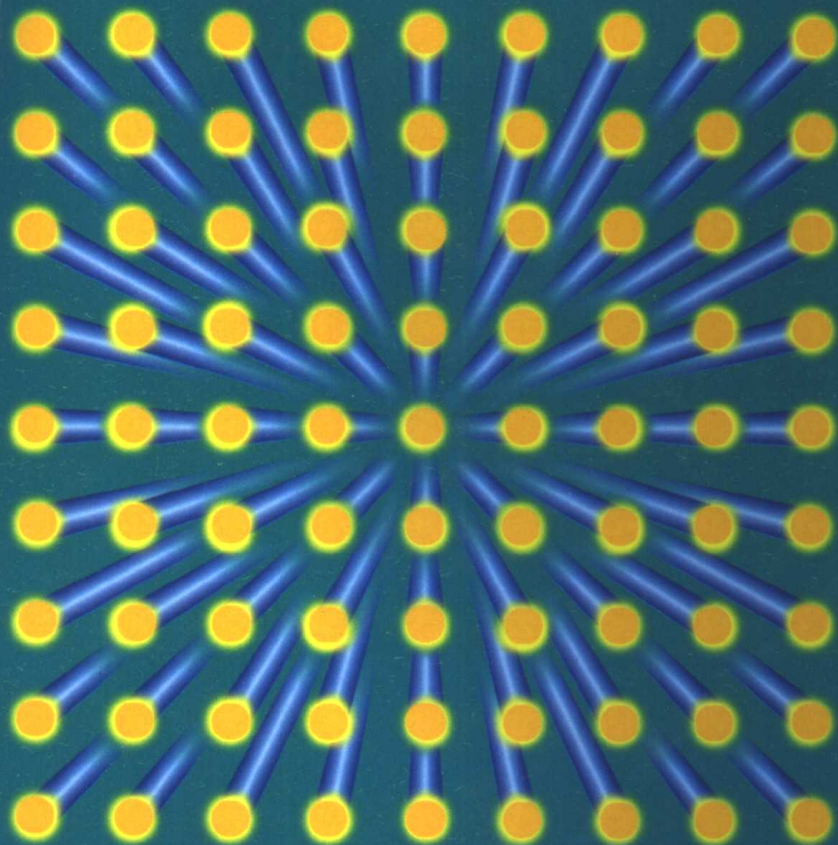


# 光纤传感技术与应用

The Technologies and  
Applications of Optical Fiber Sensing

王惠文 主编 江先进 赵长明 王茜蓓 蒋月娟 编著



国防工业出版社

# 光纤传感技术与应用

## The Technologies and Applications of Optical Fiber Sensing

王惠文 主编

江先进 赵长明 王茜蓓 蒋月娟 编著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤传感技术与应用/王惠文主编. —北京:国防工业出版社, 2001. 4

ISBN 7-118-02442-2

I. 光... II. 王... III. 纤维光缆-传感器  
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 72837 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 304 千字

2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:23.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

#### IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫悟生	崔尔杰	

## 前 言

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的,以光波为载体,光纤为媒质,感知和传输外界被测量信号的新型传感技术。作为被测量信号载体的光波和作为光波传播媒质的光纤,具有一系列独特的、其他载体和媒质难以相比的优点。光波不产生电磁干扰,也不怕电磁干扰,易为各种光探测器件接收,可方便地进行光电或电光转换,易与高度发展的现代电子装置和计算机相匹配。光纤工作频带宽,动态范围大,适合于遥测遥控,是一种优良的低损耗传输线;在一定条件下,光纤特别容易接受被测量或场的加载,是一种优良的敏感元件;光纤本身不带电,体小质轻,易弯曲,抗电磁干扰、抗辐射性能好,特别适合于易燃、易爆、空间受严格限制及强电磁干扰等恶劣环境下使用。因此,光纤传感技术一问世就受到极大重视,几乎在各个领域得到研究与应用,成为传感技术的先导,推动着传感技术蓬勃发展。

