

高等院校电子科学与技术专业系列教材

光 纤 技 术

饶云江 主编
刘德森 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对光纤技术进行了全面的科学总结和归纳。第1章回顾了光纤技术、光纤通信与光纤传感技术的发展过程和趋势;第2章介绍了光纤光缆的一些基本特性以及现在工厂中常用的一些成缆方法;第3章从几何光学和模式理论的角度阐述了光纤的传输理论;第4章在传输理论的基础上介绍了新型光纤及其基本传输特性;第5、6章分别介绍了基于光纤的常用无源和有源光纤器件的基本原理;第7章介绍了光纤传感器的类别、传感原理、复用原理以及解调原理等,此外还介绍了几种常用的光纤传感网络的原理;第8章介绍了光通信系统的基本结构和几种比较前沿的光纤通信技术。

本书可作为光通信、光电子技术、光学工程、光学、仪器科学与技术等专业的高年级本科生和研究生教材,也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤技术/饶云江主编. —北京:科学出版社, 2006
(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-017356-2

I. 光… II. 饶… III. 光学纤维-高等学校-教材 IV. TN25

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第056838号

责任编辑:马长芳 杨然 / 责任校对:宋玲玲

责任印刷:张克忠 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第一版 开本:B5(730×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—3 000 字数:398 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

主 编 姚建铨 天津大学
副主编 吕志伟 哈尔滨工业大学
金亚秋 复旦大学
陈治明 西安理工大学

委 员 (按姓氏音序排列)

曹全喜 西安电子科技大学
崔一平 东南大学
傅兴华 贵州大学
郭从良 中国科技大学
郭树续 吉林大学
黄卡玛 四川大学
金伟琪 北京理工大学
刘纯亮 西安交通大学
刘 旭 浙江大学
罗淑云 清华大学
马长芳 科学出版社
毛军发 上海交通大学
饶云江 重庆大学
张怀武 电子科技大学
张在宣 中国计量学院
周乐柱 北京大学
邹雪城 华中科技大学
秘 书 资丽芳 科学出版社

序 言

21 世纪，随着现代科学技术的飞速发展，人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是，支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展，并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础，微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展，从初期的小规模集成电路 (SSI) 发展到今天的巨大规模集成电路 (GSI)，成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展，光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成就，成为具有强大应用背景的新兴交叉学科，至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言，光电子技术将继微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此，本世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代，是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天，面对电子科学技术的飞速发展，世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下，我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域，并在产业化方面形成了一定规模，取得了可喜的进步，为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献，在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到，在电子科学与技术领域，我国与世界先进水平仍有不小的差距，尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因，也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点，就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素，其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神，电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社经过广泛而深入的调研，组织出版了

这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色：

(1) 多层次。考虑到多层面的需求（普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学），根据不同的层次，有针对性地编写不同的教材，同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

(2) 延续传统、更新内容、基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时，注重反映该领域的最新成果和发展方向，真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

(3) 拓宽专业基础，加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围，以增强培养人才的适应性；注重实践环节的设置，以促进學生实际动手能力的培育。

(4) 适应教学计划，考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程设置为课程要求的指示精神，同时给学生留有更大的选择空间，以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

(5) 立体化。教材的编写是立体的，包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等。

本系列教材的编写集中了全国高校的优势资源，突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关学校教务处及学院的帮助，在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求，我们将对这套系列教材不断更新，以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。



教育部“电子科学与技术”教学指导委员会主任
中国科学院院士，天津大学教授

前 言

本教材为科学出版社“高等院校电子科学与技术专业系列教材”中的一部。

目前国内已出版很多有关光纤通信的教材,从国外翻译过来的教材也不少,但是真正能全面介绍光纤技术及其在通信和传感中应用的教材非常少。光纤技术和激光技术被誉为 20 世纪光学工程领域两个最伟大的成就。随着光纤技术在非通信领域(如传感)中应用范围的不断扩大,出现了很多新的光纤、光纤器件和系统以及新的光纤技术应用方向。如何把这些新的技术进展介绍给广大学生,就显得十分必要和重要。作为一门日趋成熟的科学与技术,有必要对光纤技术进行认真的科学总结和归纳,尽量在书中体现出“系统性、科学性、前沿性”,对现有的技术、理论尽可能从简描述,突出重点,深入、详尽地讨论光纤技术并兼顾其新方向、新进展。同时,结合我们自己的研究成果和经历,介绍光纤技术今后的发展方向,给学生以很好的启发。希望本教材能对光纤技术在中国的推广和普及,以及我国光纤技术的发展起到一定的作用。

在内容安排上,本书第 1 章回顾了光纤技术、光纤通信与光纤传感技术的发展过程和趋势;第 2 章介绍了光纤光缆的一些基本特性以及现在工厂中常用的一些成缆方法;第 3 章从几何光学和模式理论的角度阐述了光纤的传输理论;在传输理论的基础上,第 4 章介绍了新型光纤和光纤的基本传输特性;第 5、6 章分别介绍了基于光纤的常用无源和有源光纤器件的基本原理;第 7 章介绍了光纤传感器的类别、传感原理、复用原理以及解调原理等,此外还介绍了几种常用的光纤传感网络的原理;第 8 章介绍了光通信系统的基本结构和几种比较前沿的光纤通信技术。

本教材的参考学时为 60~ 80 学时,可作为光通信、光电子技术、光学工程、光学、仪器科学与技术等专业的高年级本科生和研究生教材。

朱涛老师和周昌学、王久玲两位研究生参与了第 1、2、7、8 章的编写;冉曾令老师和谷彦菊、李建忠两位研究生参与了第 3、4 章的编写;汪平河老师和廖弦、邓宏有两位研究生参与了第 5、6 章的编写。莫秋菊、陈容睿、唐庆涛、杨晓辰等研究生也参与了本书的编写,在此一并致谢。

本书由西南大学刘德森教授审阅。刘教授是我国最早出版导波光学专著的作者之一。刘教授认真审阅了全部文稿,并提出了中肯的意见,使本书增色不少,在此对刘教授表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些错误,欢迎广大读者指正。

饶云江
2006 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 光纤技术基础	4
1.3 光纤与通信网络	6
1.4 光纤与传感技术	9
1.5 光纤技术的发展	13
1.6 小结	19
思考与练习	20
参考文献	20
第 2 章 光纤拉制及成缆	22
2.1 光纤的分类	22
2.2 光纤材料	23
2.3 光纤的拉制	26
2.4 光纤成缆技术	34
2.5 小结	49
思考与练习	50
参考文献	50
第 3 章 光纤传输理论	51
3.1 基本结构	51
3.2 光线理论	52
3.3 模式理论	59
3.4 单模光纤中的偏振现象	71
3.5 光在非正规光波导中的传输	80
3.6 小结	86
思考与练习	86
参考文献	86
第 4 章 新型光纤和光纤的基本特性	88
4.1 不同波导结构的石英光纤	88
4.2 其他材料光纤	95
4.3 光纤的传输特性	103
4.4 小结	125

思考与练习·····	126
参考文献·····	127
第 5 章 光无源器件 ·····	129
5.1 光纤连接器·····	129
5.2 光纤耦合器·····	132
5.3 光隔离器·····	138
5.4 光环行器·····	146
5.5 光纤光栅·····	151
5.6 光学滤波器·····	162
5.7 光开关·····	167
5.8 光波分复用器件·····	172
5.9 小结·····	176
思考与练习·····	176
参考文献·····	178
第 6 章 光有源器件 ·····	180
6.1 光调制器·····	180
6.2 光源·····	184
6.3 光探测器·····	201
6.4 光放大器·····	205
6.5 小结·····	220
思考与练习·····	221
参考文献·····	221
第 7 章 光纤传感技术 ·····	223
7.1 引言·····	223
7.2 光纤法珀传感器·····	234
7.3 光纤白光干涉传感器·····	251
7.4 光纤光栅传感器·····	258
7.5 光纤陀螺传感器·····	268
7.6 其他类型光纤传感器·····	276
7.7 小结·····	279
思考与练习·····	279
参考文献·····	280
第 8 章 光纤通信技术 ·····	281
8.1 光纤通信系统概述·····	281
8.2 光复用技术·····	286

8.3 相干光通信	304
8.4 光孤子通信技术	309
8.5 全光通信网	318
8.6 小结	324
思考与练习.....	324
参考文献.....	325

第 1 章 绪 论

20 世纪后几十年,以光纤通信为代表的信息技术在信息领域内掀起了一场波澜壮阔的革命,极大地推动了人类向信息社会迈进的步伐。在这场革命中,半导体激光器、光导纤维(俗称光纤)以及掺铒光纤放大器的研制成功极大地推动了光通信的实用化,它们在光通信的发展历史上具有里程碑的意义。其中以光纤作为基础的各种技术发展尤为迅速。

