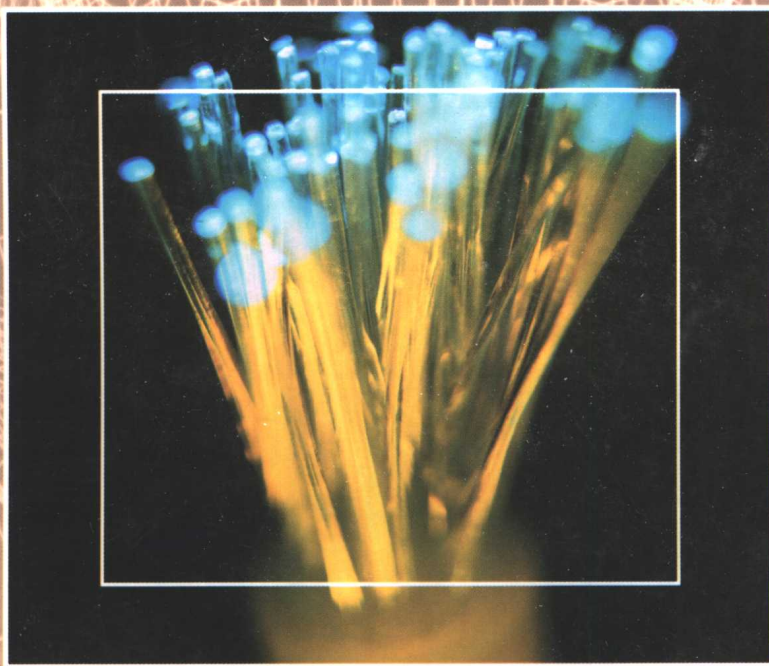


光纤与光缆技术

Guangxian yu Guanglan Jishu

吴平 严映律 编



西南交通大学出版社

光纤与光缆技术

吴 平 严映律 编

西南交通大学出版社
• 成 都 •

内 容 简 介

本书从光的电磁理论出发,介绍了光纤与光缆技术的基本理论、基本方法及其应用。主要内容
包括:光纤的基本理论;光纤的特性、制造以及特性参数的测量;光无源器件;光缆的结构、材料、制
造工艺;光缆的性能参数及测试;光缆线路工程设计、施工与维护等。

本书可作为大专院校物理电子学、光电子学、电子科学与技术、通信等专业的本科教材,也可
供有关专业科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤与光缆技术 / 吴平, 严映律编. —成都: 西南
交通大学出版社, 2003.5
ISBN 7-81057-712-3

I. 光... II. ①吴...②严... III. ①光学纤维②光
缆 IV. ①TN252②TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 020435 号

光纤与光缆技术

吴平 严映律 编

*

责任编辑 王 旻

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

西南冶金地质印刷厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.625

字数: 327 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-712-3/TN·305

定价: 20.00 元

前 言

光纤通信飞速发展,新技术不断涌现,使光纤、光缆技术的内容愈来愈丰富。目前有关光纤通信方面的专著已有不少,其内容偏重对光纤通信系统与设备的描述。有关光纤光学方面的专著也有一些,但内容主要侧重对传光理论系统完整的论述。本书作为一本大学本科教材,注重对光纤、光缆技术的基本理论、基本概念和基本方法的阐述,突出对光缆工程应用的介绍。书中尽量避免繁杂的数学推导,而突出思路和方法,并力求将工程实际与本科教学在内容、组织、难易程度、知识体系和学习方法上较好地结合起来。

全书共有十一章,分为两大部分。第一部分包括第一章~第六章,主要介绍有关光纤的发展、光纤的传输理论、光纤的特性、光纤的制造、光纤参数测量方面的内容,在这部分最后还对光无源器件进行了简要介绍。第二部分包括第七章~第十一章,主要介绍了有关光缆组成、光缆材料、光缆结构设计、光缆制造、光缆性能参数测试、光缆通信线路工程设计和光缆线路施工与维护方面的内容。

第一章~第六章由吴平编写,第七章~第十一章由严映律编写。

在本书的编写和试用过程中,得到了西南交通大学出版社、西南交通大学教务处的支持和帮助。西南交通大学应用物理系的王祖源老师为本书插图做了大量工作,在此表示衷心的感谢。由于作者水平有限,错误和疏漏之处,敬请读者批评、指正。

编 者

2003年1月于西南交通大学

目 录

第一章 概 论	(1)
第一节 光纤的发展历程	(1)
第二节 光纤的结构和分类	(3)
第二章 光纤传输的基本理论	(6)
第一节 平面介质波导的光线理论	(6)
第二节 均匀光纤的光线理论	(9)
第三节 均匀光纤的波动理论	(12)
第四节 渐变型光纤的光线理论	(26)
第五节 渐变型光纤的波动理论	(30)
第三章 光纤的特性	(34)
第一节 光纤的损耗特性	(34)
第二节 光纤的色散特性	(40)
第三节 光纤的双折射和偏振特性	(46)
第四节 光纤的非线性效应	(49)
第五节 光纤的其他特性	(54)
第四章 光纤的制造	(58)
第一节 光纤的类型、剖面结构	(58)
第二节 光纤的设计、选用原则和推荐方案	(67)
第三节 光纤的制造	(71)
第五章 光纤特性参数的测量	(81)
第一节 光纤测量的基本条件	(81)
第二节 光纤结构参数的测量	(84)
第三节 光纤传输特性的测量	(96)
第六章 光无源器件	(108)
第一节 光纤连接器	(108)

