

# 基于激光器内腔调制的低探测极限折射率传感系统

张超<sup>1,2,3</sup>, 徐德刚<sup>1,2,3\*</sup>, 石嘉<sup>1,2,3</sup>, 钟凯<sup>1,2,3</sup>, 李绪锦<sup>3</sup>, 熊建波<sup>4,5</sup>, 王胜年<sup>4,5</sup>, 任宇琛<sup>1,2</sup>,  
陈霖宇<sup>1,2</sup>, 李长昭<sup>1,2</sup>, 刘铁根<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072;

<sup>3</sup>青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋观测与探测联合实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>4</sup>中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

<sup>5</sup>水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230

**摘要** 报道了一种基于光纤激光器内腔调制的低探测极限折射率传感系统。将基于单模-无芯-单模的全光纤多模干涉结构作为损耗调制器件插入光纤激光器环形腔内, 采用激光器内腔调制技术获得了高灵敏度、高信噪比、窄半峰全宽的传感信号, 从而实现了低探测极限的折射率测量。系统的折射率探测极限可达  $7.3 \times 10^{-7}$  RIU。该传感系统具有输出稳定、温度交叉敏感小的特点, 在高精度生物化学传感、海洋环境监测等领域具有一定的应用潜力。

**关键词** 传感器; 折射率传感系统; 探测极限; 内腔调制; 光纤激光器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1210003

## Refractive Index Sensing System Based on Fiber Laser Intracavity Modulation with a Low Detection Limit

Zhang Chao<sup>1,2,3</sup>, Xu Degang<sup>1,2,3\*</sup>, Shi Jia<sup>1,2,3</sup>, Zhong Kai<sup>1,2,3</sup>, Li Xujin<sup>3</sup>,  
Xiong Jianbo<sup>4,5</sup>, Wang Shengnian<sup>4,5</sup>, Ren Yuchen<sup>1,2</sup>, Chen Linyu<sup>1,2</sup>, Li Changzhao<sup>1,2</sup>,  
Liu Tiegeng<sup>1,2</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Tianjin University, Ministry of Education, Tianjin 300027, China;

<sup>3</sup>Joint Laboratory for Ocean Observation and Detection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>4</sup>CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China;

<sup>5</sup>Key Laboratory of Harbor and Marine Structure Durability Technology of the Ministry of Communications, Guangzhou, Guangdong 510230, China

**Abstract** A fiber sensing system based on laser intracavity modulation with a low detection limit for refractive index sensing is proposed. A kind of all-fiber multimode interference structure based on single-mode-no-core-single-mode fiber is inserted in a fiber laser ring cavity as a loss-modulation device. The fiber laser intracavity modulation technology is used to obtain high-sensitivity sensing signal with high signal-to-noise ratio and narrow full width at half maximum. Depend on these characteristics, the low detection limit of the sensing system can reach up to  $7.3 \times 10^{-7}$  RIU. The sensing system with output stability and low temperature cross-sensitivity has a great potential in high-accuracy biochemical sensing and marine environmental monitoring.

**Key words** sensor; refractive index sensing system; detection limit; intracavity modulation; fiber laser

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-07-24; 录用日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61771332)、天津市科技计划项目(13ZCZDSF02300)、青岛海洋科学与技术国家实验室主任基金(QNLM201717)

\* E-mail: xudegang@tju.edu.cn

# 1 引 言

光纤传感器因具有耐腐蚀、抗电磁干扰、质量轻、体积小、灵敏度高优点而被广泛运用到折射率<sup>[1-4]</sup>、温度<sup>[5-6]</sup>、应变<sup>[7-8]</sup>、磁场<sup>[9-10]</sup>、曲率<sup>[11]</sup>等多种物理量的测量中。利用光纤传感器测量折射率(RI)在化学分析、生物医学、海洋科学等领域有着广泛的应用。

对于光学传感器的性能参数,当前的研究大多只关注某一指标的优化,如传感器的灵敏度、传感信号稳定性、系统温度交叉敏感特性、探测器分辨率等,鲜有以上各因素对传感精度综合分析的分析,这使得各光学传感器在性能方面各有优劣,难以比较。2008年,White等<sup>[12]</sup>提出采用探测极限来表征光学传感系统的传感精度。通过综合考虑传感灵敏度、传感信号稳定性、温度交叉敏感特性和探测器分辨率等因素对光学传感系统性能的影响,获得了可被精确测量的最小的传感量变化,并将其定义为传感系统的探测极限。探测极限为系统分辨率和传感灵敏度的比值。传感系统输出信号的信噪比(SNR)和半峰全宽(FWHM)的改善能使传感信号的稳定性更好,从而优化系统的分辨率,获得更低的探测极限。

