

基于模间干涉的折射率/曲率不敏感型 PbS 光纤温度传感器

付兴虎¹ 杨传庆¹ 王思文¹ 文建湘² 董艳华² 付广伟¹ 毕卫红^{1*}

¹燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

²上海大学特种光纤与光接入网省部级共建重点实验室, 上海 200072

摘要 提出了一种基于硫化铅(PbS)光纤的折射率/曲率不敏感的光纤温度传感器。该传感器制作简单,只需将一段 PbS 光纤无错位熔接在两段单模光纤之间即可。由于 PbS 光纤纤芯特殊的折射率分布,当光线由输入单模光纤进入 PbS 光纤时,它会在 PbS 光纤纤芯中激发出不同的模式,不同模式在进入输出单模光纤时将会发生干涉。当外界环境温度变化时,PbS 光纤中不同模式间的光程差将会发生变化,从而引起传感器传输光谱的变化,因此可以通过检测传输光谱的变化实现对外界温度的测量。通过实验发现,PbS 光纤长度为 4 mm 时,即可得到完整的周期性干涉谱。对该传感器进行温度、折射率与曲率传感实验,可得温度灵敏度为 55.45 pm/°C,折射率灵敏度为 2.08 nm/RIU(其中 RIU 为单位折射率),曲率灵敏度为 -0.29 nm/m^{-1} ,说明该传感器对折射率和曲率不敏感,避免了温度测量时,折射率与曲率对其的影响。该传感器具有很小的结构尺寸,能够很好地应用在生物化学、工业生产等的温度测量场合。

关键词 光纤光学; 硫化铅光纤; 温度; 折射率; 曲率

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1210002

Refractive Index and Curvature Insensitive PbS Fiber Temperature Sensor Based on Inter-modal Interference Principle

Fu Xinghu¹ Yang Chuanqing¹ Wang Siwen¹ Wen Jianxiang²

Dong Yanhua² Fu Guangwei¹ Bi Weihong¹

¹Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information
Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract A refractive index and curvature insensitive temperature sensor based on PbS fiber is proposed. It is simple in fabrication just by splicing a section of PbS fiber between two single mode fibers without dislocation. Due to the special refractive index distribution of the PbS fiber core, the light can be stimulated to different modes in the core when it couples into the PbS fiber from the input single mode fiber. Different modes interfere when they couple into the output single mode fiber. The optical path differences between different modes of the PbS fiber change when the ambient temperature changes. Finally, the transmission spectrum of the sensor has a variation. Monitoring the variation of the transmission spectrum can measure the ambient temperature. Through the experiments, it is found that a complete periodic interference spectrum can be obtained when the length of PbS fiber is 4 mm. The sensing performances of temperature, refractive index and curvature of the sensor are tested, respectively. The results show that the temperature sensitivity of the sensor is 55.45 pm/°C, the refractive index sensitivity is only 2.08 nm/RIU

收稿日期: 2016-07-26; 收到修改稿日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61475133, 61575170, 61675176)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16961701D)、河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014057)、燕山大学"新锐工程"人才支持计划

作者简介: 付兴虎(1981—),男,博士,副教授,主要从事特种光纤传感方面的研究。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: whbi@ysu.edu.cn

and the curvature sensitivity is only -0.29 nm/m^{-1} , in which RIU is refractive index unit. It means that the sensor is insensitive to refractive index and curvature. So the temperature sensor can avoid the impact of the refractive index and the curvature. The sensor has a small structure size, and it can be well used in biochemistry, industrial production and other temperature measurement occasions.

Key words fiber optics; PbS fiber; temperature; refractive index; curvature

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2400

1 引 言

作为一种新型的传感器,光纤传感器具有传统电类传感器无可比拟的优势,具有对外界环境变化敏感、响应速度快、抗电磁干扰能力强、复用容易、体积小、制作简单等特点^[1-3],因此广泛应用于电力系统、医疗诊断、环境监测、航空航天、农业生产等领域^[4-6]。近年来,国内外学者对不同结构光纤传感器进行了大量的研究,使光纤传感技术得到了迅猛发展,并对折射率^[7-9]、湿度^[10-11]、温度^[12-13]、振动^[14-16]、曲率^[17]等参量进行了准确测量。这些光纤传感器在各自特定的应用领域都具有一定的优势,但大多存在不同参量同时检测时的交叉敏感问题,严重影响了传感器的测量灵敏度。因此,制备一种高灵敏度的光纤传感器成了众多研究人员的研究热点。

