

光纤传输技术

陈新桥 主编 林金才 副主编

网络工程专业「十二五」规划教材

中国传媒大学出版社



网络工程专业“十二五”规划教材

光纤传输技术

陈新桥 主编 林金才 副主编



中国传媒大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤传输技术/陈新桥主编,林金才副主编.——北京:中国传媒大学出版社,2015.4

(网络工程专业“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5657-1146-6

I. ①光… II. ①陈… ②林… III. ①光纤传输技术

IV. ①TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 184849 号

光纤传输技术

主 编 陈新桥
副 主 编 林金才
主 审 李鉴增
责 任 编 辑 张 笛
装帧设计指导 吴学夫 杨 蕾 郭开鹤 吴 颖
设 计 总 监 杨 蕾
装 帧 设 计 刘鑫、方雪悦等平面设计团队
责 任 印 制 阳金洲
出 版 人 蔡 翔



出版发行 中国传媒大学出版社

社 址 北京市朝阳区定福庄东街1号 邮编:100024

电 话 86-10-65450528 65450532 传真:65779405

网 址 <http://www.cucp.com.cn>

经 销 全国新华书店

印 刷 三河市南阳印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.5

版 次 2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5657-1146-6/TN·1146 定 价 39.00 元

版权所有

翻印必究

印装错误

负责调换



中国传媒大学“十二五”规划教材编辑委员会

主任：苏志武 胡正荣

编委：（以姓氏笔画为序）

王永滨 刘剑波 关玲 许一新 李伟

李怀亮 张树庭 姜秀华 高晓虹 黄升民

黄心渊 鲁景超 蔡翔 廖祥忠

网络工程专业“十二五”规划教材编辑委员会

主任：李鉴增 刘剑波

委员：李栋 韦博荣 杨磊 王京玲 李建平

陈新桥 关亚林 杨成 金立标 郭庆新



致力专业核心教材建设 提升学科与学校影响力

中国传媒大学出版社陆续推出

我校 15 个专业“十二五”规划教材约 160 种

播音与主持艺术专业 (10 种)

广播电视编导专业 (电视编辑方向) (11 种)

广播电视编导专业 (文艺编导方向) (10 种)

广播电视新闻专业 (11 种)

广播电视工程专业 (9 种)

广告学专业 (12 种)

摄影专业 (11 种)

录音艺术专业 (12 种)

动画专业 (10 种)

数字媒体艺术专业 (12 种)

数字游戏设计专业 (10 种)

网络与新媒体专业 (12 种)

网络工程专业 (11 种)

信息安全专业 (10 种)

文化产业管理专业 (10 种)



传媒人书店
(For IOS)



传媒人书店
(For Android)



微博关注我们



微信关注我们



访问我们的主页

本书更多相关资源可从中国传媒大学出版社网站下载

网址: <http://www.cucp.com.cn>

责任编辑: 张笛

意见反馈及投稿邮箱: 2086280010@qq.com

联系电话: 010-65783654

目 录

第1章 概论 /1

- 1.1 光纤通信系统简介 /1
- 1.2 光纤通信的发展历程 /2
- 本章小结 /4

第2章 光纤传输理论 /5

- 2.1 光纤的结构和分类 /5
- 2.2 光纤传输的几何光学理论 /8
- 2.3 光纤传输的波动光学理论 /10
- 2.4 单模光纤 /17
- 2.5 光缆 /19
- 本章小结 /22

第3章 光纤的传输特性 /24

- 3.1 光纤的损耗 /24
- 3.2 光纤的色散 /28
- 3.3 光纤的非线性效应 /38
- 本章小结 /47

第4章 光源与光发射机 /50

- 4.1 概述 /50
- 4.2 光与物质的相互作用 /51
- 4.3 半导体发光二极管 /52

4.4 半导体激光二极管 /53

4.5 光发射机 /61

本章小结 /67

第5章 光检测器与光接收机 /70

5.1 光检测器工作原理及性能指标 /70

5.2 PIN 光电二极管 /74

5.3 APD 雪崩光电二极管 /77

5.4 光接收机 /79

5.5 光接收机的噪声 /82

5.6 误码率与灵敏度 /84

本章小结 /90

第6章 光放大器 /93

6.1 光放大器的原理与一般特性 /93

6.2 掺铒光纤放大器 /99

6.3 拉曼光纤放大器 /103

6.4 半导体光放大器 /107

本章小结 /108

第7章 光无源器件 /110

7.1 光纤连接器 /111

7.2 光耦合器 /113

7.3 光衰减器 /116

7.4 光隔离器与光环行器 /118

7.5 光滤波器 /121

7.6 波分复用/解复用器 /123

7.7 光调制器 /126

7.8 波长变换器 /129

7.9 光开关 /132

7.10 光分插复用器 /134

7.11 光交叉连接器 /136

本章小结 /138

第8章 光复用技术 /140

- 8.1 概述 /140
- 8.2 光时分复用技术 /141
- 8.3 光波分复用技术 /144
- 8.4 光码分复用技术 /147
- 8.5 其他复用技术 /149
- 本章小结 /150

第9章 光纤传输系统 /152

- 9.1 光纤传输系统简介 /152
- 9.2 光纤传输系统性能指标 /154
- 9.3 模拟光纤传输系统 /162
- 9.4 数字光纤传输系统 /167
- 本章小结 /172

第10章 光网络 /174

- 10.1 光网络的概述 /174
- 10.2 光交换技术 /177
- 10.3 光传送网 /181
- 10.4 智能光网络 /184
- 本章小结 /187

第1章 概论

■ 本章要点:

1. 光纤传输系统的构成;
2. 光纤传输的优缺点;
3. 光纤通信的发展历程。

1.1 光纤通信系统简介

1.1.1 光纤通信系统简介

光纤就是光导纤维的简称。光纤通信系统是以光纤为传输介质,以光波为载波的通信系统,它主要由光发射机、光纤、光中继器和光接收机组成,如图 1.1.1 所示。

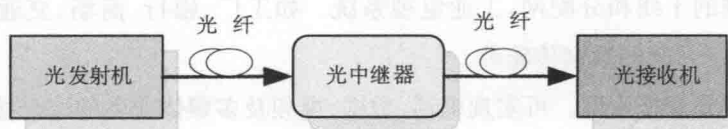


图 1.1.1 光纤通信系统简图

光发射机主要由光源和驱动电路构成,其作用是将从电端机发送过来的电信号,转换成光信号,并注入光纤。光纤的作用是将光信号由一处送到另一处。

光接收机一般由光电检测器和信号处理电路构成,其作用是将光纤送过来的光信号还原成电信号,并送入电接收机。

光中继器的主要作用是延长光信号的传输距离,它分为电光中继器和全光中继器两种。其中,电光中继器是先将经过光纤传输后有损耗和畸变的光信号转换为电信号,即光/电(O/E)转换,然后对其进行再定时、整形和再生出规则的电脉冲,最后转换成光信

号,即电/光(E/O)转换,并重新注入光纤。全光中继器,不需要进行光/电/光(O/E/O)的转换,而是直接对光信号进行放大,一般采用光放大器。光放大器不能对被放大信号进行再定时、整形和再生,而且在放大光信号的同时,也放大了噪声。因此,一般连续应用几个光放大器以后,需要用一个光电中继器对光信号进行再定时、整形和再生。

1.1.2 光纤传输的优点

与铜线相比,光纤传输最主要的优点是:

①传输距离长。一般而言,信号的传输距离与信号在线路上的损耗成反比。光纤的损耗目前已经下降至 0.15dB/km ,这样,光纤传输系统中最大的全光中继距离可达 200km 。如果采用光放大器,系统的无需电光中继距离可达 600km 以上。

②信息容量大。一般而言,通信的容量与载波频率成正比。在光纤的低损耗窗口传输的光载波频率约为 10^{14}Hz ,这样,光纤的带宽可达到 THz (太赫兹)量级。目前利用的中心波长为 1310nm 和 1550nm 两个窗口的总带宽为 20THz 左右。如果消除了光纤氢氧根(OH^-)吸收峰,可使用的波长范围从 1100nm 到 1700nm ,总带宽可达到 140THz 。

此外,光纤传输的优点还有尺寸小、重量轻,便于运输和铺设;抗电磁干扰能力强;制作光纤的原材料二氧化硅(SiO_2)取之不尽,用之不竭。

1.1.3 光纤通信的应用

光纤既可传输数字信号,也可传输模拟信号,已经广泛应用于通信网、广播电视网、计算机网络,以及其他数据传输系统中。概括如下:

- 通信网。包括全球通信网,各国公共通信网,各种专用通信网等。
- 计算机网络和广域网。如光纤以太网,互联网路由器之间的光纤高速传输链路等。
- 有线电视的干线和分配网,工业电视系统。如工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控,自动控制系统的数据传输等。
- 综合业务光纤接入网。可实现电话、数据、视频及多媒体业务的综合接入。

1.2 光纤通信的发展历程

光通信是利用光波作为载波来传递信息的通信方式。

早在 3000 多年前,我国古人就利用“烽火台”的烟火来传输敌人入侵信息,这可看成是最早的光通信。但是,由于光在大气中传输易受天气影响,以及有不能穿过障碍物等问题,直到 20 世纪 60 年代激光器出现前,光通信没有重大发展。

1950 年,人们开始对光纤作为光的传输介质进行研究,1951 年发明了医用光纤,将其用于胃镜中的导光介质。当时光纤的损耗达 1000dB/km ,显然这时的光纤不能作为通信的传输介质。

1966年,被荣称为“光纤之父”的中国人高锟^①指出,光纤的高损耗是由于其材料中杂质吸收产生的,如果将材料中金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下,光纤的损耗可降到10dB/km,如果再改进制作工艺,提高材料的均匀性,则可进一步降低损耗,这时这种低损耗的光纤就可用于信息传输。1970年,美国康宁公司按照高锟的思路,研制出损耗为20dB/km的石英光纤,1972年他们将光纤的损耗降低到4dB/km;1973年,美国贝尔实验室研制的光纤损耗达到2.5dB/km;1976年日本电报电话公司(NTT)研制的光纤损耗达到0.47dB/km;到20世纪80年代,单模



光纤之父——高锟

光纤的损耗已经降低到0.2dB/km。目前,G.654型号的光纤损耗仅为0.151dB/km,接近石英光纤损耗的理论极限。

1970年,在研制出低损耗光纤的同一年,贝尔实验室研制成功了可以在常温下连续工作的半导体激光器,它具有体积小、重量轻、功耗低、效率高等优点,是光纤通信的理想光源。低损耗光纤和半导体激光器的同时研制成功,是光纤通信发展史上的重要里程碑,1970年也因此被公认为是光纤通信的元年。从此,光纤通信开始飞速发展。1976年,世界上第一条传输速率为44.7Mbps,传输距离为10km的光纤通信系统在美国亚特兰大顺利完成现场实验。

20世纪80年代,为了进一步降低光纤损耗,获得更大带宽,光纤通信经历了由850nm的多模光纤通信系统向1300nm的单模光纤通信系统的转变,并向1550nm过渡。这是因为在长波长时,光纤损耗可以降得更低,常规光纤在850nm、1300nm和1500nm的损耗分别可达到2dB/km、0.5dB/km和0.2dB/km。由多模光纤通信系统向单模光纤通信系统的过渡是为了消除光纤的模式色散,获得更大的传输带宽。

20世纪90年代前期,掺铒光纤放大器(EDFA)以其优越的性能开始在光纤通信中应用,这促使密集波分复用(DWDM)技术快速发展。20世纪90年代,基于DWDM+EDFA光纤传输系统和光网络蔚然兴起。DWDM技术为单根光纤提供了不可思议的带宽容量,光纤通信容量每9个月会增加一倍,但成本却降低一半,比电子晶片发展速度的每18个月翻一番还快。按如此疯狂的速度发展,光纤通信注定会在世界范围的电信基础结构中扮演极其重要的角色。

20世纪90年代后期,基于DWDM技术的全光网络引起众多关注。全光网络的主

^① 高锟因在光纤通信领域的开创性贡献获得2009年诺贝尔物理学奖。

要特点是将光交叉连接设备(OXC)和光分插复用设备(OADM)引入网络,在光层实现光信号传输、复用、交换和选路的功能,构成灵活、透明、可动态重构的光网络。全光网络被ITU-T定名为光传送网(OTN)。

进入21世纪,增加网络的智能成为人们新的追求,高度智能化的自动交换光网络(ASON)应运而生。ASON将控制与管理功能分离,通过控制平面的信令、路由和自动发现机制,实现连接的自动建立、维护和删除,通过网络的智能,使服务质量(QoS)保证和流量工程的特征十分明显,可以支持带宽按需分配(BoD)、光虚拟专用网(OVPN)、组播等新业务的需求,成为光网络发展演变的主流方向。与此同时,光标记交换、光突发交换和光分组交换的研究方兴未艾。

目前,随着数据业务爆炸式地增长,通信道路越来越拥挤,光通信是唯一的出路,所以,世界上所有新建的干线通信系统均采用光纤。光纤通信已经广泛应用于长途骨干网(广域网)、城域网和接入网中,成为支撑信息网络的重要柱石之一。

总之,光纤通信的发展,以大容量、高速率和长距离传输为目标。纵观它的发展过程,可以看出其发展趋势:①由短波长向长波长发展;②由多模光纤向单模光纤发展;③由低码速向高码速发展;④由点到点系统向光网络系统发展;⑤配套的新技术、新型器件层出不穷。

本章小结

光纤传输系统由光发射机、光纤、光中继器和光接收机构成。光纤传输的主要优点是传输容量大、传输距离远。光纤通信的发展经历了从短波长向长波长、从多模向单模、从低速向高速、从点对点系统向光网络发展。光纤传输广泛应用于电信网、计算机网和广电网,是三网融合的基础。

关键词

光纤 光纤通信 网络

思考题

1. 简述光纤通信系统的组成及各部分的作用。
2. 光纤传输具有哪些优点?
3. 查阅相关资料,简述当前光纤研究的最新进展。

延伸阅读

关于光纤通信的发展史请参阅:

[美]Jeff Hecht: *City of Light - Story of Fiber Optics*, Oxford University Press, 1997.

第2章 光纤传输理论

■ 本章要点:

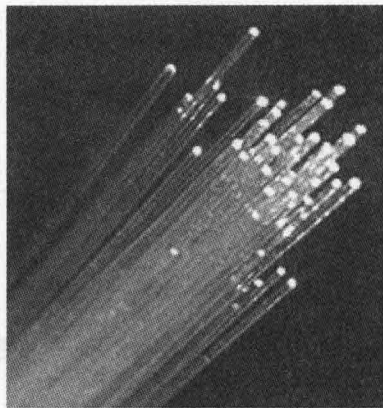
1. 光纤的结构及其种类;
2. 光纤传输的几何光学理论;
3. 光纤传输的物理光学理论。

2.1 光纤的结构和分类

2.1.1 光纤的结构

光纤具有不同的结构形式。目前,通信用的光纤主要采用横截面很小的圆柱体结构形式,它由纤芯、包层和涂敷层构成,如图 2.1.1 所示。光纤中心的圆柱体部分是纤芯,环绕在纤芯外面的同心圆柱层部分是包层。环绕在包层外面的同心圆柱层部分是涂覆层,它是一层软的缓冲层,由环氧树脂或硅橡胶形成。光纤的纤芯和包层这两部分决定了光纤的传输特性。只有纤芯和包层的光纤称为“裸光纤”。

纤芯的主要作用,是用于传输光信号。包层的主要作用,是给纤芯提供一个能产生全反射的界面,同时,它还对纤芯起保护作用。涂敷层的主要作用,是增加光纤的机械强度、柔软性和抗腐蚀性,进一步保护光纤。另外,一般在涂敷层的外面还要再加一层由高强度的合成纤维构成的套塑层,或称二次涂敷层,其主要作用是增加机械强度并满足成缆需要。套塑层大多数由尼龙或聚乙烯等热塑性材料构成。套塑



光纤

层的应用有紧套光纤和松套光纤两种不同结构形式。其中,紧套光纤是在涂敷层与套塑层之间填充一些缓冲材料,形成缓冲层,或称垫层,以减少外应力对光纤的作用;松套光纤是在涂覆层外面套塑料套管,管中填充油膏,光纤可以在套塑管中自由松动。

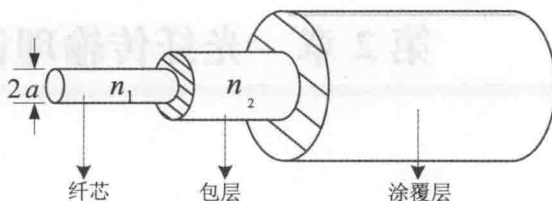


图 2.1.1 光纤的基本结构图

2.1.2 光纤的分类

光纤有多种类型,根据分类的依据不同,同一种光纤可以有不同的名称,同一名称的光纤也可包括多种不同的光纤。

1. 按折射率分布分类

按光纤横截面的折射率分布不同,光纤主要有阶跃光纤和渐变光纤两类。其中,阶跃光纤的折射率为阶跃分布,渐变光纤的折射率为渐变分布,如图 2.1.2 所示。

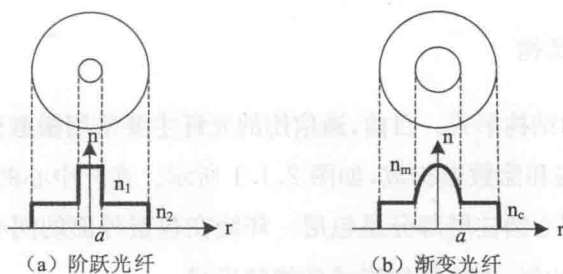


图 2.1.2 阶跃光纤与渐变光纤的结构示意图

此外,光纤折射率的分布还有三角形、双包层、四包层等,这些均是为某些特定用途设计的光纤。

从上面可见,所有的光纤结构,其纤芯的折射率必须大于包层的折射率。这是因为要将光信号束缚在光纤中传输,就必须在纤芯与包层的界面(即芯包面)上满足全反射的条件,即光必须是从光密媒质向光疏密媒质传输。改变光纤折射率的方法,一般是在二氧化硅材料中掺适合的杂质。掺锗和磷可使折射率增加,而掺硼和氟则使折射率降低。

2. 按传输的模式分类

光在光纤中传播时,可能存在多种电磁场分布形式(即模式),也就是存在多个传导

(或传输)模式,简称为导模。按导模的数目不同,光纤可分为单模光纤和多模光纤。

单模光纤,就是只传输最低阶模(即基模)的光纤,它适宜于长距离、大容量的光纤传输系统。多模光纤,就是可传输多个模式的光纤,它适宜于短距离、中容量光纤传输系统。

在光纤通信的波段上,为了满足单模传输条件,石英单模光纤的纤芯直径(简称芯径)一般在 $4\sim 10\mu\text{m}$,多模光纤的芯径一般为 $50\mu\text{m}$,不过这两类光纤包层的直径一般都为 $125\mu\text{m}$ 。

需要说明的是,单模光纤与多模光纤只是一个相对的概念,因为光纤中传输的模式取决于光纤的工作波长、横截面折射率分布和结构参数。

3. 按材料分类

构成光纤的纤芯和包层的材料均为高透明的介质材料,多数是以 SiO_2 材料为主的石英玻璃,还可以采用其他透明的材料,比如塑料等。

按制备光纤的材料来细分,光纤可分为石英光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层光纤、全塑光纤、液芯光纤等。

对石英光纤而言,其纤芯和包层由掺适当的杂质的高纯度 SiO_2 制备。目前这种光纤损耗最低,可靠性最高,应用最广。

对多组分玻璃光纤而言,其纤芯和包层由掺适当的杂质的高纯度钠玻璃制备。这种光纤损耗较低,但可靠性不高。

对塑料包层光纤而言,其纤芯由石英玻璃制备,而包层主要由硅树脂等塑料制备。这种光纤主要用于中短距离的光纤传输系统。

对全塑光纤而言,其纤芯和包层均采用高纯度的透明塑料制备,材料主要有聚苯乙烯(PMMA)塑料和全氟树脂塑料等。这类光纤的损耗大,可靠性也不高,但成本低,适合短距离、低速率光信号传输。

4. 其他分类

光纤除了上面三种分类,还有如下分类。

按在光纤中传输的光信号的波长(即工作波长)范围(即波段)来分,可分为短波长光纤、长波长光纤和超长波长光纤,它们的工作波长范围分别为 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 、 $1.0\sim 1.7\mu\text{m}$ 和大于 $2\mu\text{m}$ 。

按国际电信联盟电信标准化机构(ITU-T)建议文号分类,光纤可分为 G. 651、G. 651、G. 652、G. 655 等型号。

上面所提的光纤均为常规光纤。与常规通信光纤相比,近年出现了多种称为“特种光纤”的新型光纤,如光子晶体光纤、有源光纤、液晶光纤等,本书不予介绍。

2.2 光纤传输的几何光学理论

光是一种电磁波,要严格描述光在光纤中的传输规律,如传输模式、色散特性、传输功率等,需从麦克斯韦方程组出发,求解波动方程。

在分析光在多模光纤中传输时,由于光纤的直径(约 $50\mu\text{m}$ 左右)远大于光的波长 λ (约 $1\mu\text{m}$ 左右),这时可认为光波的波长 $\lambda \rightarrow 0$,可将光波看成是平面波,可用光线代表其传播方向,可将光波在光纤中的传输视为光线在光纤中的传输,这样就可利用几何光学的方法来处理光在光纤中的传播问题,我们把这种分析方法称为光纤传输理论中的“几何光学法”。几何光学法具有物理图像直观、方便、简单等特点,能得到许多有用的结论,特别适合分析多模光纤和平面波导的传输特性。为了简洁起见,本节仅对阶跃型多模光纤进行讨论。

需要指出的是,当光纤的直径小到可与光波的波长相比拟的时候,几何光学法得到的结果误差大,这时就需采用后面将要介绍的波动光学理论来分析光在光纤中的传输规律。

2.2.1 子午光线传输

在几何光学法中,光纤中可传输的光线分为子午光线和斜射光线两种。其中,子午光线是位于子午面(即经过光纤轴的平面)内的光线,斜射光线则是位于非子午面的光线,它不在单一平面内,是在一条类似于螺旋线的路径上传输。尽管光纤中的多数光线为斜射光线,但在获得光纤中射线传播的一般特性时,并不需要分析斜射光线,仅对子午光线的传播进行分析就可达到目的。

子午光线又可分成约束光线和非约束光线两类。其中,约束光线是满足全反射条件的,被约束在纤芯内,沿着光纤轴方向传输的光线;非约束光线是折射到纤芯外面的光线,有时也称为泄漏光线。

图 2.2.1 为光线从空气折射到光纤纤芯的情形。设空气、纤芯和包层的折射率分别为 n_0 ($n_0 = 1$)、 n_1 和 n_2 ,为了满足光在芯包面上产生全反射的条件,要求 $n_1 > n_2$ 。

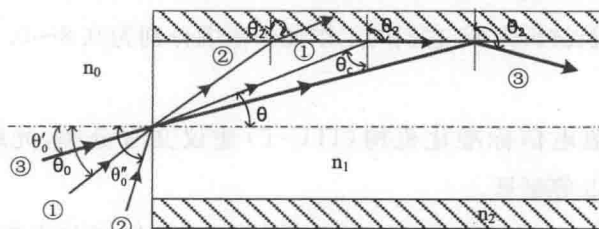


图 2.2.1 子午光线在阶跃光纤中的传输

为了便于后面的分析,我们首先介绍光纤的“相对折射率差”(用 Δ 表示),其定义为 $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ 。如果光纤的 n_1 和 n_2 相差很小, $\Delta \approx (n_1 - n_2)/n_1 \approx (n_1 - n_2)/n_2$,则 Δ 就很小。我们称 Δ 很小的条件为弱导近似条件。在弱导近似条件下的光纤称为弱导光纤。一般通信光纤均为弱导光纤,其 Δ 一般在1%左右。对于弱导光纤中“弱导”的含义可这样理解:由于 $n_1 \approx n_2$,这样全反射的临界角 $\phi_c \approx 90^\circ$ 。只有满足 $\phi_c < \theta < 90^\circ$ 的光才能在光纤中传输,这时入射光波中只有几乎跟光纤轴平行的光波才能在光纤中传输。

为了分析子午光线在光纤中的传输规律,我们将子午光线分为①、②和③三种典型的光线,如图2.2.1所示。

光线①:设光线①在空气与光纤端面的入射角为 θ_0 ,在芯包界面的折射角 θ_2 为 90° ,纤芯中对应的入射角 θ_1 为芯包界面的临界角 θ_c ,由斯奈尔定理得到 $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$,则 $n_0 \sin \theta_0 = \sin \theta_0 = n_1 \sin (90^\circ - \theta_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 。

从以上分析可见,入射到光纤的光线只有入射角小于 θ_0 才是约束光线, θ_0 越大表示光纤聚光能力越强。为了描述光纤的聚光能力,我们下面介绍光纤的“接收角 α ”和“数值孔径”的概念。

光纤的“接收角”(用 α 表示),定义为 $2\theta_0$ 所对应的圆锥角 α 。 α 值越大,表示光纤聚光能力越强,这时光纤与光纤,光纤与光器件间的耦合就容易。

光纤的“数值孔径”(用NA表示),定义为 $NA = \sin \theta_0$ 。在弱导近似条件下,有 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$ 。NA同样是描述光纤的光接收或聚光能力大小,以及计算光源与光纤间的功率耦合效率的一个参数,为无量纲的量,其值通常在0.14~0.5之间。由定义可见,NA越大,接收角 α 越大。可见,要使聚光能力越强, Δ 就要越大,但是大的 Δ 将会导致模式色散大。

光纤②: $\theta_0' > \theta_0$,在芯包界面处,入射角小于临界角,该光线将折射到包层,成为非约束光线,或泄漏光线。

光纤③: $\theta_0' < \theta_0$,在芯包面处,入射角大于临界角,产生全反射,为约束光线。

从上面的分析可见,光线从空气中折射到光纤的纤芯的时候,当入射角 $\theta < \theta_0$ 时,光线将在芯包面上发生全反射,从而能在纤芯中进行传输,为约束光线;当 $\theta \geq \theta_0$ 时,光线将折射到包层,从而泄露掉,为非约束光线。



光纤中的全反射