光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023081002

基于游标效应的萨格纳克干涉仪温度传感器

陈志萌，黄昌清*，朱庆超，侯俊杰，喻琪琪

（中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018）

摘　要： 提出了一种基于光学游标效应的级联光纤萨格纳克干涉仪和光纤模态干涉仪高灵敏度温度传感器，并对其传感特性进行了实验研究。光纤萨格纳克干涉仪由一段保偏光纤和 3 dB 四端口耦合器组成，光纤模态干涉仪由一段少模光纤与两段单模光纤熔接形成。选取光纤萨格纳克干涉仪作为温度传感器，光纤模态干涉仪充当滤波器。通过控制保偏光纤和少模光纤的长度，使光纤萨格纳克干涉仪的自由光谱范围为 2.63 nm，光纤模态干涉仪的自由光谱范围为 2.82 nm，两者的自由光谱范围相近又不相等，从而形成光学游标效应。实验结果显示，单个光纤萨格纳克干涉仪的温度灵敏度为－1.30 nm/℃，级联光纤模态干涉仪后，其温度灵敏度提高到－18.19 nm/℃，放大倍数为 13.99。该传感器制造工艺简单，稳定性好，不需要特殊的增敏材料来提高灵敏度。

关键词： 萨格纳克干涉仪；光纤模态干涉仪；游标效应；自由光谱范围；光纤温度传感器

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0845－06

Temperature Sensor of Cascaded Sagnac Interferometer Based on Vernier Effect

CHEN Zhimeng，HUANG Changqing，ZHU Qinchao，HOU Junjie，YU Qiqi

（College of Optical and Electronic Technology，China Jiliang University，Hangzhou 310018，CHN）

Abstract： In this paper，a cascaded fiber optic Sagnac interferometer and a fiber optic modal interferometer high sensitivity temperature sensor based on vernier effect were presented. The sensing properties was researched experimentally. The fiber optic Sagnac interferometer consisted of a section of polarization maintaining fiber and 3 dB four-port coupler，and the fiber optic modal interferometer was formed by a fusion of few-mode fiber and two segments of single-mode fiber. The fiber optic Sagnak interferometer was selected as temperature sensor and the fiber optic modal interferometer as filter. By controlling the length of polarization maintaining fiber and few-mode fiber，the free spectral range of the fiber optic Sagnac interferometer was 2.63 nm，and the free spectral range of the fiber optic modal interferometer was 2.82 nm. The free spectral ranges were similar and unequal，thus the optical vernier effect was formed. The experimental results show that the temperature sensitivity of a single fiber Sagnak interferometer is －1.30 nm/℃. After cascading the fiber mode interferometer，the temperature sensitivity increases to －18.19 nm/℃ with a magnification of 13.99. The sensor has a simple manufacturing process，good stability，and does not require special sensitization materials to improve sensitivity.

Key words： Sagnac interferometer；fiber optic modal interferometer；vernier effect；free spectral range；fiber optic temperature sensor

收稿日期：2023－08－10.

基金项目：浙江省基础公益研究计划项目(LGG19A040001).

* **通信作者：**黄昌清　**E-mail：** cqhuang@cjlu.edu.cn

0 引言

光纤温度传感器[1-3]因为具有抗电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀、体积小等优点，而受到了人们的广泛关注。光纤温度传感器有分布式光纤温度传感器[4-5]、光纤光栅温度传感器[6-8]和干涉式光纤温度传感器[9-11]等多种形式。与前两种光纤温度传感器相比，干涉式光纤温度传感器具有灵敏度高的优点。目前，干涉型光纤温度传感器主要分为马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer，MZI)、光纤萨格纳克干涉仪(Fiber Sagnac Interferometer，FSI)、迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer，MI)和法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer，FPI)等四种。