国外一些发达国家对光纤传感技术的应用研究已取得丰硕成果,不少光纤传感器系统已实用化,成为替代传统传感器的商品。国内不少部门和单位对光纤传感技术也进行了多年研究,取得不少研究成果,但大多处于预研阶段,离实用化尚有相当距离。为了让国内更多的读者比较系统地了解光纤传感技术的基本原理及其在某些领域的应用,作者在多年进行相关科研与教学、并参考大量图书文献的基础上编著本书,以期抛砖引玉,对促进我国光纤传感技术的发展做一点贡献。

本书在编写体例上,力图突破以往同类图书的编写模式,不局限于光纤传感器的一般介绍,也不按被测量的类型分类叙述,而是在全面系统介绍光纤传感技术原理的基础上,系统介绍光纤传感

技术在某些重要领域,如惯性导航、军用告警、智能材料结构、测试与控制、机器人及信息处理等方面的应用。对于光纤传感技术与应用的重点内容,如相位调制与解调技术、光纤光栅传感技术等,分散在有关章节中,从不同角度进行重点论述,力图使读者通过本书能比较广泛地了解各种相位调制类型及相应的解调方法。

在各章的编写上,力求内容新颖,系统完整,自成体系。在第一章简介光纤的基本知识之后,第二章全面系统地介绍光纤传感技术的基本原理,注意介绍光纤传感技术近年来发展的一些新内容,如光纤光栅、分布式光纤传感的基本原理等。对某些光波长调制型及光强调制型光纤传感器类型的划分提出了一些新见解,如将多数文献归类为颜色(波长)调制的基于热色效应、透明度效应、荧光(磷光)效应和热辐射效应的光纤传感原理,归类为光强调制,并将分布式光纤传感原理(场传感)与光纤调制原理(点传感)并述。第三章在全面系统介绍各种光纤陀螺和光纤加速度计原理的基础上,重点阐述干涉型光纤陀螺及干涉型光纤加速度计的相位调制及相位解调方法。第四章介绍水声、磁、核、激光、生化战剂等光纤传感告警技术的基本原理,重点介绍干涉型光纤水听器及磁强计的原理与复用技术。第五章汇集了智能材料结构中使用的各种嵌埋式光纤敏感元件;比较系统地介绍了复合材料结构的固化监测方法及光纤传感技术在智能材料结构损伤评估中的应用。第六、七、八章分别对航空、航天、兵工、军需测控及机器人等光纤传感技术和光纤延迟线进行比较系统的介绍。

本书由王惠文主编。第一、二章由江先进编写,第三、八章由王惠文编写,第四章由赵长明编写,第五章由王茜蓓编写,第六、七章由蒋月娟编写,全书由江先进统稿。

本书曾请毛二可院士、廖延彪教授、周世勤研究员评审。周立伟院士、魏光辉教授、倪国强教授给予了热情支持和可贵帮助。在此对他们致以最诚挚的谢意!

先后参与北京理工大学有关光纤传感技术科研组的 20 多位老师、博士、硕士研究生做了大量工作,为本书的成稿提供了良好



## VIII

基础。作者对他们致以衷心的感谢!

作者感谢多年来资助光纤传感技术科研的国防预研基金办和兵器预研基金办,是他们为此书的出版提供了科研实践的基础。

如果没有国防科技图书出版基金的资助,本书不可能出版。作者对国防科技图书出版基金评审委员会及国防工业出版社深表谢意!

