

邮电高等
学校教材

光纤通信基础

吴彝尊 蒋佩璇 李玲 编 叶培大 审

人民邮电出版社

邮电高等学校教材

光纤通信基础

吴锡尊 蒋佩璇 李玲 编
叶培大 审

人民邮电出版社出版

内 容 提 要

本书是高等学校光纤通信专业的教材。内容包括光波导传输、光电器件、光通信系统及光纤测量四部分。它系统地、由浅入深地讲述了光纤通信的基本理论和基本分析方法。

本书也可供从事光通信、激光等专业的技术人员参考。

邮电高等学校教材

光 纤 通 信 基 础

吴彝尊 蒋佩璇 李 玲 编

叶培大 审

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32

1987年11月 第 一 版

印张：14

页数：224

1987年11月 河北第一次印刷

字数：372千字

印数：1—3 200册

ISBN7115-03489-3/Z

定价：2.70元

前 言

光纤通信的发展异常迅速，在短短十多年中，它已由科研阶段发展到大规模应用阶段，形成通信领域中引人注目的新学科。它的应用广泛，遍及于长途、市话、信息网络等通信领域中，成为最重要的通信方式之一。因此学习光纤通信的技术知识，对于任何通信技术工作者来说都是不可缺少的，而在高等学校有关通信技术专业中普遍设立光纤通信课程，培养这方面的人材，更是当务之急。在这种形势下，有关教材的编写就成为刻不容缓的事。

目前已出版了不少有关光纤与光纤通信的论著，但大多数带有科研专著的性质，作为教材来考虑的著作还不多见。国外已出版的为数极少的几种教材性质的著作，就其基本理论的阐述，基本内容的选择来说，也感到对目前教学不太适用。这是由于光纤通信发展异常迅速，这方面的教学在国内外还未普遍展开的缘故。为了适应我国光纤通信技术发展的需要，为了满足高等院校有关专业广泛建立光纤通信技术课程的要求，我们在几年来教学实践的基础上，编写了这本书。

本书系统地阐述了光纤通信的基本原理与基础知识。第一章为绪论，简要介绍光纤通信的内容与发展情况，使读者对光纤通信有一概括了解。第二章是薄膜波导，第三章是光导纤维。这两章是用电磁场理论分析光波导的基本传输特性，使读者学习分析光波导的基本方法，掌握光波导的基本特性。第四章为光电器件，介绍激光器的基本原理，半导体激光器的工作原理与特性，光电检波器的工作原理与特性。第五章为光通信系统，介绍光端机的组成，接收端的噪声与信噪比的分析计算原理及光纤通信线路设计基本原理。第六章为光波导测量，介绍光波导测量的基本概念、基本原理与基本

测量方法。

考虑到当前国内高等院校各专业教学课程差异较大，上列各章内容的编写与选择尽需适应这种情况，例如，平面波内容对微波技术专业也许并无必要，但考虑到也有不少专业对电磁场与微波技术学得少，或者缺少专门的相应课程，所以介质薄膜一章是由平面波基本概念讲起。不少工科院校电子类专业没有安排量子力学或半导体物理课程，所以在光电器件一章，就综合了量子力学与半导体物理的一些必需的基本概念。不少高等院校有关专业没有数字通信原理这类课程，所以在光纤通信系统一章中，阐述了一定的数字通信的基本概念。上述这类材料均尽量综合在有关章节中，形成有机联系的系统，学习与教学能独立应用本书进行，可不用安排学习上述课程。由于对上述内容尽量阐述基本概念，故所占篇幅不大，对于一些安排有上述课程的专业，若不用这些材料时，对整个教学学时影响也不大。

本书还有针对性地安排少量光纤特性的基本测量，只期为了解光纤的基本特性为目的的。

本书的对象主要是有关专业高年级的大学生，也可供从事光纤通信的技术人员自学参考。

本书初稿经邮电部教材编审委员会审阅，各兄弟院校有关同志提出了不少宝贵意见，这对本书的修改帮助很大。在此，谨向有关同志致谢。

由于光纤通信是一门新发展起来的新学科，作为一种课程进行教学，提上日程更是近期的事，因此不论国内国外，编写这类教科书的经验都感不足。加之我们学识水平有限，本书难免错误和不妥之处。切望读者多提意见，以便今后进一步修改。

编者 1985.3.

