

# 光学学报

## 基于极大倾角光纤光栅 Sagnac 游标干涉仪的 折射率传感器

古洪, 罗彬彬\*, 石胜辉, 邹雪, 杨翔文, 李玉洁, 陈荟吉, 赵明富

重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054

**摘要** 提出了一种基于游标效应(VE)的极大倾角光纤光栅 Sagnac 干涉环折射率传感器。利用光学 VE 的基本原理,设计并制作自由谱宽为 1.52 nm 的保偏光纤 Sagnac 干涉仪和自由谱宽为 1.36 nm 的极大倾角光纤光栅 Sagnac 干涉结构,通过级联的方式将两个干涉光路进行叠加,得到游标光谱。实验结果表明,该传感器的游标包络特征明显,经游标放大后的折射率灵敏度达到  $-1286.40 \text{ nm/RIU}$ ,相比普通极大倾角光纤光栅传感器的横磁(TM)模和横电(TE)模的折射率灵敏度分别提高约 8.46 倍和约 10.55 倍,与理论计算结果吻合。传感器的输出光谱稳定,并且具有结构简单、制作方便、抗温度干扰能力较强等优点,在生化、生物医学检测等领域具有良好的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 极大倾角光纤光栅; Sagnac 光纤干涉仪; 游标效应; 折射率传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2006004

## Refractive Index Sensor Based on Excessively Tilted Fiber Grating Sagnac Vernier Interferometer

Gu Hong, Luo Binbin\*, Shi Shenghui, Zou Xue, Yang Xiangwen, Li Yujie, Chen Huiji, Zhao Mingfu

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** An excessively tilted fiber grating (ExTFG) Sagnac interference loop refractive index sensor based on vernier effect (VE) is proposed. Utilizing the basic principle of the optical VE, a polarization-maintaining fiber Sagnac interferometer with a free spectral range (FSR) of 1.52 nm and a Sagnac interferometer composed of ExTFG with an FSR of 1.36 nm are theoretically designed and fabricated. The vernier spectrum is obtained by superimposing two optical paths by cascading. Experimental results show that the characteristics of the vernier envelope are easy to identify, and the refractive index sensitivity reaches  $-1286.40 \text{ nm/RIU}$  through vernier amplification, improved  $\sim 8.46$  and  $\sim 10.55$  times than that of the TM and TE polarizations of the ExTFG sensors, respectively, which is in good agreement with the theoretically calculated result. The output spectrum of the sensor is relatively stable, and the sensor has the advantages of simple structure, convenient fabrication, and strong resistance of temperature crosstalk, leading to promising application in the fields of biochemical and biomedical detections.

**Key words** fiber optics; excessively tilted fiber grating; Sagnac optic fiber interferometer; vernier effect; refractive index sensor

### 1 引言

高灵敏度、高集成度的光纤传感器在生物医学分

析、机械故障检测和形态感知等研究方向正受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。近年来,研究者们利用不同的物理增敏机制提高光纤传感器的灵敏度,应用于光纤干涉仪

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-04-18; 录用日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61875026)、重庆英才青年拔尖人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0128)、重庆英才创新领军人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0287)、重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K201901101)、重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20223054)

通信作者: \*luobinbin@cqut.edu.cn

的游标效应(VE)逐渐发展成为提高光纤传感器折射率(RI)灵敏度的一种手段<sup>[4-7]</sup>。基于VE的传感器通常由两个干涉仪级联或并联形成,与单个干涉仪相比,基于VE的传感器的输出光谱产生的游标包络具有将监测灵敏度放大的功能(即放大波长偏移量)。2020年,Li等<sup>[8]</sup>基于VE的原理将错位熔接形成的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)和法布里-珀罗干涉仪(FPI)进行级联,制作超高灵敏度的RI传感器,在保持良好线性度的条件下,该传感器的RI灵敏度达到 $-87261.06 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,温度灵敏度为 $204.7 \text{ pm}/\text{°C}$ ,抗温度干扰性较强。同年,Chen等<sup>[9]</sup>研究 $3.4 \mu\text{m}$ 直径的双螺旋微纳光纤耦合器(DHMC),经过游标放大,当外部环境折射率(SRI)的变化范围为 $1.3333\sim 1.3394$ 时,灵敏度达到 $27326.59 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,提高了接近6倍。2022年,Jiang等<sup>[10]</sup>研究了一种由光纤Sagnac干涉仪(FSI)、封闭式FP腔和开放式FP腔组成的特种光纤干涉仪,该结构产生的组合VE避免了环境折射率和温度之间存在的相互串扰问题,二者的灵敏度分别为 $-19844.67 \text{ nm}/\text{RIU}$ 和 $-46.14 \text{ nm}/\text{°C}$ ,该结构能实现对折射率和温度的准确测量。但是上述基于VE的折射率传感器存在制备过程繁琐、系统结构复杂等问题,传感器的可重复性受到限制。

极大倾角光纤光栅(ExTFG)在SRI为1.33附近的灵敏度范围为 $100\sim 200 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,温度灵敏度仅为几个 $\text{pm}/\text{°C}$ ,相比普通的光纤Bragg光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)具有更高的RI灵敏度和抗温度干扰能力<sup>[11]</sup>,在振动传感、液位测量、温度和折射率检测、矢量磁强感应等方面已得到广泛研究及应用<sup>[12-15]</sup>。特别是在生物医学检测领域,ExTFG常被用于对蛋白分子的免标记、特异性识别检测。2018年,本课题组<sup>[16]</sup>研究了基于纳米金壳(AuNs)修饰 $81^\circ$ 倾斜光纤光栅( $81^\circ$ TFG)的新城疫病毒(NDV)免疫传感器,其对NDV的最低检测质量浓度约为 $25 \text{ pg}/\text{mL}$ ,在 $0\sim 1 \text{ ng}/\text{mL}$ 范围内的灵敏度约为 $1.627 \text{ pm}/(\text{pg}\cdot\text{mL}^{-1})$ ,能高度特异性识别NDV抗原。2019年,Zhou等<sup>[17]</sup>提出用于检测人类神经特异性烯醇化酶(NSE)癌症生物标志物的超灵敏诊断的黑磷(BP)集成光纤生物传感器,该传感器首次将BP纳米片集成到ExTFG表

面,NSE抗原的检测极限降低至 $1.0 \text{ pg}/\text{mL}$ ,比小细胞肺癌的NSE临界值低4个数量级;其检测灵敏度比基于氧化石墨烯(GO)或金纳米颗粒(AuNPs)的ExTFG生物传感器提高约100倍。2022年,Sun等<sup>[18]</sup>采用Langmuir吸收模型来研究二维纳米材料功能化后的光纤传感器,利用GO功能化的ExTFG作为传感器,以血红蛋白(Hb)作为检测对象,从实验上实现了灵敏度和检测范围可调的传感器,验证了理论的正确性。以上这些开创性的研究作为提升ExTFG传感器的性能提供了可推而广之的思路。

结合VE的放大原理和ExTFG的RI传感特性研究,本文提出基于VE的ExTFG灵敏度增强型RI传感器,系统由两个Sagnac干涉仪组成,其中,保偏光纤Sagnac干涉仪(PMF-SI)作为参考环,ExTFG Sagnac干涉仪(ExTFG-SI)作为传感环,传感区域为ExTFG栅区。通过数值计算分别设计两个自由谱宽(FSR,可用 $R_{\text{FS}}$ 表示)比较接近的Sagnac干涉仪,将其级联以形成游标光谱。实验研究中,将ExTFG调至等偏振状态,经过游标放大后,系统的RI灵敏度为 $-1286.40 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,ExTFG传感器的RI灵敏度提升接近一个数量级。该传感器具有结构简单、制作方便、稳定性好等优点,在高灵敏度生化传感领域具有重要的研究意义和很大的应用价值。

## 2 实验装置和原理

### 2.1 实验装置

该系统实验装置如图1所示,主要由宽带光源(BBS, CONOUER,  $1250\sim 1650 \text{ nm}$ )、两个 $2\times 2$ 的光耦合器(OC1和OC2,分光比1:1)、偏振控制器(PC1和PC2)和光谱分析仪(OSA, AQ6370D,  $600\sim 1700 \text{ nm}$ )组成,ExTFG作为传感单元被固定在有机玻璃实验台上。BBS输出的光信号经过传输到达OC1的输入端,该耦合器的两个输出端连接PC1和PMF形成一个闭合的Sagnac环形回路,反射端级联OC2;类似地,OC2的两个输出端连接PC2和ExTFG,形成Sagnac环结构,在该耦合器发生干涉的光最终输出到OSA。该系统中,PC1和PC2分别负责调节和控制PMF-SI和ExTFG-SI回路中光束的偏振态,维持系统

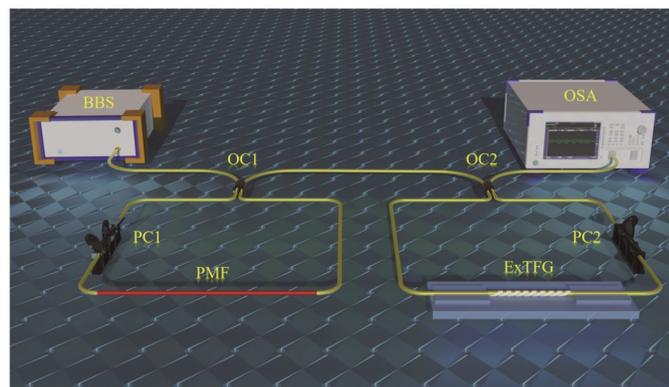


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

输出光谱的稳定性。

PMF-SI 在该系统中作为参考环,其稳定输出的干涉谱起到调谐游标包络的作用,可根据游标光谱叠加的原理对 PMF 的长度进行合理设计。ExTFG-SI 形成的干涉光谱包含 ExTFG 的特征峰信息,并且无论光路中的光信号处于何种偏振态,该结构都表现出细密均匀的梳状谱特性,满足 RI 检测的精度需求。

## 2.2 基本原理

### 2.2.1 ExTFG-SI 原理

极大倾斜条纹的写入打破光纤光栅的圆对称性,引起高双折射效应,ExTFG 的透射谱具有极强偏振依赖性,同一个高阶包层模存在一对简并模,即横电 (TE) 模和横磁 (TM) 模。图 2 为 ExTFG 的偏振相关光谱,其谐振波长<sup>[19]</sup>可表示为

$$\lambda_R = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{i,\text{eff}}^{\text{cl},m}) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta}, \quad (1)$$

式中:  $i$  为 TM 或 TE;  $\lambda_R$  为谐振波长;  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  为纤芯基模的有效折射率;  $n_{i,\text{eff}}^{\text{cl},m}$  是第  $m$  阶 TE/TM 包层模的有效折射率;  $\Lambda_G$  为光栅周期;  $\theta$  为光栅条纹的倾斜角。由于 ExTFG 是将纤芯基模耦合到同向高阶包层模,因此  $n_{i,\text{eff}}^{\text{cl},m}$  是外界折射率  $n_{\text{SRI}}$  的函数,具有良好的 RI 敏感性。

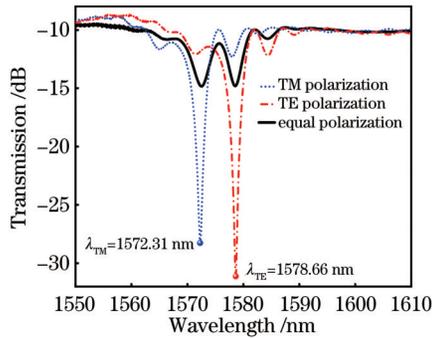


图 2 ExTFG 的偏振相关光谱

Fig. 2 Polarization dependent spectrum of ExTFG

ExTFG-SI 主要由 ExTFG 和一个  $2 \times 2$  光纤耦合器组成,其结构原理如图 3 所示。假设光信号  $E_1^{\text{in}}$  从光纤耦合器的 1 端口进入,耦合器将其分为两束分别沿  $L_1$  和  $L_2$  传输的相干光,它们经过 ExTFG 时纤芯模激发高阶包层模,承载高阶模式信息之后又分别传输  $L_2$  和  $L_1$  的距离并回到耦合器,其再次经过耦合器进行相干叠加并输出到 2 端口 ( $E_2^{\text{out}}$ ),在输出端将会观察到具有 ExTFG 特征峰的干涉谱。

根据 Jones 矩阵的相关理论,如果忽略器件的传输损耗和色散等因素,整个系统的输入与输出关系<sup>[20]</sup>可表示为

$$E_2^{\text{out}} = H_{\text{coupler}} H_{\text{fiber}} H_{\text{grating}} H_{\text{fiber}} H_{\text{coupler}} E_1^{\text{in}}, \quad (2)$$

式中:  $H_{\text{coupler}}$ 、 $H_{\text{fiber}}$ 、 $H_{\text{grating}}$  分别代表耦合器、光纤、光栅的传输矩阵表达式。本文在输入光只有  $E_1^{\text{in}}$  的情况下,将端口 1 视为输入端,  $E_2^{\text{out}}$  代表该 Sagnac 环结构输出的干涉光谱。

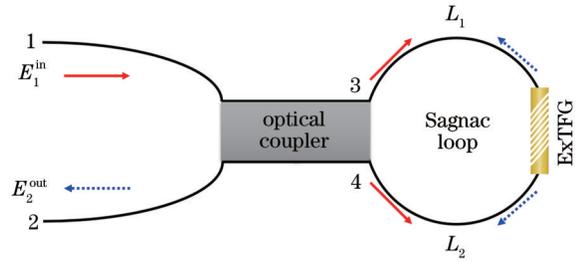


图 3 基于 ExTFG 的 Sagnac 环干涉结构

Fig. 3 Sagnac loop interferometer embedded with ExTFG

### 2.2.2 PMF-SI 原理

一阶 PMF-SI 环的结构原理如图 4 所示。光信号由入射端口 1 进入,通过在出射端口 3 和 4 之间熔接一段固定长度的 PMF,构成一个闭合的 Sagnac 环回路。受 PMF 的双折射效应的影响,从 3 和 4 端口分别沿着顺时针和逆时针经过 PMF 的两束光具有不同的光程差,它们绕环一周再次回到耦合器时,产生恒定的相位差,因此发生干涉。将反射端口 2 连接至 OSA 即可观察到干涉谱。

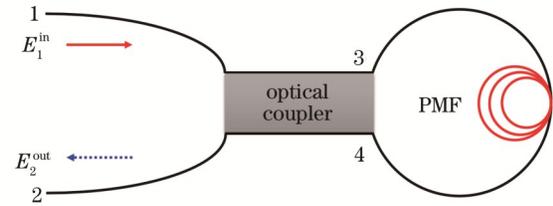


图 4 PMF-SI 示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PMF-SI

在该结构中,两束相干光的相位差可以记为  $\phi = \frac{2\pi BL}{\lambda}$ ,其中  $B$  表示 PMF 的双折射系数,  $L$  为 PMF 的长度,  $\lambda$  为输入波长,输出的干涉谱<sup>[21]</sup>可由透射系数  $T$  表示为

$$T = \frac{1 - \cos \phi}{2}. \quad (3)$$

图 5 为 PMF-SI 的干涉光谱特性,其中 PMF 长度  $L = 2.55 \text{ m}$ ,双折射系数  $B = 6.45 \times 10^{-4}$ 。可见,干涉光谱呈现周期性的梳状谱特征,其周期即 FSR,公式为  $R_{\text{FS}} = \lambda^2 / (BL)$ ,理论计算的 FSR (1.49 nm) 和实际测量的 FSR (1.52 nm) 非常接近。可知,当 PMF 的工艺参数固定时,通过调节其长度可以改变干涉谱的疏密度,达到灵活设计 PMF-SI 的 FSR 的目的。

根据 VE 的基本原理,两个 FSR 比较接近的干涉谱形成的游标包络周期为

$$R_{\text{FS,Env}} = \frac{R_{\text{FS,S}} \times R_{\text{FS,R}}}{|R_{\text{FS,S}} - R_{\text{FS,R}}|}, \quad (4)$$

其放大倍数  $M$  为

$$M = \frac{R_{\text{FS,R}}}{|R_{\text{FS,S}} - R_{\text{FS,R}}|}, \quad (5)$$

式中:  $R_{\text{FS,S}}$  和  $R_{\text{FS,R}}$  分别表示传感单元和参考单元的

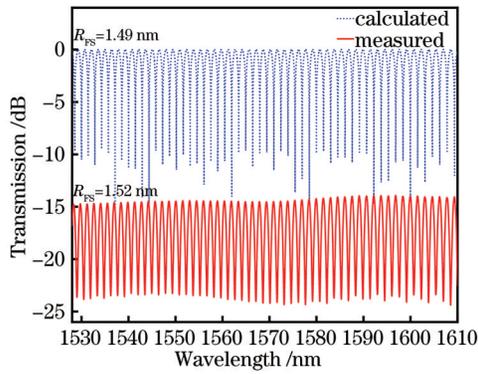


图 5 PMF-SI 光谱

Fig. 5 Spectrum of PMF-SI

FSR。当两个干涉仪的 FSR 更加接近时,理论上将获得更高的灵敏度,但是在这种情况下,游标包络周期也会变得非常大,此时对光源和光谱仪的工作波长范围要求极高,并且在展宽的包络线上可能会出现多个峰值,不利于提取目标峰值的波长信息。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 基于 VE 的 ExTFG 传感器

本文使用的 ExTFG 是采用 244 nm 的倍频氩离子激光器和扫描振幅掩模板技术在经过载氢处理的单模光纤内刻写的,其轴向周期为  $28\ \mu\text{m}$ ,光栅倾斜角度为  $81^\circ$ 。首先研究 ExTFG-SI 的光谱特性和 RI 传感性能,结果如图 6 所示。图 6(a)展示了 ExTFG 在 TM 偏振、TE 偏振和 TM/TE 等偏振状态下的实测光谱,可见该系统既能保留 ExTFG 的特征光谱,又集成 Sagnac 干涉谱所具有的周期性细密均匀的特性,并且无论 ExTFG 处于何种偏振态,干涉谱的 FSR 均为  $1.36\ \text{nm}$ 。当 ExTFG 外部环境介质的折射率发生改变时,其相位匹配条件随之变化,导致谐振波长发生漂移,因此将 ExTFG 分别调至 TM 和 TE 偏振态,使用 5 组不同含量的氯化钠折射率匹配液对 ExTFG-SI 传感器的 RI 灵敏度进行标定,折射率由全自动阿贝折射仪测定(2WEA,上海光学仪器五厂有限公司,精度  $10^{-4}$ ),结果如图 6(b)所示。可见,ExTFG-SI 传感器在 TM 偏振态下的 RI 灵敏度为  $152.09\ \text{nm}/\text{RIU}$ ,在 TE 偏振态下的 RI 灵敏度为  $121.95\ \text{nm}/\text{RIU}$ ,两者都

具有较好的线性度。其灵敏度相比普通 ExTFG 传感器并无明显变化,但由于受到细密干涉谱条纹的特征调制,ExTFG-SI 传感器的测量精度较 ExTFG 更加优异。

在 ExTFG-SI 传感器的研究基础上,利用 PMF-SI 的干涉谱可灵活调节 FSR 的特点,构建一套基于 VE 的传感系统,按图 1 所示的实验装置搭建实际光路。实验中采用熊猫型 PMF(PM 1017-A),设计其长度为  $2.55\ \text{m}$ ,先分别研究参考环和传感环的光谱特性,再结合游标原理将两个单独的 SI 结构进行级联,研究游标光谱的特性以及传感器的性能,具体结果如图 7 所示。测得 PMF-SI 干涉谱的 FSR 为  $1.52\ \text{nm}$ ,光谱均匀并且存在良好的周期性,对比度达到约  $10\ \text{dB}$ ;在 ExTFG-SI 结构中,处于 TE 偏振态的 ExTFG 的特征光谱受到 Sagnac 干涉结构的调制,干涉谱的 FSR 为  $1.36\ \text{nm}$ ;参考环和传感环的 FSR 相差较小,通过将其级联后得到传感系统的游标包络周期为  $13.01\ \text{nm}$ ,与理论计算值 ( $15.59\ \text{nm}$ ) 基本相符。

受到光偏振态的影响,ExTFG 的特征峰破坏了该系统的光谱中对应波长处游标包络的规则性和完整性,峰值位置极大偏离包络中心点,不利于计算波长漂移量。因此,将 ExTFG 的偏振态调至 TE 和 TM 模的等激励状态(即等偏振状态)以解决光谱损耗强度的差异带来的包络缺陷问题,并在此基础上对该传感器进行 RI 灵敏度特性实验研究。调节 ExTFG 至等偏振状态,采用新配备的 5 组低含量氯化钠溶液(折射率范围为  $1.3349\sim 1.3423$ )标定该传感器的 RI 灵敏度,传感器输出的游标光谱随 SRI 的变化如图 8 所示。

在图 8(a)中,ExTFG 为等偏振状态,可见游标光谱的包络形状更加趋于一致,每一个包络上仅存在唯一的峰值点。在折射率测量实验过程中,通过择优追踪单个包络的漂移来测定 RI 灵敏度(图中箭头所示),即使包络周期重复性较差,也基本不会对实验结果产生影响。随着 SRI 的增大,游标光谱逐渐发生蓝移,这是因为当 ExTFG-SI 结构的干涉谱发生漂移时,游标光谱错位叠加,造成游标包络沿波长整体平移,其偏移距离大于 ExTFG-SI 的数倍,由此产生的游标放大作用能实现更高的 RI 灵敏度。由图 8(b)可知,基于光学游标原理,该传感结构将 ExTFG 的 RI 灵敏度有效提

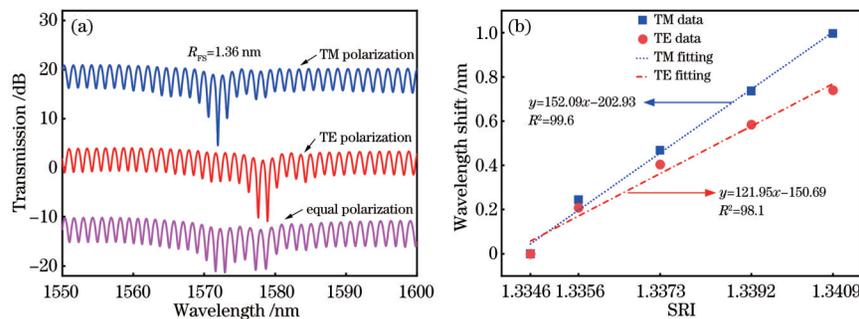


图 6 ExTFG-SI 传感器的光谱特性和 RI 灵敏度。(a) 光谱特性;(b) RI 灵敏度

Fig. 6 Spectral characteristics and RI sensitivity of ExTFG-SI sensor. (a) Spectral characteristics; (b) RI sensitivity

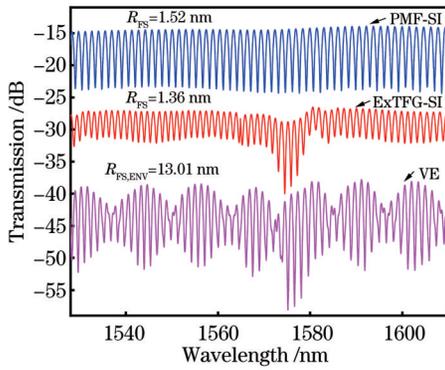


图 7 游标光谱

Fig. 7 Vernier spectra

升至  $-1286.40 \text{ nm}/\text{RIU}$  (负号表示波长向短波方向漂移), 线性拟合度为  $99.6\%$ , 相比单个 ExTFG 在 TM 和 TE 偏振态下的灵敏度分别提高了约  $8.46$  和约

$10.55$  倍, 这基本与由式 (5) 计算的放大倍数 ( $M=11.46$ ) 吻合。

此外, 还研究了该传感器的抗温度交叉敏感干扰能力。实验中, 将 ExTFG 紧贴在温控实验台上, 调节温度以  $5^\circ\text{C}$  的梯度从  $40^\circ\text{C}$  逐渐增加到  $60^\circ\text{C}$ 。图 9(a)、(b) 描述了 ExTFG 的偏振相关光谱随温度的变化情况, 随着温度的升高, 中心波长均发生红移。由图 9(c) 可知, ExTFG 在 TM 和 TE 偏振态下的温度灵敏度分别为  $7.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $6.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。本文所构建的游标传感器的温度特性如图 9(d)、(e) 所示, 当温度升高时, 游标包络整体蓝移, 温度灵敏度达到  $-114 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  (负号表示波长蓝移), 本文传感器 TM 和 TE 偏振态的温度灵敏度相比 ExTFG 分别提高约  $15.57$  倍和约  $18.04$  倍。但是, 即便经过游标放大后的温度灵敏度基本上与普通 LPFG 的温度灵敏度相当<sup>[22]</sup>, 该传感器的光谱偏移量受到外界温度的影响较小, 应用于生化检测领域仍然能够避免温度交叉敏感的问题。

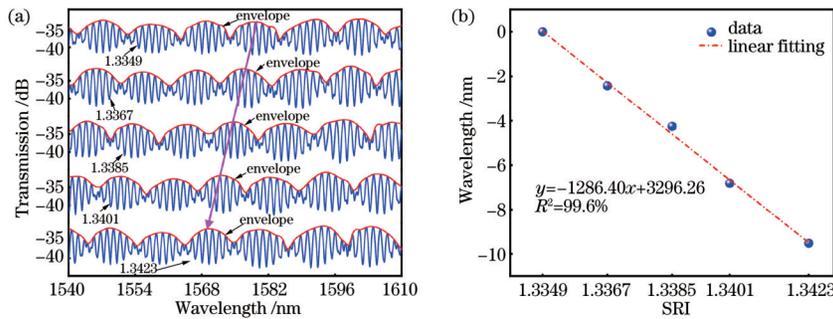


图 8 基于 VE 的 ExTFG 折射率传感器的游标光谱漂移和 RI 灵敏度。(a) 游标光谱漂移; (b) RI 灵敏度

Fig. 8 Vernier spectrum shift and RI sensitivity of ExTFG refractive index sensor based on VE. (a) Vernier spectrum shift; (b) RI sensitivity

