

引用本文: 杨明聪, 黄勇林, 钱宇阳. 基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 29–33.

基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器

杨明聪, 黄勇林*, 钱宇阳

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

摘要: 为了提高系统的温度灵敏度, 设计了一种基于倾斜光纤光栅(TFBG)边缘滤波的光纤布喇格光栅(FBG)温度传感器。该系统在常规的 TFBG 边缘滤波解调系统上引入一个光纤环形镜, 将从 TFBG 透射的光信号反射回来, 使其能再次通过 TFBG, 以增加 TFBG 透射谱的深度, 并对传感光栅进行封装。实验结果表明: 封装前和封装后的传感光栅在所测量的温度区间内中心波长的漂移量分别为 0.55 nm 和 7 nm, 封装后的漂移量扩大了十多倍; 同时, 由于 TFBG 边缘滤波解调传递函数的斜率得到提高, 传感器波长解调后的温度灵敏度也得到了改善, 是未级联光纤环形镜传感器的 1.6~2.4 倍。

关键词: 光纤传感技术; 倾斜光纤光栅; 边缘滤波; 温度传感

中图分类号: TN212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0029-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



FBG temperature sensor based on edge filtering of TFBG

YANG Mingcong, HUANG Yonglin*, QIAN Yuyang

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics(Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the temperature sensitivity of the system, a fiber Bragg grating(FBG) temperature sensor based on tilted fiber Bragg grating(TFBG) edge filter is designed. In this system, a fiber ring mirror is introduced into the conventional TFBG edge filter demodulation system to reflect the transmitted light signal from TFBG back, so that it can pass through TFBG again, increase the depth of TFBG transmission spectrum, and encapsulate the sensor grating. The experimental results show that the drift of the center wavelength of the sensor grating before and after packaging is 0.55 nm and 7 nm respectively, and the drift of the sensor grating after packaging is expanded by more than ten times. At the same time, because the slope of the demodulation transfer function of TFBG edge filter is improved, the temperature sensitivity of the sensor after wavelength demodulation is also improved, which is 1.6~2.4 times that of the uncascaded optical fiber ring mirror sensor.

Key words: optical fiber sensing technology, tilted fiber Bragg grating, edge filter, temperature sensing

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)^[1]的中心波长会随着外界物理量(如温度^[2]、应变^[3]、应力^[4]等因素)的改变而改变,因此它可用作传感器实现对物理量的测量。此外,FBG 还具有重量轻、体积小、不易影响被测环境等优

点^[5],被广泛应用于环境检测、生化工业和生命科学等需要高精度温度测量的领域。然而,目前基于 FBG 的温度传感器的灵敏度不高,采用灵敏度更高的波长位移解调技术是提高传感器灵敏度的方法之一。目前,解调技术包括匹配滤波技术^[6]、可调滤波技术^[7]、边缘滤波技术^[8]等。其中,边缘滤波技术无需扫描光纤光栅光谱便可以直接将光纤光栅波长转换为功率或输出电压,具有检测精度高、性价比高、不易受光源输出功率影响、工作稳定等优势,因而得到学者们更多的研究。

倾斜光纤光栅(TFBG)^[9]与普通 FBG 的纤芯折射率调制是均匀的,但 TFBG 平面与光纤的切向呈一定倾角,导致了多种复杂的模式耦合,这种特性被应用在制造滤波器^[10]、光谱分析仪^[11]、传感器^[12]和其它光学器件^[13]中。2020 年,田鑫等人^[14]设计了一种基于 TFBG

收稿日期: 2023-05-05。

基金项目: 江苏省光通信工程技术研究中心课题项目(ZXF201804)资助。

作者简介: 杨明聪(1998—),男,硕士研究生,本科毕业于南京邮电大学光电信息科学与工程专业,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院电子信息专业,主要从事光纤光栅传感、光纤通信技术方面的研究,参与了江苏省光通信工程技术研究中心课题项目。

