

光纤理论与技术

曾甫泉 编著

1

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书从工科专业共有的数理基础出发,注重基本概念和工程实际相结合,系统地讲述了光纤理论与技术的基本知识。

全书共9章,主要内容有:导波理论基础,光纤模式理论,耦合模理论导引,单模光纤,光纤与光源的耦合和光纤接头,光纤线路设计及光纤测量技术。

本书可作为大专院校工科电子类专业大学生和研究生教材,也可供从事光纤通信研究、设计、制造和运用的工程技术人员参考。

“ 光纤理论与技术

曹甫泉 编著

· 责任编辑 王新安

西安交通大学出版社出版

(地址: 710049)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经销

开本 787×1092 1/32 印张 10.5 字数: 218 千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 7-5605-0350-0/TN·19 定价: 2.10 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学科教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的

出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类教材办公室

前 言

光纤通信已进入全面实用化阶段,我国光纤通信技术已达到能建设中、长距离单模光纤通信系统和规划局部光纤网的水平。光纤的非通信应用,特别是光纤传感器也受到各方向的重视。以光纤通信为龙头,在研究和引进国外先进技术的基础上,南方、北方和中原都成立了开发光纤通信技术的集团,我国的光纤技术产生正在逐步形成中。

纤维光学或光纤理论与技术是各种光纤应用的理论基础。自光纤问世以来,特别是近十几年来,纤维光学已发展成一门分支学科,成果累累,方兴未艾。

光纤技术的应用与开发带有跨行业和专业交叉的特点,不同专业的学生和工程技术人员从他们各自的工作需要出发,对光纤理论与技术这门课的内容、深度和广度有不同的要求。以此为目标,作者在多年教学和科研实践的基础上编写了本书,并蒙原电子工业部教材编审委员会电磁场理论教材编审小组评选,推荐为工科电子类专业教学用书,奉献给读者。

本书系统地阐述了光纤理论与技术的基础知识,虽未论及平面或薄膜光波导,但有了本书的知识,读者不难举一反三,参阅有关书籍或文献,迅速掌握平面光波导的基本知识。

本书的初稿蒙中国科学技术大学钱景仁教授悉心审阅,提出了许多修改意见,对本书定稿帮助极大,特此向钱景仁

教授致谢。

作者学识水平有限，本书难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

曾 甫 泉

于武汉邮电科学研究院

1989年1月

目 录

第一章 光纤通信概述

§ 1.1	历史沿革及发展方向	(1)
§ 1.2	光纤的结构和导光机理	(4)
§ 1.3	光纤通信系统	(11)
§ 1.4	光纤干线网和局部网	(18)
§ 1.5	光纤的其他应用	(22)

第二章 导波场论和几何光学基础

§ 2.1	矢量波动方程	(25)
§ 2.2	波导中的场方程和边界条件	(30)
§ 2.3	模场及其分类	(35)
§ 2.4	平面波和射线	(37)
§ 2.5	平面波的斜入射	(50)
§ 2.6	几何光学——波动光学的极限	(64)

第三章 多模光纤的射线分析

§ 3.1	光纤中的射线模	(68)
§ 3.2	射线模的轨迹方程	(72)
§ 3.3	模的分类	(75)
§ 3.4	射线轨迹参量	(81)
§ 3.5	本地平面波和色散方程	(83)

§ 3.6	多模光纤中的模数	(88)
§ 3.7	梯度光纤	(91)

第四章 光纤的波动分析

§ 4.1	波动分析的基本步骤	(102)
§ 4.2	弱导光纤中的场模	(106)
§ 4.3	弱导光纤中的简化模	(111)
§ 4.4	场模的特性和参量	(116)
§ 4.5	阶跃光纤和抛物光纤	(121)
§ 4.6	幂级数法	(127)
§ 4.7	变分法	(129)
§ 4.8	有限元法	(136)
§ 4.9	微扰法	(142)
§ 4.10	等效阶跃光纤法	(149)
§ 4.11	矢量解和标量解之间的偏差	(152)

第五章 耦合模理论导引

§ 5.1	模式展开法和幅度耦合方程	(155)
§ 5.2	耦合系数的计算	(164)
§ 5.3	耦合模方程的微扰解	(175)
§ 5.4	周期介质光波导中的模耦合	(177)
§ 5.5	锥形光纤耦合器	(184)
§ 5.6	功率耦合方程	(187)