模间干涉技术是采取一定技术手段对光纤进行处理,使光在光纤中以不同的模式传输,并在输出端发生干涉的技术^[18-20]。因为不同模式的光的传播常数都不一样,故以不同模式传播的光在光纤中传输相同距离时,各个模式之间传输的光程不同,产生光程差,从而发生干涉产生干涉光谱^[21]。当外界环境因素变化引起各模式间的传播常数发生变化时,干涉光谱将会发生变化。通过对干涉光谱进行分析,就可以获得外界参量的传感信息。因为这种基于模间干涉技术的光纤传感器的传感臂和参考臂在一根光纤中,具有良好的抗干扰和环境变化能力,所以成为实用化传感器设计的一种新方法^[22],引起了学者广泛的研究兴趣。

本文提出了一种基于硫化铅(PbS)光纤的折射率/曲率不敏感的光纤温度传感器。该传感器是通过采用电弧熔接的方式将一段 PbS 光纤无错位熔接在两段标准单模光纤(SMF)之间,制成相应的 SMF-PbS-SMF 结构。由于 PbS 光纤纤芯折射率渐变分布的特性,当光由输入端 SMF 进入 PbS 光纤时,将会在 PbS 光纤纤芯中激发出不同的传输模式,并在进入输出端 SMF 时发生干涉。近年来,基于渐变折射率多模光纤干涉型温度传感器受到了研究人员的广泛关注。例如,2007 年 Liu 等^[23]提出了一种基于渐变折射率多模光纤的低损耗、高灵敏度的应力与温度传感器,其温度灵敏度为 $58.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,但温度变化与波长漂移之间具有较差的线性关系,测量误差大;2010 年 Gong 等^[24]采用具有周期性聚焦效应的渐变折射率多模光纤制备出法布里-珀罗型光纤传感器,其温度灵敏度为 $11.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,灵敏度较低;2012 年 Tafulo 等^[25]将渐变折射率多模光纤进行腐蚀,制备出本征型法布里-珀罗光纤传感器,其温度灵敏度最高为 $0.95 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,对温度不敏感。本文所提出的光纤温度传感器能够较好地解决温度测量过程中折射率与曲率变化对实验结果的影响,且温度变化与波长变化间具有很好的线性关系,提高了温度测量的灵敏度与准确性。

2 理论分析

图 1 为传感头结构图,由图可知该传感头具有由输入端单模光纤、PbS 光纤、输出端单模光纤依次级联而成的 SMF-PbS-SMF 结构。

由图 1 所示,光源发出的光首先进入输入端 SMF,并以基模形式向前传输。当光传播至 PbS 光纤时,会全部耦合进 PbS 光纤的纤芯中。由于 PbS 光纤纤芯折射率渐变分布的特点,进入 PbS 光纤纤芯的光除了以基模的形式向前传播外,还会激发出高阶模。因为以基模和高阶模传输的光的传播常数不同,所以当光在

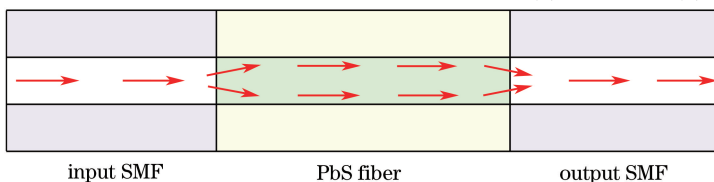


图 1 传感头结构图

Fig. 1 Configuration of the sensor

PbS 光纤中传输相同距离时,不同模式之间传输的光程不同,产生光程差,最终发生干涉效应,产生干涉光谱,并经输出端 SMF 输出。由双光束干涉理论可知,发生干涉后的光强为^[26]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\frac{2\pi(n_1 - n_2)L}{\lambda}\right], \quad (1)$$

式中 I 为输出总光强, I_1 、 I_2 分别为 PbS 光纤纤芯中基模和高阶模的光强, n_1 与 n_2 分别为基模与高阶模的有效折射率, λ 为自由空间光波长, L 为干涉长度, 即 PbS 光纤长度。其中基模与高阶模间的相位差为

$$\varphi = \frac{2\pi(n_1 - n_2)L}{\lambda} = \frac{2\pi n_{1,2}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 $n_{1,2}$ 为纤芯基模与高阶模的有效折射率差。

