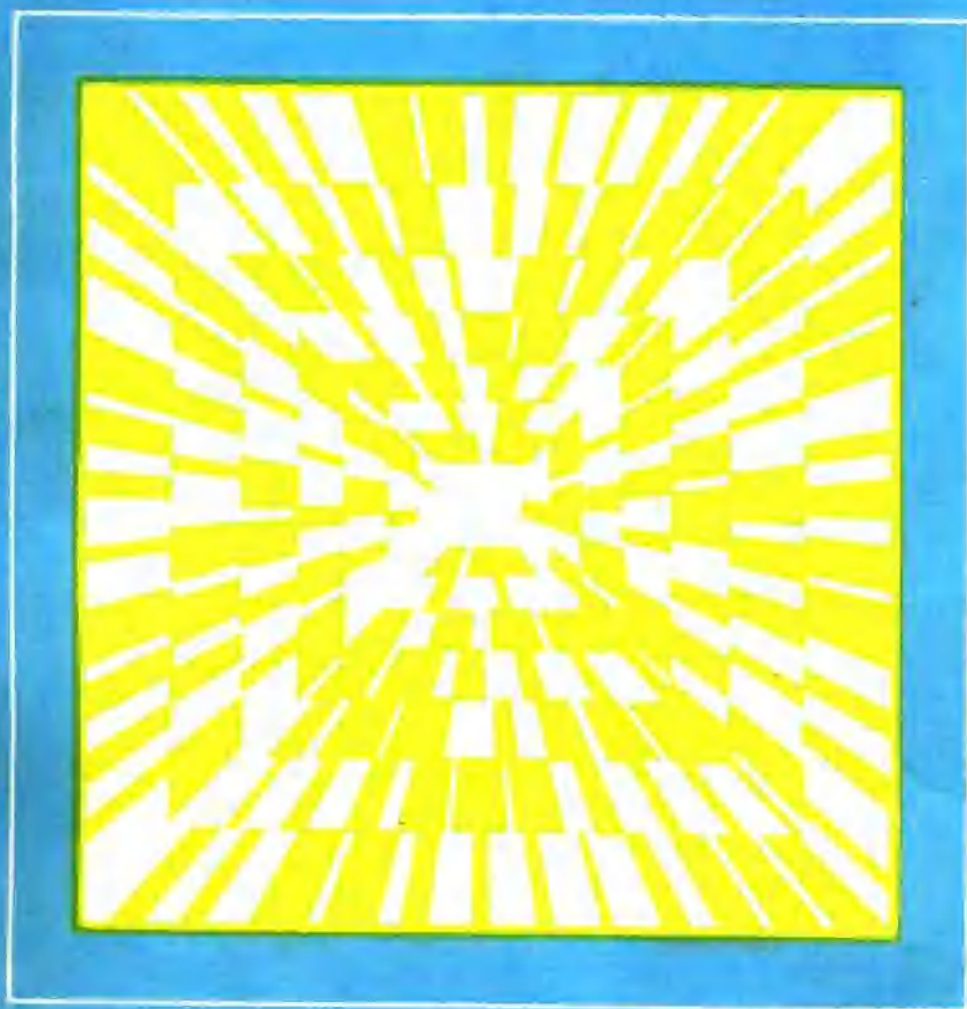


周邦寅 编

光纤通信的物理基础

周邦寅 编



电子工业出版社

光纤通信的物理基础

社

光纤通信的物理基础

周邦寅 编

电子工业出版社

内 容 提 要

本书是根据作者多年来为通信专业、电子工程专业低年级学生开设的选修课的讲义编写的。全书共分十章，讲述了光通信的发展及系统、光的电磁理论、几何光学原理、光纤的结构，并由射线理论和模式理论两方面介绍了光在光纤中传输的物理过程，光纤通信的光源、检测器等。本书着重于物理概念的讲述，深入浅出、易于阅读。

本书可供大专院校有关通信和电子系统专业低年级学生作选修课的教材；也可供从事有关通信业务的技术人员参考和作短期培训的教材。

光纤通信的物理基础

周邦寅 编

电子工业出版社出版(北京市方寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

西北工业大学印刷厂印装

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9.5 字数: 225 千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数: 1000 册 定价: 5.50 元

ISBN7-5053·1531-5/TN·462

目 录

绪论	1
§ 1 引言	1
§ 2 纤维光学	2
§ 3 光通信	3
§ 4 光纤的发展阶段	7
§ 5 光纤通信系统	8
§ 6 模拟通信与数字通信	9
第一章 光的电磁理论	10
§ 1.1 麦克斯韦方程组	10
§ 1.2 电磁场的波动性	12
§ 1.3 平面电磁波	15
§ 1.4 球面波和柱面波的波动公式	21
§ 1.5 光的辐射、辐射能	22
§ 1.6 电磁场的边界条件	26
§ 1.7 光在两透明电介质分界面上的反射和折射	27
§ 1.8 全反射	34
§ 1.9 光的吸收、色散和散射	37
习题	46
第二章 几何光学	48
§ 2.1 几何光学基本原理	48
§ 2.2 费马原理	54
习题	58
第三章 反射型光学纤维	60
§ 3.1 引言	60
§ 3.2 反射型光学纤维的结构及其传光原理	61
§ 3.3 光学纤维中子午线的传播	62
§ 3.4 光学纤维中斜光线的传播	66
§ 3.5 纤维弯曲后对传播子午光线的影响	69
§ 3.6 光学纤维直径不均匀对传播子午光线的影响	73
§ 3.7 纤维端面倾斜时对传播子午光线的影响	76
习题	79
第四章 折射型光学纤维	81
§ 4.1 梯度折射率纤维中子午光线的传播	81
§ 4.2 梯度折射率纤维波导中的折射率分布, 自聚焦光学纤维	83
§ 4.3 自聚焦光学纤维中的斜光线	87

