

薄膜型光纤温度传感器的膜系设计

高晓丹, 魏婉华

(武汉东湖学院 电子信息工程学院, 武汉 430212)

摘要: 纳米薄膜与光纤的结合为新型感测提供了各种潜在可能。为了分析温度敏感薄膜的膜系设计及其对光纤温度传感器传感特性的影响, 根据光学薄膜理论和光纤传感器的温度感测原理, 探讨了光纤温度传感器中敏感薄膜的膜系设计, 并构建了薄膜型光纤传感器的温度传感特性模型。以测试系统的参数、性能以及其对干涉光谱的要求为基础, 设计了对称性较好的法布里-珀罗薄膜腔。通过对比不同膜层厚度法布里-珀罗结构膜系的传感特性, 筛选膜系, 分析了高、低折射率薄膜材料的热光系数和热膨胀系数分别对温度传感特性的影响权重, 为光纤温度传感器敏感薄膜的镀制及工艺制定提供理论依据。

关键词: 光纤传感器; 薄膜; 膜系设计; 法布里-珀罗; 传感特性

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)03-0015-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Formula design of thin film optical fiber temperature sensor

GAO Xiaodan, WEI Wanhua

(Electronic information Engineering college, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

Abstract: The combination of nano-film and optical fiber provides various potentials for novel sensing. In order to analyze the formula design of the temperature-sensitive film and its influence on the sensing characteristics of the optical fiber temperature sensor. According to the theory of optical thin film and the temperature sensing principle of optical fiber sensor, the formula design of the sensitive thin film in the optical fiber temperature sensor is discussed, and the temperature sensing characteristic model of the thin film optical fiber sensor is constructed. Based on the parameters and performance of the test system and its requirements for the interference spectrum, a Fabry-Perot film cavity with good symmetry is designed. By comparing the sensing characteristics of Fabry-Perot formula with different film thicknesses, a formula is selected. The influence weights of the thermo-optic coefficient and thermal expansion coefficient of the high and low refractive index film materials on the temperature sensing characteristics are analyzed, which provides theoretical basis for the plating and process formulation of the temperature sensor sensitive thin film.

Key words: fiber optic sensor; thin film; formula design; Fabry-Perot; sensing characteristics

0 引言

光纤传感器兼具传输和感测的功能, 将新型功能材料与光纤元件组合研制各种新型传感器是当前传感领域的重要方向^[1]。其中, 纳米薄膜与光纤的结合为

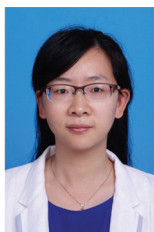
新型感测的实现提供了各种潜在可能^[2]。由于光学薄膜具有较好的空间周期结构, 根据光学薄膜理论对薄膜的组分、结构和性能进行复杂的人工剪裁和设计, 可以实现其它技术无法达到的优异性能。因此, 基于纳米薄膜的光纤传感器在参数测量的多样性方面展示出明显优势, 包括温度传感^[3]、湿度传感^[4]、折射率传感^[5]、应变传感^[6]、气体传感^[7]、化学传感^[8]和生物传感^[9]等。薄膜作为光纤传感器的敏感元件, 对传感器的测量范围、灵敏度和精度等传感特性以及系统的稳定性和可靠性都有举足轻重的作用。

基于光的干涉效应, 光学薄膜可设计为具有各种各样的光学特性, 以实现不同波段的减反、分色、偏振

收稿日期: 2020-08-15。

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2019268)资助。

作者简介: 高晓丹(1980—), 女, 湖北鄂州人, 硕士, 武汉东湖学院电子信息工程学院专职教师, 副教授, 主要研究方向是光学薄膜设计、光学薄膜工艺制定及镀制、光通信薄膜器件研制以及光学薄膜在光纤传感技术方面的应用。



分束和偏振转换等功能。在光通信和光电子应用系统中,一般要求其具有较好的稳定性,不受温度、湿度等外界环境因素的影响。薄膜型光纤传感器采用光学薄膜构建传感器的敏感探头,充分利用膜层对待测参量的敏感特性来进行感知和检测,对薄膜材料的选择、膜系的设计及鲁棒性提出了更高的要求。基于此,本文设计纳米薄膜型光纤温度传感器的膜系结构,并研究其对光纤传感器温度传感特性的影响。