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1. 光波通信的发展简况	(1)
§ 2. 光纤通信系统概述	(3)
§ 3. 光纤通信发展展望	(6)
第二章 介质薄膜波导	(8)
§ 1. 平面波在两均匀介质分界面上的反射和折射	(9)
§ 2. 用射线法分析薄膜波导中的波	(23)
§ 3. 用波动理论分析薄膜波导中的波	(36)
第三章 光导纤维	(51)
§ 1. 均匀光纤	(53)
§ 2. 非均匀光纤	(98)
§ 3. 单模光纤	(117)
§ 4. 光纤的色散特性	(131)
§ 5. 光纤的损耗	(150)
附录一、常用贝色尔函数公式	(155)
附录二、在均匀光纤中, 由 E_z 、 H_z 求其他场分量 E_r 、 E_θ 、 H_r 、 H_θ 的方法	(161)
附录三、非均匀介质中的亥姆霍兹方程	(163)
附录四、椭圆极化波及其表示法	(164)
第四章 光通信器件	(169)
§ 1. 激光器的物理基础	(169)
§ 2. 激光器的工作原理	(192)
§ 3. 半导体激光器	(226)
§ 4. 光电探测器	(270)

第五章 光纤通信系统	(287)
§ 1. 引言.....	(287)
§ 2. 量子噪声.....	(288)
§ 3. 接收机电路与噪声.....	(307)
§ 4. 光纤线路系统的分析计算.....	(333)
§ 5. 数字光纤接收机灵敏度的分析计算.....	(366)
§ 6. 调制技术.....	(391)
附录四、时间响应与频域响应.....	(404)
附录五、富氏变换特性.....	(407)
第六章 光纤测量	(411)
§ 1. 光纤折射指数分布测量.....	(411)
§ 2. 光纤衰减测量.....	(421)
§ 3. 光纤色散特性测量.....	(426)
§ 4. 单模光纤测量.....	(431)

第一章 绪 论

光纤通信是一门新的学科，为了使读者在深入学习之前对光纤通信有一基本了解，在本章中我们先对光纤通信作一概括介绍。

§ 1 光波通信的发展简况

无线电通信是以电磁波为媒介进行的，电磁波的频谱很宽，其情况如图(1-1)所示。由图可见，通常无线电通信所用波段是在波长为千米至厘米数量级范围(频率为百千赫至万兆赫数量级)。由于通信容量与电磁波频率成正比例地增大，所以人们一直在探索将更高频率的电磁波用于通信的技术。光波是人们最熟悉的电磁波，其波长在微米级，而频率则为 10^{14} Hz数量级(光波称为微波，正如微波称为厘米波、毫米波一样)，其频率比常用的微波频率高 10^4 — 10^6 倍，因而其通信容量原则上应比微波高 10^4 — 10^6 倍。正是由于这一特点，利用光波进行通信一直是人们所向往的事。

早在18世纪(1880年)，A·G 贝尔(Bell)即用通常的可见光在数百米距离上传送过语音，但这种形式的光通信一直未得到发展，其主要原因有二：首先是没有合适的光源。通常的自然光源不具有一般无线电波性质(如频带很窄，方向性很强等等)，很难按一般无线电波处理以进行通信；其次是光波在大气层中传播受气候影响严重，通信极不稳定，所传播的距离很短。

就振荡源来说，对于光波这样高的频率，要用一般无线电波或微波振荡的原理来产生是不可能的。因而在很长时期中，人们未得到类似一般无线电波的光波。直至六十年代初激光的出现才解决了这一问题。激光是基于原子、分子内能变化制造的光波振荡器，其