§ 4.4 自聚焦透镜及其成像	88
习题	93
第五章 光学纤维波导的概念	94
§ 5.1 波导中的传输模的概念	94
§ 5.2 在光学纤维波导中用特征方程法求传输模的概念	99
习题	104
第六章 光纤的光学性能及其应用	105
§ 6.1 反射型光学纤维的制造	105
§ 6.2 折射型光学纤维的制造	106
§ 6.3 光学纤维的主要特性	107
习题	115
第七章 光纤通信的光源	116
§ 7.1 玻尔原子模型与爱因斯坦辐射理论	116
§ 7.2 激光的产生	122
§ 7.3 激光的特性及应用	129
§ 7.4 光纤通信常用的激光器	131
习题	133
第八章 光纤通信的光电检测题	134
§ 8.1 光检测器的概要	134
§ 8.2 光纤通信常用的光检测器	135
习题	136
第九章 光纤的耦合和连接	137
§ 9.1 光纤与光源的耦合	137
§ 9.2 光纤的连接	140
习题	140
第十章 结束语	141
§ 10.1 光纤通信的应用	141
§ 10.2 光纤通信研究的动向	145

绪 论

§ 1 引 言

光学所讨论的内容包括光的发射、传播和接收等规律，光和其它物质的相互作用(如光的吸收、散射和色射，光的机械作用和光的热、电、化学和生理效应等)，光的本性以及在生产和生活上的应用。

光学是一门具有悠久历史的古老学科，它包含着人类自古以来对光的研究的丰硕成果，它的发展同其它的学科的发展一样经历了一个漫长而曲折的道路，它的发展史典型而又鲜明地反映着人类认识客观世界由浅而深，由表面到本质，由宏观到微观逐渐接近真理的过程。光学的发展大致可划分为下列五个时期：

- ① 萌芽时期；
- ② 几何光学时期；
- ③ 波动光学时期；
- ④ 量子光学时期；
- ⑤ 现代光学时期。

这里不打算对光学发展的各个时期的成就作系统的介绍，仅就光学发展到今天——现代光学时期与本课程有关的问题略谈几句。

现代光学是近 30 年来兴起并得到蓬勃发展起来的学科。1948 年全息术的提出，1955 年作为像质评价的光学传递函数概念的建立，1960 年新型光源——激光器的诞生，这是现代光学发展中有重要意义的三件大事。

从本世纪 60 年代起，特别在激光问世以后，由于光学与其它学科和技术领域的广泛而紧密的结合和相互渗透，随着科学技术其它领域的突飞猛进的发展，光学的研究也打破了过去一时沉寂的状态，它象一头睡醒的猛狮，以疾风骤雨般的活力，以一系列引人注目的成就，以及对于来来发展简直使人眼花缭乱的前景展现在而前，无论在发展的速度上还是在发展的规模上都是史无前例的。这门建立在电磁场理论的宏伟结构上的古老学科又焕发出它新的青春，它正在发生着深刻的变化，出现新的飞跃，产生了并且正在继续产生一系列新的学科分支，如象光子、空间滤波、纤维光学、薄膜光学、集成光学、全息光学、光通信、变换光学，当然还有激光、非线性光学等等这些已经进入当今科学和技术发展的最前列。

本课程是讨论光学纤维通信的物理基础，光学纤维已发展成为一种新型的光学元件，它为光学窥视(传光、传像)和光通信的实现创造了条件，它已成为某些新型光学系统和某些特殊激光器的组成部分。由于光纤通信具有使用范围广、容量大、抗干扰能力强、便于保密和节约金属材料等优点，将逐渐成为远距离、大容量通信的“主角”。

由于电磁理论、材料科学、集成技术和电子技术的飞跃发展，在集成电路的启示下，形成了集成光学这一门新兴的边缘学科。集成光学是研究集成光路理论及其制造的科学，它涉及介质光波导理论、集成光学材料体系、薄膜波导形式的各种分立元件、测试技术、

光集成回路和集成技术等许多领域。目前已将集成光路和光导纤维组成的光缆用于光通信、显示系统、信息处理和文字图像扫描等。

总之，现代光学与其它科学和技术的结合，已在人们的生产和生活中发挥日益重大的作用和影响，正成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率的强有力的武器。

§ 2 纤维光学

纤维光学是现代光学的一个重要的新分支，那么究竟什么叫纤维光学呢？我们把研究光学纤维传递光、信息和图像的科学叫做纤维光学。那么什么叫光学纤维呢？光学纤维又叫光导纤维（简称光纤），是传输光的导线，其种类很多，按其材料来分，分为玻璃光纤和塑料光纤两大类。如玻璃光纤，是由高折射率的透明的光学玻璃为芯，周围包着低折射率的玻璃薄层构成的，是直径为几微米到几百微米的玻璃丝（即一种特殊的玻璃丝），如图 1 所示。