FSI具有噪声小、双光路互逆，以及比MZI和FPI更高的温度灵敏度的优点，因此被广泛应用于温度测量。FSI的原理是由双折射光纤的一部分插入环路中，引起两个反向传播光波的光程差，形成干涉光谱。保偏光纤(Polarization Maintaining Fiber，PMF)具有高双折射性，因此常被应用于FSI中。2019年，Shao等[12]提出了一种基于保偏光纤Sagnac环路的高灵敏度温度传感器，PMF弯曲成半径为30 mm的圆形，获得了1.73 nm/℃的高温度灵敏度。

有人提出利用游标效应来提高FSI的温度灵敏度。主要通过FSI级联各种干涉仪来实现，如级联MZI[13-15]，级联FPI[16-17]和级联FSI[18-19]等。在级联结构中以FSI为传感器，其他干涉仪为滤波器，能够将单个FSI的温度灵敏度放大几倍到几十倍。2015年，Shao等[20]提出了一种基于游标效应的级联双FSI温度传感器，使得温度灵敏度从单个FSI的1.46 nm/℃提高到级联双FSI的13.36 nm/℃。2021年，Jia等[21]提出了一种基于级联FSI和MZI游标效应的高灵敏度光纤温度传感器，单个FSI的温度灵敏度仅为1.68 nm/℃，级联一个MZI之后，可以将其提高到14.30 nm/℃，放大倍数为8.51。2022年，Xie等[22]提出了一种基于谐波游标效应的级联保偏光纤Sagnac干涉仪高灵敏度温度传感器，其灵敏度比单个保偏光纤Sagnac干涉仪灵敏度提高了约35.5倍，在30～37 ℃的温度测量范围内具有53.3 nm/℃的温度灵敏度。但选取的滤波器本身有较高的温度灵敏度，容易对包络的移动造成影响，并且对光源有较高的要求。

本文提出了一种基于游标效应的萨格纳克干涉仪温度传感器。由一段保偏光纤和一个3 dB四端口耦合器组成FSI，一段少模光纤(Few Mode Fiber，FMF)与单模光纤(Single Mode Fiber，SMF)组成光纤模态干涉仪(Fiber Optic Modal Interferometer，FMI)，形成级联结构。采用FSI作为温度传感器，FMI充当滤波器。实验结果显示，单个FSI的温度灵敏度为－1.30 nm/℃，级联FMI后，温度灵敏度提高到－18.19 nm/℃，放大倍数为13.99。

1 级联传感结构制作与工作原理

本文中提出的级联传感结构如图1所示。其中FSI作为温度传感器，由1.5 m的PMF与3 dB四端口耦合器通过法兰盘连接形成的，PMF是标准熊猫型光纤(PM15-17034)。FMI充当滤波器，由0.5 m的FMF与两段SMF通过熔接机熔接制作而成，FMF是四模阶跃型光纤，纤芯直径为18.5 μm。通过控制PMF与FMF的长度，使两个干涉仪的自由光谱范围(Free Spectral Range，FSR)接近，从而形成光学游标效应，以提高传感器的温度灵敏度。

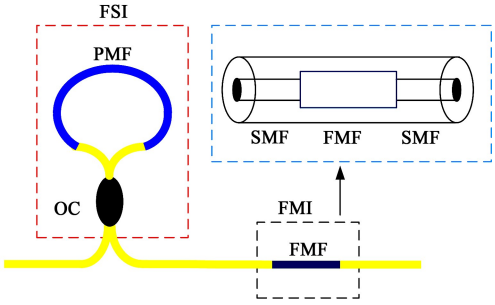


图1 级联FSI和FMI的传感结构示意图

对于FSI，其传输函数可以表示为：

$$T_{\mathrm{FSI}}=\frac{1-\cos\varphi_1}{2} \tag{1}$$

$$\varphi_1=\frac{2\pi\Delta nL_1}{\lambda} \tag{2}$$

其中，φ_1是PMF两种偏振态之间的相移，Δn是PMF快轴和慢轴之间的双折射率差，L_1是PMF的长度，λ是入射光波的波长。

当$\varphi_1=\frac{2\pi\Delta nL_1}{\lambda_m}=(2m+1)\pi(m=0,1,2,3,\cdots,$ λ_m是m阶波峰对应的波长)时，透射谱函数将达到最大值，在波形上出现波峰。FSR定义为两个相邻波峰之间的间隔，可表示为：