本书将系统地向读者展示基于光纤的各种技术。本章介绍光纤技术的发展历程以及光纤与通信和传感的关系,从而揭示光纤在这两大领域中的广泛应用;第 2~4 章介绍光纤的成缆技术、基本特性及基本传输理论;第 5、6 章介绍基于光纤的各种有源和无源器件的基本原理、结构及简单应用;第 7、8 章详细介绍光纤传感与光纤通信方面的应用技术等,希望能给读者提供一幅比较完整的光纤技术发展蓝图。

1.1 历史回顾

在很久以前,人类就开始用火(实质是利用光)来发送消息。例如,在古代以色列,人们用火来表明一个月的开始;在中世纪早期,俄罗斯士兵用点火通报敌情;我国古代在长城上修建烽火台,通过施放狼烟通报敌人入侵等。可见,人们从远古时代就以最原始的方式试图使用光在两个较远的地点间发送某种信息。因为光的可见性和易于使用,这种传送消息(通信)的方式变得非常实用,但有限的传输距离和传输信息量使得这种原始通信方式难以得到广泛的应用。

20 世纪 60 年代早期激光的发现激发了科学家和工程师对光通信的研究兴趣,但是在空气中进行若干次实验尝试后,由于空气中水分对激光的吸收以及恶劣气候的影响,激光传输距离有限,仍然不能商业应用。很显然,人们必须找寻另外一种传输光信号的媒介或管道,只有有了这种传输光的管道才能使光通信变得实用。

在未找到光传输的管道以前,科学家和工程师先是从提高信号载波的频率入手进行研究,最后发现从无线电频率到微波的转移可以数十倍地提高一个给定系统的信息运载能力,但是,在信号载波超过 100GHz 后,微波与红外区域相重叠,这时空气中的微波衰减达到相当高的程度,以至于它只能在非常短的距离间传输,很显然,这样的系统仍然不能商业应用。

随后人们开始使用一种波导结构来传输超高频(ultra high frequency, UHF)电磁波,这些波导结构是一种横截面颇似矩形、两端开口的钢制管。在 20 世纪 60

年代后期和 70 年代早期,贝尔实验室的研究人员设计并制作出了每单元拥有 238 000 个语音信道的波导装置,尽管这些新的波导设备将原先矩形的横截面重新设计成了圆形,但它们仍是那种旧式的内径为几厘米的两端开口的钢管,从价格、安装、维护等一些实用观点来看,它们仍是十分低效的,所以这种波导装置仍然不能大规模应用。

接下来,研究人员将载波频率提高到光波的频率范围,即是将通信链路的发展推向了光传输这个人类通信史上非常重大的技术发展阶段。

当将载波频率提高到光波的频率范围时,如何对光进行导向呢?首先,需要开发一种实用的导向设备,它可以用像铜线传导电流那样的方式对光进行传输,这也就意味着要发展一种灵活且易于安装与维护的导向设备。相比于钢制波导管,灵活必须是这种潜在导向设备的关键特征。于是研究人员开始考虑光纤——一种由玻璃或塑料制成的透明易弯的长纤维,并且根据斯涅耳定律(反射定律),借助于使用全内反射可以使光能在光纤内部传输。

1870 年,英国物理学家 Joan Tyndall 验证了光可以在一个弯曲的水流中传播。这就证明了全内反射现象的存在。但是,直到 1951 年,研究人员才设计出第一个光导纤维镜(fiber scope),它可以用于传输人体内部器官的图像。1953 年,在伦敦皇家科学技术学院工作的 Narinder Kapany 开发出了用不同光学玻璃作芯和包层的包层纤维,这也就诞生了今天所用光纤的结构,“光纤”这个名词就是 Kapany 给出的。但是如果光纤要成为光导设备——基本特征是要能长距离传输,这就有一个新的问题需要解决,即光衰减(随着光的传输,光的能量减小的现象)。那就是说,当光通过长距离从输入端传输到输出端时,在输出端输出的能量一定不能小于接收端探测器能探测的最小光强。

1966 年,华裔科学家高锟(Charles Kao)博士在英国发表了一篇具有里程碑意义的论文“用于光频率的绝缘纤维表面波导管”,这篇论文被认为是打开通往光纤技术大门的钥匙。高锟博士针对当时玻璃纤维传输损耗高达 1000 dB/km 的情况指出:“这样大的传输损耗不是石英玻璃光纤本身固有的基本特性,而是由于材料中带有杂质,如含有过渡金属离子产生的。材料本身的损耗是由瑞利散射决定的,它随波长的四次方而下降,其损耗是很低的。因此,有可能制造出适用于长距离通信的低损耗光纤。如果把材料中金属离子含量的质量比降低到 10^{-6} 以下,则可使光纤的传输损耗下降到 10dB/km 以下,再通过改进拉丝工艺的热处理来提高材料的均匀性,就可以把损耗降至每千米几分贝以下。”

高锟博士的工作是光纤通信领域中的一个真正的突破,因为他明确地指出,要解决的主要技术问题是突破以往普通玻璃光纤在损耗方面的局限。一旦问题清楚了,接下来的任务就是如何制造具有低衰减的光纤。1970 年,康宁公司(Corning Glass Corporation)的 Rober Maurer、Donald Keck 和 Peter Schultz 根据高锟博士的思想,采用化学气相沉积(CVD)工艺第一个制出衰减少于 20dB/km 的光纤,与

同轴电缆 5~ 10dB/km 的损耗相比,还不能说是优秀的指标,但已是通信工程师可以接受的损耗,成为世界上公认的第一根通信用光导纤维。与此同时,以半导体砷化镓为基体的新一代激光二极管、发光二极管以及光探测器等器件也有突破性进展。它们的尺寸及光点大小均同光导纤维较为配合。尤其令人惊奇的是,这种光源发射的光波波长在 0.8~ 0.9 μm ,而二氧化硅材料光导纤维的第一个低损耗窗口也正好落在 0.85 μm 附近。两方面的研究都有急速进展。最初半导体激光二极管工作寿命极短,仅数小时,并且要在低温环境中工作。到 1973 年,已取得在室温 30 $^{\circ}\text{C}$ 连续工作 1000h 的好结果,1977 年达到 7000h。同时光纤的损耗也大幅度下降,1976 年在 0.85 μm 窗口达到 1.6dB/km,已经是同轴电缆所望尘莫及的,光纤通信开始了工业化生产及商业化应用的新时期。1977 年在美国芝加哥城的两个电话局间开通了世界上第一条商用光纤通信系统。自那时以后,技术又有很多新发展。首先是开发了损耗更低、色散量小的 1.31 μm 波长,该波长处光纤的损耗降到 0.5dB/km 左右。由于二氧化硅的材料色散同光纤的波导色散在 1.31 μm 处几乎抵消,该波长又称零色散波长。在半导体激光器方面,研究成功 InGaAsP/InP 材料的长波长器件同 1.31 μm 窗口相配合,从而使 1.31 μm 成为长途干线光纤通信的主角。近几年来,在 1.55 μm 波长处的研究又非常活跃。一个原因是二氧化硅材料系的光纤在 1.55 μm 处具有最低损耗,可以达到 0.2 dB/km,但可惜的是该点的色散较严重,限制应用带宽。为此,大量研究工作投入到所谓色散位移光纤,即改变普通单模的结构,使其零色散点由 1.31 μm 移到 1.55 μm ,以获得色散及损耗均最低的理想情况。这方面的研究以及与之配合的半导体激光器、探测器等器件均已成功。1.55 μm 波段研究工作活跃的另一个原因是近几年掺铒光纤放大器异军突起。用稀土元素铒掺杂的光纤,在 1.48 μm 或 0.98 μm 波长的较强激光功率泵浦下,通过受激辐射可以将 1.55 μm 的信号放大,做成在线光放大器,使长途干线光纤系统的设计大为改进。目前供使用的掺杂光纤放大器工作在 1.55 μm 。

至 20 世纪 80 年代初,世界各地开通的光纤通信线路已达上千条。除用作电话通信外,也用于数据传输、闭路电视、工业控制与监测,以及军事。1988 年,第一条跨越大西洋海底,连接美国东海岸同欧洲大陆的光缆开通。1989 年 4 月,从美国西海岸经夏威夷及关岛,连接日本及菲律宾的跨太平洋海底光缆开通服务。最近又有第三条跨大西洋海底光缆要投入使用。这些都是耗资若干亿美元的浩大通信工程。在陆地上的推广应用更是日新月异。工业发达国家及我国均已宣布:干线大容量通信线路不再新建同轴电缆,而全部铺设光缆。我国光纤通信起步不晚,但由于有各种限制因素,直到 20 世纪 80 年代中期才开始在推广应用及工业基础方面取得长足进步。干线系统中比较著名的有南沿海工程、沪宁汉干线、芜湖至九江(含过长江的水下光缆)、京汉广等,短距离的系统更是不计其数。在武汉、上海、西安、北京、天津等地建立了几家规模较大、水平较高的光纤、光缆制造厂,另外还有一批与之配