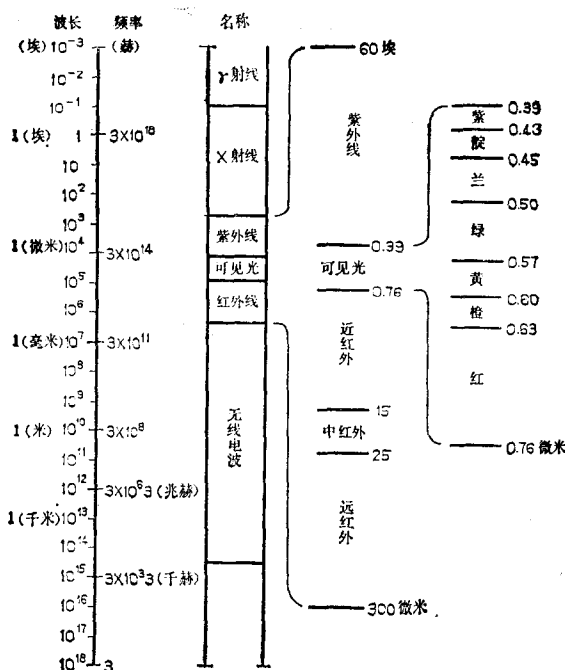


图 1-1 电磁波谱

振荡原理完全不同于一般无线电波振荡源。它产生频率单纯的光波，这种光波可以类似无线电波那样受人工控制。由于光波振荡源问题得到解决，六十年代以后，光纤通信的研究工作得到普遍重视。但光波传输受气候影响这一问题还未能解决，因而光波通信仍未能迅速发展。直至1966年论证提出利用光导纤维作为光波传输手段的可能性，以及1970年实践上制出低损耗的光导纤维，光波传输问题才得到解决。这样光通信发展上所遇到的两大问题基本上都得到了解决，因而在1970年以后，开始了世界性的光纤通信研究热潮，在八十年代中期已开始大规模应用。这在通信历史上引起了一

个划时代的变化，形成一个新的技术领域，构成一门应用范围广阔的新学科。

§ 2 光纤通信系统概述

目前实用的光纤通信系统都采用直接检波系统。直接检波系统就是在发送端直接把信号调制到光波上，而在接收端用光电检波管直接把被调制的光波检波为原信号的系统。这种系统的示意方框图如图（1-2）所示。图中电端机就是一般电信号设备，例如载波机

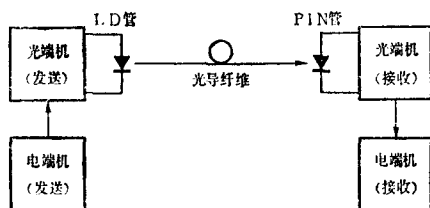


图 1-2 光纤通信直接检波系统示意图

或电视图象发送与接收设备等。光端机则是把电信号转变为光信号（发送光端机），或把光信号转变为电信号（接收光端机）的设备。发送光端机的作用是将发送的电信号进行处理，加在半导体激光器上，使电信号调制光波，然后将此已调制光波送入光导纤维。已调制光波经光导纤维传送至接收光端机的半导体光电管上检波。检波后得到的电信号经过适当处理再送接收电端机，然后按一般电信号处理。这就是整个光纤通信的过程。这个过程和一般无线电通信过程是十分相似的。当然光纤通信的空间传输手段是光导纤维，这与一般无线电通信在空间传输电波的情况是不同的。

直接检波系统的基本优点是构成简单，就当前光波技术水平来讲现实可行。同时由于光波频率极高，在这样系统上传送上万路电

话、几十路电视并不困难，完全可以满足目前通信的需要。因此直接检波系统是光纤通信当前较多采用的形式。

一般无线电通信系统常采用外差形式，在光纤通信中也在进行这类系统的研制。这种系统叫做相干光纤通信系统，其示意方框图示于图（1-3）。图中，发送端光波振荡器发出频率为 f_0 的光波，在调制器中，此光波被电端机（发送）的信号所调制，然后送入光纤。传输至接收端后，与接收端光波振荡器输出的频率为 $f_0 + \Delta f$ 的光波，同时送入混频器进行混频，得到频率为 Δf 的中频输出。此