第二节	光耦合器件·····	(111)
第三节	光开关·····	(112)
第四节	光衰减器·····	(113)
第五节	光波分复用器·····	(114)
第七章	光缆概述 ·····	(116)
第一节	光缆的基本结构·····	(116)
第二节	通用光缆·····	(123)
第三节	特种光缆·····	(133)
第四节	光缆材料·····	(140)
第八章	光缆的结构设计与制造工艺 ·····	(144)
第一节	光缆结构设计概述·····	(144)
第二节	结构设计的基本理论·····	(148)
第三节	光缆的制造·····	(158)
第九章	光缆性能及测试 ·····	(164)
第一节	传输性能·····	(164)
第二节	机械性能·····	(164)
第三节	环境性能·····	(170)
第十章	光缆线路工程设计 ·····	(174)
第一节	工程设计的原则和程序·····	(174)
第二节	工程设计的主要内容·····	(175)
第三节	线路设计·····	(180)
第四节	光纤、光缆选型 ·····	(186)
第十一章	光缆线路施工与维护 ·····	(188)
第一节	概 述·····	(188)
第二节	光缆敷设·····	(188)
第三节	光缆接续与安装·····	(194)
第四节	光缆线路的测量·····	(198)
第五节	光缆线路的维护技术·····	(201)
第六节	光纤测量中的常用仪器·····	(206)
参考文献	·····	(211)

第一章 概 论

第一节 光纤的发展历程

光纤的发展,大致可分为三个阶段:

第一阶段,光纤的早期研究阶段。

在这一阶段主要是研究透明材料对光线和图像的传播。很早希腊的玻璃工人就发现了玻璃这种材料可以传送光,他们利用玻璃的这种性质,制造了各种装饰用的玻璃器皿。1854年,英国的丁达尔(J. Tyndall)指出:根据光的全反射原理,光线在水中通过弯曲的通道可以传播,他用如图 1.1.1 所示的实验装置观察到了这一现象。1927年,英国的贝尔德(J. G. Baird)提出了利用光的全反射现象制成石英光纤,利用石英光纤来传递图像。1930年,德国拉姆(H. Lamm)提出把柔软的光纤集合起来成为光纤束,利用光纤束来传递光学图像。拉姆把直径为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的石英光纤有规则地排列起来,做成了肠胃检查镜。在这一阶段,由于技术和材料的限制,光纤的研究进展缓慢。

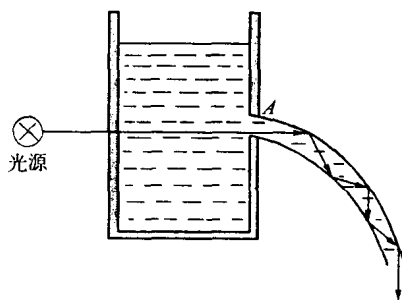


图 1.1.1 丁达尔实验简图

第二阶段,光纤研究的蓬勃发展阶段。

1951年,荷兰的范西尔(A. C. S. Van Heel)和英国的霍普金斯(H. H. Hopkins)与卡帕提(N. S. Kapang)对光纤进行了研究工作,他们用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的细光纤捆扎成束,想清晰地传递图像,但由于漏光和排列工艺方面的原因,这种光纤束传递图像并不理想。1953年,范西尔将一种折射率为 1.47 的塑料涂敷在玻璃纤维上,制造出了玻璃(芯) - 塑料(涂层)光纤。这种结构的光纤,可以满足光的全反射条件,并且塑料外涂层对玻璃芯有保护作用。但由于塑料涂层难以做得很均匀,芯 - 涂层之间的界面不理想,光能损失大,这种光纤的传光效果并不好。1955年,美国的希斯乔威兹(B. I. Hirschowitz)把高折射率的玻璃棒插在低折射率的玻璃管中,将它们放在高温炉中拉制,得到了玻璃(芯) - 玻璃(涂层)光纤,初步解决了光纤的漏光问题。为今天的光纤制造工艺奠定了基础。

1954年美国的考特尼普拉特(J. S. Courtneypratt)提出用光纤制作熔融面板,作为电子束管屏的想法。但由于工艺的原因,这个想法并没有得到实现。1958年,卡帕提提出了拉制复合光纤的新工艺。这种工艺制造的光纤单丝直径很小,用这种小直径光纤就可以得到具