1 薄膜型光纤温度传感器理论模型

薄膜型光纤温度传感器的功能是通过在光纤端面沉积单层或多层薄膜构建温度敏感探头实现的,从光源发出的光经过光纤传入薄膜层,在薄膜层中发生干涉,反射回光纤,形成干涉光谱。薄膜型光纤温度传感器原理如图1所示。

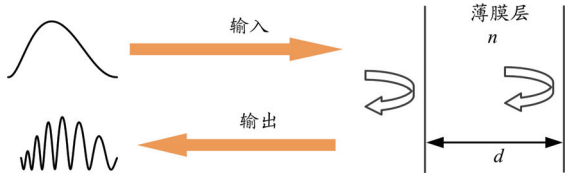


图1 薄膜型光纤温度传感器原理图

根据法布里-珀罗干涉理论,反射光谱的强度为:

$$I_r(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + 2\sqrt{I_1(\lambda)I_2(\lambda)} \cos\left(\frac{2\pi\gamma}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (1)$$

其中, $I_1(\lambda)$ 和 $I_2(\lambda)$ 分别为膜层两界面的反射光强, φ_0 为初始相位, γ 为两界面反射光的光程差,它取决于膜层的折射率 n 和膜层的厚度 d ,关系式如下:

$$\gamma = 2nd \quad (2)$$

根据光学薄膜理论,膜系结构的特征矩阵 $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left[\sum_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i\sin\delta_j}{\eta_j} \\ I\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, k 为膜系总层数, η_j 为第 j 层薄膜的有效导纳, η_0 为出射介质的有效导纳, δ_j 为第 j 层薄膜的相位厚度,可由式(4)求出:

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \quad (4)$$

多层薄膜系统的反射率 R 为:

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (5)$$

从式(1)可以看出,反射光谱干涉条纹的频率取决于薄膜腔的光程差 γ , 设 $2\pi\gamma/\lambda + \varphi_0 = 2m\pi$, m 为整数,此时对应干涉光谱的极大值 λ_m 为:

$$\lambda_m(T) = \frac{\gamma}{m - \frac{\varphi_0}{2\pi}} \quad (6)$$

由于薄膜材料的热光系数和热膨胀系数受温度影响,当温度从 T_0 变化为 T 时,薄膜层的折射率 n 和膜层厚度 d 都会随着温度的变化而改变,从而使干涉光谱随温度的变化而产生波长的漂移:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_m(T) - \lambda_m(T_0)}{\lambda_m(T_0)} = \frac{2n(T)d(T) - 2n(T_0)d(T_0)}{2n(T_0)d(T_0)} \quad (7)$$

通过监测干涉光谱波长相对变化量 $\Delta\lambda/\lambda$ 的大小就可以得出对应的温度信息。

2 薄膜材料的选择

薄膜作为传感器的敏感部件,是光纤温度传感器的核心,薄膜材料的光学性能、机械特性、电学以及化学特性决定了薄膜型温度传感器的应用环境和使用范围。敏感薄膜材料的类型、晶体微观结构和自由载流子属性等决定了温度传感器的灵敏特性^[10]。薄膜材料的选取除了要考虑常规的波段透明度、材料折射率、机械牢固度、化学稳定性和抗高能辐射等特性,尤其要关注薄膜材料的温度特性,例如折射率的温度特性、热膨胀温度特性等。另外,为了使传感器能测量较宽的温度范围,可应用于高温恶劣环境,例如燃气机、内燃机等高温作业领域的健康监测,传感探头的光纤选用蓝宝石光纤。蓝宝石具有极高的熔点(2054℃)、良好的机械特性和抗腐蚀能力,采用蓝宝石光纤代替传统光纤是实现大温度范围传感测量的最佳方案。

介质材料 ZrO_2 、 Ta_2O_5 、 TiO_2 和 Al_2O_3 满足透明度、折射率和机械稳定性等基本需求。考虑到温度传感器的测试环境,薄膜材料与蓝宝石光纤应具有相近的热膨胀系数,否则膜层应力较大,易发生裂变。而且薄膜材料还必须在高达 1800℃ 的温度范围内不与蓝宝石发生化学反应。但是, TiO_2 膜在高于 1200℃ 时会与蓝宝石发生化学反应生成化合物钛酸铝,其膨胀系数与蓝宝石区别较大,易形成较大的膜层应力。 Ta_2O_5 薄膜与蓝宝石光纤构建的温度传感器测温范围限制在 1000℃ 以内^[11]。

综上所述,在兼顾高温检测的情况下,本文选择 ZrO_2 和 Al_2O_3 分别作为敏感薄膜的高、低折射率材料^[12]。

3 膜系设计及其传感特性

为了减少薄膜镀制过程中的累积误差,传感器敏感薄膜的膜层数不宜多,本文采用 ZrO_2 -917 nm 单层膜、 Al_2O_3 -1186 nm 单层膜和具有法布里-珀罗结构

(ZrO_2 -256 nm/ Al_2O_3 -1545 nm/ ZrO_2 -256 nm) 三层膜设计膜系,根据薄膜干涉理论仿真其光谱曲线如图 2 所示。可以看出, ZrO_2 、 Al_2O_3 单层薄膜的反射光谱强度太低,会影响光谱条纹精细程度。考虑到光纤传感器的精度等评价指标,传感器的敏感薄膜不适合设计单层膜。

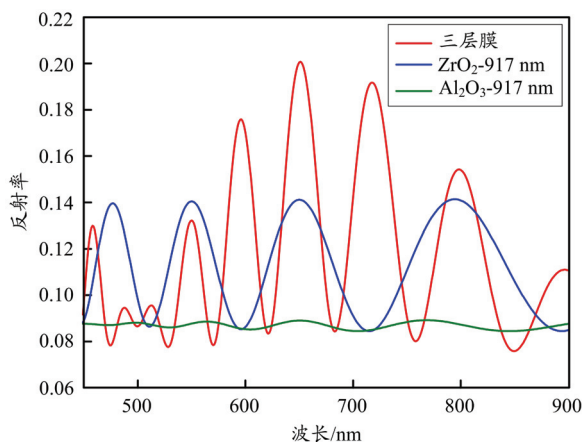


图 2 单层 ZrO_2 、 Al_2O_3 膜与三层膜光谱强度对比

由于测试系统所采用的宽带光源的发光范围是 400~900 nm, 光强的峰值位于 600 nm 附近, 所以膜系设计时中心波长 λ_0 选择 600 nm。用高、低折射率交替的 $\lambda_0/4$ 厚的介质多层膜构建法布里-珀罗腔, 当膜系所有界面上反射的光束回到前表面具有相同相位时, 会产生相长干涉, 从而提高反射率。而且, 高、低折射率的比值越大或层数越多, 则反射率越高。为了得到较高的反射率和较低的损耗, 膜系最外层采用高折射率膜层。

针对光学薄膜的法布里-珀罗干涉, 干涉光谱的波峰数越多, 测量结果越准确, 但波峰太多不利于数据处理。运用 TFCalc 膜系设计软件, 设计初始规整膜系 Fiber|pHqLpHlAir。其中, H 表示光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的高折射率膜层, L 表示光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的低折射率膜层, p 和 q 分别为高、低折射率膜层系数。以膜层厚度不宜太厚为基本原则, 当 $p=1$ 或 3, q 为 9~19 的整数时满足基本的干涉光谱要求。但初始膜系只是初步选择光谱, 不能全面反映膜系的温度特性。结合传感器的温度感测原理和光学薄膜干涉理论, 以初始膜系的温度传感特性为基础, 采用 Matlab 进行膜系分析和优化。当温度从常温变化到 1200 °C 时, 由于薄膜材料的热光系数和热膨胀系数的温度特性, 干涉光谱会发生波长平移。对于不同的整数 p 和 q , 本文所设计膜系对应的波长相对变化量 $\Delta\lambda/4$ 如图 3 所示。可以看出, $p=3$ 时对应的三层膜系对温度的变化更加敏感, 波长的

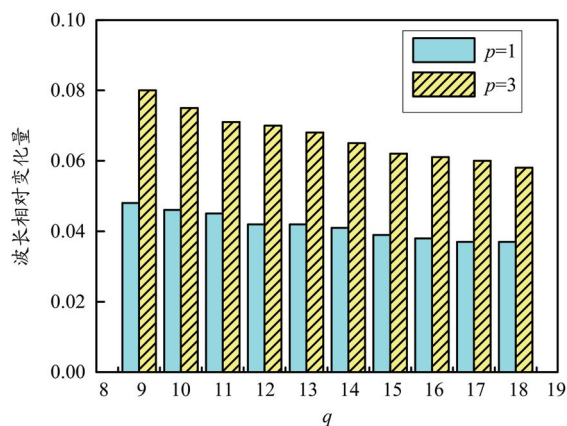


图 3 不同设计膜系对应的波长相对变化量

相对变化量更大, 灵敏度更高, 膜层厚度也更厚, 实际镀膜可能产生的误差也会随之增大。

综合权衡, 本文设计膜系为: Fiber| ZrO_2 -230 nm/ Al_2O_3 -1264 nm/ ZrO_2 -230 nm|Air。

本文所设计膜系在不同温度下的光谱曲线如图 4 所示。随着温度升高, 光谱曲线向右平移, 其波长相对变化量随温度变化的特性如图 5 所示。可以看出, 波长相对变化量受温度的影响是非线性的, 呈现为一条平滑的曲线。

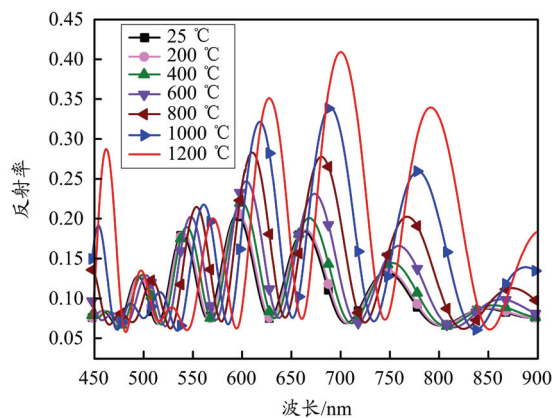


图 4 设计膜系在不同温度下的光谱曲线

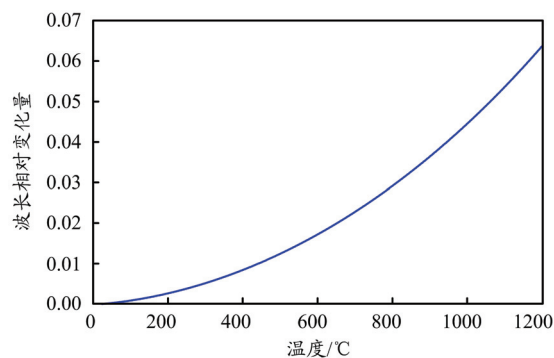


图 5 设计膜系的温度特性

当膜系确定后, 光纤温度传感器的传感特性 ξ 是关于介质材料热光系数 α_n 和热膨胀系数 α_d 的函数。

$$\xi = F(\alpha_n, \alpha_d, T) \quad (8)$$

分别对高、低折射率薄膜材料的 α_n 和 α_d 对温度传感特性的影响权重进行分析。令薄膜材料的 α_n 对温度传感器传感特性影响的权重因子 s_n 为:

$$s_n = \frac{\partial \xi}{\partial \alpha_n} \frac{\alpha_n}{\xi} \quad (9)$$

同理, 薄膜材料的 α_d 对温度传感器传感特性影响的权重因子 s_d 为:

$$s_d = \frac{\partial \xi}{\partial \alpha_d} \frac{\alpha_d}{\xi} \quad (10)$$

设 S_{nH} 和 S_{nL} 分别为高、低折射率薄膜材料 α_n 对传感特性影响权重, S_{dH} 和 S_{dL} 分别为高、低折射率薄膜材料 α_d 对传感特性影响权重, S_{nH} 、 S_{nL} 、 S_{dH} 和 S_{dL} 随温度变化的变化情况如图 6 所示。可以看出, 在温度从常温到 1200 °C 变化的过程中, S_{nL} 、 S_{dH} 和 S_{dL} 都随着温度的升高而降低, 三者相比, S_{nL} 大于 S_{dL} , 而 S_{dH} 最低。 S_{nH} 在大约 120 °C 之前是随着温度升高急剧降低, 之后随着温度的升高又逐步增大, 直至对温度传感特性的影响起主导作用。不同膜系结构对温度传感特性的影响权重会有所区别, 在本文所选择的膜系中, 因为高折射率薄膜材料 ZrO_2 膜层较薄, 因此 S_{dH} 相对较低, 但是 ZrO_2 膜的折射率受温度影响较大, 随着温度的升高, 其 S_{nH} 逐步提升。

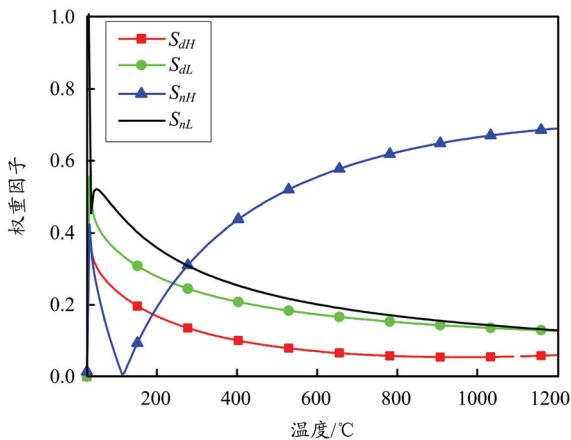


图 6 S_{nH} 、 S_{nL} 、 S_{dH} 和 S_{dL} 随温度变化的变化情况

4 结束语

本文以光纤温度传感器的感温原理及光学薄膜理论为基础, 通过构建具有对称结构的法布里-珀罗

薄膜腔, 设计了较简单的温度传感薄膜的膜系, 模拟了所设计膜系的温度传感特性, 并分析了薄膜材料的热光系数和热膨胀系数对温度传感特性的影响权重, 便于后期薄膜镀制工艺的制定。本文的研究为光学薄膜应用于其它物理参量测量的光纤传感器提供了借鉴意义和理论基础。

参考文献:

- [1] WANG Min, LIU Fufei, ZHOU Xian, et al. Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 070703-1-070703-9.
- [2] YANG M, PENG J, WANG G, et al. Fiber optic sensors [M]. Sydney: Springer, 2017: 1-6.
- [3] HUANG Chujia, LEE Dongwen, DAI Jixiang, et al. Fabrication of high-temperature sensor based on dielectric multilayer film on Sapphire fiber tip[J]. Sensors and Actuators, 2015, A232: 99-102.
- [4] PENG Jiankun, QU Yapeng, WANG Weijia, et al. Thin-film-based optical fiber Fabry-Perot interferometer used for humidity sensing [J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 2967-2972.
- [5] ZHANG Z, LI S, LIU Q, et al. Groove micro-structure optical fiber refractive index sensor with nanoscale gold film based on surface plasmon resonance[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 45-48.
- [6] TIAGO P, FRANCISCO A, ANTUNES P. Highly sensitive fiber optic temperature and strain sensor based on an intrinsic Fabry-Perot interferometer fabricated by a femtosecond laser [J]. Optics Letters, 2019, 44(19): 4833-4836.
- [7] ZHANG G, DAI J, YANG M, et al. Fiber optic hydrogen sensor based on Fabry-Perot interferometer coated with Sol-Gel Pt/WO₃ coating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2530-2534.
- [8] SHARMA A K, KAUR B. Chalcogenide fiber-optic SPR chemical sensor with MoS₂ monolayer, polymer clad, and polythiophene layer in NIR using selective ray launching[J]. Optical fiber technology, 2018, 43(7): 163-168.
- [9] PANDEY I, BAIRAGI P K, VERMA N. Electrochemically grown polymethylene blue nanofilm on copper-carbon nanofiber nanocomposite: an electrochemical sensor for creatinine [J]. Sensors and Actuators, 2018, 277(12): 562-570.
- [10] NARASIMMAN S, BABU K H, BALAKRISHNAN L, et al. Fabrication of fiber optic based temperature sensor[J]. Materials today: proceedings, 2019(9):164-174.
- [11] WANG Jiajun, EVAN M. LALLY, WANG Xiaoping, et al. ZrO₂ thin-film-based sapphire fiber temperature sensor[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 2129-2134.
- [12] GAO Xiaodan, YANG Minghong, PENG Jiankun, et al. Miniature fiber-optic temperature sensor based on optical coating interference[J]. Optik, 2017(130): 1014-1020.