

纤维光学

原理及实验研究

朱世国
付克祥
编 著

四川大学出版社

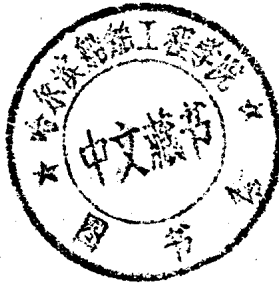
358275

7N21
乙90

纤维光学

—原理及实验研究

朱世国 付克祥 编著



四川大学出版社

1992年·成都

(川)新登字 014 号

责任编辑:杨守智

封面设计:冯先洁

版式设计:杨守智

DX10/14

纤维光学

—原理及实验研究

朱世国 付克祥 编著

四川大学出版社出版发行 (成都市望江路 29 号)

四川省新华书店经销 成都市前进印刷厂激光照排印刷

850×1168 毫米 32 开本 印张 9.25 字数 220 千字

1992 年 4 月第一版

1992 年 4 月第一次印刷

印数:0001—2000 册

ISBN 7-5614-0433-6/O·57

定价:5.00 元

前 言

纤维光学是研究光在光导纤维中传播规律的一门新兴学科,它是现代光学的一个重要分支。随着光导纤维在邮电通讯、传感测量、图象传输等技术领域中应用的发展,它已引起这些领域中愈来愈多的科技工作者的重视。他们从不同的角度关心这门学科的发展,并在理论和实验技术上为促进这门学科的发展作了大量工作,也为培养学生撰写了许多有关的专著和教材。这是值得庆幸的事!然而,在纤维光学方面有许多问题(无论基础理论或应用)也是值得物理学工作者,尤其是光学工作者进行深入的研究。编写本书的目的,就是希望物理学界有更多的同行来关心这门学科的发展和建设,并把“纤维光学”纳入培养物理类学生的教学计划,使他们今后能够适应光纤技术不断发展的需要。

基于以上想法,与现已出版的国内外的光纤通讯基础一类的书籍不同,本书着重论述纤维光学的基本理论和实验研究方法。对基本理论方面的论述,力求物理图象清楚、论证严密;在分析方法上,引入了模式场的圆偏振分量的分析方法,这对于光纤模式的理论和实验研究都是一种有力的分析工具;在第三章中论述了作为新型光学元件的自聚焦透镜的聚焦性和成象原理。第八章论述了利用空间滤波技术对光纤模式的激励和检测以及光纤模式的辐射理论。

本书可作物理类各专业本科生、研究生“纤维光学”课的教材,也可供从事光纤通讯、光纤传感的科技人员参考。

本书是根据作者为川大物理系光学专业学生开设的《纤维光

学导论》选修课的讲义、近年的科研论文以及近期收集的国内、外资料编写而成。全书共分九章,付克祥编写第七章,朱世国编著其余各章并统稿全书。由于作者水平有限,在某些问题的认识上难免有不妥之处,望读者批评指正。

朱世国

1991. 6

于成都

目 录

第一章 绪论

- § 1-1 概况 (1)
- § 1-2 光纤的分类 (3)
- § 1-3 光导纤维的制造方法 (5)
- § 1-4 本书的主要内容 (10)

第二章 阶跃型光纤的射线分析

- § 2-1 阶跃型光纤中的光射线 (12)
- § 2-2 子午射线传播特性的分析 (14)
- § 2-3 偏射线传播特性的分析 (17)
- § 2-4 阶跃型多模光纤的射线色散 (27)

第三章 梯度型光纤的射线分析

- § 3-1 概述 (30)
- § 3-2 程函方程 (31)
- § 3-3 射线方程 (34)
- § 3-4 梯度型光纤中子午射线的几何形态 (36)
- § 3-5 梯度型光纤中偏射线的几何形态 (38)
- § 3-6 梯度型光纤中的射线分类 (44)
- § 3-7 梯度型光纤的自聚焦和成象特性 (48)

第四章 阶跃型光纤的电磁理论分析

- § 4-1 电磁场的基本方程 (57)
- § 4-2 阶跃型光纤中的模式场 (60)
- § 4-3 阶跃型光纤模式场的圆偏振分量 (64)
- § 4-4 阶跃型光纤的模式特征方程及其数值求解 (68)
- § 4-5 模式特征方程的化简 (77)