由(1)式可知,两光束发生干涉后的干涉谱中将会出现一系列最大值(波峰)与最小值(波谷)。当 $\varphi = 2n\pi$ 时,干涉光强出现最大值;当 $\varphi = (2n + 1)\pi$ 时,干涉光强出现最小值, n 取整数。所以传输光谱中相应波谷对应的波长为

$$\lambda_n = \frac{2n_{1,2}L}{2n + 1}. \quad (3)$$

由(3)式可知, λ_n 同时受到 $n_{1,2}$ 与 L 的共同影响。当传感器所处的环境温度变化 ΔT 时,由于热光效应和热胀冷缩特性,光纤长度和模式有效折射率发生变化,可以表示为^[27]

$$L(T) = L(T_0) (1 + \alpha_T \Delta T), \quad (4)$$

$$n(T) = n(T_0) (1 + \epsilon_T \Delta T), \quad (5)$$

式中 $L(T_0)$ 与 $n(T_0)$ 分别为温度 T_0 时的光纤长度与某一模式的有效折射率, α_T 与 ϵ_T 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。当环境温度变化时,受热膨胀效应和热光效应影响, PbS 光纤纤芯基模与高阶模的有效折射率变化不同,引起基模与高阶模间的有效折射率差发生变化。同时,热膨胀效应也会导致 PbS 光纤长度发生变化,最终导致干涉光谱发生变化。干涉光谱中相应波谷或波峰的波长漂移量为

$$\Delta\lambda_n = \frac{2(n_{1,2} + \Delta n_{1,2})(L + \Delta L)}{2n + 1} - \frac{2n_{1,2}L}{2n + 1} \approx \frac{2n_{1,2}\Delta L}{2n + 1} + \frac{2\Delta n_{1,2}L}{2n + 1}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\lambda_n$ 为波长漂移量, $\Delta n_{1,2}$ 为基模与高阶模间的有效折射率差的变化量, ΔL 为 PbS 光纤长度的变化量。

由(6)式可见,在 $\Delta n_{1,2}$ 不变的情况下,当接入的 PbS 光纤长度 L 越大, $\frac{2\Delta n_{1,2}L}{2n + 1}$ 越大,导致波长漂移量越大,也即灵敏度越高。

3 实验与结果分析

3.1 传感器的制作

该传感器采用上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室研制的 PbS 光纤作为传感单元,这种光纤的纤芯中掺有 PbS,外包层直径 $2b = 125 \mu\text{m}$,纤芯直径 $2a = 9 \mu\text{m}$,纤芯折射率 n_{co} 高于包层折射率 n_{cl} 并呈渐变分布,其折射率分布与端面如图 2 所示。硫化铅光纤的纤芯折射率约为 1.471,包层折射率约为 1.458,在 1310 nm 处损耗约为 0.2 dB/m,在 1550 nm 处损耗约为 0.1 dB/m。

该传感器制备简单,只需将一段 PbS 光纤无错位熔接在两段单模光纤之间即可。实验中共制备了 4, 6,

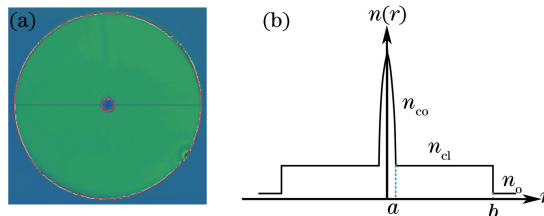


图 2 (a) PbS 光纤端面; (b) PbS 光纤折射率分布

Fig. 2 (a) Cross section of the PbS fiber; (b) refractive index profile of the PbS fiber

10, 13 mm 四种不同 PbS 光纤长度的传感器, 并将制作好的传感头固定在洁净的载玻片上, 两端分别与 ASE3700 型放大自发辐射(ASE)光源和 AQ6375 型光谱分析仪(OSA)相连, 测得不同 PbS 光纤长度的传感器的干涉光谱如图 3 所示。