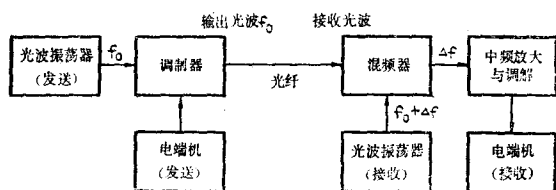


图 1-3 相干光纤通信系统示意图

中频经过中频放大与解调，即送入接收电端机，得到所需的信号。这种系统的工作原理与一般无线电外差系统完全一样，只不过将无线电的高频电磁波（微波、米波等电磁波）换作光频电磁波而已。

与直接检波系统相比较，相干光通信系统具有接收灵敏度高，可作多路频分复用等优点。但此系统需要频率极稳定的光源，调制、解调技术都很复杂，有不少技术问题与一些特殊元件尚待解决，还需经大力研究，才有可能进入实用，因此下面内容将以直接检波系统为主。

由于固体器件具有小型化，高可靠性以及便于高速调制的优点，再加上低成本的巨大潜力，所以目前光纤通信实用系统的激光光源基本上都采用半导体激光器，它是一个加正向偏置电流可发光的半导体二极管（LD管），其特性如图（1-4）所示。当偏置电流增大时，半导体激光管的输出光功率（ P ）增大，因此很容易得到如图所示的用电信号调制的光功率输出。除激光二极管外，还常用发

光二极管 (LED管), 其发光原理与激光二极管类似。

目前光纤通信所用的接收检波器是半导体光电探测器, 这是利用某些半导体物质在吸收光子后形成电子——空穴对, 因而把光转变为电流的效应作成的。常用的有PIN 光电二极管和雪崩光电二极管 (APD管)。

由图 (1-2) 可见, 光端机的主要作用是: 一方面把电端机的电信号调制到光波上, 另一方面又需要将收到的已调制光波复原为电信号。由于光频器件都采用半导体二极管, 其调制与解调可方便地利用半导体二极管的发光特性与检波特性进行, 所以在光端机中, 除光频半导体二极管外, 都是由一般电路组成的。在发送端须保证电信号能按指标要求加在半导体激光管上, 而在接收端能把光电二极管检出的弱信号不失真地进行低噪声放大, 还原为原来的电信号。所以光端机基本上是由常用的功率放大器、低噪声放大器、编码接收机的整形电路等构成。除了要求其频带宽或脉冲窄 (这是由于光纤通信容量大的缘故) 之外, 它们没有更多的特点。所以本书在这方面内容将不多涉及。

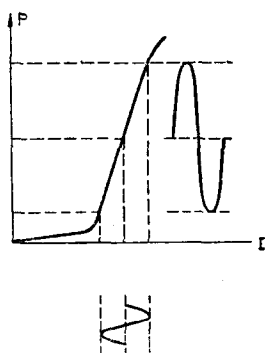


图 1-4 半导体激光管的光功率与偏置电流曲线示意图

光信号由光导纤维 (玻璃纤维)

传输。光导纤维是介质波导, 其结构如图 (1-5) 所示。内部圆柱介质的折射率为 n_1 , 外部包层介质的折射率为 n_2 , $n_1 > n_2$ 。在两介质交界面上满足全反射条件时, 可将光波限制于折射指数为 n_1 的介质圆柱中来回反射, 传输到另一端, 而形成光波导。由于这些玻璃介质的纯净度极高, 所以光导纤维的损耗极低, 图 (1-6) 为光导纤维损耗与波长关系示意图。目前制作的光导纤维的损耗已接近理论极限值。在 $\lambda = 1.35\mu\text{m}$ 与 $\lambda = 1.5\mu\text{m}$ 附近, 衰减有最低点, 这个波段叫做长波长波段。而 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ 的波段叫做短波长波段。由于

