

光纤数字通信实用基础

纪越峰 赵荣华 编著
顾晚仪 李国瑞

科学技术文献出版社

71.1.92.11
J23

光纤数字通信实用基础

纪越峰 赵荣华 编著
顾晚仪 李国瑞

科学技术文献出版社

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

本书是关于光纤通信的一本速成基础教材,内容较为广泛,深浅适宜,不仅讲述了光纤、光缆、电端机、光端机、辅助设备和光纤数字通信系统中的各种基本概念、性能参数、工作原理等基础知识,而且还介绍了很多实用技术,如:常用仪表使用方法;系统性能测试与实例;系统规划、设计、施工、验收及维护要领;故障示例与处理方法;光器件的使用与挑选;各种最新标准与要求等。另外还介绍了一些光纤通信的新技术。

本书可供从事光纤通信技术的规划、设计、施工、使用、管理和维护等项工作的工程技术人员学习或参考,也可作为各单位对相关技术人员的培训用书或光纤通信专业的本科生或专科生学习和参考。

光纤数字通信实用基础

纪越峰 赵荣华 编著
顾晓仪 李国瑞

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路 15 号 邮政编码 100038)

北京师范大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 380 千字

1994 年 1 月第 1 版 1994 年 1 月第 1 次印刷

印数: 00001—4100 册

ISBN 7-5023-2061-X/TN·122

定 价: 11.80 元

前 言

目前,国内光纤数字通信技术发展迅猛,实用化的系统已越来越多,迫切需要尽快培养出大批懂得此项技术的工程技术人员去从事规划、施工、调测以及使用、维护、管理等项工作。为此,国内已经出版了一些相关论著,但这些书籍或为注重理论分析与学术研究,或为专业使用丛书,起点较高,不太适合于初涉该领域的读者学习或参考。基于这一现状,我们在多年科研和教学工作的基础上,利用多次举办的各种层次光纤通信学习班所积累的经验 and 所用讲义,编写了此书,突出“基础”和“实用”两大特点,可作为光纤通信技术的一本速成基础教材使用,目的是使读者能够在短期内不仅理解和掌握光纤通信的基本概念和基本原理,而且能够将所学知识用于实际,最终提高实际应用和实际操作的水平,以尽快胜任有关光纤通信技术的工程及维护等项工作。

本书的主要内容的特点如下:

(1) 重在实用

本书从实用的观点出发,重点介绍实用化的技术和知识。如:光纤通信系统各部分的设计、安装、测试、验收与维护;光纤通信辅助设备;怎样挑选和使用光电器件等等。在理论知识方面,则突出重点,避免繁索的数学推导。目的是通过理论与实际的结合,提高读者实际应用和实际操作的水平,以便培养出能够从事光纤通信系统的规划、设计、制造、安装、施工、调测和维护的工程技术人员。

(2) 采用最新标准

本书在介绍系统以及相关部件时,均按照最新的国家标准和 CCITT 的相关建议来讨论性能参数和规范要求。为使读者查阅方便,在附录中介绍了大量的最新实用数据与图表、常用仪器使用方法、端机性能实例、故障处理方法等内容。

(3) 新技术介绍

鉴于光纤通信发展的速度很快,更新换代的周期较短。所以,本书介绍了一些新型的光纤通信技术,以便使读者了解世界最新发展动向,即开阔视野,也为新技术的即将来临做好准备。

(4) 内容广泛

本书涉及到了光纤通信领域的很多方面,并进行了比较全面的介绍,内容包括各种基本概括、基础知识和应用技术,图文并茂,适应面广,力图使读者通过学习比较系统地了解 and 掌握各方面的知识,以适应目前光纤通信飞速发展的需要。

(5) 便于自学或作培训之用

本书不仅叙述层次清楚,由浅入深,而且各章均有小结及思考和练习题。便于自学或作为培训教材使用。

本书共含四篇,主要是根据光纤通信系统的基本构成形式而设置的。第一篇为光纤信道,第二篇为电端机,第三篇为光端机,第四篇为光纤数字通信系统,内容易懂且又有一定的实用价值。