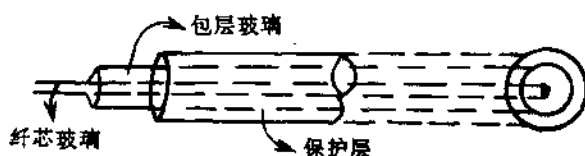


图 1 光学纤维

早在 50 年代，范·黑尔就提出用低折射率的固体介质包在高折射率的介质芯之外，可使光在介质芯中依靠全反射而传播。其后，很快制成了多种光学纤维和光学纤维束。

梯度纤维是 1968 年出现的一种新型的光学纤维。光线在其中自动弯曲前进。自聚焦光学纤维便是梯度纤维的一种，它具有成像的作用。

用光学纤维来传输光能，具有数值孔径大，可以弯曲，结构简单等优点。但是用一般光学玻璃制成的纤维传输光能，衰减较大，传输距离只能达到数米。后来人们开始研制纯度较高，衰减较小的石英玻璃纤维，能长距离传输光能和光信息，并可以应用于通信。近年来，研制低损耗光学纤维的技术有较大进展，许多国家已建立了光纤通信实验系统，并且投入了实际应用。这种通信用的光学纤维，称为光波导纤维或光导光纤。现在已研制成了许多种类的新型光导纤维。

用光学纤维组合而成的光学纤维束，按其用途可分为两类：一类是只用来传输光能的，称为非相关传光束；另一类是用来传输图像的，称为相关传光束。应用相关和非相关光束的一个典型设备是内窥镜，可用于工业和医疗。现在各种传光束和内窥镜在我国均有生产。

用光学纤维组合而成的通信用光缆，也是一种专用的纤维束。光缆的成功应用，代替了传统的电缆，是近年来纤维光学在实际应用上的重大发展。

总之，光纤在应用上的潜力和优越性，还有待于进一步的发提和发展。目前来看，主要动向转向了光通信和数据处理。但可以肯定，光纤在科学技术的许多其它领域中，存在着很大的潜力。

§ 3 光 通 信

光通信是现代光学的一个重要的分支，也是近代通信发展的重大成果。

1. 通信的概念

在人类社会里，人类为了生存必须了解自然规律并改造自然使之为人造福。进行这一伟大而艰巨的工作，仅靠着一个人的能力那是不行的，而要靠全人类的共同努力，为此，在生活和工作中，人与人之间总要要进行思想交流、问题探讨、感情传递，换句话说，就是人们总是离不开信息的传递。人与人之间这种思想感情的交流，信息的传递是随着生产技术的发展而不同，传递的方式也在逐渐的发展。远在古代我们祖先用的烽火台、驿站、金鼓、旌旗；当今的书信，旗语、电话、电报、传真、电视……等都是传递信息的方式。一般来说，我们把信息由一地 toward 另一地的传递叫通信，换句话说，通信是由一地 toward 另一地传递信息，在科学发展的今天，通信的方式之多是举不胜举的。

然而，随着科学生产技术的发展，人们对传递信息（即通信）的要求也越来越高，要求信息传递的既快又准确。对信息的传递方式（即通信的方式）也各不相同，以信号的“载体”来分，通信又可分为电通信和光通信，在目前各种各样的通信方式中，电通信（利用“电”来传递信息的通信方式）已获得了非常广泛的应用和发展，这是由于电通信方式能使传递信息几乎在任意的通信距离上实现既迅速、有效，而又准确、又可靠的缘故。70年代以来光通信（利用“光”来传递信息）更像雨后春笋一样蓬勃的发展起来，由于它强有力的生命力而正在蕴酿着一场大的通信革命。由目前我国和世界各国对光通信研究的进展情况来看，这一天的到来已不是遥远的未来。

通信中所传递的信息，有各种不同的形式，例如符号、文字、语声、音乐、数据、图片、活动画面等等，故根据所传递的信息的形式不同，在目前通信业务上又可分为电报、电话、传真、数据的传输、可视电话等。如果从广义的角度来看，则广播、电视、雷达、导航、遥控等也可列入通信的范畴。

控信息由一地 toward 另一地传递媒质的不同，通信又可分为两大类，一类称为有线通信，另一类称为无线通信。所谓有线通信，即信息传递是用导线来完成的通信方式。这里导线可以是架空明线，电缆或光缆及波导等。例如普通的有线长途电话系统可由图 2 来示意。电话机完成语声与电的话音信号之间的变换，而载波机则是完成语言信号与传输信号之间的变换。

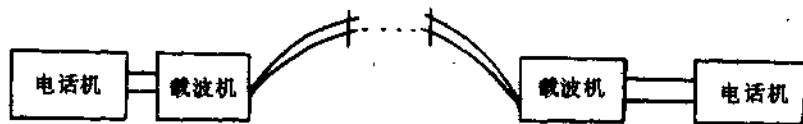


图 2 有线长途电话

所谓无线通信，它不需架设线路而用无线电波或光波在空间传播来传递信息。用于通话的无线通信系统如图 3 所示，语声通过话筒变成电的话音信号，发射机及天线将话音信号转换成相应的高频辐射波，并发往另一地。另一地（称为接收端）通过接收机及扬声器

