

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

# 光纤传感技术与应用

## Optical Fiber Sensing Techniques and Applications

廖延彪 黎敏 张敏 匡武 编著

Liao Yanbiao Li Min Zhang Min Kuang Wu

清华大学出版社

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

# 光纤传感技术与应用

## Optical Fiber Sensing Techniques and Applications

廖延彪 黎敏 张敏 匡武 编著

Liao Yanbiao Li Min Zhang Min Kuang Wu

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在全面介绍各类光纤传感器的基础上,分析和讨论了在设计和应用光纤传感器时要注意的一些基本问题和关键技术,并给出了光纤传感器的典型应用实例。其中包括光纤和光纤器件的选用、连接和封装,光纤传感网,相位调制型光纤传感器的信号解调,以及光纤传感器在电力、石油化工、生医生化、航空航天、环保、国防等领域的典型应用。

本书选材广泛,既反映了光纤传感技术的最新发展,又有一定深度。本书可作为高校物理电子和光电子、光学、光学仪器等专业的本科生和研究生的教材或参考书,也可供相关专业技术人员选用和设计光纤传感器时参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤传感技术与应用/廖延彪等编著. —北京:清华大学出版社,2009.1

(清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列)

ISBN 978-7-302-17866-8

I. 光… II. 廖… III. 光纤器件—光电传感器—高等学校—教材 IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 087905 号

责任编辑:陈国新

责任校对:梁毅

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:22.25 字 数:471千字

版 次:2009年1月第1版 印 次:2009年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:38.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:026820-01

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任： 郑大钟  
副 主 任： 蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 覃 征  
          王希勤 王 雄 余志平  
编 委： 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵  
          萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里  
          郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙  
秘 书： 王 娜  
责任编辑： 马瑛璐 王一玲 陈国新 邹开颜

# 出版说明

---

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届学生试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理



论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的、有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

# 前言

## Preface

信息的提取——传感技术是信息化时代的重要内容之一。光纤传感则是 21 世纪传感技术的一个重要领域,其发展直接影响到许多行业的进步。但是目前缺少一本较全面反映光纤传感技术进展的教材。这本教材能够使读者既能了解光纤传感器的基本理论,又能使学生通过此教材的学习,在今后的创新工作中,能为光纤传感器的选用和设计打下一个良好的基础。编者希望根据自己和所在的课题组近三十年的从事光学、光电子学以及光纤传感器方面的教学和科学研究的经验,能对此做一些微薄的贡献。

本书较全面地介绍了光纤传感技术与典型应用,其中包括光纤传感器的基本原理,光纤传感器的网络技术,光纤传感器中的光纤技术,相位型光纤传感器的信号处理技术,光纤传感器的封装技术,多传感器的融合技术,以及光纤传感器在电力、石油与化工、生医生化、航空航天、国防、环境保护与监测等领域的应用。

本书编写的目的有二:一为教材,二为参考书。作为教材,书中内容可按教学大纲有所取舍。其中光纤传感器的基本原理和光纤传感器的关键技术(网络技术、光纤技术、信号处理技术、封装技术、多传感器的融合技术)可作为基本内容,重点讲述;而光纤传感器的典型应用,则作为一般了解内容,可做简要介绍,也可作为自学内容,目的是扩大眼界。建议课上,教师以讲清楚物理概念为主,使学生了解各类光传感器的基本原理,其余可作为自学的阅读材料。也可采取学生自学有关材料后,以综述报告的形式进行交流,为学生在今后工作中选用或设计所需的传感器打下必要的基础。作为参考书,本书可作为各领域相关读者系统而全面地了解光传感器的参考读物。

本书的主要特点可归纳为：

(1) 本书较全面、简要地介绍了各类光电信息传感器，不仅包括传统的光电传感器，还包括光纤传感器、全息干涉传感器、散斑干涉传感器、荧光传感器、衍射传感器，以及近代出现的光层析传感器、波前传感器、MEMS 传感器、纳米传感器等。

(2) 本书着重讨论一些重要的光电传感器的原理——其物理模型的建立过程和结果的分析，着重在物理概念及其数学表达方式，便于读者在今后工作过程中能自己建立有关传感过程的物理模型，对所得传感结果能给予正确、合理的解释。

(3) 本书选材不仅较全面地介绍了光纤传感技术，还根据编者多年科研和教学工作的经验，给读者提供了：对于不同的使用环境，如何选用和设计光电传感器，在使用和设计中应考虑实际使用中的一些问题，如何研究和开发新的光电传感器，以满足工作的需要。