第六章 单模光纤

§ 6.1	折射率剖面与色散特性	(190)
-------	------------------	---------

§ 6.2	基模的高斯近似和模场半径的定义	(194)
§ 6.3	单模光纤的偏振特性	(202)
§ 6.4	保偏光纤	(209)
§ 6.5	单模光纤中的光学孤粒子 (Soliton) ...	(211)

第七章 光纤的耦合与连接

§ 7.1	光源的相干性	(217)
§ 7.2	光纤的数值孔径和端面通过系数	(221)
§ 7.3	普通光源的耦合系统	(224)
§ 7.4	半导体激光器耦合系统	(228)
§ 7.5	提高耦合效率的微光学系统	(231)
§ 7.6	多模光纤的模功率分配	(237)
§ 7.7	近场图和远场图	(242)
§ 7.8	光纤的连接	(247)
§ 7.9	模分配噪声和模噪声	(252)

第八章 光纤线路的特性和传输设计

§ 8.1	中继间距的衰减限制	(259)
§ 8.2	脉冲扩散的矩量分析法	(261)
§ 8.3	光纤的脉冲响应和频率响应	(268)
§ 8.4	色散对光纤传输码率的限制	(276)
§ 8.5	中继间距的带宽限制	(278)
§ 8.6	确定中继间距的 CCITT 图解法	(283)
§ 8.7	光纤通信系统的传输设计	(287)

第九章 光纤制造和测量技术

§ 9.1 光纤制造技术	(291)
§ 9.2 光纤的 CCITT 标准	(294)
§ 9.3 测量系统的稳态注入条件	(297)
§ 9.4 衰减测量	(300)
§ 9.5 带宽测量	(305)
§ 9.6 折射率剖面的测量	(307)
§ 9.7 数值孔径的测量	(311)
§ 9.8 单模光纤的测量	(315)
参考文献	(320)

第一章 光纤通信概述

本章简要介绍光纤通信的概念和光纤的入门知识。

§1.1 历史沿革及发展方向

古代烽火台大约是最早的光通信系统。这种白天用烟、夜间用火光的接力报警体系包含了光信号的产生、传输和再生等长距离通信系统的基本要素，只不过实现这些要素的设备和方式十分原始罢了。

就传输方式来讲，光的大气传输受制于气象条件，不可能建立稳定可靠的长距离直接传输地面光通信系统。因此始于上世纪末，科学家们就开始寻求新的导光方式。

1854年，英国人丁达尔(J. Tyndall)观察到光沿着从水管喷射出的水柱折射前进的现象。洪都斯(D. Hondros)和戴比(P. Deby)于1910年发表了关于介质棒中电磁波的论文。光是一种波长极短的电磁波，双层透明介质柱体可作为一种光波导。

1926年出现了可挠透明光纤束，但直到50年代，双层玻璃光导纤维方始定型。那时的光纤，损耗高达1000dB/km，主要用作短距传像光纤束，医用胃内窥镜是一个典型的例子。

1960年，梅曼(T. H. Maiman)首先在固体中发现了受激光放大的现象，即激光。随后，霍尔(R. N. Hall)、内森

(M.I.Nathan)和奎斯特(T.M.Quist)等3个小组于1962年分别研制出半导体激光器。这些成果激发起人们探索光通信,研究低损耗导光媒体的热情。

60年代中期,出现了透镜列、反射镜列、气体透镜以及薄膜光波导等多种光波导方案,并进行了传输试验,但均因结构复杂、装设困难等缺陷而搁浅。于是科学家们又重新把希望寄托于石英玻璃光纤上,致力于研究制造工艺,降低光纤损耗和扩大传输频宽。

1966年,当时在英国标准电信实验室(STL)工作的中国科学家高锟(K.C.Kao)及其同事撰文论述了玻璃中光损耗的原因,指出玻璃中游离金属离子是光纤吸收损耗的主要因素,若把金属杂质含量减少到 10^{-8} 以下,能制出损耗低于20dB/km的光纤,采用芯和包层折射率差甚小的光纤结构,有利于扩大光纤的传输带宽,这种光纤预期可作为光纤通信的媒体。高锟的论文和预测奏响了光纤通信时代的序曲,他被誉爲光纤通信的先驱。