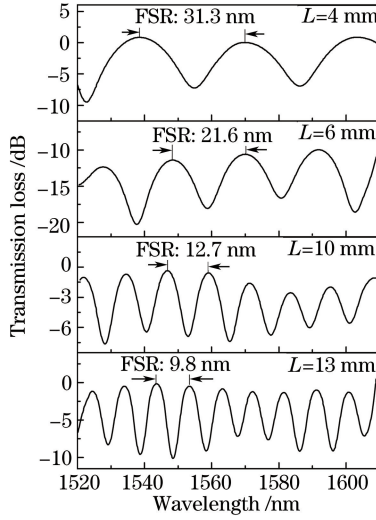


图 3 不同 PbS 光纤长度的传感器的干涉光谱

Fig. 3 Transmission spectra of the sensors with different PbS fiber lengths

由图 3 可知, 对于不同的 PbS 光纤长度, 该传感器均会出现规整的周期性光谱, 且随着 PbS 光纤长度的增加, 其自由光谱范围(FSR)逐渐减小。在实验过程中, 制备了多组不同长度的 PbS 光纤传感器, 其损耗随 PbS 长度的变化呈现出不同程度的损耗, 主要原因是实验过程中熔接损耗、对准偏差、模间色散等因素会影响损耗的变化。但整个传输光谱随着 PbS 光纤长度的增加, FSR 逐渐减小的趋势不会改变, 且其传输谱线的对比度均保持在 10 dB 范围之内, 因此并不影响后续传感实验中对传输谱线的波长解调分析。由于 PbS 光纤长度为 4 mm 时, 传感器就已经出现了大于一个周期的完整光谱, 满足实验测量要求, 所以选取 PbS 光纤长度为 4 mm 的传感器进行温度、折射率与曲率的测量。

为了进一步分析干涉光谱的特性, 对 PbS 光纤长度为 4 mm 传感器的干涉光谱进行快速傅里叶变换(FFT), 得到其傅里叶频谱如图 4 所示, 其中, 空间频率可表示为^[28]

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0^2} \Delta n L, \tag{7}$$

式中 ξ 为空间频率, λ_0 为中心波长, Δn 为模式间的有效折射率差。由(7)式可知, ξ 与 Δn 成正比。即当 L 一定时, ξ 越大, 所对应的模式越高。

由图 4 可知, 干涉光谱的频谱中有 3 个波峰, 说明在 PbS 光纤纤芯中传输的模式除了基模之外, 还有两个高阶模。其中, 空间频率为 0.033 的高阶模能量远大于空间频率为 0.067 的高阶模能量。因此, 产生干涉光谱的

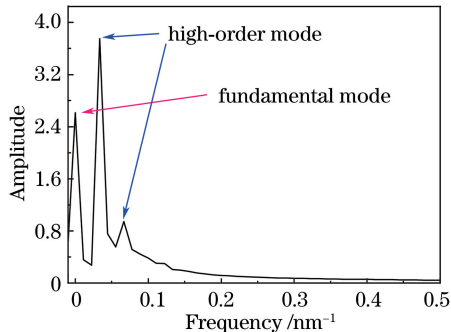


图 4 传输光谱的傅里叶频谱

Fig. 4 FFT frequency spectrum of the transmission spectrum

主要模式为基模和空间频率为 0.033 的高阶模。下面分别对该传感器的温度、折射率与曲率特性进行实验研究。

3.2 温度传感实验

在温度传感实验中,将制作好的传感头水平放置于控温精度为 0.1 °C 的温度控制箱中,两端分别与 ASE 光源和 OSA 连接,实验原理图如图 5 所示。

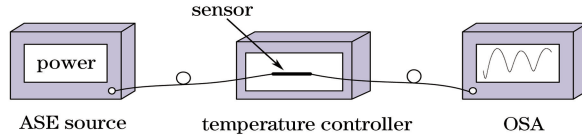


图 5 温度传感实验系统

Fig. 5 Schematic of the temperature sensing experiment system

调节温控箱温度设置按钮使温度预设值设定在某一温度,待温度稳定后,观察光谱仪上的传输光谱,并记录实验数据。如此反复进行,观察不同温度下的传输光谱并记录相应实验数据。实验结果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着温度的升高,传感器的传输光谱向长波方向移动,即出现红移现象。在 1555 nm 波长附近对其光谱漂移情况进行分析,得到波长与温度间的关系,如图 7 所示。