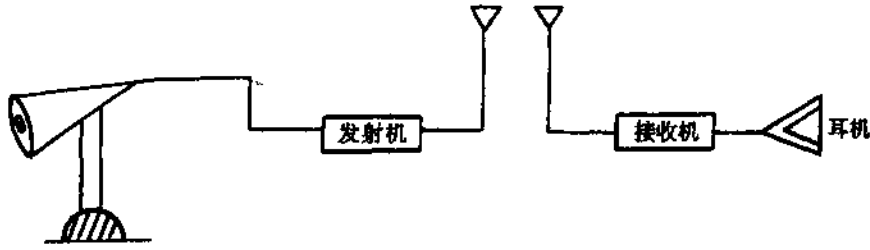


图3 无线通信

完成与发送端相反的变换。

通常，有线通信按传输线路的种类可分为明线通信，电缆通信，波导通信等。无线通信常见的有短波通信，散射通信（电离层散射或对流层散射等），微波中继通信，流星余迹通信，人造卫星中继通信等。

总的来看，无论何种通信，均是把一地（发送端）的信息传递到另一地（接收端），因而，通信系统可用图4加以概括。这里，信息源（也称发送端）的作用是把各种需要传送的信息转换成原始电信号（在光通信中还要进一步把电信号变换为光信号），为了使这个原始信号适合在信道中传输，由发送设备对原始信号完成某种变换，然后再送入信道。信道——是指信号的传输媒质。在接收端，接收设备的功能与发送设备的相反，它将从接收信号中恢复出相应的原始信号，而受信者（也称收终端），它是将复原的原始信号转换成相应的信息。

图4是对各种通信系统的一个抽象，它概括地反映了通信系统的共性，人们常称其为通信系统的模型。通常，根据我们的研究对象及关心的问题不同，将会出现不同形式的较具体的通信系统模型。通信的原理或基本理论的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

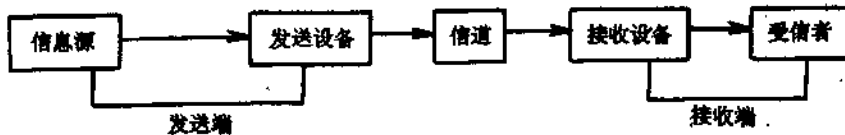


图4 通信系统

2. 通信的发展

(1) 电通信

电通信起源于19世纪30年代出现低级的有线电报通信方式作为标志。当然，电报通信方式的问世是完全建立在以往人们长期实践基础上的，当时已积累了电磁学的丰富知识。到了19世纪70年代，又由于电磁理论的形成和发展，开始有了电话机，并开始形成了以金属导线作为传输媒质的简单的有线电话通信方式。不久，人们又发现了电磁波现象，于19世纪末期人们发明了简单的无线电发送和接收装置，从而人们开辟了无线电通信发展的道路。20世纪初，电子管等器件开始出现，从而使电报和电话获得了迅速的发展，相端有了较高水平的有线通信及长波、中波和短波一类的无线电通信。由于人们对通信技术需要愈来愈迫切，从而又大大推动了通信科学的发展，从20世纪30年代开始，尤其是50年代之后，人们逐步对通信实践中遇到的问题展开了深人的理论研究，并获得了

可喜的进展。在通信理论上，先后形成了“过滤和预测理论”，“香农信息论”，“调制理论”，“信号检测理论”等等。在通信体制上，由于电子管的更加完善，晶体管的出现以及集成电路的问世，不仅更加促进电话通信的高速发展，而且于20世纪中叶电报通信方式有了重大的突破，出现了具有广阔发展前景的数字通信方式。在通信的传输方式上，早已打破了人与人之间进行通信的旧框框，已经实现了人与机器或机器之间的通信。

尽管目前通信技术已经发展到了相当高的程度，但通信发展仍然不能满足社会的需要，因此，通信科学必将朝着更高的水平不断发展。

(2) 光通信

广义地说，通信就是彼此间传递信息。从这一含义出发，公元前700多年我国用烽火台火光通信（报告敌人的人侵情况）就是光通信的开端（这比欧洲早两个世纪左右）。到了汉朝，汉武帝又把烽火通信加以发展，在长城上每5公里左右设一烽火台用来报警，用接力的方式增加通信距离，并且还把报警装置分成烽表、烽烟和营火三种，根据人侵之敌的多少和严重程度分别使用。

当然，这种传递信息的方法极为简单，信息容量很有限，直到1880年第一个真正的光学电话才问世（这是由电话的发明者贝尔研究成功的）。到了第一次世界大战期间，光学电话应用在军事上，为提高通信保密性，制成了红外线的通信机。在第二次世界大战期间，美国、日本和苏联也都使用过红外线通信系统。

不过从光学电话问世一直到第二次世界大战这一漫长的时间里（约60年），光通信系统所用的光源都是热辐射源，辐射的都是非相干光，调制很困难，同时用作接收机的硅光电池内部噪声很大，因此通话质量很差。加之红外线在大气中的传输损耗很大，严重地影响了通信距离和可靠性，这样就限制了光通信的发展和应用。

自从1960年第一台激光器出现以后，应用激光——相干光，作为载频的光通信^①就很快地发展起来。特别是自70年代以后，低损耗的光导纤维研制成功，应用光纤波导，克服了大气光通信的缺点，目前光纤通信系统日趋完善，已走向全面使用的阶段。

3. 光纤通信

上面我们谈到了光通信可分为有线通信和无线通信。无线通信即大气光通信，是直接利用光在大气中的传播来进行通信的，这种通信的优点是：

(1) 光的频率很高，信息容量大；(2) 方向性好，保密性强；(3) 不需要特殊的敷设线路。

其缺点是：

(1) 受大气分子的吸收，尘埃、雾、露、雪和雨的散射以及云和大气湍流的干扰等因素的限制。另外，任何意外的空间拦截物，如飞鸟、飞机的遮挡，都可使通信中断。

(2) 通信方向的瞄准和保持困难。

这些缺点限制了光的大气通信的使用。大气光通信适宜用于固定的通信站，如山头、

^①现代的“光通信”，实际上是“光波通信”，即利用可见光谱区或其邻近的光波（归根结底是一种电磁波，现在实际使用的是近红外光波）作载波的一种通信方式。这种通信系统，不同于像烽火、灯光、旗语、信号标、日光反射信号器等那些直接利用可见光传递信息的可见光通信系统，而是经过载波通信、短波通信、超短波通信、微波通信、准毫米波及毫米波（波导）通信等逐渐发展起来的。

岛屿之间的通信。光纤通信（有线通信）克服了大气通信的缺点而迅速发展起来。光纤通信的优点是：

(1) 传输容量大，特别适于图像传送和数字化系统信息的传递。光是频率极高的电磁波，在 $10^{13} \sim 10^{15}$ Hz 之间，比短波频率高 100 万倍，比微波频率高一倍。以它来作为信号的载体就可以传输极宽的信号频谱。若每个话路频带宽度按 4kHz 计算，则它可容纳 100 亿个话路。如果每个彩色电视的频率宽度为 10MHz，则它可同时传送 1 000 万套电视节目，这是同轴电缆望尘莫及的。

(2) 不怕电磁干扰。光纤的材料都含有很高的二氧化硅含量，是不导电的无电感的。因此，不会受电磁干扰，可确保高而可靠的信号传输，尤其适用于电力输配系统的数据传输与控制线路。

(3) 光纤线路之间不会产生串音，也不需要采取防雷措施。因为作为载运信息的光都在纤维内传输，所以纤维间不会有串扰。因它不受外界干扰，故可在有干扰的地方也可在无屏蔽的情况下使用。光纤又是绝缘体，因而无接触短路的问题，不会受到雷击的据坏，也不会受辐射能的损伤。

(4) 保密性强，几乎不可能被窃听。由于所传递的信息都在纤维内部传递，纤维外无信息能量，所以不可能被窃听。

(5) 由于光纤是玻璃（或塑料），主要原料是二氧化硅，来源丰富，这样可节省大量的有色金属。

(6) 由于光纤的传输损耗低，所以可延长中继距离（减少中继站的数目）。60MHz 的同轴电缆中继距离为 1.5km，而光缆一般为 10~15km，是通 10 800 路的同轴电缆的 7~10 倍。若应用损耗为 1dB/km 以下的光缆，中继距离可达 50km。低于 1dB/km 以下的光纤也研究成功，美、日、英国已试验成功 100km 以上无中继站的通信。60MHz 的同轴电缆传输损耗为 19dB/km。而光缆为 2~5dB/km。

(7) 光纤的重量轻，可挠性好，敷设方便。（重量轻，直径细可以充分利用地下管道）。

表 1 同轴电缆和光缆媒质的特性比较

项目 \ 媒质类型	同轴电缆	光缆	注
直径(mm)	9.5	0.05~0.3	
弯曲半径(mm)	> 50	> 5~10	
频带	60MHz~200MHz (频率划分调制) 400MHz(脉冲调制)	$10^5 \sim 10^6$ GHz *	
衰减(dB/km)	19(60MHz)	2~8	最低已达 0.2dB/km
中继距离(km)	1.5(60MHz)		据美、英、日报导，目前可作到 100km 以上无中继
容量/单位截面	1	100~1 000	
重/单位容量	1	1/5~1/100	

* 1GHz = 10^3 MHz = 10^9 Hz.

(8) 光源调制方便。若光源用半导体激光器作通信光源，可采用改变注入电子流的方法进行高速直接调制，可以与现有的各种电信信息终端机匹配。

(9) 采用半导体发射和接收器件作中继器，体积小，重量轻，耗电省，敷设与维护方便。

事物总是一分为二的，光纤也有它的缺点：质地脆弱，芯线不易接续，不能传输电力等。为确保光纤的优点而克服缺点，就对光纤材料提出了较高的要求，要求材料的吸收、散射损耗要小，色散要小，化学性能稳定，机械强度大等。

同轴电缆和光缆媒质的特性的比较见表 1。

§ 4 光纤的发展阶段

光纤通信的信道是光纤。关于光纤的发展过程这里略提一下。

1960 年人们获得了强相干光源——激光光源后，由于光通信的通信容量大，保密性好等优点，因而首先在大气中进行了试验。但是，受气候的影响比较严重，大气中的各种微粒的吸收与散射，特别是遇到了雾、雨、雪坏天气，会使激光光束严重衰减甚至中断，大大地减少它的有效传输距离。于是，人们对激光通信就有了射束引导的设想。

开始时，人们凭借镜子和透镜来引导光线。把一组镜子或透镜两两相隔一定的距离，屏蔽于管道内，使激光束可以在管内以不断反射或聚焦的方式逐节前进，此装置称为镜子波导或透镜波导（见图 5）。若在透镜表面镀上增透膜，传输损耗能降低达 $0.5\text{dB}/\text{km}$ （相当于 1km 约消耗 10% ）。但问题是管道的振动，上下的温度差的偶然因素以及透镜的位置稍有偏离，就会影响光束的传输，使其偏离传播路线的轴线，且管道上下一旦有温差，管道中空气透镜作用会使光束弯曲，所以此种装置不实用。

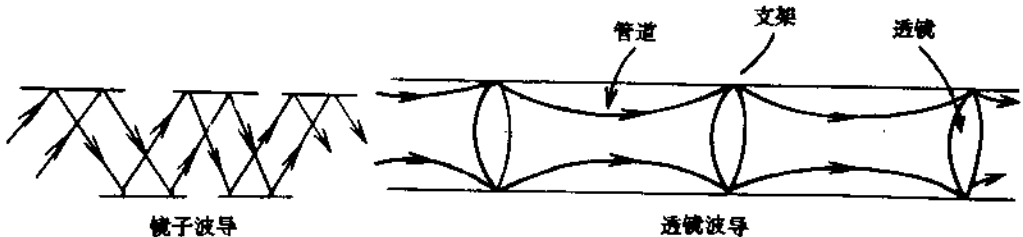


图 5 镜子波导和透镜波导

当时，正值光纤蓬勃发展之际，因此，就想到了利用光纤能弯曲传光的特性来实现光纤通信。

第一阶段：传输媒质的探索阶段(1960~1969年)。

1966 年，英国标准电信试验室（高锟）首先提出用玻璃纤维作光通信的传输媒质。开始研究的目的是判断玻璃纤维作为通信传输线路的可能性及与其它传输手段相比较看看有无研究的实际价值。直到 1969 年研究尚未取得大的进展，玻璃纤维的损耗在

1000dB/km, 中继距离 20m 左右, 在经济上确实是不堪设想的(要符合通信要求, 光纤损耗 < 20dB/km 以下, 相当在 1km 长度上光有 1% 的透过率)。所以当时认为没有实用价值。所以 60 年代以前称为光纤通信发展的第一阶段——传输媒质探索阶段。

第二阶段: 降低玻璃纤维传输损耗的阶段。

1970 年美国康宁玻璃公司以超纯石英为材料, 用烟灰沉积工艺首先拉制成在 $0.63\mu\text{m}$ 波长上损耗为 20dB/km 的纤维(这根光纤实质上是单模的)。在当时看来损耗是非常低的, 这是向使用先学纤维来实现光通信目标所迈出的最重要的一步。

1973 年初, 该公司(康宁玻璃公司)宣布拉制出 N.A. 为 0.14 在 0.8、0.85 和 $1.03\mu\text{m}$ 的波长下损耗为 4dB/km 的近似梯度多模光纤(这个损耗已比工作在 10MHz 以下的同轴电缆的损耗小得多)。这样就大大地激发了对光学纤维研究的兴趣。随后各国的研究工作再次活跃起来。1973、1974 年以后发展很快, 出现了各种类型的低损耗光学纤维。1974 年, 贝尔实验室研究人员, 拉制成掺硼光纤的 N.A. 为 0.17, 波长在 $1.03\mu\text{m}$ 下的损耗为 1.1dB/km。在这个阶段, 激光通信的研究在于选择制作光纤的适当材料, 改善制作工艺, 并在降低传输损耗方面取得了一定的成绩。

第三阶段: 实用研究阶段。

1974 年光导纤维的研究取得了进展以后, 促进了整个光通信技术的研究工作。成缆、耦合、连接、中继器等方面的技术工作也相应迅速发展起来。近年来, 光纤通信受到科学技术发达的美国、日本、英国、法国等国家的高度重视, 并投入了大量人力、物力、财力进行研究工作, 我国也进行了大量工作, 因而促进了光纤通信的飞速发展。现在光纤通信的研究总体上已经成熟, 并开始大规模的推广和应用。

§ 5 光纤通信系统

现在的光纤通信系统采用直接调制和直接检测, 简单地说由先发射机(即电/光转换), 光接收机(即光/电转换), 传输线采用的光纤或光缆, 对长距离通信还需先中继机等部分构成, 其结构示意图如图 6。

光发射机是将载有信息的电信号变损成光信号功率, 然后耦合到光纤中进行传输, 它主要包含信号处理、驱动器, 光源, 光源——光纤耦合器及其它附加电路。



图 6 光纤通信系统(此图仅表示单方向信道)

光接收机的功能是将光纤传输来的光信号功率变损成电信号, 再经过一系列电处理, 使其复原成为原来的电信号, 再输出给终端机, 分配到用户。它一般由光纤——光检测器耦合装置, 光检测器, 放大器, 信号处理等装置以及其它附加电路构成。

