

# 光载微波干涉光子晶体光纤传感系统实验研究

梁斯靖<sup>1,2</sup>, 周次明<sup>1</sup>, 范典<sup>1\*</sup>, 李宇潇<sup>1</sup>, 庞彦东<sup>1</sup>, 陈希<sup>1</sup>

<sup>1</sup>武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 针对目前光子晶体光纤传感器存在对模间干涉敏感、难以封装等问题, 搭建了一种基于光载微波干涉的光子晶体光纤传感系统。系统干涉发生在光载波的微波包络之间, 光不发生干涉, 光波的偏振衰落、色散、模间干涉等对系统的信号质量影响很小, 因此不需要对系统中光子晶体光纤进行特殊处理, 且该系统对加工精度要求较低。分别对系统进行了应变与高温传感实验。应变实验结果表明: 微波域干涉条纹可见度为 20 dB, 8 GHz 处应变测量灵敏度为 6.3 kHz/ $\mu\epsilon$ , 微应变测量分辨率可达 1.59  $\mu\epsilon$ 。温度实验结果表明: 系统在室温到 800 °C 温度范围内的温度测量灵敏度为 76.04 kHz/°C, 理论上温度测量分辨率可达 0.13 °C, 通过多组长度探头的温度实验证明系统具有良好的温度灵敏度与稳定性。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 干涉测量法; 微波光子学; 光子晶体光纤

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050602

## Experimental Study on Photonic Crystal Fiber Sensing System Based on Optical-Borne Microwave Interference

Liang Sijing<sup>1,2</sup>, Zhou Ciming<sup>1</sup>, Fan Dian<sup>1\*</sup>, Li Yuxiao<sup>1</sup>, Pang Yandong<sup>1</sup>, Chen Xi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** A photonic crystal fiber sensing system based on optical-borne microwave interference is built to solve the problem that the current photonic crystal fiber sensor is sensitive to inter-mode interference and difficult to package. The system interference occurs between the microwave envelopes of the optical carriers, the light does not interfere, and the polarization fading, dispersion, and inter-mode interference of the optical waves have a little effect on the signal quality. Therefore, the system does not require special processing for the photonic crystal fiber, with low requirements of the processing accuracy. Strain and high temperature sensing experiments are carried out on the system. The strain test results show that the visibility of interference fringe in microwave domain can reach 20 dB, the strain measurement sensitivity at 8 GHz is 6.3 kHz/ $\mu\epsilon$ , and the resolution of the microstrain measurement is 1.59  $\mu\epsilon$ . The temperature experimental results show that temperature measurement sensitivity of system is 76.04 kHz/°C from room temperature to 800 °C, and the theoretical temperature measurement resolution is 0.13 °C. Temperature experiments using multiple sets of length probes prove that the system has good temperature sensitivity and stability.

**Key words** fiber optics; fiber optics sensors; interferometry; microwave photonics; photonic crystal fibers

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.3180; 060.5625

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-08-15; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61775173, 61975157)、预研基金(6140243010116QT69001)

\* E-mail: fandian@whut.edu.cn

# 1 引言

光纤传感器具有体积小、灵敏度高、复用能力强、抗电磁干扰等优点,在温度、应变和生物测量,分布式检测中得到了广泛应用。光学干涉法是已知的较灵敏的测量技术之一<sup>[1]</sup>,大多数光学干涉仪都是由单模光纤制备而成。单模光纤干涉仪可以在光学的相干长度范围得到周期性的光谱条纹,由测量参数引起的较小光程差变化能够通过条纹的偏移量来读取,因此,基于单模光纤的光学干涉传感器具有灵敏度高、解调方式简单、方便制造等优点。然而,最广泛使用的单模光纤一般是由掺锗二氧化硅制备的,在高温条件下,掺杂物的扩散会导致干涉光谱随时间漂移,进而造成高温区传感不稳定<sup>[2]</sup>。光子晶体光纤(PCF)是一种新型的光纤,具有结构多样、无截止单模和高双折射率等特性,受到国内外学者的广泛关注<sup>[3]</sup>。光子晶体光纤具有纯硅芯结构,耐高温且信号稳定<sup>[4]</sup>,可以解决单模光纤干涉仪的传感光谱在高温区漂移等问题。目前已提出多种基于光子晶体光纤的温度及应变传感方法,包括在光子晶体光纤中填充液体或进行表面涂覆、基于光子晶体光纤的模间干涉的方法、制作单模光纤与光子晶体光纤的法布里-珀罗干涉仪<sup>[5-8]</sup>等。但是,由于光子晶体光纤纤芯与单模光纤纤芯存在折射率差异,熔接后的熔接端面会形成一个微小的反射面;同时,光子晶体光纤存在微结构,模场分布复杂,在与单模光纤熔接时存在包层空气孔塌陷、模场失配等情况,造成很大的熔接损耗<sup>[9]</sup>。此外,利用模间干涉的光子晶体光纤传感方法对光纤间模式功率分布很敏感,这意味着光纤的轻微弯曲就会明显改变模式分布<sup>[10]</sup>,从而对传感结果造成影响,因此这类传感器存在难以封装、不抗弯、对熔接要求高等缺点。