套的光电子器件的工厂及研究所,为光纤通信在我国广泛应用打下了基础。到2001年底全国铺设光缆总长度已达149.5万公里,其中长途干线光缆33.5万多公里,本地中继网光缆线路75.5万多公里,接入网光缆线路37万多公里。到2002年3月,我国“八横八纵”格状国家光通信骨干网也已基本建成。近两年来,我国铺设光缆的方向已经开始转向城域网等局部性网络,随着光通信的发展,我国数据传输速度和质量将进一步得到改善和提高。

1.2 光纤技术基础

虽然透镜可以弯曲光束,反射镜可以偏转光束,但实际上光束在光学仪器之间仍然是沿直线传播的,光的直线传播特性保证了照相机、人的双眼、望远镜和显微镜等结构能正确成像。有时候,我们更希望让光线绕过物体,就可以知道物体之后或者直视观察不到的地方有什么东西,也就可以将光线从一个地方传输到另一个地方,通过这种方式光就可以用来通信、观察、照明等,这就是光纤技术研究的范畴了。下面我们先来了解一些光纤方面的基础知识,这些知识在后续的章节还会详细介绍。

1. 光纤结构

光纤的基本结构十分简单。光纤的纤芯是由折射率比周围包层略高的光学材料制作而成的,如图1.1所示。这种光纤结构引起全内反射,从而引导光线在纤芯内传播。

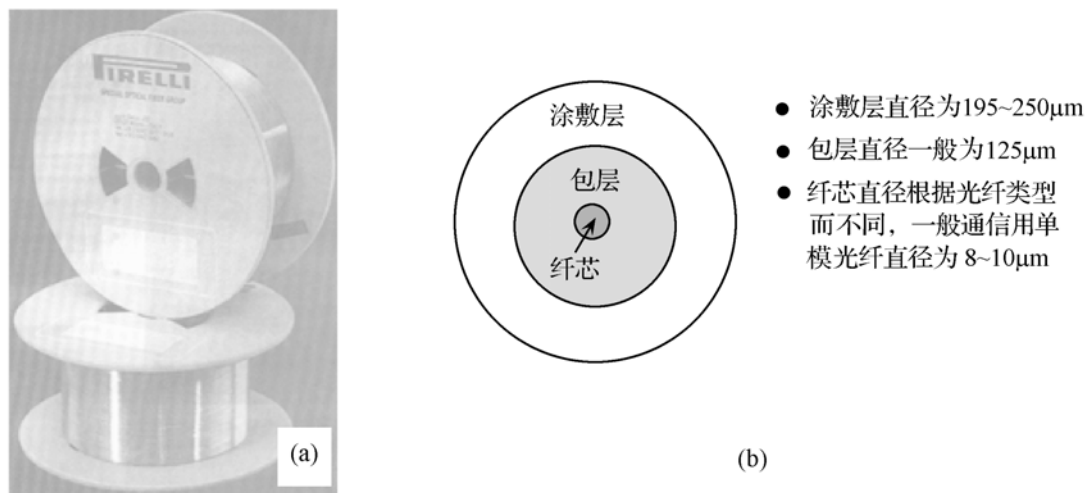


图 1.1 光纤的基本结构

(a) 整圈光纤; (b) 光纤横截面

光纤的基本结构是导光的纤芯和外面低折射率的包层,不同类型光纤的纤芯和包层的几何尺寸差别很大。用于高清晰度图像传输的光纤(传像光纤)其芯径小、

包层薄;传输高功率能量的照明光纤则一般具有更粗的纤芯和细薄的包层;用于通信的光纤则是厚包层和小纤芯,纤芯折射率到包层折射率的变化是阶跃变化,纤芯折射率可以是均匀的,也可能是渐变的;还有一些高性能光纤其纤芯和包层之间甚至有多层结构。

通信光纤的标准包层直径是 $125\mu\text{m}$,塑料护套的直径约 $250\mu\text{m}$,便于操作和保护光纤内部的玻璃表面,防止刮痕或其他机械损伤。而传像光纤束中单根光纤的直径小到只有几个微米,一些特殊用途光纤则可能有几毫米。

2. 光纤材料

多数光纤几乎是纯石英,加入少量掺杂物的目的是改变纤芯或包层的折射率。从化学的角度讲,通信用最纯的光纤材料当然是纯二氧化硅,即 SiO_2 ;医用传像光纤和照明光纤则使用低纯度玻璃制造;还有一些光纤是用塑料制造的,虽然没有玻璃光纤透明,但是更灵活易用;少数光纤使用塑料作包层材料,但一般情况下塑料都是用于机械保护的外部涂敷层。

专用光纤也有可能是用其他材料制造的。例如,对于远红外波长,氟化物比石英更透明,因此氟化物有时用于红外波段。这些光纤有时被称为玻璃光纤,因为制造光纤的材料是玻璃态或非晶态物质,但是光纤是由制造材料决定的,如氟化物玻璃光纤。

3. 光纤特性

在机械特性方面,光纤坚硬而又弯曲灵活,强度极大。细光纤比粗光纤更容易弯曲。通信光纤的尺寸可以和人的头发的粗细相比,但这种比较也得是在很粗的头发和很细的光纤之间进行。通信光纤比同样长度的人的胡须要硬得多,把它比作单丝钓鱼线很恰当。和电线不同,光纤被弯曲后还能恢复到原来笔直的形状,但光纤在受到外力牵引时不能一直延伸下去,外力过大就会折断光纤。如果光纤表面布满了裂纹,那么光纤就很容易损伤。塑料涂敷层的作用就是防止光纤表面受到机械损伤。

光纤的光学性质取决于它们的结构和成分,最明显的就是损耗或信号衰减特性,此外还有很多损害光脉冲的消极因素,这些将在第3章详细介绍。

4. 图像传输和成束光纤

光纤最初是用于图像传输的。如果光纤束的两头光纤的排列都是相同的,则光纤束可以传输图像。光纤束还可以用来传送照明光,这时光纤的排列就不重要了。

光纤束可软可硬。软光纤束由许多分离的光纤组成,两头固定中间松散(外面可能会有一层保护结构)。硬光纤束将光纤熔合成一个棒,在制造时通常弯曲成想要得到的形状。这种坚硬熔合光纤束比软光纤束的成本低,每根光纤还能做得比散

开的光纤更细,但是既不灵活也不柔软,所以很多场合不适用,比如无法用于观察病人的咽喉。

1.3 光纤与通信网络

光纤的带宽和具有吸引力的特征使其成为理想的线缆传输媒介。对于通信系统,光纤是具有强大运载信息能力的工具。它不仅为电信工业带来巨大的收益,还引发了很多革命性的变化。今天,这项技术决定了接入、传输、信令、交换和联网等技术,换句话说,它在现代电信系统中的每个方面都起着关键性的作用。因此可以说,没有低损耗光纤就没有现代电信。

很难用准确的日期来标记这项技术发展的重要转折点,因为它总是处在一个持续变化的状态。所以,对于这个不断发展的技术,昨天的新产物到了今天就变得很平常甚至落伍了。不过,通常可以确定的是,在 20 世纪 90 年代早期第一次大规模使用光纤网络(不是简单的点到点连接,而是实际的网络),所有的长途和本地电话公司都将光纤作为主要的传输介质,而电话网络依然是电信的灵魂与核心。光纤工业已进入显著的繁荣期。全世界的电信用户都想获得更大的带宽,光纤正好能够满足人们的愿望。在过去的 20 年里,一根光纤所能承载的最大数据率差不多平均每年翻一番,比电子行业的摩尔定律(每 18 个月翻一番)还要快。

1. 全球海底网络

第一条国际海底光纤链路连接了英格兰和比利时,它于 1986 年在北海海底铺设。到 1988 年年底为止,铺设了第一条连接美国和欧洲的跨大西洋海底光缆。那个项目被称为 TAT-8,它是 AT&T、英国电信、法国电信和其他公司共同投资进行的。这个链路先是从新泽西州的 Tuckerton 连到欧洲的大陆架,长度为 5600km,在那里链路分成两个分支,一支经过五百多千米连到英国,另一支经过三百多千米连到法国。这个链路可以运载 80 000 个语音信道。不过这个数字只表明它的运载信息能力,因为显然它不仅传输语音,还传输视频和数据。这条链路使用单模光纤,使用的波长是 1300nm。它的光源采用的是平均寿命可达 106h 的激光二极管。为了对付信号衰减,沿着电缆每隔 50km 安装一个再生中继器。从功能上讲,它是处理数字信号的,它分析到来的信号,判断信号是代表逻辑 0 还是 1,根据判断结果产生新的脉冲,然后将这些脉冲沿着链路继续向前发送。这样,再生中继器不停地重复到来信号的逻辑含义,并产生新的电信号来传输这些逻辑含义。为了完成这个任务,再生中继器先要将光信号转化成电的形式,对电信号进行处理,然后再把电信号转换为光信号在光纤上继续传输。