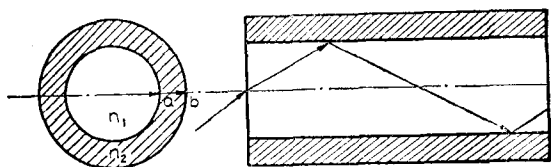


图 1-5 光纤结构示意图

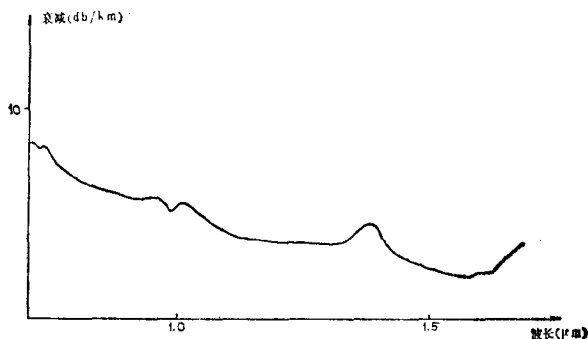


图 1-6 光纤衰减曲线示意图

长波长波段的衰减低，因而是较理想的工作波段。

§ 3 光纤通信发展展望

光纤通信不仅是可能提供极大通信容量的通信手段，而且其传输衰耗之低（在长波长波段可低至 0.2dB/km ）为过去任何传输手段所未见。它用玻璃介质做成传输线，这就打破了长期以来用铜制作传输线或波导的传统。在自然界，玻璃原料比铜原料丰富得多，光导纤维有取之不尽的材料源泉。同时，光导纤维的截面尺寸很小（每根光纤直径为 $100\mu\text{m}$ 数量级），重量很轻，易弯曲，便于处理，容易成束使用，这些都是过去任何铜制传输线所不能比拟的。

此外，光纤通信是在光波波段工作，不易受电磁干扰，保密性也好。由于以上这些优点，光纤通信被认为是通信史上一次革命性的变革。光纤通信网将在长途通信网与市话通信网中代替现用的电缆通信网，这已为各国所公认。目前这种通信上的巨大变革正在世界各地迅速进行，而在未来信息社会中，交换大量信息的信息网路也将由光纤通信网路来构成。由此看来，无论是目前还是将来，几乎几种主要通信网路都将由光纤线路组成，因此这一新学科的影响将是非常深远的。

光纤通信作为一门新学科来讲，还处在起始阶段，其发展的潜力在通信史上很少有其它技术可与之相比。例如，相干光纤通信系统的研制成功将使我们有可能把现有光纤通信容量提高几个数量级，一次传送距离为几百公里的通信系统可望建立；新的红外光纤材料的研究，有可能使光纤的衰耗再减少两、三个数量级，使一次传输距离达到成千上万公里；光波放大器的应用以及全部由光波器件组成的光纤通信线路的研制成功将会形成一个全新的异常优越的通信系统。这些方面的研制工作正在进行，它们的实现不少是可望可及的。光纤通信将代替多种传统的通信手段，其深远意义也许可与晶体管在许多方面代替电子管相比拟。因此这一通信新技术是当代科学技术发展的中心之一，需要我们很好学习与注意。

第二章 介质薄膜波导

在光纤通信中，一般不是用介质薄膜波导（以下简称薄膜波导）而是用光导纤维做为远距离传输光信号的媒质，但是，薄膜波导的讨论是具有重要意义的。首先，薄膜波导是一种最简单的光波导，分析起来方便，得出的结果简单。因此，通过薄膜波导的讨论可帮助初学者比较容易地建立起介质光波导的概念。从这个意义上讲，可把这一章看做学习光导纤维的基础。另外，用薄膜波导可以做成各种光波元件，如光的耦合器、调制器等。因而薄膜波导又是集成光学的基础。

