

FBG 环形衰荡腔的温度传感动态特性研究

林洪太¹, 张丽^{1,2*}, 刘欣^{1,2}, 卢新硕¹, 邓霄^{1,2}, 崔丽琴^{1,2}, 韩国华¹

¹ 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

² 太原理工大学新型传感器与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 通过分析光纤布拉格光栅(FBG)光谱响应和指数衰荡的动态变化,探究内置 FBG 光纤环形衰荡腔的温度传感系统性能。建立 FBG 环形衰荡腔的理论模型,研究 FBG 透射谱中心波长与指数衰荡时间随温度的变化及其动态的演变过程,搭建 1551.13 nm 脉冲激光的 FBG 环形衰荡腔温度传感系统对其进行了实验验证,数值模拟结果与实验结果相吻合。实验结果表明,所提系统在低温环境 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下有良好的重复性、稳定性,测量分辨率高达 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度灵敏度为 $0.02501/(\mu\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$,FBG 中心波长的灵敏度为 $0.00248/(\mu\text{s}\cdot\text{pm})$ 。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光纤环形衰荡腔; 温度传感; 中心波长

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1006003

Research on Dynamic Characteristics of Temperature Sensing Based on Loop Ring-Down Cavity with FBG

Lin Hongtai¹, Zhang Li^{1,2*}, Liu Xin^{1,2}, Lu Xinshuo¹, Deng Xiao^{1,2},
Cui Liqin^{1,2}, Han Guohua¹

¹ College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

² Shanxi Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract In this study, the temperature sensing system performances of a fiber loop ring-down cavity with a fiber Bragg grating (FBG) are investigated by analyzing the spectral response of an FBG and the dynamic variation of an exponential decay. A theoretical FBG loop ring-down cavity model is established to investigate the relationships of the central wavelength of the FBG transmission spectrum and the exponential decay time with temperature change as well as their dynamic evolution procedures. They are experimentally tested by building a temperature sensing system integrated with a fiber loop ring-down cavity with an FBG and 1551.13 nm pulsed laser. The mathematical simulation results agree well with the experimental results, which show that the proposed system has perfect repeatability and stability under the low temperature conditions of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Specifically, the measurement resolution achieved is $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, the sensitivity of temperature is $0.025/(\mu\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$, and the sensitivity of FBG central wavelength is $0.00248/(\mu\text{s}\cdot\text{pm})$.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; fiber loop ring-down cavity; temperature sensing; central wavelength

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 140.3510

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)和光纤环形腔衰荡光谱(FLRDS)技术在结构健康监测、火灾监测、军事、医学、工业生产、水电工程等领域^[1-2]得到广泛的应用。FLRDS技术源自 20 世纪 80 年代的腔衰荡光谱

(CRDS)技术。CRDS 技术的优点是灵敏度高、分辨率高、受光源波动影响小^[3],该技术主要应用于吸收光谱和大气环境的测量,但对谐振腔的两个反射镜的反射率及准直要求极高,这严重限制了该技术的工程应用。Stewart 等^[4]首次提出 FLRDS 系统,该系统由腔内放大的掺铒光纤放大器(EDFA)和光纤

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-01-20; 录用日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51641904, 61705160, 51809190)、国家留学基金(201508140062)、山西省重点研发计划(201903D321001)

* E-mail: zhangli06@tyut.edu.cn

环组成,用来测量吸收损耗。之后 FLRDS 技术在折射率、液体浓度、气体浓度及吸收光谱等领域获得快速发展^[5]。传统 FLRDS 技术尽管在应变和温度检测方面的应用已有报道,但其系统灵敏度还有待提高。

FBG 具有易兼容、高分辨率及易集成等特点,在传感领域得到广泛关注,尤其在应变和温度检测方面^[6-7]。2006 年,一种测温的光纤光栅环形衰荡腔被提出,主要用于研究高温环境中的传感特性^[8]。随后长周期光纤光栅(LPG)的光纤环衰荡腔被提出,主要被应用于高灵敏度折射率传感器^[9]、化学传感器^[10]及压力传感器^[11]中。Zhao 等^[3]利用 FLRDS 技术从理论上分析了光纤环耦合器的分光比特性^[12],并利用该技术开展了气体浓度传感器的实验研究。Yarai 等^[13]利用外部的 FBG 衰荡腔系统来提高 FBG 温度传感器的测量分辨率。Chopra 等^[14]利用 FBG 环形腔原理初步研究了温度检测,但这只是基于理论的研究。目前还需对基于 FBG 环形衰荡腔(FLRDC-FBG)温度传感的波长漂移特性的动态变化及其在低温环境中的检测性能进行更多的研究。