光纤是个绝缘体,它不能够直接传输电信号和能量。所以一个用来传输电能的单独导线必须包括在海底电缆中。TAT-8 项目中的导线要传输 1.6A 的电流来为

系统的中继器提供电能,这是光纤在长距离传输方面的一个缺点。

前几年在连接美国和欧洲的项目(1996)TAT-12和TAT-13中使用最新的波分复用(wavelength-division multiplexing)技术来进一步提高链路的运载信息能力。这些链路可以运载超过300 000个语音信道,几乎是TAT-8跨越大西洋链路所能运载的80 000个语音信道的四倍多。

现在,整个世界已经用一个庞大的光网络连接在一起。一个发展全球网络最好的例子是称作泛美电缆系统(Pan American Cable System)的国际项目,该网络通过国际网关把南美洲的7个国家和北美洲、欧洲、亚洲连接起来。其中加勒比海海底部分把位于美国维京岛的圣托马斯的起点与委内瑞拉、阿鲁巴岛、哥伦比亚和巴拿马相连。这段海底电缆有2700km,共安装23个再生中继器,每120km一个。太平洋海底部分将巴拿马与厄瓜多尔、秘鲁和智利相连。这一部分长4400km,共有40个再生中继器,每150km一个。链路的总长度有7300km,其中200km的电缆在巴拿马陆上铺设。

还有其他几个全球海底项目正在进行之中:Project Oxygen(氧气计划)以建立一个全球的海底光纤网络为目标;全球交叉公司(Global Crossing Ltd,GCL)正在建立一个海底和陆地的全球光纤通信网络。除前面描述过的泛美电缆系统外,泛美交叉电信电缆系统(Pan American Crossing Telecommunications Cable System,PAC)也正在连接加利福尼亚、墨西哥、巴拿马和美国维京岛的圣克罗伊,并在那里与GCL的大西洋海底网络相连。

随着几年前(2002年左右)光通信市场泡沫的破灭,全球海底光通信市场迅速跌入谷底。据TeleGeography公司统计,全球海底光缆系统的投资额2001年曾高达130亿美元,但2002年一下子跌到34亿美元,2003年预计将只有12亿美元。但是,从长远观点看,海底光通信市场还将有一定增长空间。随着通信量的不断增长,当前容量大于需求的状况终将结束,海底光缆系统将再次进入发展期,跨太平洋/亚太海底光通信尤其如此。据美国Pioneer Consulting公司的最新预测,从2002年到2012年,跨太平洋海底光缆的容量将每年增长42%,2012年可达到16Tbit/s;而亚太地区海底光缆容量在同一段时间的复合年增长率为46%,2012年将达到21Tbit/s。目前跨太平洋和亚太地区海底光缆系统的容量利用率分别为60%和58%;但Pioneer Consulting公司认为,同今后的容量不足比起来,现在的容量过剩并不严重。在出现实际的容量不足之前,将会建一些新的系统,而建设新的海底光缆系统的机会将首先出现在跨太平洋的路由上。

2. 陆地网络

显然全球光纤网络不仅包括海底段也包括陆地部分。不仅整个美国陆地已经布满庞大的光纤网络,所有其他的国家都在经历着同样的过程。另一个典型的例子是泛欧光纤网络。这个项目的目的是使用波分复用技术,用光纤网络覆盖包括东欧

和斯堪的纳维亚半岛的整个欧洲。它已经在几次现场试验中成功地将 $16 \times 10 \text{ Gbit/s}$ 的信号传输超过 500km (数字“16”表示使用的波长的数值,“ 10Gbit/s ”表示单个波长信道的能力),随着光通信技术不断发展,现在信息传输容量已经达到了数 Tbit/s ,比如在 2001 年就达到了 1Tbit/s ,2003 年实现了较长距离($8000 \sim 9000\text{km}$) $1.5 \sim 2\text{Tbit/s}$ 的传输容量。至 2010 年,大容量光纤传输系统的数字速率可能达到 10Tbit/s 。到那时,世界上才会普遍使用 Tbit/s 级数字速率,也将有较多国家和较多厂商能够制造提供 10Tbit/s 级的大容量光纤传输系统。

3. 卫星系统与光纤网络

我们知道,用卫星通信系统可以很实用地连接地球上的任何一点,那么为什么还需要一个全球光纤网络呢?那是因为与卫星通信相比,光纤通信具有两个主要优势,即它的高运载信息能力和传送信号的高速度。

我们知道,光纤具有超大的运载信息能力,比如一根光纤能达到 50Tbit/s 的速度。在 1996 年,第一次成功完成了在超过 100km 的长距离以超过 1Tbit/s 的速度传输的实验。直到今天,仍没有任何迹象表明卫星通信可以达到这样的信息传输能力。由于卫星通信需要将信号从地面站发送到卫星,再从卫星发射回地面站,这就造成了卫星通信的另一个不足——信号延迟。光纤在发送器与接收器间建立了较直接的且短得多的连接,实际上避免了延迟问题。卫星通信还有一个主要的缺陷是,它很容易被大气条件影响。

4. 光纤到户

对于本地电话网络,光纤到户就意味着所有中心局之间和所有远程终端到中心局之间的连接都是用光缆进行的。今天唯一还把铜线作为传输介质的连接就是用户的房屋与最近的中心局或最近的远程终端间的连接。这个“最后一公里”是现代电信网络的瓶颈。因为根本不可能在一夜间就把这些大约有 10 亿个铜电缆的双绞线连接用遍布全球的光纤进行替换,大家可以想像一下,仅美国一个国家就有超过 2.5 亿条线路需要更换,这是一个多么庞大的工程和一笔多么高昂的投资。但是,目前整个电信业又总在热心地讨论光纤到社区(*fiber-to-the-curb*, FTTC),光纤到户(*fiber-to-the-home*, FTTH),甚至光纤到桌面(*fiber-to-the-desk*, FTTD)的系统,那是因为光纤到户网与原有的通信网相比具有四大优势:一是光纤到户是无源网络,从局端到用户,中间基本上可以做到无源;二是高带宽、长距离正好符合运营商的大规模运用方式;三是在光纤上承载的业务种类多;四是支持的协议比较灵活。目前,世界数据业务的增长已超过话音业务,随着视频点播、数字电视等服务需求的增加,带宽将成为制约互联网性能的最大瓶颈,而光纤到户很好地解决了这一问题,接入带宽在今后相当长的时间内都能满足用户需求。2004 年 4 月,武汉电信

与烽火公司联合开通了“光纤到户·数字家庭”应用试点项目,该试点项目正式推出标志着电信运营企业 FTTH 网络建设正式起步,综合接入业务迈上新台阶,家庭数字化进程将进一步加快。2005 年 8 月,美国开始大范围部署光纤到户,近几年内,FTTH 的持续增长主要由非传统运营商推动,如公用事业公司、市政当局、房屋开发商以及一些竞争性本地交换运营商。然而,现在有很多独立本地交换运营商和至少一个老牌运营商已经开始选择光纤到户,无论在新建楼宇或者重建楼宇时他们都会考虑部署光纤到户。我们相信,随着光通信成本的进一步降低,全球光纤到户的目标必将实现。

5. 局域网

让我们现在看一下局域网(local area network,LAN)市场以及光纤通信在局域网市场中的角色。我们都知道,个人计算机的能力每更新一代都会有显著提高,而现在这样的更新似乎成为了每年都发生的事情。个人计算机的操作速度已达每秒 100 兆指令(MIPS)。还应记住的是,计算机的能力越大,它在单位时间内产生和要传输的信息也就越多。

另一个发展的趋势是将计算机进行联网,这样计算机就可以共享资源和信息。局域网、城域网(metro-polian area network,MAN)和广域网(wide area network,WAN)甚至比单个计算机能力的增长在更大程度上改变了计算机技术。

为了使 LAN 有效地工作,需要在网络上以高速度传输大量信息。一个 LAN 所需的最小传输能力据估计为 1 Mbit/s,这也就是所谓的 Amdahl(阿姆得尔)法则。但是,现在这条法则已经不再适用,因为我们现在需要 100 Mbit/s 的速率,而 LAN 通常以低得多的速率运行,影响 LAN 进一步发展的就是它们的联网结构,因为 LAN 绝大部分仍是用铜线相连的。解决方案很明显:换成光纤。到现在为止,在 LAN 中对光纤的进一步使用因其与铜线相比过高的安装费用而受到限制。不过现在所有的光纤器件——光纤、合适的塑料纤维、连接器、光电和接口设备等的价格正在不断下降。这些,再加上由于不需要复杂的编码和压缩,使用于高速纤维光传输的电子器材比较容易设计和制造,而这就使光纤与铜线竞争 LAN 市场时具有优势。