有高分辨率的光学纤维面板。后来他们改进光纤制造工艺,在光纤上增加吸收套层,减少了杂散光的影响,提高了像的质量,使纤维面板进入了实用化阶段。

1960年,光纤束传像研究得以突破,美国人解决了光纤排列工艺方面的问题,制造出了可弯曲、高分辨率的光纤传像束,这种光纤传像束在医疗仪器中得到广泛的应用。

1957年,研制出了闪烁发光光纤,这种光纤可用于高能粒子探测。1961年,研制出了红外和紫外波段使用的光纤,并且用钽玻璃制造出了激光光纤。

在这一阶段,主要是对光纤工艺、光纤传光和传像的研究。这段时期建立和完善了光纤理论,光纤的制造工艺有了很大的改进,光纤和光纤元件(光纤面板、光纤束)的质量明显改善,光纤在生产、生活中有广泛的应用。例如:利用光纤柔软的特点制成的潜望镜、内窥镜,用光纤制作的各種图像变换器,像增强器等。

第三阶段,光纤的新发展阶段。

这一阶段的主要特点是光纤通信的迅猛发展。

光通信的历史可以追溯到3000年前的烽火台。1791年法国人发明了信号灯,开始了“灯语”通信。17世纪中叶,发明了望远镜,大大地增加了目视通信的距离。但所有这些都属于可视通信,它与现代光通信有本质的不同。

现代通信是从1880年美国的贝尔发明光学电话开始的。贝尔的光学电话以日光为光源,大气为传输介质,通信距离达到了217 m。但此后光通信发展十分缓慢。其主要原因是构成光通信系统的三个核心部分(光源、传输介质、光检测器)没有突破性进展。

1960年,美国人梅曼发明了红宝石激光器。得到了第一台相干振荡光源,它的出现激起了世界范围的光通信研究热潮,这期间的研究主要集中在激光大气通信方面。激光大气通信(又称为无线光通信)是以激光作为光源,大气作为传输介质的。这种通信受制于大气的影晌。由于大气对光有严重的吸收、散射作用,又易受天气变化的影响,所以激光大气通信在通信距离、通信稳定性和可靠性方面受到制约。激光大气通信的研究出现停止状态。到目前为止激光大气通信的研究基本上限于宇宙空间通信。

由于大气通信存在的缺点,人们不得不寻求可以在封闭状态下传送光信号的办法。例如,用波导管、棱镜、透镜折射的光束导管等。但这些波导结构复杂,难以实现实用导光的目的。光纤也是一种能把光信号封闭在其中的光波导,但在这一时期优质光学玻璃制作的光纤的损耗仍很大,高于1000 dB/km。它无论如何是不可能用于光通信的。1966年,英国标准电信研究所美籍华人高锟和霍克汉姆(G. A. Hockham)发表了具有重大历史意义的论文,指出可以利用带有包层材料的石英玻璃光纤作为光通信传输介质。他们认为:光纤的高损耗不是光纤本身固有的,而是由材料中所含杂质引起的。如果降低材料杂质的含量,就可以大大降低光纤的损耗。他们还预言通过降低杂质含量、改进光纤的制造工艺,可以将光纤的损耗降到20 dB/km或更小。世界上几个实验室对此进行了研究。1970年,美国康宁公司的Maurer等人研制出了阶跃折射率多模光纤,该光纤对630 nm波长的光,损耗小于20 dB/km,这使光纤进行远距离信息传输成为可能。这是光通信史上划时代的事件。与此同时半导体激光器的研究也取得了突破性进展,实现了GaAs半导体激光器室温连续工作,该激光器的输出波长为850 nm,恰好与这一时期光纤的低损耗窗口波长一致。这一幸运的巧合,无疑加快了光通信发展的进程。因此1970年被认为是值得纪念的光纤通信元年。

1972年,随着光纤原材料提纯、制棒和拉丝技术的提高,梯度折射率多模光纤的损耗降

至 4 dB/km。1976 年,美国芝加哥成功地进行了世界上第一个 44.736 Mbit/s 传输 110 km 的光纤通信系统的现场试验,使光纤通信进入实用化阶段。

进入实用阶段以后,光纤通信的应用发展极为迅速,应用的光纤通信系统已经多次更新换代。20 世纪 70 年代的光纤通信系统主要是用多模光纤,应用光纤的短波长(850 nm)波段。20 世纪 80 年代以后逐渐改用长波长(1 310 nm),光纤逐渐采用单模光纤。到 20 世纪 90 年代初,通信容量扩大了 50 倍,达到 2.5 Gbit/s。进入 20 世纪 90 年代以后,传输波长又从 1 310 nm 转向更长的 1 550 nm 波长,并且开始使用光纤放大器、波分复用(WDM)技术等新技术。光通信容量和中继距离继续不断增长。20 世纪 90 年代末,商用电时分复用 TDM 系统的速率已达 10 Gbit/s;而 TDM 40 Gbit/s 系统已进入实用阶段。由于受电子器件极限速率的限制,TDM 系统的速率进一步提高将是十分困难的。而波分复用 WDM 技术的不断发展,使其成为网络升级、增加容量的最佳选择方案。WDM 试验系统容量最高记录一年中每隔几个月就被刷新一次。到 2001 年 3 月,OFC2001 年会上,日本 NEC 公司发布了当时世界最高记录的 WDM 系统,该系统速率为 $10.92 \text{ Tbit/s} = 273 \times 40 \text{ Gbit/s}$,传输距离达 117 km,该系统采用了分布拉曼放大、集中光纤放大和极化复用技术,频带利用率达 $0.8 \text{ bit/s} \cdot \text{Hz}$ 。