$$FSR_{\mathrm{FSI}}=\lambda_m-\lambda_{m+1}=\frac{\lambda_m\lambda_{m+1}}{\Delta nL_1}\approx\frac{\lambda_m^2}{\Delta nL_1} \tag{3}$$

当 PMF 所在区域的温度发生变化时，其双折射率差 Δn 也会发生变化，从而导致 FSI 的透射光谱发生漂移，可以表示为：

$$\Delta\lambda=\lambda\frac{\Delta n_{T_1}-\Delta n_{T_2}}{\Delta n} \tag{4}$$

其中，$\Delta\lambda$ 表示波长随温度变化的漂移，Δn_{T_1} 和 Δn_{T_2} 分别表示保偏光纤在 T_1 和 T_2 两个温度下的双折射率差。

对于 FMI，入射光波经过第一熔接处激发出高阶模式，高阶模式与基本模式在 FMF 中传输后会产生光程差，在第二熔接处发生模式耦合，形成干涉。FMI 输出端的功率可以表示为：

$$I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\varphi_2 \tag{5}$$

$$\varphi_2=\frac{2\pi\Delta n_{\mathrm{eff}}L_2}{\lambda} \tag{6}$$

其中，I_1 和 I_2 分别是沿 FMF 传输的基模与高阶模的光能量，φ_2 是光路传输的相位差，Δn_{eff} 是基模和高阶模的有效折射率之差，L_2 是 FMF 的长度，λ 是入射光波的波长。

当 $\varphi_2=\frac{2\pi\Delta nL_2}{\lambda_m}=(2m+1\pi)$（$m=0,1,2,3,\cdots$，$\lambda_m$ 是 m 阶波峰对应的波长）时，透射谱函数将达到最大值，在波形上出现波峰。FSR 定义为两个相邻波峰之间的间隔，可表示为：

$$FSR_{\mathrm{FMI}}=\lambda_m-\lambda_{m+1}=\frac{\lambda_m\lambda_{m+1}}{\Delta n_{\mathrm{eff}}L_2}\approx\frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\mathrm{eff}}L_2} \tag{7}$$

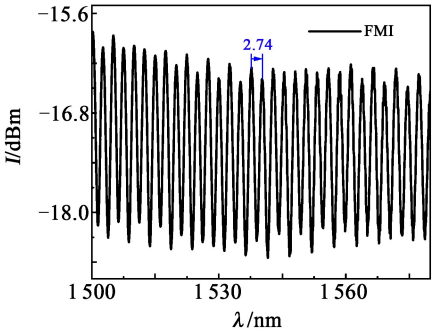
本文中将两个干涉仪级联，两者的输出波长相互叠加，形成具有周期性的包络。包络的 FSR 可以表示为：

$$FSR_{\mathrm{envelope}}=\frac{FSR_{\mathrm{FSI}}\times FSR_{\mathrm{FMI}}}{|FSR_{\mathrm{FSI}}-FSR_{\mathrm{FMI}}|} \tag{8}$$

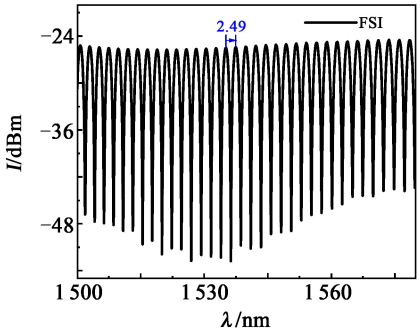
当 FMI 不受环境变化影响，FSI 受温度变化发生波长漂移时，漂移量会因为游标效应被放大，放大倍数为：

$$M_{\mathrm{FSI}}=\frac{FSR_{\mathrm{FSI}}}{|FSR_{\mathrm{FSI}}-FSR_{\mathrm{FMI}}|} \tag{9}$$