1.4 光纤与传感技术

人类已进入信息时代,信息的获取技术是信息技术的关键,传感器技术是信息技术的重要基础,传感器技术是获取信息的主要技术途径,获取信息是利用信息的先决条件。传感器是一种能按一定规律将各种被检测的物理量转换成便于处理的量(如电、磁等)的器件。世界各国对传感器技术的研究和开发都极为重视,日本将

传感器列为 20 世纪 80 年代大力发展的五项重要技术之首,又将传感器研发确定为 20 世纪 90 年代发展的重点,美、英等国也投入巨资进行传感器技术的研发。

光纤传感器技术经过二十多年的发展,已形成了一个巨大的传感器家族。光纤传感器虽然有很多优点,但交叉敏感性等问题限制了其在实际中的应用。在 20 世纪 80 年代,对光纤传感器的研究曾经一度陷入低谷。进入 90 年代以来,随着光纤及半导体集成光电子技术的发展,例如光纤光栅、各种无源和有源光波导的出现,给光纤传感器的发展注入了新的活力。现在光纤传感器已有了新的内涵,即传感部分不仅使用圆波导,还可利用光波导技术,集成电子技术将各种不同的光波导与光纤集成为一体,形成所谓的光波导传感器。以光作为传感和传导媒介的最大优势是传输容量大,抗电磁干扰,以及作为光波载体的光纤(光波导)所具有的化学惰性和柔软性。在智能材料、智能结构(smart structure)和大型结构监测、高电压、强磁场、核辐射以及生物医学等方面,光纤传感器是最具竞争力的测量手段。

经过这些年的发展,光纤传感器在科研与工业应用中已占有重要的一席之地,其最主要的原因在于光纤与金属导线之间的根本区别。这一区别使光纤具有一些独特的优点。

(1) 抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、本质安全。由于光纤传感器是利用光波传输信息,而光纤又是电绝缘、耐腐蚀的传输介质,并且安全可靠,这使它可以方便有效地用于各种大型机电、石油化工、矿井等强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中。

(2) 灵敏度高。光纤传感器的灵敏度优于一般的传感器,其中有的已由理论证明,有的已经实验验证,如测量水声、加速度、辐射、磁场等物理量的光纤传感器,测量各种气体浓度的光纤化学传感器和测量各种生物量的光纤生物传感器等。

(3) 重量轻、体积小、可挠曲。光纤除具有重量轻、体积小特点外还有可挠的优点,因此可以利用光纤制成不同外型、不同尺寸的各种传感器。这有利于航空航天以及狭窄空间的应用。

(4) 测量对象广泛。目前已有性能不同的测量各种物理量、化学量的光纤传感器在现场使用。

(5) 对被测介质影响小,有利于在医药卫生等具有复杂环境的领域中应用。

(6) 便于复用,便于成网。有利于与现有光通信技术组成遥测网和光纤传感网络。

(7) 成本低。有些种类的光纤传感器的成本将大大低于现有同类传感器。

光纤传感技术在现代科技的许多领域都具有极佳的应用前景。这些包括工业制造、土木工程、军用科技、环境保护、地质勘探、石油探测、生物医学等。对于各种不同的应用,已开发出多种光纤传感器和系统。目前常用的传感器包括旋度、温度、应变、应力、振动、声音和压力传感器等。下面我们简单介绍几类传感器,以使得读者能对光纤传感器有一个大致的了解,详细的讨论请阅读本书第7章。

1. 光纤光栅传感器

光纤光栅分布拉格光纤光栅(fiber bragg grating, FBG)和长周期光纤光栅两类。布拉格光纤光栅是一种折变周期小于 $1\mu\text{m}$ 的反射式短周期光栅,其反射谱具有线宽小、中心波长长、设计容易等优点;而长周期光纤光栅是一种周期为数十微米到毫米量级的透射式光纤光栅,其透射谱的带宽一般较大,其中心波长或幅度容易受到外界环境的影响。其基本原理请参看本书第 5 章。

应力、应变、温度、浓度等外界环境的变化将引起光纤有效折射率或光栅周期等参数的变化,从而导致光纤布拉格光栅的谐振波长发生变化,因此布拉格光纤光栅是性能优良的敏感元件,测量光栅谐振波长的变化就可获得周围环境参量的变化,并且布拉格光纤光栅的传感信息通常是以波长编码的,这使其克服了强度调制传感器必须补偿光纤连接器和耦合器损耗以及光源输出功率起伏的不足。与传统的电子或机械传感器相比,布拉格光纤光栅传感器具有灵敏度高、动态范围宽、不受电磁干扰、可靠性高、成本低、体积小、可埋入智能结构等一系列优点,特别适用于强磁场、辐射性、腐蚀性或危险性大的环境,这使其可以实现对桥梁、水坝、建筑物、飞行器、舰船、火车、矿井、油田、油罐等的实时监测,以保证其安全可靠,因此布拉格光纤光栅传感技术,特别是多参数复用传感技术越来越受到人们的青睐。

随着光纤布拉格光栅制作工艺的不断提高,特别是 FBG 自动化生产平台的建立,制作出高性能、低成本的可靠 FBG 已经成为可能。同时,随着近几年对波长解调技术的深入研究和不断成熟,已经扩大了光纤布拉格光栅传感器的应用,并为智能传感这一新思路创造了一个新的机遇。智能结构监测、智能油井和管道、智能土木工程建筑,以及智能航空、航海传感都需要高质量、低成本、稳定性好、传感特性精密的光学传感器,FBG 传感器阵列由于其波长编码、可同时测量多个物理量(温度、应力、压力等)以及一路光纤上应用波分复用技术等自身的优点在上述领域已经得到了广泛关注。世界著名的油田设备服务商 Schlumberger 和 Weather Ford 在过去的两年里,分别投资超过一个亿美元购买光纤布拉格光栅传感器技术,广泛应用于陆地油井和海上石油平台监控。同时,美国国家宇航局专门立项用此传感器对飞行器材料和结构进行优化。美国海军用此传感器对舰船潜艇结构进行监控,并在此基础上研究开发超灵敏的光纤布拉格光栅的声呐系统。目前国内外都在为光纤光栅传感器的发展而努力,国际上已经基本实现了光纤光栅传感器的产业化和工程化,如 MOI、CiDRA、Weatherford 等,而国内主要集中在一些研究单位,如重庆大学、北方交通大学、哈尔滨工业大学、南开大学及黑龙江大学等。

人们在光纤布拉格光栅传感应用中发现其存在一定的局限性,比如对某些参数灵敏度不够高,对单位应变或温度的改变所引起的波长漂移较小,因而需要高分辨率的光谱分析仪器,此外由于光纤布拉格光栅是反射型光栅,以致光纤布拉格光栅传感系统通常需要隔离器来抑制反射光对测量系统的干扰。自长周期光纤光栅

问世以来,人们发现长周期光纤光栅是一种透射型光纤光栅,无后向反射,在传感测量系统中不需隔离器。此外,与人们熟知的光纤布拉格光栅不同,长周期光纤光栅的周期相对较长,满足相位匹配条件的是同向传输的纤芯基模和包层模,这一特点导致了长周期光纤光栅的谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感,具有比光纤布拉格光栅更好的温度、弯曲、扭曲、横向负载、浓度和折射率灵敏度。因此,长周期光纤光栅在光纤传感领域具有和光纤布拉格光栅传感器互补的优点。

2. 光纤法布里-珀罗传感器

光纤法布里-珀罗(以下简称法珀)传感器(optical fiber Fabry-Perot sensor)是目前技术成熟、应用非常广泛的一种光纤传感器。它是在光纤内制造出两个高反射层,从而形成一个腔长为 L 的微腔。当相干光束沿光纤入射到此微腔时,光纤在微腔的两端面反射后沿原路返回并相遇而产生干涉,其干涉输出信号与此微腔的长度相关。当外界参量(力、变形、位移、温度、电压、电流、磁场……)以一定方式作用于微腔,使腔长 L 发生变化,导致其干涉输出信号也发生相应变化。根据此原理,就可以从干涉信号的变化导出微腔的长度,乃至外界参量的变化,实现各种参量的传感。例如,若将光纤法珀腔直接固定在形变对象上,则对象的微小形变就直接传递给法珀腔,导致输出光的变化,从而形成光纤法珀应变/应力/振动等传感器;若将光纤法珀腔固定在热膨胀系数线性度好的热膨胀材料上,使腔长随热膨胀材料的伸缩而变化,则构成了光纤法珀温度传感器;若将光纤法珀腔固定在磁致伸缩材料上,则构成了光纤法珀电压传感器。