在这一阶段,光纤广泛地应用于市内电话中继和长途通信干线,成为通信线路的骨干,促进了光通信的发展。

在传输光的过程中,光纤易受到外界环境因素的影响,如:温度、压力、电磁场等外界条件的变化都将会引起光纤传输的光波参数(如:光强、相位、频率、偏振状态等)的变化。利用光纤的这一特性,人们发明了光纤传感器。通过测量光纤中传输光波参数的变化,来测量导致光波参数变化的各种物理量的大小。近年来,光纤传感技术发展十分迅速,成为了光纤应用的新领域。

第二节 光纤的结构和分类

一、光纤的结构

光纤是光导纤维的简称,它是一种光波导。

光纤的结构一般为双层或三层同心圆柱体,如图 1.2.1 所示。中心部分为纤芯,纤芯以外的部分为包层。光纤外径一般为 $125 \sim 400 \mu\text{m}$,芯径一般为 $2 \sim 200 \mu\text{m}$ 。纤芯的作用是传导光波,包层的作用是将光波封闭在光纤中传播。光波要在光纤中传播,要求光纤纤芯的折射率大于包层的折射率。为实现包层和纤芯折射率差,必须使包层和纤芯的材料有所不同。实际的光纤在包层外面还有一层缓冲涂覆层,其作用是保护光纤免受环境污染和机械损伤。

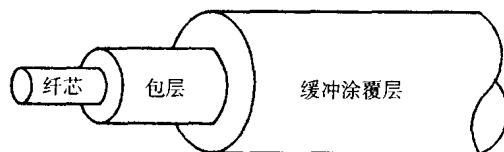


图 1.2.1 单根光纤结构简图

二、光纤的分类

光波在光纤中传输时,由于纤芯边界的限制,光纤能传输的光波的光场解是有限的。光纤中存在的光场解称为模式。

光纤的分类方法很多,可以按折射率分布形状分类,也可按传输模式多少分类,还可以按光纤材料和传输的波长分类。下面介绍几种常用的分类方法。

1. 按光纤截面上折射率分布形状分类

- (1) 突变型光纤(又称阶跃型光纤);
- (2) 渐变型光纤(又称梯度折射率光纤);
- (3) 三角形折射率分布光纤;
- (4) W 形折射率分布光纤。

光纤折射率分布描述的是从光纤纤芯至光纤包层的折射率随光纤半径 r 的变化:

$$n=n(r)$$

在实际应用中光纤折射率分布可用下面的函数描述:

$$n^2(r)=n_1^2\left[1-2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^g\right] \quad (r<a)$$

$$n^2(r)=n_2^2=\text{常数} \quad (r\geq a)$$

式中, a 为光纤纤芯的半径; n_1 为光纤轴上折射率; n_2 为光纤包层的折射率; $\Delta=[n_1^2-n_2^2]/2n_1^2$;光纤折射率剖面指数 $g>0$ 。光纤折射率分布如图 1.2.2 所示。其中, $g=1$ 对应三角形分布, $g=2$ 对应梯度折射率分布, $g\rightarrow\infty$ 对应阶跃型分布。

2. 按光纤的组成材料分类

- | | | | | |
|-----------|---|-------|---|---------|
| (1) 石英系光纤 | { | 掺杂石英芯 | { | 掺杂石英包层; |
| | | 纯石英芯 | | 纯石英包层; |
| | | | | 塑料包层; |

- (2) 多组分玻璃光纤;
- (3) 全塑料光纤;
- (4) 氟化物光纤;
- (5) 硫硒碲化合物光纤。

3. 按光纤传输光波长的长短分类

- (1) 短波长光纤;
- (2) 长波长光纤;
- (3) 超长波长光纤。

短波长光纤工作在 $0.8\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 波段;长波长光纤工作在 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段;超长波长光纤工作在 $2\ \mu\text{m}$ 以上波段。

4. 按光纤的传输模式分类

- (1) 单模光纤;

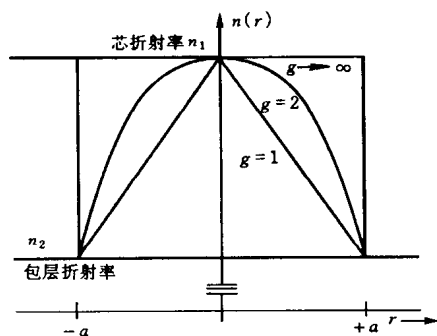


图 1.2.2 光纤折射率分布

(2) 多模光纤;

