

十一五

普通高等教育“十一五”规划教材

光纤光学

GUANG XIAN GUANG XUE

刘德明 孙军强 鲁平 严敏 主编

(第二版)



科学出版社

www.sciencep.com

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229；010-64034315；13501151303

内 容 简 介

本书较系统地论述了光纤光学的基本理论及光纤的传输特性与主要性能参数的测试技术，介绍了一些正在发展的有源与无源光纤器件，并阐述了光纤在通信和传感方面的应用。全书内容全面、系统，理论叙述深入浅出，注重介绍各种实用技术和研究成果，每章后还附有习题与参考文献，以供读者复习与进一步研究之用。

本书可作为光电子技术、信息与通信技术等专业本科生教材和相近专业研究生的参考书，也可供有关工程技术人员、科研人员和教师阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光学/刘德明等主编. —2版. —北京: 科学出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-03-021366-2

I. 光… II. 刘… III. 纤维光学—高等学校—教材 IV. TN25

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第032138号

责任编辑: 张颖兵 / 责任校对: 梅莹

责任印制: 董艳辉 / 封面设计: 苏波

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第二版 开本: B5(720×1000)

2008年3月第一次印刷 印张: 17 1/2

印数: 1—5 000 字数: 341 000

定价: 28.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

始自 20 世纪 80 年代末的光纤通信技术的高速发展,极大地推动了“光纤光学”的学科发展。1992 年,原电子工业部教材办公室组织电子物理与器件编审委员会激光与红外编审小组进行征稿、评选,推荐由刘德明教授等主持编写的《光纤光学》作为高等学校工科电子类规划教材出版。同时,“光纤光学”这门课程也成为光学工程、光信息科学与技术、光电信息工程、光电子技术、通信技术、测控技术等专业的一门重要的专业基础课。

本教材是《光纤光学》的修订版,在作者多年从事光纤光学教学与科研工作的基础上,根据修订编写大纲作了内容的精选、更新和充实。既注重了系统、深入的理论描述,同时也力求反映光纤技术研究领域的最新成果,使之不但可作为工科大学本科生和研究生教材,而且也可作为有关领域技术人员参考书。

本教材参考教学时数为 50 学时,重点讲授光纤光学的理论与技术,内容包括光纤传输的基本理论,光纤性能参数及测试技术,光纤有源与无源器件,光纤连接与耦合技术、光子晶体光纤、特种光纤与光缆以及光纤应用技术。与第一版相比,由刘德明、孙军强和鲁平分别对原书第一章“光纤光学的基本理论”、第三章“光纤激光器与光纤放大器”小节和第七章“光纤技术的主要应用”及第八章“特种光纤及应用”等章节内容进行了重新改写;由严敏和孙军强分别编写了“光子晶体光纤”一章和“光纤光栅”及“光隔离器与环行器”两节内容;删除了“光纤非线性”和“光纤传感技术”两章内容;并对其他各章节内容进行了全面修订。全书最后由刘德明统编定稿,并由刘海荣审稿。

在本教材的编写过程中,童维军、刘陈、柯昌剑等多位研究生在资料收集整理和文字图稿编辑与校对方面的做了大量工作,还得到了科学出版社普通高等教育“十一五”规划教材以及华中科技大学“教学质量工程”精品教材项目支持,在此一并表示最诚挚的感谢。同时,也要衷心感谢本书第一版作者向清女士与黄德修教授,他们的前期贡献为本书修订奠定了良好基础。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,热切希望读者指正。

编 者

2008 年 1 月 28 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 光纤及其分类	2
1.3 光纤的制备工艺	5
1.4 光纤光学的发展	8
习题与思考	8
参考文献	9
第 2 章 光纤光学的基本方程	10
2.1 麦克斯韦方程与亥姆霍兹方程	11
2.2 程函方程与射线方程	13
2.3 波导场方程	15
2.4 模式及其基本性质	16
习题与思考	21
参考文献	21
第 3 章 阶跃折射率分布光纤	22
3.1 几何光学方法分析	22
3.2 波导场方程及导模本征解	24
3.3 本征值方程	26
3.4 模式分析	27
3.5 弱导光纤与线偏振模	35
习题与思考	44
参考文献	45
第 4 章 渐变折射率分布光纤	46
4.1 几何光学方法分析	46
4.2 波导场方程及模式性质	53
4.3 平方律折射率分布光纤中的导模场解	56
4.4 任意折射率分布光纤中的导模场解	58
4.5 单模光纤中的导模场解	64