本文以波长为 1551.13 nm 的脉冲激光作为探测信号,研究 FBG 环形衰荡腔的温度传感动态特性和其在低温环境中的传感性能。建立 FBG 环形衰荡腔温度传感的数学模型,研究 FBG 的指数方程和温度扰动下的谱位移响应特性,并通过建立 FBG 环形衰荡腔的温度传感装置,对理论分析进行实验验证。实验结果表明,此系统在低温 -40 °C 的环境中具有良好的重复性、稳定性,分辨率高,证明该系统拥有良好的工作性能。

2 理论原理与模拟

2.1 FBG 传感原理

FBG 是通过改变光纤纤芯区的折射率,使其产生周期性调制而形成的。当脉冲激光注入 FBG 时,FBG 反射回的中心波长被称为布拉格波长^[15],可以表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅周期; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率。

FBG 作为感测单元,本质上对温度变化和应变扰动同时敏感,这会影响到有效折射率和周期性。布拉格波长的变化可以表示为

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial\epsilon}\epsilon + \frac{\partial\lambda_B}{\partial T}\Delta T, \quad (2)$$

式中: T 为温度; ϵ 为应变。本文主要对温度进行研究,设置应变为零。FBG 仅受温度影响,主要体现在两方面,分别为使折射率改变的热光效应和使光栅周期改变的热膨胀效应,变化关系可以表示为

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT, \quad (3)$$

式中: $\frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}dT}$ 为热光系数 ξ ; $\frac{d\Lambda}{\Lambda dT}$ 为膨胀系数 α 。令 FBG 灵敏系数 $K_T = \xi + \alpha$,则(3)式可表示为

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = K_T dT. \quad (4)$$

(4)式表示 FBG 中心波长变化与温度变化之间的关系,即 FBG 传感的基本原理。针对 FBG 石英光纤, $\xi = 8.3 \times 10^{-8}$, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}$,则 $K_T = 6.33 \times 10^{-7}$ 。FBG 对温度的传感特性系数是一个与材料系数相关的常数,这保证了 FBG 作为温度传感器时会有很好的线性输出。

2.2 FBG 环形衰荡腔理论模型

图 1 为 FBG 环形衰荡腔理论模型,该模型由两个耦合比均为 90:10 的耦合器(C1, C2)、光隔离器(ISO)、FBG 传感单元及长度为 38.3 m 的单模光纤组成。其中, A 为环内固有损耗, B 为当 FBG 感测单元受到温度扰动时环内的额外损耗, I_0 为入射光强, I 为 t 时输出的光强。温度传感单元 FBG 在室温下的中心波长为 1551.135 nm,具有 10% 的反射率和 0.25 nm 的半峰全宽(FWHM)。脉冲激光经 C1 注入 FBG 环形衰荡腔并在光纤环内循环传输,但当脉冲激光每次经过 C2 时,会有 10% 的光脉冲信号输出被探测。脉冲激光在环腔内循环传输时会有光学损耗和 FBG 的附加损耗,最终脉冲激光信号减弱为零。表 1 为 FBG 环形衰荡腔数值模拟参数。

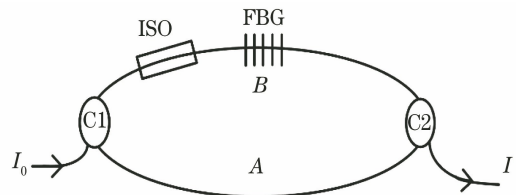


图 1 FBG 环形衰荡腔的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of FBG loop ring-down cavity

FBG 的光谱响应^[16]可以表示为

$$R(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\sqrt{k^2 - \Delta\beta^2} \times l)}{k^2 \cosh^2(\sqrt{k^2 - \Delta\beta^2} \times l) - \Delta\beta^2}, \quad (5)$$

