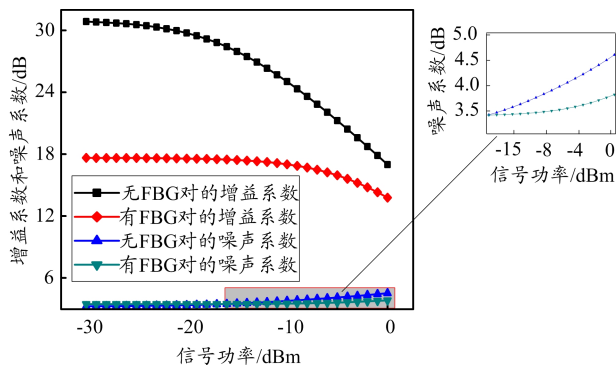


图 2 增益钳制 Bi-EDFA 与未钳制 Bi-EDFA 的增益特性和噪声特性

振腔中还会产生谐振激光,它与信号光共同竞争反转粒子数,产生此消彼涨的效应,从而实现了增益钳制的效果。与未添加 FBG 对的 Bi-EDFA 相比,添加了 FBG 对的 Bi-EDFA 不仅具有更好的噪声特性,而且还获得了更小的、更稳定的增益,非常适用于空域光纤腔衰荡传感技术。

FBG 对的反射率 R 对 Bi-EDFA 增益系数和噪声系数的影响如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,在信号功率为 -30~-10 dBm 的区间内,增益系数的变化范围分别为 10.64~10.50 dB、15.41~15.02 dB、17.62~17.00 dB 和 19.08~18.24 dB,这表明了 FBG 对的反射率越高,增益钳制效果越好;从图 3(b)可以看出,高反射率的 FBG 对却带来了更大的噪声系数。因此,为了获得适合于空域有源的光纤腔衰荡传感系统的低增益、低噪声的钳制 Bi-EDFA,FBG 对的反射率不宜太高或太低,太高会导致较大的噪声,太低会导致增益钳制的效果较差。由于空域有源腔衰荡传感系统本身的固有损耗较低,通常为 1 dB 左右,所以不需要太大的增益,

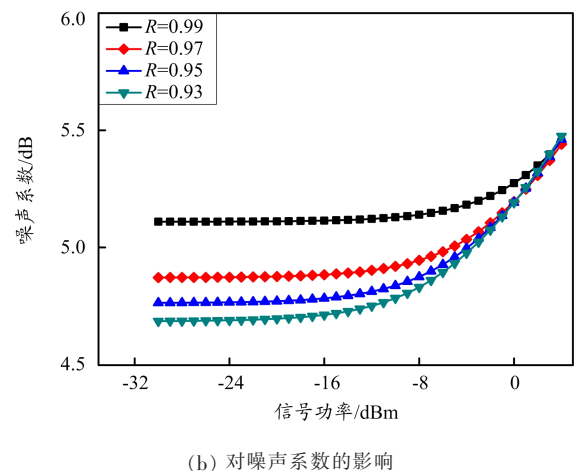
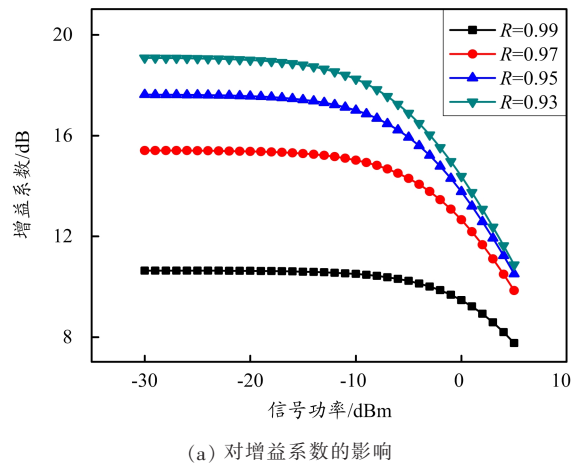