微波光子学是微波学技术与光子学结合的产物。与传统的微波系统相比,微波光子系统具有带宽大、损耗低、结构紧凑及抗电磁干扰等诸多优点<sup>[11]</sup>,可以有效突破电子瓶颈,很多在传统微波系统中难以实现的功能都可以利用微波光子技术来实现。微波和光波一样可以干涉<sup>[12]</sup>,微波波长远长于光波,其干涉仪稳定性要优于光学干涉仪<sup>[13]</sup>,更容易实现长距离探测<sup>[14]</sup>。将光载微波干涉应用于光纤传感,系统的干涉发生在光载波的微波包络之间,光不发生干涉。目前国内学者已证明:通过微波干涉的传感方法可以明显减小光波的偏振衰落、色

散和模间干涉对传感信号质量的影响<sup>[15-17]</sup>。因此,光载微波干涉技术不会面临目前光子晶体光纤传感中模式分布、封装等方面的问题;同时,由于不发生光波干涉,利用光载波信号在微波域重建干涉条纹,该方法具有条纹清晰<sup>[18-19]</sup>、解调方便、相干距离长<sup>[20]</sup>等优点。基于上述分析,本文搭建了光载微波干涉的光子晶体光纤传感系统,并进行了应变与温度实验研究。所搭建系统具有良好的应变与温度稳定性,对加工精度要求低,响应速度快,可以实现实时解调。

## 2 传感原理

生成光载微波的方法有很多,本实验中光波经马赫-曾德尔光电调制器(MZM)的强度调制后输出,由于偏置控制器(MBS)可以控制 MZM 的调制深度,所以这种方法输出的光载微波比较稳定, MZM 的驱动信号的输出以及微波域干涉信号的解调都是由网络分析仪(VNA)负责。基于光载微波干涉的光子晶体光纤传感系统如图 1 所示。

从自发辐射宽带光源(ASE)发出波长范围为 1527~1603 nm 的连续光波,经 MZM 被分成两路。MZM 的一路由网络分析仪 1 端口发出的连续扫频微波信号驱动,驱动信号的频率加载到光波的时间项上。MZM 的另一路通过偏置控制器(MBS)调节直流偏置电压。MBS 需要一个分光比为 99:1 的耦合器分出 1% 的 MZM 输出信号用于探测,根据探测得到的光载微波的功率大小判断 MZM 的偏置点,进而将偏置电压输入 MZM,进行反馈控制。实验需要将 MZM 输出控制在 Quad 输出点,以得到稳定的光载微波信号,信号的包络频率与网络分析仪 1 端口发出的扫频信号频率相同。光载微波信号从环形器(circulator)1 端口输入,2 端口输出。选用一个分光比为 50:50 的 2×1 耦合器搭建迈克尔孙干涉仪,耦合器的末端通过适配器与两段具有一定臂长差的光子晶体光纤相连,一段为参考臂,一段为传感臂。垂直切割两段光子晶体光纤的末端端面以形成反射面。载波扫频信号经过不同长度的光子晶体光纤后,在光纤末端端面处发生反射,两束反射信号在耦合器处发生干涉。干涉信号可以分成微波干涉的自积项和光学干涉的交叉积项两部分,通过宽带光源发出的光信号可作为载波,其相干长度在微米级。当干涉仪参考臂与测量臂的臂长差远大于宽带光源的相干长度时,光不发生干涉,交叉积项趋近于零;由于干涉信号中不同模式和偏振态对传感