光纤传感技术是一门边缘学科性质的高科技应用技术,涉及许多学科的专门知识,尽管编者参阅了大量国内外资料,仍难免有欠妥当,甚至错误处,欢迎读者指正。

# 目 录

<b>第一章 光纤基本知识</b> .....	1
§ 1.1 光纤的基本结构 .....	1
§ 1.2 光线在光纤中的传播 .....	3
§ 1.3 光波在光纤中的传播 .....	10
§ 1.4 光纤的损耗与色散 .....	15
§ 1.5 光纤的偏振与双折射 .....	20
<b>第二章 光纤传感基本原理</b> .....	24
§ 2.1 光强调制型光纤传感原理 .....	25
§ 2.2 光相位调制型光纤传感原理 .....	40
§ 2.3 光偏振调制型光纤传感原理 .....	65
§ 2.4 光波长调制型光纤传感原理 .....	70
§ 2.5 光频率调制型光纤传感原理 .....	78
§ 2.6 分布式光纤传感原理 .....	81
<b>第三章 光纤惯性传感技术</b> .....	89
§ 3.1 惯性导航与惯性传感器 .....	89
§ 3.2 干涉型光纤陀螺(I-FOG) .....	101
§ 3.3 谐振型光纤陀螺(R-FOG)与布里渊型 光纤陀螺(B-FOG) .....	129
§ 3.4 光强调制型光纤加速度计 .....	135
§ 3.5 相位调制型光纤加速度计 .....	140
<b>第四章 军用光纤告警传感技术</b> .....	151
§ 4.1 光纤水声告警传感技术 .....	151
§ 4.2 光纤磁告警传感技术 .....	175
§ 4.3 光纤核辐射告警传感技术 .....	182

§ 4.4	光纤激光告警技术	185
§ 4.5	生化战剂光纤告警传感技术	197
<b>第五章</b>	<b>光纤传感技术在智能材料结构中的应用</b>	<b>201</b>
§ 5.1	智能材料结构中使用的 光纤敏感元件	202
§ 5.2	光纤传感技术在热固性 复合材料固化监测中 的应用	225
§ 5.3	光纤传感技术在智能材料 结构损伤定位 评估中的应用	240
<b>第六章</b>	<b>光纤传感技术在军用测控 技术中的应用</b>	<b>267</b>
§ 6.1	军用飞机光纤传感器系统	267
§ 6.2	光纤传感技术在火箭发动 机测试中的应用	279
§ 6.3	光纤传感技术在兵工测试 中的应用	284
§ 6.4	光纤传感技术在军需油罐 液位测试中的应用	290
§ 6.5	光纤传感技术在微位移测 量中的应用	296
<b>第七章</b>	<b>光纤传感技术在军用机器 人中的应用</b>	<b>303</b>
§ 7.1	军用机器人光纤触觉传感 器	303
§ 7.2	防爆机器人接近觉光纤传 感器	314
<b>第八章</b>	<b>光纤延迟线及其应用</b>	<b>320</b>
§ 8.1	光纤延迟线	320
§ 8.2	光纤延迟线的时域特性	329
§ 8.3	光纤延迟线的应用	333
<b>参考文献</b>		<b>352</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Basic Concept of Optical Fiber</b> .....	1
1.1 Fundamental structure of optical fibers .....	1
1.2 Optical ray propagation in optical fiber .....	3
1.3 Optical wave propagation in optical fiber .....	10
1.4 Loss and dispersion of optical fiber .....	15
1.5 Polarization and double refraction of optical fiber .....	20
<b>Chapter 2 Fundamental Principles of Optical Fiber Sensing</b> .....	24
2.1 Principles of intensity-modulated Optical Fiber Sensing .....	25
2.2 Principles of phase-modulated Optical Fiber Sensing .....	40
2.3 Principles of polarization-modulated Optical Fiber Sensing .....	65
2.4 Principles of wavelength-modulated Optical Fiber Sensing .....	70
2.5 Principles of frequency-modulated Optical Fiber Sensing .....	78
2.6 Principles of distributed Optical Fiber Sensing .....	81
<b>Chapter 3 Optical Fiber Inertia Sensing Technology</b> .....	89
3.1 Inertial navigation and inertia sensors .....	89
3.2 Interferometric fiber optic gyroscope .....	101
3.3 Resonate fiber optic gyroscope and Brillouin fiber optic gyroscope .....	129
3.4 Intensity-modulated optical fiber accelerometer .....	135
3.5 Phase-modulated optical fiber accelerometer .....	140