在室温情况下，FMI 和 FSI 的透射光谱如图 2(a)～(b)所示。FMI 的 FSR 为 2.82 nm，FSI 的自由光谱范围为 2.63 nm。根据公式(8)计算，两者级联后包络的 FSR 为 39.03 nm。使用 FSI 作为温度传感器时，根据公式(9)计算，可以得到温度灵敏度的放大倍数为 13.84，两个干涉仪级联后的输出光谱如图 3 所示。两个干涉仪级联后形成了光学游标效应，获得了包络，其 FSR 为 39.10 nm，与上述计算结果基本一致。



(a) FMI 的输出光谱



(b) FSI 的输出光谱

图 2　FMI 和 FSI 的输出光谱

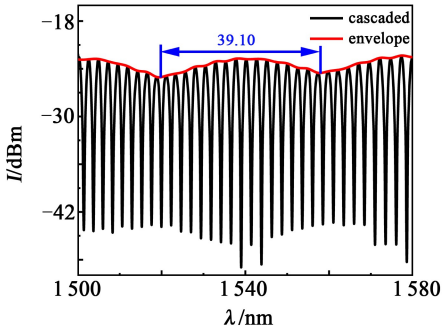


图 3　级联 FSI 和 FMI 的输出光谱

2　实验结果与分析

本文基于级联 PMF 和 FMF 的光纤温度传感器实验装置示意图如图 4 所示，由宽带光源（Broadband Light Source，BBS，波长范围为 1 500～1 580 nm）发射出的光波经过 FSI 和 FMI，产生光学游标效应，用光谱分析仪（Optical Spectrum Analyzers，OSA，Yokogawa，AQ6375，波长分辨率为 0.02 nm）测量输出光谱。以 FSI 为温度传感器，FMI 为滤波器。将 PMF 放在加热台上，并盖上木板，使得 PMF 受热均匀。

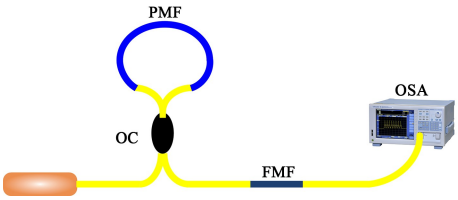
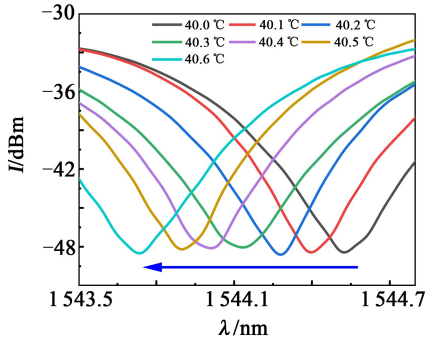


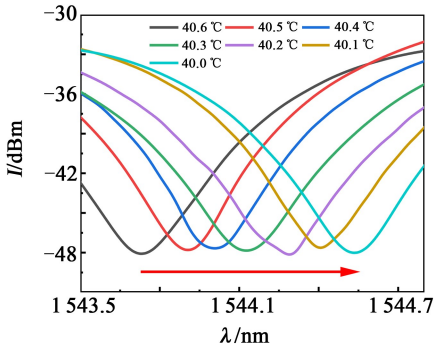
图 4 级联 FSI 和 FMI 的光纤温度传感器实验装置示意图

先测量单个 FSI 的温度灵敏度。从 40.0 ℃加热到 40.6 ℃，每次加热 0.1 ℃，之后静置 10 min，记录下输出光谱。

由图 5(a)可知，当温度上升时，波谷向波长更短的方向移动(蓝移)。这是传感器中 PMF 温度升高时，本身的双折射率差减小引起的。进一步进行了降温实验，实验结果如图 5(b)所示，在降温过程中，波谷向波长更长的方向移动(红移)，这是由于降温过程中 PMF 的双折射率差增大引起的线性温度响应。