表 1 FBG 环形衰荡腔数值模拟参数
Table 1 Simulated parameters of FBG loop ring-down cavity

Parameter	Value
Core refractive index n	1.46
$\Lambda / \mu\text{s}$	0.591
Grating length l / mm	10
Δn	0.0001
Single mode fiber length L / m	38.3
λ_B / nm	1551.135
Light speed $c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.0×10^8

式中: $k = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\Lambda^2} \right)$, Δn 为折射率变化量, 是一个常数; $\Delta\beta = \frac{2n\pi}{\lambda} - \frac{2n\pi}{\lambda_B}$; l 为 FBG 栅区长度; λ 为给定温度下 FBG 的中心波长。FBG 透射率是波长的函数, FBG 透射光谱响应曲线如图 2(a) 所示。图 2(b) 是光强指数衰减曲线。

当激光脉冲输入到 FBG 环形衰荡腔时, 由于固

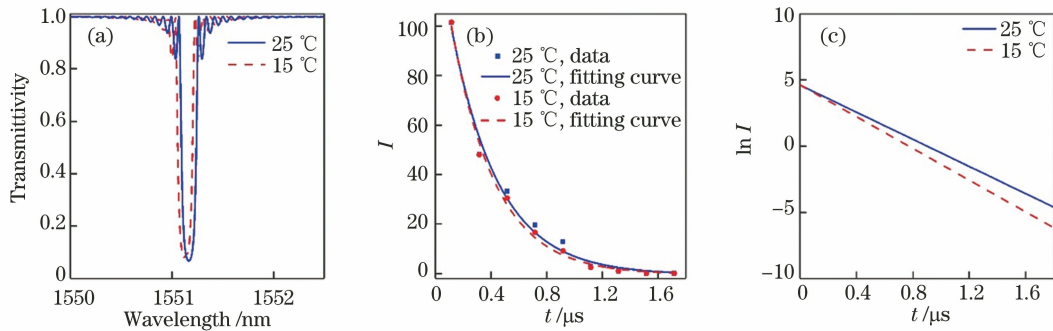


图 2 不同温度下的 FBG 环形衰荡腔的数值模拟结果。(a) FBG 光谱响应; (b) 光强指数衰减曲线; (c) 光强对数曲线
Fig. 2 Simulated results of FBG loop ring-down cavity with different temperature perturbations. (a) FBG spectral response; (b) exponential decay curve of intensity; (c) logarithm curve of intensity

当 FBG 感测单元受到温度扰动时, 环腔内的脉冲激光信号会有额外的损耗 B , 此时的衰荡时间 τ 可以表示为

$$\tau = \frac{nL}{c(A+B)}. \quad (9)$$

最终可获得 FBG 环形衰荡腔的传感原理公式^[8]:

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{cB}{nL} = K\Delta T, \quad (10)$$

式中: K 为演算系数且是常数。根据(4)、(10)式, 获得了由温度扰动引起的 FBG 中心波长变化与衰荡时间之间的关系, 表达式为

$$\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \frac{cK_T \Delta\lambda_B}{nL}. \quad (11)$$

(11) 式为 FBG 环形衰荡腔温度传感的基本原

理。当 FBG 受温度变化影响, 其中心波长发生变化时, 通过计算衰荡时间即可获得 $\Delta\lambda_B$ 和温度。图 2 为温度变化时 FBG 环形衰荡腔的模拟曲线。如图 2(a) 所示, 随着温度的降低, FBG 中心波长由 1551.135 nm 左移至 1551.035 nm, 中心波长变化了 0.100 nm。如图 2(b) 所示, 随着温度的降低, 衰荡时间由 0.507 μs 变化至 0.429 μs 。

$$I = I_0 e^{-\frac{c(A+B)t}{nL}}. \quad (6)$$

令 FBG 环形衰荡腔的初始温度为室温 25 $^{\circ}\text{C}$, FBG 中心波长为 1551.135 nm, 将该模型的初始衰荡时间 τ_0 定义为脉冲激光光强 I 下降到其 1/e 的时间, 表示为

$$\tau_0 = \frac{nL}{Ac}. \quad (7)$$

对(7)式取对数, 得到

$$\ln I = -\frac{cA}{nL} I_0 = -\frac{1}{\tau_0} I_0. \quad (8)$$

(8) 式表明, 该直线的斜率是衰荡时间的负逆, 曲线如图 2(c) 所示。

3 实验和结果

3.1 实验装置

利用现场可编程门阵列(FPGA)控制并产生波长为 1551.13 nm 的脉冲激光, 将其作为探测信号, 建立 FBG 环形衰荡腔的温度传感实验装置, 如图 3 所示, 该系统主要由脉冲激光源发生器和 FBG 环形衰荡腔组成。脉冲激光源发生器由分布式反馈激光

