

激光与光电子学进展

基于随机激光的光纤温度传感器研究

赵天锋, 崔鹏鹏, 王富祥, 黄昌清*

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 提出并实现了一种基于随机激光的光纤温度传感器。通过单模光纤的瑞利散射与布拉格光纤光栅(FBG)的反射提供激光器的光反馈,实现随机激光输出。结果表明,输出激光中心波长在 1550.52 nm 附近,阈值功率约为 30 mW,当泵浦功率远高于阈值功率时,随机激光输出保持稳定。当FBG的温度在 30 °C到 90 °C范围内变化时,随机激光的输出波长会发生相应的移动,且温度和波长呈良好的线性关系,该传感器升温 and 降温时的温度灵敏度分别约为 10.5 pm/°C和 10.4 pm/°C。这种基于随机激光的光纤传感器将在温度传感领域有着广泛的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 光纤激光器; 布拉格光纤光栅; 瑞利散射

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1106004

Optical Fiber Temperature Sensor Based on Random Laser

Zhao Tianfeng, Cui Pengpeng, Wang Fuxiang, Huang Changqing*

*College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, Zhejiang, China*

Abstract Herein, an optical fiber temperature sensor based on a random laser was proposed and implemented. The Rayleigh scattering of the single-mode fiber and the reflection of fiber Bragg grating (FBG) were employed to provide the optical feedback of the laser and achieve a random laser output. Results show that the central wavelength and threshold power of the output laser are 1550.52 nm and 30 mW, respectively. When the pump power is considerably higher than the threshold power, the laser output remains stable. When the temperature of FBG range varies from 30 °C to 90 °C, the output wavelengths of the random laser will shift accordingly, and there is a good linear relationship between temperature and wavelength. The temperature sensitivities of the sensor are 10.5 pm/°C and 10.4 pm/°C during heating and cooling, respectively. This type of optical fiber sensor based on random lasers is expected to show diverse application prospects in the temperature sensing field.

Key words fiber optics; fiber sensor; fiber laser; fiber Bragg grating; Rayleigh scattering

1 引言

与传统光纤激光器相比,随机光纤激光器不依赖于传统的谐振腔结构,其光反馈一般由单模光纤(SMF)中的瑞利散射提供,因而具有结构简单、稳定性好、可靠性高等独特的优势,在过去十几年间

引起了研究人员极大的兴趣。因此,开展随机光纤激光的特性及应用研究具有重要的科学意义与实用价值^[1-3]。

温度传感器在工业领域有着广泛的应用,最流行的温度传感器是电传感器,包括热电温度计、电阻温度计等,而光纤传感器因其抗电磁干扰的优势

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-07-16; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A040001)

通信作者: *cqhuang@cjlu.edu.cn

而受到越来越多的关注。近年来,人们提出了各种各样的光纤传感结构来实现温度传感,例如,光纤布拉格光栅(FBG)、长周期光栅(LPFG)、Sagnac干涉仪(SI)、法布里-珀罗干涉仪(FPI)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)等^[4-9]。近年来,光纤激光传感器应运而生,与传统的宽带光源传感器相比,其具有稳定性好、光谱宽度窄、信噪比高等优点^[10-11]。Yin等^[12]制作了基于均匀光纤布拉格光栅(UFBG)和聚乙烯醇薄膜涂层LPFG的传感器探头,利用不同中心波长的两个UFBG来产生双波长激光输出,从而实现同时对温度和湿度的同时检测,其中基于波长检测和微分强度检测的温度灵敏度系数分别为 $9.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.021 \text{ dB}/^\circ\text{C}$;Kang等^[13]在基于环形腔激光器结构的基础上,提出了一种基于串联FBG与一段双芯光纤级联的传感探头,用于同时测量温度和应变,其应变灵敏度和温度灵敏度分别为 $7.52 \times 10^{-4} \text{ mW}/\mu\epsilon$ 和 $-4.45 \times 10^{-3} \text{ mW}/^\circ\text{C}$;Huang等^[14]设计了一种基于飞秒激光器刻蚀的FBG和Sagnac环结构的光纤激光器,FBG在 1100°C 下退火,提高了光纤激光器在高温下的稳定性,使得该结构在 1000°C 下可作为温度传感器稳定工作,实验测得的温度灵敏度约为 $15.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。由此可见,光纤激光传感器越来越受到国内外研究者的关注。但是,上述几种光纤激光传感器通常结构复杂不易实现,而随机激光器的独特性质既能保证结构简单,又能稳定产生较高的输