<b>Chapter 4 Optical Fiber Sensing Technology for</b>	
<b>Military Warning</b> .....	151
4.1 Optical fiber sensing technology for	
hydroacoustics warning .....	151
4.2 Optical fiber sensing technology for magneto	
warning .....	175
4.3 Optical fiber sensing technology for	
nuclear radiation warning .....	182
4.4 Optical fiber sensing technology for laser warning .....	185
4.5 Optical fiber sensing technology for	
biochemistry warfare agent warning .....	197
<b>Chapter 5 Application of Optical Fiber Sensing Technology</b>	
<b>for Smart Materials and Structures</b> .....	201
5.1 Optical fiber sensing elements in smart materials	
and structures .....	202
5.2 Application of optical fiber sensing technology in	
monitoring the cure of thermosetting matrix	
composite materials .....	225
5.3 Application of optical fiber sensing technology for	
positioning and evaluating damage in smart	
materials and structures .....	240
<b>Chapter 6 Application of Optical Fiber Sensing Technology</b>	
<b>for Military Detection and Control</b> .....	267
6.1 Optical fiber sensing system in military aeroplane .....	267
6.2 Application of optical fiber sensing technology	
for jet detection .....	279
6.3 Application of optical fiber sensing technology	
for arms detection .....	284
6.4 Application of optical fiber sensing technology for	
liquid level gauss of military oil tank .....	290

6.5	Application of optical fiber sensing technology for micro-displacement measure .....	296
<b>Chapter 7 Application of Optical Fiber Sensing Technology for Military Robot .....</b>		
	<b>for Military Robot .....</b>	<b>303</b>
7.1	Optical fiber tactile sensors for military robot .....	303
7.2	Optical fiber proximity sensors for anti-explosive robot .....	314
<b>Chapter 8 Optical Fiber Delay Line and It's Application .....</b>		
	<b>Chapter 8 Optical Fiber Delay Line and It's Application .....</b>	<b>320</b>
8.1	Optical fiber delay line .....	320
8.2	Time domain characteristic of optical fiber delay line .....	329
8.3	Applications of optical fiber delay line .....	333
References .....		352

# 第一章 光纤基本知识

## § 1.1 光纤的基本结构

光纤(Optic fiber),光导纤维的简称,一般由纤芯、包层、涂敷层与护套构成,是一种多层介质结构的对称柱体光学纤维。

### 1.1.1 光纤的结构

光纤的一般结构如图 1.1 所示。纤芯和包层为光纤结构的主体,对光波的传播起着决定性作用。涂敷层与护套则主要用于隔离杂光,提高光纤强度,保护光纤。在特殊应用场合不加涂敷层与护套,为裸体光纤,简称裸纤。

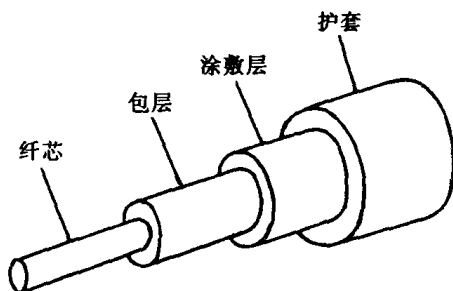


图 1.1 光纤结构示意图

纤芯直径一般为  $5\sim 75\mu\text{m}$ ,材料主体为二氧化硅,其中掺杂极微量其他材料,如氧化锗、五氧化二磷等,以提高纤芯的光学折射率。

包层为紧贴纤芯的材料层,其光学折射率稍小于纤芯材料的折射率。根据需要,包层可以是一层,也可以是折射率稍有差异的二层或多层。包层总直径一般约  $100\sim 200\mu\text{m}$ 。包层材料一般也