1970年,格罗格(D.Gloge)把芯、包层折射率差甚小的光纤称为弱导光纤,对其进行了理论分析,给出了设计光纤的简明近似公式。同时,美国康宁(Corning)公司的卡普罗(F.P.Kapron)等人用化学气相沉积法(CVD)研制出损耗20dB/km的单模光纤。这一年,美国和日本又成功地研制出室温下连续工作的长寿命双异质结半导体激光器,并能通过控制注入电流实现光强调制。光纤和光源研究的重大突破揭开了光纤通信时代的帷幕。

1974年,美国贝尔实验室的马克钦斯(J.B. MacChesney)公布了改进的化学气相沉积法(MCVD)光纤制造技术。

1977年,日本电报电话公司(NTT)发表了轴向气相沉积法(VAD)光纤制造工艺。随着光纤制造技术的发展,光纤损耗逐年下降,现在贝尔实验室的单模光纤损耗高达0.12 dB/km (1.55 μm 波段),接近石英光纤理论损耗的极限,石英单模光纤的带宽亦达到吉赫兹·公里(GHz·km)数量级。

1986年,贝尔实验室采用分布反馈式半导体激光器(DFB-LD),创造了码率达8 Gb/s,中继距离63.3 km的新记录。

随着光纤和半导体器材的日趋成熟,研制出模拟传输和数字传输的各种光纤通信系统。进入80年代,光纤通信系统已实用化,许多国家正迅速发展长距离光纤通信系统。1984年底安装的波长1.3 μm ,码率400 Mb/s,贯通日本南北,长2500 km的F-100M单模光纤通信系统;1986年完成的连接美国密西西比河东岸各主要城市,总长8000 km的光纤通信网;以及1987年安装的从比利时的奥斯坦德到英国的布罗茨泰尔斯,长120 km,中继间距20 km,码率280 Mb/s,波长1.3 μm 的商用单模光纤海底光缆系统等都是一些典型的例子。国内到1988年已建成数百公里级的全国产化长距离光纤通信系统,并正向形成光纤通信产业的方向迈进。由于国产光纤通信系统已能代替同轴电缆系统,1988年9月,国家公布了今后不再建设同轴电缆长途通信系统和大力推广光纤通信等新技术的通信发展方针。

光纤通信仍沿着扩大通信容量,延长中继间距的主方向发展。使零色散波长和最低衰减波长重合的零色散低损耗单模光纤颇具吸引力,这种光纤与波分复用技术结合将大大提高线路的利用率。

在 $1\sim 4\mu\text{m}$ 的红外波段内,氟玻璃光纤和二氧化锗玻璃光纤的最低理论损耗值估计为 0.001 和 0.06 dB/km ,大大优于石英光纤,红外光纤的长距离无中继传输有极大的潜力。

现有的光纤通信系统是光强调制-直接检测非相干系统。正在研究的数字频移键控(FSK)或相移键控(PSK)-外差或零差检测相干光纤通信系统可使接收机灵敏度比非相干系统高 $10\sim 25\text{ dB}$,这对大中继间距的海底光缆通信极有价值。低损耗单模保偏光纤是实现相干光纤通信的重要条件。

综上所述,有关光纤通信的近、中期研究大体包括大功率单模激光器、低噪声雪崩光电二极管、集成光电子学器件与技术、光放大器、光外差技术、单模保偏光纤,红外光纤和配套的红外光器件以及波分复用技术等方面的课题。

除光纤通信外,光纤传感技术、光纤中的非线性光学效应、光纤传象以及光纤用于生理感应等新技术领域和应用的可能性也表现出光纤技术的广阔前景和生命力。实际上一门新学科——纤维光学已经建立并正在发展。

§ 1.2 光纤的结构和导光机理

光纤是一种由多层透明介质构成的纤维状光波导,实心纤芯的折射率略高于包层,包层的折射率为常数。仅有芯和包层的裸光纤直径约 $100\sim 200\mu\text{m}$,脆弱易断,需经几次涂敷,才能成为有足够强度的成品光纤。成品光纤的直径约 1 mm ,敷层一般有一次敷层、垫层和壳层3层。一次敷层用折射率高于包层的快速固化塑料,垫层用硅橡胶等低弹性模数材料,壳层用尼龙等高强度材料,图1.1是成品光纤的结构。

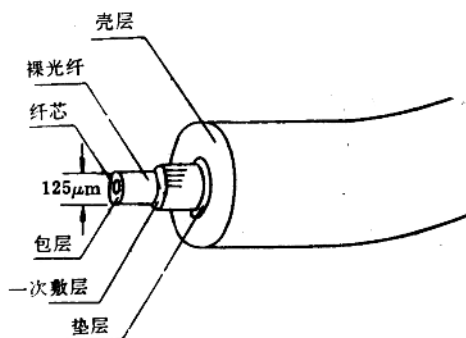


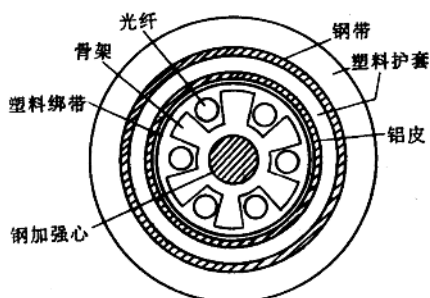
图 1.1 成品光纤的结构

把数根光纤组绞或疏松地置于特制螺旋槽聚乙烯支架内，外缠塑料绑带和铝皮，再被覆塑料或用钢带铠装即成为光缆。图 1.2(a) 是 6 芯铠装光缆的结构，数十芯到千芯的大型光缆，可用 10 槽支架作基本单元构成，如图 1.2(b) 所示。

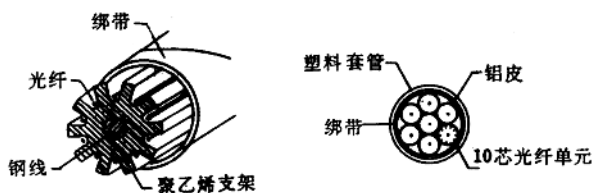
通信光纤是圆光纤，具有轴对称结构。包层常为单层，亦可有多层，各包层都是均匀介质材料，但各层的折射率不同。

折射率是常数和沿径向的递减函数的光纤，分别称为阶跃光纤和梯度光纤。光纤的结构常用折射率沿光纤径向的分布函数 $n(r)$ 来表征，此折射率分布函数称为光纤的折射率剖面。光纤理论中， $n(r)$ 就是光纤的数学模型，这里 r 是径向坐标。

对于单包层光纤，常用 a 表示纤芯半径， n_1 表示芯轴处 ($r=0$) 的折射率， n_2 为包层的折射率。为了简略地表示光纤



(a) 铠装光缆



(b) 10芯光纤单元和大型光缆

图 1.2 光缆的结构

折射率剖面的特征，引入芯包相对折射率 δ 作为剖面参量，它定义为

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

$\delta \ll 1$ 的光纤称为弱导光纤，通信光纤属于弱导光纤，并有近似关系

$$\delta \approx \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

包层的作用是提供一个芯包交界面，利用界面的全反射把光线束缚在纤芯内，因此理论分析时，包层可视为无限厚。

光纤的特性与工作波长和芯径的相对值有关，为使理论分析的结果具有通用性，引入归一化频率 V 来代替工作波长 λ 。归一化频率无量纲，其定义为

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = ka(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.2)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是自由空间波数。

对于弱导光纤，(1.2)式近似为

$$V \approx kan_1 \sqrt{2\delta} \quad (1.3)$$

光纤的导光机理可形象地解释为入射光线被芯包界面全反射或梯度折射率剖面限制，沿光纤曲折迂回地传播。这种传导光线的轨迹称为射线轨迹，不同 V 值下光纤中的射线轨迹如图 1.3 所示。

在给定的工作波长下，不同芯径光纤中射线轨迹的数目不同。每一特定的射线迹轨称为一种射线模，因此光纤中的射线模数目取决于波长与芯径的比值，即归一化频率 V 。只能传输一个射线模的光纤称为单模光纤，它允许的归一化频率 V 有一定的限制，称为单模传输条件。阶跃光纤的单模传输条件为 $0 < V < 2.405$ 。不满足单模传输条件的光纤是多模光纤。

为在光纤内形成具有一特定轨迹的射线模，对入射光线的入射点和入射角均有一定的要求。定义射向光纤端面中心，并能激起传导射线模的最大入射角 θ_c 为光纤的接收孔径角，并把 $\sin \theta_c$ 的值称为光纤的称为光纤的理论数值孔径 NA，