

基于光纤熔接与抛磨技术的硅锗芯光纤 F-P 腔温度传感器

李聪聪, 陈娜*, 陈振宜, 刘书朋, 商娅娜

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘要: 光纤法布里-珀罗(F-P)腔传感器作为温度传感器, 应用广泛。提高光纤制作材料及成分的光电特性有利于提高温度传感器的灵敏性。基于光纤熔接与抛磨技术制备了一种基于硅锗芯光纤的 F-P 腔温度传感器, 其制备过程为: 先用优化的熔接参数将普通单模光纤与硅锗芯光纤熔接, 再通过光纤抛光的方式抛磨硅锗芯光纤, 其长度可通过观察抛磨过程中反射光谱的自由光谱范围精确控制。实验结果表明: 熔接端面光滑平整, 其反射光谱的强度比单模光纤平端高 7.7 dB; 硅锗芯光纤 F-P 腔传感器具有较高的温度灵敏度, 可达 116.1 pm/°C。

关键词: 硅锗芯光纤; 光纤 F-P 腔传感器; 温度灵敏度

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)01-0006-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



SiGe core fiber F-P cavity temperature sensor based on fiber fusion and polishing technology

LI Congcong, CHEN Na*, CHEN Zhenyi, LIU Shupeng, SHANG Ya'na

(Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: As a temperature sensor, fiber Fabry-Perot (F-P) cavity sensor is widely used. Improving the photoelectric properties of the materials and components of the optical fiber is conducive to improving the sensitivity of the temperature sensor. A F-P temperature sensor based on SiGe core fiber is prepared based on fiber fusion and polishing technology. The preparation process comprises the following steps: firstly, splicing the general single-mode fiber with the SiGe core fiber by using optimized splicing parameters, and then polishing the SiGe core fiber by means of optical fiber polishing, the length of which can be precisely controlled by observing the free spectrum range of the reflection spectrum during the polishing process. The experimental results show that the spliced end face is smooth and flat, and the intensity of the reflection spectrum is 7.7 dB higher than that of the single-mode fiber. The SiGe core optical fiber F-P cavity sensor has a high temperature sensitivity, which can reach 116.1 pm/°C.

Key words: SiGe core fiber; fiber Fabry-Perot cavity sensor; temperature sensitivity

0 引言

光纤传感器具有传统电子传感器难以比拟的优势, 如微米尺寸、高灵敏度和适用于高温高压易腐蚀等极端环境等, 被广泛应用于航空航天、医学、生物和化学等领域。光纤法布里-珀罗(F-P)腔传感器是一种

常见的光纤传感器, 其结构紧凑、体积小, 传感距离远, 可实现温度、气压、应变、折射率、液位和湿度^[1]等多种物理量的传感, 一直是光纤传感器研究的热点。

温度是一种常见的物理量, 用于温度传感的光纤传感器种类繁多, 如光纤布喇格光栅(FBG)、长周期光纤光栅、马赫-曾德尔干涉仪和光纤 F-P 干涉仪等。FBG 是基于熔融石英材料的光纤传感器, 由于石英的热光系数较低, 其温度灵敏度为 10.3 pm/°C^[2]; 长周期光纤光栅的温度灵敏度可达 100 pm/°C^[3], 但传感的栅区相对较长, 一般有几厘米, 不适于微米级别的温度检测; 马赫-曾德尔干涉仪可通过熔接特种光纤、芯径不匹配结构和拉锥等多种方式制作^[4-6], 需通过透射谱来实现物理量的传感, 结构相对不够紧凑, 不适合狭

收稿日期: 2019-05-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575120、61475095、61675125、61875118)资助。

作者简介: 李聪聪(1993-), 男, 硕士生, 现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事半导体芯光纤 F-P 腔传感器的制备与光探测特性研究, 以用于全光纤探测系统进行温度和光功率传感。