(a) 加热



(b) 冷却

图 5 不同温度下单个 FSI 的输出光谱

如图 6 所示，绘制并线性拟合了升温和降温时波谷随温度变化的关系曲线，计算可得升温时温度灵敏度为－1.30 nm/℃，且具有 0.998 的线性拟合度，降温时温度灵敏度为－1.30 nm/℃，且线性拟合度为 0.997，表现出良好的线性关系。并且可以计算出温度测量范围大致为 40.0～42 ℃。同时，可以看出在升温和降温过程中，同一个温度中的波谷所处的波长位置几乎一致，表明保偏光纤具有良好的稳定性。

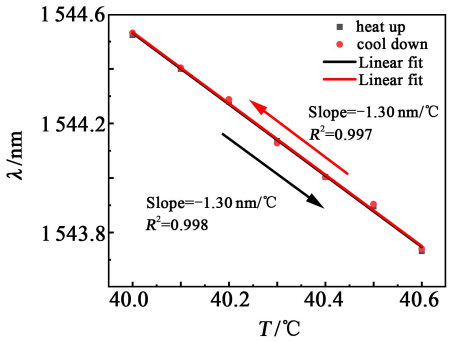


图 6 单个 FSI 的温度与波长的关系曲线

测量级联结构中 FSI 的温度灵敏度时，将 FMI 干涉仪放在加热台外，只加热 PMF。温度从 40.0 ℃加热到 40.6 ℃，每次加热 0.1 ℃，之后静置 10 min，用光谱分析仪测量输出光谱。

FSI 级联 FMI 之后，形成了光学游标效应，获得了包络。由图 7 所知，当温度从 40.2 ℃上升到 40.5 ℃时，包络中的波谷向波长更短的方向移动了 5.4 nm。

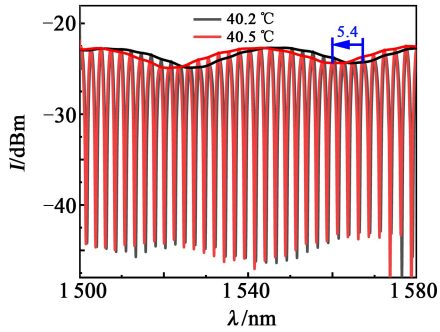
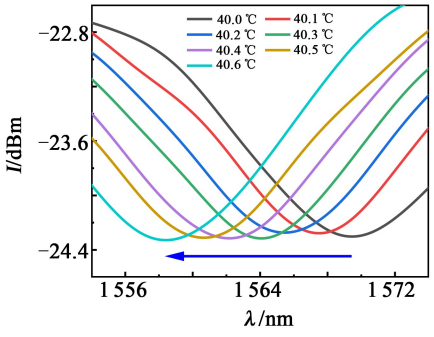


图 7 级联 FSI 和 FMI 在 40.2 和 40.5 ℃的输出光谱

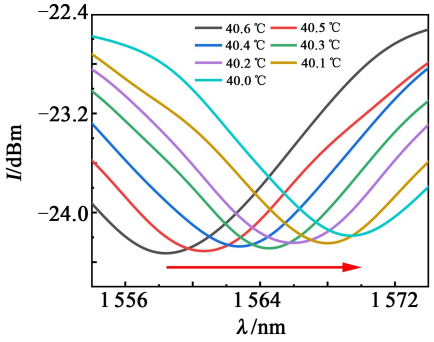
图 8(a)显示当温度上升时，包络中的波谷向短波长方向移动(蓝移)；图 8(b)显示当温度下降时，包络中的波谷向长波长方向移动(红移)。