光纤中只传输一个模式的光纤称为单模光纤;光纤中传输多个模式的光纤称为多模光纤。

图 1.2.3 是单模光纤和多模光纤的结构示意图,图中给出了单模光纤和多模光纤的剖面折射率分布、光线在光纤中传播的轨迹、单模光纤和多模光纤的典型尺寸。

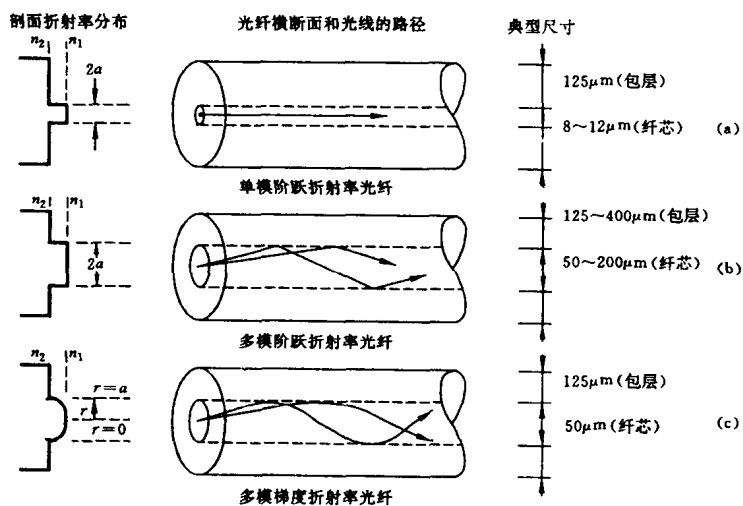


图 1.2.3 单模光纤和多模光纤的结构示意图

第二章 光纤传输的基本理论

光纤传输的基本理论有两种:光线理论和光波动理论。光线理论是用几何光学的方法来研究光在光纤中的传输特性。光波动理论是以电磁波理论为基础,研究光在光纤波导中的传输特性。在介绍光纤的基本理论之前,先用光线理论分析平面介质波导。平面介质波导的分析方法简单,得出的结论物理图像清晰,比较容易建立起描述光在光波导中传输的有关概念。

第一节 平面介质波导的光线理论

平面介质波导是光波导最基本、最简单的结构形式。在这一节中,将简单地介绍一些平面介质波导的内容。引入一些描述光在光波导中传输的物理参数。

最简单的平面介质波导是三层平板结构,如图 2.1.1 所示。中间一层称为薄膜层,折射率为 n_1 ,厚度为 d 。上面一层称为覆盖层,折射率为 n_3 。下面一层称为衬底层,折射率为 n_2 。为使光波集中在薄膜中, n_2 和 n_3 必须小于 n_1 。如果 $n_2 = n_3$,这种波导称为对称平面介质波导(或对称薄膜波导)。一般情况有: $n_1 > n_2 > n_3$ 。

下面用光线理论来分析平面介质波导中波的传播情况。光线理论的方法就是把平面介质波导中的波看作是在两个介质平板间传输的光线,光线在平板界面上发生反射、折射,从而形成波的传播。

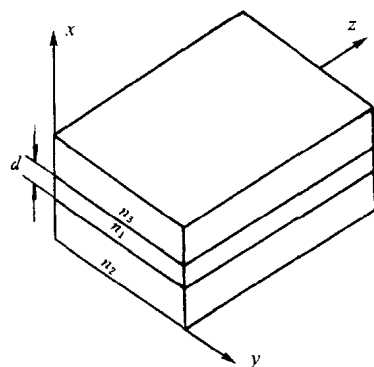


图 2.1.1 三层平板介质波导示意图

一、平面介质波导中光的传输模式

图 2.1.1 中由于波导的横向宽度(y 方向)一般为 $1 \sim 2$ cm,与光的波长相比,这是一个很长的距离,所以,可以将平面介质波导看作是只在 x 方向受限的二维波导。

各层介质是各向同性的,入射光是平面波,根据入射角的不同,平面波在两均匀介质交界面上,发生反射时,有三种不同的情况,从而可以得到两种不同的传输模。假设薄膜-覆盖层、薄膜-衬底界面的全反射临界角分别为 θ_{13} 、 θ_{12} 。

1. 导波模

波导内传输光的入射角 θ 满足 $\theta > \theta_{12} > \theta_{13}$ 时,光在波导薄膜的上下两个界面上都要发生

全反射。这样,光就被限制在波导薄膜中沿 z 方向传播,传播路径如图 2.1.2(a)所示。这种模式称为导波模或导模。

2. 辐射模

如果光线的人射角减小,满足 $\theta_{13} < \theta < \theta_{12}$ 时,光在波导薄膜 - 覆盖层界面上发生全反射,在波导薄膜 - 衬底界面上不会发生全反射。部分光会折射进入衬底,而离开波导辐射出去。光传播路径如图 2.1.2(b)所示。这种模式称为衬底辐射模。

如果光线的人射角继续减小,满足 $\theta < \theta_{13} < \theta_{12}$ 时,光在波导薄膜的上下两个界面上都不会发生全反射。部分光会折射进入覆盖层,部分光会折射进入衬底,这些光会离开波导而辐射出去。光传播路径如图 2.1.2(c)所示。这种模式称为辐射模。