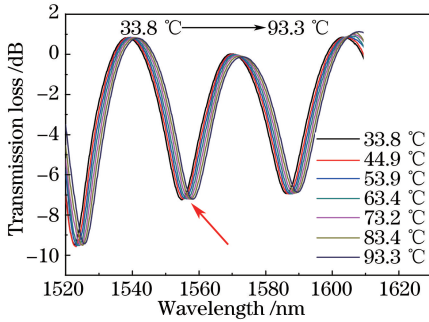


图 6 传感器在不同温度下的传输光谱

Fig. 6 Transmission spectra of the sensor under different temperatures

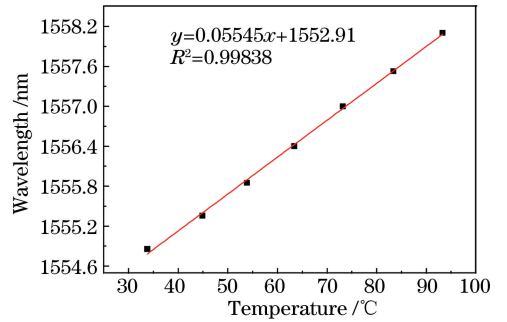


图 7 波长漂移与温度变化之间的关系

Fig. 7 Relationship between the wavelength shift and temperature variation

由图 7 可知,该传感器的温度灵敏度为 55.45 pm/°C,并且波长的漂移量与温度的变化量具有很好的线性关系(拟合优度的确定系数 R^2 为 0.99838)。原因在于:不同的温度下,光纤的热光效应和热胀冷缩特性会使得光纤的折射率发生变化,同时热膨胀效应还会导致光纤的长度发生变化,由(6)式可知,传输光谱发生漂移。但因为二氧化硅的热膨胀系数很小,由(4)式可知,在一定的温度变化范围内,光纤长度的变化量很小,所以由光纤长度改变引起的传感器传输光谱的变化可以忽略不计。而由于热光效应和热膨胀效应的存在,光纤的折射率升高,不同模式间的有效折射率也升高。不同模式间的传播常数不同,基模的有效折射率增加量大于高阶模有效折射率的增加量, $\Delta n_{1,2}$ 取正值。由(6)式可知, $\Delta \lambda_n$ 为正,即传输光谱向长波方向漂移。

为了研究该传感器温度特性的稳定性,对该传感器进行第二次温度测量,对实验结果进行分析可得其温度灵敏度为 55.12 pm/°C,且具有很好的线性度。将两次测量的结果进行对比,如图 8 所示。

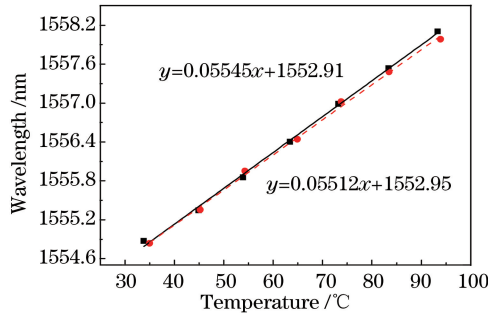


图 8 两次温度测量结果之间的关系

Fig. 8 Relationship between the results of the two temperature measurements

由图 8 可知,该传感器的传输光谱与温度具有很好的——对应关系,且两次测量结果具有很好的——一致性,说明该传感器能够对温度进行准确的测量。

3.3 折射率传感实验

在进行折射率传感实验时,配置了 8 组不同体积分数的甘油溶液,并用阿贝折射仪测得其折射率变化范围为 1.3465~1.4436。实验中,将传感头完全浸没在溶液中,两端分别与光源和光谱仪连接,实验原理如图 9 所示。

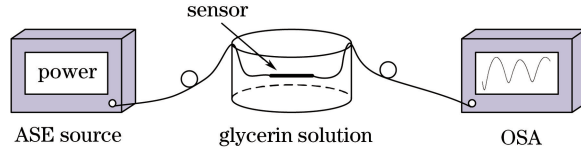


图 9 折射率传感实验系统

Fig. 9 Schematic of the refractive index sensing experiment system

为了减少残留溶液对实验结果的影响,每次测量之后用蒸馏水多次清洗传感头并擦拭干净,为下次测量做好准备。实验结果如图 10 所示。

由图 10 可知,随着溶液折射率的增加,传感器的传输光谱向长波方向发生了微小的漂移。在 1555 nm 波长附近对其光谱漂移情况进行分析,得到波长与折射率间的关系,如图 11 所示。

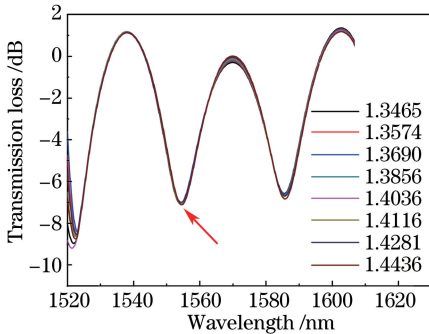


图 10 传感器在不同折射率甘油溶液中的传输光谱

Fig. 10 Transmission spectra of the sensor in glycerin solutions with different refractive indexes