参加本书编写的有：匡武博士，负责编写第 4 章；黎敏教授，负责编写第 7 章、第 9 章和第 10 章；张敏副教授，负责编写第 6 章、第 8 章、第 11 章和第 12 章；第 2 章和第 3 章由廖延彪和黎敏共同完成，其余由廖延彪编写。全书由廖延彪定稿。

本书得以出版，要感谢课题组的同仁赖淑蓉老师以及家人给予的大力支持和帮助。

本书内容涉及面广，由于编者知识有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 5 月于清华园

lyb-dee@mail. tsinghua. edu. cn



# 目 录

# Contents

1	光纤传感器 .....	1
1.1	概述 .....	1
1.1.1	光纤传感器的定义及分类 .....	1
1.1.2	光纤传感器的特点 .....	2
1.2	振幅调制传感型光纤传感器 .....	2
1.2.1	光纤微弯传感器 .....	3
1.2.2	光纤受抑全内反射传感器 .....	3
1.2.3	光纤辐射传感器 .....	4
1.3	相位调制传感型光纤传感器 .....	5
1.3.1	引言 .....	5
1.3.2	光纤 M-Z 干涉仪和光纤 Michelson 干涉仪 .....	6
1.3.3	光纤 Sagnac 干涉仪 .....	7
1.3.4	光纤 Fabry-Perot 干涉仪 .....	12
1.3.5	光纤环形腔干涉仪 .....	16
1.3.6	白光干涉型光纤传感器 .....	16
1.3.7	光纤干涉仪的传感应用 .....	18
1.4	偏振态调制型光纤传感器 .....	18
1.4.1	光纤电流传感器 .....	18
1.4.2	光纤偏振干涉仪 .....	19
1.5	波长调制型光纤传感器 .....	20
1.5.1	引言 .....	20
1.5.2	光纤光栅的分类 .....	21



1.5.3	光纤布拉格光栅传感原理 .....	21
1.5.4	光纤布拉格光栅在光纤传感领域中的典型应用 .....	22
1.5.5	长周期光纤光栅在传感领域的应用 .....	25
1.5.6	光纤光栅折射率传感技术 .....	26
1.6	光纤荧光温度传感器 .....	30
1.6.1	光纤荧光温度传感原理 .....	30
1.6.2	荧光寿命测温 .....	31
1.6.3	荧光强度比测温 .....	31
1.6.4	荧光传感材料 .....	32
1.6.5	荧光测温系统 .....	33
1.6.6	荧光测温系统在工业界的应用 .....	34
1.7	分布式光纤传感器 .....	36
1.7.1	概述 .....	36
1.7.2	散射型分布式光纤传感器 .....	38
1.7.3	偏振型分布式光纤传感器 .....	40
1.7.4	相位型分布式光纤传感器 .....	41
1.7.5	微弯型分布式光纤传感器 .....	41
1.7.6	荧光型分布式光纤传感器 .....	41
1.7.7	应用 .....	44
1.8	聚合物光纤传感器 .....	44
1.8.1	概述 .....	44
1.8.2	多模聚合物光纤传感器及其应用 .....	46
1.9	光子晶体光纤及其在传感中的应用 .....	52
1.9.1	概述 .....	52
1.9.2	光子晶体光纤在传感中的应用 .....	53
1.9.3	高双折射光子晶体光纤 .....	55
1.9.4	双模光子晶体光纤传感器 .....	55
1.9.5	掺杂的微结构聚合物光纤传感器 .....	58
1.9.6	其他传感应用 .....	58
1.10	传光型光纤传感器 .....	58
1.10.1	振幅调制传光型光纤传感器 .....	58
1.10.2	相位调制传光型光纤传感器 .....	60
1.10.3	偏振态调制传光型光纤传感器 .....	62

1.11 光纤传感技术的发展趋势及课题 .....	63
1.12 小结 .....	64
思考题与习题 .....	64
参考文献 .....	66
<b>2 多传感器的光网络技术 .....</b>	<b>67</b>
2.1 概述 .....	67
2.2 光纤网络的连接技术 .....	68
2.2.1 网络损耗的主要来源 .....	68
2.2.2 光网络常用无源及有源光纤器件 .....	78
2.3 光网络技术 .....	96
2.3.1 可用于构成光传感网的传感器 .....	96
2.3.2 成网技术 .....	99
2.4 光传感网实例——光纤光栅在传感中的应用 .....	104
2.4.1 光纤光栅在传感应用中需考虑的一般问题 .....	104
2.4.2 光纤光栅传感网络 .....	105
2.5 小结 .....	111
思考题与习题 .....	111
参考文献 .....	111
<b>3 光电传感器中的光纤技术 .....</b>	<b>113</b>
3.1 概述 .....	113
3.2 光纤的基本特性 .....	113
3.3 均匀折射率光纤的特性 .....	115
3.3.1 子午光线的传播 .....	115
3.3.2 斜光线的传播 .....	117
3.3.3 光纤的弯曲 .....	117
3.3.4 光纤端面的倾斜效应 .....	118
3.3.5 圆锥形光纤 .....	119
3.4 光纤的损耗 .....	120
3.4.1 吸收损耗 .....	120
3.4.2 散射损耗 .....	121

3.5	光纤的色散 .....	122
3.6	光纤的耦合技术 .....	123
3.6.1	光纤和光源的耦合 .....	123
3.6.2	光纤和光纤的直接耦合 .....	124
3.6.3	多模光纤通过透镜耦合 .....	125
3.7	光纤中光波的控制技术 .....	126
3.7.1	光纤偏振器 .....	126
3.7.2	光纤滤波器 .....	128
3.7.3	光纤光栅 .....	130
3.7.4	光隔离器 .....	134
3.7.5	光调制器 .....	135
3.8	小结 .....	140
	思考题与习题 .....	140
	参考文献 .....	141
<b>4</b>	<b>光传感信号处理技术 .....</b>	<b>143</b>
4.1	概述 .....	143
4.2	相位调制型光传感器的信号解调技术 .....	144
4.2.1	双光束干涉理论 .....	144
4.2.2	干涉仪的信号解调 .....	147
4.3	光纤锁相环法 .....	152
4.3.1	光纤锁相环的原理 .....	153
4.3.2	光纤锁相环系统的理论分析 .....	153
4.3.3	小结 .....	158
4.4	相位生成载波方法 .....	159
4.4.1	概述 .....	159
4.4.2	PGC 方法原理 .....	159
4.4.3	PGC 方法注意事项 .....	162
4.4.4	PGC 信号频谱分析 .....	166
4.4.5	PGC 两种方案的比较 .....	169
4.4.6	小结 .....	170
4.5	外差法 .....	170
4.5.1	概述 .....	170

4.5.2	外差法原理	170
4.5.3	外差法频谱分析	173
4.5.4	外差法的优缺点和注意事项	174
4.5.5	小结	175
4.6	干涉型光纤传感器复用解复用方法	175
4.6.1	概述	175
4.6.2	频分复用	176
4.6.3	时分复用	177
4.6.4	时分-波分复用	185
4.7	小结	186
	思考题与习题	186
	参考文献	187
<b>5</b>	<b>光传感器的封装技术</b>	<b>189</b>
5.1	概述	189
5.2	光传感器的封装方式	191
5.2.1	机械固定式	191
5.2.2	胶粘固定式	191
5.2.3	焊接固定式	192
5.2.4	金属焊固定式	192
5.3	光器件封装实例	192
5.3.1	同轴封装	192
5.3.2	蝶式封装	194
5.3.3	带尾纤全金属化封装	196
5.3.4	Mini-DiL 封装	197
5.3.5	无源对准技术	198
5.4	石英平面光路器件的封装技术	199
5.4.1	PLC 封装技术	199
5.4.2	各种 PLC 组件封装技术	200
5.5	光表面安装技术	202
5.5.1	光表面安装技术的基本结构与特点	202
5.5.2	光表面安装技术的研究进展	203
5.6	小结	204

思考题与习题·····	204
参考文献·····	205
<b>6 多传感器信息融合技术</b> ·····	<b>206</b>
6.1 概述 ·····	206
6.2 多传感器信息融合的基本原理 ·····	207
6.3 多传感器信息融合的系统结构 ·····	208
6.3.1 检测级融合结构·····	209
6.3.2 位置级融合结构·····	210
6.3.3 目标识别级融合结构·····	212
6.4 多传感器信息融合的理论方法 ·····	214
6.4.1 模型建立·····	215
6.4.2 实际系统的性能优化工具和方法·····	217
6.4.3 传感器系统及其神经网络学习算法的应用·····	219
6.5 多传感器数据融合的典型应用 ·····	219
6.5.1 基于传感器融合的反潜战·····	219
6.5.2 在线水质监测·····	220
6.5.3 多传感器直线度误差测量与分离技术·····	221
6.6 小结 ·····	231
思考题与习题·····	231
参考文献·····	231
<b>7 光电传感技术在电力系统的应用</b> ·····	<b>233</b>
7.1 概述 ·····	233
7.1.1 电力系统对传感器的要求·····	233
7.1.2 电力系统用光传感器的主要类型·····	234
7.2 光纤电流传感器 ·····	234
7.2.1 辐射内调制型光纤电流传感器·····	234
7.2.2 电热型和磁光型光纤电流传感器·····	235
7.2.3 光纤光栅电流传感器·····	236
7.2.4 三相光纤电流传感器系统的研究·····	237
7.3 光学电压传感器 ·····	237