§ 4-6	模式参数 α 的取值范围及两类模式的物理意义	(85)
§ 4-7	简并和拟简并模式的线性组合——线偏振 L_p 模的形成	(96)
§ 4-8	模式场功率流的分布	(105)
第五章 梯度型光纤的波动理论分析		
§ 5-1	基本方程及其 WKB 法的近似解	(112)
§ 5-2	转折点位置的确定及其物理意义	(116)
§ 5-3	梯度型光纤中模式的分类	(120)
§ 5-4	传导模式的模式特征方程	(121)
§ 5-5	梯度型光纤中传导模式容量的计算	(129)
第六章 多模光纤的传输特性		
§ 6-1	光纤的损耗特性及其实验测量方法	(133)
§ 6-2	多模光纤的色散特性及其实验测量方法	(151)
第七章 单模光纤		
§ 7-1	单模传输条件	(171)
§ 7-2	单模光纤的光场与光功率分布	(173)
§ 7-3	单模光纤中的色散	(178)
§ 7-4	单模光纤的设计	(187)
§ 7-5	单模光纤的双折射	(191)
第八章 光纤模式的激励、观察和定量识别		
§ 8-1	光纤模式的激励	(198)
§ 8-2	光纤模式的观察	(211)
§ 8-3	光纤模式功率的定量识别	(235)
第九章 光纤基本参数的测量		
§ 9-1	概述	(246)
§ 9-2	测量无包层光纤参数的后向散射图样法	(249)
§ 9-3	有包层阶跃型光纤参数的测量	(259)
§ 9-4	梯度型光纤折射率分布剖面的测定	(266)
附 录		(280)
参考文献		(285)

第一章 绪 论

§ 1.1 概 况

纤维光学是研究光波在光导纤维中传播规律的一门新兴学科。它的建立和发展首先是与人们对通讯系统不断提高传输信息容量的要求有密切的关系。

通常的电气通讯系统,其信息传输容量是与载波的工作频段有关。载波频率愈高,能够传输的信息容量就愈大,所以,原有电气通讯系统的发展过程就是设法使用愈来愈高的载波频段的变化过程。从最初的频率为数十千赫的低频载波系统发展到目前频率为1GHz—100GHz的微波载波系统,其主要目的都是为了适应信息容量不断增加的要求。但是,由于目前微波系统的载波频率有限,从而使进一步提高电气通讯系统的信息传输容量遇到不可克服的障碍。1960年具有高相干性的激光器问世后,促使人们提出了建立利用激光作光源、以光导纤维为传输介质的载波频率为光频段的光通讯系统的设想。由于激光的频率为现有微波通讯系统载波频率的1000多倍,因此,从频率的角度考虑,上述光通讯系统所能传输的信息容量,也将高出微波系统的1000倍以上。此外,与电气通讯系统中所采用的金属电缆或金属波导相比,由光导纤维组成的光缆具有重量轻,体积小和抗电磁干扰性能强等优点,也进一步增强了人们对光纤通讯系统所涉及的各种理论和技术问题(其中包括光波在光导纤维中的传播规律等问题)进行研究的兴趣。

要构成经济的、可靠的光纤通讯系统,必须具备以下三个部分:效率高、工作可靠、长寿命的激光光源;低损耗和低色散的纤维传输介质;低噪声的光检测器。

在60年代后期,光纤的损耗近1000db/km,这远远不能满足光纤通信技术的要求。在1966年高锟和Hockmon[1]以及A·Werts[2]等人同时指出,这样大的损耗是光纤中的杂质引起,这就促进人们对光纤材料的进一步提纯,使这一情况迅速得到改变。1970年康宁玻璃公司的Kapron、Keck和Maurer[3]制成了损耗大约为20db/km的光纤。光纤的损耗与工作波长有关,所以在工作波长的选用上,应尽量选择损耗低的工作波长。光纤通信最早是用短波长0.85 μm ;近来发展至用1.3—1.55 μm 范围内的波长,因为,在这一波长范围内光纤不仅损耗低,而且色散也小(甚至可以达到“零色散”)。目前研制出的光纤在1.5 μm 波长下其损耗可低于1db/km。