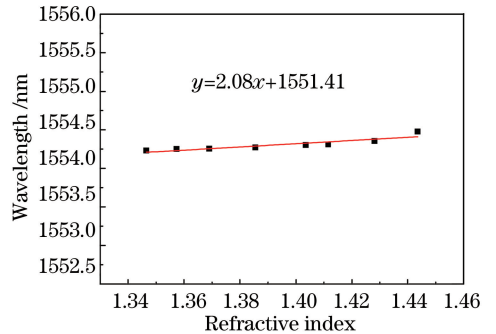


图 11 波长漂移与折射率变化之间的关系

Fig. 11 Relationship between wavelength shift and refractive index variation

由图 11 可知,该传感器的折射率灵敏度仅为 2.08 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。这是因为外界溶液折射率的增加使得基模和高阶模的有效折射率增加,但基模的有效折射率增加量大于高阶模的有效折射率增加量,所以传输光谱出现红移。又因为基模与高阶模均在 PbS 光纤纤芯内传播,纤芯外又有包层包裹着,外界溶液折射率变化对二者影响较小,所以传输光谱的漂移量很小,说明该传感器对折射率的变化不敏感。

3.4 曲率传感实验

在进行曲率传感实验时,将传感头水平置于弹性系数良好的薄钢条的表面,并使传感头处于钢条的中间位置,钢条的两端分别固定在两个三维调节架上,通过调节钢条正上方的高精度微动台可以实现传感器不同程度的弯曲。将力 F 施加在钢条的中间位置。曲率测量实验的系统装置原理图如图 12 所示。通过下降位移与弯曲半径之间的三角关系,可得曲率表达式为^[29]

$$\rho = \frac{1}{r'} = \frac{8d}{l^2 + 4d^2}, \quad (8)$$

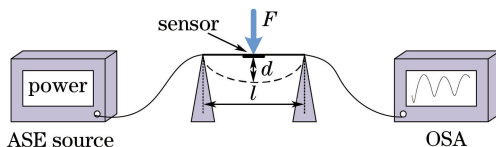


图 12 曲率传感实验系统

Fig. 12 Schematic system of curvature sensing experiment

式中 ρ 为曲率, r' 为钢条弯曲半径, d 为传感器在垂直位置上移动的位移, l 为两个三维调节架之间的距离, 初始大小为 260 mm, 且当钢条弯曲时产生的影响忽略不计。

由于进行折射率与温度传感实验时, 为了减小实验误差, 制备的传感头已稳定地固定在了载玻片上, 已无法再进行曲率的测量, 所以在进行曲率传感实验时, 需要重新制备一个新的传感头, PbS 光纤长度为 4 mm。由于实验误差的存在, PbS 光纤长度无法与进行温度和折射率测量时制备的传感器完全一致, 所以传输光谱有所差别, 但光谱的周期数一样, 不影响曲率传感特性的研究。曲率传感实验结果如图 13 所示。

由图 13 可知, 随着曲率的增加, 传感器的传输光谱向短波方向发生了微小的漂移。在 1555 nm 波长附近对其光谱漂移情况进行分析, 得到波长与曲率间的关系, 如图 14 所示。