近几年,激光器内腔传感技术作为一种新型的传感方法被广泛研究。这种方法将传感单元作为调制器件插入激光器谐振腔内,不仅提高了传感系统的灵敏度<sup>[13-14]</sup>,而且使整个系统的输出信号具备了激光信号高SNR、窄FWHM的特性,从而优化了传感系统的探测极限。

本文报道了一种基于光纤激光器内腔调制的低

探测极限折射率传感器。通过软件模拟研究了基于单模-无芯-单模(SNCS)全光纤多模干涉结构的折射率和温度响应特性。在模拟结果的指导下,选择合适长度的无芯光纤制成SNCS光纤结构,并将其作为损耗调制器件插入光纤激光器环形腔中,获得单调的传感特性,折射率传感信号具有高SNR、窄FWHM的特点。光信号经SNCS光纤结构调制多次后,折射率传感灵敏度大幅提高。基于激光器内腔调制的传感系统具有高SNR、窄FWHM和高灵敏度的特性,实现了传感系统低探测极限的折射率测量。实验结果表明,传感系统输出信号的SNR大于49 dB,FWHM小于40 pm,在1.3330~1.3624折射率范围内的灵敏度为0.54 mW/RIU,在10~50 °C温度范围内的灵敏度为0.037 μW/°C,折射率探测极限可达到 $7.3 \times 10^{-7}$  RIU。与分立式无源光纤传感系统相比,基于激光器内腔调制的传感系统的折射率探测极限大幅优化。本传感系统具有输出稳定、温度交叉敏感小的特点。

## 2 全光纤多模干涉结构工作机理及探测极限

### 2.1 全光纤多模干涉结构的工作机理及传感特性仿真

SNCS光纤结构如图1所示。一段长度为 $L$ 的无芯光纤(NCF)熔接在两段完全相同的普通单模光纤(SMF)之间,构成单模-无芯-单模的光纤结构。当光从一段SMF入射到NCF中时,由于两者的结构参数不同,NCF中会激发出一系列高阶本征模式。

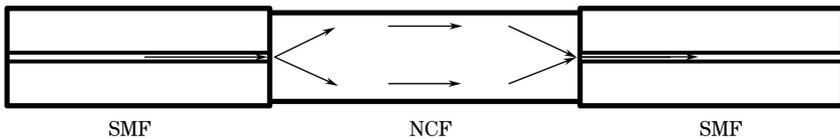


图1 SNCS光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic of SNCS fiber structure

在NCF与输出SMF熔接处,NCF中的各阶模式场能量将会再次耦合到输出SMF中。整个结构的传输特性可以表示为<sup>[15]</sup>

$$T(\lambda) = \sum_{i,j=1}^N \eta_i^2 \eta_j^2 \times \cos[(\beta_i - \beta_j)L], \quad (1)$$

式中: $N$ 为NCF中可以容纳的模式总数; $\beta_n$ 为第 $n$ 阶模式的纵向传播常数; $\eta_n$ 为第 $n$ 阶模式的激发系

数。 $\eta_n$ 可以通过入射场分布与第 $n$ 阶模式场分布的重叠积分得到<sup>[15]</sup>,即

$$\eta_n = \frac{\int_0^\infty E(r,0) \Psi_n(r) r dr}{\int_0^\infty \Psi_n(r) \Psi_n(r) r dr}, \quad (2)$$

式中: $E(r,0)$ 为SMF输入的光场分布; $\Psi_n(r)$ 为NCF中激发的第 $n$ 阶模的模场分布。根据(1)式可

以看出,对于某一波长,当 NCF 中的各阶模式传输到输出 SMF 处的相位差均为  $2\pi$  的整数倍时,NCF 在该位置重现了输入基模场的分布,此时整个 SNCS 光纤结构的透射损耗最小,对应波长处产生一个透射峰,即自成像峰。

当外界其他条件不变,只改变 NCF 周围环境的折射率时,会导致 NCF 中各模式的激发系数  $\eta_n$  和传播常数  $\beta_n$  发生改变,最终导致自成像峰移动。利用这种现象便可对外界折射率进行传感。

根据表 1 中的光纤参数,本课题组分别模拟了 SNCS 光纤结构的折射率特性以及其在空气(RI 为 1)中的温度特性。为使 SNCS 光纤结构在空气中的自成像峰约为 1530 nm 左右,NCF 的长度取 59 mm。