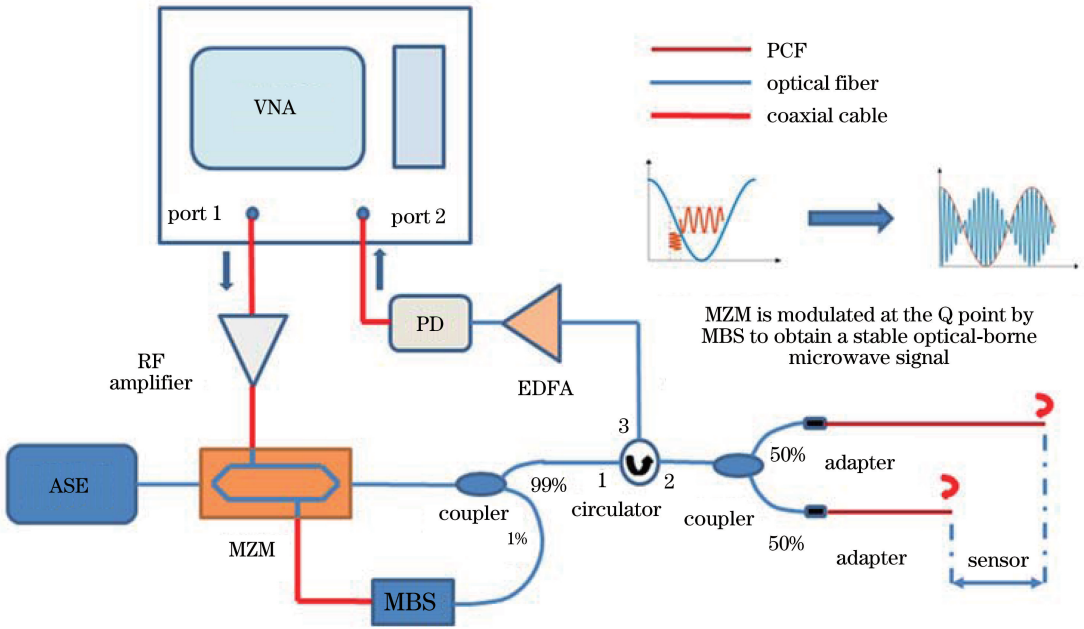


图 1 光载微波干涉光子晶体光纤传感系统原理图

Fig. 1 Schematic of photonic crystal fiber sensing system based on optical-borne microwave interference

造成的影响主要集中在光学干涉的交叉积项,因此,当光不发生干涉时,上述参数对传感影响很小。干涉信号由环形器的 3 端口输出,经增益为 20 dB 的掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,再经 10 GHz 高速光电探测器(PD)转换成电信号,输入到网络分析仪的 2 端口。网络分析仪主要由信号发射机与接收机组成,其接收机与发射机有相同的本振源。混频器将发射信号与接收信号混频后,再通过中频滤波器与正交分解得到信号的幅度与相位,经过正交解调后信号可以表示为

$$E_{IQ} = AJ_1(m) \exp \left[ j \left( 2\pi f_D \frac{W + nL_r}{c} \right) \right] + AJ_1(m) \exp \left[ j \left( 2\pi f_D \frac{W + nL_s}{c} \right) \right], \quad (1)$$

式中: $A$  为信号幅值项; $J_1(m)$  为一阶贝塞尔级数; $L_r$  为参考臂测量长度; $L_s$  为传感臂长度; $n$  为光纤折射率; $W$  为电延迟项; $f_D$  为微波信号频率; $c$  为光速。正交解调信号是具有参考臂与传感臂长度信息的两个正弦信号的叠加,对正交解调信号进行傅里叶逆变换(IFFT),可以得到反射端面的位置信息,傅里叶逆变换结果可以表示为

$$X(t) = AJ_1(m) \left| \text{sinc} \left\{ \Delta f_D \left[ t - \left( \frac{W + nL_r}{c} \right) \right] \right\} \right| + AJ_1(m) \left| \text{sinc} \left\{ \Delta f_D \left[ t - \left( \frac{W + nL_s}{c} \right) \right] \right\} \right|, \quad (2)$$

式中: $\Delta f_D$  是微波信号的扫频范围。对正交解调信号取模值可以得到干涉信号  $S$  参数的幅度谱,忽略直流项可以表示为<sup>[14]</sup>

$$S = 20 \lg \left\{ A^2 J_1^2(m) \cos \left[ 2\pi f_D n \left( \frac{L_s - L_r}{c} \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

由(3)式可以得出,干涉信号  $S$  参数的频谱是一个正弦信号的指数形式,其中正弦信号的频率和系统参考臂与传感臂的光程差(OPD)成正比。通过解调  $S$  参数谱某一频点的偏移可以解调光程差的变化,从而得到施加在传感光纤上的温度应变等信息。

本文对上述推导进行了仿真分析:仿真设置的参考臂与测量臂的初始光程差(OPD1)为 1 m,微波扫频范围为 4~5 GHz,采样点数为  $2^{20}$ ,沿光纤轴向拉伸 5 mm,其应变达到  $5000 \mu\epsilon$ ,此时的光程差用 OPD2 表示。仿真结果如图 2 所示。图 2(a)是位置可分辨的正交解调信号傅里叶逆变换时域谱:第一个峰是参考臂端面的反射峰,其在应变变化下保持稳定;第二个峰是传感臂端面的反射峰,在应变下光程差由 OPD1 变化到 OPD2。图 2(b)是信号  $S$  参数谱,其中蓝线是光纤原始频谱,红线是延光纤轴向拉伸 0.005 m 后的  $S$  参数谱,光程差的变化可以通过  $S$  参数频率的偏移表现出来。

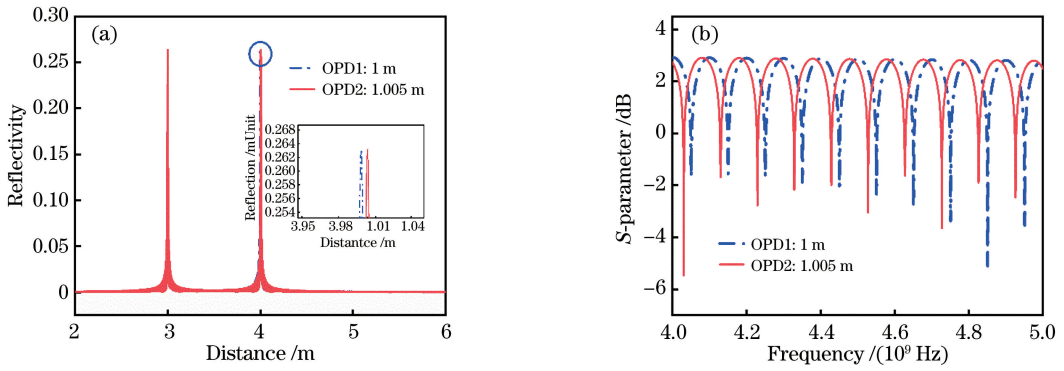


图2 光载微波干涉光纤传感系统的仿真分析图。(a)位置可分辨的IFFT时域谱;(b)信号的S参数频谱  
Fig. 2 Simulation analysis diagram of optical-borne microwave interference based optical fiber sensing system.  
(a) Position-resolvable IFFT time domain spectrum; (b) S-parameter spectrum of signal frequency domain

### 3 实验与结果分析

对基于光载微波干涉的光子晶体光纤传感系统进行了应变与高温传感实验。使用的光子晶体光纤为国内武汉长飞公司生产的无截止单模光子晶体光纤(SM-10 PCF),其由纯硅芯制作,在1550 nm波长范围损耗小于1.0 dB/km。网络分析仪1端口输出扫频信号频率范围为1~8.5 GHz,信号功率为0 dBm;射频放大器增益为25 dB;网络分析仪2端口接收机的中频带宽为10 kHz。ASE光源输出波长范围为1527~1604 nm、3 dB带宽为77 nm、功率为10 dBm的连续光。根据相干长度公式  $L =$