在本书编写与出版过程中,温公慧先生给予了大力支持和帮助,谨此表示感谢。

由于作者水平所限,错误之处,恳请指正为盼。

作者 1994 年 1 月

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 光纤信道

第一章 光学基本知识	(3)
§ 1.1 光谱、光速和媒质折射率	(3)
§ 1.2 反射、折射和全反射	(4)
§ 1.3 干涉和驻波	(5)
§ 1.4 散射和吸收	(7)
一、散射和瑞利散射	(7)
二、吸收	(8)
本章小结	(9)
思考和练习题	(9)
第二章 光纤导光原理	(11)
§ 2.1 光纤的结构与分类	(11)
§ 2.2 光线理论	(13)
一、阶跃光纤中的光线轨迹和数值孔径 NA	(13)
二、梯度光纤中的光线轨迹和局部数值孔径 LNA	(14)
三、光线模式的分立性	(16)
§ 2.3 波动理论	(16)
一、模式概论	(17)
二、归一化频率 V 模截止频率 V_{cutoff}	(17)
§ 2.4 模耦合与模功率分布	(20)
本章小结	(21)
思考和练习题	(22)
第三章 光纤的主要参数及测量	(23)
§ 3.1 结构参数和光学参数	(24)
一、几何参数	(24)
二、折射率分布 $n(r)$	(25)
三、数值孔径 NA	(26)
四、模场直径 $2w_0$	(26)
五、截止波长 λ_c	(28)
§ 3.2 光纤的传输场及其测量系统	(30)
一、近场及其测量系统	(30)
二、远场及其测量系统	(31)
三、传输场在光纤测量中的应用	(33)
§ 3.3 光纤损耗及其测量	(34)
一、损耗机理和定义	(34)

二、光纤损耗的测量方法	(37)
§ 3.4 基带响应及其测量	(43)
一、概念和定义	(44)
二、基带响应的测量方法	(48)
§ 3.5 色散系数(D)及其测量	(49)
一、概念和定义	(49)
二、光纤的色散参数	(50)
三、色散系数和带宽的关系	(51)
四、测量方法	(51)
§ 3.6 光纤的机械和温度性能及其试验简介	(54)
一、关于光纤机械性能及其试验方法	(54)
二、关于光纤温度性能及其试验方法	(54)
本章小结	(55)
思考和练习题	(55)
第四章 常用无源光器件简介	(57)
§ 4.1 综述	(57)
一、分类	(57)
二、主要指标	(57)
三、一种新型元件——自聚焦透镜	(58)
§ 4.2 光纤连接器	(58)
一、活动连接器	(59)
二、固定连接器	(59)
§ 4.3 耦合器	(61)
一、X 一耦合器	(61)
二、星形耦合器	(62)
§ 4.4 合/分路器	(62)
一、波长无关类	(62)
二、波分复用器	(63)
§ 4.5 光衰减器	(64)
一、固定光衰减器	(64)
二、可变光衰减器	(65)
§ 4.6 光开关	(65)
一、机械式光开关	(65)
二、非机械式光开关	(66)
§ 4.7 光隔离器	(66)
本章小结	(67)
思考和练习题	(67)
第五章 光缆及工程要领	(69)
§ 5.1 光缆的分类与结构	(69)
一、分类和命名方法	(69)

二、典型结构·····	(70)
§ 5.2 光缆的主要参数和性能·····	(71)
一、机械性能参数·····	(71)
二、环境性能参数·····	(74)
§ 5.3 光缆施工及维护要领·····	(75)
一、准备阶段·····	(76)
二、路由工程·····	(76)
三、光缆敷设·····	(76)
四、光缆加通·····	(77)
五、竣工验收·····	(78)
六、光缆维护要领·····	(78)
本章小结·····	(79)
思考和练习题·····	(79)

