

光纤通信

(原理和技术) ■ 李泽民 编著

■ 科学技术文献出版社



62/23
(京)新登字130号

内 容 简 介

本书系统阐述了光纤通信的基本原理和技术。首先介绍光纤通信所涉及的基本内容,接着分别对光纤传输线理论、光器件理论和常用光器件、光发射机和光接收机、光纤通信系统和光纤通信中的测量技术,以及光波复用系、相干光纤通信和全光通信等新技术做了详细的论述;每章后面均附有复习题。

光纤通信(原理和技术)

李泽民 编著

叶培大 审阅

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路15号 邮政编码100038)

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

787×1092毫米 32开本 21.75印张 470千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数: 1—5000册

科技新书目: 266—107

ISBN 7-5023-1648-5/TN·97

定 价: 13.50元

前 言

光纤通信技术发展十分迅速，从70年代末算起，至今只有十多年的历史。一些科学技术发达的资本主义国家，都在采用先进的光纤通信逐步取代传统的电缆通信，已建立或正在建立全国范围内的光纤通信网；我国对发展光纤通信也给予了足够的重视，目前省际和省内光纤通信线路已逐步建成和投入使用，这对改变我国落后的通信状况将起到举足轻重的作用。从学科领域看，围绕光纤通信的发展已拓宽了近代光学和其他基础学科的应用范围；从通信技术领域看，光纤通信已发展成一种新的通信技术。为此，国内外已出版了不少有关光纤通信方面的书籍，以适应需要。但这些已出版的书籍大都有两种倾向：一是不少书籍具有专著性质，这些著作具有一定的理论层次，很难用来作为一般初学者的教材；二是一部分著作偏重实用性和工程性，理论上的系统性却难以照顾，而初学者阅读这类书籍需要一定的理论基础，方能掌握要领。虽然国外也出版了几本具有教材性质的光纤通信书籍，但不太适应我国国情。因此，国内许多从事光纤通信教学工作的同行们深感责任重大，相继编写并出版了几本适合国情的光纤通信教材，各有其特点和长处，编著者在学术上都具有一定的水平。本书力图阐明光纤通信的基本原理和技术，全书偏重于教材性，兼顾工程性，以适应在校教师、学生的教学需要和从事光纤通信工作的工程技术人员需要。本书取材广泛，并力图照顾与其他学科相关基础知识衔

接，以使不同层次的读者都易于学习。例如，第一章全面地介绍了包括对光的本性认识在内的光纤通信所涉及主要内容。这样使读者一方面对光纤通信有初步的了解；另一方面也留下了许多待解决的问题，以引起对相关基础理论的重视。在以后各章的讨论中都给第一章提出的问题以响应，力图做到首尾呼应，而又尽量避免“论旨相违”，不过分的纠缠在基础理论知识的讨论上，以防止造成全书的逻辑混乱，对于过分繁琐的数学推导均以附录的形式给出。本书还尽量运用电子计算机求解光纤通信工程中的相关问题，这是一个初步尝试，相关计算机程序收集在附录中。

本书涉及的基础知识面十分广泛，笔者理论学术水平有限，也缺乏经验，因而处理不当以致出现错误是在所难免的，希望读者和同行们批评指教。

作者

1991.5

目 录

第一章 光纤通信概说	(1)
§ 1-1 光的本性和光纤通信发展概况	(1)
§ 1-2 光纤通信系统简介	(22)
复 习 题	(38)
第二章 光纤传输线	(40)
§ 2-1 光纤的一般介绍	(41)
§ 2-2 阶跃折射率光纤的模式理论	(77)
§ 2-3 分析渐变折射率光纤的WKB法	(115)
§ 2-4 单模光纤	(124)
§ 2-5 多模光纤及其色散	(153)
复 习 题	(165)
第三章 光纤通信的光源	(168)
§ 3-1 几个基本概念	(168)
§ 3-2 半导体激光器 (LD)	(200)
§ 3-3 半导体发光二极管 (LED)	(246)
复 习 题	(254)
第四章 光电检测器	(258)
§ 4-1 半导体光电检测器的基本原理	(259)
§ 4-2 半导体光电检测器的主要特性	(265)
§ 4-3 半导体光电检测器的材料和结构	(278)
复 习 题	(283)
第五章 光发射机	(285)

§ 5-1	光载波的调制·····	(285)
§ 5-2	光源器件的驱动电路·····	(299)
§ 5-3	光源与光纤的耦合·····	(318)
§ 5-4	实用光发射机介绍·····	(326)
§ 5-5	外调制技术介绍·····	(329)
	复 习 题·····	(338)
第六章	光接收机·····	(339)
§ 6-1	数字光接收机的基本原理·····	(340)
§ 6-2	数字光接收机理论·····	(367)
§ 6-3	模拟光接收机·····	(424)
§ 6-4	数字光接收机的计算机辅助分析·····	(436)
	复 习 题·····	(460)
第七章	线路码型·····	(463)
§ 7-1	问题的提出·····	(463)
§ 7-2	光纤通信常用线路码·····	(466)
§ 7-3	编码和译码·····	(475)
§ 7-4	误码检测方法·····	(483)
§ 7-5	线路码型的参数和性能·····	(491)
	复 习 题·····	(494)
第八章	数字光纤通信系统设计·····	(496)
§ 8-1	用参数选择法估算系统的传输距离·····	(497)
§ 8-2	用 CCITT 图解法确定系统的传输距离·····	(503)
	复 习 题·····	(513)
第九章	光纤通信系统中的测量·····	(514)
§ 9-1	多模光纤测量·····	(514)
§ 9-2	单模光纤测量·····	(548)

§ 9-3 光纤通信系统数据传输特性测量	(561)
复习题	(564)
第十章 展望发展中的光纤通信	(567)
§ 10-1 光波波分复用多路光纤通信	(567)
§ 10-2 相干光纤通信	(587)
§ 10-3 略谈全光通信系统	(606)
复习题	(607)
附录一 关于贝塞尔函数	(608)
附录二 LP_{mn} 模特征方程的推导	(611)
附录三 阶跃折射率光纤中, 由 E_z 和 H_z 分量、 求解 E_r 、 E_ϕ 以及 H_r 、 H_ϕ 的方法	(617)
附录四 阶跃折射率光纤中, 矢量模的场方程	(619)
附录五 单模光纤中的椭圆偏振波	(621)
附录六 计算多模光纤“ β/k_0-V ”曲线 FORT- RAN 语言程序	(624)
附录七 数字光接收机灵敏度 FORTRAN 语言 计算机程序	(648)
专业名词英汉对照表	(666)
参考资料	(677)

第一章 光纤通信概说

在近代各种通信手段中，光纤通信是最有发展前途的通信方式之一。光纤（或称光导纤维）是一种由玻璃材料制作的介质传输线。以光载波载送信息，以光纤作为传输媒质传送光载信息的通信方式，称为光纤通信。光纤通信这门课程所涉及的基础知识面十分广泛，不仅涉及到物理学中近代光学和电磁学的一些基本理论，而且还涉及到通信原理中诸如调制-解调方式、数字脉冲信号传输等多方面的技术基础理论，以及电子电路基础理论。本章在研究光的本性的基础上，介绍光纤通信的发展概况和光纤通信系统的组成及其特点，以及光纤通信局域网的一般性概念和原理，作为学习本书以后各章的一个索引。

§ 1-1 光的本性和光纤通信 发展概况

1.1 光的本性

近代物理学中关于光的本性的认识，在光纤通信理论中占有十分重要的地位。近代物理学的观点认为，光既具有波动性又具有粒子性，即光具有波粒两重性。光在光纤中传输时，突出地显示其波动性；而在光频有源器件中，突出地显示其粒子性。下面分别介绍光的波动性和光的粒子性。

1.1.1 光的波动性

从光的波动性观点看,光是一种电磁波。通常所说的光是指可见光,可见光是能够引起视觉的电磁波。在图1.1所示的电磁波谱中,可见光的波长 λ 在 $0.39\text{--}0.77\mu\text{m}$ 之间,亦即它的频率 f 在 $3.9\times 10^8\text{--}7.7\times 10^8\text{MHz}$ 之间,不同频率

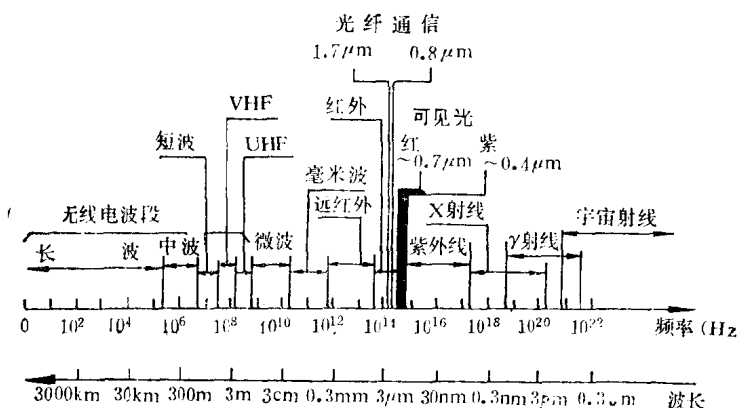


图1.1 电磁波谱

的光给人以不同颜色的感觉,可见光是由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色的单色光混合而成的复色光。光纤通信所用的光处在近红外线范围内,是一种不可见光,它像通常使用的无线电波一样,是一种不能引起人的视觉的电磁波。光既然是电磁波,就必然具有波动的一般性特征,故也可以称光为光波。下面仅就光纤通信中常引用的有关光波的波动性的若干概念进行讨论,关于光波波动性特征的详尽论述是物理学的任务。

A. 光的偏振

光波是电磁波；电磁波是横波，如图1.2所示，它是由两个相垂直的波动矢量即电场强度矢量 $\hat{E}$ 和磁场强度矢量 $\hat{H}$ 来表征的。 $\hat{E}$ 和 $\hat{H}$ 均与电磁波的传播方向 Z 垂直， $\hat{E}$ 和 $\hat{H}$ 在时间上同相，在真空中都以光速沿 Z 方向向前传播。在单位时间内通过与电磁波的传播方向相垂直的单位面积的电磁能流功率为

$$\hat{S} = \hat{E} \times \hat{H} \quad (1.1)$$

式中 $\hat{S}$ 称为坡印亭矢量，其单位为 w/m^2 。上式为矢量积， $\hat{S}$ 的方向即为光波的传播方向，它表明光的能量分布在波阵面上。

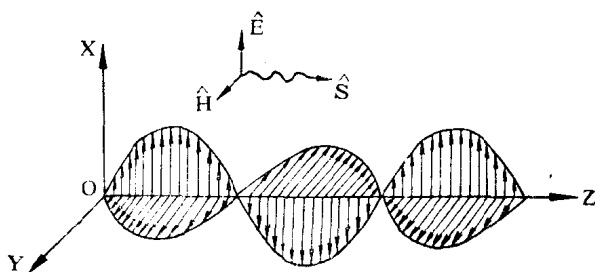


图1.2 电磁波

实验表明，使照相底片感光以及产生光的生理效应等，主要是光波中电场 $\hat{E}$ 的作用结果。亦即，电磁波中起“光”作用的主要是电场矢量 $\hat{E}$ ，故电场矢量 $\hat{E}$ 又称为光矢量。在垂直于光波传播方向的平面内，光矢量 $\hat{E}$ 可能出现的各种不同的振动状态，称为光的偏振态。激光器发出的光是激光¹⁾，普通光源发出的光是自然光，它们都具有各自的偏振态。

1) 参见第三章

激光的光矢量 $\hat{E}$ 只沿一个固定的方向振动,这种光矢量只沿一个固定方向振动的光,称它为线偏振光,或简称偏振光。偏振光是激光的偏振态。包含光矢量 $\hat{E}$ 和光波传播方向 Z (见图1.2)的平面称为振动面,激光或偏振光的振动面是固定不变的。

光是由光源物质中大量的粒子(电子、原子或分子)在原子“能级”间“跃迁”而辐射出来的²⁾。普通光源物质中的粒子的跃迁杂乱无章,以此发出许许多多振动频率复杂、初始相位各不相同、振动方向各不相同的光波,它们彼此互不相关,而呈现随机分布的偏振态。在垂直于光的传播方向的平面内,各个振动方向都有光矢量 $\hat{E}$ 。自然光就是这种光的平均结果,即如图1.3所示,自然光的光矢量 $\hat{E}$ 在垂直于光传播方向的平面内,呈对称均匀分布,且振幅相等。显然,普通光源发出的光不是偏振光,它是一种自然光,它不像激

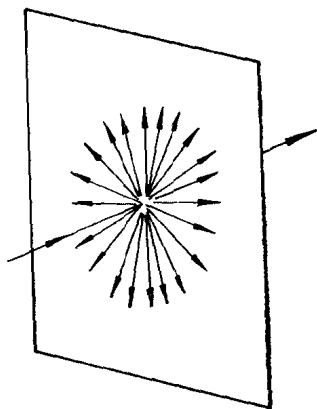


图1.3 自然光

2) 参见第三章

光那样具有通常使用的无线电波的性质。

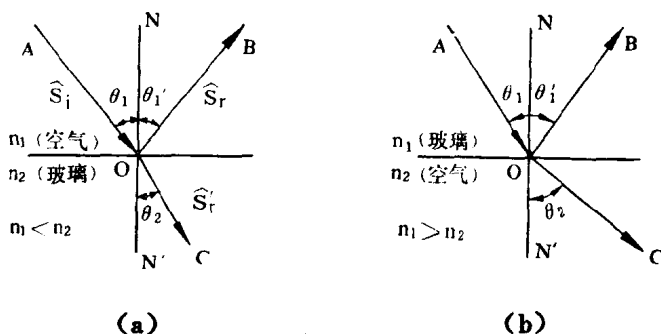
B. 光在传播过程中的反射和折射

光在均匀介质中是以

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.2)$$

的速度作直线传播的。式中 $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 是真空中光速， n 是介质的折射率，空气的折射率等于 1，玻璃的折射率等于 1.5 左右。

光在一种均匀介质传播过程中，遇到另一种均匀介质时，将在两种均匀介质的交界面上产生反射和折射。图 1.4 所示，直线 MM' 是空气介质与玻璃介质交界面的横截线，



(a) 从光疏介质进入光密介质； (b) 从光密介质进入光疏介质

图 1.4 光的反射和折射

NN' 是交界面的法线，当某一入射光 $\hat{S}_i$ 沿直线 AO 传播到交界面上的 O 点时，一部分光 $\hat{S}_r$ 沿直线 OB 形成反射光反射回原介质，继续作直线传播；一部光 $\hat{S}_r'$ 沿 OC 直线形成折射光进入另一种介质，继续作直线传播。通常将入射光线称

为入射线；将反射光线称为反射线；将折射光线称为折射线；将三种射线与介质交界面法线 NN' 的夹角 θ_1 、和 θ_1' 和 θ_2 分别称为入射角、反射角和折射角。光的反射和折射分别服从反射定律和折射定律。

反射定律：反射线位于入射线和法线 NN' 所决定的平面内，反射线和入射线处于法线 NN' 的两侧，反射角 θ_1' 等于入射角 θ_1 ，即 $\theta_1' = \theta_1$ 。

折射定律：折射线位于入射线和法线 NN' 所决定的平面内，折射线和入射线处于法线 NN' 两侧，入射角 θ_1 和折射角 θ_2 满足以下关系

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

式中， n_1 为第一种介质的折射率； n_2 为第二种介质的折射率。

通常将折射率 n 小的介质称为光疏介质，折射率 n 大的介质称为光密介质。图 1.4(a) 所示的情况是 $n_1 < n_2$ ，故光波是从光疏介质折射进入光密介质；图 1.4(b) 所示的情况是 $n_1 > n_2$ ，故光波是从光密介质折射进入光疏介质。根据 (1.3) 式可知：图 1.4(a) 中的折射角 θ_2 应小于入射角 θ_1 ，即折射线较入射线更靠近法线；显然，图 1.4(b) 所示的情况则应与图 1.4(a) 相反。对于图 1.4(b)，当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，光波不再折射进入第二种介质，而此时入射角 θ_1 应增大到使得

$$\sin\theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

成立。若入射角在以上基数上再增加时，光波将全部反射回

第一种介质，这种现象称为全反射。将开始产生全反射的入射角定义为临界角 θ_c ，显然由(1.4)式所决定的入射角，就是临界角，即

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

式中 $n_1 > n_2$ 。只有入射角 $\theta_1 > \theta_c$ 时，才能产生全反射。利用全反射原理可将光波限制在光纤中传播³⁾。

C. 光的色散和光的单色性

光波在光纤中传输时，要产生复杂的色散现象，从而要引起光载信号的失真⁴⁾。然而，“色散”一词却直观地来自于复色光（可见光）通过透明物质（例如三棱镜）分解成单色光（红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫色光）的这样一种物理现象。图1.5所示的三角形ABC是一个玻璃三棱镜的横截面，NN'是AB面的法线。入射的复色光在AB面上的O点进入三

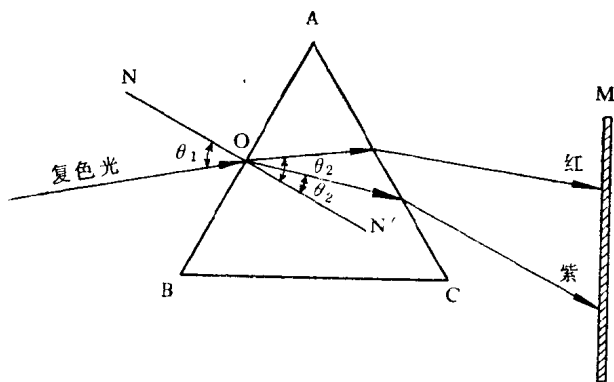


图1.5 光的色散

8)，4) 参见第二章

棱镜产生第一次折射，被分解成从红到紫七种颜色的单色光，它们再分别折射出AC面，在M屏幕上就可以观察到从红到紫的单色光带。

由(1.2)式可得：

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (1.6)$$

式中 λ_0 是真空中光波波长； λ_s 是介质中的光波波长。由图1.1、图1.5和(1.5)式、(1.3)式看出：紫色光在玻璃介质中的波长 λ_s 最短、折射率 n 最高、折射角 θ_2 最小，而红色光在玻璃介质中的波长 λ_s 最长、折射率 n 最小、折射角 θ_2 最大，故复色光进入玻璃三棱镜后就被分解成单色光，形成光的色散。

占据一定波长范围的单色光不是单一波长（或频率）的光，称它为“准单色光”。波长为 λ 的准单色光一般用如图1.6所示的光强 I 和波长 λ 的关系曲线来表示。该图表明，在

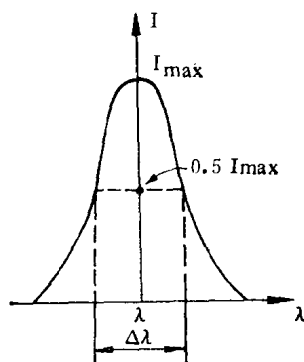


图1.6 谱线及谱线宽度

λ 附近的其它波长成分的光强 I 急剧减弱，从而构成一条谱线（亮线）。将光强 I 等于最大光强 $I_{\max}$ 一半的波长范围 $\Delta\lambda$ 称为“谱线宽度”。 $\Delta\lambda$ 愈小，即谱线宽度越窄，表明光的单色性愈好。通常用谱线宽度来衡量一种光源单色性的优劣。

普通光源发出的光，其颜色一般都极为复杂；而激光器发出的光是高单色性的激光，这是激光器区别于普通光源的一个重要的特点。在普通单色光源中，单色性最好的是同位素氪灯，它的谱线宽度 $\Delta\lambda$ 约为千分之五 $\text{\AA}$ ；而氦-氖气体激光器发出的激光其谱线宽度 $\Delta\lambda$ 小于千万分之一 $\text{\AA}$ ，可见其单色性比氪灯提高了几十万倍。

由于激光具有良好的单色性，将有可能在光纤通信系统中采用像无线电通信系统中所使用的外差接收方案，以提高光接收机的“灵敏度”⁵⁾、延长通信距离。

D. 相干光和非相干光

激光器发出的激光是相干光，普通光源发出的自然光是非相干光。所谓“相干”，其广义含义是指波的干涉。波的干涉现象是一切波动（机械振动波、声波、无线电波、光波等）过程的基本特点之一。如果能在实验中实现光的干涉，就能证实光的波动性。

所谓光的干涉是两列（或几列）光相遇，在空间形成如图1.7所示的明暗交替干涉条纹稳定分布的现象，它可用图1.8所示的实验方法观察到。图1.8中的 T_1 和 T_2 是两块垂直于纸面放置的平行板， T_1 板上有一条细缝隙 g ， T_2 板上有两条平行的细缝隙 g_1 和 g_2 ， g 到 g_1 和 g_2 的距离相等，均为 S_1 ， T_3 是

5) 参见第六章

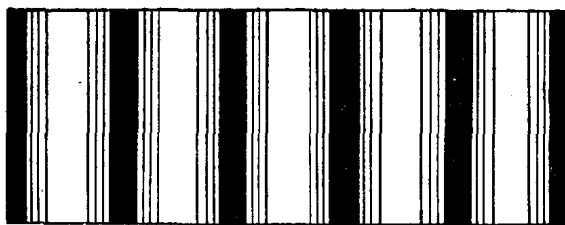


图1.7 单色光的干涉条纹

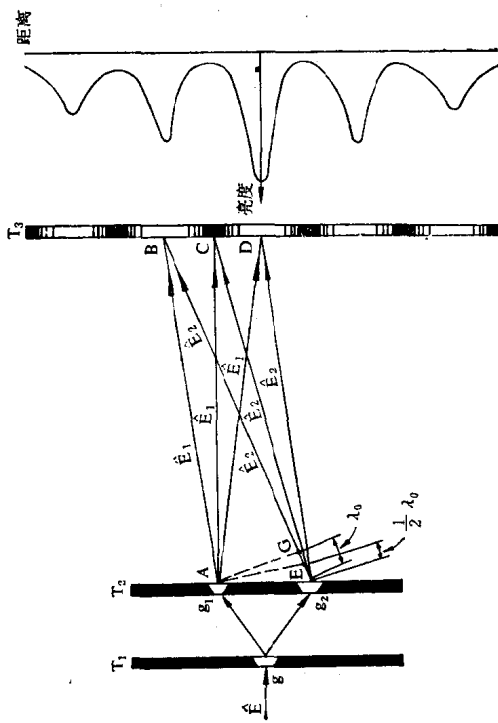


图1.8 光的干涉