$\frac{c}{n\Delta f}$ :微波的最大相干长度为20 km,最小相干长度为1.3 cm;光波的相干长度为24  $\mu\text{m}$ 。因此当参考臂与传感臂臂长差大于1.3 cm时,系统仅会发生微波干涉,光学干涉的模式串扰和偏振等影响被消除。

#### 3.1 基于光载微波干涉的光子晶体光纤应变传感实验

使用罗德施瓦茨网络分析仪(ZVA67)与应变台进行传感实验测试,接收机的采样点数为 $10^5$ ,完成一次扫描需要10.85 s。实验中使用的光子晶体光纤参考臂与传感臂之间臂长差测量值约为31 cm,系统的微波干涉结果如图3所示。

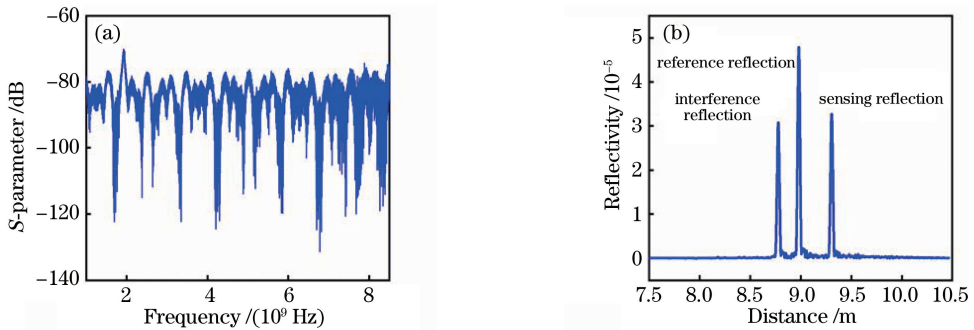


图3 应变传感实验光载微波干涉谱。(a)信号的S参数频谱;(b)位置可分辨的IFFT时域谱  
Fig. 3 Optical-borne microwave interference spectrum for strain sensing experiments. (a) S-parameter spectrum of signal frequency domain; (b) position-resolvable IFFT time domain spectrum

图3(a)是干涉信号的S参数谱。图3(b)是网络分析仪对正交信号进行傅里叶逆变换后的位置可分辨时域谱,时域谱由三个峰组成,第一个峰是由适配器中光纤端面反射造成的反射峰,第二个和第三个峰分别是参考臂端面反射峰与传感臂端面反射峰。对傅里叶逆变换信号添加窗函数,滤掉适配器的反射峰后,再进行傅里叶变换,可以得到高质量的微波干涉S参数谱。添加窗函数的时域谱和傅里

叶变换后的干涉信号S谱如图4所示。

图4(a)是添加窗函数后的时域谱,通过窗函数滤掉了图3(b)中适配器的反射峰,图中参考臂反射峰与传感臂反射峰相距0.3252 m,与先前臂长差测量值相近。图4(b)是滤波后的干涉信号S参数谱,与仿真结果图2(b)相符,干涉条纹可见度可达20 dB,说明微波干涉现象非常明显。网络分析仪的最小可分辨率偏移等于扫频范围除以采样点数。

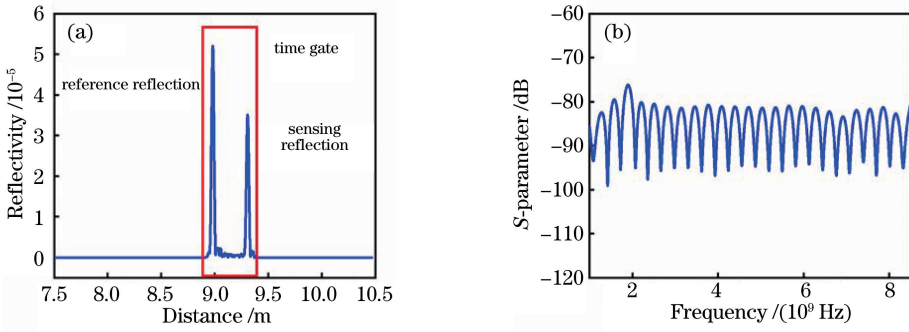


图4 添加时域门后的光载微波干涉谱。(a)位置可分辨的IFFT时域谱;(b)信号的S参数频谱  
Fig. 4 Optical-borne microwave interference spectrum after adding time domain door. (a) Position-resolvable IFFT time domain spectrum; (b) S-parameter spectrum of signal frequency domain