器(DFB)、FPGA 开发板、电光调制器(EOM)及 EDFA 组成。采用 FPGA 的锁相环倍频技术产生电脉冲,电脉冲和 DFB 产生的光信号进入 EOM 并调制产生脉宽和周期可调的脉冲激光信号。选择脉冲激光的宽度和重复周期时需考虑它们与光纤环长度是否匹配,即脉冲激光在光纤环内传播一周的时间需要大于脉冲的脉宽,并且脉冲信号衰减至零所需要的总时间要小于脉冲的重复周期,否则信号之间会产生串扰。光在光纤环中传播一周所用时间可以用 $t=nL/c$ 计算,其中 n 为 1.46, L 为 38.3 m, c 为 3×10^8 m/s,计算得 t 为 186 ns。因此选用脉宽

为 20 ns、周期为 10 μ s 的脉冲激光开展实验,在此条件下不会出现信号相互干扰的现象,可保证信号的正常传输。其中图 4(a)为多周期的脉冲激光电压曲线(脉冲周期为 10 μ s),图 4(b)为单脉冲电压曲线(脉宽为 20 ns)。脉冲激光的输出功率为 21.2 μ W,经 EDFA 后,脉冲激光信号输出功率被放大到 5.87 mW。经 EDFA 放大的脉冲激光信号进入 FBG 环形衰荡腔的温度传感器,从 C2 输出的 10%脉冲激光信号被光电检测器(PD)转换成电信号,再利用示波器(OSC)测量电信号。FBG 的透射光谱响应曲线由光谱分析仪(OSA)检测。

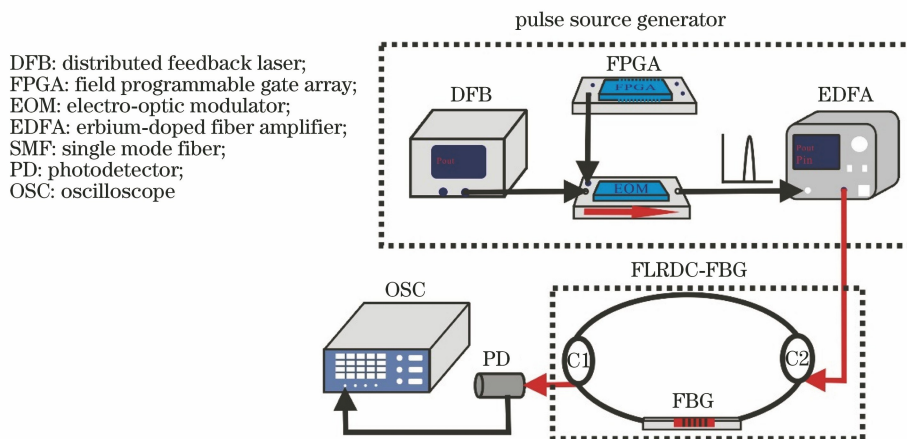


图 3 基于 FPGA 的 FLRDC-FBG 的温度传感装置

Fig. 3 Temperature sensing setup of FLRDC-FBG based on FPGA

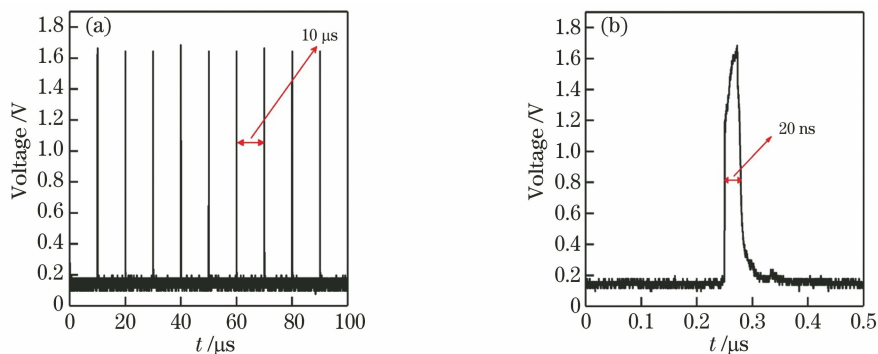


图 4 脉冲激光信号。(a)激光脉冲周期;(b)激光脉冲宽度

Fig. 4 Signal of optical pulse. (a) Period of optical pulse; (b) width of optical pulse