3. 光纤白光干涉传感器

在光学测量领域中,基于光纤干涉的测量系统已成为物理量检测中最为精确的系统之一。在这些测量系统中,最常使用的是各类单模(或窄频带)高相干激光设备,如单模氦氖激光器作为光源的长相干测量系统。这类系统的特点是采用激光波长为标准量,在精密测量条件下,可达纳米级至埃米级测量精度,但由于受光学传递函数(OTF)的周期影响,这类系统的单值动态范围一般很小。而且,由于测量系统在重新启动时无法识别出干涉级的级数,因此只能对物理量进行相对测量。同时,这类系统对温度、湿度、压力等外界环境要求苛刻,结构复杂,成本高。相比之下,采用低相干光源的白光干涉测量则能解决其中的一些难题,它不仅可用来对物理量进行绝对测量,而且能使传感器的动态范围得以扩展,分辨率得以提高。近年来,人们在研究及发展白光干涉测量系统方面已进行了大量的工作,使这类系统不断得到完善。

白光干涉测量是使用低相干、宽谱光源,如半导体激光器(LD)或发光二极管(LED)。所以这种传感方法通常称为“白光”干涉测量方法。同所有的干涉原理一样,光程的改变可以通过观测干涉条纹来进行分析。

第一个完整的基于白光干涉技术的位移传感器是在 1984 年报道的,该工作显示出白光干涉测量技术可以应用于任何可以转换成绝对位移的物理量的测量,并且具有很高的测量精度。在 1985~ 1989 年,基于白光干涉原理的传感器被广泛用于压力、温度和应变测量的研究中。

4. 光纤陀螺传感技术

光纤陀螺是一种新型角速度敏感元件,与激光陀螺相比,光纤陀螺无闭锁,易于微型化,可用于不同精度应用场合而保持较低的性能价格比。自 1976 年 Vail 和 Shorthill 首次报道了光纤陀螺后,近二十年来,人们对光纤陀螺中存在的物理现象已理解清楚,一些关键技术问题已经解决。目前,一些低中精度光纤陀螺已在市场上出售,高精度光纤陀螺也正在投入生产。

光纤陀螺分为干涉型和谐振型两种。谐振型陀螺有一些难以解决的技术难题,离实用还有一段距离。

5. 其他光纤传感技术

除了上面介绍的几种光纤传感技术外,近年来,还发展了一些新型的光纤传感技术:① 基于光子晶体光纤传感技术,它可以用于一些气体的检测,可以用于曲率传感,以及用于增强双光子生物传感等;② 基于聚合物的光纤传感技术,它可以用作安全检测传感器、湿度传感器、生物传感器、化学传感器、气体传感器、露点传感器、流量传感器等,此外,聚合物光纤还可以用于传感和测量一系列重要的物理参量,包括辐射、液面、放电、磁场、折射率、温度、风度、旋度、振动、位移、水声、粒子浓度等;③ 基于光纤激光器的有源腔传感器,比如利用 Ring-Down 腔技术可以进行吸收谱分析的测量,其灵敏度可以达到 1ppm^* (10^{-6})。现在 Ring-Down 腔测量分析技术已经被广泛应用于测量各种吸收,如等粒子体、火焰辐射、超声喷射和气体分子吸收等。

*

1.5 光纤技术的发展

1. 光纤的发展

在光纤种类方面,从最早研究的多模光纤,到现在的单模光纤、保偏光纤、掺杂光纤、塑料光纤、光纤晶体光纤等已形成数十种不同种类的光纤来满足人们对不同应用场合的各种需求。目前在光纤通信中用得最多的是常规的石英光纤,已有一套相当完善的生产工艺和一系列国际标准,技术已相当成熟,光纤技术研究正快速向

* ppm 为无量纲值,一般表示“ $\times 10^{-6}$ ”,也可根据具体情况表示 $\mu\text{g}/\text{g}$, mg/L , $\mu\text{L}/\text{L}$, mg/m^3 ...

具有新型传光机理的光子晶体光纤、具有特种功能的聚合物/塑料光纤和掺杂光纤,以及针对特殊应用背景的特种光纤等方向发展。

1) 聚合物/塑料光纤

聚合物光纤又名塑料光纤,具有较粗的芯径(0.3~3mm),并且具有柔韧性好、连接方便、耦合效率高等特点,加上其具有高带宽、耐震动、抗辐射、价格便宜、施工方便等优点,已成为短距离信息传输的理想传输介质之一。现已有多种聚合物光纤商用产品面世,并越来越广泛地应用于汽车总线布线、家庭网络、工业自动化、传感器、小型光盘系统和个人计算机中。

国外在聚合物光纤的应用开发上已取得了较大的成果,且在不断增加新的应用研究投入,我国大陆以及台湾地区已经有厂商开始进行研发生产。国内主要有中国科技大学、中国科学院化学研究所、中国科学院理化所、南京玻璃纤维设计院、中国科学院西安光学精密机械研究所等院校和研究所相继开展了聚合物光纤和器件的研究工作。现已有国内研制的聚合物光纤链路系统(主要由聚合物光纤波长转换器、聚合物光纤中继器、聚合物光纤交换机和聚合物光纤网卡等器件组成)投入实际局域网现场应用。2003年四川汇源光通信股份有限公司开发了PMMA阶跃型塑料光纤,采用光学级PMMA芯材与低折射率的高透明氟树脂包层材料,通过共挤法生产PMMA阶跃型塑料光纤,其应用领域主要有照明装饰、汽车工业、消费电子、短距离数据通信、工业控制、军事、航空航天。

聚合物光纤(POF)的传输带宽、温度稳定性和长期可靠性是其在短距离信息传输应用中的主要问题。人们提出了梯度折射率聚合物光纤(GIPOF),它既增加了POF的带宽又保持了POF的大芯径优势,在可见光波段损耗不到10dB/km,带宽可达1GHz·km,并可在-40~80℃范围内稳定工作。显然,GIPOF的损耗衰减和带宽还可进一步改善,这与其制造工艺和方法密切相关。澳大利亚新威尔士大学G. D. Peng教授带领的研究小组一起致力于单模塑料光纤的研究,目前他们已经拉制出单模塑料光纤样品,并对其基本特性进行了广泛的研究,取得了一些非常有意义的进展,单模光纤的发展为实现家庭、办公室等小型网络的全光纤连接提供了更低成本、更方便的连接工具。

功能聚合物光纤与器件的研究是目前聚合物光纤领域中的研究热点之一,在光纤通信和传感领域具有重要的应用前景。根据聚合物材料多样性、掺杂发光效率高、光学非线性强以及响应时间快等特点,可以研究用于有源和无源聚合物光纤器件的特种功能光纤,包括聚合物光纤跳线/连接器和耦合器、聚合物光纤光栅、聚合物光纤自聚焦透镜阵列、聚合物光纤放大器等。

此外,最近两年在功能聚合物光纤领域中又出现了一种微结构聚合物光纤——聚合物光子晶体光纤,并逐渐成为聚合物光纤的研究亮点。这种微结构聚合物光纤通过沿着光纤轴向均匀而截面上周期性分布的空气孔来限制光线在波导中的传播。微结构聚合物光纤(MPOF)与石英光纤中的光子晶体光纤相比有着独特

的优势:在拉丝温度下其材料的表面张力和黏性有着很好的平衡性使空气气孔不易遭到破坏,气孔排列结构的紧密性要求降低,利用聚合物材料本身具有较低的加工温度和良好的裁剪性可选择多种设计材料等。

2) 光子晶体光纤

光子晶体光纤(PCF)的概念在 1991 年首次被提出,五年后,P. Russel 教授领导的科研小组制造出了第一根光子晶体光纤的样本,随后引起了全世界的关注,尤其在光纤通信和光纤研究领域。光子晶体光纤按结构特点或导光机理可分为折射率导光型实芯 PCF 和光子能隙导光型空芯 PCF,前者研究得最多。光子晶体光纤衰减是该新型光纤实用化的关键,目前在 1550nm 波长的衰减最低值已降低到 0.37 dB/km。现在丹麦等国家已经能够提供商品化 PCF。

光子晶体光纤是在光子晶体研究的基础上发展起来的新型光波导材料,这种新型光纤的突出特性已经突破了传统光纤技术的主要准则,使光纤性能得到飞速提高,具有十分重要的研究和应用价值。

PCF 在光纤通信系统中主要有两方面的应用潜力:传输光纤和光纤器件。前者的研究重点是改进制造工艺、降低光纤衰耗等,后者主要是通过调整 PCF 结构尺寸来实现 PCF 光器件所需要的性能指标。PCF 可以构成光纤激光器和光纤放大器,已取得研究进展的 PCF 与光纤通信相关的应用还有:光波长变换、拉曼放大器、光孤子激光器、光纤光栅和连续谱超宽带光源等。

PCF 现已进入实验室的光纤通信系统传输实验研究阶段。NTT 公司的研究人员利用 PCF 组成 10km 的线路进行了 $8 \times 10\text{Gbit/s}$ 的波分复用传输实验,试验效果良好;C. Peucheret 等人的研究小组利用 5.6km 的 PCF 线路进行 1550nm 的 40Gbit/s 的传输实验。PCF 具有的低损耗、低色散和低非线性效应等特性,使其在光纤通信领域的应用是非常有前途的,将有可能成为光纤通信中的下一代光信号传输介质。