* 通信作者: 黄勇林(1964—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤通信技术和光纤光栅传感。



杨明聪, 黄勇林, 钱宇阳. 基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器

的受激布里渊散射滤波器, 对后向受激布里渊散射 (SBS) 信号的平均滤除率高于 16 dB。2021 年, 吕清明等人^[15]提出了一种双通道探针式 81° TFBG 传感器, 对肝癌患者的血清具有较好的特异性响应。TFBG 不仅可用作传感器, 也可用作解调系统^[16]。此外, 通过提高 TFBG 光谱的透射深度, 系统的传感灵敏度和解调灵敏度也随之提高。2014 年, ZHENG J 等人^[17]设计了一种啁啾光栅级联 TFBG 的功率参考折射率计, 啁啾光栅反射的信号光能第二次通过 TFBG, 从而提高了光谱的透射深度。这种结构需要采用与 TFBG 带宽匹配的啁啾光栅, 但啁啾光栅难以覆盖 TFBG 的谱宽, 且限制了透射深度的增加。本文在文献[18]的基础上, 设计一种基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器, 以提高系统的温度灵敏度。

1 系统原理和实验装置

与常规的 TFBG 边缘滤波解调系统^[16]不同, 基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感系统引入了一个光纤环形镜, 该环形镜对 TFBG 的透射光完全反射, 使其再次经过 TFBG。然后, 通过 TFBG 与光纤环形镜级联被加深的光谱中的线性部分, 实现对温度传感信号的解调, 以有效提高传感器的灵敏度。基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器结构如图 1 所示。该系统由宽带光源、2 个光环行器、4 个 FBG、1 个耦合器、1 个 TFBG、1 个光纤环形镜和 2 个光探测器组成。光由宽带光源发出, 经光环行器 1 到达 FBG, 光被 FBG 反射后经耦合器被分为 2 路: 一路经过光环行器 2 和 TFBG, 光被光纤环形镜反射再次经过 TFBG, 最终进入到光探测器 2; 另一路直接到达光探测器 1, 作为参考光路, 与解调光路进行对照, 以补偿宽带光源波动对解调结果的影响。在光信号传输过程中, 作为边缘滤波器的 TFBG 不受任何应变和弯曲的影响, 在室温环境中, 其透射谱始终不变。改变 FBG 所处环境的温度, 使其中心波长

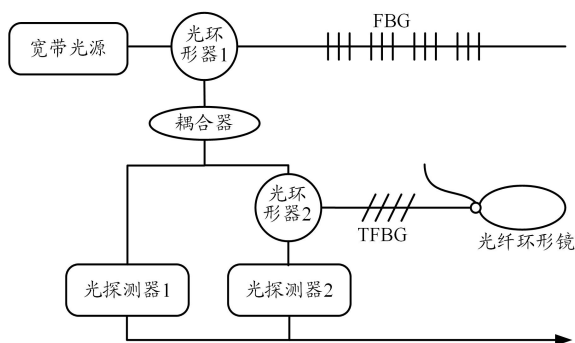


图 1 基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器

随温度的变化而漂移, 通过 TFBG 在相应波段的线性光谱, 将波长信号转换成功率信号以完成解调。本文对此采取了 2 种措施提高系统灵敏度: 一是将 FBG 封装在有机玻璃上, 温度改变时使 FBG 中心波长获得更大的漂移; 二是通过光纤环形镜将从 TFBG 透射的光信号反射, 使光信号能再次通过 TFBG, 从而增加 TFBG 透射谱的深度。

边缘滤波解调原理如图 2 所示。图中, I 表示光强, λ 表示波长, $H(\lambda)$ 为边缘滤波器的传递函数曲线, $R(\lambda)$ 为 FBG 反射谱。传递函数的斜率越大, 则温度传感解调系统的灵敏度越高。本实验采用光纤环形镜与 TFBG 级联, 增大了传递函数的斜率; λ_B 为 FBG 反射谱的中心波长, 得到 FBG 反射光谱第 2 次经过 TFBG 的光强为

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda' \quad (1)$$

若 $H(\lambda)$ 可近似为线性函数, 且 FBG 的谱宽远小于的波长范围, 则也可表示为线性函数, 即

$$I(\lambda) = H(\lambda) \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda' \quad (2)$$

式(2)可简化为

$$I(\lambda) = P + kP\Delta\lambda \quad (3)$$

其中, P 为系统初始光功率, k 为 FBG 所在解调区间的斜率, $\Delta\lambda$ 为 FBG 中心波长的漂移量, $R(\cdot)$ 为 FBG 反射谱代表的函数。

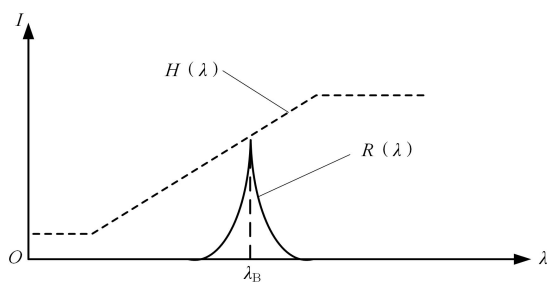


图 2 边缘滤波解调原理

温度是导致反射波长漂移的直接物理因素之一。然而, 由于裸光纤光栅的热敏系数非常低, 它对温度变化的响应并不敏感。例如, 在 1 550 nm 波段, 裸光纤光栅的温度灵敏系数约为 0.01 nm/°C^[19], 如此低的灵敏度不适于实际的工程测量; 而封装 FBG 传感器可以使其温度传感能力得到提高, 其温度敏感系数是裸光纤光栅的 3 倍以上^[20]。本文将 FBG 封装在有机玻璃上, 置于温控箱中以改变环境温度。

经过封装的 FBG 波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与温度变化量

ΔT 的关系式为

$$\Delta\lambda = \lambda_B [\alpha_f + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha_f)] \Delta T \quad (4)$$

其中, α_f 表示纤芯的热胀系数, ξ 表示纤芯的热光系数, P_e 表示光纤的有效光弹系数, α_s 表示有机玻璃衬底材料的热胀系数, α_s 远大于纤芯的热胀系数 α_f , 因此相较于未封装的 FBG, 其 FBG 中心波长随温度改变的漂移量会大幅增加。文献[21]提出选用热胀系数很大的聚合物对 FBG 进行封装, 可以将 FBG 的温度灵敏度增大十余倍。因此, 本文选用聚甲基丙烯酸甲酯做为封装 FBG 的衬底材料, 即有机玻璃, 其热胀系数为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

2 实验结果与分析讨论

本文实验采用的 TFBG 由康宁公司的单模光纤 SMF-28e+TM 写制, 光栅长度为 2 cm, 栅格倾角为 8° , 在 TFBG 两侧尾纤熔接了 FC-FC 单头跳线以便连接。实验使用的控温装置是精宏仪器的 DHG-9023A, 控温精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验光源采用浩源光电的 ASE-C 宽带光源, 输出波长在 1 525~1 565 nm, 满足中心波长为 1 550 nm 的需求; 输出功率为 20 dBm, 即 100 mW。纤芯模波长在 L 波段, 中心波长约为 1 570 nm; 包层模波长在 C 波段, 中心波长为 1 525~1 568 nm。当 TFBG 处于空气中时, TFBG 初始包层模透射谱如图 3 所示。可以看出, 图中存在多个谐振峰, 最大透射深度约为 4 dB。

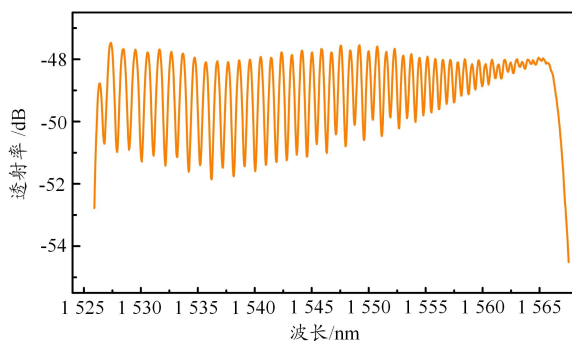


图3 TFBG 初始包层模透射谱

除了纤芯的有效折射率, 包层的有效折射率(环境折射率)也是影响 TFBG 包层谐振峰的因素。当 TFBG 所处环境的折射率一直提高, 包层模将不再受光纤包层的限制, 其谐振峰会按照从短波到长波的顺序泄漏到周围的介质中, 并演化为耗散性漏模的模式^[22]。当 TFBG 的周围环境的折射率大于其包层折射率时, 其透射谱会产生线性度良好且宽度较宽的下陷沿和上升沿, TFBG 浸没在折射率溶液中的级联和未级

联光纤环形镜的透射谱如图 4 所示。可以看出, 透射光谱的线性区间约在 1 526~1 535 nm 和 1 550~1 565 nm, 级联光纤环形镜的曲线深度明显加深, 其线性部分的斜率明显增大, 即当 FBG 所处环境温度改变时, 其光谱中心波长的偏移可以使中心波长功率变化更大。因此, 采用级联光纤环形镜作为边缘滤波器可以显著提高温度传感的灵敏度。

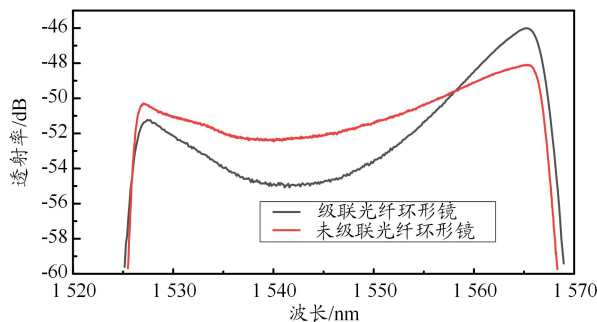


图4 级联和未级联光纤环形镜的 TFBG 透射谱

本文研究 4 个 FBG 反射谱的中心波长 λ_B (1 526、1 550、1 553、1 556 nm) 随温度改变的漂移情况(如图 5 所示)。可以看出, FBG 的反射光谱随着温度的升高向着长波长移动。在温度为 23~78 $^{\circ}\text{C}$ 时, 经有机玻璃封装的 4 个 FBG 反射谱的中心波长均漂移了约 7 nm, 其在相同温度区间内中心波长的漂移量仅约为 0.55 nm, 漂移量扩大了十多倍。经过扩大的波长漂移量可以遍历 TFBG 透射谱的线性区间, 从而增大中心波长功率的变化量, 最终达到提高灵敏度的目的。通过实验测得的数据可知, 4 个 FBG 反射谱的中心波长与温度的关系可以分别拟合为以下 4 个线性方程:

$$\begin{aligned} 1\ 526\text{ nm}: & y = 0.127\ 9x + 1\ 523.5; \\ 1\ 551\text{ nm}: & y = 0.135x + 1\ 547.4; \\ 1\ 553\text{ nm}: & y = 0.135\ 2x + 1\ 550.2; \\ 1\ 556\text{ nm}: & y = 0.130\ 3x + 1\ 553.3. \end{aligned}$$

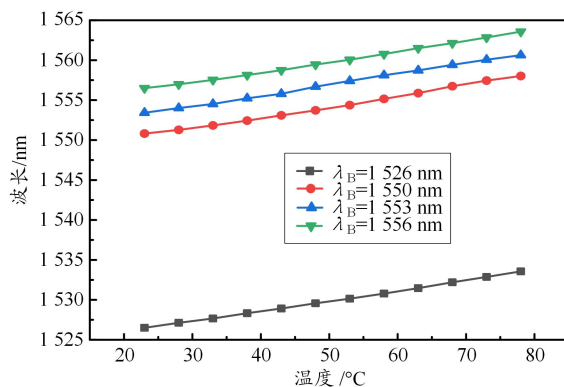


图5 FBG 反射谱的中心波长随温度改变的漂移情况

杨明聪, 黄勇林, 钱宇阳. 基于 TFBG 边缘滤波的 FBG 温度传感器

4 个 FBG 反射谱的中心波长位移灵敏度分别为 0.127 9、0.135、0.135 2、0.130 3 nm/°C。由此可知, 经过封装的 FBG 的灵敏度比裸 FBG 提高了十余倍, 这对解调部分的测量非常有利。

在 4 个 FBG 的传感信号被 TFBG 边缘滤波解调后, 光探测器接收到的反射谱中心波长光功率随温度升高的变化趋势如图 6 所示。同时, 使用 Origin 软件将中心波长功率与温度拟合为以下 4 个线性方程:

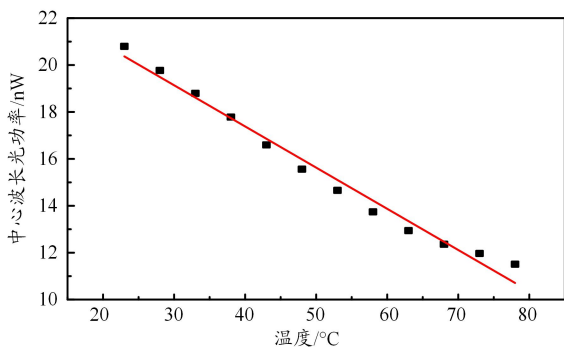
$$P_1(T) = -0.1756\Delta T + 24.407 \quad (5)$$

$$P_2(T) = 0.4468\Delta T + 8.5024 \quad (6)$$

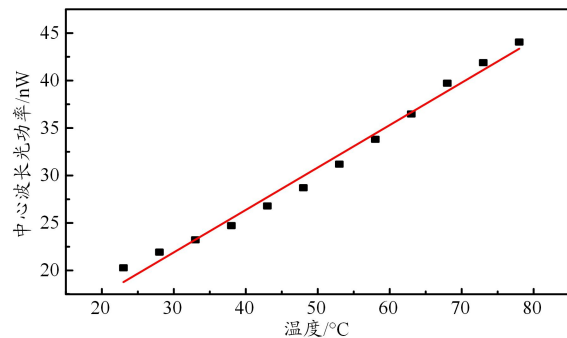
$$P_3(T) = 0.4988\Delta T + 7.0456 \quad (7)$$

$$P_4(T) = 0.7318\Delta T + 6.6455 \quad (8)$$

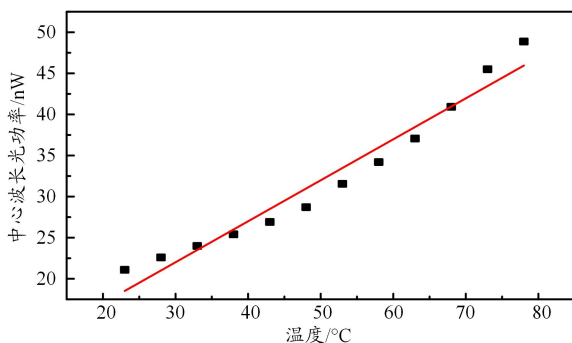
根据图 6 计算可知, λ_B 为 1 526 nm 时 FBG 对应



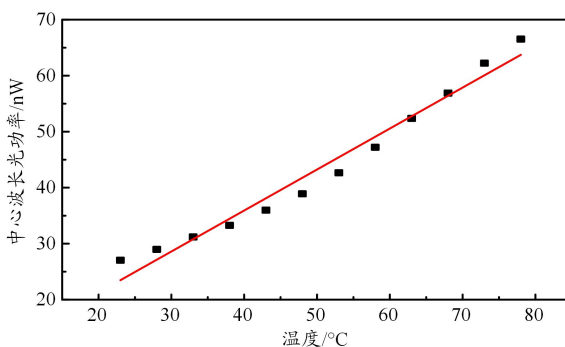
(a) λ_B 为 1 526 nm



(b) λ_B 为 1 550 nm



(c) λ_B 为 1 553 nm



(d) λ_B 为 1 556 nm

图 6 4 个 FBG 反射谱中心波长光功率随温度升高的变化趋势

的TFBG 解调区间为 1 526.56~1 533.59 nm, 灵敏度为 $-0.1756 \text{ nW/}^\circ\text{C}$, 此区间处于 TFBG 光谱的下降沿, 所以系统检测到的中心波长功率随着温度升高而下降; λ_B 为 1 550 nm 时, FBG 对应的 TFBG 解调区间为 1 550.81~1 558.06 nm, 灵敏度为 $0.4468 \text{ nW/}^\circ\text{C}$; λ_B 为 1 553 nm 时, FBG 对应的 TFBG 解调区间为 1 553.46~1 560.67 nm, 灵敏度为 $0.4988 \text{ nW/}^\circ\text{C}$; λ_B 为 1 556 nm 时, FBG 对应的 TFBG 解调区间为 1 556.47~1 563.58 nm, 灵敏度为 $0.7318 \text{ nW/}^\circ\text{C}$ 。后面这 3 个 FBG 对应的解调区间均处于 TFBG 光谱的上升沿, 当温度升高时系统检测到的中心波长功率随之上升。

通过分析以上数据可知, λ_B 为 1 556 nm 时的 FBG 经解调后的灵敏度最高, 因为其波长漂移的区间处于 TFBG 光谱上升沿斜率较大的一段。而 λ_B 为 1 526 nm 时的 FBG 的灵敏度是最低, 这是由于其波长漂移的区间所处的下降沿斜率较小。为了验证光纤环形镜的作用, 本文也对 TFBG 未级联光纤环形镜时的系统进行了实验, 使用 Origin 软件对测得的中心波长功率与温度的关系进行拟合得到温度灵敏度。2 种传感器的灵敏度对比情况如表 1 所示。可以看出, 将 TFBG 与光纤环形镜级联后四波长系统的温度灵敏度均有很大的提升, 是未级联光纤环境镜传感器的 1.6~2.4 倍。由此可见, 光纤环形镜对 TFBG 透射谱不同波长处斜率增加的倍数并不相同, 斜率越大增加的倍数越大, 因此

表 1 未级联光纤环形镜与级联光纤环形镜传感器的灵敏度

光纤环形镜 是否级联	FBG 的灵敏度/[nW·(°C)]			
	$\lambda_B=1\ 526\text{ nm}$	$\lambda_B=1\ 550\text{ nm}$	$\lambda_B=1\ 553\text{ nm}$	$\lambda_B=1\ 556\text{ nm}$
未级联	-0.107 2	0.193 7	0.232 3	0.298 7
级联	-0.175 6	0.446 8	0.498 8	0.731 8

在实际应用中可以在合适的范围内选取反射谱的中心波长较大的 FBG。

3 结束语

本文设计了一种基于 TFBG 边缘滤波解调的 FBG 温度传感器。当 TFBG 所处环境折射率大于 TFBG 包层折射率时,由于 TFBG 具有线性度良好的光谱特性,本文通过级联光纤环形镜使 FBG 光谱 2 次经 TFBG,这样可以将波长信号转换为功率信号,从而解调出由温度变化引起的光栅中心波长的变化。这种方法显著提高了传感器的温度灵敏度。实验研究表明:在 23~78 °C 的温度变化内,传感器测得的中心波长功率与温度有着良好的线性关系,4 个 FBG 的温度灵敏度分别为 -0.175 6、0.446 8、0.498 8、0.731 8 nm/°C。

参考文献:

- [1] JIANG Q. A comparison study of the sensing characteristics of FBG and TFBG[J]. *Sensor Review*, 2013, 33(1): 68-79.
- [2] 陈梓泳,何俊,徐锡镇,等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 15-23.
- [3] 王紫超,刘志昂,杨华东. 光频域反射与超弱光纤布拉格光栅技术的结构监测性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(21): 97-103.
- [4] 张伟刚,刘艳格,王跃,等. 利用单光纤光栅实现力学量垂直感测的研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 71-74.
- [5] 廖光萌,何建新,朱玉琴,等. 光纤光栅传感器及其应用[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(11): 142-149.
- [6] DASTMALCHI M, DOUCET S, RUSCH L A, et al. FBG-based matched filters for optical processing of RF signals[J]. *Photonics Journal*, 2012, 4(3): 832-843.
- [7] ROCHETTE M, LITTLER I C M, MCKERRACHER R W, et al. A dispersionless and bandwidth-adjustable FBG filter for reconfigurable 2R-Regeneration[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, 17(8): 1680-1682.
- [8] ZHANG X D, NIU H, HOU C G, et al. An edge-filter FBG interrogation approach based on tunable Fabry-Perot filter for strain measurement of planetary gearbox[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102379-1-102379-9.
- [9] JAUREGUI C, QUINTELA A, ECHEVARRIA J, et al. Experimental characterization of tilted fiber Bragg gratings [C]//*Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, May 10, 2002, Portland, USA. New York: IEEE,

2002: 159-162.

- [10] HOLMES M J, KASHYAP R, WYATT R, et al. Ultra narrow-band optical fibre sidetap filters[C]//24th European Conference on Optical Communication, September 20-24, 1998, Madrid, Spain. New York: IEEE, 1998: 137-138.
- [11] WAGENER J L, STRASSER T A, PEDRAZZANI J R, et al. Fiber grating optical spectrum analyzer tap [C]//Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications, September 22-25, 1997, Edinburgh, UK. New York: IEEE, 1997: 65-68.
- [12] LAFFONT G, FERDINAND P. Fiber Bragg grating-induced coupling to cladding modes for refractive index measurements[C]//Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors, October 11-13, 2000, Venice, Italy. Washington: SPIE, 2000: 326-329.
- [13] LÓPEZ J M, HIGUERA J. Handbook of optical fiber sensing technology[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.
- [14] 田鑫,王蒙,王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 38-43.
- [15] 吕清明,罗彬彬,杨琪,等. 基于双通道探针式 81°倾斜光纤光栅的甲胎蛋白免疫检测[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 29-38.
- [16] 张卫华,童峥嵘,苗银萍,等. 基于倾斜光纤光栅的传感解调研究[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(4): 284-287.
- [17] ZHENG J, DONG X Y, JI J H, et al. Power-referenced refractometer with tilted fiber Bragg grating cascaded by chirped grating[J]. *Optics Communications*, 2014, 312: 106-109.
- [18] 钱宇阳,黄勇林,郑加金. 基于倾斜光纤光栅的四波长传感解调研究[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(12): 1579-1583.
- [19] LI W, LI Y W, HAN X D, et al. The study of enhancing temperature sensitivity for FBG temperature sensor [C]//2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, July 12-15, 2009, Hebei, China. New York: IEEE, 2009: 2746-2749.
- [20] ZHANG Y M, LIU Q Z, HE W, et al. Quasi-distributed temperature sensor system based on various-packaged FBG [C]//Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, October 10, 2013, Guiyang, Guizhou, China. Washington: SPIE, 2013: 89161C-1-89161C-8.
- [21] 贾振安,乔学光,傅海威,等. 光纤光栅增敏技术[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(4): 413-420.
- [22] JIANG B Q, BI Z X, WANG S H, et al. Cascaded tilted fiber Bragg grating for enhanced refractive index sensing [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(11): 114220-1-114220-5.