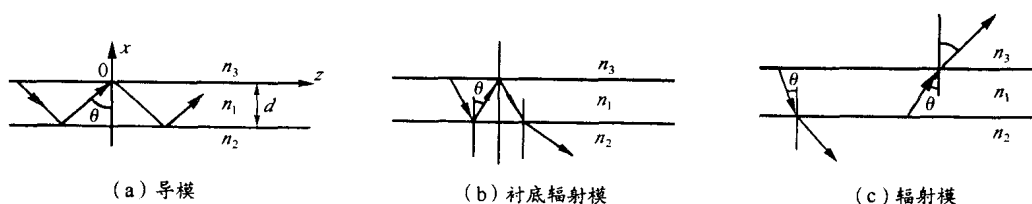


图 2.1.2 平面波导中的三种模式

入射角不同,波导中可产生两种类型的模,其中导波模是最重要的,因为只有这种模式才能在波导中传输,而辐射模是向波导外辐射能量,是实际应用中不需要的。

二、薄膜波导的特征方程

我们知道:只有入射角满足 $\theta > \theta_{12} > \theta_{13}$ 的光波,才能形成导波模。但是,不是所有满足这一条件的光线都能形成导波模。光线除满足 $\theta > \theta_{12} > \theta_{13}$ 条件外,还必须满足横向谐振条件,即:在波导薄膜上下界面来回反射一次所产生的横向相移的代数和等于 2π 的整数倍。表示为:

$$2n_1kd\cos\theta - 2\varphi_{13} - 2\varphi_{12} = 2m\pi \quad m=0,1,2,\dots \quad (2.1.1)$$

式中, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$; ω 为光波的角频率; c 为光速; λ 为光的波长; d 为波导薄膜的厚度; $2\varphi_{13}$ 、 $2\varphi_{12}$ 分别为在波导薄膜上下界面处发生全反射引起的相位变化; m 为模指数。

对水平偏振波:

$$\varphi_{12} = \arctan \frac{\sqrt{\sin^2\theta - (n_2/n_1)^2}}{\cos\theta} \quad (2.1.2)$$

$$\varphi_{13} = \arctan \frac{\sqrt{\sin^2\theta - (n_3/n_1)^2}}{\cos\theta} \quad (2.1.3)$$

对垂直偏振波:

$$\varphi_{12} = \arctan(n_1/n_2)^2 \frac{\sqrt{\sin^2\theta - (n_2/n_1)^2}}{\cos\theta} \quad (2.1.4)$$

$$\varphi_3 = \arctan(n_1/n_3)^2 \frac{\sqrt{\sin^2\theta - (n_3/n_1)^2}}{\cos\theta} \quad (2.1.5)$$

(2.1.1)式决定了形成导波模的入射角的条件,它说明:满足全反射条件的光线中,只有有限个 θ 满足横向谐振条件,因此波导中能传输的模式只有有限个导波模是分立谱。把(2.1.1)式称为薄膜波导的特征方程。特征方程具有重要的意义,是研究导波特性的基础。

三、波导模式的轴向相位传播系数

导波模沿 z 方向按锯齿形路径传播,如图2.1.2(a)所示。其传播系数为:

$$\beta = n_1 k \sin\theta \quad (2.1.6)$$

因此, β 只能取分立的值,由于导波模的 θ 是: $\theta_{12} < \theta < \frac{\pi}{2}$,所以 β 满足如下关系:

$$kn_2 < \beta < kn_1 \quad (2.1.7)$$

将(2.1.6)式代入(2.1.1)~(2.1.5)式,用 β 替换 θ ,可将(2.1.1)式表示为导波模传播系数 β 随角频率 ω 变化的方程,因此(2.1.1)式又称为薄膜波导的色散方程。

色散方程是超越方程,不能给出传播系数 β 的解析解。下面只讨论 β 的一些变化规律。

将色散方程变形为:

$$n_1 k d \cos\theta = \varphi_3 + \varphi_2 + m\pi$$

分别画出 $n_1 k d \cos\theta$ 即 $\frac{2\pi n_1 d}{\lambda} \cos\theta$, $\varphi_3 + \varphi_2 + m\pi$ 随 θ 的变化曲线,两组曲线的交点即为色散方程的解。如图2.1.3所示。