在光源方面,虽然CO₂、He—Ne和YAG等各式各样的激光器早已问世,但它们均不适合于光纤通信。因为从驱动功率、调制性能、转换效率、寿命长短和小型轻便等方面看,它们都不如半导体激光器,而且半导体激光器可以通过对半导体材料种类的选择来改变它的发光波长,使之与光纤低损耗波长相匹配。70年后,配合当时低损耗波长约为0.85 μm 的光纤,研制出GaAlAs激光器,其发光波长也是0.85 μm 附近。76年后,低损耗波长在1.3—1.55 μm 范围的光纤问世。为配合这种光纤的使用,研制出了波长在这一范围内的InGaAsP激光器。与此同时,响应峰值波长与上述激光波长一致的半导体光检测器也研制成功。

由于在传输介质(光导纤维)、光源和光检测器等方面研制工作所取得的成就,到1980年时,在世界范围内就建立起了实用而经济上可行的光纤通讯系统,用以传送日常电讯、光缆电视和其它类型的通讯业务。

虽然光通讯技术促进了光导纤维的研制和生产,但是目前光纤技术的应用已经大大地超出了光通信的范围。除光通信外,利用各种物理量对光纤中所传输的光波的某些参数(如强度、相位、频率和偏振态等等)的影响,还可用来制成对各种物理量进行测量的光纤传感器。此外,一种称为“自聚焦”的光纤,具有与透镜类似的聚焦和成像性质,已广泛地应用在各种图象传输系统中,这种传输系统在现代医疗技术和现代复印技术中已被采用。

§ 1.2 光纤的分类

描述光纤传播特性的重要指标有两条:一是看它传输信息的距离能多远;二是看它携带信息的容量有多大,前者决定光纤的损耗,后者由光纤的脉冲响应或其基带频率特性的带宽决定。光纤的脉冲响应或它的基频特性的带宽又主要决定于光纤的模式性质^①。光纤按其模式性质通常可以分成两大类:(1)单模光纤;(2)多模光纤。单模光纤折射率沿截面径向分布呈阶跃型,而多模光纤按其折射率沿截面的分布状况又分成阶跃型和梯度型两种。在图 1.2.1 中示出了以上三种光纤的结构示意图。其中(1)为阶跃型多模光纤,(2)为梯度型多模光纤,(3)为阶跃型单模光纤。这些光纤均由纤芯部分和其周围的包层部分组成。纤芯的折射率高于包层的折射率,在某种入射条件下,可在阶跃型光纤的纤芯——包层界面上发生全内反射。在梯度型光纤中,由于折射率随离开光纤轴线距离的增加而逐渐减小,因此,使光纤中传播的光线会自动地弯向光纤的轴线。光纤的多模传导由光线的多条传播路径来表征。多模光纤的模式色散是由不同模式具有不同的轴向传播速度引起

^① 光纤模式是由电磁场物理论中的麦氏方程和边界条件所决定光纤中一种允许传播的电磁场形态。其详细讨论见第四章。

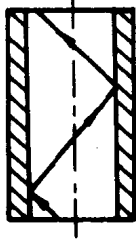
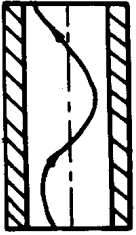
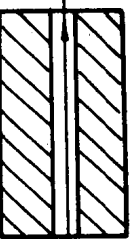
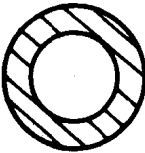
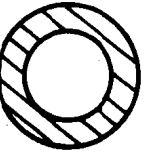
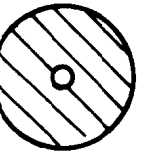
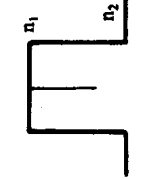
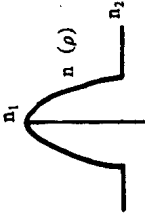
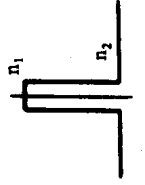
光纤类型	(1) 阶跃型多模光纤	(2) 梯度型多模光纤	(3) 阶跃型单模光纤
传光机理			
几何结构			
折射率分布			