为了提高系统的应变测量分辨率,在满足相干条件的前提下,将扫频范围控制在7.5~8.5 GHz,最小可分辨频率偏移为10 kHz。光子晶体光纤的传感部分固定在应变台上,通过应变台上的螺旋测微计每次将光子晶体光纤拉伸0.05 mm,每次拉伸对应的应变变化为153.75  $\mu\epsilon$ ,一共拉伸30次。应变传感结果如图5所示。

图5(a)是应变实验下微波干涉信号的频率偏移。图5(b)是应变实验的中间峰谷频率偏移以及线性拟合结果,图中传感系统应变灵敏度为6.3 kHz/ $\mu\epsilon$ ,拟合线性度可达0.99953,稳定性较好。通过扫频范围除以采样点数可以计算出网络分析仪的测量分辨率为10 kHz,因此,系统应变测量分辨率可达1.59  $\mu\epsilon$ 。

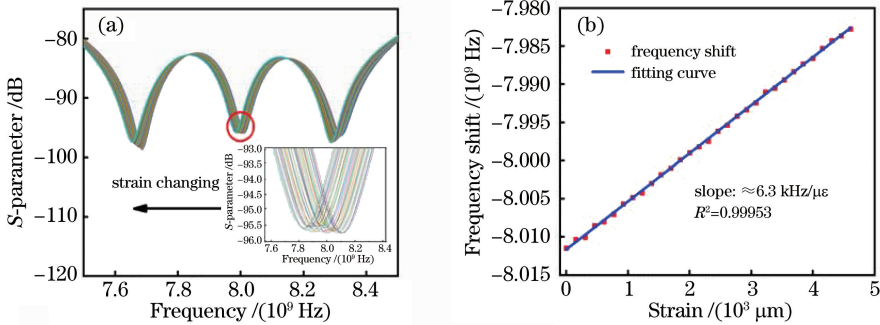


图5 应变传感实验结果。(a)应变变化下微波干涉信号的频率偏移;(b)波谷处的频谱偏移与拟合结果

Fig. 5 Results of strain sensing experiments. (a) Frequency shift of the microwave interference signal under strain changes; (b) frequency shift and fitting results at the valley

### 3.2 基于光载微波干涉的光子晶体光纤高温传感实验

光子晶体光纤由纯硅芯制造,耐高温,且温度稳定性好。使用前述传感系统进行了高温传感实验验证。网络分析仪接收机的采样点数、扫描时间与应变传感实验相同。实验使用的光子晶体光纤参考臂与传感臂之间的臂长差约为22 cm。高温炉温度从室温升到100  $^{\circ}\text{C}$ ,再每次步进100  $^{\circ}\text{C}$ ,升高到800  $^{\circ}\text{C}$ ,每步停留时间为40 min。温度变化导致光子晶体光纤光程差变化( $\Delta_{\text{OPD}}$ )为

$$\Delta_{\text{OPD}} = 2L(\delta_T + n\alpha_T)\Delta T, \quad (4)$$

式中: $L$ 为光子晶体光纤两个反射端面之间的距离,实验中约为22 cm; $\delta_T$ 是光子晶体光纤的热光系

数,约为 $1.45 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_T$ 是光子晶体光纤的热膨胀系数,约为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $n$ 为光子晶体光纤的折射率,约为1.4575。将扫频范围控制在7~8 GHz,系统的测量分辨率为10 kHz,由(4)式可以计算出:7.5 GHz的S参数的温度测量灵敏度约为78.73 kHz/ $^{\circ}\text{C}$ ,每10 kHz的频率偏移代表的温度变化为0.127  $^{\circ}\text{C}$ 。实验每10 min记录一次信号的温度信息,得到的传感结果如图6所示。图6(a)是温度实验下微波干涉信号的频率偏移。图6(b)是温度实验的中间峰谷频率偏移与热电偶温度测量的比较结果,热电偶初始温度与最后时刻测量的温度差为761.3  $^{\circ}\text{C}$ ,干涉信号频率偏移为57.89 MHz。通过计算可得:系统温度测量灵敏度为76.04 kHz/ $^{\circ}\text{C}$ ,