出功率,且随机激光在传感领域应用较少。因此,基于随机激光的光纤温度传感器在温度测量上有着极大的应用前景。

本文提出并实现了一种基于随机激光的光纤温度传感器。通过单模光纤的瑞利散射与FBG的反射提供激光器的光反馈,实现随机激光输出。研究了随机激光的输出光谱、阈值功率和稳定性,并探究了其在温度传感领域的应用。

2 基本原理与实验结构

本文提出的基于随机激光的光纤温度传感器实验装置如图1所示。激光器结构由FBG和10 km长的SMF提供光反馈,一段14 m长的掺铒光纤(EDF,在1550 nm处的峰值吸收为7 dB/m)作为有源增益介质。EDF由980 nm的泵浦激光器通过980/1550 nm波分复用器(WDM)进行泵浦,由于瑞利散射的随机分布反馈以及EDF的增益作用,最后形成随机激光振荡,输出光谱由光谱分析仪(OSA)得出,分辨率为0.02 nm。为了防止光纤端面的菲涅耳反射,图1中各部分光纤均采用熔接方式连接,整个光纤传感器的左右两端光纤端面作 8° 角处理。所使用FBG,既是光纤激光器的波长选择组件和反射镜,又是光纤激光传感器系统中的传感探头。基于布拉格波长对FBG的温度依赖性,本装置通过监测输出激光波长的偏移来实现温度传感。

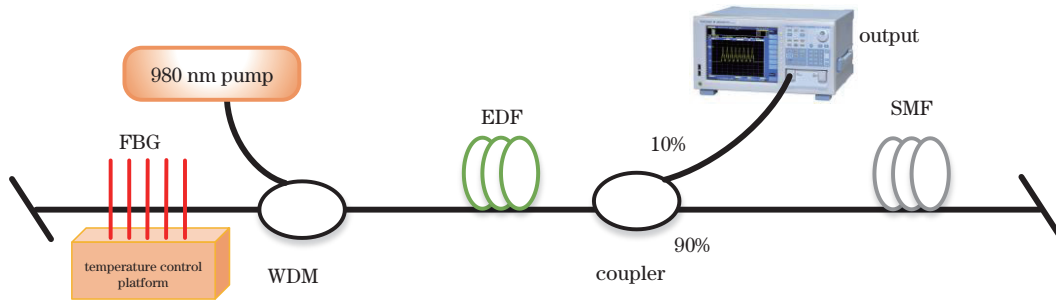


图1 光纤温度传感器实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup of optical fiber temperature sensor

FBG反射峰的中心波长满足

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

式中: n_{eff} 为纤芯有效折射率; Λ 表示光纤光栅的周期。

由式(1)可知,FBG反射峰的中心波长由光纤的有效折射率和周期所决定,温度和应力都会影响这两个参数。其中,温度通过热光效应影响光纤的有效折射率,通过热膨胀效应影响周期。当FBG不

受应力影响,仅受温度影响时,温度变化为 dT ,则 $d\lambda_B$ 为

$$d\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT. \quad (2)$$

令式(2)中的 $\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} = \alpha$, $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \beta$, 则式(2)

变为

$$d\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \beta) dT, \quad (3)$$

式中: α 为光纤的热光系数, 用来描述 FBG 的有效折射率随温度的变化规律; β 为光纤的热膨胀系数, 用来描述 FBG 的周期随温度的变化关系。从式(3)可以看出, 通过测量 FBG 的反射波长移动, 即输出激光的波长偏移, 便可以测量出 FBG 附近的环境温度。

3 分析与讨论

按图 1 所示将各部件连接好, 逐步增加 980 nm 激光器泵浦功率, 随机激光从激光器右侧输出。图 2(a) 显示了不同泵浦功率下的随机激光输出光谱。当泵浦功率为 24 mW 时, 输出光谱在 1550 nm 附近有一个不明显的波峰。随着泵浦功率的进一步增加, 输出光谱的峰值逐渐变大, 带宽越来越窄, 最后输出光谱趋于稳定和平滑。测得随机激光输出功率特性曲线如图 2(b) 所示, 可以发现, 随机激光的输出功率与泵浦功率呈良好的线性关系, 阈值泵浦功率约为 30 mW, 这里阈值功率较低的原因

是, 在激光器谐振腔的一侧使用 FBG 作为反射镜, 不仅可以降低激光阈值还能保持激光器的随机激光特性^[15]。图 2(c) 为所用 FBG 的透射光谱和反射光谱, FBG 的反射中心波长为 1550.36 nm, 3 dB 带宽为 0.60 nm, 反射率为 84.5%, 其中心波长与图 2(a) 中输出激光稳定的中心波长基本对应。图 2(d) 为激光器左侧作为输出端时, 不同泵浦功率下的随机激光输出光谱。不同于右侧作为激光输出, 当输出端在左侧, 泵浦功率达到 100 mW 时, 输出光谱在 1550 nm 附近才会出现一个不明显的波峰, 随着泵浦功率的进一步增加, 输出光谱的带宽开始变窄, 中心波长发生一定的偏移, 当泵浦功率为 400 mW 时, 输出激光的中心波长约为 1550.58 nm, 3 dB 带宽约为 0.15 nm。由于左侧输出时, 输出光谱的中心波长和 3 dB 带宽存在一定幅度的波动, 而右侧输出下的光谱更为平坦和光滑, 因此选取右侧输出下的激光器结构进行后续实验。

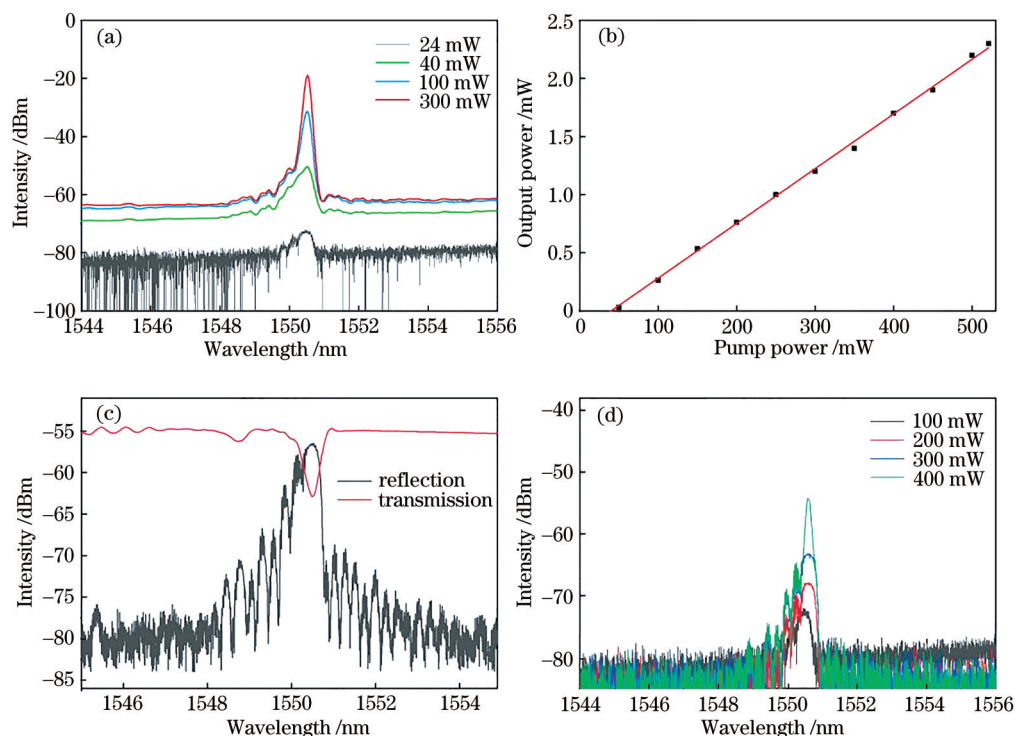


图 2 激光器的输出结果。(a)不同泵浦功率下的输出光谱;(b)输出功率特性曲线;(c) FBG 的反射谱和透射谱;(d)左端作为输出端时,不同泵浦功率下的输出光谱

Fig. 2 Output results of laser. (a) Output spectra under different pump powers; (b) output power characteristic curve; (c) reflection and transmission spectra of the FBG; (d) output spectra under different pump powers with left end as output end

当右侧输出时, 泵浦功率大于 100 mW 后, 输出随机激光趋于稳定, 中心波长基本稳定在 1550.52 nm 附近, 本实验中选取 300 mW 进行后续的温度传感实验。将泵浦功率固定在 300 mW, 控

制温度不变, 每隔 240 s 用光谱仪记录一次激光输出谱, 共记录 5 次, 结果如图 3 所示, 输出激光中心波长比较稳定, 3 dB 带宽稳定在 0.46 nm 附近, 峰值基本保持不变, 在监测阶段未见大幅度波动, 表明该

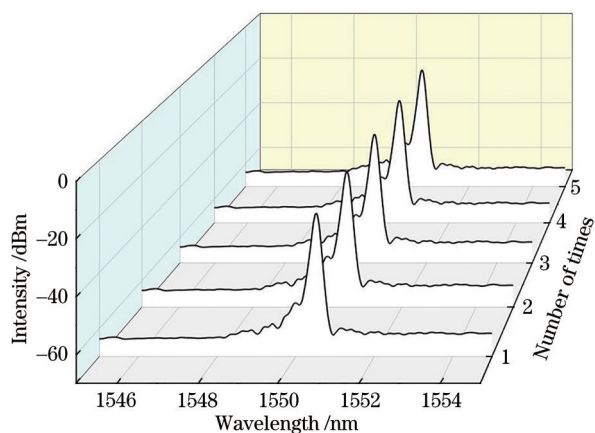


图 3 在 300 mW 泵浦功率下每 240 s 记录的激光输出光谱
Fig. 3 Laser output spectrum recorded every 240 s under 300 mW pump power

激光器结构能够稳定地进行温度监测。

图 4 分别显示了加热和降温过程中,不同温度下该光纤传感器的激光光谱,可以看出,随着外部温度的升高,激光输出波长向着更长的波长方向移动。图 5 则显示了该传感器的中心波长随温度从 30 °C 到 90 °C 的变化情况,三角形和倒三角形分别代表加热和冷却过程中记录的数据,实线代表它们的线性拟合。方块表示基于式(3)的仿真曲线,其仿真灵敏度为 11.2 pm/°C。从加热过程和冷却过程的线性拟合曲线可以看到,该传感器与温度具有良好的线性关系,从而使得温度传感器在 30 °C 到 90 °C 范围内更容易解调,其温度灵敏度在 30 °C 到 90 °C 的加热过程和冷却过程中分别约为 10.5 pm/°C 和 10.4 pm/°C,升温 and 降温变化曲线很好地重合在一起。因此,该温度传感器具有良好的温度传感能力。

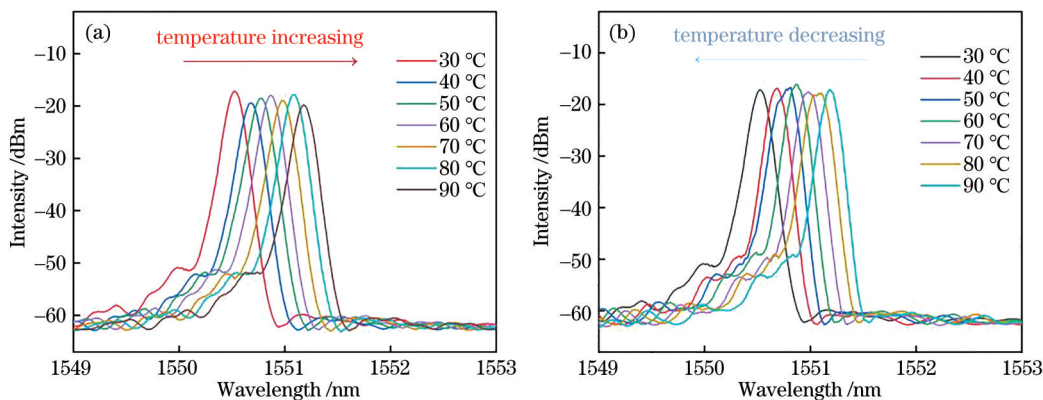


图 4 在不同温度下测量的输出光谱。(a)升温;(b)降温
Fig. 4 Output spectra measured at different temperatures. (a) Heating; (b) cooling

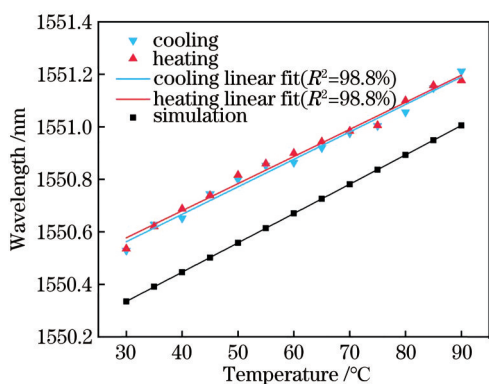


图 5 传感器的中心波长关于温度的变化函数
Fig. 5 Central wavelength of sensor as a function of temperature

4 结 论

本文提出并实现了一种简单的基于随机激光

的光纤温度传感器,通过单模光纤的瑞利散射与 FBG 的反射提供激光器的光反馈,实现随机激光输出。本文表征其激光器结构的性能后,对该传感器的温度传感能力进行了测试。实验结果表明,激光器的阈值功率约为 30 mW,输出激光中心波长在 1550.52 nm 附近。选取 300 mW 泵浦功率进行后续的温度传感实验,温度与输出激光的中心波长在 30 °C 到 90 °C 的测量范围内具有良好的线性关系,根据线性拟合曲线可知,该传感器升温 and 降温时的温度灵敏度分别约为 10.5 pm/°C 和 10.4 pm/°C。所提基于随机激光的光纤传感器结构简单,成本较低,有着较低的阈值功率和良好的稳定性,在温度测量领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

[1] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, et al.

- Random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2010, 21(12): 33.
- [2] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [3] Churkin D V, Sugavanam S, Vatik I D, et al. Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 516.
- [4] Jung J, Park N, Lee B. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium: ytterbium-doped fiber[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(7): 1118-1120.
- [5] Wang Q, Du C, Zhang J M, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating[J]. *Optics Communications*, 2016, 377: 89-93.
- [6] Shi J, Wang Y Y, Xu D G, et al. Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 794-797.
- [7] 申佳鑫, 王伟, 张军英, 等. 光纤布拉格光栅与空芯光纤多模干涉混合型温度应变双参量传感器[J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 0506006.
Shen J X, Wang W, Zhang J Y, et al. Hybrid temperature and strain dual-parameter sensor based on fiber Bragg grating and multi-mode interference of hollow-core fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 0506006.
- [8] Deng M, Liu L G, Zhao Y, et al. Highly sensitive temperature sensor based on an ultra-compact Mach-Zehnder interferometer with side-opened channels[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3549-3552.
- [9] Li H, Li H B, Meng F Y, et al. All-fiber MZI sensor based on seven-core fiber and fiber ball symmetrical structure[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 1-6.
- [10] Shao L Y, Liang J W, Zhang X P, et al. High-resolution refractive index sensing with dual-wavelength fiber laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8463-8467.
- [11] Shang Y, Guo R R, Liu Y, et al. Managing Brillouin frequency spacing for temperature measurement with Brillouin fiber laser sensor[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(4): 211.
- [12] Yin B, Sang G F, Yan R, et al. Wavelength-and intensity-demodulated dual-wavelength fiber laser sensor for simultaneous RH and temperature detection [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 52091-52099.
- [13] Kang Z X, Sun J, Bai Y L, et al. Twin-core fiber-based erbium-doped fiber laser sensor for decoupling measurement of temperature and strain[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(12): 6828-6832.
- [14] Huang F Q, Chen T, Si J H, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 233-237.
- [15] Zhang W L, Rao Y J, Zhu J M, et al. Low threshold 2nd-order random lasing of a fiber laser with a half-opened cavity[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14400-14405.