* 通信作者: 陈娜(E-mail: na.chen@shu.edu.cn)。



小区域或远距离传感。基于 F-P 腔的光纤温度传感器制作方式简单多样,如镀膜、化学腐蚀、多次熔接、拼接特种光纤和激光微加工等^[7-11]。

硅具有优良的光学特性,与光纤传感器结合,可显著提高其温度检测性能。Guigen Liu 等人通过紫外胶固化的方式将微米尺寸的柱体纯硅固定在单模光纤一端,构成了基于硅柱的 F-P 腔温度传感器,灵敏度达 84.5 pm/°C^[12]。由于其传感头为硅柱而非硅芯光纤,所以不是全光纤式的传感器。张绍林等人通过电弧放电法设计并制作了全光纤式的硅芯光纤 F-P 腔传感器,其温度灵敏度为 82 pm/°C^[13]。但直接通过熔接参数优化形成硅芯 F-P 腔,腔体长度不易控制。

相对于硅,硅锗合金具有更佳的光电特性,载流子迁移率高,通过组分的调节,能够实现能带和光学性质的连续可调,且热光系数更高。本文基于光纤熔接和抛磨技术,研究制备光纤 F-P 腔的方式,以此制备腔长可控的硅锗芯光纤 F-P 腔温度传感器。

1 硅锗光纤 F-P 腔传感原理

本文所提出的硅锗芯光纤 F-P 腔温度传感器如图 1 所示。熔接端面与硅锗芯光纤抛光端面构成 F-P 腔的两个平行反射腔镜,当 1550 nm 信号光入射 F-P 腔时,由于抛光后的硅锗-空气界面的反射率相对较低,硅锗芯光纤 F-P 腔中产生双光束干涉,反射光强(I_R)公式可表示为^[14]:

$$I_R = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} I_i, \varphi = \frac{4\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda} \quad (1)$$

其中, R_1 和 R_2 分别是熔接端面和抛光端面对 1550 nm 信号光的反射率, φ 是产生干涉的相邻 2 条光线的相位差, n_{eff} 是谐振腔的有效折射率, L 是腔体长度。

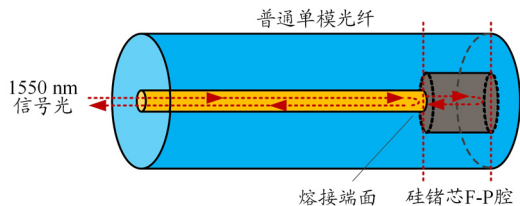


图 1 传感器结构示意图

当外界温度作用于 F-P 腔时,根据热光效应与热膨胀效应,将引起腔体的有效折射率和长度的改变,反射光谱的相位随之变化,进而引起谐振峰位的偏移。因此,通过监测谐振峰位的偏移即可解调出温度值。传感器响应温度变化的波长偏移示意图如图 2 所示。结合反射光谱谐振峰位与温度的对应关系,即可

计算出光纤 F-P 腔的温度灵敏度,其温度灵敏度(S_T)公式为:

$$S_T = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right) \lambda = (\alpha + \xi) \lambda \quad (2)$$

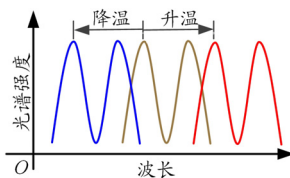


图 2 传感器响应温度变化的波长偏移示意图

其中, α 是热光系数, ξ 是热膨胀系数, $\Delta \lambda$ 是谐振峰位的偏移, ΔT 是温度变化。由式(2)可知,腔体材料的热光系数与热膨胀系数越高。光纤 F-P 腔的温度灵敏度越高,选取高热光系数与热膨胀系数的材料作为谐振

腔,可显著提高其温度传感性能。通过检测谐振峰位的偏移,可实现温度的高灵敏度检测。

2 硅锗芯光纤制备与表征

硅锗芯光纤是本实验室通过管棒法拉制而成的。将单晶硅半圆棒和单晶锗半圆棒拼接在一起,置于一端封闭的石英预制棒中,预制棒的一端和真空泵相连并固定在拉丝塔上端。通过石墨炉熔融和光纤拉丝工艺,制备出硅锗芯光纤。