第二篇 电端机

第六章 数字通信基础知识 ·····	(80)
§ 6.1 数字通信系统与模拟通信系统·····	(80)
一、数字信号与模拟信号·····	(80)
二、二进制·····	(80)
三、时分多路复用持术·····	(82)
§ 6.2 数字通信系统的构成与特点·····	(82)
一、数字通信系统模型·····	(82)
二、特点·····	(83)
本章小结·····	(83)
思考和练习题·····	(83)
第七章 PCM 通信技术 ·····	(84)
§ 7.1 PCM 通信概念·····	(84)
一、什么是 PCM 通信·····	(84)
二、怎样实现 PCM 通信·····	(84)
§ 7.2 主要技术问题·····	(86)
一、非均匀量化问题·····	(86)
二、编码问题·····	(88)
三、PCM 单路编/译码器·····	(91)
四、PCM 通信制式·····	(92)
§ 7.3 PCM 基群设备与复接方式·····	(94)
一、基群设备的帧和复帧结构·····	(94)
二、传输码型·····	(94)
三、电端机基群设备框图·····	(97)
四、基群设备的技术数据与工作条件·····	(97)
五、复接方式·····	(99)

本章小结	(99)
思考和练习题	(99)

第三篇 光端机

第八章 光发射端机	(100)
§ 8.1 光源	(101)
一、激光原理的基础知识	(101)
二、半导体激光器的发光原理	(105)
三、半导体激光器的性质	(109)
四、如何使用和挑选半导体激光器	(112)
五、发光二极管	(112)
§ 8.2 线路编码	(114)
一、光纤通信常用的线路码型	(115)
二、编译码电路	(116)
§ 8.3 半导体激光器的瞬态性质和调制电路	(118)
一、半导体激光器的瞬态性质	(118)
二、直接调制原理与电路	(122)
三、光发射机驱动条件的选择及驱动电路	(123)
§ 8.4 自动控制电路	(125)
一、自动温度控制(ATC)	(126)
二、自动功率控制(APC)	(127)
三、实用化 LD 组件	(128)
本章小结	(128)
思考和练习题	(129)
第九章 光接收端机	(131)
§ 9.1 光电检测器	(131)
一、PIN 光电二极管	(131)
二、雪崩光电二极管(APD)	(132)
三、如何挑选及使用光电检测器	(134)
§ 9.2 放大器	(134)
一、前置放大器	(135)
二、主放大器	(135)
§ 9.3 均衡器、AGC 电路和再生电路	(135)
一、均衡器	(135)
二、接收机的动态范围和 AGC 电路	(137)
三、再生电路	(138)
§ 9.4 光接收机的性能参数	(140)
一、灵敏度(P_r)	(140)
二、动态范围(D_r)	(141)
三、抖动	(141)

本章小结.....	(141)
思考和练习题.....	(142)
第十章 辅助设备	(143)
§ 10.1 监控管理设备.....	(143)
一、基本组成与工作原理	(143)
二、主要功能	(144)
§ 10.2 公务通信设备.....	(145)
一、网络结构	(145)
二、通信方式	(145)
三、局站设备	(147)
§ 10.3 区间通信设备.....	(147)
一、组成原理	(148)
二、解决方法	(148)
三、线路码型	(150)
§ 10.4 自动倒换设备.....	(150)
一、倒换规则	(150)
二、自动倒换设备的性能要求	(151)
§ 10.5 告警处理设备.....	(151)
一、告警种类	(152)
二、告警设备与电路	(152)
§ 10.6 电源供给设备.....	(153)
一、光端机的供电设备	(153)
二、光中继器的供电设备	(154)
§ 10.7 辅助信号的传输方式.....	(155)
一、时分复用	(155)
二、频分复用	(157)
本章小结.....	(158)
思考和练习题.....	(159)
第十一章 光端机的测试、验收与维护	(160)
§ 11.1 光端机的测试.....	(160)
一、光发射端机的测试	(160)
二、光接收端机的测试	(161)
三、光中继器的测试	(162)
四、监测告警辅助功能测试	(162)
五、光端机重要点的波形测试	(162)
§ 11.2 光端机的工程验收.....	(164)
一、初步验收阶段	(164)
二、试运行阶段	(164)
三、最终验收阶段	(164)
四、保修期运行阶段	(164)

§ 11.3 光端机的日常维护与故障处理	(164)
一、光端机(光中继器)的维护	(165)
二、光端机故障查询及处理方法	(165)
本章小结	(165)
思考和练习题	(166)