图 3 FBG 对的反射率对 Bi-EDFA 的增益系数和噪声系数的影响

同时为了提高传感系统的灵敏度和稳定性,增益钳制 Bi-EDFA 必须具有较小的噪声系数。由图 3 可知,当 FBG 对的反射率为 0.93 和 0.95 时,Bi-EDFA 的增益过大,增益钳制效果较差,这种较大增益的波动会造成空域有源光纤腔衰荡信号不再呈现完美的指数衰荡规律(即衰荡信号的指数拟合将变差),从而使传感系统的检测精度变差;当 FBG 对反射率为 0.99 时,虽然 Bi-EDFA 的增益钳制效果很好,但其噪声较大,大的噪声会恶化传感系统的信噪比,导致传感系统的稳定性变差;当 FBG 对的反射率为 0.97 时,Bi-EDFA 能保持较好的增益钳制效果和较低的噪声。因此,为了获得较高检测精度和较好稳定性的传感系统,选择反射率为 0.97 的 FBG 对比较合适。

当 FBG 对反射率为 0.97、信号功率为 30 dBm 时,EDF 长度对增益钳制 Bi-EDFA 的增益系数和噪声系数的影响如图 4 所示。可以看出,随着 EDF 长度的增加,增益钳制 Bi-EDFA 提供的增益会先增加后减少,即存在一个最佳 EDF 长度可使增益系数达到最大,其原因为:当 EDF 长度小于最佳长度时,铒离子 Er^{3+} 对泵浦光的吸收随着 EDF 长度的增加越来越充分,反转粒子数也随之逐渐增多,从而导致信号光逐渐增强,故增益逐渐增大;当 EDF 长度大于最佳长度时, Er^{3+} 对信号光的吸收变得逐渐显著,从而导致增益的下降,故出现了增益先增后减的现象。从图 4 还可以看出,Bi-EDFA 的噪声是先减少后一直增大。这是由于当 EDF 长度很短时,被泵浦到高能级的 Er^{3+} 数较少,受激辐射相对较少,有相当数量的 Er^{3+} 以自发辐射的形式跃迁,导致放大自发辐射噪声较高;随着 EDF 长度的增加,受激辐射逐渐占主导地位,从而导致放大自发辐射噪声逐渐减少;当 EDF 长度进一步增加时,由于后段 EDF 会放大前段 EDF 传播的光束,即同时放大了前段光纤产生的信号光和放大自发辐射噪声,

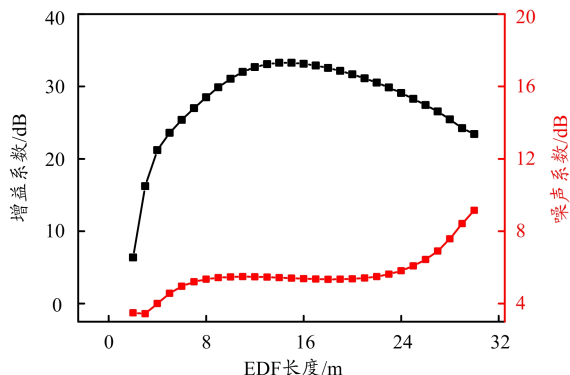


图4 EDF长度对Bi-EDFA的增益系数和噪声系数的影响

所以随着 EDF 长度增加,噪声系数上升越来越明显。仿真结果表明:在 EDF 长度为 3 m 处可获得最小的噪声系数,仅为 3.52 dB。因此,选择长度为 3 m 的 EDF,可获得低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA。

当 FBG 对的反射率为 0.97 和 EDF 长度为 3 m 时,泵浦功率对增益钳制 Bi-EDFA 的增益系数和噪声系数的影响,模拟结果如图 5 所示。可以看出,随着泵浦功率的增加,信号光逐渐增强,故增益上升较快;同时,随着泵浦功率的增加,增益饱和效应更加明显,即增益系数的变化速率更加缓慢,曲线逐渐变得平稳。同样,更大的泵浦功率使得反转粒子数维持在很高的水平,抑制了自发辐射噪声,噪声系数随泵浦功率的增加而持续地减小。

本文根据上述参数的优化,在 FBG 对的反射率为 0.97、EDF 长度为 3 m 和泵浦功率为 20 mW 的最佳条件下,获得了增益为 15.35 dB、噪声仅为 3.52 dB 的增益钳制 Bi-EDFA 如图 6 所示(右上图是有无 FBG 对的噪声系数曲线放大图)。可以看出,在最佳参数条件下,与未钳制 Bi-EDFA 相比,本文设计的增益钳制 Bi-EDFA 的增益钳制效果更好,并且具有更好的噪声特性。

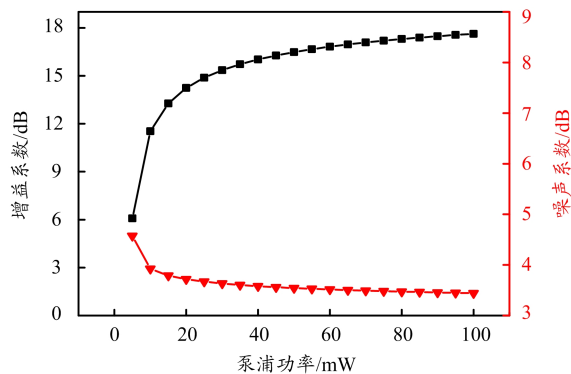


图5 泵浦功率对Bi-EDFA的增益系数和噪声系数的影响

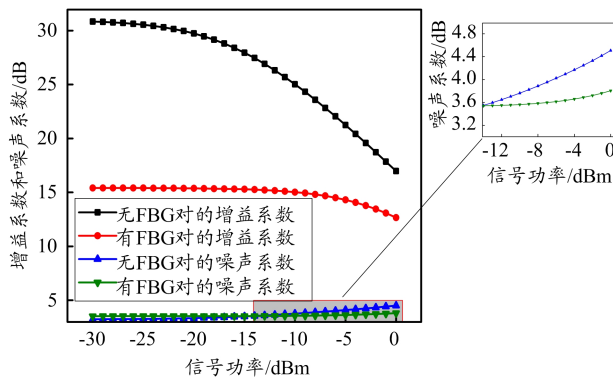


图6 最佳参数下,增益钳制 Bi-EDFA 与未钳制 Bi-EDFA 的增益特性和噪声特性

本文所提线性腔结构的 Bi-EDFA 和常用环形腔结构的 EDFA 的噪声系数对比如图 7 所示。可以看出,线性腔结构 Bi-EDFA 具有更低的噪声特性。与 2×2 耦合器构成的环形腔增益钳制结构 EDFA 获得的 8.3 dB 的噪声系数^[20]和在环路中加入 FBG 的环形腔结构 EDFA 获得的 5.2 dB 噪声系数^[21]这 2 个方案相比,本文所设计的线性腔结构 Bi-EDFA 仅带来了 3.52 dB 的噪声,这表明本文设计的 Bi-EDFA 更适用于在空域有源腔衰荡传感系统中补偿光纤衰荡腔的固有损耗。

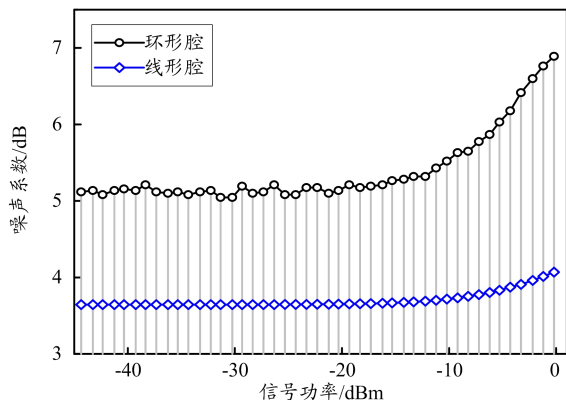


图7 信号光功率对线性腔与环形腔 EDFA 的噪声系数的影响

3 结束语

本文设计了基于线性腔结构的低增益、低噪声的增益钳制 Bi-EDFA,应用 Optisystem 软件对其增益和噪声特性进行了数值仿真,并分析了 FBG 对的反射率、EDF 长度和泵浦功率对 Bi-EDFA 的增益和噪声系数的影响。通过优化设计,在最佳参数条件下,获得了增益系数、噪声系数分别为 15.52 dB、3.25 dB 的增益钳制 Bi-EDFA。与传统环形腔结构的 EDFA 相比,本文设计的 Bi-EDFA 噪声系数和增益系数更小,更加适用于空域有源光纤腔衰荡传感系统。该方案对于指导适合应用于空域有源光纤腔衰荡传感系统的 Bi-EDFA 的优化设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] WANG C. Fiber loop ring-down a time-domain sensing technique for multi-function fiber optic sensor platforms: current status and design perspective[J]. Sensors, 2009, 9(10): 7595–7621.
- [2] SILVA S O, MAGALHÃES R, MARQUES M B, et al. New advances in fiber cavity ring-down technology [J]. Opt. Laser Technol., 2016, 78: 115–119.
- [3] TARSIA P B, BRZOZOWSKI D M, RABINOWITZ P, et al. Cavity ring-

down strain gauge[J]. Opt. Lett., 2004, 29: 1339–1341.