图 1.2.1 三种基本类型的光导纤维

的。因此,当把一个短的光脉冲输入到光纤中时,光能量将以不同的模式耦合到光纤内,各个模式的能量会以不同的时间到达光纤

的接收端,使得被接收到的光脉冲在时间上有一定的展宽。由此引起的脉冲展宽称为模式色散。模式色散降低了光纤传输信息的容量,因为它限制了在给定时间内能够传输可分辨的光脉冲数目。梯度型光纤的模式色散比阶跃型的小。当然,在单模光纤中不存在着模式色散,单模光纤中的脉冲加宽完全是由于材料色散和波导色散引起。我们能够把单模光纤设计成在某一特定波长工作时上述两种色散相互抵消,使之处于所谓“零色散”的工作状态。

此外,在光纤传感技术中,常常需要在光纤中传播的光波的偏振状态保持不变。能够满足这一要求的光纤称为偏振态保持光纤,简称保偏光纤。

§ 1.3 光导纤维的制造方法

在这一节中,我们主要介绍玻璃光纤的制造方法。光纤的技术指标不同,制做时所用原材料的组分也不一样,按原材料的组分,玻璃光纤可分为:石英系玻璃光纤和多组分玻璃光纤两类。

石英系玻璃光纤的纤芯材料,由纯石英中加入少量增大折射率的添加物二氧化锗(GeO_2)组成,而包层材料是由纯石英加入少量降低折射率的添加物三氧化二硼(B_2O_3)或氟(F)组成,。为了降低石英玻璃的熔融温度,在纤芯和包层材料中常常也加入少量五氧化二磷(P_2O_5)。纤芯和包层材料中加入上述添加物的份量与要求制做的光纤折射率分布的形状有关。石英系玻璃光纤,可作成具有很好的传输特性,即具有很低的传输损耗和较宽的传输频带(有关光纤传输特性的分析见第六章),故可以用于长距离的传输系统中,但石英系玻璃光纤的数值孔径(表征光纤对投射到端面上的光射线的捕获能力的一个参数,见第二章讨论)有限。多组分玻璃光纤的原材料与普通窗玻璃一样,是以二氧化硅(SiO_2)为主,份量占

百分之几十,另外还包含碱金属、碱土金属、铝、硼的氧化物等其它材料。与石英玻璃比较,多组分玻璃的熔融温度较低,为 1400°C 或 1400°C 以下,这使得它易于拉制成光纤。多组分玻璃光纤的传输特性不及石英系玻璃光纤,但它的数值孔径可以作得较大,所以可应用于发光二极管作光源的短距离的传输系统中。

下面我们对上述两种组分的玻璃光纤的制作过程分别加以介绍。

一、石英系玻璃光纤制作方法

石英系玻璃光纤是经预制棒的制备、拉丝和涂覆等过程制作而成。在制备预制棒时就形成了所需折射率的分布。在拉丝的过程中折射率径向分布的形状不变。涂覆的目的是为了加强光纤的机械强度。

预制棒的制备方法很多,其中有管内汽相氧化法——IVPO法(Inside Vapour Phase Oxidation)、汽相轴向沉积法——VAD法(Vapour Phase axial deposition)和棒外汽相氧化法——OVPO法(Outside Vapour phase Oxidation),其中管内汽相氧化法是目前生产高质量石英系光纤的最常用方法。下面我们主要介绍这种方法。

管内汽相氧化法亦称改进的化学汽相沉积法——MCVD法(Modified Chemical Vapour Deposition)。管内汽相氧化法能降低光纤的传输损耗,因这种方法能减少玻璃材料中所含的过渡金属离子和氢氧根等杂质。

管内汽相氧化法制备预制棒的工艺过程如图 1.3.1 所示。制备预制棒的原料是半导体工业用的纯度很高的液态四氯化硅(SiCl_4) (纯度要求通常为 99.9999% 以上,目前使用的已高达 99.999999%) 和添加材料液态 GeCl_4 、 BCl_3 及 POCl_3 等等。这些原材料汽化后与反应气体氧气一起流入石英管中,在高温下进行化学反应,生成 SiO_2 、 GeO_2 和 P_2O_5 等粉末状氧化物,沉积在石英管壁周围。石英管的外径通常为 20mm,内径为 17mm 左右,它安装在

玻璃车床上,以每分钟数十转的转速转动。图 1.3.1 中氢氧喷灯是加热源,它以每分钟 15cm 的速度顺着原料气体的流动方向移动,在到达石英管的另一端时,高速地沿反方向回扫。当喷灯沿原料气流方向移动时,沉积在石英管内壁周围的 SiO_2 等粉末微粒在 1500°C 高温下熔融成为透明的玻璃层。在回扫期间由于喷灯回扫