SNCS 光纤结构折射率特性的模拟结果如图 2(a)所示,可见:随着折射率增加,自成像峰波长

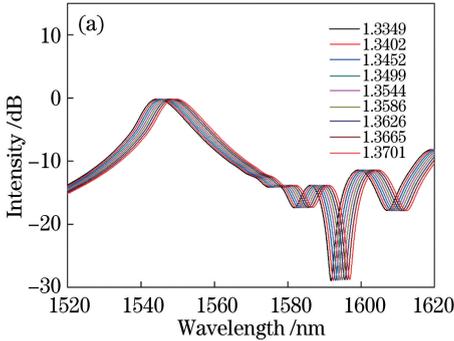


表 1 光纤参数  
Table 1 Parameters of optical fiber

Parameter	SMF	NCF
Length of NCF /mm	—	59
Radius of fiber core / $\mu\text{m}$	4.15	62.5
Radius of fiber cladding / $\mu\text{m}$	62.5	—
RI of fiber core	1.4681	1.446
RI of fiber cladding	1.4628	—
Thermo-optic coefficient / $^{\circ}\text{C}$	—	$1.06 \times 10^{-5}$ [16]
Thermal expansion coefficient / $^{\circ}\text{C}$	—	$5.0 \times 10^{-7}$ [17]

从 1544.61 nm 红移到 1549.42 nm,折射率灵敏度为 136.10 nm/RIU。环境温度的改变也会对自成像峰的位置产生影响,其温度交叉敏感特性的模拟结果如图 2(b)所示。由图 2(b)可见:随着温度升高,自成像峰波长从 1533.02 nm 红移到 1533.54 nm,温度灵敏度为 10.57 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。模拟结果表明,SNCS 光纤结构具有温度交叉敏感小的特性。

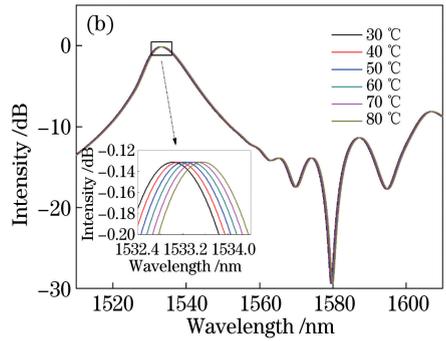


图 2 SNCS 光纤结构传感特性的模拟结果。(a)折射率特性;(b)温度特性

Fig. 2 Simulated sensing characteristic of SNCS fiber structure. (a) Refractive index characteristic; (b) temperature characteristic

## 2.2 传感系统探测极限

传感系统的探测极限可定义为系统可被精确测量的最小的传感量变化。对于传感系统来说,探测极限不仅跟传感灵敏度有关,还需要综合考虑传感信号稳定性、温度交叉敏感以及探测器分辨率等因素的影响。传感系统的探测极限  $D$  与系统分辨率  $R$ 、系统折射率灵敏度  $S$  的关系为<sup>[12]</sup>

$$D = \frac{R}{S}, \quad (3)$$

式中:系统分辨率  $R$  包括整个系统传感信号的稳定性( $\sigma_{\text{stab-included}}$ )、温度交叉敏感特性( $\sigma_{\text{temp-included}}$ )、探测器分辨率( $\sigma_{\text{res-included}}$ )。用综合考虑所有误差因素的(4)式计算系统的分辨率:

$$R = 3\sigma = 3\sqrt{\sigma_{\text{stab-included}}^2 + \sigma_{\text{temp-included}}^2 + \sigma_{\text{res-included}}^2}. \quad (4)$$

在光纤传感系统中,传感信号 SNR 和 FWHM

的优化能减小相对强度噪声,使输出的传感光谱更稳定。传感光谱的波动与信号 SNR 和 FWHM 的关系可表示为<sup>[12]</sup>

$$\sigma_{\text{stab-included}} \approx \frac{\Delta\lambda}{4.5 \cdot r_{\text{RSN}}^{0.25}}, \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\text{stab-included}}$  为传感光谱波动的标准差; $\Delta\lambda$  为传感信号的 FWHM; $r_{\text{RSN}}$  为传感信号的 SNR。根据(5)式结合(3)~(4)式可知,传感信号 SNR 和 FWHM 的优化能提高传感光谱的稳定性,从而提高系统的分辨率,优化系统的探测极限。

## 3 基于多模干涉结构的折射率传感系统实验及探测极限分析

分别对基于 SNCS 光纤结构的分立式无源传感系统和激光器内腔传感系统的探测极限进行分析。

### 3.1 基于多模干涉结构的分立式无源折射率传感系统

在分立式无源传感系统中,将 SNCS 光纤结构的一端与宽带光源连接,另一端接入光谱仪(AQ6370,光谱分辨率为 0.02 nm)。根据文献[18]中室温下氯化钠溶液的质量分数与其折射率的经验公式分别配制了 RI 分别为 1.3349、1.3402、1.3452、1.3499、1.3544、1.3586、1.3626、1.3665、1.3701 的 9 种溶液。保持外界温度不变,分别测量 SNCS 光纤结构在不同折射率的氯化钠溶液中的透射谱,结果如图 3(a)所示,可见:当外界折射率从 1.3349 增加到 1.3701 时,自成像峰波长从 1546.13 nm 红移到 1550.44 nm。图 3(b)为自成像峰波长与外界折射率的线性拟合结果,灵敏度为 125.23 nm/RIU。

