

# 光纤温度传感薄膜探头的设计与实验研究

胡佳惠 陶春先 张大伟 黄元申 倪争技

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室  
教育部光学仪器与系统工程研究院, 上海 200093)

**摘要** 针对目前光纤温度传感器稳定性及抗干扰性差的问题,研究设计了一种新型光纤温度传感器探头。光纤温度传感薄膜探头是以锗为传感薄膜材料,探头结构采用了双层膜层叠结构,其中低折射率材料是二氧化硅,高折射率材料为锗。其探测原理是根据锗的折射率随温度变化而改变,从而导致了反射率的变化,在实际应用中,通过测量反射功率值达到测温的目的。光纤温度传感薄膜探头具有良好的线性特性,通过实验验证可以得到在测温范围为 30 ℃~130 ℃时,其线性为 99.85%。结果表明,得出的结论能够满足光纤温度传感器的线性化的目的。

**关键词** 薄膜; 线性; 光纤; 双层膜; 温度

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s107004

## Research and Design of a Fiber-Optic Temperature Sensing Film Probe

Hu Jiahui Tao Chunxian Zhang Dawei Huang Yuanshen Ni Zhengji

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System,

Engineering Research Center of Optical Instruments and Systems, Ministry of Education,

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200093, China)

**Abstract** In order to solve nonlinear and unstable problem in measurement, a fiber-optic temperature sensing film probe was designed. The material of the sensing film probe is germanium. The sensing probe is a double-layered film structure, in which the low refractive index material is silicon dioxide and the high refractive index material is germanium. The detection principle is based on the changes of refractive index of germanium because of the temperature change, resulting in changes in the reflectivity. Practically, we can get the temperature figures by measuring the reflected power. The line linearization of the sensor, which was obtained over a temperature measurement range of 30 ℃~130 ℃ is 99.85%. The results show that the conclusion can meet the purpose of linearization of fiber temperature sensor.

**Key words** thin films; linearity; fiber; double-layered film; temperature

**OCIS codes** 060.2310; 280.6780; 280.4788; 310.6845; 310.6805

## 1 引 言

光纤传感器(FOS)是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种基于光导纤维的新型传感器<sup>[1]</sup>。目前人们对光纤温度传感器的研究主要集中在三个方面<sup>[2~7]</sup>:一是对温度敏感的半导体材料的研究,更多的半导体材料被应用到半导体式光纤温度传感器中;二是系统结构和调制技术的研究,为了克服环境因素

对系统的影响,需要某种形式的光路补偿和强度参考;三是产品化实用化的研究,即从实际应用出发,对能满足特定要求、应用于特定场合的光纤温度传感器实用系统的研发。在实际应用中,其稳定性和抗干扰性问题至今仍没解决。测量精度、长期工作稳定性以及降低成本等方面仍需要做进一步的研究。

针对目前光纤温度传感器稳定性差、抗干扰性

收稿日期: 2011-08-14; 收到修改稿日期: 2011-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(60908021)、上海市纳米专项(1052nm07100)、上海市重点学科项目第三期(S30502)和上海市研究生创新基金(JWCXSL1102)资助课题。

作者简介: 胡佳惠(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学薄膜和温度传感等方面的研究。E-mail: usstoe0620@163.com

导师简介: 张大伟(1977—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光学薄膜、离子束技术、微纳光学器的设计及设备、新型薄膜及纳米材料等方面的研究。E-mail: usstoe@163.com

能差、灵敏度差、线性差和成本高等状况,本文研究了一种新型光纤温度传感器探头,反射光功率随着温度的变化线性好、灵敏度高、稳定性好、抗干扰性能好和成本低。

## 2 温度测量原理及探头设计

单层介质膜的反射率计算公式为<sup>[8]</sup>

$$R = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 - \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + (\eta_0 \eta_2 / \eta_1 + \eta_1)^2 \sin^2 \delta_1}, \quad (1)$$

式中

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 d_1 \cos \theta_1, \quad (2)$$

$\delta_1$  称为膜层的有效相位厚度,  $N_1 d_1 \cos \theta_1$  是膜层的有效光学厚度。

对(1)式进行 Matlab 编程可得单层介质膜光学特性与膜层光学厚度的关系,分别选取在 1550 nm 波段下折射率为 4.275 的锗和折射率为 1.44497 的二氧化硅。

由图 1 可知,对于锗而言,光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍数时,锗的反射率为极大值;光学厚度为  $\lambda/4$  偶数倍数时,锗的反射率为极小值。

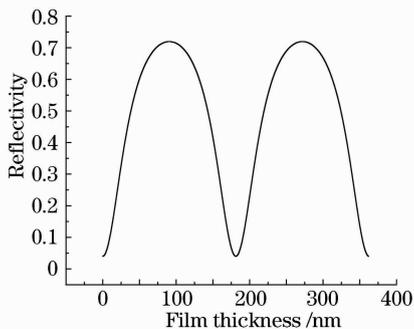


图 1 锗反射率与膜层厚度关系图

Fig. 1 Relationship between reflectivity of germanium and film thickness

由图 2 可知,对于二氧化硅而言,光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍数时,二氧化硅的反射率为极小值;光学厚度为  $\lambda/4$  偶数倍数时,二氧化硅的反射率为极大值。