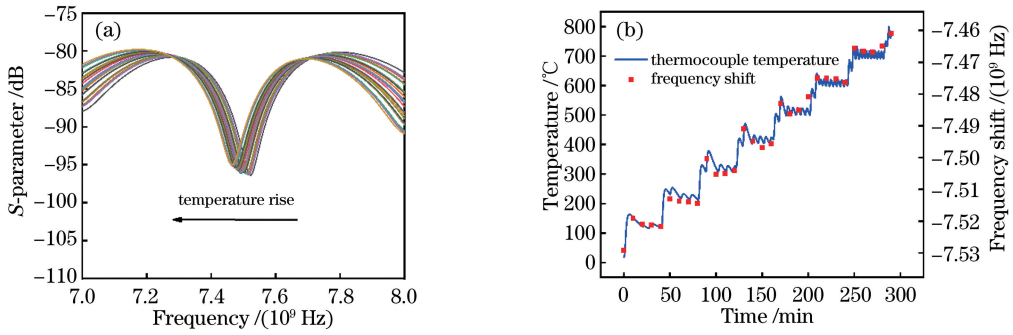


图6 高温传感实验结果。(a)温度变化下微波干涉信号的频率偏移;(b)波谷处频率偏移与热电偶温度测量曲线  
Fig. 6 Results of high temperature sensing experiments. (a) Frequency shift of microwave interference signal under temperature change; (b) frequency shift at the valley and thermocouple temperature measurement curve

每 10 kHz 的频率偏移代表的温度变化为  $0.131\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与经验(4)式的差值仅为  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该结果说明：所搭建系统可以实现室温到  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温传感，且具有良好的温度灵敏度。

分别对臂长差为 13, 22, 28 cm 的传感探头进行了高温传感实验。由于不同长度探头的干涉条纹在  $7\sim 8\text{ GHz}$  处的波谷频率不同，偏移量也不同，所以需要针对不同臂长差的探头随升温时间变化的频率偏移进行归一化处理，结果如图 7 所示。由归一化结果可以看出：不同臂长差探头所测得的温度结果在高温炉的温度保持区有很高的重合度，该实验证明系统在不同探头长度都具有良好的温度灵敏度和稳定性。由于微波干涉仪更稳定且相干长度长，在网络分析仪 1 端口输出扫频信号的频率范围为  $1\sim 8.5\text{ GHz}$  的条件下，系统理论上可在 1.3 cm 至 20 km 范围内调节探头长度，因此该系统降低了对光子晶体光纤加工精度的要求，同时可以满足多种环境下高温与应变传感需要。

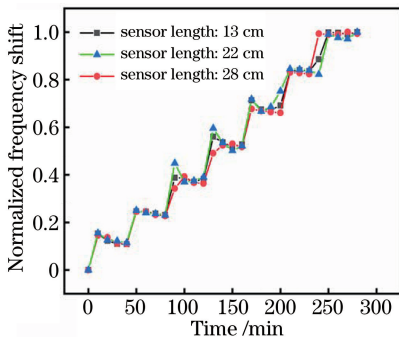


图7 不同长度探头随升温时间变化的频率偏移的归一化结果  
Fig. 7 Normalized result of frequency shift with different probe lengths as a function of temperature rise time