第四篇 光纤数字通信系统

第十二章 光纤数字通信系统	(167)
§ 12.1 光纤数字通信系统的基本组成	(167)
§ 12.2 光纤通信同步数字系列简介	(169)
一、准同步数字系列(PDH)	(170)
二、同步数字系列(SDH)	(170)
§ 12.3 光纤通信系统的全程全网形式	(171)
一、长途电信网的构成	(171)
二、市内电信网的构成	(171)
§ 12.4 光纤数字通信系统的性能参数	(172)
一、误码性能	(172)
二、抖动性能	(175)
三、可靠性与可用性	(176)
§ 12.5 系统全程特性测试	(176)
一、全程误码特性的测试	(176)
二、系统富余度的测试	(177)
三、系统抖动特性的测试	(177)
本章小结	(178)
思考和练习题	(179)
第十三章 光纤数字通信系统的规划、设计与施工	(180)
§ 13.1 长途光纤数字通信系统的规划与设计	(180)
一、总体规划	(180)
二、光中继段的系统设计	(182)
§ 13.2 市内光纤数字通信系统的规划与设计	(190)
一、总体规划	(190)
二、光中继段的系统设计	(190)
§ 13.3 光纤数字通信系统的施工	(191)
一、机房设计要领	(192)
二、设备安装要领	(192)
本章小结	(192)
思考和练习题	(193)
第十四章 新型光纤通信系统	(194)
§ 14.1 光波复用系统	(194)
一、WDM 系统的基本构成与原理	(195)

二、WDM 技术的特点	(195)
§ 14.2 副载波复用系统	(196)
一、SCM 系统的基本结构与原理	(196)
二、SCM 系统的优缺点	(196)
§ 14.3 相干光通信系统	(197)
一、系统的组成与原理	(197)
二、几个关键的技术问题	(198)
§ 14.4 超长波长光通信系统	(198)
一、超长距离的设想	(198)
二、超低损耗光纤材料	(199)
§ 14.5 全光通信系统	(200)
一、全光电话传输系统	(200)
二、全光图像传输系统	(200)
三、光放大器	(200)
§ 14.6 光孤子通信系统	(202)
一、孤立波与光孤子	(202)
二、光孤子通信系统	(202)
本章小结	(203)
思考和练习题	(203)

附 录

附录一 光纤端面处理技术	(205)
附录二 常用仪器简介	(208)
附录三 13 折线 A 律编码树表	(213)
附录四 光接收机的灵敏度计算简介	(214)
附录五 实用光端机故障情况与处理方法	(217)
附录六 光、电端机故障情况与处理方法	(221)
附录七 长途光纤数字通信系统的性能规范	(225)
附录八 市内光纤数字通信系统的性能规范	(228)
主要参考资料	(229)

绪 论

随着社会的发展,信息交换量与日俱增。为了扩大通信容量,通信方式从中波、短波发展到微波、毫米波,究其规律,都是通过提高载波频率来扩大容量的。那么能否继续提高频率,达到光波段,以收效更大呢?答案是肯定的,因为光波也是一种电磁波,只不过频率比微波高得多。所以,光波通信在理论上讲是完全可行的。自从1880年贝尔的“光电话”开始,人们即进行了长期的艰难探索,渴望能找到一种实现光波通信的方法,但由于一直有两大难题未能解决,致使光波通信沉睡了多年。这两大难题是光源和传光媒介的选择。直到1966年英籍华人高锟博士提出了光导纤维的概念,接着在1970年美国康宁公司生产出了低损耗(20dB/km)的光导纤维(简称光纤),GaAlAs半导体激光器也在同年实现了室温下连续工作,从而揭开了光纤通信的序幕。从光纤通信的“元年”(1970年)至今不过才短短的二十余年,但其发展速度之快令人震惊,可以说没有任何一种通信方式可与之相比拟。光纤通信产业自1980年以来,以年增长率30%的速度在发展,在这二十世纪的最后十年中,还将猛增数十倍,到二十一世纪将成为世界主要产业之一。

1. 光纤通信发展的历史、现状和前景

回顾光纤通信的发展历史,光纤通信系统已经历了四代的变更。1973年~1976年,研制成功了 45Mb/s $0.85\mu\text{m}$ 多模光纤系统,称之为第一代光纤通信系统,光纤损耗在 $0.85\mu\text{m}$ 处为 4dB/km ,在 $1.06\mu\text{m}$ 处为 2dB/km ,LD寿命达 10^6 小时,同时Si雪崩光电探测器也可实用。组成系统的各个部分,性能上已基本满足要求。1976~1982年,研制成功了第二代光纤通信系统,其工作波长为 $1.3\mu\text{m}$,损耗为 0.5dB/km ,色散的最小值近似为零,可以传送中等码速的数字信号。自1982年开始,长波长单模光纤通信系统在几个国家开始实验,波长为 $1.31\mu\text{m}$,使用LD,可传输 $140\sim 600\text{Md/s}$ 的高码速信号,中继距离达 $30\sim 50\text{km}$,这种 $1.31\mu\text{m}$ 单模光纤系统称之为第三代光纤通信系统,目前正处在实用化的高潮阶段。近几年来,人们又开始研究将零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$,得到的好处是光纤损耗更低,色散为零,这种系统称之为第四代光纤通信系统,但目前还处在实验室的研制阶段。

从以上所述可以看出光纤通信的三个发展趋势:即从短波长($0.85\mu\text{m}$)向长波长($1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$)发展;从多模光纤向单模光纤发展;从低速系统向高速系统发展。目前,世界上许多国家的新建通信系统均采用光纤,例如,日本横贯南北的大干线,美国的世界第二大通信网MCI网,均以光纤通信作为主要传输手段。另外,英国的 565Mb/s 光纤通信系统已经商用,日本的 1.6Gb/s 系统也开始实用,美国的 2.4Gb/s 系统不久也将商用。截止到1989年底,世界上光缆敷设总量约510万公里。不仅陆地方兴未艾,而且跨越大西洋、太平洋的光缆也正大量兴建,可以说目前光缆几乎已经包围了全球,其旺盛的生命力令人振奋。

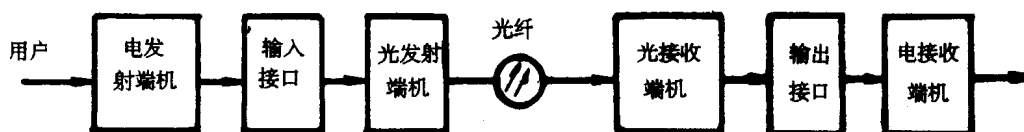
我国早在1963年就开始研究大气激光通信,从1974年开始研究光纤通信。目前,多模及单模光纤、光缆,长、短波长光源和检测器件都已能自行生产,三次群以下光纤系统已经商用,四次群系统已达到了实用化的要求,五次群光通信设备已掌握了关键技术, 800Mb/s 光纤通信传输系统、相干光通信系统等基础应用研究也已取得了丰硕成果。另外,许多设备和产品已取代或部分取代了进口,正形成批量生产。截止到1990年底,全部采用国产设备建设的光纤通信线路已达 3800km ,在“八五”期间,国家计划敷设22条光缆干线,总长度约为3.2万公里,并以北京为中

心，将全国的东、西、南、北、中各地区连接起来，形成光缆传输网。由于我国有关部门已规定今后建设长途干线，一律采用光缆，所以，预计光纤通信的发展会越来越快。

今后光纤通信的发展方向可以概括为大容量、长距离、超小型和全光化。另外，宽带光纤网也应引起重视。在实现大容量通信方面，可以通过提高系统的传输速率，或采用波分复用系统、副载波复用系统加以实现；在长距离通信方面，可以采用外差通信技术或超低损耗光纤加以实现；在超小型方面，可以利用光集成和全光通信技术加以实现。当然，与上述相关的重要器件。如，高性能激光器、滤波器也必然会引起人们的重视。

2. 光纤数字通信系统的基本构成与特点

光纤数字通信系统主要由七部分组成，即电端机（电发射端机和电接收端机），光端机（光发射端机和光接收端机），接口（输入接口和输出接口）和光纤（光缆）。其具体构成如下图所示：



其简单工作原理为：电发射端机将用户信息模/数变化并进行时分复用，光发射端机将含有用户信息的电信号转变成光信号送入光纤。这个光信号在光纤中传输到光接收端机，然后将接收到的光信号转变成电信号，并放大和处理，最后输出相应的电信号，电接收端机的作用是完成数/模变换和信息分路，将所传信号送给相应用户，从而完成整个传输过程。

光纤通信的特点是：

- (1) 光纤传输损耗低，通信容量大。
- (2) 光纤尺寸小，重量轻，有利于敷设和运输。
- (3) 不存在电磁干扰问题，适用于有强电干扰和电磁辐射的环境中。
- (4) 光纤之间的串话小。
- (5) 制造光纤的主要原料是 SiO_2 ，它是地球上蕴藏最丰富的物质之一。

第一篇 光纤信道

光纤信道由光纤及各种无源光器件组成，实用中还需将光纤做成光缆。本篇重点介绍光纤的结构和传光原理（第二章），以及光纤的主要参数和性能（第三章）；简要介绍常用无源光器件（第四章）、光缆和光缆工程的施工与维护（第五章）。作为理解原理的基础，第一章先介绍一些光学基本知识。

第一章 光学基本知识

本章介绍光纤通信中涉及到的光学基本知识。如果读者过去已有这方面的基础，可以略去不看，或作为一次复习。

§ 1. 1 光谱、光速和媒质折射率

光是频率很高的电磁波，因此有波长。光频为 10^{14} Hz 量级，波长为 μm 量级。正因为在大约 $0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 波长范围的电磁波能够被人的眼睛感受到，人类才把这种电磁波称作光，并把邻近波长的电磁波称为红外光 ($\lambda > 0.75 \mu\text{m}$) 或紫外光 ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$)。波长轴上各波段的通俗名称及目前光通信采用的波长 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 所在位置如图 1.1-1 所示。

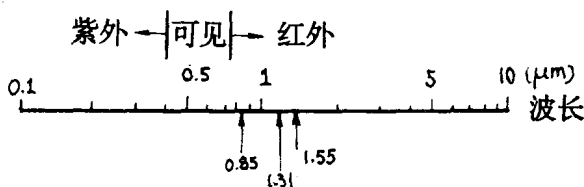


图 1.1-1 光谱各段名称

光在真空中的速度是 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ km/s}$ ，在空气中为 $c_0 = 2.997 \times 10^8 \text{ km/s}$ ，两者相近。在其它透明媒质中速度不一，但都比真空中的光速小。根据光在各种媒质中的速度可以定义媒质的折射率。如光在水中的传播速度为真空光速的 $3/4$ ，因此水的折射率为 $n_{\text{水}} = 1.33$ 。根据同样道理，可知玻璃的折射率约为 1.5。

折射率值较大的媒质称为光密媒质，折射率值较小的媒质称为光疏媒质。光疏和光密是相对概念，如水相对于空气是光密媒质，相对于玻璃则是光疏媒质。

进一步考查还可发现，媒质的折射率还与光的波长有关，或者说不同波长的光在同一媒质中传输速度有差异。如玻璃对红光（波长较长）的折射率比对紫光（波长较短）折射率小。

§ 1. 2 反射、折射和全反射

光束射到两种介质（媒质）的交界面上会发生反射和折射（图 1. 2-1）。反射和折射规律可用菲涅尔公式表示，因此，其中的反射又称“菲涅尔反射”。入射角 θ_i 、反射角 θ_r 和折射角 θ_t 分别满足关系式：