温度变化实验在 BILON-W-506S 恒温槽内进行。该恒温槽可在 $-60 \sim 95$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内工作,精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$,恒温波动误差为 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 。将 FBG 置于恒温槽内,将标定过的铂电阻作为温度测量探头,用数据采集器采集铂电阻的温度,并将结果作为参考温度。实验温度为 $25 \sim -40$ $^{\circ}\text{C}$,温度间隔为 5 $^{\circ}\text{C}$ 。当恒温槽稳定 30 min 时,进行衰荡时间数据的采集(10 组),并用数据采集器采集温度数值。

3.2 实验结果和讨论

令室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下所提装置的状态为初始状态,探究温度在 $25 \sim -40$ $^{\circ}\text{C}$ 内连续变化时,系统输出的衰荡曲线与 FBG 光谱响应曲线的动态变化。在温度为 $25, 5, -15, -35$ $^{\circ}\text{C}$ 下选择样本点,以显示 FBG 环形衰荡腔的温度传感的动态变化过程。图 5(a)~(d)分别表示 FBG 温度在 $25, 5, -15, -35$ $^{\circ}\text{C}$ 时系统输出的衰荡变化曲线,其中虚线为峰

值点的拟合曲线,曲线变化呈单指数衰减特性,表明随着温度的降低,脉冲数目随 FBG 额外损耗的增加而减少。图 5(a)为初始状态的输出曲线,其初始衰荡时间 τ_0 为 0.495 μs ,该值与(7)式数值模拟结果吻合。不同温度下指数衰荡时间分别为 0.401, 0.334, 0.283 μs ,如图 5(b)~(d)所示。温度的变化不仅会使系统输出的脉冲激光信号发生变化,

还会使对应的 FBG 中心波长也发生偏移,其中心波长变化的透射光谱如图 5(e)~(h)所示,可以看到,随着温度的降低,FBG 中心波长发生左移。图 5(e)为 FBG 初始状态的光谱图,随着温度的降低,FBG 中心波长分别位移到 1550.935, 1550.735, 1550.535 nm 处,波长偏移量分别为 0.2, 0.4, 0.6 nm。

