

光纤通信导论

● 石守勇 编著

● NANQIANG

CONGSHU

● XIAMEN DAXUE

CHUBANSHE

● 南强丛书

“南强丛书”序

厦门大学是爱国华侨领袖陈嘉庚先生于1921年4月6日创办的,到明年将有70年的历史。为了庆贺这个光辉节日,在海内外校友的倡导和支持下,我们编辑出版了这套“南强丛书”。

厦门大学创办伊始,就明确宣告:“本大学之目的,在博集东西各国之学术及其精神,以研究一切现象之底蕴与功用,同时并阐发中国固有学艺之美质,使之融合贯通,成为一种完善之文化。”厦大校歌则反复咏唱:“吁嗟乎南方之强”。几十年来,厦门大学师生弘扬“南强”精神,为实现自己的办学宗旨和追求自己的理想目标,做出了可贵的努力和贡献,培养造就了一批卓有成就的学者专家,编写出版了许多引人注目的优秀教材和学术专著,丰富了我国文化宝库。特别是新的社会主义历史时期,厦门大学满园春色,欣欣向荣,人才辈出,成果丰盈。以历史的眼光,选萃集成我校学者专家的优秀之作,出版一套以教材、专著为主的“南强丛书”,这是具有深远意义的文化积累工作,也是对建校70周年大庆的最好纪念。

“南强丛书”的出版,是我校发展史上的一件盛事,引起了广泛的关注和强烈的反响。首次征稿,各系、所踊跃推荐,参评的优秀书稿达50多部。经“南强丛书”编审委员会认真评选,首批入选的书稿有15部。这些著作涉及自然科学和社会科学各个主要学科,都是作者多年潜心研究的重要成果,其中既有久负盛名的老一辈学者专家花了心血的力作,又有后起之秀富有开拓性的佳作,还有已故著名教授的遗作。虽然数量有限,门类不全,但在某种程度上仍可以体现我校的教学、科研特色和学术水平。

出版“南强丛书”,是一项长期性的重大工程,需要各方面的热情支持和密切合作。今后,我们将根据本丛书的出版宗旨和具体条件,成熟一批,出版一批,以求更全面更系统地展示我校教学、科研的丰硕成果。

由于时间匆促和我们的水平有限,评选工作和编辑出版工作遗漏、错误在所难免,衷心希望校友和作者、读者给予指正。

最后,我们谨向资助出版本丛书的厦门大学旅港校友会前理事长黄克立先生致以衷心感谢!

厦 门 大 学 副 校 长 郑 学 檬
“南强丛书”编审委员会主任

1990年9月15日

目 录

第一章 绪 论	(1)
---------	-------

1-1 引言	(1)
1-2 光纤通信系统	(3)
1-3 通信的发展	(4)
参考资料	(5)

第二章 光波导纤维	(7)
-----------	-------

2-1 光波导纤维的结构	(7)
2-1.1 结构类型	(7)
2-1.2 梯度多模光纤的结构	(10)
2-1.3 单模光纤的结构	(11)
2-1.4 光纤的物化性质	(12)
2-2 光缆	(12)
2-2.1 基本结构形式	(12)
2-2.2 光缆的品种和性能	(14)
2-3 光纤中的传播模式	(16)
2-3.1 传播模式	(17)
2-3.2 传播模式的场结构和功率流分布	(19)
2-3.3 传播模式的群速度	(21)
2-4 光纤的衰减特性	(21)
2-4.1 光纤的衰减因素和衰减谱	(22)
2-4.2 光纤衰减参数的测量值	(23)
2-5 光纤的带宽特性	(24)
2-5.1 多模离散	(24)
2-5.2 单模色散	(25)
2-5.3 光纤的基带响应	(27)
2-5.4 光纤带宽的测量	(31)

2-6 光纤的噪音特性	(33)
参考资料	(34)

第三章 光载波发射机	(36)
-------------------------	-------------

3-1 基本组成	(36)
3-1.1 驱动电路	(37)
3-1.2 功率控制电路	(41)
3-1.3 温度控制电路	(43)
3-1.4 电接口	(43)
3-1.5 光接口	(44)
3-2 光源	(46)
3-2.1 p-n 结发光与约束场结构	(46)
3-2.2 半导体发光二极管(LED _s)	(50)
3-2.3 半导体激光二极管(LD _s)	(56)
3-2.4 双异质结半导体激光二极管(DHLD _s)的高速调制特性	(59)
3-3 高速光载波发射机	(60)
3-3.1 单纵模短腔激光器	(61)
3-3.2 解理耦合双腔激光器(C ¹ LD)	(65)
3-3.3 分布反馈激光器(DFBLD)	(66)
3-3.4 集成光载波发射机	(67)
参考资料	(70)