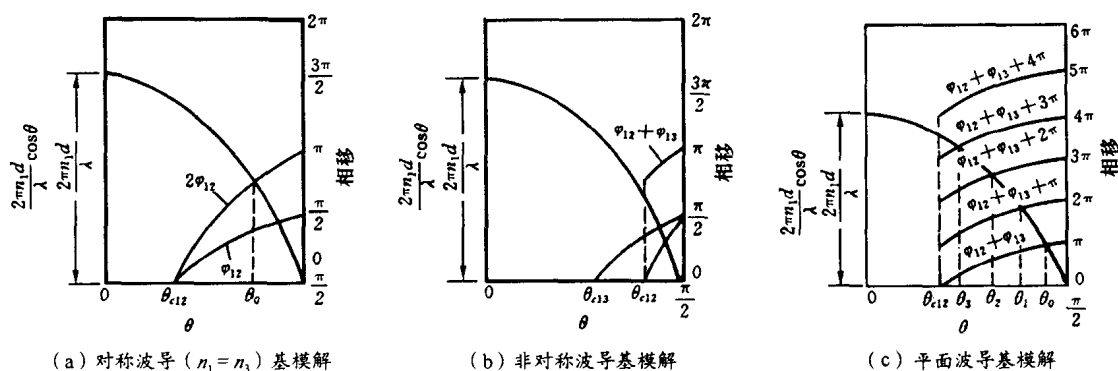


图 2.1.3 平面波导的图解

利用色散方程可以得出某一 m 值下的传播系数 β 随角频率 ω 变化的曲线,这就是平面介质的色散曲线。如图2.1.4所示。由(2.1.7)式可知:导波模是有上限、下限的,由于 $0 \leq \sin\theta \leq 1$,所以 $\beta > n_1 k$ 是不可能的。 $\beta > n_1 k$ 的区域称为禁区; $\beta < n_2 k$ 时,光线不满足全反射条件,部分光会离开波导而辐射出去,形成辐射模。辐射模是连续谱。对于导波模,其 β 是限制在 $\beta = n_1 k$ 和 $\beta = n_2 k$ 两条直线所夹的扇形区域中的。

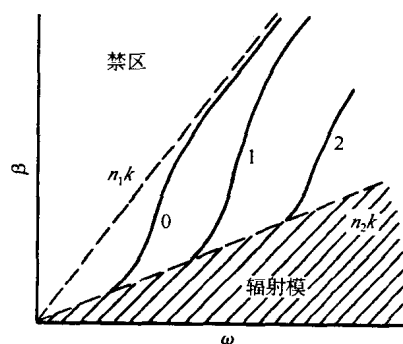


图 2.1.4 平面波导色散曲线

四、导波模的截止波长

在金属波导中,轴向相位传播常数 $\beta=0$ 意味着导波截止。介质波导中截止的概念与此不同。在介质波导中,当平面波的入射角 θ 小于波导边界的临界角时,光线不能发生全反射,部分光会离开波导,形成辐射模,这时认为波导中导波模是截止的。所以定义 $\theta=\theta_c$ (θ_c 为全反射的临界角)为导波模的截止条件。

平面介质波导的色散方程可写为:

$$n_1 \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta = \varphi_{13} + \varphi_{12} + m\pi$$

对一定的模式, m 是定值。当工作波长 λ 变化时,为满足色散方程,平面波的入射角 θ 必须做相应的变化,才能形成导波模。 λ 增加, θ 减小。当 θ 减小到 θ_c 时,导波模转化为辐射模。导波模被截止。对应于 $\theta=\theta_c$ 的波长称为该模式的截止波长。

截止波长由波导参数 n_1, n_2, n_3 和波导厚度 d 决定,不同的模式有不同的截止波长,模指数越大,截止波长越短。

第二节 均匀光纤的光线理论

均匀光纤的光线理论是用几何光学方法研究光在阶跃折射率光纤中的传输。均匀光纤的折射率分布如图 2.2.1 所示。纤芯半径 a , 折射率 n_1 ; 包层半径 b , 折射率 n_2 。 n_1, n_2 均匀分布, 并且 $n_1 > n_2$ 。

一、相对折射率差

纤芯和包层的折射率差直接影响光纤的性能, 定义相对折射率差为:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.2.1)$$

在均匀光纤中导波模是靠光线在纤芯和包层交界面上发生全

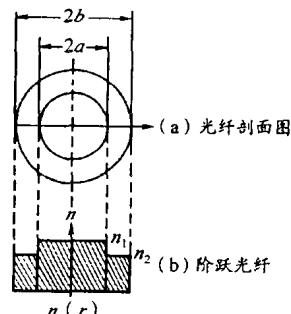


图 2.2.1 光纤的结构和折射率分布图

反射而传播的。这种传播行为与平面介质波导相同,由于光纤的交界面是圆柱形的,使得光纤中光线传播比平面波导中光线传播更复杂。

二、子午光线和斜光线

为方便研究光在光纤中的传播,将光纤中传输的光线分为两大类:子午光线和斜光线。

经过光纤轴线的平面称为子午面,显然,光纤中子午面有许多个。在图 2.2.2(a)中画出了一个子午面 MN 。位于子午面内的光线称为子午光线。子午光线是与光纤轴线相交的平面折线,子午光线在光纤端面上的投影是一条过光纤中心的直线。

光纤中不在子午面内传播的光线都是斜光线。这种光线与光纤的轴线既不平行也不相交,其光线传输轨迹是空间螺旋折线。它在光纤端面上的投影是不过光纤中心的折线。如图 2.2.2(b)所示。此折线可为左旋,也可为右旋,但它和光纤的中心轴是等距的。