光中继机的作用类似于电通信中的增声机。它的功能是将经过一段距离传输的已经减

弱的光信号增强后再使其继续向前传输，这在长距离光纤通信中是必不可少的。光纤通信系统较详细的方框图见图 7。

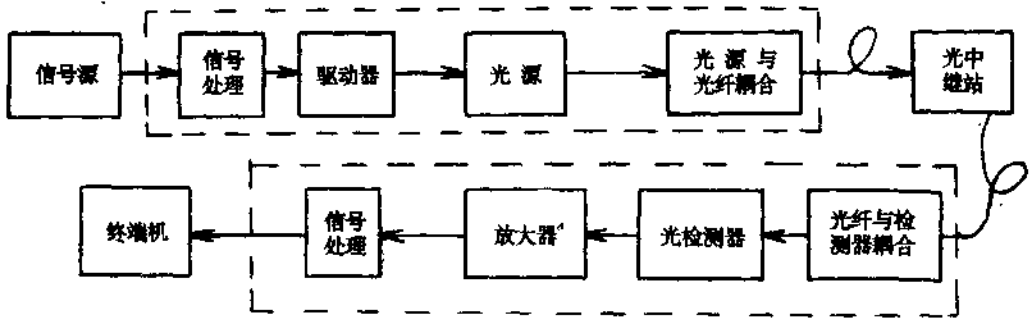


图 7 光纤通信系统方框图

§ 6 模拟通信与数字通信

无论是光通信系统还是电通信系统一般都可分为模拟式和数字式两大类。我们知道通信时有待传输的信息是多种多样的，它可以是符号、文字、语声、图像等等。然而，所有不同的信息，都可归结为两大类：一类称作离散信息，一类称作模拟信息。离散信息也指信息的状态是可数的或离散型的，比如符号、文字或数据等。离散信息也称为数字信息，而模拟信息则是非离散型的，也即信息状态是连续变化的，例如，强弱连续变化的语声，亮度连续变化的图像等。模拟信息也称为连续信息。

为了传递信息，各种信息需要转换成电信号。由图 6 可知，信息与电信号之间必须建立单一的对应关系，否则在接收端就无法复制原来的信息。通常，信息被寄托在电（光）信号的某一参量上。如果电信号的参量携带着离散信息，则该参量必将是离散取值的，这样的信号就称为数字信号，如电传机输出的信号就是数字信号。如果电信号的参量对应于模拟信息而连续取值，则这样的信号为模拟信号或连续信号，如普通电话机输出的信号就是模拟信号。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成两类，模拟通信系统和数字通信系统。（当然也可以把模拟信号换成数字信号进行传输。）

目前，无论是模拟通信，还是数字通信，都是已经获得广泛应用的通信方式。数字通信——低级的电报出现最早，但发展很慢，实用信号设备也远比模拟信号少。但到 20 世纪中叶以来，数字通信日益兴旺，目前出现了数字代替模拟的某种趋势。其原因是数字与模拟相比，数字通信更能适应对通信技术越来越高的要求。其优点为：

- (1) 数字传输抗干扰能力强；
- (2) 传输的差错可以设法控制，改善传输质量；
- (3) 便于用计算机对数字信息进行处理；
- (4) 数字信息保密性强；
- (5) 数字通信可以传递各种信息，使通信系统变得通用、灵活等。这些优点是数字通信发展快的原因所在。

数字通信的缺点：数字通信比模拟通信占的频带宽，故通信的频带利用率不高。

第一章 光的电磁理论

通过物理课的学习,我们知道,光具有波动性,光是波长在一定范围内的电磁波。因此,要了解光的波动性,就必须首先讨论电磁波有些什么基本性质,如电磁波在两种介质的分界面上折射和反射时,其传播方向,能量密度以及偏振状态等要发生什么变化,这些变化有什么样的规律,这些就是本章所讨论的主要课题。

19世纪60年代,麦克斯韦(Maxwell)总结了前人在电磁学方面的研究成果,建立了经典电磁理论。同时,他又把光学现象和电磁现象联系起来,指出光也是一种电磁波,从而建立了光的电磁理论。光的电磁理论的确立,推动了光学及整个物理学的发展。尽管现代光学产生了许多新的领域,并且许多光学现象需要用量子理论来解释,但是光的电磁理论的研究仍然是掌握现代光学的一个重要基础。

§ 1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦在安培环路定律、高斯定律、法拉弟定律和无自由磁荷等基础上,从理论上进行概括、总结和推广,在19世纪中期,建立了电磁场方程组——麦克斯韦方程组,为完整的电磁场理论奠定了基础。从该方程组出发,结合具体的条件,可以定量地计算在给定的条件下发生的光学现象,例如光的辐射和传播、光的反射、折射、干涉、衍射和光与物质相互作用等现象。

不稳定电磁场的普遍规律由麦克斯韦方程组

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = \Sigma q \quad (1-1)$$

$$\oiint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (1-2)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{\sigma} \quad (1-3)$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \iint \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{\sigma} \quad (1-4)$$

来表示,式中 \mathbf{D} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 分别表示电位移矢量、电场强度、磁感强度和磁场强度。对 $d\boldsymbol{\sigma}$ 和 $d\mathbf{l}$ 的积分分别表示对任一闭合曲面和闭合回路的积分; Σq 表示积分闭合曲面内包含的自由电荷的代数和,即总电量, I 表示积分闭合回路包围的传导电流的代数和。这四个方程通常称为积分形式的麦克斯韦方程组。