第四章 光载波接收机	(73)
-------------------------	-------------

4-1 数字光载波接收机的基本组成	(73)
4-1.1 光电检波器	(74)
4-1.2 接收放大器	(80)
4-1.3 均衡	(86)
4-1.4 判决	(89)
4-2 光接收机噪声	(97)

4-2.1 光电检波器噪声	(97)
4-2.2 前置放大器噪声	(98)
4-2.3 光接收机噪声	(99)
4-3 光接收机灵敏度	(100)
4-3.1 量子极限	(101)
4-3.2 光接收机的灵敏度	(102)
4-3.3 光接收机的灵敏度分析	(104)
参考资料	(106)

第五章 线路码型 (108)

5-1 光纤通信常用线路码型	(109)
5-2 编译码器	(114)
5-3 误码检测方法	(116)
5-4 线路码型的性能参数及其最佳线路码型的选择	(122)
参考资料	(128)

第六章 光纤通信系统 (129)

6-1 传输系统	(129)
6-1.1 实例	(129)
6-1.2 传输系统组成	(132)
6-1.3 中继器	(139)
6-2 光纤通信系统的网络结构	(143)
6-3 交换与控制	(145)
6-4 终端	(146)
参考资料	(147)

第七章 相干光通信 (148)

7-1 引言	(148)
7-2 检测技术	(150)
7-2.1 直接检测	(150)
7-2.2 零拍直接检测及其最优量子极限	(152)
7-2.3 理想的外差检测	(154)
7-3 激光器中的相位噪声	(155)
7-4 相位锁定技术	(157)
7-4.1 光学锁相环(OPLL)	(158)
7-4.2 具有锁相环的零拍检波器性能	(160)
7-4.3 外差锁相环	(164)
7-4.4 具有锁相环的外差检波器性能	(165)
7-5 二进制移频键控(FSK)	(167)
7-6 差分移相键控(DPSK)	(175)
7-6.1 光学处理	(175)
7-6.2 DPSK 外差检测	(178)
7-7 通断键控(OOK)	(184)
7-8 实例	(186)
7-8.1 采用相位分集实现 ASK 和 PSK 零拍检测实验系统	(187)
7-8.2 采用相位调谐 DFBLD 构成 FSK 外差检测实验系统	(188)
7-8.3 DPSK 实验性光传输系统	(190)
参考资料	(192)

第八章 综合服务数据网 (195)

8-1 光纤通信技术的发展现状	(195)
8-1.1 单频光源	(195)
8-1.2 宽带光纤与偏振控制	(197)
8-1.3 相干光接收技术	(198)
8-2 社会对信息服务需求的调查	(199)
8-2.1 传统的通信应用考察	(200)

8-2.2 新的通信应用考察	(201)
8-3 综合服务光纤数据网	(203)
参考资料	(204)

第一章 绪 论

1-1 引 言

从本世纪 30 年代开始^[1-2],无线电载波通信获得迅速的发展,电缆通信、微波中继通信^[1-2]和卫星通信等一系列无线电载波通信的主要系统相继布满全球。这些系统能够利用从低频无线电波到微波的广大频域。近年来由于波分复用技术的发展,这些信道通信容量得到了充分的利用。

然而,人类社会的进步和经济的繁荣对通信需求量的增长是非常迅速的,人们对这些无线电载波通信系统是否能满足未来社会的需要产生了怀疑,因此,投入了相当大量的人力物力探索实现毫米波波导通信的可能性。这是 60 年代末 70 年代初的情况^[1-3]。由于 H_{01} 波导系统的工程敷设复杂、稳定性差、造价高,更重要的是 1960 年 Maiman 发明了红宝石激光器,使人们看到了希望之“光”^[1-4],中止了实现毫米波波导通信的探索,而把力量转移到实现光通信的探索研究中。

研究者之所以这么及时地抓住光通信这个方向,是因为光载波具有高达 10^{14} Hz 的频率;而一般无线电载波的频率最高只有 $10^6 \sim 10^8$ Hz,能够用在长途干线上的微波载波的频率最高只有 10^{10} Hz,这就是说,从频率的角度看,光波所能携带的信息量比微波要高出 10000 倍。传输线路的横截面线度基本上与载波波长相当,考虑到光波导是采用介质材料,传输线路的横截面线度比光载波波长约大一个数量级,那么,光波导传输线的横截面尺寸也仅仅是微波的 $1/1000^2$,这就是说,从频率和空间利用的角度来考察光通信,它的容量可以比微波通信大几十亿倍。