从图 1 与图 2 可以看出单层介质膜对确定波长的反射率随膜层光学厚度的变化是呈周期性变化的。由此可以选取最佳的膜层厚度,锗为 450 nm,二氧化硅为 540 nm。当膜层厚度确定时,改变材料的折射率,其反射率也会发生改变,改变锗材料的折射率,其范围为从 4.2~4.3,如图 3 所示。

由图 3 可知随着锗折射率的变化,反射率近乎呈线性变化。而温度的变化会导致材料折射率的变

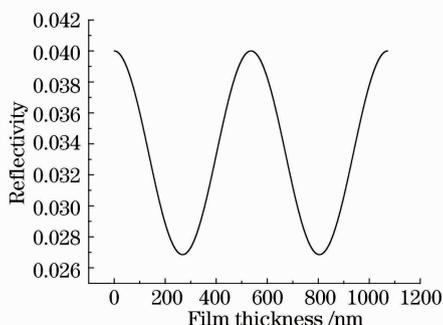


图 2 二氧化硅反射率与膜层厚度关系图

Fig. 2 Relationship between reflectivity of silicon dioxide and film thickness

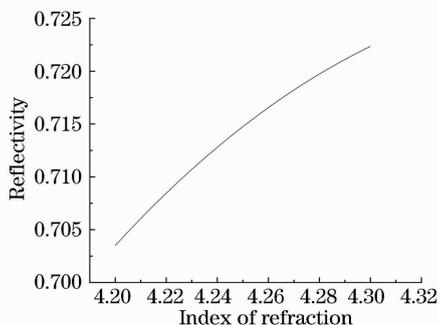


图 3 锗反射率与折射率的变化关系

Fig. 3 Relationship between reflectivity of germanium and refractive index of germanium

化,当光照射到半导体材料上会被吸收,进而激发出电子-空穴对,使得半导体材料中的非平衡载流子增多。而近年来的研究表明,当波导中载流子浓度发生变化时(只要浓度变化达到一定的数量级,  $10^{18}$  以上)就会引起比较明显的折射率变化<sup>[9]</sup>。

本设计中选择锗为单层膜材料时因为:锗随着温度变化其折射率变化的幅度大,其他红外材料的变化小<sup>[10]</sup>,差了 1~2 个数量级<sup>[11]</sup>。在 1550 nm 波

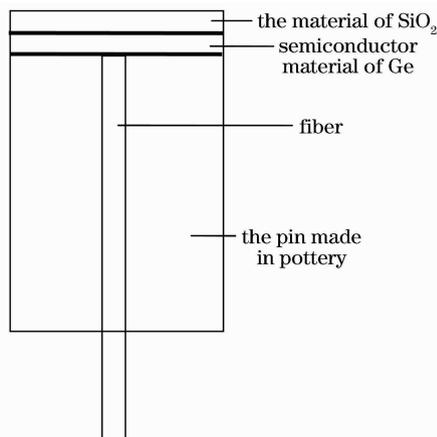


图 4 薄膜探头设计结构

Fig. 4 Structure of the thin probe

段光源照射下：当温度变化时，锆的折射率发生改变，导致反射率变化，反射率影响光功率，因而，通过测量透过锆的光的强弱即可达到测温的目的。探头设计结构如图 4 所示。

探头制备的方法是用真空蒸镀方式在陶瓷插针的端面上先镀一层锆薄膜然后再镀一层二氧化硅薄膜，探头结构的实物图如图 5 所示。



图 5 薄膜探头

Fig. 5 Film probe

其结构包括：陶瓷插针；陶瓷插针与光纤紧密粘结，而且两者端面抛光对齐；在该陶瓷插针的端面通过真空蒸镀技术先镀一层锆薄膜；然后再利用真空蒸镀技术镀一层二氧化硅薄膜。当从光纤输入  $1.55 \mu\text{m}$  波长的一定光功率的激光时，该探头可以使反射光功率随着温度的变化是线性的，而且灵敏度很高。上述锆薄膜与陶瓷插针致密结合；上述二氧化硅薄膜与锆薄膜致密结合。采用了双层膜层叠结构，可以提高测量的抗干扰性和稳定性。选用二氧化硅作为低折射率层，二氧化硅可以对锆层起保护作用，隔离空气，保证折射率变化的准确性，可防止膜的污染与氧化，便于得到洁净致密的薄膜；同时，与锆的光曲线叠加后可以增大变化率，使得斜率更陡，更趋向于线性化。

### 3 实验结果及分析

利用产品性能测试装置，在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内对反射式光纤温度传感器进行了实验研究并做了相应的分析。装置图如图 6 所示。