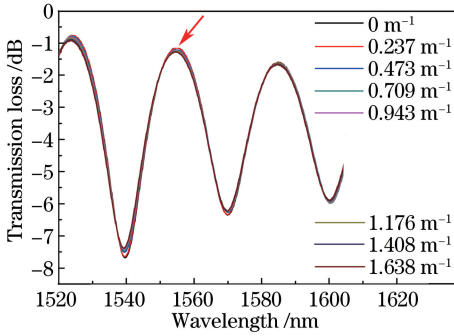


图 13 传感器在不同曲率下的传输光谱

Fig. 13 Transmission spectra of the sensor under different curvatures

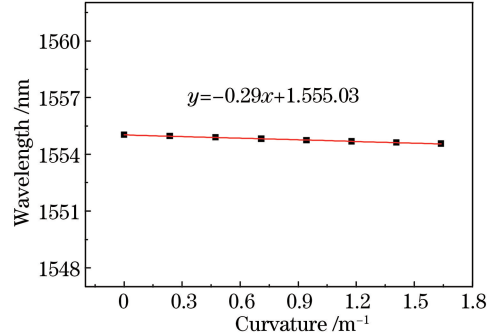


图 14 波长漂移与曲率变化之间的关系

Fig. 14 Relationship between the wavelength shift and curvature variation

由图 14 可知, 该传感器的曲率灵敏度仅为 -0.29 nm/m^{-1} 。原因在于: PbS 光纤的芯径与 SMF 的芯径相同, 所激发的传输模式均在纤芯中传输, 应力变化会造成的光纤基模和高阶模有效折射率发生变化。但是 PbS 光纤包层较厚, 应力造成的基模与高阶模间的有效折射率差的变化量很小, 所以应力对干涉谱的影响也很小, 可以认为传感器对光纤应力变化也不敏感。

将该传感器与其他级联型光纤温度传感器进行比较, 结果如表 1 所示。其中, 在两段标准单模光纤之间熔接的光纤分别为光子晶体光纤(PCF)、多模光纤(MMF)-细芯光纤(TCF)、熔锥光纤(Tapered-fiber)。

表 1 接入不同类型光纤的温度传感器

Table 1 Temperature sensors with different fiber types

Fiber type	Sensitivity / (pm/°C)
PbS	55.45
MMF-TCF ^[30]	54.2
Dual core PCF ^[31]	20.7
Tapered-fiber ^[32]	10.0

由表 1 可知, 采用 PbS 光纤制备的传感器具有更高的温度灵敏度。由于该传感器的折射率灵敏度与曲率灵敏度仅为 2.08 nm/RIU 与 -0.29 nm/m^{-1} , 因此当折射率与曲率变化很小时, 折射率与曲率变化对温度测量的影响可以忽略, 可以避免温度测量时折射率与曲率对测量结果的影响, 提高温度测量的准确性。

4 结 论

提出了一种基于 PbS 光纤的折射率不敏感的光纤温度传感器, 它是通过将一段 PbS 光纤无错位熔接在两段标准单模光纤之间制作而成。实验测量了 PbS 光纤长度为 4 mm 时, 传感器的温度、折射率与曲率传感特性。实验结果表明, 在 $33.8 \sim 93.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, 该传感器的温度灵敏度为 $55.45 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 且波长漂移量与温度变化量具有很好的线性关系; 在 $1.3465 \sim 1.4436$ 折射率变化范围内, 该传感器的折射率灵敏度仅为 2.08 nm/RIU , 说明该传感器对折射率不敏感; 在 $0 \sim 1.638 \text{ m}^{-1}$ 曲率变化范围内, 该传感器的曲率灵敏度仅为 -0.29 nm/m^{-1} , 说明该传感器对曲率不敏感。因为该传感器制备简单、体积小, 又避免了温度测量过程中折射率与曲率对温度测量的影响, 所以能够很好地应用在生物化学、工业生产等的温度测量场合。