习题与思考	78
参考文献	79
第 5 章 光纤的特征参数与测试技术	80
5.1 光纤的损耗	80
5.2 光纤的色散与带宽	89
5.3 单模光纤模场半径	101
5.4 单模光纤截止波长	103
5.5 光纤参数测试技术	104
习题与思考	119
参考文献	121
第 6 章 光纤无源及有源器件	122
6.1 自聚焦透镜	122
6.2 光纤定向耦合器	132
6.3 光隔离器与环行器	139
6.4 光纤光栅	144
6.5 光纤放大器与光纤激光器	156
习题与思考	178
参考文献	180
第 7 章 光纤的连接与耦合	181
7.1 光纤-光纤的连接损耗	181
7.2 光纤固定接续	188
7.3 光纤活动连接器	195
7.4 光纤-光源的耦合	197
7.5 光纤-光无源器件的耦合	206
习题与思考	210
参考文献	211
第 8 章 光子晶体光纤	213
8.1 光子晶体光纤的基本原理	213
8.2 光子晶体光纤的基本理论	218
8.3 光子晶体光纤的制备	223
8.4 光子晶体光纤的应用技术	225
习题与思考	231
参考文献	231

第 9 章 特种光纤与光缆	234
9.1 色散位移与色散平坦光纤	234
9.2 色散补偿光纤	236
9.3 全波光纤	237
9.4 保偏光纤	237
9.5 红外光纤	238
9.6 衰减场光纤	241
9.7 照明光纤	244
9.8 其他特种光纤	245
9.9 光纤成缆技术	249
习题与思考	254
参考文献	254
第 10 章 光纤应用技术	255
10.1 光纤通信	255
10.2 光纤传感	259
10.3 光纤医疗	264
10.4 光纤传光	269
习题与思考	270
参考文献	270

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

虽然早在 1854 年英国的廷达尔(Tyndall)就观察到光在水与空气分界面上作全反射以致光随水流而弯曲的现象,并由美国的哈纳尔(Hanael)和德国的拉姆(Lamm)于 1929 年和 1930 年先后拉制出石英光纤且用于光线和图像的短距离传输,但在 1966 年高锟博士发表他的著名论文《光频介质纤维表面波导》^[1]之前,在光纤波导理论与应用技术方面的研究进展相当缓慢。其中最主要的障碍在于当时的光纤损耗太大,达到几百甚至一千多分贝每千米。很明显,这种光纤对于通信是毫无用处的。

1966 年对于光纤的发展具有划时代的历史意义。这一年高锟博士在他的论文中首次明确提出,通过改进制备工艺,减少原材料杂质,可使石英光纤的损耗大大下降,并有可能拉制出损耗低于 20 dB/km 的光纤,从而使光纤可用于通信之中。这是一个富有创造性的科学论断,激励了全世界许多重要实验室的科学家从事进一步研究。

1970 年,美国康宁玻璃公司(Corning Glass Co.)率先将高锟博士的科学预言变为现实,研制成功在 0.6328 μm 波长下损耗为 20 dB/km 的石英光纤,取得了重要的技术突破。由于同年由前苏联和美国所研制的双异质结半导体激光器实现了室温连续工作,为光纤通信提供了一种实用光源,这就使得光纤通信步入了一个迅猛发展的时期。因此,1970 年成为光纤通信发展史上的一个重要里程碑。

在此后短短的 20 多年时间里,光纤的损耗就由 1000 dB/km 下降到 0.16 dB/km,20 世纪 80 年代末期掺铒光纤放大器(EDFA)的发明与应用,使光纤通信在世界范围内形成了一个充满活力的新兴产业。在通信基础设施比较薄弱的中国,光纤通信技术的发展与应用更为迅猛。

光纤应用于通信系统,具有许多金属导线和同轴电缆所无法比拟的优越性:① 光纤具有极宽的传输带宽,其通信容量可提高一到两个数量级;② 光纤具有极低的损耗,可使无中继通信距离更长;③ 光纤中传输的是光波信号,不易被窃听,具有很好的保密性,且无电缆短路问题,还可以抗电磁干扰;④ 光纤体积小、重量轻、韧性好,易于铺设,便于实际工程应用,尤其适于航空航天通信。此外,光纤材料储藏丰富,取代电缆可节约大量宝贵的金属材料,且光纤的成本(尤其是话路成本)越来越低,用光纤代替金属导线传输信息已经成为一个必然的发展趋势。目

前,在中国已经实现了骨干网及城域网的“光纤化”,而且接入网的“光纤化”也正在逐步实施,其重要标志是各运营商开始着手实施“光纤到户”(FTTH)计划,以期实现“光进铜退”的战略目标。

与光纤通信几乎并驾齐驱的另一方面的研究课题是光纤传感器。光纤在这方面的应用是利用了光纤中传输光波的强度、相位、偏振特性以及光纤散射、弯曲损耗和其他传输特性对于外界物理参数的变化异常敏感,从而可制成各种性能优越的光纤传感器。目前已研制出位移、振动、温度、压力、应变、应力、电流、电压、电场、磁场、流量、浓度等 70 多种光纤传感器,其中有些已有商品出售。光纤传感技术的研究开发也正在成为继光纤通信技术之后光纤光学应用的又一大热点。

此外,在光纤光学信息处理以及照明与显示光纤、医用内窥镜光纤、光纤面板、激光光纤、激光手术光纤、电力输送光纤等非通信应用方面,光纤技术也具有极大的吸引力。在这方面尚有许多有待深入研究的课题。

1.2 光纤及其分类

光纤光学是一门研究光波在光纤中传播特性的科学。光纤是一种介质圆柱光波导,它能够约束并导引光波在其内部或其表面附近沿其轴线方向向前传播,而在光纤中传播的光波被称之为“导波光”。

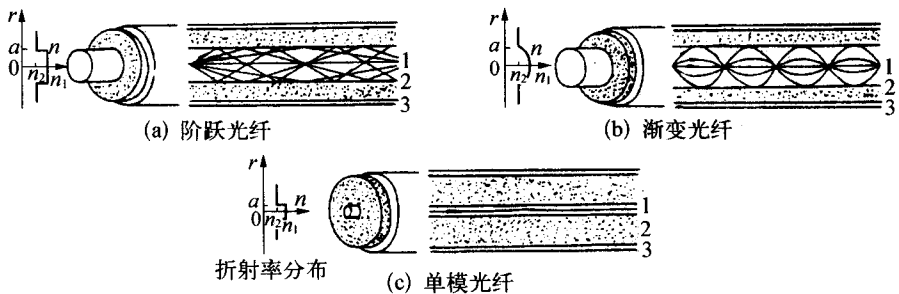


图 1.1 光纤的结构

1—纤芯; 2—包层; 3—套层

光纤的基本结构如图 1.1 所示,由纤芯、包层和套层构成。纤芯由高度透明的介质材料(如石英玻璃等)经过严格的工艺制成,是光波的传播介质;包层是一层折射率稍低于纤芯折射率的介质材料,它一方面与纤芯一起构成光波导,另一方面也保护纤壁不受污染或损坏;套层一般由高损耗的柔软材料(如塑料等)制成,起着增强机械性能,保护光纤的作用,同时也阻止纤芯光功率串入邻近光纤线路,抑制

串扰。

一般地,光纤可分为两大类:一类是通信用光纤;另一类是非通信用光纤。前者主要用于各种光纤通信系统之中;后者则在光纤传感、光纤信号处理、光纤测量及各种常规光学系统中广为应用。对于通信用光纤,在系统工作波长处应满足低损耗、宽传输带宽(大容量)以及与系统元器件(如光源、探测器和光无源器件)之间的高效率耦合等要求。同时,也要求光纤具有良好的机械稳定性、低廉的成本和抗恶劣环境的性能。

非通信用光纤通常要求具有特殊的性能(例如高双折射、物理敏感性强以及具有非线性等),而在其他方面的要求则相应降低。

根据光纤的结构、材料、折射率分布和传播特性可将其分为如下几种类型。

1. 阶跃折射率分布光纤(SIOF)与渐变折射率分布光纤(GIOF)

两种光纤的折射率分布如图 1.1(a)、(b)所示,其中 SIOF 中纤芯各处折射率均等于 n_1 ,包层各处的折射率均等于 n_2 ,且有 $n_1 > n_2$,在纤芯与包层分界面处折射率发生突变或阶跃变化。其折射率分布形式为^[2]

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & (0 \leq r \leq a, \text{纤芯中}) \\ n_2 & (r > a, \text{包层中}) \end{cases} \quad (1.1)$$

在 GIOF 中,纤芯中的折射率是变化的,在轴线处最高(n_1),沿径向则随半径 r 的增大而减小,在包层与纤芯分界面处最低(n_2),在包层中折射率一般恒定不变。多数 GIOF 遵从 g 型折射率分布:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}} & (0 \leq r \leq a) \\ n_2 & (r > a) \end{cases} \quad (1.2)$$

式中, a 为纤芯半径; Δ 为纤芯轴线折射率与包层折射率的相对差(简称为“相对折射率差”),

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

g 是折射率分布参数,它决定了折射率分布曲线的形状。当 $g \rightarrow \infty$ 时,为 SIOF;当 $g = 2$ 时为平方律折射率分布或抛物线折射率分布光纤,又称为“自聚焦光纤”;当 $g = 1$ 时为三角折射率分布光纤。

2. 单模、双模与多模光纤

模式是光纤传播的一种极为重要的特性,其严格的意义将在第 2 章中讨论。

这里,可直观地将光纤的模式看成光场在光纤截面上的一种分布图。当光纤中只允许一个模式传播时,就称之为单模光纤;当光纤中允许两个或更多的模式传播时,就称之为双模光纤或多模光纤。在光纤中允许存在的模式数目可由下式来估算:

$$M = \frac{g}{2(g+2)} V^2 \quad (1.4)$$

式中, V 称为光纤的归一化频率,是一个反映光纤结构特征的重要参数,定义为

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.5)$$

其中, k_0 是真空中光波波数; λ_0 是真空中光波的波长。

当 V 很大时,光纤中可以传输几十甚至几百个模式;当 V 值较小时,则只允许少数几个或单个模式传播。阶跃单模光纤确切的判据是

$$V < 2.405 \quad (1.6)$$

这时,在光纤中只有一个模式传播,称之为主模或基模。

很显然,当波长 λ_0 和折射率参数确定之后,光纤中允许传播的数目就与纤芯半径 a 有关。因此,多模光纤芯径较粗(50~60 μm),而单模光纤芯径就很细(5~10 μm ,与入射波长 λ_0 有关)。

3. 石英、塑料与红外光纤

石英玻璃光纤是采用高度透明的光学玻璃为材料制成的光纤,其主要优点是严格的提纯工艺可以减少原材料中的 Cr^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 等过渡金属元素离子以及 OH^- 离子,获得损耗极低的光纤。目前已研制出在2.25 μm 波长处损耗低达0.16 dB/km的单模光纤。

塑料光纤是采用高度透明的光学塑料为材料制成的光纤,具有重量轻(为石英光纤的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$),韧性好(直径2 mm仍可自由弯曲不断裂,而同样粗的石英光纤实际上已成为玻璃棒了),工艺简便,成本低廉以及在远红外和紫外波段光波透过率优于石英玻璃等诸多优点,在导弹制导、人造卫星、宇宙航行等领域都有重要的应用。

红外光纤是利用红外材料(如氟化物玻璃和硫属化合物玻璃等)制作的光纤。这种光纤具有极低的理论损耗极限(10^{-3} dB/km),因此在长距离光纤通信,尤其是跨洋通信中具有极其诱人的前景。同时,红外光纤透过区域可延伸到几微米甚至十几微米,因此在红外探测与传输方面具有石英光纤无法替代的作用。不过,由于工艺和技术上的原因,目前红外光纤的损耗还相当高(每千米几十至几百分贝),还

需要进行更深入的理论与实验研究方可达到实用。

4. 特种光纤

特种光纤是指具有某种特殊性能的光纤,它包括:

(1) 保偏(单偏振)光纤。通过波导结构的特殊设计,使在纤芯中传播的基模只沿一个方向偏振,且在传播过程中保持偏振方向不变。

(2) 有源光纤。利用具有增益的激活材料制作纤芯,在外光源泵浦下可输出激光(光纤激光器)或对外来微弱光信号进行直接光放大(光纤放大器)。

(3) 双包层或多包层光纤。这种光纤具有模场半径大,弯曲损耗小的特点,且在很宽的波长范围内均具有较低的色散,在波分复用光纤通信系统中具有重要应用。

(4) 增敏光纤。通过增强光纤的磁光、电光或温度敏感效应,使光纤的特征参数对外界物理量(如磁场、电流、温度、压力、转速等)的敏感性增强,从而构成各种灵敏的光纤传感系统。

(5) 特殊涂层光纤。对于应用于恶劣环境中的光纤,其涂层材料不能采用普通的石英类或硅胶类材料,而必须采用一些硬质材料(如 SiN_2 或金属等),以增强光纤的抗压或耐高温、耐酸碱等性能。

(6) 耐辐射光纤。当光纤工作于大剂量核辐射环境下时,普通的石英玻璃会因染色而失去透光能力。为此,采用耐辐射玻璃材料(如含铈玻璃)来制作光纤的纤芯和包层,这样的光纤就可以在核辐射环境下正常工作。

(7) 发光光纤。采用磷光体、发光晶体以及其他发光材料制成的光纤,可用于探测 X 射线、高能粒子以及其他带电粒子。

1.3 光纤的制备工艺

为获得低损耗的石英光纤,需要解决两个关键的技术难题:① 超高纯度的光纤原材料(主要是 SiO_2)的获取,例如要求其中的重金属(Fe , Cu , Ni , Cr , Mn)离子含量不能超过十亿分之一,氢氧根(OH^-)含量不能超过 10^{-8} ;② 超高精度的光纤拉丝尺寸控制,控制精度要求达到 $1\ \mu\text{m}$ 或者更小。对于渐变折射率分布光纤,还要求高精度的折射率参数控制。

光纤原材料的提纯采用“加温-蒸馏-冷凝”工艺,非常类似于酿酒工艺。当石英沙子原料被加温到 2230°C 时,其中的石英(SiO_2)成分先被汽化然后再在 2000°C 的温度冷凝为液体,通过这种工艺使得纯石英与沸点更高的重金属离子分离,从而获取高纯度的石英原材料。杂质离子的分离需要将石英原料加温到更高温度(达到 7000°C),这时所有杂质化合物都将被分解。通过“加温-蒸馏-冷凝”工艺获得的

石英原料纯度可以达到 10^{-6} 。更高的纯度还要依赖光纤制备工艺来实现。

高质量的光纤通常需采用“预制棒”拉丝工艺来制备。“预制棒”工艺包括改进的化学气相沉积(modified chemical vapour deposition, MCVD)法,等离子体化学气相沉积(plasma chemical vapour deposition, PCVD)法,管外气相沉积(outside vapour deposition, OVD)法以及气相轴向沉积(vapour-phase axial deposition, VAD)法。

MCVD 工艺的化学反应机理为高温氧化。MCVD 工艺是由沉积和成棒两个工艺步骤组成。沉积是获得设计要求的光纤芯折射率分布。如图 1.2 所示,以 SiCl_4 为原材料、 GeCl_4 、 PoCl_3 及 BCl_3 等为掺杂材料,以氢氧焰为热源,在高纯度石英玻璃管内进行气相沉积。在石英玻璃管内,高纯度石英原料气体在高温区发生化合反应:

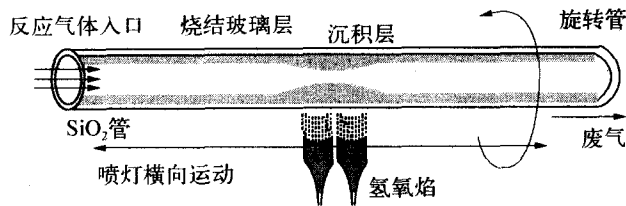
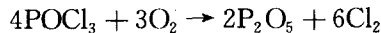


图 1.2 MCVD 预制棒工艺

高纯度的石英原材料以及掺杂材料就在氢氧焰加热部位的石英管内壁沉积为“光纤预制棒”材料,其折射率包络结构与光纤完全一致,所不同的仅仅只是直径不一样。随后的成棒工艺是将已沉积好的空心高纯石英玻璃管熔缩成一根实心的光纤预制棒芯棒。

PCVD 与 MCVD 的工艺一样,也是在高纯石英玻璃管内壁进行高温氧化反应和气相沉积。所不同之处是热源和反应机理:PCVD 工艺用的热源是微波,其反应机理为微波加热产生等离子使气体电离。离子重新结合时释放出的热能熔化反应物形成透明的石英玻璃沉积薄层。PCVD 方法可以更为准确地控制光纤的折射率分布,而且沉积效率高、沉积速度快,有利于消除 SiO_2 层沉积过程中的微观不均匀性,从而大大降低光纤中散射造成的本征损耗,适合制备复杂折射率剖面的光纤。

MCVD 和 PCVD 工艺的预置棒都是在石英管内沉积,因此预置棒的尺寸受到

石英玻璃管直径的限制。当需要制备较大直径的预制棒时,就需要用到 OVD 工艺。如图 1.3 所示,其原料在氢氧焰中水解生成 SiO_2 微粉,然后经喷灯喷出,沉积在由石英、石墨或氧化铝材料制成的“母棒”外表面,经过多次沉积,去掉母棒,再将中空的预制棒在高温下脱水,烧结成透明的实心玻璃棒,即为光纤预制棒。

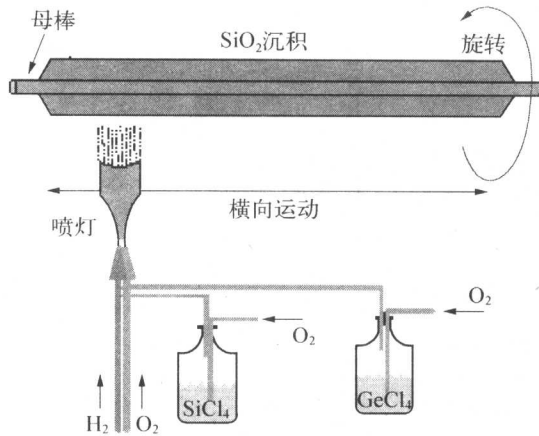


图 1.3 OVD 预制棒工艺

VAD(气相轴向沉积法)工作原理与 OVD 相同,不同之处预制棒的生长方向是沿母棒轴向垂直生长的,如图 1.4 所示。VAD 的重要特点是可以连续生产,适合制造更大型号的预制棒,从而可以拉制更长的连续光纤。

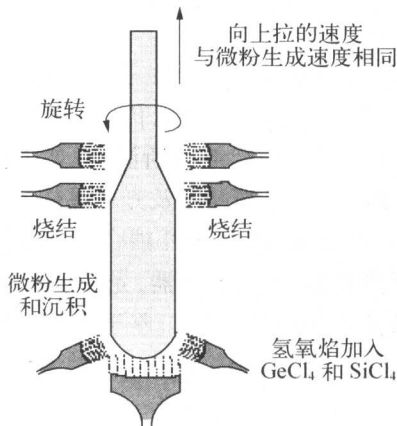


图 1.4 VAD 预制棒工艺

在预制棒工艺之后就是光纤拉丝、套塑和成缆(光缆)等工艺。拉丝工艺设备构成如图 1.5 所示,光纤预制棒(直径 10~25 mm)的端部被电加热炉加热到

1850~2000℃,形成熔融状态;然后利用重力的作用并适当加一点牵引力来进行光纤拉丝,同时利用激光直径仪精密监测光纤的包层外径并通过控制拉丝速度来使光纤包层直径保持为 125 μm ;然后再利用丙烯酸酯材料进行涂敷至 250 μm ,即获得所谓的“裸光纤”,也可以进一步涂覆至 900 μm 。制成的光纤缠绕在直径为 20 cm 左右的光纤卷盘上。

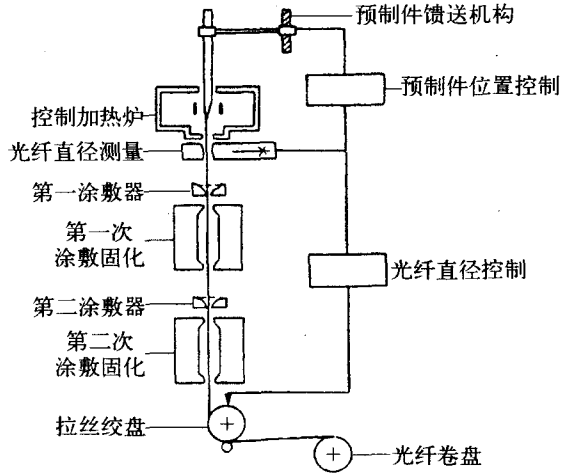


图 1.5 光纤拉制工艺

1.4 光纤光学的发展

伴随着光纤技术日益广泛的应用,光纤光学已经愈来愈成为光学与光电子学科领域的一门重要的基础课程。光纤在通信、传感、信息处理以及在工业和医疗等领域的应用技术的发展,催生新型光纤的不断涌现,如色散位移光纤、色散平坦光纤、色散补偿光纤、全波光纤、双包层光纤以及光子晶体光纤等。同时,人们也发展了多种光纤光学器件,例如自聚焦透镜、光纤耦合器、光纤光栅、光纤起偏器、光纤退偏器、光纤调制器、光纤激光器、光纤放大器、光纤衰减器、光纤隔离器与环形器、光纤色散补偿器以及各种光纤传感器等等。鉴于本书篇幅的局限性,有些内容未涉及,感兴趣的读者可以进一步阅读本章给出的相关参考文献^[3-12]。

习题与思考

- 1.1 构成光纤波导的必要条件是什么?
- 1.2 光纤的包层主要起什么作用? 光纤去掉包层其导光特性有何改变?

- 1.3 PCVD 工艺与 MCVD 工艺相比,主要优点是什么?
- 1.4 OVD 与 AVD 工艺的主要特点是什么?
- 1.5 “单模光波导”中总模式数目是多少?
- 1.6 举例说明“对称波导”基模不截止。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Proc. IEE, 1966, 113: 1151
- [2] 大越孝敬. 光学纤维基础. 刘时衡,译. 北京:人民邮电出版社,1980
- [3] 张宝富. 全光网络. 北京:人民邮电出版社,2002
- [4] 徐荣,龚倩. 高速宽带光互联网技术. 北京:人民邮电出版社,2002
- [5] 任海兰. 光传送网设备. 北京:北京邮电大学出版社,2004
- [6] 王兆宏. 集成光学. 北京:科学出版社,2005
- [7] 任海兰,刘德明. 光通信信号处理. 北京:电子工业出版社,2006
- [8] 胡健,刘德明,黄德修. 色散管理孤子的研究. 光电子技术与信息,2004(4)
- [9] Kim J H, John Y M, Byun Y T. All-optical XOR gate using semiconductor optical amplifiers without additional input beam. IEEE Photonics Technology Letters, 2002(10)
- [10] Fjelde T, Klocha, Wolfson D, et al. Novel scheme for simple label swapping employing XOR logic in an integrated interferometric wavelength converter. IEEE Photonics Technology Letters, 2001(7)
- [11] Fjelde T, Wolfson D, Kloch A, et al. Demonstration of 20 Gbit/ s all optical logic XOR in integrated SOA-based interferometric wavelength converter. Electronics Letters, 2000(22)
- [12] Ratnam J. Optical CDMA in broadband communication scope and applications. Journal of Optical Communications, 2002(7)

第 2 章 光纤光学的基本方程

迄今为止,已经提出了许多种研究光纤波导的理论。这里只介绍其中最基本的两种,即光线理论和波动理论。

当光纤芯径远大于光波波长 λ_0 时,可近似认为 $\lambda_0 \rightarrow 0$,从而将光波近似看成由一根根光线所构成。因此,可采用几何光学的方法来分析光线的入射、传播(轨迹)以及时延(色散)和光强分布等特性。这种分析方法即为光线理论。

光线理论的主要优点是简单直观,在分析芯径较粗的多模光纤时可以得到较精确的结果;但由于采用了几何光学近似,光线理论不能够解释诸如模式分布、包层模、模式耦合以及光场分布等现象。而且,当不满足 λ_0 远小于芯径的近似条件时(如对于单模光纤),光线理论的分析结果存在很大的误差。

波动理论是一种更为严格的分析方法,其严格性在于:① 从光波的本质特性——电磁波出发,通过求解电磁波所遵从的麦克斯韦方程,导出电磁场的分布,具有理论上的严谨性;② 未作任何前提近似,因此适用于各种折射率分布的单模光纤和多模光纤。

两种理论分析问题的基本思路如图 2.1 所示。

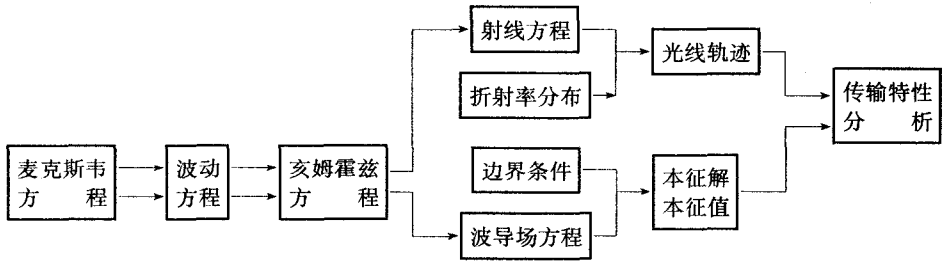


图 2.1 光线理论与波动理论分析思路

光纤光学研究的目的是要通过通过对光纤传输特性的理论分析,为光纤技术的应用奠定基础。本书将从光纤光学的基本方程出发,首先利用光线理论来分析光在光纤中的传播特性,并对光纤中的模式及其基本性质进行初步讨论;然后用波动理论来进一步深入分析光纤中的导波场的特性,依据光纤波导的边界条件求解波导场方程,导出本征值方程,并根据导模的截止和远离截止条件对光纤中的模式特性进行详细讨论。

与其他任何光波导研究一样,光纤光的理论研究所涉及的基本问题是光波

如何进入光纤以及光波在光纤中如何传播? 具体讲, 主要包括以下几个方面的内容: ① 光纤模式的激励(或光的入射); ② 光纤中的模式分布(或光线传播轨迹); ③ 模式的传播速度(或光线的时延); ④ 模式沿光纤横截面场分布; ⑤ 光信号的传输损耗; ⑥ 光信号的畸变; ⑦ 模式的偏振特性; ⑧ 模式的耦合。

读者应重点掌握光纤光学的基本概念、思路、分析方法以及所得出的重要结论及其物理内涵, 而不必拘泥于繁杂的数学运算之中。

2.1 麦克斯韦方程与亥姆霍兹方程

光纤是一种介质光波导, 这种波导具有如下特点: ① 无传导电流; ② 无自由电荷; ③ 线性各向同性。在其中传播的电磁波遵从下列麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

式中, $\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{B}$ 分别为电场强度、电位移矢量、磁场强度及磁感应矢量。 ∇ 为梯度算符, 在直角坐标系与圆柱坐标系中分别为

$$\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\phi \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \phi} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.3)$$

其中, e_x, e_y, e_z 是沿 x, y, z 方向的单位矢量; e_r 与 e_ϕ 是沿径向与角向的单位矢量。

电位移矢量 \mathbf{D} 与电场强度 \mathbf{E} 以及磁场强度 \mathbf{H} 与磁感应矢量 \mathbf{B} 之间由下列关系式相联系:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

式中, μ 是材料的磁导率, 在真空中为 μ_0 , 对于非磁性材料一般有 $\mu = \mu_0$, 为常数; ϵ 是材料的介电常数, 在真空中为 ϵ_0 , 一般物体中 ϵ 是空间坐标的函数为 $\epsilon(x, y, z)$ 或 $\epsilon(r, \phi, z)$ 。 ϵ 与材料折射率 n 的关系为

$$\epsilon = \epsilon_0 n^2 \quad (2.6)$$