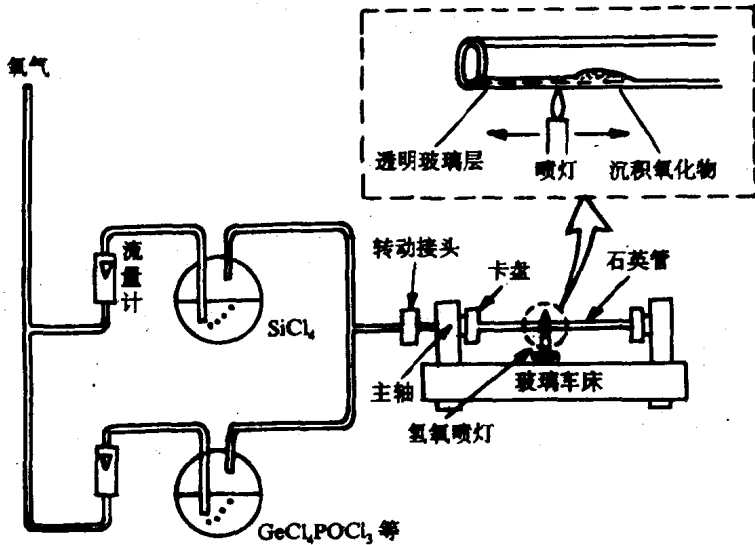


图 1.3.1 管内汽相氧化法原理图

速度很快,故不会在石英管中沉积出玻璃层。在制作多模光纤的预制棒时,通常包层玻璃需沉积 5—20 层,纤芯玻璃需沉积大约 50 层。这样,氢氧喷灯只需沿旋转石英管来回移动几十次,就可在管内沉积出制备预制棒所需的全部玻璃层,然后,提高氢氧焰的温度,将石英管加热到 2000°C 的高温,使石英管及其内部的玻璃层塌缩成实心的预制棒。上述工艺可以制作出直径为 10mm、长为 60—90cm 的预制棒。利用这种预制棒可以拉制 2—3 公里的石英系玻璃光纤。

通过控制图 1.3.1 中 GeCl_4 、 POCl_3 和 BCl_3 气体的流量,能够

制作出折射率呈所需阶跃型分布和梯度型分布的光纤预制棒。

由上可见,用管内汽相氧化法制作预制棒的整个过程中,原材料和中间产物与外部大气没有接触,所用的原材料纯度又很高,故很少有杂质混入预制棒中,故用这种方法制备预制棒,可以使光纤的传输损耗降低。目前,用这种方法制成的光纤,其实验室水平的传输损耗已降低至理论的极限值。

石英系玻璃光纤制作的第二阶段是把预制棒拉成光纤。拉丝所用的装置如图 1.3.2 所示,预制棒安装在进棒机构上,进棒机构以精确的恒定速度把预制棒送进石墨电阻炉中。在加热中,预制棒的末端加热到 2000℃ 高温时开始软化到可以拉丝的程度。为了精密控制光纤直径,应尽量减少拉丝时温度的变化,位于图 1.3.2 所示拉丝机下方的绕丝盘的转速也与光纤直径有重要关系,因此,必须精确控制绕丝盘的转动速度。图 1.3.2 中所示的光纤线径监测仪和线径控制电路就是为这一目的而设置的。

为了保护裸玻璃光纤,使其不受大气中灰尘和水汽等杂物的沾染,在光纤拉制后,应当立即给它涂覆上弹性涂料,即进行预涂覆。为了加强光纤的机械强度,在预涂覆以后再进行第二次涂覆。有关预涂覆和第二次涂覆的工艺过程见参考文献〔4〕的介绍。