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.2-1)$$

和
$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.2-2)$$

其中 n_1 和 n_2 分别表示两个介质的折射率。

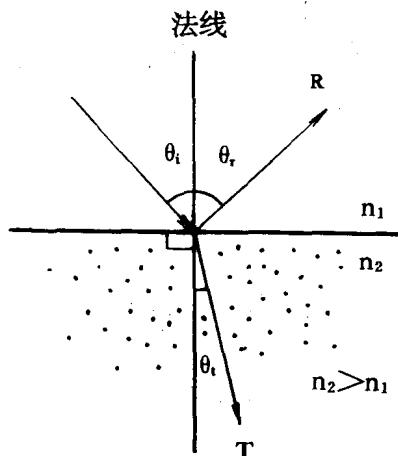


图 1.2-1 反射和折射现象

反射系数 R （即反射光功率与入射光功率之比）与入射角 θ_i 有关，在 $0 \sim 30^\circ$ 入射范围内，可用下式近似计算：

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.2-3)$$

折射到第二种介质中的光功率部分，自然就是

$$T = 1 - R \quad (1.2-4)$$

图 1.2-1 表示的是光从光疏媒质向光密媒质的情况，折射角 θ_t 小于入射角 θ_i 。如果是光从光密媒质向光疏媒质，就会出现图 1.2-2 所示的情况，即 $\theta_t > \theta_i$ （光线①）。随着入射角逐渐增大， θ_t 也将增大，并先于 θ_i 趋近 90° （光线②）。而一旦 θ_i 超过 90° ，这部分光功率就回到了入射光所在媒质（光线③）。在这种媒质中只能服从反射定律 [公式 (1.2-1)]，此时，完全没有折射光，被称为全反射现象，并定义刚好使 $\theta_t = 90^\circ$ 的入射角为全反射临界角 θ_c 。由公式 (1.2-2) 不难得出

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2-5)$$

深入的研究还发现，全反射光线并不是从入射点（即入射光线与媒质界面的交点）处发生的，而是在平行于界面的方向有一定相移（称为“古斯——汉欣”相移）之后才沿反射方向射出（图 1.2-3 (a)），就象是透入对方媒质一定深度之后才返回一样。实际上，入射光作为一种电磁波确实透入到第二种媒质中一定深度，建立了一定的透入场，正是这部分场与媒质 2 的表层结构互相

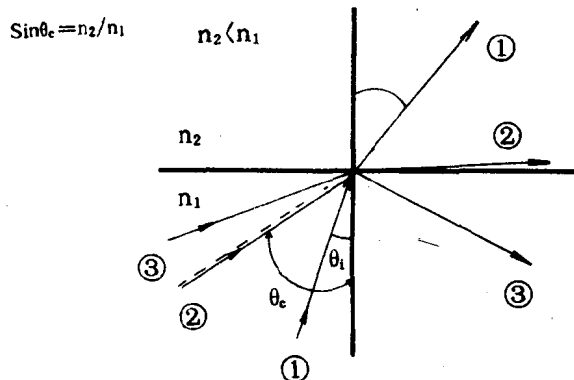


图 1.2-2 全反射示意

作用才使得入射光改变方向，发生全反射。这一现象可以借助刚性小球（比喻光子）与弹性壁碰撞的情况来理解。小球只有把壁碰得变了形才能产生相应弹力，使小球改变运动方向。在壁发生形变和恢复的过程中小球并没有停止平行于壁的运动。光的全反射现象中存在“古斯——汉欣”（GOOS-Haenchen）相移或者说媒质 2 中存在一定深度的透入场，说明媒质 2 必须有一定厚度，而不能是无限薄的。

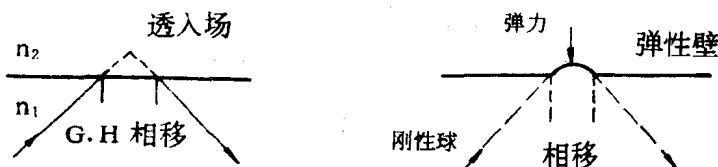


图 1.2-3 古斯——汉欣相移及其比喻

§ 1. 3 干涉和驻波

光有干涉现象，说明它确实是一种波，双缝干涉实验便是一大力证。

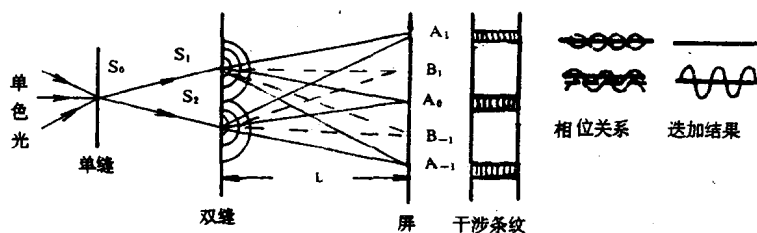


图 1.3-1 双缝干涉及波形迭加示意

图 1.3-1 中狭缝光源 S_0 发出的单色光照亮双缝 S_1 和 S_2 ，使它们变成两个新狭缝光源。这两个光源的频率（或波长）完全相同，且相位差恒定，这便是发生干涉的条件。假设 S_0S_1 和 S_0S_2 两距离相等，则 S_1 和 S_2 光源在始发点完全同相位，即相位差为零。这两个光源发出的柱面波传播到屏上时，由于屏上各点到两个光源的距离一般不相等，所以两个光源对屏上某一点的贡献便存在相位差。在某些特殊位置如 A 处相位差为零或 2π 的整数倍，则迭加的结果是幅度增加，称为干涉相长，在 B 处相位差为 π 的奇数倍，则迭加结果是互相抵消，称为干涉相消。可观察到的现象是相长处呈现亮条纹，相消处为暗条纹，其它各处则是明暗之间的过渡。