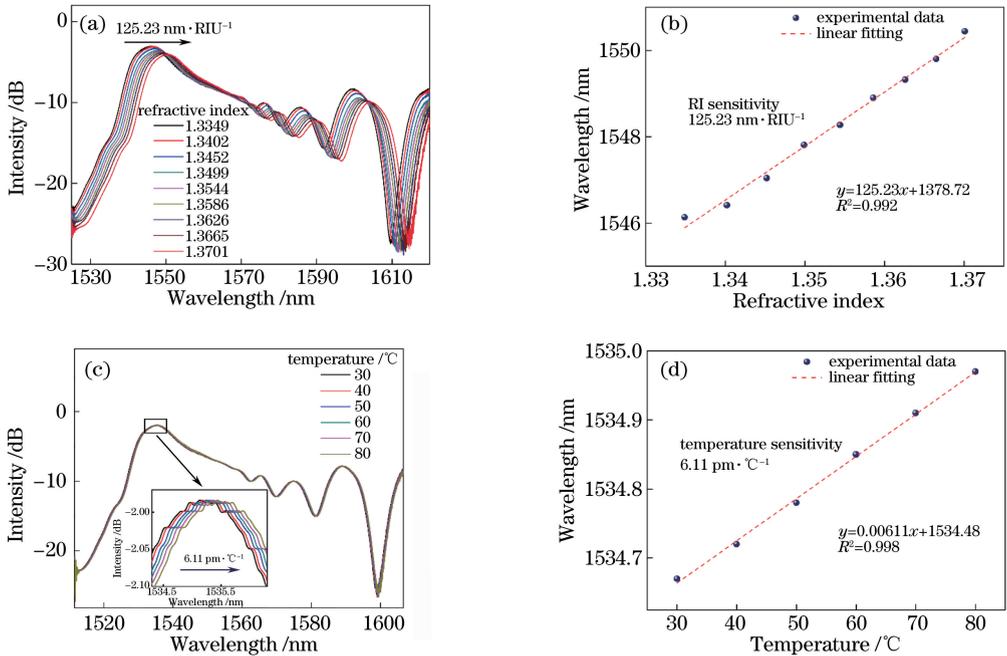


图 3 SNCS 光纤结构传感特性的实验结果。(a) 折射率特性;(b) 自成像峰波长与外界折射率的关系;(c) 温度特性;(d) 自成像峰波长与外界温度的关系

Fig. 3 Experimental sensing characteristic of SNCS fiber structure. (a) Refractive index characteristic; (b) the relationship between self-imaging wavelength and external refractive index; (c) temperature characteristic; (d) the relationship between self-imaging wavelength and external temperature

在系统输出波长稳定性的分析中,本课题组将 SNCS 光纤结构置于具有稳定折射率的溶液中,控制溶液温度,通过光谱仪监测自成像峰波长的波动。结果表明,自成像峰的波动小于 0.1 nm,相应的波动的标准差  $\sigma_{\text{stab-included}} = 0.017 \text{ nm}$ 。

分立式无源传感系统的探测极限需要综合考虑系统灵敏度、信号波长稳定性、温度交叉敏感特性以及光谱仪的波长分辨率。系统所使用的光谱仪的波

由于光纤的热光效应和热膨胀,NCF 的折射率、半径和长度均会随温度变化而发生改变,导致自成像峰发生漂移。将 SNCS 光纤结构置于空气中,随着环境温度从 30 °C 上升到 80 °C,其自成像峰波长从 1534.67 nm 红移到 1534.97 nm,如图 3(c)所示。图 3(d)为自成像峰波长与外界温度的线性拟合结果,温度灵敏度为 6.11 pm/°C。由于 SNCS 光纤结构没有复杂的微结构,温度改变导致结构的相对变化较小,因此该结构的热膨胀效应较小。与传统的光纤拉锥结构<sup>[19]</sup>相比,SNCS 光纤结构具有折射率传感灵敏度高、温度交叉敏感小的特点。实验中采用商用温度传感器(SBE 39 plus Temperature Recorder,分辨率为 0.01 °C)对系统进行温度补偿,获得温度引起的误差范围约为 -0.031~0.031 pm,相应的标准差  $\sigma_{\text{stab-included}} = 0.018 \text{ pm}$ 。