硅锗芯光纤拉制完成后,使用共焦喇曼光谱仪来测量光纤纤芯的喇曼光谱,以确定管棒法成功拉制了硅锗芯光纤,硅锗芯光纤纤芯的喇曼光谱如图 3 所示。喇曼

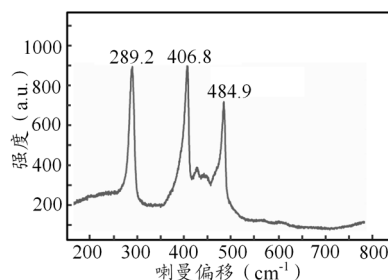


图 3 硅锗芯光纤纤芯的喇曼光谱

振动峰在 289.2 cm⁻¹、406.8 cm⁻¹ 和 484.9 cm⁻¹ 处,分别对应着 Ge-Ge、Si-Ge 和 Si-Si 光学声子模式的喇曼峰,表明在纤芯内形成了硅锗合金^[15]。

3 硅锗芯光纤 F-P 腔传感器的制备

硅锗芯光纤 F-P 腔传感器的制备分为两步:首先将硅锗芯光纤与普通单模光纤熔接,再抛磨硅锗芯光纤一端至所需长度。其中,硅锗芯光纤和单模光纤熔接过程为:先处理待熔接的 2 根光纤端面,单模光纤一端使用切割刀切平,硅锗芯光纤一端较脆,需使用研磨机(WESTEL,MS-08)抛光;再通过熔接机的手动模式将单模光纤与硅锗芯光纤中心对齐,设置好熔接参数后,通过电弧放电将其熔接。

为得到光滑平整的熔接端面,需反复实验优化熔接参数(参数优化使用熔接机型号为古河 S178),优化后的熔接参数为:放电时间为 600 ms,放电强度为 70 bit,预熔时间为 0 ms,清洁放电时间为 0 ms,其它参数为默认值。

抛磨硅锗芯光纤的系统如图 4 所示。1550 nm 信号光通过环形器传输至硅锗芯光纤,在光纤 F-P 腔内产生干涉后被光谱仪检测。自由光谱范围(FSR)方程如式(3)所示,若已知干涉谱的 FSR 为 R_{FSR} ,则可计算相应的腔长。由此通过光谱仪观察干涉光谱的 FSR,可知硅锗芯光纤的实时长度,从而达到精确控制腔长的目的。光纤抛磨过程中,依次使用粗磨、中磨、精磨和抛光 4 种不同规格的研磨纸进行光纤抛磨以保证抛光端面光滑平整。

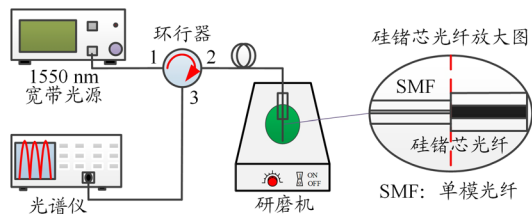
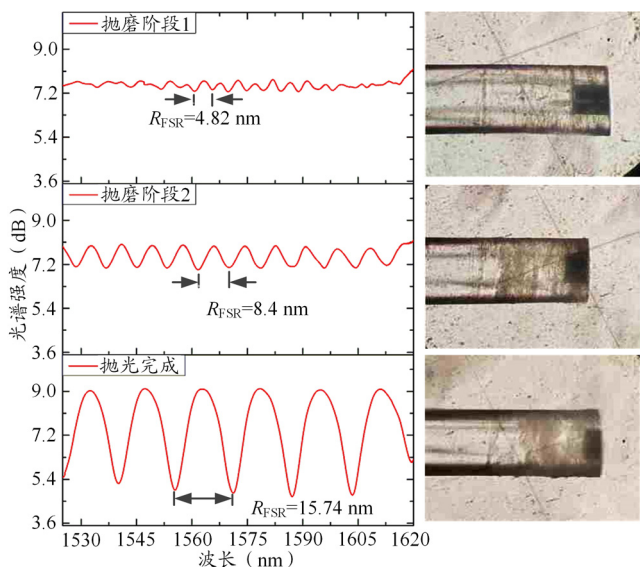


