

光 纤 通 信 入 门

〔日〕末松安晴 伊贺健一 著

刘时衡 梁民基 译

國防工業出版社

内 容 简 介

本书是论述光纤通信的入门读物。全书共分八章，内容包括：光通信概述；传光现象基础；光波导的性质和聚光；发光和激光器工作的原理；光通信用的光源；光的调制-解调及集成光路；光纤传输线；光通信系统及其应用等。

本书可供从事光通信、电信、电子技术及光学方面工作的技术人员和大专院校有关专业的师生参考。

光ファイバ通信入門

末松安晴 伊賀健一 著

オーム社 1976

*

光纤通信入门

〔日〕末松安晴 伊賀健一 著

刘时衡 梁民基 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张 6¹/₄ 129 千字

1981年2月第一版 1981年2月第一次印刷 印数：0,001—4,700册

统一书号：15034·2130 定价：0.67元

原 序

本书是为担负光纤通信今后发展任务的学生和青年技术人员所编写的入门读物。书中论述了：光波导原理；半导体激光器和发光二极管一类光源的工作原理、特性及调制方法；光电探测器和光路；光纤传输线路的特性以及光信息传输系统的现状等。

从广义上说，光通信可以上溯到人类诞生之日。可是为了有效地利用光，人类已不断地对光通信方式作出筛选。把光作为适应现代高度文明所要求的信息传输工具，从而引起科学工作者的注意，乃是1960年发明了激光器后的事情。而具备其工业规模的可能性，却是在光纤传输损耗降低，同时改进成功小型高效半导体激光器之后——即距今不久的1970年后。

通过这五、六年来的研究，光纤可以被认为是一种损耗最低的大容量传输线。光纤通信是一门新技术，它已引起全世界的注意，并正在蓬勃地发展中。

我们有这样的机会从一开始就参与了这一领域的研究工作，并曾多次在一些刊物上发表过有关的文章。这次应欧姆出版社之约，为了在发展光通信方面获得青年朋友们的关心与帮助，遂编成此书。

由于仓促写就，书中或有误解和不明确之处，希望通过读者的批评在以后改进。

本书曾参阅多方的研究成果，并蒙他们愉快地提供照片和图稿，借搁笔之际，谨表示衷心的感谢。同时深深地感谢编写此书时给过大力协助的欧姆出版社的森及桑山两位先生。

著 者

1976年初秋

目 录

第一章 光通信概述

1.1 什么叫光通信	1
1.2 新型光源与光纤传输线的发展史	3
1.3 几种传光方法	6
〔1〕 空间传播——一种简单的传光方法	6
〔2〕 透镜列波导系统	8
〔3〕 光纤传输线	9
1.4 光纤通信及其优点	10

第二章 传光现象基础

2.1 折射与反射	12
2.2 传光原理	15
2.3 沿波导传输的光波的模	17
2.4 模数	21
2.5 群速度	25
2.6 TE 模和 TM 模	27

第三章 光波导的性质和聚光

3.1 聚焦型波导	29
〔1〕 聚焦型波导中波的传播	30
〔2〕 聚焦型波导中模的次数	32
〔3〕 聚焦型波导中模的群速度	35
3.2 折射率分布不同的波导	35
3.3 单模波导	38
3.4 波导是弯曲时的传光特点	39
3.5 界面有凹凸时的传光特点	41
3.6 聚光的方法	42

第四章 发光和激光器工作的原理

4.1 发光现象的机理和激光器	45
〔1〕 发光机理	45

〔2〕 光放大和光振荡的机理	46
4.2 半导体的发光和发光二极管	49
〔1〕 半导体发光材料	49
〔2〕 发光二极管	52
4.3 激光器的工作原理	54
〔1〕 激光器的振荡原理	54
〔2〕 激光器的振荡条件	56
〔3〕 室温下连续工作的双异质结激光器	57
4.4 半导体激光器	59
〔1〕 双异质结半导体激光器的工作原理	59
〔2〕 半导体激光器的振荡光谱	61
〔3〕 双异质结半导体激光器的制法	61
4.5 辐射光的性质	66
〔1〕 相干原理	66
〔2〕 激光与其相干性	67

第五章 光通信光源

5.1 通信光源的特点	70
〔1〕 光源的必要条件	71
〔2〕 光源的充分条件	72
5.2 光纤的传输特性和发光元件	74
5.3 光源	75
〔1〕 砷镓铝 (GaAlAs) 系列发光二极管	75
〔2〕 砷镓铝 (GaAlAs) 系列半导体激光二极管	77
〔3〕 条形激光器	79
〔4〕 提高可靠性的途径	81
〔5〕 输出功率和效率	82
〔6〕 砷镓铝 (GaAlAs) 双异质结激光器的温度特性	83
5.4 光源与光纤的耦合	84
5.5 长波长的半导体光源	86
〔1〕 砷镓铟 (InGaAs) 系列	86
〔2〕 锑砷镓 (GaAsSb) 系列	87
〔3〕 磷砷镓铟 (InGaAsP) 系列	88
5.6 固体激光器	88

5.7 改进型半导体激光器	90
---------------------	----

第六章 光调制、解调和集成光路

6.1 光调制	94
6.2 半导体激光器的直接调制	96
〔1〕 谐振现象	98
〔2〕 谐振频率附近产生的脉冲	99
〔3〕 张弛振荡	99
〔4〕 脉冲调制的载流子累积效应	100
6.3 发光二极管的直接调制	103
6.4 外调制	104
〔1〕 相位调制器	104
〔2〕 波导型调制器	106
6.5 光电探测器	107
〔1〕 光功率和电信号	107
〔2〕 对光电探测器的要求	107
〔3〕 雪崩光电二极管(APD)的工作原理	108
〔4〕 雪崩放大	110
6.6 集成光路概要	111
6.7 集成光路用的波导	113
6.8 波导型无源光路	114
〔1〕 滤光器	114
〔2〕 单向波导	115
6.9 波导型有源光路	115
〔1〕 集成激光器	115
〔2〕 波导型调制器和偏转器	116
〔3〕 波导型光电探测器	117
〔4〕 参量光波导	117
〔5〕 具有存贮作用的波导	118
6.10 集成光路展望	118

第七章 光纤传输线

7.1 光纤的种类与特征	119
7.2 光纤的基本常数	121

〔1〕 圆柱形光纤的参数	131
〔2〕 折射率阶跃型光纤中光波的模	122
〔3〕 聚焦型光纤	125
7.3 光纤用的材料和制法	128
〔1〕 石英玻璃光纤	128
〔2〕 多组分玻璃光纤	130
7.4 光纤的损耗	131
〔1〕 吸收损耗与散射损耗	132
〔2〕 界面散射损耗和弯曲损耗	133
〔3〕 光纤的对接损耗	134
7.5 折射率分布的测试方法	135
7.6 光纤的传输带宽	137
〔1〕 传输带宽受限制的主要原因	137
〔2〕 折射率色散	139
〔3〕 结构色散	141
〔4〕 模色散	142
〔5〕 模耦合和模次数对损耗的影响	144
〔6〕 几种光纤的传输特性	146
7.7 光缆及其对接	148

第八章 光通信系统及其应用

8.1 光纤通信的特征和应用领域	151
〔1〕 光通信和传统的有线通信比较	151
〔2〕 光纤通信的优点和应用领域	152
8.2 光纤通信的传输距离	153
〔1〕 传输系统概述	153
〔2〕 最低接收电平	154
〔3〕 传输距离	156
〔4〕 传输方式和传输距离的关系	157
8.3 光的传输方式二、三例	159
〔1〕 光脉冲间隔调制 (PIM) 方式	159
〔2〕 脉码调制 (PCM) 的光传输	159
〔3〕 电力系统用的光通信系统	162
〔4〕 观测和控制用的光纤	163

附 录

附录一 聚焦型波导内的光线轨迹——式 (3.4) 的推导	165
附录二 聚焦型波导中光线传播一个周期的相位变化 ——式 (3.9) 的推导	166
附录三 式 (3.12) 和式 (3.15) 的推导	168
附录四 厄密-高斯型模函数	168
附录五 聚焦型光纤中各种模的对应关系	169
参考文献	170
百分损耗(%)与分贝损耗(dB)换算表	188
dBm 与 mW 换算表	188
电磁波频率 f 与波长 λ 换算表	189
光纤的特征及其应用范围	190

第一章 光通信概述

1.1 什么叫光通信

一种新型的波正在涌现，这就是光通信用的光波。光通信究竟是什么呢？为了回答对此感兴趣的读者，我们编写了这本不需要预备知识的入门读物。

近年来，通信技术的进步的确惊人，如在电视屏幕上可从地球一方同时看到地球另一方举行的奥运会实况已属常事。将来，医疗和教育用的电视或函件和报纸的传真均会相当普及，就连家里的通信，也都要使用数据传输和电视电话，因而，需要比目前大几百倍的通信容量。为了传送这样大量的信息，就要展宽频带，采用高频电磁波。所以，研究比过去频率高的电磁波的技术是通信部门科技人员的一项重大课题。1960年，发明了激光器（光振荡器），它能产生比微波频率（ $\approx 10^{10}\text{Hz}$ ）高 $10^4\sim 10^5$ 倍的相干光。这种激光出现以后，其作为通信载波而固有的优点，即单色性好、频带宽、方向性强等，一直在进行试验并把它应用到通信中。开始曾有人对它评价过高，以为只凭频率增高倍数（ $\approx 10^5$ 倍），激光通信能容纳的频道数就增多。但考虑实际通信系统时，如何使激光器本身使用更方便的问题，调制、解调的问题，提高传输线路的可靠性及降低其损耗的问题等等，问题还不少，因而遇到障碍。

然而，到了1970年，却成功地获得了低损耗的玻璃光纤

(又称光导纤维或光学纤维)。同一年,尚欠完善而又拟作光通信光源的半导体激光器,也能在室温下连续工作。其后,通过延长半导体激光器寿命和减小光纤损耗的研究,光通信的实际应用终于萌芽了。当然,这还是处在起始阶段,但可以认为这颗幼芽已具有他日能培育成大树的气质。

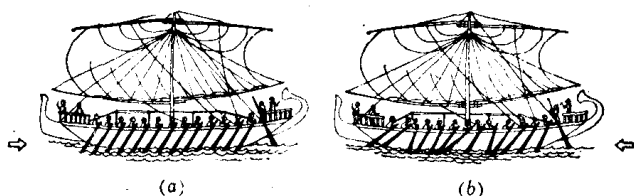


图1.1 相干现象〔图(a)中船桨的动作等周期一致的现象称为相干〕

(a) 相干; (b) 非相干。

另一方面,对于频率比可见光波更高的紫外线和X射线,若考虑到它们每个光子的能量很大,量子噪声效应又过强,加之传输线路和反射器等的制作难度时,则可以说这两种射线是难用于通信的。因此,光频也许就是我们能用于通信的最后一种电磁波段。

在各种光通信方式中,本书主要论述图1.2那种采用光纤和半导体光源的方式。这种光纤通信中,发信端首先把用户想传送的信号(声音)变为电信号,然后使半导体激光器或发光二极管等通信光源发出的光强随电信号变化(称为调制),并用光纤把该光信号传向远方;收信端则用光电探测器接收光信号,在还原为电信号(称为解调)后,再变成用户能理解的信号(声音),这样就构成一个完整的光纤通信系统。

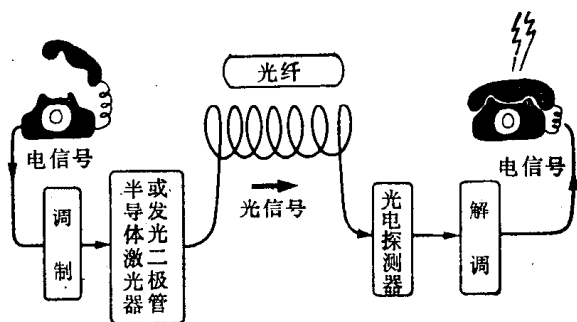


图1.2 光纤通信系统

1.2 新型光源与光纤传输线的发展史

在人类历史上，除用眼光示意的方法外，还有过利用灯火和烽烟及利用镜面反射太阳光等来进行光通信。直至今日，人们还在轮船上使用灯光莫尔斯码通信。

关于电致发光光源，欧美是在研制放电管、白炽灯和固体发光以及电流流经半导体接合面时会发光等现象的基础上，研制成功的。这时，人们已认识到硅、锗这类元素的半导体晶体的发光强度虽小，但砷化镓（GaAs）这样的化合物半导体的发光强度却相当大，并以制成发光元件为目标，研究起这种化合物半导体晶体的生长技术。

至于传输线路，玻璃加工盛行的古希腊在玻璃精加工时，就发现玻璃棒能传光，而在科学方兴的十九世纪的英国，也观察到光沿细小水流传播的现象。

根据上述原理，德国在1930年进行了由玻璃纤维传光的最初实验。1958年，英国设想出了现用光纤的原形，即以—种玻璃纤维为芯子，其周围被覆另—种玻璃包层。

六十年代初，日本也开始制作这种包层光纤，并用来传送图象；但损耗很大，在一米长度上光强就减剩为原值的几分之一，不能用来传送信号。

此外，美国在1960年进行了透镜阵列传光的通信实验。他们在地面上敷设一公里传输线（将焦距均为50 m的10个光学透镜按间距100 m排列，并以管道遮蔽），用氩灯作光源进行通信试验。同时还制成了红宝石固体激光器，1961年又制成氦-氖（He-Ne）气体激光器，1962年制成砷化镓半导体激光器。于是，人们又认识到，新获得的激光将能应用于高效能的通信方式中。

随后，对法布利-珀罗谐振腔（激光器中，两块反射镜相对放置而成的锁光装置）中的特征模进行了研究（表示光的分布形式），建立了光束从激光器谐振腔发出，并在空间传播的状态方面的基础理论。

1964～1965年间，又提出了气体透镜的设想，并进行了研究。这是使气体的折射率分布从中心轴往外按平方率递减，把光限制在中心轴附近来达到低损耗传输的一种气体透镜。光在具备这种折射率分布的透镜式介质内的传播模式数学基础，近来已经建立。但是，为了使气体的折射率按一定方式分布，需要电功率，而且设备的体积也很大，不可能作传输元件。虽然如此，这种将光连续闭锁来进行传输的思想，和为了使各个模都有相等的群速度而使折射率取近似平方率分布的方向，以及分析介质波导的数学模型的形成等——这些成果，已在今天的光纤研究中有效地被利用。

从1966年开始，日本和美国都注意到半导体激光器在光通信中的应用，并且确信能直接调制在很高的频率上。同时，

日本、英国和美国又重新把玻璃光纤用作通信的传输线，并开始探讨光纤在降低损耗和扩大带宽方面的问题。

1970 年前后，出现了两项使光通信可能获得实际应用的研究成果。其一是美国和日本成功地获得可在室温下连续工作的、长寿命的半导体激光器；其二是玻璃光纤的传输损耗从 1000dB/km （一公里长的光纤光透过率为 $1/10^{100}$ ）降低到 10dB/km 左右。最近几年，光学元件和光传输线的研制，光通信这一技术，无论在理论上或实践上都被认为很有希望。充分利用半导体技术成果而进步显著的光纤传输线，由于损耗低和频带宽，现在可以说已成为一种最优秀的传输线了。

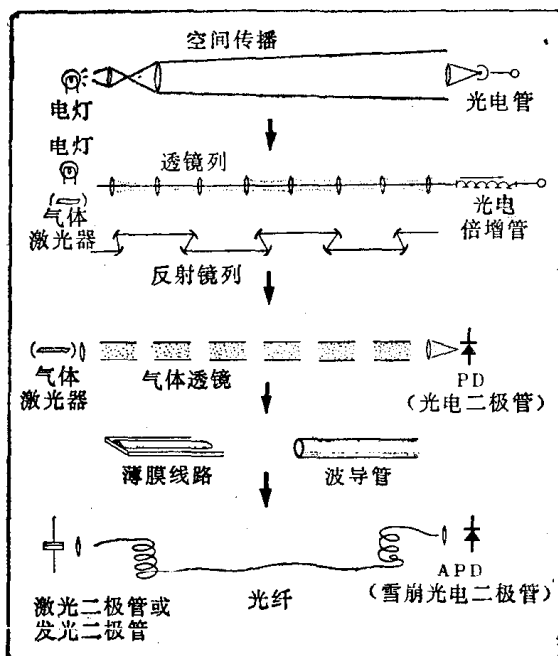


图1.3 光通信的发展

1.3 几种传光方法

从历史上看,有过多种多样的光通信传输线,而且今后还往往局部地要加以利用,因此需要稍加介绍,并与光纤进行比较。

〔1〕 空间传播——一种简单的传光方法

光波在空间辐射时方向性极强,能把光束传送得相当远。对于高斯射束,其横向强度为:

$$I(r) = I(0) \exp[-r^2/w_0^2]$$

上式中, r 为离中心轴的距离; w_0 是常数,称为光点尺寸,表示中心光强 $1/e$ ($e \approx 2.718 \dots$) 处的光束半径[●]。设以图 1.4 所示光束扩散角来表示此射束的方向角 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{2\pi w_0} = 0.32 \left(\frac{\lambda}{2w_0} \right) \text{ (rad)} \quad (1.1)$$

并如图所示按角度

$\Delta\theta$ 扩展开来,那么辐射源处的光点尺寸 w_0 越大,波长越短,则 $\Delta\theta$ 就越小。

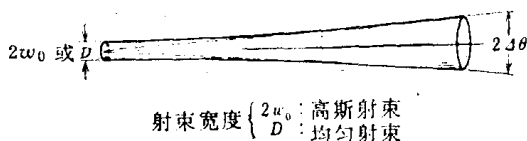


图 1.4 光束与扩散角

例如, $w_0 = 1 \text{ mm}$ 时,对应于波长 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 的 $\Delta\theta$, 分别为 $6^\circ/1000 = 10^{-4} \text{ rad}$ 和 $1^\circ/100 = 1.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 这是非常小的。这些角度值说明,即使传输 1 km , 光点尺寸也仅仅分别为 10 cm 和 1.7 m 。在没有大气的空间,可以考虑利用这种强方向性的高斯射束。采用与电波辐射天线相当的望远镜,如光从图 1.5 的反方向进入,光束的光点尺

● 有时也以电场强度的 $1/e$ 处的半径 w' 定义,此时 $w' = \sqrt{2} w_0$ 。

寸可以加大，而且辐射光束的方向角可以减小。为了减轻透镜的重量，可采用图 1.5 (c) 那种结构的菲涅耳透镜作简单的望远镜。

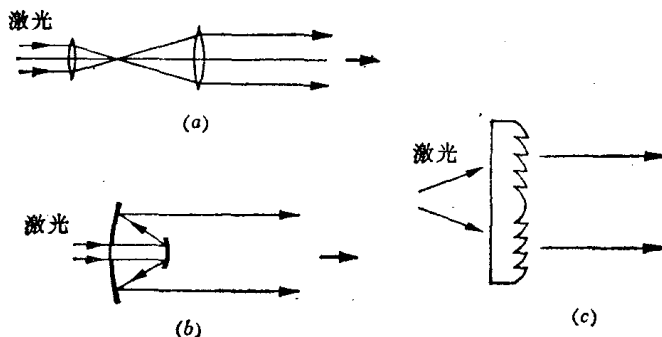


图 1.5 辐射用倒置望远镜的例子

(a) 折射望远镜；(b) 卡塞格伦望远镜；(c) 菲涅耳透镜式望远镜。

在大气中，吸收损耗因波长不同而异，如图 1.6 所示，故必须选择适合“大气窗口”的低吸收波长。在雨雾气象条件

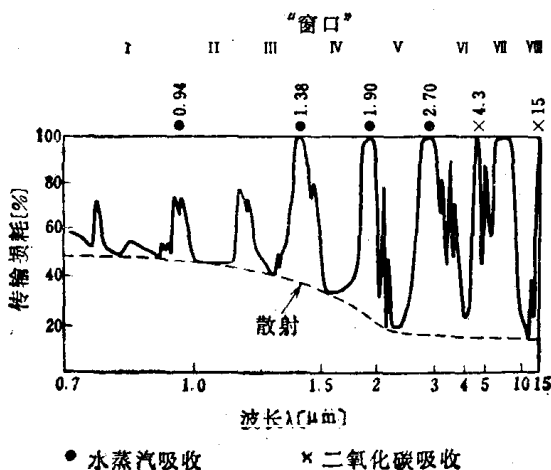


图 1.6 大气中的传输损耗

下, 光束要受到很强的吸收和散射, 通常造成 $20 \sim 30 \text{ dB/km}$ 以上的损耗。

即使晴朗无风的天气, 由于地面上的水汽, 光束也摇摇晃晃不易稳定。此外, 发信端和收信端用的望远镜, 如果振动, 接收强度就变化很大。因此, 空间传播除作短距离通信外, 不能用于作长距离通信的主要传输线路; 但在几十米距离的范围内的空间传播, 由于其简便而受到重视, 是一种可充分利用的传输方法, 应用范围很广。

〔2〕 透镜列波导系统

如上所述, 在管道围成的空间内, 用一系列透镜或反射镜来传光的光波导系统 (如

图 1.7), 可以认为代表着光通信研究的一个阶段。

该系统可以消除气象影响, 将宽光束进行周期性聚焦以窄光束进行传播。

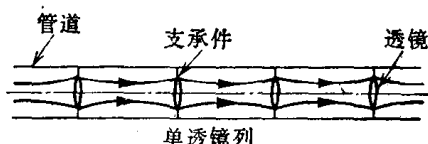


图 1.7 透镜列光波导系统

现在设两透镜间的距离为 $2l$, 透镜的焦距为 f , 则 $f = l$ 时, 光束在透镜面上的光点尺寸 w 最小, 而且

$$w = \sqrt{l\lambda/\pi} \quad (1.2)$$

当 $2l = 100 \text{ m}$, $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 时, $w = 3.2 \text{ mm}$, 光束的端部充分入射到透镜的面上, 再将光束的变动也估计在内, 则透镜的孔径要大于几厘米。如果透镜的表面镀上消反射膜层, 传输损耗就能低达 0.5 dB/km (相当于 1 km 约损耗 11%)。

但这种波导系统有缺点: 一旦因地震等使透镜位置稍许移动, 则光束的光路变化不定; 而且管道上下一有温差, 管道中空气的棱镜作用就会使光束弯曲, 所以必须采用隔热管

道或真空管道。不过，若透镜装上补偿位置移动的设备，则能反过来探测出地基的变动，故可考虑作别的用途。

〔3〕 光纤传输线

光纤传输线的结构见图 1.8。它是在折射率 n_1 较大的纤芯外部，覆上一层折射率 n_2 较小的包层，光在纤芯与包层的界面上发生全反射而被限制在纤芯内传播。实际上就是以光纤为代表的介质波导。光纤用的介质材料，通常为石英玻璃（二氧化硅）和多组份玻璃，根据用途情况，也有用塑料或液体的。在光传输线中，其材料可使用玻璃、塑料、性能稳定的有机物、光学晶体或半导体等。

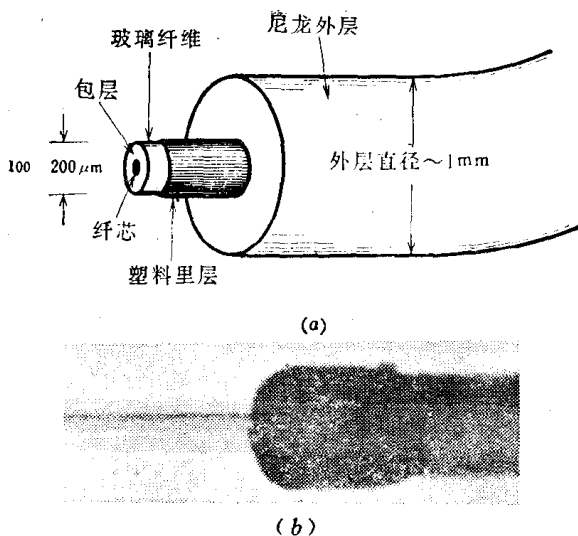


图1.8 加被型的光纤

(a) 纤芯及其被覆；(b) 光纤外形。

光纤的芯径一般从几微米至几十微米，包层直径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 。若只是这样，则机械性能差，而且一旦沾附水