由于玻璃中的分子扩散非常困难,即使拉丝时预制棒被加热

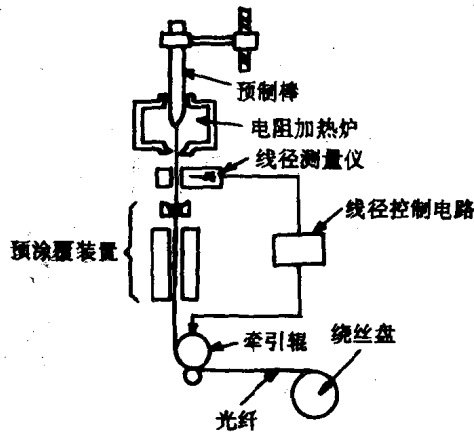


图 1.3.2 拉制石英光纤的装置略图

到 2000℃ 的高温,其中为控制折射率分布而加入的二氧化锗等添加物的分子也几乎不会发生扩散。因此在拉丝的过程中,这些添加物的浓度分布仍然跟预制棒中的分布状况相似。所以为了拉制出所需折射率分布和芯径、外径比的光纤,只要在备制预制棒阶段,精确控制折射率的分布形式和芯径、外径比就行了。

图 1.3.3 表示了由上述方法拉制成的梯度型石英系玻璃光纤的折射率分布情况。光纤的纤芯 A 由掺有 10—15% GeO_2 、1—2% P_2O_5 的石英组成,包层 B 由掺有 B_2O_3 和少量 P_2O_5 的石英组成,最外层 C 层是纯石英,其组分与制作预制棒时所用的纯石英玻璃管的材料一样。

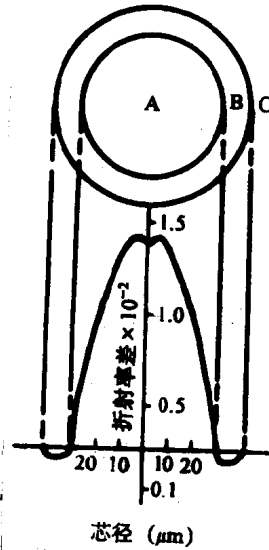


图 1.3.3 梯度型石英光纤的折射率分布图

二、多组分玻璃光纤的制作方法

拉制多组分玻璃光纤通常采用双坩锅法。所用的双坩锅通常是由白金等高熔点金属制成,分内、外坩锅两层。两个坩锅底部具有同轴的喷咀,如图 1.3.4 所示。

事先在石英坩锅内用直接熔融法制成的纤芯玻璃棒和包层玻璃棒分别投入到内、外坩锅中,在近 1000℃ 的温度下融化,并以丝状形式从两个坩锅的同轴喷嘴中流出而成为光导纤维。调节内、外坩锅喷嘴的大小,可以随意调节纤芯和包层直径,故该法适合制作大芯径光纤。通过改变备制纤芯玻璃和包层玻璃棒原材料的各组

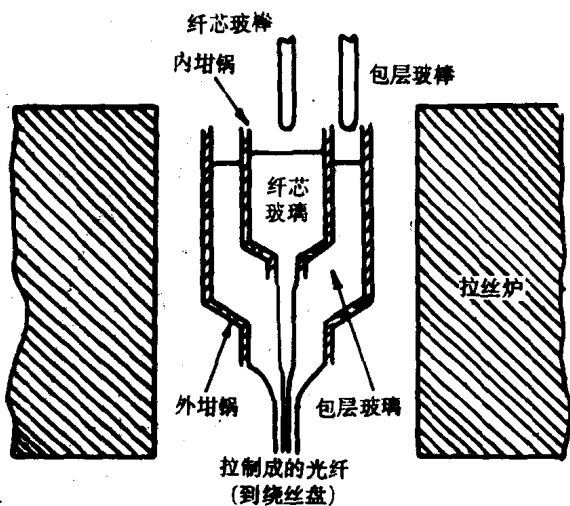


图 1.3.4 拉制多组分玻璃光纤的双坩锅设备

分比例,可以在较大范围内改变纤芯和包层的折射率差值,故能够制作出数值孔径比石英系玻璃光纤大的光纤。

双坩锅法从熔融纤芯和包层玻璃到拉丝可以连续操作,所以产量较高,产品的成本较低。但由于玻璃原材料的纯度不够高和坩锅的污染影响,使得用这种方法拉制成的多组分光纤的传输特性不如由 MCVD 法拉制成的石英光纤好。

§ 1.4 本书的主要内容

本书共计九章。第一章绪论。第二章应用几何光学中全反射的概念,分析了阶跃型光纤的导光机理,并由波导结构中的“横向谐振”概念,导出了阶跃型光纤中传导射线的射线特征方程。在这