[4] GHIMIRE M, WANG C. Highly sensitive fiber loop ringdown strain sensor with low temperature sensitivity [J]. Meas. Sci. Technol., 2017, 28: 105101-1–105101-3.

[5] STEWART G, ATHERTON K, YU H, et al. An investigation of optical fiber amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements[J]. Meas. Sci. Technol., 2001, 12: 843–849.

[6] STEWART G, ATHERTON K, CULSHAW B. Cavity-enhanced spectroscopy in fiber cavities[J]. Opt. Lett., 2004, 29: 442–444.

[7] NI N, CHAN C C. Improving the measurement accuracy of CRD fiber amplified loop gas sensing system by using a digital LMS adaptive filter[J]. Meas. Sci. Technol., 2006, 17: 2349–2354.

[8] ANDREWS N L P, LITMAN J, STROH D, et al. Near-infrared absorption detection in picolitre liquid volumes using amplified fibre loop ring-down detection[J]. Opt. Fiber Technol., 2013, 19: 822–827.

[9] ZHAO Y, CHANG J, NI J, et al. Novel gas sensor combined active fiber loop ring-down and dual wavelengths differential absorption method [J]. Opt. Express., 2014, 22(9): 11244–11253.

[10] SHARMA K, KHUDUS M I M A, ALAM S U, et al. Comparison of detection limit in fiber-based conventional, amplified, and gain-clamped cavity ring-down techniques[J]. Opt. Commun., 2018, 407: 186–192.

[11] SILVA S, MAGALHÃES R, PÉREZ-HERRERA R A, et al. Fiber cavity ring down and gain amplification effect [J]. Photonic Sens., 2016 (4): 324–327.

[12] 刘亚萍,张伟刚,姜萌,等. 光纤腔衰荡光谱技术及其最新进展[J]. 物理学进展, 2008, 28(4): 401–409.

[13] YE F, QI B, QIAN L. Continuous-wave fiber cavity ring-down measurements using frequency shifted interferometry [J]. Opt. Lett., 2011, 36 (11): 2080–2082.

[14] CHENG C, YANG Z, OU Y, et al. Simultaneous measurement of gas composition and concentration combined fiber cavity ringdown and frequency-shifted interferometry[J]. Opt. Fiber Technol., 2019, 48: 303–307.

[15] OU Y, CHENG C, CHEN Z, et al. Continuous-wave fiber cavity ring-down pressure sensing based on frequency-shifted interferometry [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1207-1–1207-7.

[16] TIAN H, ZHOU C, FAN D, et al. Continuous-wave fiber cavity ring down magnetic field sensing method based on frequency-shifted interferometry[J]. Chin. Opt. Lett., 2014, 12(12): 120604-1–120604-4.

[17] 唐平生,杨晨,刘丹,等. 掺铒光纤放大器双向放大特性[J]. 半导体光电, 1997, 18(5): 307–31.

[18] 毛庆和,王劲松,孙小茵,等. 双向掺铒光纤放大器的特性分析[J]. 光学学报, 1999, 19(11): 1484–1490.

[19] 臧琦,邓雪,刘杰,等. 用于长距离光学频率传递链路的双向掺铒光纤放大器的优化设计[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306006-1–0306006-3.

[20] 何华杰,申云峰. 增益控制 EDFA 的原理、性能和系统试验[J]. 光子学报, 1997, 26(8): 716–718.

[21] TSUJI K, AND UEHARA T. Gain-clamped erbium-doped fiber amplifier using a Sagnac loop and low-reflectivity fiber Bragg grating [J]. IEICE Electronics Express, 2019, 16(8): 56-56.