## 4 结 论

搭建了一种基于光载微波干涉的光子晶体光纤

传感系统。利用微波干涉技术，通过傅里叶逆变换添加时域窗函数可以获得高质量的微波干涉频谱，条纹可见度可达 20 dB。应变实验结果表明，8 GHz 处应变测量灵敏度为  $6.3\text{ kHz}/\mu\epsilon$ ，相应的测量分辨率为  $1.59\text{ }\mu\epsilon$ ，并且有良好的线性度。高温实验结果表明，系统在室温到  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内，温度测量灵敏度为  $76.04\text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$ ，理论上最小可测温度变化达  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，具有良好的温度灵敏度和稳定性。由于系统不发生光波干涉，光的偏振、色散和模间干涉等对系统信号质量影响很小，因此降低了对光子晶体光纤的加工要求；光子晶体光纤具有耐高温、高温区无光谱漂移等优点，能够满足多种环境下高温与应变传感需要，具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Li M, Liao Y B. Fiber optic sensors and application technology[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2012: 75-78  
黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2012: 75-78.
- [2] Hua L W, Song Y, Huang J, et al. Microwave interrogated large core fused silica fiber Michelson interferometer for strain sensing[J]. Applied Optics, 2015, 54(24): 7181-7187.
- [3] Chi H, Zeng Q J, Jiang C. Photonic crystal fiber: theory, applications and recent progress[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(5): 534-537.  
池灏, 曾庆济, 姜淳. 光子晶体光纤的原理、应用和研究进展[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(5): 534-537.
- [4] Ma J, Yu H H, Xiong J G, et al. Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070006.  
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研

- 究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070006.
- [5] Yu H, Wang Y, Ma J, et al. Fabry-Perot interferometric high-temperature sensing up to 1200 °C based on a silica glass photonic crystal fiber [J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 273.
- [6] Ma S Z, Feng W L, Peng Z Q, et al. Carbon monoxide gas sensor based on CuO/PANI coated photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050603.  
马诗章, 冯文林, 彭志清, 等. 基于氧化铜/聚苯胺包覆光子晶体光纤的一氧化碳传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 050603.
- [7] Rao Y J, Li H, Zhu T, et al. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1484-1488.  
饶云江, 黎宏, 朱涛, 等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1484-1488.
- [8] Wu T S, Wang L, Wang Z, et al. A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1114002.  
伍铁生, 王丽, 王哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1114002.
- [9] Wang X Y. The application of PC and PCF in sensor [J]. *Science & Technology Information*, 2008(31): 90-91.  
王向宇. 光子晶体和光子晶体光纤在传感器中的应用[J]. 科技信息, 2008(31): 90-91.
- [10] Liu F, Feng X L, Guo X, et al. Research on the bending sensing characteristics of PM-PCF based on intermodal interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0905005.  
刘丰, 冯晓龙, 郭璇, 等. 基于模间干涉的保偏光子晶体光纤弯曲传感特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905005.
- [11] Yao J P. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [12] Wei T, Huang J, Lan X W, et al. Optical fiber sensor based on a radio frequency Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 647-649.
- [13] Cui Y F, Wang Y P, Shi Q Y, et al. High-resolution transverse load fiber sensor based on microwave photonic filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206004.  
崔益峰, 汪弋平, 施青云, 等. 基于微波光子滤波器的高分辨率光纤横向负载传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206004.
- [14] Huang J, Hua L, Lan X W, et al. Microwave assisted reconstruction of optical interferograms for distributed fiber optic sensing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18152-18159.
- [15] Huang J, Lan X W, Wang H Z, et al. Optical carrier-based microwave interferometers for sensing application [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9098: 90980H.
- [16] Huang J, Lan X W, Song Y, et al. Microwave interrogated sapphire fiber Michelson interferometer for high temperature sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1398-1401.
- [17] Huang J, Lan X W, Luo M, et al. Spatially continuous distributed fiber optic sensing using optical carrier based microwave interferometry [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18757-18769.
- [18] Wang Y P, Wang M, Xia W, et al. High-resolution fiber Bragg grating based transverse load sensor using microwave photonics filtering technique [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17960-17967.
- [19] Cheng B K, Hua L W, Zhang Q, et al. Microwave-assisted frequency domain measurement of fiber-loop ring-down system [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1209-1212.
- [20] Hua L W, Song Y, Cheng B K, et al. Coherence-length-gated distributed optical fiber sensing based on microwave-photonics interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31362-31376.