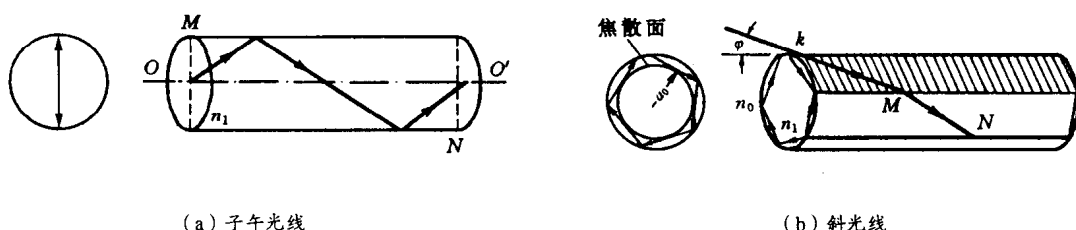


图 2.2.2 光纤中的光线

三、子午光线在均匀光纤中传输

子午光线位于子午面内,子午光线的轨迹是平面曲线。由光的反射定律可知:入射光线、反射光线和分界面的法线在同一平面。当子午光线入射到纤芯界面时,入射光线、反射光线和分界面的法线三者均在子午面内,如图 2.2.3 所示。因而研究子午光线在光纤中的传播可简化为研究光线在子午面内的传播。

从图 2.2.3 中,可以导出子午光线在光纤内发生全反射时必须满足的条件。图中 n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。要使光完全限制在光纤内传输,光线在纤芯-包层分界面上的入射角 φ 必须大于等于临界角 φ_0 ,即:

$$\sin \varphi_0 = \frac{n_2}{n_1}, \quad \varphi \geq \varphi_0 = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.2.2)$$

或

$$\sin \theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} \quad (2.2.3)$$

式中, $\theta_0 = 90^\circ - \varphi_0$, 利用 $n_0 \sin \gamma = n_1 \sin \theta$, 可得:

$$n_0 \sin \gamma_0 = n_1 \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2.4)$$

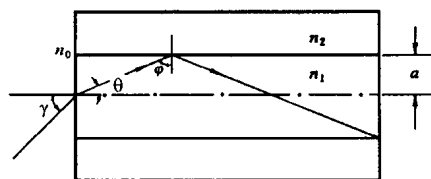


图 2.2.3 光纤中的子午光线

这里 n_0 为空气的折射率。

只有入射角 $\gamma \leq \gamma_0$ 的子午光线才可以在光纤中传输,为光纤所收集。 γ_0 的大小反映了光纤收集光的能力,通常称 γ_0 为最大孔径角。此外还引入另一个表示光纤收集光线能力的参量——光纤的数值孔径 $N.A.$ (Numerical Aperture)。定义光纤的数值孔径($N.A.$)为:

$$N.A._z = \sin \gamma_0 \quad (2.2.5)$$

由(2.2.4)式可得空气($n_0=1$)中光纤的数值孔径($N.A.$)为:

$$N.A._z = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \cdot (2\Delta)^{1/2} \quad (2.2.6)$$

下标“子”表示子午面内的数值孔径。它是最大理论数值孔径。实际应用中,还有其他数值孔径的定义。由(2.2.6)式可以看出:光纤的数值孔径($N.A.$)完全由纤芯和包层的折射率决定, n_1 、 n_2 的差越大,即 Δ 越大,光纤的数值孔径越大,光纤收集光线的能力越强。

四、斜光线在均匀光纤中传输

图 2.2.4 画出了斜光线的传输光路,由此可求出斜光线的全反射条件。设斜光线 SX 由 X 点入射后(入射角为 θ_0),在 Y 、 Z 等点反射,由于 SX 是斜入射,光纤的轴线不包含在入射面之内,所以光线的轨迹是一条空间折线。作 YP 和 ZQ 平行于轴线 CC' ,交光纤横截面于 P 、 Q 两点。 $\angle XYP = \theta'$ 表示 XY 光线与轴线的夹角(称为轴线角), XYP 平面和横截面 XPC 垂直,其交线为 XP , $\alpha = 90^\circ - \theta'$ 表示 XY 与 XP 的夹角, β 表示 XP 与 XC 的夹角。由于 α 、 β 所在的平面相互垂直,根据立体几何公式有:

$$\cos \varphi = \cos \alpha \cos \beta \quad (2.2.7)$$

式中, φ 表示 XY 与 XC 的夹角,即 XY 与光纤界面过 X 点的法线的夹角。

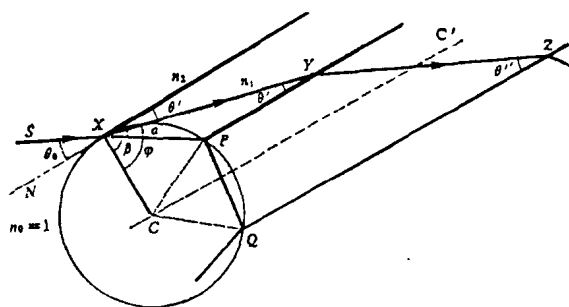


图 2.2.4 斜光线的传输光路图

将 $\alpha = 90^\circ - \theta'$ 代入(2.2.7)式,可得:

$$\cos \varphi = \sin \theta' \cos \beta \quad (2.2.8)$$

图 2.2.4 中 X 、 P 、 Q 各点在光纤横截面上组成的折线,可以看成光线 XYZ 在横截面上的投影。每曲折一次表示发生一次反射。从图 2.2.4 中可以看出,在光线传播过程中 β 角是不变的,轴线角 θ' 也是不变的。所以光线在光纤中传输在各反射点入射角 φ 是不变的。

在端面上, SX 的入射角为 θ_0 ,折射角为 θ' ,由折射定律可得: