

学校编码：10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号：X2007193008

UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

蓝宝石光纤消逝波传感器的  
波谱特性及应用

Spectral Characteristics and Its Applications of Sapphire  
Fiber-optic Evanescent Wave Sensor

王逸平

指导教师姓名：罗学涛 教授

专业名称：材料工程

论文提交日期：2012 年 月

论文答辩时间：2012 年 月

学位授予日期：2012 年 月

答辩委员会主席：\_\_\_\_\_

评阅人：\_\_\_\_\_

2012年5月

厦门大学博硕士论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（厦门大学材料学院罗学涛教授）课题（组）的研究成果，获得（罗学涛教授）课题（组）经费或实验室的资助，在（材料学院罗学涛教授课题组）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

光纤传感器具有抗电磁干扰、体积小、重量轻、耐腐蚀、灵敏度高优点，是一类优良的传感器，被广泛应用在生物、化工、军事等各种领域。但是对于一些特殊性质和用途的光纤传感器的研究，仍然是当今传感器研究的热点之一。本文选取蓝宝石消逝波传感器为研究对象，着重研究了这类新型传感器应用于重水中微量水含量的预测和悬浊液中光谱信息的分析。主要研究结果如下：

1、测量了纯净水、球形玻璃碳悬浊液和石墨悬浊液的常规透过谱，发现常规透过谱由于悬浮颗粒严重散射大部分信号被散射掉。研究发现对于片状石墨悬浊液和球形玻璃碳悬浊液透过谱，透过信号的强度和形状存在差别，我们从悬浮颗粒的形状和大小以及消逝波的穿透深度等方面给出了合理解释。

2、测量了蓝宝石消逝波光纤在不同体积比水含量浓度的重水中的透过谱图。研究也发现，对于水含量较大的溶液，光纤透过谱强度很弱，信号几乎淹没在背景噪声中，因此蓝宝石光纤消逝传感器不能应用于水含量较高的溶液中。

3、计算了蓝宝石光纤传感器在不同浓度重水溶液中的消逝波吸收谱，采用主成份回归和经典二乘法建立理论模型，预测重水中的水含量。发现主成份回归方法建立的模型预测浓度和实际浓度间的标准偏差为 0.3%，经典二乘法预测的标准偏差为 0.08%。研究结果表明，蓝宝石光纤消逝波传感器是一类适用于重水溶液中微量水含量定量分析的在线、实时监测的新型传感器。

**关键词：**光纤；消逝波；传感器，波谱特性

## Abstract

Fiber-optic sensor is widely applied in biological, chemical and martial industries, because of its high precision, fast response, high repeatability and reliability, low price, anti-electromagnetism interference ability, light weight, easy to install, and other unique advantages. New fiber-optic sensor is still the research focus for its unique characteristics and applications. This thesis is focused on the application of new sapphire fiber evanescent sensors in extraction spectral information in suspension solution and determination of low-level water content in deuterium oxide. The coiled fiber-optic sensors based on evanescent absorption spectroscopy have been applied to implement for in situ monitoring of H<sub>2</sub>O concentration in deuterium oxide and chemical information in highly scattering turbid solutions. The main results were as follows:

1. The bulk transmitted spectra of graphite flakes and glassy carbon suspension with various concentrations were recorded. For graphite and glassy carbon suspension, most transmitted signals were lost due to the scattering of suspension particles. Based on the theory of evanescent field absorption of fiber-optic sensors, the evanescent absorbances of coiled sapphire sensors in those suspensions were calculated. The reasons for different influence of graphite flakes and glassy carbon particles suspension on transmitted spectra were analyzed on the basis of particles morphology, size and transmitted depth of evanescent field wave.

2. The transmitted spectra of a coiled sapphire fiber-optic sensor in deuterium oxide with different H<sub>2</sub>O concentration were recorded. The intensities of transmitted signals for the samples with high H<sub>2</sub>O concentration remain the same in the exclusion noise effect. Those results demonstrate that the coiled sapphire fiber-optic sensor based on evanescent absorption around 2.9 $\mu$ m is not suitable for monitoring deuterium oxide with high H<sub>2</sub>O concentration.

3. Based on the theory of evanescent field absorption of fiber-optic sensors, the

evanescent absorption spectra of the sensors in those solutions with different H<sub>2</sub>O concentration were obtained and analyzed. Principal component regression method and classical least square method were utilized to build the calibration mode and predict the H<sub>2</sub>O concentration, the standard error of predicted H<sub>2</sub>O concentration in deuterium oxide solution is 0.3% and 0.08%, respectively. The present investigation demonstrates that the coiled sapphire fiber-optic sensor based on evanescent absorption spectroscopy is a feasible online, in situ candidate in the prediction of low-level H<sub>2</sub>O content during deuterium oxide distillation.

**Key words:** Fiber-optic; Evanescent Wave; Sensor; Spectral Characteristics

# 目录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 光纤</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 光纤传感器</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 光纤传感器的分类 .....	3
1.2.2 光纤传感器的应用 .....	5
1.2.3 目前应用较广的光纤传感器 .....	5
<b>1.3 光纤消逝波传感器</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 本文的研究背景及研究内容</b> .....	<b>11</b>
1.4.1 研究背景 .....	11
1.4.2 研究内容 .....	11
<b>第二章 光纤消逝波传感器的相关基本理论</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 光纤波导理论</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 光纤消逝波理论</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 本章小结</b> .....	<b>18</b>
<b>第三章 实验过程及研究方法</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 实验所用仪器设备</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2 光纤传感器结构</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3 实验原材料及样品制备</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4 实验研究方法</b> .....	<b>23</b>
3.4.1 常规透过谱测试 .....	23
3.4.2 光纤消逝波透过谱测试 .....	24
3.4.3 悬浮颗粒显微结构测试 .....	24
<b>第四章 蓝宝石光纤消逝波传感器在悬浊液中的波谱特性</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1 光纤消逝波传感器的定标</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2 悬浊液中的蓝宝石光纤消逝波谱图</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3 悬浊液中光谱信息分析</b> .....	<b>30</b>



4.4 本章小结 .....	35
第五章 用蓝宝石光纤消逝波传感器检测重水中水含量 .....	36
5.1 实验结果 .....	36
5.2 实验结果分析与讨论 .....	39
5.3 本章小结 .....	46
第六章 结果与展望 .....	47
参 考 文 献 .....	49
致 谢 .....	55

厦门大学博士论文摘要库

# Table of Contents

<b>Chapter1 Literature Review .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Fiber-optic .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Fiber-optic Sensors .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Classification of fiber-optic sensors.....	3
1.2.2 Application of fiber-optic sensors.....	5
1.2.3 Widely-applied fiber-optic sensors .....	5
<b>1.3 Fiber-optic Evanescent Wave Sensors.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Background and Contents .....</b>	<b>11</b>
1.4.1 Background.....	错误! 未定义书签。
1.4.2 Contents .....	11
<b>Chapter2 Basic Theory of Fiber-optic Evanescent Wave Sensors .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Theory of Fiber-optic Wave Guide.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Theory of Fiber-optic Evanescent Wave .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Summary .....</b>	<b>18</b>
<b>Chapter3 Experiment and Research Methods.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Apparatuses.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Structure of Fiber-optic Sensors .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Experimental Material and Sample Preparation .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 Research Methods .....</b>	<b>23</b>
3.4.1 Testing of common spectral region.....	23
3.4.2 Testing of fiber-optic sensors spectral region .....	24
3.4.3 Testing of suspended particle microstructure .....	24
<b>Chapter4 Analysis of Chemical information by Sapphire Fiber-optic Evanescent Wave Sensors .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Calibration of Fiber-optic Evanescent Wave Sensors .....</b>	<b>26</b>

4.2 Spectra of Sapphire Fiber-optic Evanescent Wave sensors in the suspension.....	28
4.3 Analysis of Chemical information in the suspension.....	30
4.4 Summary .....	35
<b>Chapter5 Measurement of H<sub>2</sub>O Concentration Base on Sapphire Fiber-optic Evanescent Wave Sensors .....</b>	<b>36</b>
5.1 Results.....	36
5.2 Analysis and Discussion .....	39
5.3 Summary .....	46
<b>Chapter6 Conclusions and Prospects .....</b>	<b>47</b>
<b>References.....</b>	<b>49</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>55</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 光纤

光纤是光导纤维的简写,是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中的全反射原理而达成的光传导工具。20 世纪后半叶光纤及光纤通讯技术的发展是信息革命的重要标志之一<sup>[1-2]</sup>。光纤具有很多优异的性能,例如:抗电磁干扰和原子辐射的性能,体积小、重量轻的机械性能;绝缘、无感应的电气性能;耐水、耐高温、耐腐蚀的化学性能等<sup>[3]</sup>。此外,它还有灵敏度高,能够与计算机连接,便于遥测等优点。

光纤分类:

1、按光在光纤中的传输模式来分类,可分为单模光纤和多模光纤,如图 1.1 所示。所谓“模”是指以一定角速度进入光纤的一束光。单模光纤采用固体激光器做光源,多模光纤则采用发光二极管做光源。多模光纤允许多束光在光纤中同时传播,从而形成模分散,由于每一个“模”光进入光纤的角度不同,它们到达另一端点的时间也不同,这种特征称为模分散,模分散技术限制了多模光纤的带宽和距离,因此,多模光纤的芯线粗(一般为 50-62.5 $\mu\text{m}$ )、传输速度低(一般为 100-1000M bit/s)、距离短(有效传输距离大约是几公里),整体的传输性能差。

多模光纤模间色散较大,限制了传输数字信号的频率,而且随距离的增加会更加严重,但其成本比较低,一般用于距离不远的环境下。单模光纤只能允许一束光传播,所以单模光纤没有模分散特性,其模间色散很小,适用于远程通讯。由于单模光纤还存在着波导色散和材料色散,因此对光源的谱宽和稳定性有较高的要求,即谱宽要窄,稳定性要好。因此单模光纤的纤芯相应较细(一般为 9-10 $\mu\text{m}$ ),传输带宽较大(通常可达 1G bit/s 以上)、传输距离长(传输距离可达数千公里),但因其需要激光源,成本较高<sup>[4]</sup>。

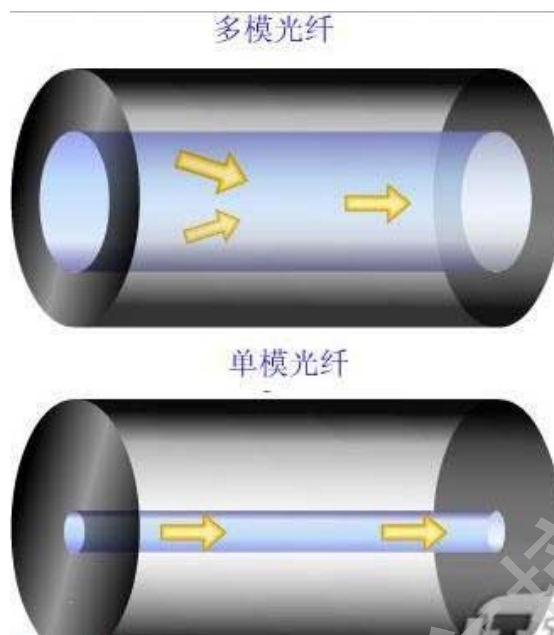


图 1.1 多模光纤和单模光纤的示意图

2、按折射率变化类型来分类，可分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤，如图1.2所示。阶跃折射率光纤的纤芯与包层之间的折射率是突变的，纤芯折射率保持不变。渐变折射率光纤在横截面中心处折射率最大，由中心向外折射率逐渐变小，到内芯边界处变为包层折射率。通常折射率变化为抛物线形式，又称为梯度型。

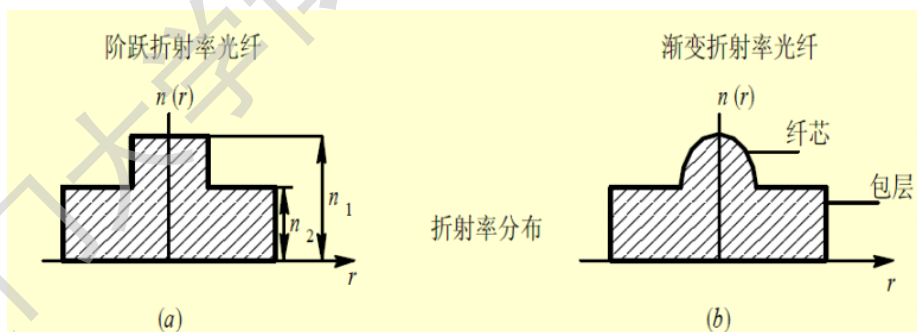


图 1.2 阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤

3、按材料分类，可分为塑料光纤、多组分玻璃光纤、高纯度石英玻璃光纤以及本文使用到的蓝宝石光纤等。

## 1.2 光纤传感器

光纤传感器是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一门新技术，它是伴随着光纤

及光通信技术的发展而逐步形成的<sup>[5]</sup>。光纤传感器应用于对磁、声、陀螺、电流、压力、温度、湿度、位移、液面、转矩、加速度、光声和应变等物理量的测量，具有极为广泛的应用前景<sup>[6]</sup>。光纤传感器的应用范围很广，几乎涉及国民经济和国防上所有重要领域和人们的日常生活，尤其可以安全有效地在恶劣环境中使用，解决了许多行业多年来一直存在的技术难题，具有很大的市场需求<sup>[7]</sup>。

光纤传感器是把被测量的状态转变为可测的光信号的装置，其原理示意图见图 1.3。光受到被测量的调制，已调光经光纤耦合到光接收器，使光信号变为电信号，经信号处理系统得到被测量。



图 1.3 光纤传感器的原理示意图

### 1.2.1 光纤传感器的分类

1、光纤传感器根据传感原理可分三大类<sup>[8-9]</sup>：第一类是功能型传感器，又称为传感型传感器，其结构示意图见图 1.4(a)。功能型传感器是利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件，被测量对光纤内传输的光进行调制，使传输的光的强度、相位、频率或偏振态等特性发生变化，先通过被调制光的传导进行解调，从而得出被测信号，光纤在其中不仅是导光媒质，而且也是敏感元件，光在光纤内被测量调制。功能型传感器的典型例子是光纤陀螺、光纤水听器。

第二类是非功能型传感器，又称为传光型传感器，其结构示意图见图 1.4(b)、(c)、(d)。非功能型传感器是利用其它敏感元件感受被测量的变化，光纤仅作为信息的传输介质，光纤在其中仅起导光作用，光照在光纤型敏感元件上被测量调制。目前实用化的大都是非功能型的光纤传感器。

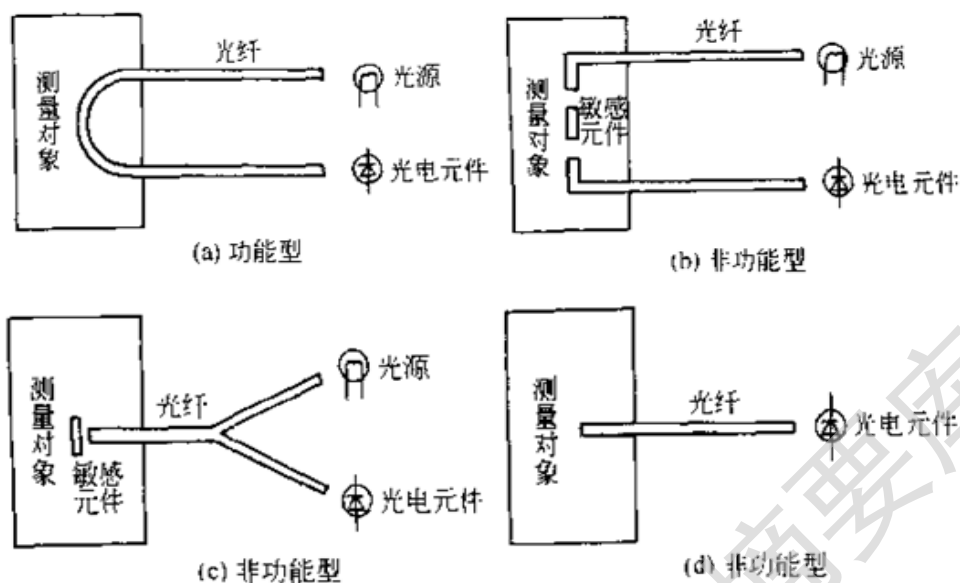


图 1.4 功能型传感器和非功能型传感器

第三类是拾光型传感器，它是用光纤作为探头，接收由被测对象辐射的光或被其反射、散射的光，拾光型传感器的典型例子是光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等<sup>[10-11]</sup>。三种光纤传感器的原理示意图见图 1.5。

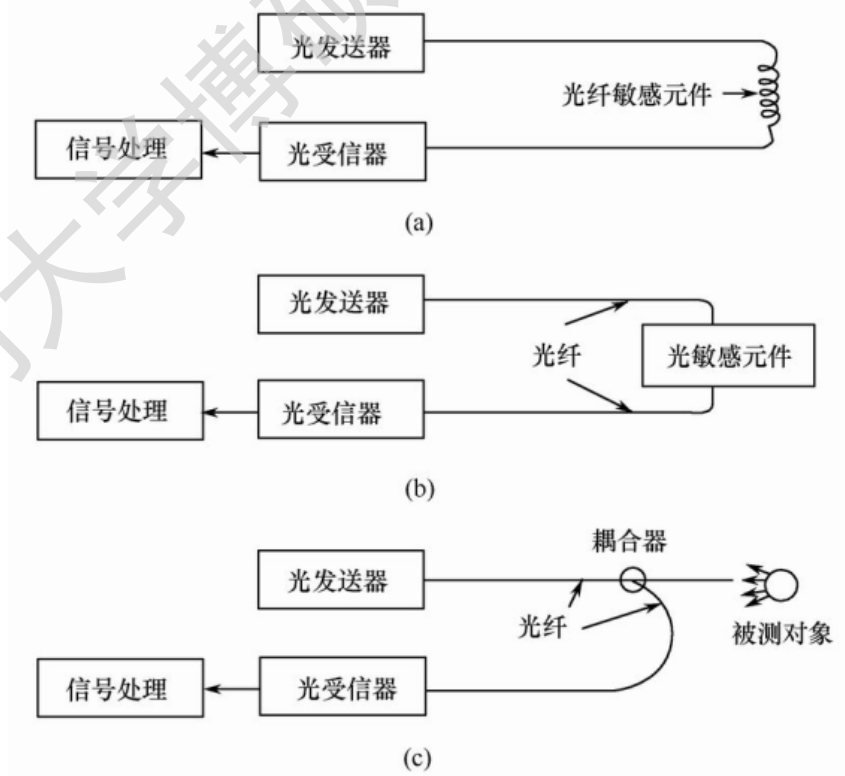


图 1.5 三种光纤传感器的原理示意图

注：(a)功能型传感器；(b)非功能型传感器；(c)拾光型传感器

2、光纤传感器根据测量对象可分为光纤温度传感器、光纤流速传感器、光纤电流传感器、光纤位移传感器、光纤浓度传感器等。

3、光纤传感器根据被调制的光波参数可分为强度调制光纤传感器、频率调制光纤传感器、相位调制光纤传感器、波长调制光纤传感器、偏振调制光纤传感器等。

4、光纤传感器根据传感原理可分为光纤散射型传感器、光纤荧光型传感器、光纤偏振型传感器、光纤干涉型传感器、光纤消逝波传感器等。

### 1.2.2 光纤传感器的应用

光纤传感器的应用范围很广<sup>[12-13]</sup>，尤其适用于恶劣环境<sup>[14]</sup>。在电力系统由于测定温度、电流等参数的需要，传统的电磁类传感器易受强电磁场的干扰，导致在这些场合中无法使用，因此用光纤传感器来进行监测是最合适的。

桥梁、大坝、高层建筑等重要建筑物往往涉及到生产、生活安全，因此它们的健康安全监测也是相当重要的，光纤传感器能监测到它们的应力变化，并集信息传输与传感于一体，耐高温、抗腐蚀，同时又能与网络相连，因此光纤传感器在这些方面大有可为。

在石油化工系统、矿井、大型电厂等需要检测氧气、一氧化碳、碳氢化合物等气体的场所，采用电磁类传感器不但达不到要求的精度，而且易引起安全事故。因此研究和开发高性能的光纤气敏传感器可以安全有效地实现上述检测。

在环境监测、食品安全检测、临床医学检测等方面，由于其环境复杂、影响因素多，使用其它传感器达不到所需要的精度。采用光纤传感器可以具有很强的抗干扰能力和较高的精度，可实现对上述各领域的生物量的快速、方便、准确地检测。

光纤传感器在航空和航海中的应用航空工业是光纤传感器最有潜力的用户之一，这主要是因为光纤传感器具有重量轻，以及相应的传导线具有抗辐射特性的优点。由于相邻光纤之间绝对无串话干扰，所以整个布线就非常简单<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2.3 目前应用较广的光纤传感器

#### 1、光纤陀螺

光纤陀螺是用光学方法测量角度的一种新型敏感元件。光纤陀螺分干涉型、谐振型和布里渊型。光纤陀螺结构根据所采用的光学元件有 3 种实现方法：小型



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库