屏上明、暗条纹出现的位置可利用三角函数的知识求出。设 S_1 和 S_2 发出的波均为 $E_0 \cos(\omega t)$ ， E_0 为光场振幅，即

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{E}_2 \\ &= E_0 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (1.3-1)$$

光源到屏的距离为 l ，光源之间距离为 $2d$ 。屏上设垂直于狭缝方向的 x 轴，原点设在对称中点处。于是，在屏上 x 位置的光场为：

$$E(x) = E_0 [\cos(\omega t - kl_1) + \cos(\omega t - kl_2)] \quad (1.3-2)$$

其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， λ 为光波长。 l_1 和 l_2 分别是 x 点对 S_1 和 S_2 的距离，它们可表示为

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{l^2 + (x - d)^2} \\ l_2 = \sqrt{l^2 + (x + d)^2} \end{cases} \quad (1.3-3)$$

代入 (1.3-2) 式可得

$$E(x) = 2E_0 \cos\left[\frac{k}{2}(l_2 - l_1)\right] \cdot \cos\left[\omega t - \frac{k}{2}(l_1 + l_2)\right] \quad (1.3-4)$$

其中的因子 $\cos\left[\omega t - \frac{k}{2}(l_1 + l_2)\right]$ 表示 x 处仍是以 ω 为圆频率振荡的光场，而因子 $\cos\left[\frac{k}{2}(l_2 - l_1)\right]$ 则与光的频率无关，表示在屏上 x 方向光场的强弱按 $\Delta l = (l_2 - l_1)$ 以余弦规律变化。

将 (1.3-3) 式代入便可得出光场按 x 的变化规律和 x 方向明暗条纹的位置。这些运算不妨留给读者去完成。

波在有限空间中传播时，会受到该空间边界的反射。反射波与后续の入射波迭加可能产生驻波现象。现在，先来看看受一个界面反射的情况。

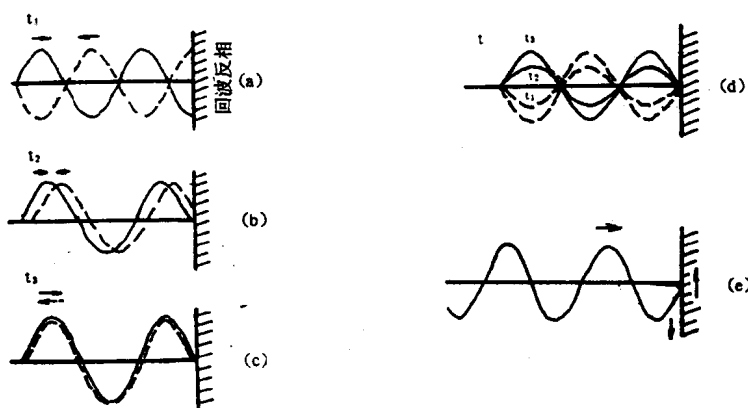


图 1.3-2 反射波与入射波相互作用示意

图 1.3-2 (a) 表示在时刻 t_1 入射波 (实线) 与反射波 (虚线) 的各点振幅情况。此例中假设界面使反射波始终与入射波反相，即在界面处不允许出现平行于界面的场分量，这是在波导分析中经常运用的边界条件。为理解这一点，可以想想绳子一端被系在墙上的情况。(图 1.3-2 (e))。用手抖动绳子，这一机械波可以沿绳传播。当波到达系在墙上的一端时。这一绳端虽有按波的规律运动的趋势，但却被墙给予的反向力限制住，不能有丝毫的运动。

根据这一回波反相条件，并设反射没有损耗。则在时刻 t_2 和 t_3 入射和反射波各点振幅便呈