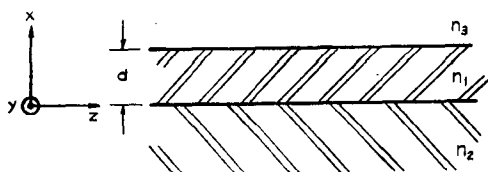


图 2-1 介质薄膜波导的结构

图（2-1）表示均匀薄膜波导的纵向剖面。它由三层均匀介质构成。中间一层折射指数为 n_1 ，厚度为 d 。 d 约在 $1\sim 10\mu m$ 之间。光波就在薄膜及其附近传播。另外两层介质的折射指数分别为 n_2 和 n_3 。为了使光波集中在薄膜中， n_2 和 n_3 必须小于 n_1 。假若 $n_2=n_3$ ，则形成对称薄膜波导。一般薄膜是用扩散工艺沉积在衬底材料上面的，薄膜之上则是某种敷层或折射指数为1的自由空间。在以后的讨论中，把折射指数为 n_2 的介质做为衬底，而把折射指数为 n_3 的介质做为敷层。一般 $n_1>n_2>n_3$ 。

薄膜波导的横向（ y 向）宽度，一般为 $1\sim 2cm$ 。与光波波长相

比，这是很长的距离。例如，当工作波长 $\lambda_0 = 1\mu m$ 时，1cm的宽度中就包含了上千个波长。因而薄膜波导可以认为是无限宽的，光波在这个方向上不受限制。

我们用射线法和波动理论分析法来分析薄膜波导中的波。所谓射线法是把薄膜波导中的波看做由均匀平面波在薄膜的两个界面上全反射而形成的，波动理论则是把薄膜波导中的波看做满足波导边界条件的麦氏方程的解。

为了便于建立介质光波导的概念，首先用射线法来分析薄膜波导。这要用到均匀平面波反射和折射的若干规律，因此首先复习一下平面波在介质分界面上的反射和折射。

§ 1 平面波在两均匀介质分界面上的反射和折射

1-1 均匀平面波的一般概念

在均匀介质中能存在均匀平面波。所谓均匀平面波是指在与传播方向垂直的无限大平面上，电场强度 $\vec{E}$ 和磁场强度 $\vec{H}$ 的幅度和相位都相等的那种波型。或者说这种波的等幅、等相面是无限大的平面。均匀平面波可用图(2-2)示意。在下面的讨论中将均匀平面波简称为平面波。

平面波是一种非常重要的波型，这是因为一些复杂的波型可由平面波叠加而得到的缘故。例如，薄膜波导中的波就可用平面波叠加而成。它是用射线法分析复杂波型的基础。

图(2-3)表示一折射指数为 n 的无限大的介质，一工作波长为 λ_0 的平面波在其中传播，其波数为

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda_0} = k_0 n = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon}$$

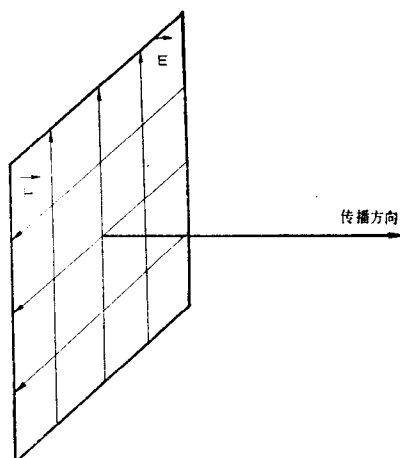


图 2-2 均匀平面波的示意图。

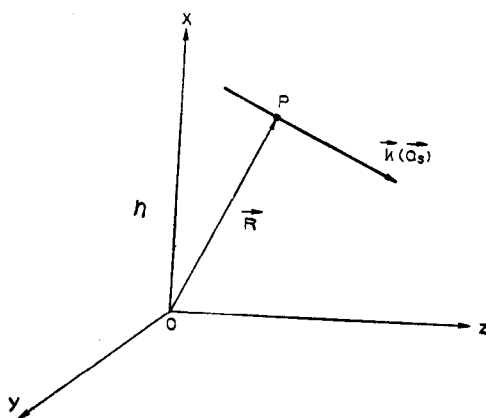


图 2-3 平面波的波矢量及所用的坐标