参 考 文 献

- 1 Shen C Y, Zhong C, You Y, *et al.* Polarization-dependent curvature sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a difference arithmetic demodulation method[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15406-15417.
- 2 Chen Wei, Meng Zhou, Zhou Huijuan, *et al.* Nonlinear phase noise analysis of long-haul interferometric fiber sensing system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 184210.
陈 伟, 孟 洲, 周会娟, 等. 远程干涉型光纤传感系统的非线性相位噪声分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 184210.
- 3 Chen Z H, Lau D, Teo J T, *et al.* Simultaneous measurement of breathing rate and heart rate using a microbend multimode fiber optic sensor[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(5): 057001.
- 4 Liu G G, Han M, Hou W L. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7237-7247.
- 5 Xiong Yikun, Huang Xuguang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1956-1960.
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1956-1960.
- 6 Zhang Yulong, Jia Dagong, Li Shuai, *et al.* Study of displacement sensor based on few-mode multi-core fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0905006.
张玉龙, 贾大功, 李 帅, 等. 基于多芯少模光纤位移传感器的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0905006.
- 7 Wu D, Zhu T, Deng M, *et al.* Refractive index sensing based on Mach-Zehnder interferometer formed by three cascaded single-mode fiber tapers[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(11): 1548-1553.
- 8 Gong Yuan, Guo Yu, Rao Yunjiang, *et al.* Sensitivity analysis of hybrid fiber Fabry-Pérot refractive-index sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 064202.
龚 元, 郭 宇, 饶云江, 等. 光纤法布里-珀罗复合结构折射率传感器的灵敏度分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 064202.
- 9 Zhu S, Pang F F, Huang S J, *et al.* High sensitivity refractive index sensor based on adiabatic tapered optical fiber deposited with nanofilm by ALD[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 13880-13888.
- 10 Shao M, Qiao X G, Fu H W, *et al.* An in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on arc-induced tapers for high sensitivity humidity sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 2026-2031.
- 11 Harith Z, Irawati N, Rafaie A H, *et al.* Tapered plastic optical fiber coated with Al-doped ZnO nanostructures for detecting relative humidity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 845-849.
- 12 Fu Haiwei, Xu Shichao, Qiao Xueguang, *et al.* Coated and tapered fiber transmission characteristics based on temperature variation[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0305001.
傅海威, 许士超, 乔学光, 等. 基于温度变化的涂覆型熔锥光纤传输特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0305001.
- 13 Coviello G, Finazzi V, Villatoro J, *et al.* Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000 °C [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21551-21559.
- 14 Xu Y P, Lu P, Qin Z G, *et al.* Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3031-3042.
- 15 Xu B, Li J Q, Pan Y Y, *et al.* Temperature-insensitive fiber cantilever vibration sensor based on a fiber-to-fiber structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(2): 020604.
- 16 Han Ping, Xie Yongquan, Liu Yang. Research of all-fiber micro-vibration multiplexing sensors [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305004.
韩 屏, 谢涌泉, 刘 阳. 分布式全光纤微振动传感器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305004.
- 17 Saffari P, Allsop T, Adebayo A, *et al.* Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3508-3511.
- 18 Smietana M, Brabant D, Bock W J, *et al.* Refractive-index sensing with inline core-cladding intermodal interferometer based on silicon nitride nano-coated photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1185-1189.
- 19 Hou Jianping, Ning Tao, Gai Shuanglong, *et al.* Sensitivity analysis of refractive index measurement based on intermodal interference in photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4732-4737.
侯建平, 宁 韬, 盖双龙, 等. 基于光子晶体光纤模间干涉的折射率测量灵敏度分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 4732-4737.
- 20 Dobb H, Kalli K, Webb D J. Temperature insensitive long period grating sensors in photonic crystal fiber[C]. *SPIE*, 2004, 5579: 66-79.

- 21 Mu Zhiyong. Research on sensing characteristics of modal interferometer instrument based on fiber grating[J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(7): 32-35.
穆志勇. 基于光纤光栅的模间干涉仪传感特性研究[J]. 光通信技术, 2014, 38(7): 32-35.
- 22 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Research on modular interference of elliptical-core polarization maintenance fiber[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(8): 1019-1022.
刘 丰, 毕卫红, 郭 璇. 椭圆芯保偏光纤模间干涉的研究[J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(8): 1019-1022.
- 23 Liu Y, Wei L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. Applied Optics, 2007, 46(13): 2516-2519.
- 24 Gong Y, Guo Y, Rao Y J, *et al.* Fiber-optic Fabry-Pérot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(23): 1708-1710.
- 25 Tafulo P A R, Jorge P A S, Santos J L, *et al.* Intrinsic Fabry-Pérot cavity sensor based on etched multimode graded index fiber for strain and temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 8-12.
- 26 Zhao Na, Fu Haiwei, Shao Min, *et al.* Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1722-1726.
赵 娜, 傅海威, 邵 敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1722-1726.
- 27 Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, *et al.* Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605001.
黄泽铤, 李 强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605001.
- 28 Fu Haiwei, Yan Xu, Shao Min, *et al.* Optical fiber core-mismatched Mach-Zehnder refractive sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2285-2291.
傅海威, 闫 旭, 邵 敏, 等. 纤芯失配的光纤 Mach-Zehnder 折射率传感器[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2285-2291.
- 29 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.* Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506002.
付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506002.
- 30 Fu Haiwei, Yan Xu, Li Huidong, *et al.* Study of fiber sensor for simultaneous measurement of refractive and temperature based on a core-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106001.
傅海威, 闫 旭, 李辉栋, 等. 基于纤芯失配型马赫曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106001.
- 31 Chen D, Hu G F, Chen L X. Pressure/temperature sensor based on a dual-core photonic crystal fiber [C]. Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011: 12784366.
- 32 Yang S, Sun H, Yuan L T, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by abrupt taper interferometer[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 120604.