7.3.1	主要类型、原理与结构 .....	238
7.3.2	典型应用 .....	241
7.4	光纤电功率传感器 .....	245
7.5	开关设备的传感器——非电量传感器 .....	247
7.5.1	光纤超声波传感器——局部放电定位 .....	247
7.5.2	光纤探针传感器 .....	247
7.5.3	光纤荧光传感器 .....	248
7.5.4	半导体光纤温度传感器 .....	248
7.6	典型应用及产品实例 .....	249
7.6.1	光电式高压电流传感器 .....	249
7.6.2	NxtPhase 的高压电流传感器 .....	250
7.6.3	ABB 公司的电压互感器 .....	250
7.6.4	数字光学仪用互感器 .....	251
7.7	小结 .....	252
	思考题与习题 .....	252
	参考文献 .....	252
<b>8</b>	<b>光电传感技术在石油与化工行业的应用 .....</b>	<b>255</b>
8.1	概述 .....	255
8.2	分布式光纤温度和压力传感器 .....	255
8.2.1	基于拉曼散射的光时域反射计与分布式光纤温度传感器 .....	256
8.2.2	基于光纤布拉格光栅的准分布式温度/压力传感 .....	257
8.3	井下油气水光谱分析仪 .....	259
8.3.1	概述 .....	259
8.3.2	吸收式光谱分析仪的设计 .....	260
8.4	地震勘探中的光纤传感器 .....	265
8.4.1	概述 .....	265
8.4.2	无指向性光纤声传感器 .....	265
8.4.3	光纤加速度传感器 .....	267
8.5	小结 .....	269
	思考题与习题 .....	269
	参考文献 .....	269

<b>9 光电传感技术在生物、生医生化领域的应用</b> .....	271
9.1 概述 .....	271
9.2 光生物传感器 .....	271
9.2.1 概述 .....	271
9.2.2 光生物传感器的主要类型、原理与结构 .....	272
9.2.3 DNA 传感器 .....	272
9.2.4 光学免疫传感器 .....	276
9.2.5 无标记测试传感器 .....	277
9.3 生物传感器的典型应用例 .....	277
9.3.1 表面等离子体谐振生物传感器与 SPR 分析技术 .....	278
9.3.2 生物传感器的固定化技术 .....	279
9.4 光医学传感器 .....	280
9.4.1 概述 .....	280
9.4.2 光纤体压计 .....	281
9.4.3 光纤血流计 .....	282
9.4.4 液芯光纤温度传感器 .....	284
9.4.5 医用内窥镜 .....	284
9.5 光生化传感器 .....	285
9.5.1 概述 .....	285
9.5.2 原理与结构 .....	286
9.5.3 基本类型 .....	288
9.6 小结 .....	293
思考题与习题 .....	293
参考文献 .....	293
<b>10 光电传感技术在航空航天领域的应用</b> .....	297
10.1 概述 .....	297
10.2 光纤陀螺仪 .....	298
10.2.1 开环光纤陀螺仪 .....	298
10.2.2 闭环光纤陀螺仪 .....	298
10.2.3 消偏干涉型光纤陀螺仪 .....	300
10.2.4 高精度光纤陀螺仪 .....	300



10.2.5	影响 IFOG 性能的主要误差源	301
10.3	航天飞行器姿态控制	303
10.4	自主定位导航技术	303
10.4.1	组合导航系统	303
10.4.2	机载惯性导航系统	304
10.5	精确制导武器	305
10.5.1	机载战术导弹的惯性制导	305
10.5.2	航空火力控制系统	306
10.5.3	航空弹药的制导	306
10.6	智能材料与智能结构	307
10.6.1	概述	307
10.6.2	智能材料中的光纤传感器	307
10.6.3	光纤智能材料结构工艺	310
10.7	典型应用实例	311
10.7.1	减振降噪	311
10.7.2	LN-100M 先进模式定位系统	312
10.7.3	LN-195	314
10.7.4	惯性检测单元 LN-200S	315
10.8	小结	316
	思考题与习题	316
	参考文献	316
<b>11</b>	<b>光电传感技术在国防领域的应用</b>	<b>318</b>
11.1	概述	318
11.2	光纤水听器	318
11.2.1	概述	318
11.2.2	干涉型光纤水听器工作原理	319
11.2.3	光纤水听器的种类	321
11.2.4	光纤水听器中应考虑的问题	322
11.3	光学传感器在安全防范中的应用	322
11.3.1	概述	322
11.3.2	全光纤的智能安全防范系统的设计	324
11.4	其他光学传感技术的应用	325