长分辨率为 20 pm,引起的误差范围为 -10~10 pm,相应的标准差( $\sigma_{\text{res-included}}$ )为 5.77 pm。系统温度交叉敏感特性标准差  $\sigma_{\text{temp-included}} = 0.018 \text{ pm}$ ,输出稳定性标准差  $\sigma_{\text{stab-included}} = 0.017 \text{ nm}$ 。利用(4)式获得基于 SNCS 光纤结构的无源传感系统的折射率分辨率为 53.86 pm,结合系统的灵敏度(125.23 nm/RIU),通过(3)式可得到系统的折射率探测极限为  $4.3 \times 10^{-4} \text{ RIU}$ 。

### 3.2 基于多模干涉结构的激光器内腔折射率传感系统

为获得高灵敏度、高 SNR 和窄 FWHM 的传感信号,实现更高的探测极限,将 SNCS 光纤结构作为损耗调制器件插入光纤激光器环形腔内。环境折射率的改变使 SNCS 结构光纤的透射谱发生漂移,从而调制光纤激光器腔内的运行损耗。通过测量光纤激光器的输出功率,解调得到环境的折射率信息。整个内腔调制传感系统如图 4 所示。在光纤激光器环形腔中,3 m 长的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,980 nm 的抽运光源(VLSS-980-M)通过波分复用器(WDM,980 nm/1550 nm)对其进行抽运,抽

运功率为 200 mW。隔离器用来保证腔内光的单方向运转。耦合器的 10% 端口输出到光谱仪(AQ6370,光谱分辨率为 0.02 nm),90% 端口将大部分能量反馈回环形腔中。布拉格光栅(FBG)作为波长选择器件,通过环形器插入环形腔中,系统所使用的 FBG 波长约为 1532 nm。SNCS 结构光纤的一端与光纤反射镜相连,形成反射式传感结构。反射式传感结构作为边缘滤波器,通过一个环形器插入环形腔中。该结构的优势在于光信号两次通过 SNCS 光纤结构进行损耗调制,增强了调制深度,进而提高了折射率传感的灵敏度,实现了系统探测极限的优化。

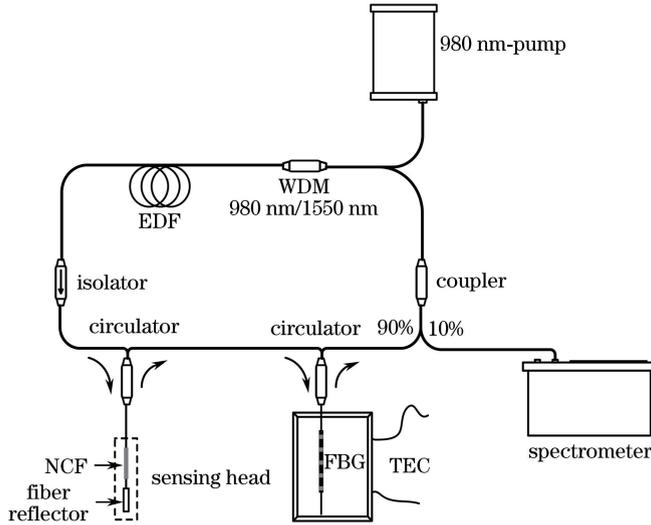


图 4 内腔调制折射率传感系统示意图

Fig. 4 Schematic of refractive index sensing system based on intracavity modulation

为了获得单调的传感特性,本课题组通过模拟预估了 SNCS 光纤结构透射谱的最大漂移量,最终确定系统中所使用的 NCF 长度为 60 mm。SNCS 光纤结构在水中的自成像峰位于 1525.13 nm 处。将反射式传感结构浸没在不同折射率的氯化钠溶液中,传感结构的折射率响应特性如图 5(a)所示,可见:随着环境折射率从 1.3330 增加到 1.3633,反射式传感结构在 FBG 波长处的插入损耗从 -12.92 dB 减小到 -10.57 dB,整个基于激光器内腔调制的传感系统的输出逐渐增加。光谱随环境折射率的变化如图 5(b)所示,可以看出,输出信号的 FWHM 小于 40 pm。图 5(c)为传感系统输出信号 SNR 随折射率的变化关系,可见:输出信号的 SNR 在折射率为 1.3330 时最小,且随着折射率的增大而线性增加;系统的 SNR 大于 49 dB。

本课题组通过实验分别研究了基于激光器内腔调制的传感系统的折射率和温度响应特性以及

FBG 温度对传感系统输出功率的影响,并分析了传感系统的输出稳定性。将反射式传感结构浸没在氯化钠溶液中,用功率计(OMM-6810B, ILX Lightwave,分辨率为 1 pW)分别测量不同折射率和不同温度下传感系统的输出功率。获得的内腔调制传感系统的传感响应特性如图 6 所示。图 6(a)为传感系统输出功率随外界折射率的变化,可以看出:随着环境折射率增加,传感系统的输出功率迅速增加,线性拟合可得折射率的灵敏度为 0.54 mW/RIU。图 6(b)为传感系统输出功率与环境温度的关系,线性拟合可得到温度灵敏度为 0.037  $\mu$ W/ $^{\circ}$ C。结果表明,传感系统的温度交叉敏感小。为了进一步优化系统的探测极限,同样在实验中采用商用温度传感器(SBE 39 plus Temperature Recorder,分辨率为 0.01  $^{\circ}$ C)对系统进行温度补偿,得到温度引起的误差范围约为  $\pm 0.185$  nW,相应的标准差  $\sigma_{temp-included} = 106.81$  pW。

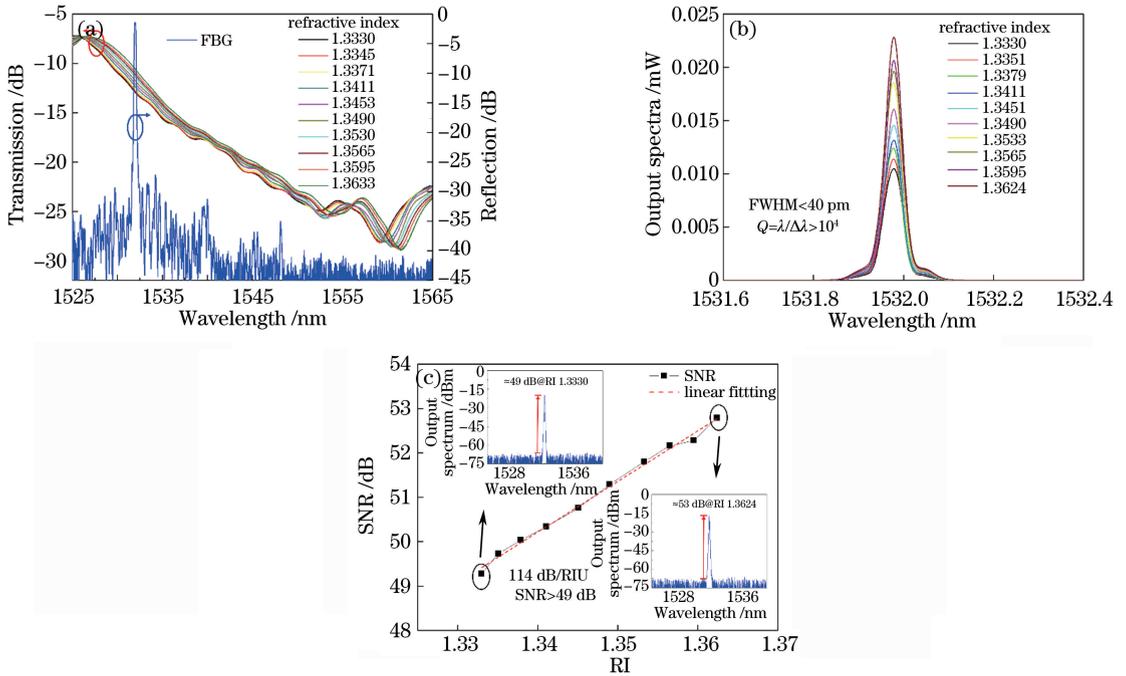


图 5 (a) FBG 的反射谱及反射式传感结构的折射率响应特性;(b)内腔调制传感系统输出的折射率特性;  
(c)内腔调制传感系统输出信号的 SNR 与折射率的关系,插图分别是折射率为 1.3330 和 1.3624 时传感系统的输出光谱  
Fig. 5 (a) Reflective spectrum of FBG and the refractive index response characteristic of the reflective sensing structure;  
(b) refractive index characteristic of the sensing system based on intracavity modulation; (c) the relationship  
between refractive index and SNR of the sensing system based on intracavity modulation , and the inserts are the  
output spectra of the sensing system at refractive indices of 1.3330 and 1.3624, respectively

作为环形激光器的选频器件,FBG 也是一个温度敏感元件。FBG 工作环境温度的改变会导致其谐振波长的变化,最终引起传感系统输出光功率的变化,因此本课题组通过实验研究了 FBG 温度对传感系统的影响。将传感探头置于水中 (RI 为 1.3330),温度控制在 25 ℃,在传感探头保持恒温的情况下,利用半导体制冷贴片 (TEC) 改变 FBG 的温度,通过功率计监测传感系统的输出功率,实验结果如图 6(c) 所示。实验表明,FBG 温度改变引起系统输出光功率的变化率为 0.01 μW/℃,达到了与传感探头温度交叉敏感相同的量级。因此,为了减小 FBG 温度对传感系统测量的影响,在系统中加入 TEC 对 FBG 实施温度控制,使 FBG 的温度稳定在 25 ℃ 左右。