图 9 中黑线为波谷的波长变化与温度上升的线性拟合，计算可得温度灵敏度为－17.81 nm/℃，线性拟合度为 0.999；红线为波谷的波长变化与温度下降的线性拟合，计算可得温度灵敏度为－18.19 nm/℃，线性拟合度为 0.998。可以计算出温度测量范围大致为 40.0～42 ℃。与单个 FSI 温度灵敏度相比，级联 FMI 之后，FSI 温度灵敏度在升温时放大了 13.7 倍，降温时放大了 13.99 倍，与理论值 13.84 几乎一致。在升温和降温中，同一个温度中的波谷所处的

波长位置几乎一致，表明传感结构具有良好的稳定性和重复性。表 1 给出了本文研制的传感器灵敏度与已有文献报道的结果。



（a）加热



（b）冷却

图 8　不同温度下级联 FSI 和 FMI 的输出光谱

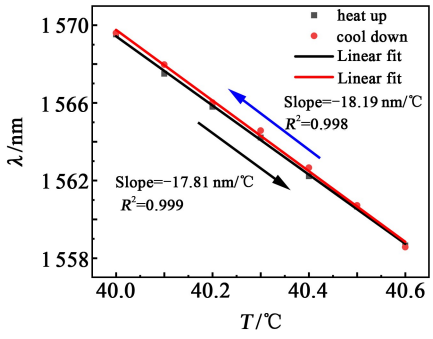


图 9　级联 FSI 和 FMI 的温度与波长的关系曲线

表 1　与已有文献报道的传感器性能对比

干涉仪类型	温度灵敏度/(nm/℃)	参考文献
Cascaded PMF-SIs	−3.66	[23]
Cascaded FSI and MZI	−12.02	[24]
Cascaded FSI and MZI	−14.3	[25]
Cascaded FSI and FPI	−9.99	[26]
Cascaded FSI and FPI	−10.28	[27]
Cascaded FSI and FMI	−18.19	本文

3　结论

本文提出了一种基于级联保偏光纤和少模光纤的高灵敏度温度传感器，其中一段长为 1.5 m 的保偏光纤和 3 dB 四端口耦合器组成 FSI，作为温度传感器；一段长为 0.5 m 少模光纤与单模光纤组成 FMI，作为滤波器。实验结果表明，单个 FSI 的温度灵敏度为 −1.30 nm/℃，线性拟合度为 0.998。级联 FMI 后，温度灵敏度提高到 −18.19 nm/℃，线性拟合度为 0.998。级联结构的温度灵敏度是单个 FSI 的温度灵敏度的 13.99 倍，与理论值 13.84 几乎一致。该温度传感系统具有成本低、制作工艺简单、灵敏度高的优点，适用于对温度变化监测要求较高的设备。

参考文献：

[1] Liu Q P, Wang C F, Liu W F, et al. Large-range and high-sensitivity fiber optic temperature sensor based on Fabry-Pérot interferometer combined with FBG[J]. Opt. Fiber Technol., 2022, 68: 102794.

[2] Liu M Y, Wu Y H, Song H, et al. Multiparameter measuring system using fiber optic sensors for hydraulic temperature, pressure and flow monitoring[J]. Measurement, 2022, 190: 110705.

[3] Zhao J, Zhao Y, Cai L. Hybrid fiber-optic sensor for seawater temperature and salinity simultaneous measurements[J]. J. of Lightwave Technol., 2022, 40(3): 880-886.

[4] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Opt. & Laser Technol., 2016, 78: 81-103.

[5] Iezzi V L, Loranger S, Kashyap R. High sensitivity distributed temperature fiber sensor using stimulated Brillouin scattering[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 32591-32601.

[6] Xia X P, Zhang Y M, Lou X P, et al. Half-size metal-packaged fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. Optical Engineering, 2019, 58(11): 116104.

[7] Esposito F, Campopiano S, Ladicicco A. Miniaturized strain-free fiber Bragg grating temperature sensors[J]. IEEE Sensors J., 2022, 22(17): 16898-16903.

[8] 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]. Opt. Communications, 2019, 452: 233-237.

[9] Gao S, Ji C K, Ning Q Y, et al. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique[J]. Opt. Fiber Technol., 2020, 56: 102202.

[10] Cui Y, Jiang Y, Liu T M, et al. A dual-cavity Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80582-80587.

[11] Wang Q Z, Meng H G, Fan X F, et al. Optical fiber temperature sensor based on a Mach-Zehnder interferometer

with single-mode-thin-core-single-mode fiber structure[J]. Rev. of Scientific Instruments, 2020, 91(1): 015006.

[12] Shao L P, Hu J H, Lu H G, et al. High-sensitivity temperature sensor based on polarization maintaining fiber Sagnac loop[J]. Photonic Sensors, 2019, 9: 25-32.

[13] Luo W D, Cao Z G, Zhang G S, et al. A highly sensitive optical fiber temperature sensor based on the enhanced Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 67: 102702.

[14] Chen Q, Chen H L, Liu Y D, et al. An optical fiber sensor for the detections of liquid level and strain through cascading Sagnac interference and modal interference[J]. Infrared Phys. & Technol., 2022, 127: 104387.

[15] Zhao Y F, Jia Z N, Dai M L, et al. Cascaded fiber non-adiabatic taper and Sagnac loop for refractive index sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113212.

[16] Zhang W J, Wu X Q, Zuo C, et al. Highly sensitive temperature and strain sensor based on fiber Sagnac interferometer with Vernier effect [J]. Opt. Communications, 2022, 506: 127543.

[17] Shangguan C M, Zhang W, He W, et al. Fabry-Perot cavity cascaded Sagnac loops for temperature and strain measurements[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 047103.

[18] Liu S, Lu G G, Lv D Y, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with cascaded Sagnac loops based on harmonic Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 66: 102654.

[19] Lin W H, Shao L Y, Liu Y B, et al. Temperature sensor based on fiber ring laser with cascaded fiber optic Sagnac interferometers[J]. IEEE Photonics J., 2021, 13(2): 1-12.

[20] Shao L Y, Luo Y A, Zhang Z Y, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect [J]. Opt. Communications, 2015, 336: 73-76.

[21] Jia X L, Zhou X F, Bi M H, et al. High-sensitivity optical fiber temperature sensor of cascaded FSI and MZI based on Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 65: 102625.

[22] Xie L Q, Chen M M, Zhang Z X. Simplified highly sensitive temperature sensor based on harmonic Vernier effect[J]. Appl. Phys. B, 2022, 128(8): 158.

[23] Liu S, Lu G, Lv D, et al. Sensitivity enhanced temperature sensor with cascaded Sagnac loops based on harmonic Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 66: 102654.

[24] Su H, Gao L X, Zhang Z R, et al. Optical fiber temperature sensor with Vernier effect formed by Mach-Zehnder interferometer cascaded Sagnac interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2022, 52: 101085.

[25] Jia X L, Zhou X F, Bi M H, et al. High-sensitivity optical fiber temperature sensor of cascaded FSI and MZI based on Vernier effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2021, 65: 102625.

[26] Huang B S, Sheng X Z, Tang Z J, et al. High and online tunable sensitivity fiber temperature sensor based on Vernier-effect[J]. Opt. Fiber Technol., 2022, 72: 103003.

[27] Zhou X F, Zhou Y, Li Z Y, et al. Research on temperature sensing characteristics with cascaded fiber Sagnac interferometer and fiber Fabry-Perot interferometer-based fiber laser[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 057103.

作者简介：

陈志萌(1998—)，男，硕士研究生，主要研究方向为光纤温度传感技术；

黄昌清(1980—)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤激光器和传感器、光子晶体光纤。