麦克斯韦方程的积分形式适用于一般情形的电磁场,但由于这些方程的数学表示式是以积分形式来联系所选定范围内(例如一个闭合回路或一个封闭曲面内)所有点的电磁场量(\mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 等)之间的关系,而不能求出某一点上各电磁量之间的相互联系。但在实际应用中,更重要的是要知道场中某些点或某一点的场量。例如,已给定在初始时刻的电荷分布、电流分布或电荷运动情况,要求知道以后时刻场中某一点或某些点的电磁场量的强弱和变化规律。从数学上来看,首先要把积分形式的方程变换为相应的微分形式,才

能有效地适应实际应用的要求。

为此，我们首先把方程组(1-1)~(1-4)变换为相应的微分形式。对于方程式(1-1)，如果闭合曲面积分域内包含的电荷是连续分布的，则 $\Sigma q = \iiint \rho dv$ ，式中 ρ 是体电荷密度，积分域是闭合曲面所包围的体积。这样(1-1)变为

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = \iiint \rho dv$$

根据积分学中的高斯定理

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = \iiint \nabla \cdot \mathbf{D} dv$$

得

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-5)$$

式中算符 $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ 称为哈密顿(Hamilton)算符， i, j, k 分别为 x, y, z 坐标轴的单位矢。

$\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$ 表示 \mathbf{D} 的散度(也可记为 $\text{div} \mathbf{D}$)， D_x, D_y, D_z 分别为 \mathbf{D} 在 x, y, z 坐标轴上的分量。(1-5)即(1-1)的微分形式。

再如方程(1-4)式，如把 I 写成 $I = \iint \boldsymbol{\delta} \cdot d\boldsymbol{\sigma}$ ，式中 $\boldsymbol{\delta}$ 为传导电流密度，表示单位时间垂直通过单位面积的电流，这样(1-4)式变为

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint \boldsymbol{\delta} \cdot d\boldsymbol{\sigma} + \iint \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{\sigma}$$

根据积分学中的斯托克斯(Stokes)定理

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint \nabla \times \mathbf{H} \cdot d\boldsymbol{\sigma}$$

得到

$$\nabla \times \mathbf{H} = \boldsymbol{\delta} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-6)$$

式中 $\nabla \times \mathbf{H}$ 表示 \mathbf{H} 的旋度(也可写为 $\text{rot} \mathbf{H}$ 或 $\text{curl} \mathbf{H}$)(1-6)即(1-4)的微分形式。

同样，我们很容易得到方程(1-2)和(1-3)的微分形式

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-7)$$

和

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-8)$$

因此，和麦克斯韦方程组(1-1)(1-4)积分形式的相对应的微分形式的麦克斯韦方程为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \boldsymbol{\delta} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (1-9)$$

对于静电场和稳恒电流的磁场，麦克斯韦方程组变为下面的形式

积分形式

$$\begin{cases} \oiint \mathbf{D} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = \Sigma q = \iiint \rho dv \\ \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \\ \oiint \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = 0 \\ \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint \delta \cdot d\boldsymbol{\sigma} \end{cases}$$

微分形式

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \delta \end{cases}$$

麦克斯韦方程组是电磁场理论的基础，在应用这些方程求解问题时，还要考虑介质对电磁场的影响，这种影响就是所谓的物质方程（电磁场量和介质特性 μ, ϵ, γ 之间的关系式）。

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\delta = \gamma \mathbf{E}$$

其中 ϵ, μ, γ 分别称为介质的介电常数、磁导率和电导率。（在各向同性的均匀介质中， $\gamma=0$ ， ϵ 和 μ 为常数，在真空中 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} (C^2 / N \cdot m^2)$ ， $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (N \cdot s^2 / C^2)$ ）。

同时还要考虑电磁场量在非均匀介质界面上的边界条件，以及具体问题 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 的初始条件（即它们在 $t=0$ 时的值），这样，才能对方程组求解。通过解方程组，可以求得任一时刻的 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 和 $\mathbf{B}(x, y, z)$ ，也就确定了任一时刻的电磁场。当然，根据给定的初始条件求解微分方程组还有数学上的问题，有的实际问题可以求出精确解，而有一些问题只能求出近似解。但不管怎么说，从物理原理上来看，麦克斯韦微分方程组和物质方程构成一组完整的反映电磁场普遍规律的方程组，它是进一步研究电磁场理论的基础。

§ 1.2 电磁场的波动性

由麦克斯韦方程组，可以得出两个结论：第一，任何随时间变化的磁场在周围空间产生电场，这种电场具有涡旋性，电场的方向由左手定则决定（如图1-1）；第二，任何随

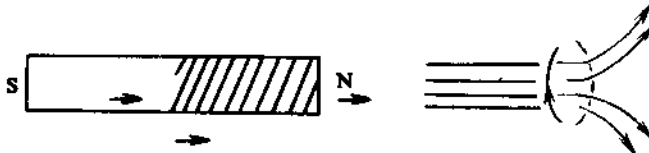


图 1-1 永磁铁向闭合线圈运动