人们利用光传递信息的历史要比无线电通信的历史早得多;公元前 700 多年,我国就已经使用烽火台传递信息、警报敌情;随后还出现了海军旗语、信号弹等多种光通信形式。然而人们在这个阶段对光波的利用是极为初级的,虽然是一种创造,然而更多的成份是一种自然的直觉,所以,当无线电载波通信问世后,它就一直是一种最先进的通信技术,且获得迅速而充分的发展。问题就在于电磁感应现象发现以后,科学家们对于电磁波有了深刻的认识,人们能够依照通信系统的要求产生电磁载波。对于电磁载波的要求主要有稳定性、相干性、以及空间功率密度等。激光器的发明,使人们看到了人类的技术发展已经到了可以在光频段获得具有高度稳定性、高度相干性和高空间功率密度的光波,这就是激光器的发明使光通信获得新生的原因

所在。

然而,为光通信展现光明前景的是在光信道方面研究的突破。光波不像电磁波那样,在大气空间有一个宽广的透过带,从低频无线电波到波长为2厘米的微波的频谱范围内,电磁波在大气中的传输几乎不表现出任何衰减[见图1-1]。光波在大气中传输虽然也存在一些透射窗口[见图1-2],然而总是存在一定的衰减,且这些窗口的透过率是有限制条件的,一遇到雨、雾、风沙等的气候,信道的衰减将急剧增大,使可传输信息的距离变得极短而没有实用价值。而且,电磁波可以简单地使用金属材料制成传输线,虽然在高频段的这种波导结构也是复杂的,然而它总是从简单的金属导线开始逐步改进而成的。光波则不一样,一开始就被导波材料的损耗难住,人们为探索可行的光波导而从多方面开展了研究,1966年K. C. Kao首先提出可以把玻璃纤维波导作为光通信的传输媒介^[1-5],接着,1970年美国Corning玻璃公司的Maurer等人宣布他们研制出了20dB/Km的石英型光纤波导,引导人们成功地制成了今天的光波导纤维。光通信探索者们认识到玻璃材料光损耗的主要原因是在玻璃中存在着大量的过渡元素离子,羟基以及其它杂质^[1-5]。至此,光通信的两个最基本的问题——光载波发射源和光纤信道——获得了突破。光纤通信为人们展现了光明的前景。

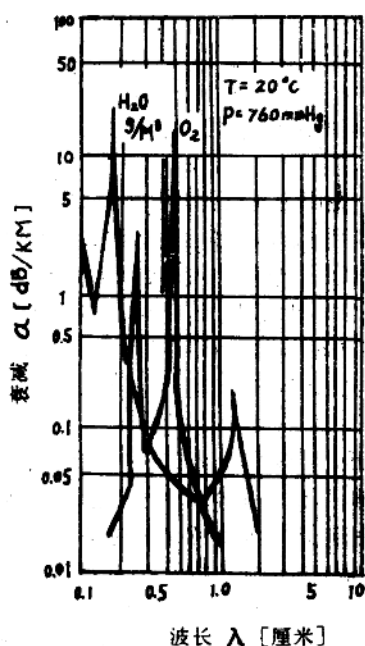


图1-1 微波大气传输的吸收谱

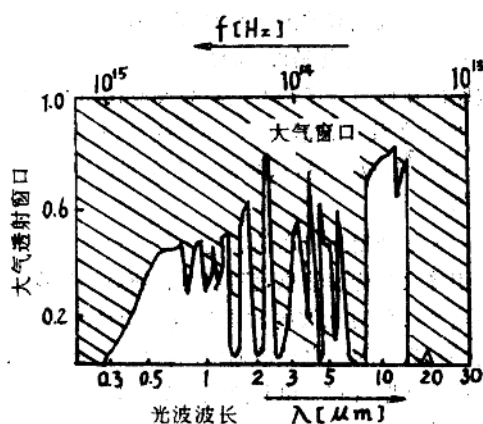


图1-2 光波大气传输的透射谱

1-2. 光纤通信系统

通信系统的组成,从设备组成角度来讲,包括终端设备(这是一种把以声音、图像、数字等表示形式的任意信息物理量转换成适合于传输的物理量的变换装置)交换机和信道等三个基本部分。这里所说的信道是广义的,它包括载波发射机、传输线、载波接收机以及中继器等四部分。从系统组成的角度讲,包括通信系统的组成方法、控制方法、技术标准与维护,以及像号码计划和计费方式等的其它方面。

光纤通信技术的开发,首先是由于扩充通信系统信道传输容量的要求。因此,光纤通信技术发展的初期,对通信系统的组成,交换设备以及终端装置并没有重大影响,而仅仅作作为信道代用的方式挤进电信网络。