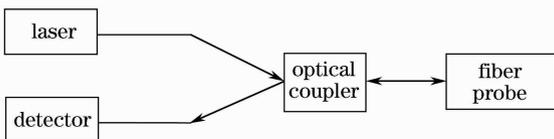


图 6 测量装置结构

Fig. 6 Structure of measuring equipment

测量装置结构的实物图如图 7 所示。

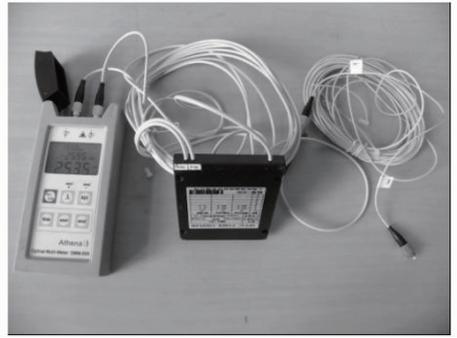


图 7 测量装置图

Fig. 7 Measuring equipment

对温度探测器的测温功能进行实际的检测，得到温度和反射光功率的变化关系，如图 8 所示。

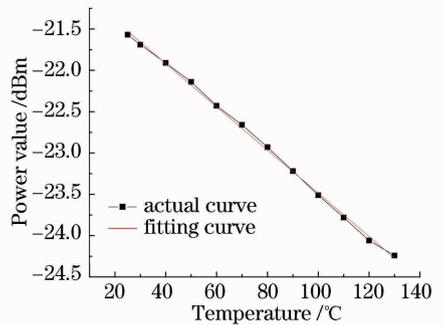


图 8 反射光功率与温度关系曲线图

Fig. 8 Relationship between reflected light power and temperature

检测时温度的变化范围为  $30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 8 可以明显的看出，随着温度的增加半导体光功率探测器获得的反射光功率逐渐变小且呈现出线性减小的趋势。

将图 8 的反射光功率变化曲线进行拟合，得到拟合曲线函数

$$y = -0.02614x - 20.8736, \quad (3)$$

式中  $x$  为反射光功率， $y$  为温度值，拟合曲线的决定系数  $R^2 = 99.85\%$ ，可见反射光功率随温度变化曲线的线性度极高。

### 4 结 论

通过实验可以看出本样品得到的结果较为理想。其主要原因是采用的温度传感薄膜元件是锆，锆对温度的敏感度高。另外，通过真空蒸发镀膜技术得到致密的双层膜结构使本样品具有更好的稳定性和抗干扰性，从而得到较好的线性度。

### 参 考 文 献

1 Zhou Guangli, E Shulin, Deng Wenyuan. Optical fiber

- temperature sensors based on bending loss [J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(1): 46~49  
周广丽,鄂书林,邓文渊. 基于弯曲损耗的光纤温度传感器[J]. 激光技术, 2009, **33**(1): 46~49
- 2 Wu Jinling. Fluorescence fiber temperature sensor based on wavelet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1149~1152  
武金玲. 基于小波变换技术的荧光光纤温度传感器研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1149~1152
- 3 Lei Feipeng, Ning Tigang, Zhou Qian *et al.*. Optical fiber temperature sensor [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, **25**(5): 39~42  
雷飞鹏,宁提纲,周倩等. 基于光纤的温度传感器[J]. 光电技术应用, 2010, **25**(5): 39~42
- 4 Zhang Lei, Feng Xue, Zhang Wei *et al.*. Fiber Raman distributed temperature sensor based on the light source with adjustable pulse width [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2584~2587  
张磊,冯雪,张巍等. 基于变脉宽光源的分布式光纤拉曼温度传感器研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2584~2587
- 5 Yu Shigang. Study on application of a novel optical fiber sensor [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2004, **21**(1): 64~67  
俞世钢. 一种新型光纤传感器的应用研究[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(1): 64~67
- 6 Y. Liu, L. Wei. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(13): 2516~2519
- 7 Wu Jie, Xue Lingling. Research and development of optical fiber sensor [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(5): 4~5  
吴洁,薛玲玲. 光纤传感器的研究进展[J]. 激光杂志, 2007, **28**(5): 4~5
- 8 Wang Biyi, Li Jianfeng, Liu Xin *et al.*. Infrared optical thin film technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(1): 40~43  
王毕艺,李建峰,刘鑫等. 红外光学薄膜技术[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(1): 40~43
- 9 Duan Mengmeng, Chen Changle, Lei Songhe *et al.*. Study on absorption fiber-optic temperature sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1207~1210  
段萌萌,陈长乐,雷松鹤等. 吸收式光纤温度传感器的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(8): 1207~1210
- 10 Wang Lei, Wang Shengyun, Hou Xiqi *et al.*. Parameter measurement for infrared optical materials [J]. *J. Applied Optics*, 2001, **22**(6): 40~42  
王雷,王生云,侯西旗等. 红外光学材料参数测试[J]. 应用光学, 2001, **22**(6): 40~42
- 11 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping *et al.*. An equipment for measuring the temperature coefficient of refractive index of infrared materials [J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(3): 54~56  
王雷,杨照金,黎高平等. 红外光学材料折射率温度系数测量装置[J]. 应用光学, 2005, **26**(3): 54~56

栏目编辑: 马 沂