光子晶体光纤在光纤传感领域方面一样具有非常广阔的发展前景,因为光子晶体光纤具有极大的传输带宽,因此它在扩大光纤传感系统容量方面(如采用波分频分方法)具有很大的应用前景;另一方面,可以在光子晶体光纤上写出光纤光栅(FBG 和 LPFG),掺铒光纤光栅在传感领域具有十分广泛的用途,在光子晶体光纤上还可以加工出法珀腔,因此,也可以将干涉技术应用于传感领域,也可以在光子晶体光纤上加工各种各样的微传感结构。再考虑到光子晶体光纤独特的一维传光模型,光子晶体光纤在光纤传感领域的应用必将更加广泛。

因此,目前有关 PCF 的研究重点是:理论模型、制造工艺、性能测量、实验研究和工程技术应用探索(如光纤通信与光纤传感)等。

3) 其他光纤

光纤通信是如今信息时代“信息高速公路”的支柱,具有低损耗、高带宽的特性的光纤已成为了现代通信网络中的最佳传输介质。通信光纤技术的发展体现在光

纤材料、制造工艺、性能和品种等几个方面。通信网络、系统设备和光器件的共同发展必然推动适应不同通信需求的新品种光纤的不断出现。最新通信用光纤主要有：

(1) 宽带光传输非零色散位移光纤(G. 656 光纤):它实质上是一种宽带非零色散平坦光纤。与 G. 655 光纤相比,其工作波长更宽(1460~ 1625nm),可承载更多的复用信道数;更合理的正色散值,可抑制 FWMF 等非线性效应;更小色散斜率,可降低系统色散补偿成本。2003 年武汉邮电科学研究院通过调整纤芯与内包层折射率环间的下凹环宽度与深度研究出了 G. 656 光纤。可工作在 WDM 系统 S+ C+ L 波段上的核心网。

(2) 色散补偿光纤(DCF):为了满足长途核心网 DWDM 系统应用中色散补偿光纤必须补偿传输光纤整个工作波长的色散要求,人们研究出了具有负色散且色散斜率可与传输光纤色散斜率匹配的新 DCF。OFS 公司根据耦合模理论(不同于传统的包层/芯传输特性理论)研制出了更贴近实际系统(传输光纤+ DCF)传输特性的新的 DCF。表征 DCF 关键性能的参量有品质因数(FOM,色散衰减比)、宽波长色散补偿性能(DOS,色散与其斜率比)和非线性效应抑制能力等。新型 DCF 的研究重点是寻求能够平衡上述性能指标的最佳方案,实现在 C+ L 波段上、甚至在 S+ C+ L 波段上的最佳补偿。

(3) 无水峰纯硅芯非色散位移光纤:DWDM 和 CWDM 技术在城域网/接入网中的混合应用逐渐增多,在适应城域网多业务、大容量和中等传输距离通信的同时,由于两种技术指标的不同,一直存在兼容互通问题。采用无水峰纯硅芯非色散位移光纤(PSCF,纯硅芯光纤)实现整个波段 1280~ 1675nm 通信,是解决问题的一个方面。目前光纤通信中可使用的低水峰光纤有 G. 652C 和 G. 652D,纯硅芯非色散位移光纤(PSCF)有 G. 654 光纤,在此基础上设法通过改善其制造工艺消除水峰,就可以获得衰减最小和工作波长很宽的无水峰 PSCF。日本住友公司已研究出一种满足 G. 652D 性能的无水峰 PSCF。

(4) 宽工作波长多模光纤:目前的多模光纤工作在 850/1300nm 的窄工作带宽上,限制了局域网和存储区域网的容量或距离的提高,而一些工程应用如校园网等需要将数据传输更长的距离,可以采用 1300/1550nm 宽工作波长的 50/125 μ m 多模光纤。通过提高芯折射率分布控制精度或共同掺杂的方法可达到扩大多模光纤工作波长范围的目的。

(5) 掺稀土光纤:掺稀土光纤以其芯径大小与通信光纤匹配、耦合容易且效率高、可形成传输光纤与有源光纤一体化为特点,在光纤激光器、放大器和传感器中有着广泛的应用。稀土元素具有外电子满壳层结构,其离子通常以三价电离态出现,在光场和磁场方面具有不同于其他光活性离子的重要性质:亚稳态的寿命较长、量子效率高等。目前大多数掺杂光纤与通信光纤使用相同的石英玻璃材料,其中掺铒、掺镱和掺铥光纤有相对较多地应用。

2. 光纤通信技术的发展

在光纤通信方面,现在有三个快速发展的趋势与光纤网络相关。

第一是光网络容量的迅速增加。目前提高网络容量的主要技术是波分复用(wavelength-division multiplexing, WDM)技术和时分复用(time-division multiplexing, TDM)技术。波分复用是指将几个波长不同的信号在一根光纤上传输。时分复用技术是利用一路光载波,将若干个信号源发出的光脉冲在时间上进行等间隔的交叉排列,从而在单根光纤线路中形成一个超高速的综合光脉冲序列。随着光纤技术的发展,光纤可利用的带宽资源已经大大提高,目前全波光纤的可利用带宽已经达到400nm。光带宽资源的增加同时带动了光放大技术的迅速发展,目前宽带光放大技术受到了研究人员的重视,特别是光纤拉曼放大技术。WDM技术也发展为密集波分复用(各通道间的频率间隔在200GHz以下)。单信道的速率已经从2.5GHz发展到40GHz,最近几年已经有单信道速率为640GHz的实验报道。

第二是各种数据业务的迅速增加。今天,除了传统的语音业务外,很多其他的业务(如视频业务)迅速增长。随着这些业务量的迅速增加,光网络也从开始的准同步数字体系(PDH)发展到了同步数字体系(SDH)。目前很多光通信公司都在研究基于SDH的多业务传送平台(MSTP)。光包交换技术和光突发交换技术等在最近几年也取得了长足的发展。

第三是全光网络的发展。全光网络是光通信发展的终极目标,通过全光网络几乎可以将全球的信息方便、快速地互联起来,从而真正实现信息世界的目标。但是全光网络的发展首先要有各个全光器件和子系统的发展,比如全光光开关、增益均衡器,上/下分路器,以及全光交换机等。目前世界大多数国家都为此投入大量资金进行研发。

所有这些发展的结果就是各地之间的传输链路到设备内部的连接在任何地方都能发现光纤。例如,在现代信令机(SS7)中发现光纤链路;公用事业和天然气工业是光纤的用户;汽车业和航天业越来越多地利用光纤进行通信。毫无疑问,你能够根据自己的经验举出很多例子。

3. 光纤传感技术的发展

光纤传感技术是伴随着光导纤维和光纤通信技术发展而形成的一门崭新的传感技术,现在正在成为一个研究热点。我们知道,光纤传感器的传感灵敏度要比传统传感器高许多倍,而且它可以在高电压、大噪声、高温、强腐蚀性等很多特殊环境下正常工作,还可以与光纤遥感、遥测技术配合,形成光纤遥感系统和光纤遥测系统。光纤传感技术是许多经济、军事强国争相研究的高新技术,它可广泛应用于国民经济的各个领域和国防军事领域。

光纤传感器的发展与光纤通信的发展密切相关,因为光纤通信的许多基础技

术和元器件如光源、光纤、耦合器、连接器、接收器等都可以用到光纤传感器上。但是,光纤传感器有许多与光纤通信不同的特殊问题,这些问题的研究和解决推动着光纤传感器的发展。

从目前国内外发展态势可以看出光纤传感器的研究有如下的动向:

1) 深入研究传感理论和技术,解决实用化问题,发展新原理的光纤传感器

光纤传感器基本原理的研究日益深入,强度、相位、波长调制的传感器更加完善。传感器用于实际测量的主要问题是长时间漂移效应,人们对此进行了深入研究,提出了许多解决办法。漂移效应来自光纤传输线的衰减、耦合器和分束器特性不完善、光源输出不稳定及探测器的响应等。为了从技术上解决漂移问题,人们对光纤传感头的固有调制形式进行了研究,例如,采用参考光路引入参考信号可解决由于光学结构的漂移特性对测量的影响。对于不同调制方法的传感器有着不同的参考光路。采用参考通道和信号通道的波长多路传输和空间多路传输的先进技术,通过必要的调节,可以确保光纤传感系统达到完全平衡。无论采用何种方式,在传感头上使用“比较”技术,使光纤传感器获得长时间的稳定,这样,就可以使光纤传感器实用化。