人们讨论光纤通信系统,首先总是从广义的光信道开始。广义的光信道由光载波发射机,光纤缆、光载波接收机以及再生中继器等四部分组成。

光载波发射机的主要组成是:一个能够实现直接调制的光源,如半导体发光二极管(LED)或半导体激光二极管(LD)和它的馈供电源两部分。它的作用不但要能够产生单色性好的光载波,而且还要能够把从复用设备送来的综合信息的信号直接调制在光载波上。实用的光载波发射机一般是由可直接调制的光源,馈供以及其它辅助电路安装成一个密闭的整机,这种整体发射机带有信号输入线,电源馈线以及光载波输出光纤。

光载波接收机组成比较复杂,它由光电检测放大器,均衡与判决再生,以及馈供几部分组成。接收机能够把接收到的微弱的光载波转换成电信号并加以放大。经过均衡和再生判决以后,依照系统误码要求,送出含有综合信息的电信号。实用的光载波接收机是密闭封装的,并且带有输入光纤,输出信号线以及电源馈线。

到现在为止还没有一种有实用价值的光放大器能够用于光纤通信系统。所以,在光纤通信系统中,全部采用再生中继的方式。再生中继器基本上就是由一个光载波接收机和一个光载波发射机组合而成。

在光纤通信系统中起传输媒介作用的是光纤,或称光波导纤维。光纤具有非常低的传输损耗和非常宽的传输频带。一般说,如果系统工作在短波长区域,如 $0.85\mu\text{m}$,光纤的传输损耗大致在 $3-1\text{dB/Km}$;如果系统工作在长波长区域,如 $1.3\mu\text{m}$ 或 $1.5\mu\text{m}$,光纤的传输损耗大致在 $1-0.2\text{dB/Km}$ 。目前通信工作中实用的光波导纤维有两种,一种是多模梯度型石英光纤,一种是单模石英光纤。多模梯度型石英光纤的传输频带大致是 $400-1000\text{MHz} \cdot \text{Km}$,单模石英光纤,依其材料和设计的情况,传输频带大致是 $30-200\text{GHz} \cdot \text{Km}$ 。光纤中存在某些微弱的均匀性和微弱的非线性效应,有可能带来一定量的插入噪音,但只要控制得好,它在整个通信系统中所占的比例是不重要的。

在工程应用中光纤也必须象电线一样受到保护的。所以,实用的光纤总是制成光纤缆的形式。当然,在工程中还要用到光纤的连接、耦合器和分路器等无源器件。

光纤通信技术的发展速度是惊人的,我们从光源、材料、光电探测器、电子器件的响应速度和光纤等几个最主要的方面来考察这个问题。

光纤通信用光源的开发,一开始就集中于半导体激光器(LD),然而由于泵浦电流密度的阈值太高,一直实现不了室温连续工作。1970年,美国的哈雅希^[1-7,8]和苏联的阿尔费略夫等人^[1-9]分别用双异质结(DH)的结构解决了约束自由载流子和约束光场的问题,大幅度地降低了泵浦电流密度的阈值,从而实现了DH激光器的室温连续工作。然而,随着光纤通信技术的发展,这种以解理端面反馈的DHLD,在高速率调制下,难于保证动态单轴模输出,这就严重地限制了光纤通信潜力的发挥。为此,人们采用了集成光学中的分布反馈技术^[1-10,11],于1975年制成了室温连续工作的分布反馈(DFB)^[1-12,13]和分布布拉格反馈^[1-14](DBR)的DHLD。而贝尔实验室的曾焕添博士则制成了适用于高速调频的解理耦合双腔激光器(C³LD)。至此,在原则上我们已经能够为光纤通信提供稳定、可靠,且在高速调制下能够保持动态单轴模输出的长寿命可直接调制的光源,这是光纤通信技术一项带根本性质的进展。采用扩展腔的DBRLD获得了10KHz超窄线宽。

材料研究的进展也是十分重要的,因为低阈值长寿命的室温连续工作的DHLD是用GaAs—Al_xGa_{1-x}As异质结构制作的,只能发射0.85μm左右的短波长激光。然而,用掺杂石英材料制成的光纤在1.0~1.6μm波段的损耗^[1-15]和材料色散^[1-16]最低,为了适应这一要求,人们大量工作集中于发射波长在1.0~1.6μm范围内的材料,这一努力的结果,获得了各种InGaAsP/InP的器件,如发射波长在1.1μm附近的室温连续工作的InP—Ga_{0.12}In_{0.88}P_{0.77}As_{0.23}的DHLD^[1-17],发射波长为1.55μm,输出功率为30mw的InGaAsP/InP DBRDHLD^[1-18,19]等等。材料工作的另一重要作用是,获得InGaAs三元系晶体这一优异的电子元件材料,它的自由载流子迁移率是GaAs的两倍,是Si的七倍,这就有了制造高速电子元件的可能。我们可以利用集成技术,把光源和光发射机所需的电子元件制作在一小片的InP单晶基片上,也可以把光电检测元件和光接收机所需的电子元件制作在一小片的InP单晶基片上,从而获得极高的信道传输速率。

至于光电探测器,也由于采用了双异质结技术制成波导型结构,因而可以获得极高的量子转换效率和极高的脉冲响应速率。例如,S. Y. Wang就研制成功了3dB带宽大于100GHz的GaAs肖特基光电二极管。

最重要和最基本的进展还是属于光波导纤维,因为它是信道的主体和命脉。

由于半导体的材料工业、无水石英熔炼的技术基础,我们已经能够制造出对光传输来讲是有害的杂质的含量在PPb级的光波导纤维,其最低损耗已降低到接近于理论值,即石英材料的本底损耗约为0.11dB/Km,在实验上在1.55μm波长已获得0.14dB/Km的光波导纤维^[1-20]。所以,从损耗的角度看,光纤通信的中继距离已可以达到百公里的长度,当然,人们并不满足于这种现状,现在仍有不少人在探索超低损耗的光纤材料,这种新材料的损耗,理论上预测可达到10⁻³dB/Km。

光纤制造技术进步的第二个重要方面是扩展传输带宽。多模光纤由于采用了梯度逼近抛物线型的结构,使模式之间的延迟差降低到极低的程度,使这种光纤的传输带宽达到 $1\text{GHz} \cdot \text{Km}$ 的水平。然而,真正宽带传输的性能是属于单模光纤,在这种光纤中,材料色散造成的带宽限制远远超过单模色散。围绕这个问题所进行的有成效的工作是,首先把工作波长推向以 $1.31\mu\text{m}$ 为中心的低色散区,这在波导制造技术上主要是要尽量降低羟基含量,其它并不存在什么困难,而光源和检测器件方面则要付出如上所述的巨大努力;其次是通过掺杂控制零色散点的位置;与单模色散相比,材料色散总是存在的,特别是在波分复用情况下,需要在宽频带区域传输载波,这就要求光波导纤维要在一个相当宽的窗口超低色散地传输光载波,为此,日本川上等人提出了 W 型折射率剖面结构的光波导^[1-21]。这种波导具有负的波导色散,通过巧妙的设计选择,可以使波导色散与材料色散相互抵消,从而实现数百 $\text{GHz} \cdot \text{Km}$ 以上的超宽频带的传输。

部件研究工作的进展促进了系统的进展,例如,1985年10月在意大利威尼斯召开的欧洲光通信会议上,报导了相干光通信系统的最新成果。美国贝尔获得 1Gbit/s 速率和 148Km 传输距离的水平;日本 NTT 获得 400Mbit/s 和 251Km 传输距离的水平。

光信道的这一系列重大进展,使科学家们认识到,开发光纤通信技术的意义远远不止是为了扩充电信信道的传输容量。电信工作者们原来那种“通信=电信=公众通信”的狭隘概念受到巨大的冲击,深深感到必须摆脱这种狭隘的传统观念,重新探索“通信”的本来意义。广大的科技工作者则是从另一种截然不同的角度来考察这个问题,他们把光纤通信这种巨大的通信能力与当代信息社会对信息的存取、传送、处理和交换等的大量的综合性质的信息服务需求放在一起加以考虑,提出综合服务数据网(ISDN)模型,^[1-22]欧美许多科技工作者投入了这项研究工作,并且在某些先进的地区开始考虑投入使用,日本则着力于发展综合服务网(INS)的研究。无疑地,这些新型的社会信息服务网已经远远超出传统的电信网络的业务范围,能够更充分地满足现代社会的需求。这种新型的信息网有两个显著的特点:一个是以数码传输为其基本信号形式^[1-23],采用时间分割制,这一方面是由于这种通信形式具有最优越的性质和最广泛的适用能力,一方面则是由于光信道具有巨大的传输能力^[1-24,25];另一个特点是采用了计算机控制,这是以信号的数码方式为基础,通过电脑使网络具有了多功能的性质。

参考资料

- [1-1] 《长途电信学》北京邮电学院长途电信教研组,人民邮电出版社,1962。
- [1-2] 《微波中继通信》北京邮电学院微波教研组,人民邮电出版社,1962。
- [1-3] 国外电子技术,1971.6。
- [1-4] Proc. IEEE. 1970,58,NO. 10.
- [1-5] K. C. Kao, G. A. Hockham, "Dielectric-Fiber Surface Waveguides For Optical Frequencies", Proc. IEE. 113(7), July 1966, PP1151-1158.

- [1—6] 石守勇, 实现光波导传输的几个问题, 物构所通讯, 1977. 2, P21—29.
- [1—7] I. Hayashi and M. B. Panish. *Device Research Conference* Seattle, Washington. June 1970.
- [1—8] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski. *Appl. Phys. Lett.* , 17(1970), 109.
- [1—9] Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, D. Z. Garbuzov, Yu. V. Zhilyaev, E. P. Morozov, E. L. Portnoi and V. G. Trofim, *Sov. Phys. Semicond.* , 4 (1971), 1573, [Translated from *Физика и техника Полупроводников*, 1970. 9].
- [1—10] H. Kogelnik and C. V. Shank, *Appl. phys. Lett.* , 18(1971), 152.
- [1—11] H. Kogelnik and C. V. Shank, *J. Appl. phys.* , 43(1972), 2327.
- [1—12] H. C. Casey, Jr. S. Somekh and M. Hegerms, *Appl. Phys. Lett.* , 27(1975), 142.
- [1—13] D. Aiki, M. Nakamura, J. Umeda, A. Yariv, A. Katzir and H. W. Yen, *Appl. phys. Lett.* , 27 (1975), 145.
- [1—14] F. K. Reinhart, R. A. Logan and C. V. Shank, *Appl. Phys. Lett.* , 27(1975), 45.
- [1—15] H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi, T. Izawa and H. Takata, *Electron Lett.* , 12(1976), 549.
- [1—16] L. G. Cohen and C. Lin, *Appl. Optics*, 16(1977), 3136.
- [1—17] J. J. Hsieh, I. A. Rossi and J. P. Donnelly, *Appl. Phys. Lett.* , 28(1976), 709.
- [1—18] K. Aiki, M. Nakamura, J. Umeda, *IEEE J. QE*—13(1977), 220.
- [1—19] Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu, S. Arai, *Digest of Technical Papers. IEEE/OSA Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics Asilomar, CA (6—8. January 1982) P. WB2.*
- [1—20] 《光纤通信》, 张熙, 1987. 1, P3.
- [1—21] S. Kawakami and S. Nishida, *IEEE Jour. of Q. E.* QE—10(1974)879.
- [1—22] *Electronics Lett.* , 20(1984), 18, 735.
- [1—23] 川西悟基, 吉开范章, 山田顺一, 《信学技报》, GS84—163.
- [1—24] K. Hagimoto, K. Aida, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6(1988), NO. 11.
- [1—25] H. Salwan, *Telecomms.* , 23(1989), 1, 47—48.

第二章 光波导纤维

首先介绍光纤光缆的几何结构、基本类型以及它们的物化性质和机械性能,然后讨论光纤中传播模式的概念,通过对特征方程解的讨论引入光波导纤维的传播常数和群速度的概念。在这些知识的基础上,我们就可以讨论光波导纤维的三个基本光传输特性,即传输损耗、传输带宽和插入噪音。

本章的目的是使读者基本了解光纤的传输特性,以便在系统设计中正确地选择和使用光纤光缆。

2-1 光波导纤维的结构

2-1.1 结构类型

制造光波导纤维的主要材料是无水石英和无水掺杂石英。掺杂的目的是控制波导的折射率分布,现在实用的光纤都是圆柱对称的,因此,光波导纤维的结构特征可以由光纤横截面上的几何结构参数和折射率分布函数完全确定,如图 2-1 所示。

最早开发的光纤结构基本的形式是如图 2-1(a)所示的阶跃型多模光纤。这种光纤是圆柱形结构,沿着轴向和角向都是均匀的,沿着径向有一个阶跃变化,即此光纤是由一个芯柱和一个同心套层组成。芯和套所用的材料不同,芯材料的折射率总比套层略大一些。所以,如果套层材料采用纯无水石英,那么芯材料一般是采用具有较高折射率的掺杂石英。用以掺杂的组分有 GeO_2 和(或) P_2O_5 ;反过来也可以,如果芯材料采用纯无水石英,那么套层材料就要采用具有较低折射率的掺杂石英,用以掺杂的组分有 B_2O_3 或 F。

描述光纤结构的参数有芯径 $2a$, 外径 $2b$ 和折射率分布函数 $n(r)$ 。依照 IEC^①和 CCITT^②建议的国际标准,这种阶跃型多模光纤的结构参数为

$$\begin{cases} 2a = 50 \pm 2\mu\text{m}, \\ 2b = 125 \pm 3\mu\text{m}, \\ N \cdot A = 0.2 \pm 0.02. \end{cases} \quad (2-1)$$

① IEC:国际电工委员会。

② CCITT:国际电报电话咨询委员会。

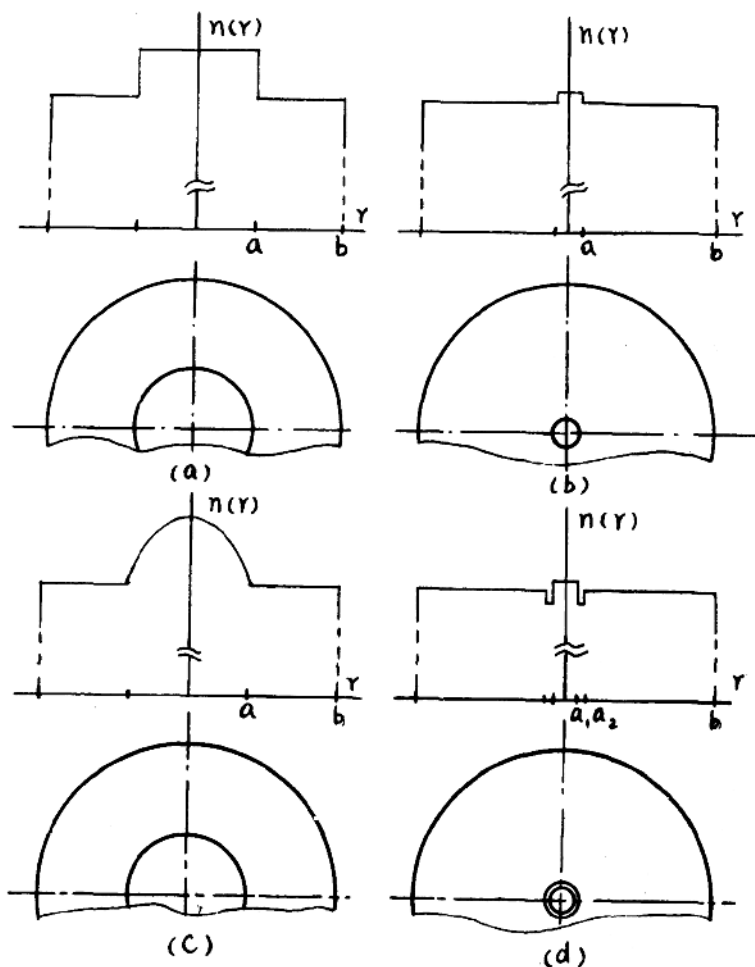


图 2-1 光波导纤维横截面的几何形状和折射率分布

(a) 阶跃型多模光纤; 芯径 $2a=50\mu\text{m}$, 外径 $2b=125\mu\text{m}$;

(b) 阶跃型单模光纤; 芯径 $2a=4\sim 10\mu\text{m}$; 外径 $2b=125\mu\text{m}$;

(c) 梯度型多模光纤; 芯径 $2a=50\mu\text{m}$, 外径 $2b=125\mu\text{m}$; (d) w 型单模光纤; 外径 $2b=125\mu\text{m}$ 。

参数 $N \cdot A$ 称为数值孔径, 它的定义如图 2-2 所示, 其表达式为

$$[N \cdot A] = \sin \alpha, \quad (2-2)$$

由于临界角 $\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$, 利用三角关系可以得到数值孔径与折射率参数的关系为

$$[N \cdot A] = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (2-3)$$

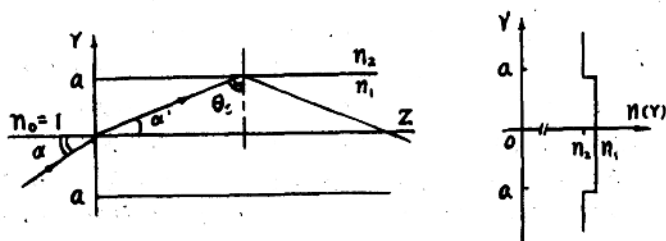


图 2-2 阶跃型多模光纤的光线注入与传播, θ_c 是全反射临界角

式中参数 n_1 和 n_2 是在折射率分布函数中定义的, 即

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r \leq a, \\ n_2 & r > a. \end{cases} \quad (2-4)$$

由上述讨论可见, 阶跃型多模波导的结构是由几何结构参数 $2a$ 和折射率分布参数 n_1, n_2 决定的, 所以, 在光波导传输理论研究中引进了一个综合参数——归一化频率 V , 它定义为

$$V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = ak_0[N \cdot A], \quad (2-5)$$

式中 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 是真空中平面波的传播常数。

这种波导存在严重的群速度离散, 我们在后边将会讨论, 因为在波导中传播的各阶模式的群速度差别很大, 使得这种光波导的传输带宽很窄, 或者说光脉冲通过它时展宽严重, 所以, 这种波导用作信道时, 其信息传输容量或者信息传输速率非常小。为了克服这种缺点, 人们做了许多深入的研究, 找到了两种可行的解决办法。一种是减小波导的标准化频率, 以便减少波导中传播模式的数量, 特别是当 $V \leq 2.4048$ 时, 波导中只存在基模 HE_{11} , 即实现了单模传输, 彻底消除多模离散引起的传输带宽限制。这种单模波导的结构如图 2-1(b) 所示, 依照 IEC 和 CCITT 建议的国际标准为

$$\begin{cases} 2a = 4 \sim 10 \pm 1\mu\text{m}, \\ 2b = 125 \pm 3\mu\text{m}, \\ \text{色散} \leq 6\text{PS/Km} \cdot \text{nm}, \\ \text{截止波长: } 1.100 - 1.280\mu\text{m}. \end{cases} \quad (2-6)$$

另一种解决办法是通过修改波导结构来减小模式之间的离散, 这就是如图 2-1(c) 所示的梯度型多模光纤。在 1970 年以前, 日本板玻璃公司和电子公司致力于研究一种用多组份光学玻璃材料制成的 SELFOC 光纤^①, 这种光纤是利用双坩埚法拉制的玻璃纤维, 实现了高温下离子交换, 具有如下式的折射率分布函数

$$n(r) = n_0(1 - \frac{1}{2}Ar^2). \quad (2-7)$$

在这种光纤中, 模式群速度之间的离散极小, 因而具有很高的信息传输容量。只是由于多组分

① SELFOC 光纤: 自聚焦型光纤。

C

玻璃材料损耗偏高,一般只能降低到 5dB/Km 左右,难于和石英材料制成的光纤竞争。但是,这种波导的结构形式是优越的。不但具有高的信息传输能力,而且保持较大的几何孔径和数值孔径,使得它在制造技术和工程应用中都较为简便。所以,无水石英制成的光波导,后来也采用梯度逼近抛物线形分布的方法制成梯度型光纤。如图 2-1(c)所示,这种光纤的传输带宽一般是 400~800MHz·Km,好的可以达到 1GHz·Km 以上。工程上应用较为普遍。

随着技术的发展和容量长途干线的需要,单模光纤的研制和生产也逐渐受到重视,而且成为光纤产业中最重要的最先进的一种产品。在单模光纤中虽然消除了多模离散,单模色散又是极小,可是,相比之下,光纤材料的色散却是一个不小的数量,它成为限制单模光纤传输带宽的最重要原因。尽管把光纤工作波长推向低材料色散的长波区域,材料色散仍然是限制单模光纤带宽的主要因素。

总之,在单模光纤中,限制波导带宽有两个基本的因素。一个是材料色散,次一个是单模色散,这两种色散是同符号的(都是正色散),为了使单模色散变为负色散,川上等人提出如图 2-1(d)所示的 W-型光纤^[2-1],精心调整 W-型光纤的结构参数,可以使两种色散相互抵消,从而大大地提高传输带宽,达到 100GHz·Km 数量级的水平。因此,W-型光纤是一种可取的大容量信道。

光波导纤维的结构类型很多,然而可作为信道的光纤,最基本的类型就是上述四种,在生产上,目前主要的产品只有两种,一种是梯度型光纤,一种是单模光纤。下面我们将对这两种光纤的详细结构进行讨论。

2-1.2 梯度多模光纤的结构

这种光纤的原则结构在图 2-1(c)中已经给定,然而,实际光纤的结构要复杂得多。制造这种光纤有各种不同的工艺途径。例如 MCVD 法,OVD 法,VAD 法,PMCV 法和 PCVD 法等^[2-2],工艺方法不同,所制造的光纤结构也略有差别。

我们先以 MCVD 法制造的光纤为例,分析其结构特点。这种光纤由三部分组成,如图 2-3 所示。最外层称为套层,是用纯无水石英构成,具有均匀的折射率分布;中间夹一层隔离层,其折射率比套层还要低,这是利用 B₂O₃ 的反常特性,在纯无水石英中掺进少量的 B₂O₃,就可以获得此低折射率的隔离层,厚度 6~8μm;隔离层以内的就是梯度型的光纤芯,其折射率分布的拟合函数为

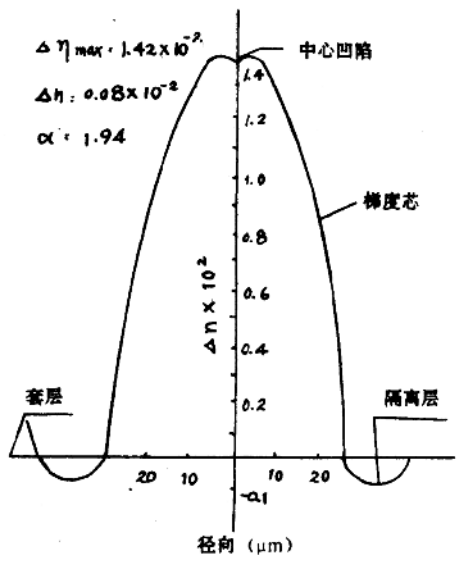


图 2-3 用干涉显微镜测量到的折射率分布曲线^[2-3]