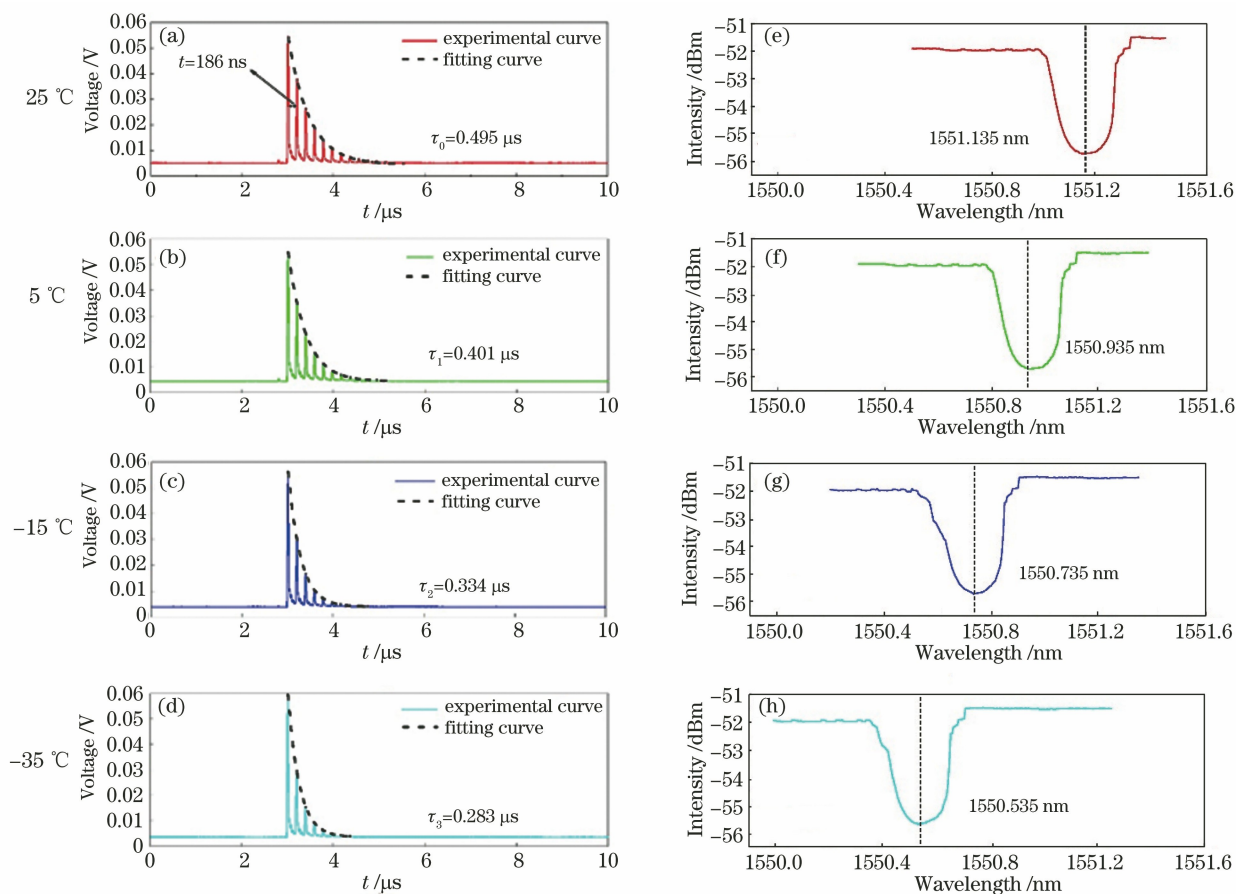


图 5 不同温度下的脉冲衰荡波形和波长变化过程。(a)~(d)衰荡波形;(e)~(h)波长变化

Fig. 5 Pulse ring-down waveforms and wavelength evolution at different temperatures.

(a)-(d) Pulse ring-down waveforms; (e)-(h) wavelength evolution

为进一步论证 FBG 环形衰荡腔温度传感的可行性,在多个温度下对 FBG 环形衰荡腔的衰荡性能进行测试,结果如图 6 所示。图 6(a)表示 FBG 温度在 25~−40 $^{\circ}\text{C}$ 内连续变化时获得的指数衰减曲线。图 6(b)为 $(1/\tau - 1/\tau_0)$ 与温度之间的线性关系,衰荡时间随温度的降低而减小,线性度良好,检测灵敏度为 0.02501/ $(\mu\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

当温度在 25~−40 $^{\circ}\text{C}$ 内连续变化时,FBG 透射光谱中心波长从 1551.135 nm 降低到 1550.480 nm,动态变化过程如图 7 所示。图 7(a)为 FBG 透射谱中心波长变化的光谱响应曲线,其对应的脉冲激光的衰荡曲线如图 6(a)所示。图 7(b)

为 FBG 中心波长偏移量与衰荡时间之间的关系,二者呈良好的线性关系,检测灵敏度为 0.00248/ $(\mu\text{s} \cdot \text{pm})$ 。

为进一步验证 FBG 环形衰荡腔温度传感系统的重复性和稳定性,先对该系统的重复性进行检测,将 FBG 传感单元分别置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 −25 $^{\circ}\text{C}$ 温度中进行多次测量,结果如图 8(a)所示。其中,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时重复性测试结果的平均值为 3.22164 μs^{-1} ,最大误差为 −0.00313 μs^{-1} ,方差为 0.00000196;温度为 −25 $^{\circ}\text{C}$ 时重复性测试结果的平均值为 2.04954 μs^{-1} ,大误差为 0.00272 μs^{-1} ,方差为 0.0000017。重复性测试结果表明,FBG 的最大误

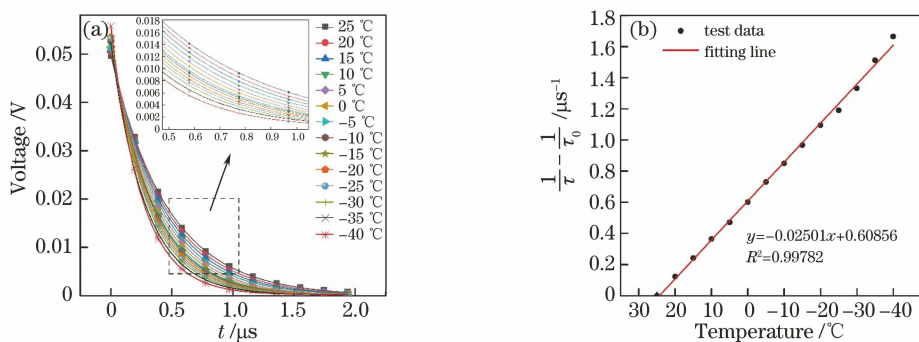


图 6 多温度拟合曲线。(a)衰荡时间演变过程;(b)温度与 $(1/\tau - 1/\tau_0)$ 之间关系
Fig. 6 Fitting curves at different temperatures. (a) Evolution process of ring-down time;
(b) relationship between temperature and $(1/\tau - 1/\tau_0)$

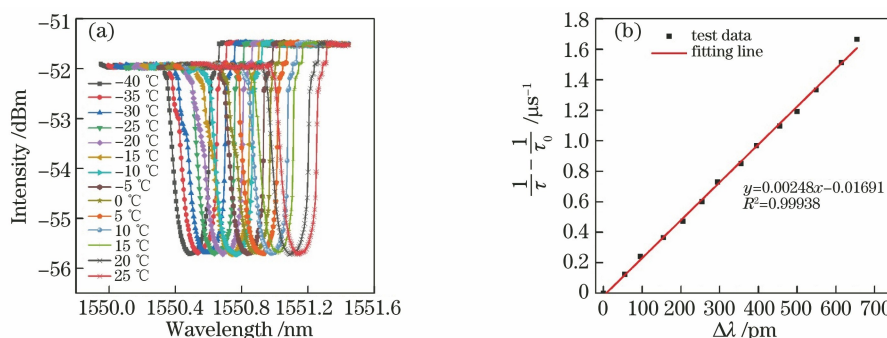


图 7 不同温度下透射光谱变化曲线。(a) FBG 透射光谱;(b) $\Delta\lambda$ 与 $(1/\tau - 1/\tau_0)$ 的线性关系
Fig. 7 Transmission spectral evolution curves at different temperatures. (a) Transmission spectra of FBG;
(b) linear relationship between $\Delta\lambda$ and $(1/\tau - 1/\tau_0)$

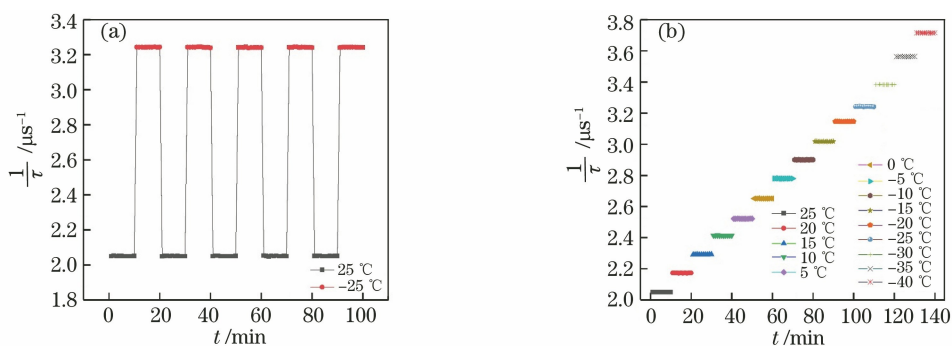


图 8 工作性能。(a)重复性测试;(b)稳定性测试
Fig. 8 Operation performance. (a) Repeatability results (b) stability results

差很小,方差基本相同且数值很小,验证了 FBG 环形衰荡腔的温度传感不仅能对温度快速响应,而且具有很好的重复性。在 $25 \sim -40$ °C 的温度范围内,温度每变化 1 °C,衰荡时间变化约为 $0.025 \mu\text{s}^{-1}$ 。图 8(a)中 25 °C 时结果的标准差为 $0.0014 \mu\text{s}^{-1}$,由此获得系统的温度测量分辨率约为 0.05 °C,证明该系统在低温区具有高分辨率^[8,13]。

图 8(b)为温度在 $25 \sim -40$ °C 内变化下,基于 FPGA 脉冲激光的 FBG 环形衰荡腔温度传感系统的稳定性测试结果,其中对每个温度点均进行了多

组数据测量,可以看到,测量值从 2.049891 增加到 3.715271 ,每个温度点数据基本保持不变。

上述实验验证,以 FPGA 控制产生的波长为 1551.13 nm 脉冲激光作为探测信号的 FBG 环形衰荡腔温度传感系统不仅重复性好而且具有较高的稳定性,该系统在 -40 °C 低温条件下仍具有良好的工作性能。

4 结 论

通过建立 FBG 环形衰荡腔的温度传感理论模型,对 FBG 的敏感特性及光纤衰荡腔的输出特性进

行了研究,获得了 FBG 传感单元透射光谱响应与指数衰荡时间的动态演变过程。以 FPGA 控制产生的波长为 1551.13 nm 的脉冲激光作为探测信号,建立 FBG 环形衰荡腔温度传感系统,对温度在 25 ~ -40 °C 内的系统输出特性进行了分析,实验结果与数值模拟结果吻合。结果表明,所提系统在低温环境下也具有良好的重复性、稳定性,分辨率高(达 0.05 °C),温度灵敏度为 0.02501/($\mu\text{s} \cdot \text{°C}$),波长灵敏度达 0.00248/($\mu\text{s} \cdot \text{pm}$)。

参 考 文 献

- [1] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328001.
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328001.
- [2] Wang Q, Xia J, Liu X, et al. A novel current sensor based on magnetic fluid and fiber loop cavity ring-down technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11): 6192-6198.
- [3] Zhao Y, Bai L, Wang Q. Gas concentration sensor based on fiber loop ring-down spectroscopy [J]. *Optics Communications*, 2013, 309: 328-332.
- [4] Stewart G, Atherton K, Yu H B, et al. An investigation of an optical fibre amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12 (7): 843-849.
- [5] Li X Y, Wang X, Niu P P, et al. Refractive index measurement using OTDR-based ring-down technique with S fiber taper [J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 186-190.
- [6] Cho K, Kim S T, Park Y H, et al. Measurement of mechanical and thermal strains by optical FBG sensors embedded in CFRP rod [J]. *Journal of Sensors*, 2019, 2019: 5345901.
- [7] He W, Xu X D, Jiang D S. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor with polymer jacket and its low-temperature characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1316-1319.
何伟, 徐先东, 姜德生. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(10): 1316-1319.
- [8] Wang C J, Mbi A. An alternative method to develop fibre grating temperature sensors using the fibre loop ringdown scheme [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(7): 1741-1751.
- [9] Yan J H, Jiang M. A high-sensitivity refractive-index sensor using LPG [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(2): 178-179, 190.
严金华, 姜萌. 一种基于 LPG 的高灵敏度折射率传感器[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(2): 178-179, 190.
- [10] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. Unique characteristics of long-period fibre gratings fabricated by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(6): 1432-1437.
王义平, 饶云江, 冉曾令, 等. 高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅传感器的特性研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(6): 1432-1437.
- [11] Gao K, Zhou Y W, Lin F, et al. A novel pressure sensor based on long period fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(8): 997-1000.
高侃, 周赢武, 林峰, 等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, 31(8): 997-1000.
- [12] Zhao Y, Bai L, Wang Q. Theoretical and experimental research on the effect of coupler splitting ratio for fiber loop ring-down spectroscopy technology [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(1): 99-103.
- [13] Yaraı A, Hara K. Resolution enhancement of fiber Bragg grating temperature sensor using a cavity ring-down technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(2): 028002.
- [14] Chopra S, Das L, Srinivasan B. Fiber interrogator for Bragg grating sensors based on cavity ring-down technique [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9654: 96541V.
- [15] Campanella C, Cuccovillo A, Campanella C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications [J]. *Sensors*, 2018, 18 (9): 3115.
- [16] Yariv A, Yeh P. *Optical electronics in modern communications*[M]. Chen H M, Shi W H, Wang J L, et al., Transl. 6th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 550-560.
阿曼·亚里夫, 波奇·耶赫. 光子学: 现代通信光电子学[M]. 陈鹤鸣, 施伟华, 汪静丽, 等, 译. 6 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 550-560.
- [17] Yang Y, Yang L Z, Zhang Z W, et al. Fiber loop ring down for static ice pressure detection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 312-316.