图 4 光纤抛磨系统示意图

$$R_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}L} \quad (3)$$

抛磨阶段 1 至抛磨完成的反射光谱(各反射光谱已减去单模光纤平端的光谱强度)如图 5(a)所示,相



(a) 抛磨阶段 1 至抛磨完成的反射光谱
(b) F-P 腔结构光学放大图

图 5 不同抛磨阶段的样品的反射光谱及对应的光学放大图

应的 F-P 腔结构光学放大图如图 5(b)所示。由反射光谱的 FSR,计算可得 3 个抛磨阶段的腔长分别为 68.75 μm 、39.56 μm 和 21.2 μm 。从反射光谱的 FSR 推知腔体的实时长度,根据需要停止抛磨,从而获得所需腔长的硅锗芯光纤 F-P 腔传感器。

另外,由抛磨阶段 1 的反射光谱可知,硅锗芯光纤与单模光纤熔接界面的反射光谱强度比单模光纤端面的反射光谱强度高 7.7 dB,一方面是因为熔接端面对 1550 nm 信号光的反射率高于单模平端;另一方面是因为熔接质量较好,熔接端面光滑平整,即优化后的参数适合单模光纤与硅锗芯光纤熔接。

4 硅锗芯光纤 F-P 腔的温度传感实验

硅锗芯光纤 F-P 腔传感器的温度实验系统如图 6 所示。将样品用高温胶固定于载玻片上,再放入温控箱中进行温度标定。紧靠样品粘有热电偶,以获得准确的实时温度。温控箱温度标定过程如下:0 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ 温升阶段,10 $^{\circ}\text{C}$ 为间隔,温度稳定后保持 10 min,并记录光谱数据;150 $^{\circ}\text{C}$ ~0 $^{\circ}\text{C}$ 的降温阶段操作相同。使用光纤光栅解调仪(型号为 sm125)监测实验进程并保存相应数据,解调仪波长精度为 1 μm 。

实验中进行多次温度标定,通过升温与降温过程去除光纤内部的残余应力,使样品更加稳定,实现对样品进行退火的目的。实验前后光谱对比如图 7 所

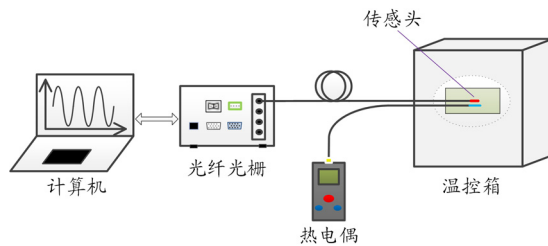


图 6 温度标定装置示意图

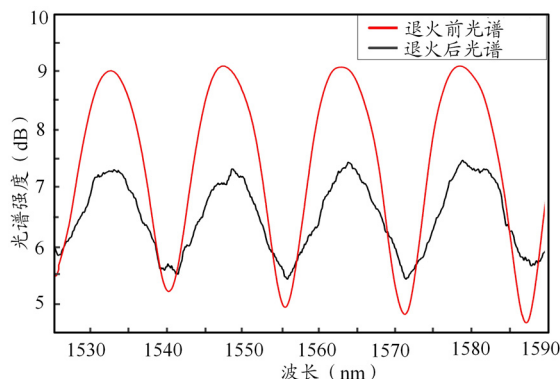


图 7 退火前后光谱对比

示,退火完成后光谱对比度有所下降,光谱峰谷强度差值由 4.4 dB(红色曲线)降为 2 dB(黑色曲线)。

传感器经退火稳定后,升温过程中不同温度下反射光谱如图 8 所示。为对比不同温度下的谐振峰位偏移,各温度下光谱沿 Y 轴做了相应的平移。升温与降温过程中,温度与谐振峰位关系如图 9 所示,经直线拟合,温度灵敏度分别为 114.1 pm/°C 和 116.1 pm/°C,比熔融石英基质的光纤传感器灵敏度高 11 倍左右^[2],且其线性度高,相关系数分别为 0.99846 和 0.99907。

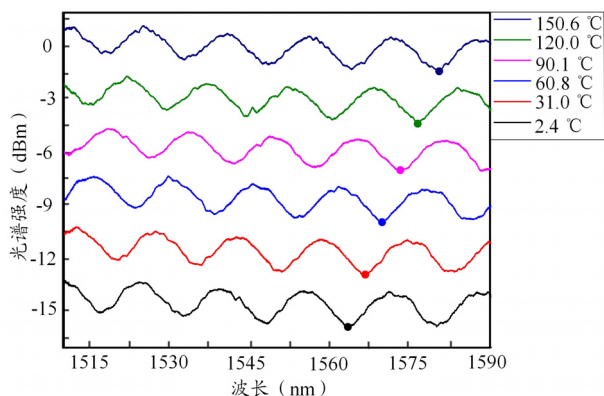


图 8 不同温度下反射光谱

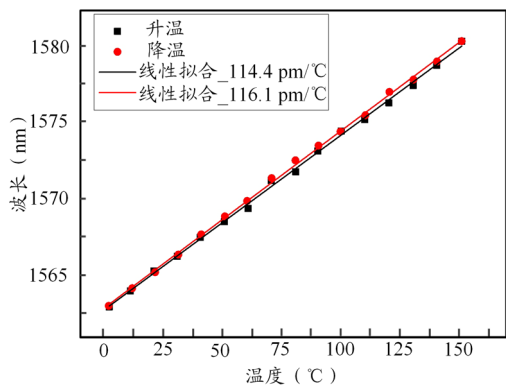


图 9 谐振峰位与温度关系

5 结束语

本文基于光纤熔接与抛磨技术制备了一种基于硅锗芯光纤的 F-P 腔温度传感器。通过实验优化了硅锗芯光纤与单模光纤的熔接参数,熔接端面光滑平整且损耗较低。通过光纤抛磨的方式制备硅锗芯光纤 F-P 腔传感器,可根据抛磨过程中干涉谱的 FSR 精确控制其腔体长度。实验结果表明:硅锗芯光纤与单模光纤熔接端面的反射光谱强度比普通单模光纤平端高 7.7 dB;硅锗芯光纤 F-P 腔传感器温度灵敏度较高,升

温过程的温度灵敏度为 114.1 pm/°C,降温过程温度灵敏度为 116.1 pm/°C,且线性度好。

参考文献:

- [1] ISLAM M, ALI M, LAI M H, et al. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review [J]. Sensors, 2014, 14(4): 7451–7488.
- [2] HIRAYAMA N, SANO Y. Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use[J]. ISA Transactions, 2000, 39(2): 169–173.
- [3] SINGH A, ENGLER D, SHARMA A, et al. Temperature sensitivity of long period fiber grating in SMF-28 fiber[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(1): 457–460.
- [4] HU X, SHEN X, WU J, et al. All fiber MZ interferometer for high temperature sensing based on a hetero-structured cladding solid-core photonic bandgap fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21693–21699.
- [5] RONG Q, QIAO X, WANG R, et al. High-Sensitive Fiber-Optic Refractometer Based on a Core-Diameter-Mismatch Mach-Zehnder Interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2501–2505.
- [6] JASIM A A, HARUN S W, AROF H, et al. Inline microfiber Mach-Zehnder interferometer for high temperature sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(2): 626–628.
- [7] LIU B, LIN J, LIU H, et al. Diaphragm based long cavity Fabry-Perot fiber acoustic sensor using phase generated carrier [J]. Optics Communications, 2017, 382: 514–518.
- [8] WANG R, QIAO X. Intrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor Based on Microfiber Created by Chemical Etching [J]. Sensors, 2014, 14(9): 16808–16815.
- [9] MATHEW J, SCHNELLER O, POLYZOS D, et al. In-fiber Fabry-Perot cavity sensor for high-temperature applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2419–2425.
- [10] 庞拂飞,马章微,刘兔兔,等. 蓝宝石衍生光纤及传感器研究进展[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 59–74.
- [11] LIAO C R, HU T Y, WANG D N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing [J]. Optics Express, 2012, 20(20): 22813–22818.
- [12] LIU G, HAN M, HOU W. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7237–7247.
- [13] ZHANG S, ZHAO Z, CHEN N, et al. Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry-Perot interferometer [J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1362–1365.
- [14] HERMAN V D S, MULLER J M. Multimirror Fabry-Perot interferometers [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985, 2(8): 1363–1370.
- [15] WANG D, CHEN N, CHEN Z, et al. Composition and strain analysis of Si1-xGex core fiber with Raman spectroscopy[J]. AIP Advances, 2018, 8(6): 065006-1–065006-6.