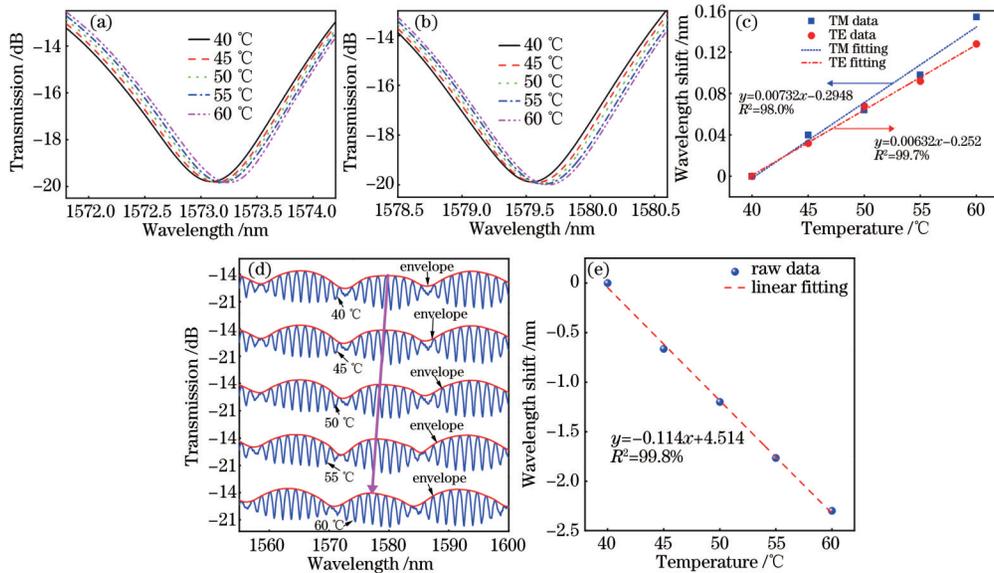


图 9 温度灵敏度分析。(a) TM 偏振态下 ExTFG 的光谱随温度的变化; (b) TE 偏振态下 ExTFG 的光谱随温度的变化; (c) ExTFG 的温度灵敏度; (d) 游标光谱随温度的漂移; (e) ExTFG 游标传感器的温度灵敏度

Fig. 9 Analysis of temperature sensitivity. (a) Spectral evolution of TM polarized ExTFG with temperature; (b) spectral evolution of TE polarized ExTFG with temperature; (c) temperature sensitivity of ExTFG; (d) evolution of vernier spectrum with temperature; (e) temperature sensitivity of ExTFG vernier sensor

### 3.2 传感器的稳定性评估

由于该系统是基于光纤干涉原理的传感器,光纤的曲率会受到外界环境振动的影响,导致光纤中的光波强度、相位等信息发生改变,信号噪声增加并影响系统的稳定性。针对这一问题,选取了该系统在波长范围为 1530~1600 nm 内的 5 个游标包络[图 10(a)],分别标记为 A、B、C、D 和 E,测试它们的峰值在 1 h 内的波长漂移和损耗强度的变化情况,以此评估该系统的稳定性。

图 10(b)、(d) 分别表示在空气环境中每隔 5 min 记录的 5 个峰位的波长位置和强度信息,可以看出其变化量均比较小。为了更好地说明问题,采用标准差

来描述波长和强度的波动程度,标准差越小,数据变化范围越窄,稳定性越好,具体分析结果如图 10(c)、(e) 所示。图 10(c) 中纵轴为波长漂移的平均值,正负号表示波长红移或蓝移,误差棒的大小表示标准差的数值,可以看出:峰位 D 处存在最大标准差,为  $-0.74096$ ,其余峰位的误差棒较小,波长扰动相对稳定。值得说明的是,虽然波长漂移存在一定的标准差,但是这一数值对 RI 测量结果的影响是微弱的,因为 SRI 变化导致的波长漂移量远大于系统受到环境扰动引起的波长抖动量。在图 10(e) 中,5 个峰位的标准差都非常小,由此可以判断光谱的损耗强度波动极小,系统的稳定性良好。