稳定性是传感系统的另一重要指标。将传感探头置于稳定折射率的环境中,温度控制在 25 ℃,通过功率计监测传感系统输出功率的波动。实验分别获得了折射率为 1.3330、1.3451、1.3565、1.3624 时输出功率的变化,监测时长为 24 h,结果如图 6(d) 所示,可见:传感系统输出功率的波动不超过 0.14 μW,测量误差小于 0.3%,相应的波动的标准

差 ( $\sigma_{stab-included}$ ) 不超过 76.6 pW。这说明该系统表现出了良好的传感稳定性。

激光器内腔传感系统的探测极限需要综合考虑系统灵敏度、输出功率稳定性、温度交叉敏感特性以及功率计的分辨率。系统所使用的功率计的分辨率为 1 pW,引起的误差范围为 -0.5~0.5 pW,相应的标准差 ( $\sigma_{res-included}$ ) 为 0.2887 pW。系统的温度交叉敏感特性标准差  $\sigma_{temp-included} = 106.81$  pW,输出稳定性标准差  $\sigma_{stab-included} = 76.6$  pW。利用式 (4) 获得激光器内腔传感系统的折射率分辨率为 394.31 pW,结合系统的折射率灵敏度 (0.54 mW/RIU),通过 (3) 式获得传感系统的折射率探测极限为  $7.3 \times 10^{-7}$  RIU。与无源传感系统相比,激光器内腔调制技术大幅优化了系统的折射率探测极限,实现了折射率的高精度测量。基于内腔调制的传感系统的所有性能参数如表 2 所示。

## 4 结 论

采用基于激光器内腔调制的传感技术,将 SNCS 结构光纤作为折射率传感单元插入光纤激光器环形腔内调制谐振腔的运行损耗,获得了高灵敏

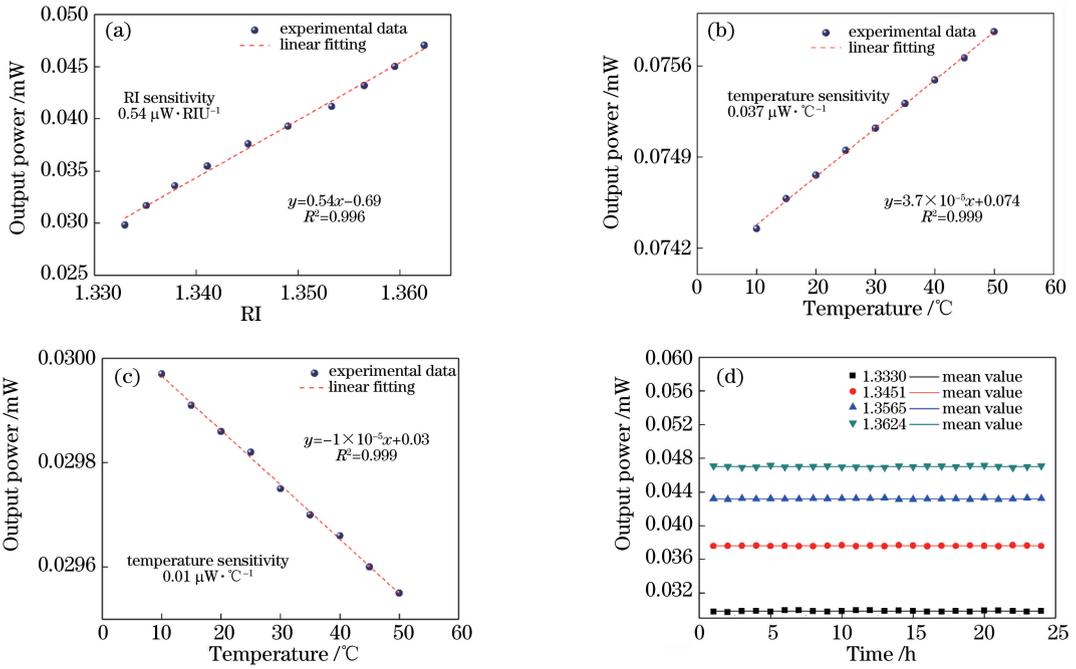


图 6 内腔调制传感系统输出功率与外界折射率、温度的关系。(a)折射率线性拟合曲线;(b)温度线性拟合曲线;(c)传感系统输出功率与 FBG 工作环境温度的关系;(d)传感系统的输出稳定性

Fig. 6 Relationship between output power of the sensing system and the external refractive index or temperature.

(a) Linear fitting curve of refractive index; (b) linear fitting curve of temperature; (c) relationship between output power of the sensing system and the working temperature of FBG; (d) output stability of the sensing system

表 2 内腔调制折射率传感系统的性能参数

Table 2 Performance parameters of refractive index sensing system based on intracavity modulation

Parameter	Value
SNR /dB	>49
FWHM /pm	<40
RI sensitivity /(mW · RIU <sup>-1</sup> )	0.54
Output stability /pW	76.6
Cross-sensitivity of temperature /pW	106.81
Power resolution /pW	0.2887
Sensor resolution (3σ) /pW	394.31
Detection limit /RIU	7.3 × 10 <sup>-7</sup>

度、高 SNR 和窄 FWHM 的传感信号,从而实现了低探测极限的折射率测量。传感系统的折射率探测极限可达  $7.3 \times 10^{-7}$  RIU。传感系统具有输出稳定、温度交叉敏感小的特点,在高精度生物化学传感、海洋环境监测等领域具有一定的应用潜力。

参 考 文 献

[1] Chen Y F, Han Q, He Y, *et al.* Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0905001.  
陈耀飞, 韩群, 何洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. 中国激光, 2013,

40(9): 0905001.  
[2] Liu Z B, Tan Z W, Yin B, *et al.* Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5037-5042.  
[3] Jiang M S, Sui Q M, Jin Z W, *et al.* Temperature-independent optical fiber Fabry-Perot refractive-index sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(13): 3295-3298.  
[4] Miao Y P, Liu B, Zhao Q D. Refractive index sensing characteristic of tilted fiber Bragg gratings with different cladding-diameters [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2072-2076.  
苗银萍, 刘波, 赵启大. 不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2072-2076.  
[5] Wang X L, Kang J, Zhao C L, *et al.* A narrow channel microflow velocity and temperature measurement system based on FBG embedded in Sagnac ring[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(12): 1331-1336.  
王小蕾, 康娟, 赵春柳, 等. FBG 嵌入型光纤 Sagnac 环的窄道空间微流速和温度测量系统[J]. 光电子 · 激光, 2017, 28(12): 1331-1336.  
[6] Liao G Z, Zhang J, Cai X, *et al.* All-fiber

- temperature sensor based on graphene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706004.  
廖国珍, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706004.
- [7] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Dual resonance and dual-parameter sensor of long period grating between two core modes in few-mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906003.  
郭艳城, 刘艳格, 王志, 等. 少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906003.
- [8] Jiang Y, Zeng J, Liang D K, *et al.* Influence of birefringence on axial strain sensitivity of birefringence fiber loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1106001.  
江莺, 曾捷, 梁大开, 等. 双折射率对双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1106001.
- [9] Dai Y T, Zhou G F, Li T, *et al.* Fiber optic magnetic field sensor based on femtosecond laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206001.  
戴玉堂, 周广福, 李涛, 等. 基于飞秒激光微加工的光纤磁场传感器 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206001.
- [10] Luo L F, Pu S L, Tang J L, *et al.* Reflective all-fiber magnetic field sensor based on microfiber and magnetic fluid [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18133-18142.
- [11] Gong Y, Zhao T, Rao Y J, *et al.* All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 679-681.
- [12] White I M, Fan X D. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1020-1028.
- [13] Liu K, Liu T G, Jiang J F, *et al.* Investigation of intra-cavity gas sensing technology based on wavelength modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 0105008.  
刘琨, 刘铁根, 江俊峰, 等. 基于波长调制技术的内腔式气体传感研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0105008.
- [14] 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.
- [15] Chen Y F, Han Q, Liu T G, *et al.* Wavelength dependence of the sensitivity of all-fiber refractometers based on the singlemode-multimode-singlemode structure [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 6801807.
- [16] Kim Y J, Paek U C, Lee B H. Measurement of refractive-index variation with temperature by use of long-period fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1297-1299.
- [17] Huang S Y, Blake J N, Kim B Y. Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(1): 23-33.
- [18] Zhang Z W, Yin W F, Wen T D, *et al.* Study on the relational expression of solution concentration and its refractive index [J]. *Journal of North University of China*, 2009, 30(3): 281-285.  
张志伟, 尹卫峰, 温廷敦, 等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(3): 281-285.
- [19] Hu Y H, Jiang C, Zhou M, *et al.* High-sensitivity fiber temperature and refractive index sensing with nonadiabatic fiber taper [J]. *Journal of Optical Technology*, 2018, 85(4): 233-237.