2) 开展多参数传感及分布式传感网络系统的研究

单一光纤传感器的研究已进入实用化阶段,但它无法适用于多参数、多变量的测量,而实际的被测对象常需要测量几个不同的参量,比如飞机发动机的运行状态监控,就需要同时监控它的温度、应变、压力等各种物理参量,如果采用分离的传感器进行测量,则会提高系统的复杂性和监控成本,也会降低系统的可靠性,如果能够研究设计出可以同时测量几个物理量的传感器,就可以大大降低系统的复杂度和成本。目前多参数传感技术已引起了国内外学者的广泛关注,国内清华大学、重庆大学等高校和研究所也在从事这方面的研究。

另一方面,有些大型结构如桥梁、大坝、坡体等需要大量的传感器对它进行多点、多层次的连续实时监控,这就需要大容量实时性强的传感网络系统,这是目前国内外学者研究的热点,由于光纤传感器具有普通传感器无法比拟的优点而成为了目前最具发展潜力的网络传感器系统。

光纤传感器系统的一种形式是采用多路传输的光学无源传感器系统,其核心问题是如何节省光路,寻求可能更有效利用的信息通道,使其能不畸变地更多地传输由各个光纤传感器取得的信息。利用光纤之间、几个无源传感器之间、数据遥测通道之间的多路传输可达到此目的。

多路传输大致有三种基本结构:其一是采用时分多路传输结构。空间上分离的多个光纤传感器用相同的光纤连接在同一无源信号通道上,所有的传感器都被调制成同一光特性(如强度),在工作时间内实现多路传输;其二是正交传播调制的局部多路传输,这一类结构可分为偏振态调制、波长刻度和两个正交干涉等形式,这种多路传输系统在国外已实现了多参数的测量;其三是采用光纤被覆技术,如改变

光纤上的被覆层能使声传感器变为磁场或其他类型的传感器。在同一根光纤上采用不同的被覆层构成的多路光纤传感器,将在油田勘探、武器制造和工业控制方面得到广泛应用。

光纤传感器具有与光纤遥测技术的内在相容性的优点,它可以与现有的光纤数据传输组成光纤遥测系统。如用一组光纤液面或流量传感器与遥测装置相结合对易燃、易爆等液面和流量进行检测与控制。

3) 研究功能完善、可靠性及稳定性高的基础元器件

(1) 开发光纤传感器用的特殊光纤。光纤传感器的种类繁多,应用范围极广泛,因此所要求的光纤的种类不是单一的,而是具有多种不同特性,比如低双折射光纤(旋光纤)、高双折射光纤、圆双折射光纤(螺旋光纤)、椭圆双折射光纤、特殊涂敷光纤、特殊掺杂光纤、特殊芯结构光纤、红外光纤、塑料光纤、传像束、光子晶体光纤等。随着科学技术的发展,光纤制造工艺不断地改进,可以预测将会出现更多的特殊光纤以满足光纤传感器的需要。

(2) 提高有源和无源器件的稳定性、可靠性。由于近几年来特殊光纤的不断发展,光纤传感器应用的有源、无源器件发展十分迅速,这包括偏振器、耦合器、探测器、光源、连接器以及各种光学器件。目前,国内外用于光纤传感器的基础元器件大部分都已商品化,其稳定性和可靠性大都能满足光纤传感器的要求。

(3) 深入研究检测系统。检测系统的目的是把光纤传感器的信号输出转换为正比信号场变化的一个电信号,一般来说,振幅型传感器的检测系统比干涉型传感器的检测系统简单。由于干涉仪传感器输出的是光的相位信息,这一信息可以变化干涉条纹或与相位有一定关系的振幅,因此带来检测系统的复杂性。

我们可以想像,随着世界各国对光纤传感技术的重视,以及众多科研人员的潜心研究,光纤传感器将广泛应用于世界各国的军用和民用产品上。

1.6 小 结

本章介绍了光纤技术的发展历程、光纤与通信技术的关系,以及光纤与传感技术的关系,从中你可以了解到经过人们不断的探索和钻研,一项新的技术——光纤技术得到了迅猛发展。它的发展,一方面极大地改变了人们的通信方式,并且,随着时间的推移,这种变化还在不断加强;另一方面也大大地改变了人们获取未知世界秘密的方式,这就是光纤传感器件及系统的发展。

光纤技术是现今世界非常热门的技术,有数十万的研发人员、工程技术人员在为之而努力工作。我们也衷心地希望读者朋友们能够从本书感受到这种变化,并且能从本书出发,为光纤技术的发展贡献自己的微薄之力。

思考与练习

1. 如何定义光信道?
2. 光纤技术是如何发展起来的?
3. 通过本章的学习,对于光纤,你了解了些什么?
4. 光纤在通信中有哪些应用?
5. 光纤在传感中有哪些应用?
6. 除了本章介绍的光纤应用技术,你还知道或者你认为光纤还有些什么用途?

参考文献

- 陈伟民等. 2003. 大型民用基础设施健康检测光纤传感器的发展及应用简况. 中国光电, 1: 43~ 49
- 靳伟, 廖延标, 张志鹏等. 1998. 导波光学传感器:原理与技术. 北京:科学出版社
- 靳伟, 阮双琛等. 2005. 光纤传感技术新进展. 北京:科学出版社
- 李玉权, 崔敏. 2002. 光波导理论与技术. 北京:人民邮电出版社
- 刘德森等. 1987. 纤维光学. 北京:科学出版社
- 王惠文. 2001. 光纤传感技术与应用. 北京:国防工业出版社
- 杨祥林. 2000. 光纤通信系统. 北京:国防工业出版社
- 张志鹏, Gambling W A. 1991. 光纤传感器原理. 北京:中国计量出版社
- 赵梓森. 1998. 光纤通信工程. 北京:人民邮电出版社
- Ahmed K. 1992. The Telecommunications Fact Book and Illustrated Dictionary. Albany, N. Y. : Delmar Publishers
- Bennion I, Williams J A R, Zhang L et al. 1994. UV-written in-fiber Bragg gratings. Opt. Quantum Electron, 28:93~ 159
- Bergano N. 1998. WDM long haul transmission systems. Paper TuF. Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC 1998), SanJose
- Bjarklev A, Broeng J, Bjarklev A S. 2003. Photonic Crystal Fibres. Kluwer Academic Publishers
- Born M, Wolf E. 1986. Principle of Optics. 6th ed. New York: Pergamon
- Butler K H. 1980. Fluorescence Lamp Phosphors. Pennsylvania State University Press
- Carroll R, Coccoli C D, Cardarelli D, Coate G T. 1986. The passive resonator fiber optic gyro and comparison to the interferometer fiber gyro. SPIE Proceedings, 719: 169~ 177
- Danielson B L, Whittenberg C D. 1987. Guided-wave reflectometry with micrometer resolution. App. Opt., 26: 2836~ 2842
- Delisle C, Cielo P. 1975. Application de la modulation spectral a la transmission de l'information. Can. J. Phy., 53: 1047~ 1053
- Donald B K, Milton C. 1988. Recollections of a leading fiber-optics pioneer. Photonics Spectra:30~ 31
- Grattan K T V, Zhang Z Y. 1995. Fiber Optic Fluorescence Thermometry. London: Chapman & Hall
- Hill K O, Fujii Y, Johason D C et al. 1978. Photosensitivity in optical fiber waveguide: application to reflection filter fabrication. Appl. Phys. Lett., 32(10): 647~ 649
- John Bray. 1995. The Communications Miracle (The Telecommunications Pioneers from Morse to the

- Information Super Highway). New York:Plenum Press
- Knight J C et al. 1996. All silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. Optics Letters, 21: 1547~ 1549
- Matthias Berger et al. 1997. An-European optical networking using wavelength division multiplexing. IEEE Communications Magazine; 82~ 87
- Patrick Trischitta, Antonio Medina, Roberto Remedi. 1997. The pan american cable system. IEEE Communications Magazine; 134~ 140
- Peng G D et al. 1996. Broadband tunable optical amplification in Rhodamine B-doped step-index polymer optical fibre. Opt. Communications, 129:353~ 357
- Peng G D, Li A D. 2001. Laser activity in polymer optical fibres doped with new organic material. Proc. of Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS'2001, Osaka, Japan, 497
- Rai Y J. 1997. In-fibre Bragg grating sensors. Meas. Sci. Technol., 28:355~ 375
- Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, Zhu T. 2003. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses. J of Lightwave Technology, 21: 1320~ 1325
- Rao Y J, Zhu T, Wang Y P, Jiang J, Hu A Z. 2004. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication. Optics Communications, 229: 209~ 221
- Takada K et al. 1987. New measurement systems for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique. Appl. Opt., 26: 1603~ 1606
- Vali V, Shorthill R W. 1976. Fiber ring interferometer. Applied Optics, 15: 1099~ 1100
- Youngquist R C, Carr S, Davies D N. 1987. Optical coherence domain reflectometry: a new optical evaluation technique. Opt. Lett., 12: 158~ 160
- Zhu Y et al. 2003. Health monitoring system for dafosi cable-stayed bridge. Proc. of SPIE, 5057