是二氧化硅,但其中微量掺杂物一般为三氧化二硼或四氧化二硅,以降低包层的光学折射率。

涂敷层的材料一般为硅酮或丙烯酸盐,用于隔离杂光。

护套的材料一般为尼龙或其他有机材料,用于增加光纤的机械强度,保护光纤。

### 1.1.2 光纤的结构特征

光纤的结构特征一般用其光学折射率沿光纤径向的分布函数  $n(r)$  来描述( $r$  为光纤径向间距)。对于单包层光纤,根据纤芯折射率的径向分布情况可分为阶跃光纤和梯度光纤(或渐变折射率光纤)两类。

#### 1.1.2.1 阶跃光纤

阶跃光纤的特点是纤芯折射率  $n_1$  和包层折射率  $n_2$  均为常数,其折射率径向分布函数为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & (0 \leq r \leq a) \\ n_2 & (r > a) \end{cases} \quad (1.1-1)$$

式中, $a$  为纤芯半径, $n_1 > n_2$ ,其差值用相对折射率差  $\Delta$  表示。

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.1-2)$$

阶跃光纤的折射率径向分布函数示于图 1.2(a)。

#### 1.1.2.2 梯度光纤

梯度光纤的纤芯折射率沿径向呈非线性递减,故亦称渐变折射率光纤。在纤轴处( $r = 0$ ),折射率最大,即  $n(0) = n_1$ ;在纤壁处( $r = a$ ),折射率最小,即  $n(a) = n_2$ 。常见梯度光纤的折射率径向分布函数为

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2} & (0 \leq r \leq a) \\ n_2 & (r > a) \end{cases} \quad (1.1-3)$$



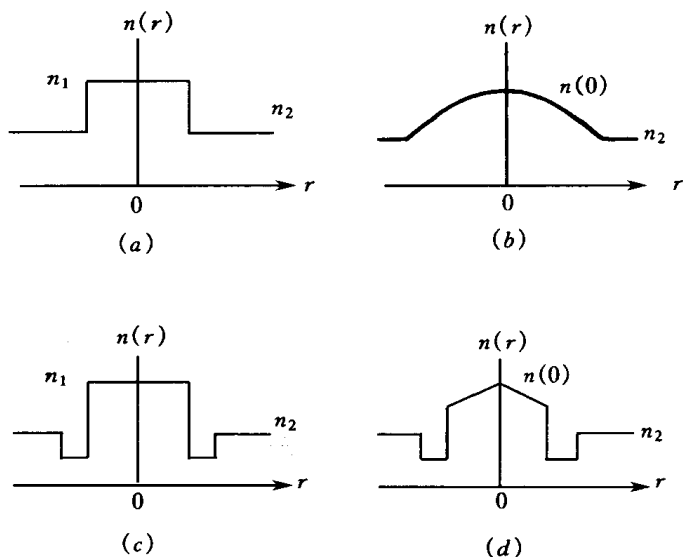


图 1.2 光纤折射率径向分布示意图

梯度光纤折射率径向分布函数如图 1.2(b) 所示。

对于多包层光纤,常给出各内层的厚度和折射率,外层仅仅提供一个界面,在理论分析时将其厚度视为无限大。纤芯折射率为常数的一种多包层光纤的折射率径向分布曲线如图 1.2(c) 所示。纤芯折射率呈函数分布的一种多包层光纤的折射率径向分布曲线如图 1.2(d) 所示。

## § 1.2 光线在光纤中的传播

### 1.2.1 光线在阶跃光纤中的传播

设一平行光束从折射率为  $n_0$  的介质中射入阶跃光纤,入射角为  $\theta_0$ ,如图 1.3 所示。在该平行光束中取一根光线  $SX$ ,入射点  $X$  位于光纤入射端面的芯包界面上,其在纤芯内的反射光线为  $XY$ ,相继的反射光线为  $YZ$ ,余此类推。设  $CC'$  为光纤的轴线(简称纤轴),光线  $XY$  在芯包界面上的反射角  $\angle CXY = \phi$ 。过  $Y$  点作直线