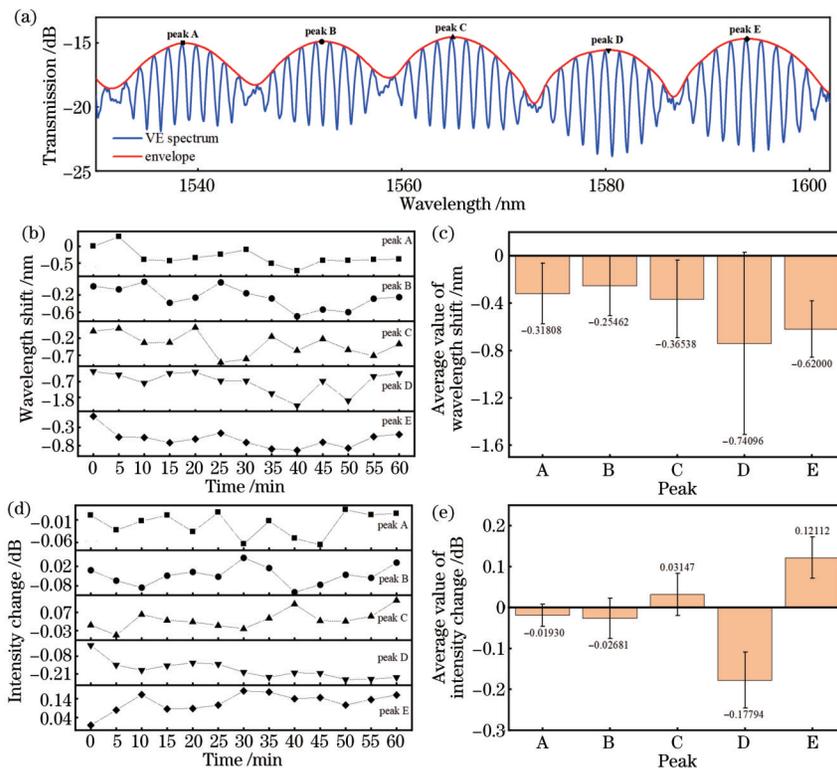


图 10 ExTFG 游标传感器的稳定性评估。(a)在游标光谱中选取的 5 个峰值点;(b)波长漂移;(c)波长漂移稳定性分析;(d)强度变化;(e)强度变化稳定性分析

Fig. 10 Stability evaluation for ExTFG vernier sensor. (a) Five peaks chosen in vernier spectrum; (b) wavelength shift; (c) stability analysis of wavelength shift; (d) intensity change; (e) stability analysis of intensity change

单个 ExTFG 传感器的 RI 灵敏度仅为  $100\sim 200$  nm/RIU<sup>[11]</sup>,生物分子检测对光谱仪的分辨率要求非常高[分辨率需为  $(5\pm 1)$  pm],因此基于 ExTFG 的高灵敏度 RI 传感器成为其在生物传感应用中一个重要的研究方向。表 1 为已有的 ExTFG 传感器增敏技术的性能比较,目前主流的方法分为两种:一种是优化 ExTFG 的结构,如在细芯光纤(纤芯直径为  $4.2\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $80\ \mu\text{m}$ )中刻写 ExTFG<sup>[23]</sup>,以提高色散因子和 RI 灵敏度,不过该方法增加了光栅制作的难度及其与标准单模光纤的熔接难度;此外, Li 等<sup>[24]</sup>基于全矢量复杂耦合模理论(CCMT)增大光栅周期,使纤芯模仅与极化简并的偏振模式耦合,理论上实现在低 RI 范围的超高灵敏度。另一种方法是在 ExTFG 的包层

表面集成具备特殊光学特性的纳米复合材料<sup>[17-18, 25-27]</sup>,虽然这种方法提高了 ExTFG 传感器表面的倏逝场强度,实现传感器的增敏,但是需要设计具有优异光电性能的二维材料并将其修饰到传感器表面,这增加了传感器的制作难度。与以上 ExTFG 传感器相比,本文提出的基于 VE 的 ExTFG-SI 传感器结构简单、制作容易、稳定性好,且同时有效地将单个普通 ExTFG 的 RI 灵敏度提高了一个数量级。

## 4 结 论

提出一种基于 VE 的极大倾角光纤光栅 Sagnac 干涉环的折射率传感器。根据极大倾角光纤光栅 Sagnac 干涉结构输出光谱的 FSR,设计 PMF 的长度、

表 1 不同 ExTFG 传感器的性能对比

Table 1 Comparison of sensing performance of different ExTFG sensors

Year	Sensor configuration	Sensitivity	RI range	Reference
2019	BP coated ExTFG	Not mentioned	—	Ref. [17]
2022	GO coated ExTFG	2.46–8.21 nm·mg <sup>-1</sup> ·mL <sup>-2</sup>	Around 1.33	Ref. [18]
2015	ExTFG written in thin cladding fiber	About 1180 nm·RIU <sup>-1</sup>	1.345	Ref. [23]
2018	Optimized Ex-TLPPFG	3850–12182.9 nm·RIU <sup>-1</sup>	1.33–1.34	Ref. [24]
2016	ExTFG with carbon nanotube deposition	207.38–241.79 nm·RIU <sup>-1</sup>	1.344–1.374	Ref. [25]
2018	TiO <sub>2</sub> film coated ExTFG around dispersion turning point	19835.7–32261.2 nm·RIU <sup>-1</sup>	1.330–1.331	Ref. [26]
2022	ExTFG with biofunctionalized AuNPs	Not mentioned	—	Ref. [27]
2022	ExTFG sensor based on VE	1286.40 nm·RIU <sup>-1</sup>	1.3349–1.3423	This work

制作 Sagnac 干涉仪,使两者 FSR 接近,根据光学游标放大的基本原理,将 ExTFG-SI 作为传感环、PMF-SI 作为参考环,使传感器的灵敏度提升至—1286.40 nm/RIU,这比普通 ExTFG 传感器的灵敏度提高了一个量级。该传感器的游标光谱具有特征明显、对比度高等特点,游标包络完整、容易提取,传感器性能稳定、抗温度干扰能力较强,适用于高灵敏度的生化检测领域。

## 参 考 文 献

- [1] 郭晨瑜,王豆豆,穆长龙.基于石墨烯/氧化石墨烯的光纤传感器研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(15):150003.  
Guo C Y, Wang D D, Mu C L. Progress on optical fiber sensors based on graphene/graphene oxide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150003.
- [2] 陈勇,陈亚武,刘志强,等.基于光纤布拉格光栅传感器的齿轮故障检测方法[J].中国激光,2020,47(3):0304007.  
Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304007.
- [3] 闫洁,李伟,姜明顺,等.基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J].中国激光,2020,47(11):1106006.  
Yan J, Li W, Jiang M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1106006.
- [4] Gomes A D, Bartelt H, Frazão O. Optical vernier effect: recent advances and developments[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(7): 2000588.
- [5] Liu Y X, Li X G, Zhang Y N, et al. Fiber-optic sensors based on Vernier effect[J]. Measurement, 2021, 167: 108451.
- [6] Gomes A D, Ferreira M S, Bierlich J, et al. Optical harmonic vernier effect: a new tool for high performance interferometric fiber sensors[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5431.
- [7] 郝晋青,韩丙辰.基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器[J].光学学报,2020,40(2):0206002.  
Hao J Q, Han B C. Ultrasensitive refractive index sensor based on optical fiber couplers assisted with vernier effect[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0206002.
- [8] Li J W, Zhang M, Wan M G, et al. Ultrasensitive refractive index sensor based on enhanced Vernier effect through cascaded fiber core-offset pairs[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4145-4155.
- [9] Chen G T, Zhang Y X, Zhang W G, et al. Double helix microfiber coupler enhances refractive index sensing based on Vernier effect[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102112.
- [10] Jiang Z J, Wu F G, Yang J, et al. Combined-Vernier effect based on hybrid fiber interferometers for ultrasensitive temperature and refractive index sensing[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 9578-9589.
- [11] Xie L, Luo B B, Zhao M F, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 125-128.
- [12] 刘开俊,罗彬彬,邹雪,等.基于薄包层极大倾角光纤光栅的灵敏度增强型振动传感器[J].光子学报,2021,50(2):0206004.  
Liu K J, Luo B B, Zou X, et al. Sensitivity-enhanced vibration sensor based on thin-cladding excessively tilted fiber gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 0206004.
- [13] Mou C B, Zhou K M, Yan Z J, et al. Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating[J]. Optics Communications, 2013, 305: 271-275.
- [14] Yan Z J, Sun Q Z, Wang C L, et al. Refractive index and temperature sensitivity characterization of excessively tilted fiber grating[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3336-3346.
- [15] Lu T A, Sun Y Z, Moreno Y, et al. Excessively tilted fiber grating-based vector magnetometer[J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2494-2497.
- [16] Luo B B, Xu Y F, Wu S X, et al. A novel immunosensor based on excessively tilted fiber grating coated with gold nanospheres improves the detection limit of Newcastle disease virus[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 100: 169-175.
- [17] Zhou L, Liu C, Sun Z B, et al. Black phosphorus based

- fiber optic biosensor for ultrasensitive cancer diagnosis[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 137: 140-147.
- [18] Sun Y Z, Guo X X, Moreno Y, et al. Sensitivity adjustable biosensor based on graphene oxide coated excessively tilted fiber grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 351: 130832.
- [19] Yan Z J, Wang H S, Wang C L, et al. Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12107-12115.
- [20] 赵小丽, 张钰民, 庄炜, 等. 级联光栅结合 Sagnac 环的可调谐光纤激光器[J]. *发光学报*, 2019, 40(3): 357-365. Zhao X L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Tunable fiber laser based on cascaded grating combing with Sagnac loop [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(3): 357-365.
- [21] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z Y, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect[J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 73-76.
- [22] Jiang H P, Gu Z T, Gao K, et al. A high sensitivity sensor based on novel CLPFG with wavelength and intensity modulation for simultaneous measurement of SRI and temperature[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102886.
- [23] Yan Z J, Sun Z Y, Zhou K M, et al. Numerical and experimental analysis of sensitivity-enhanced RI sensor based on ex-TFG in thin cladding fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(14): 3023-3027.
- [24] Li Z H, Shen J, Ji Q P, et al. Tuning the resonance of polarization-degenerate  $LP_{1,1}$  cladding mode in excessively tilted long period fiber grating for highly sensitive refractive index sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(3): 397-405.
- [25] Badmos A A, Sun Q Z, Yan Z J, et al. High-sensitivity refractive index sensor based on large-angle tilted fiber grating with carbon nanotube deposition[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9899: 989916.
- [26] Li Z H, Luo Q Q, Yan B T, et al. Titanium dioxide film coated excessively tilted fiber grating for ultra-sensitive refractive index sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(22): 5285-5297.
- [27] Zhang J X, Liang T M, Wang H Y, et al. Ultrasensitive glucose biosensor using micro-nano interface of tilted fiber grating coupled with biofunctionalized Au nanoparticles[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 4122-4134.