



高等院校光电子实验规划示范教材



“光电名师堂”  
系列教材

# 光纤光学与光纤 通信基础实验

GUANGXIAN GUANGXUE YU GUANGXIAN  
TONGXIN JICHU SHIYAN

主编 刘德明

参编 鲁平 柯昌剑 刘海

胡必春 聂明局 崔晟

华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>



高等院校光电子实验规划示范教材



“光电名师堂”  
系列教材

# 光纤光学与光纤 通信基础实验

GUANGXIAN GUANGXUE YU GUANGXIAN  
TONGXIN JICHU SHIYAN

主编 刘德明

参编 鲁平 柯昌剑 刘海

胡必春 聂明局 崔晟

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

光纤光学与光纤通信基础实验/刘德明 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2009年6月

ISBN 978-7-5609-5421-9

I. 光… II. 刘… III. ①纤维光学-实验-高等学校-教材 ②光纤通信-实验-高等学校-教材 IV. TN25-33 TN929.11-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084066 号

光纤光学与光纤通信基础实验

刘德明 编著

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:刘勤

责任校对:汪世红

封面设计:潘群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:8.25 插页:1

字数:187 000

版次:2009年6月第1版

印次:2009年6月第1次印刷

定价:14.80元

ISBN 978-7-5609-5421-9/TN·144

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



# 丛书编委会

主 编：刘劲松

编 委：陈海清 常大定 刘德明

王 英 曾延安 曹丹华

# 总序



光学专业在很长一段时间内主要涉及光学仪器和光电测试设备。随着激光技术、光电子技术、微电子技术和计算机技术的迅猛发展,给光学专业赋予了崭新的内涵,迅速发展成为内容广泛的光电子专业,包含能量光电子、信息光电子、生物光电子、医疗光电子和消费光电子等诸多方面,形成了一个涉及众多专业领域的综合性学科。与此相适应,形成了丰富的光电子实验教学内容。然而,目前的实验教材或讲义是针对不同的内容而各自独立编写的。这种状况已不能满足新形势下光电子学科发展和人才培养的需要,因此编辑出版一套有相互关联的光电子系列实验教材就显得十分必要。本套教材旨在在这方面做一个有益的尝试。

本套教材将现有光电子技术实验内容以系列教材的形式出版,既体现了光电子学科领域的系统性,又能在每本分册中体现该门实验课程的特点,并能够随着光电子领域科学技术的不断发展来扩展新的分册。本套教材的出版,可望为高等学校光电信息类专业的光电子实验课程提供一套内容较为全面的实验教材,亦可供高等职业学校相近专业以及光电工程技术人员参考。

本套教材分为四个分册:《工程光学实验》、《光纤光学与通信技术实验》、《激光原理与技术实验》和《光电信息技术基础实验》。《工程光学实验》,包括应用光学和物理光学实验等主要内容;《光纤光学与通信技术实验》,包括光纤基础实验、光纤通信技术实验和光纤通信系统实验;《激光原理与技术实验》,重点介绍激光基本物理量测量、固体激光系统、激光单元技术和激光应用系统的有关实验;《光电信息技术基础实验》,以光电探测器、光电弱信号探测、光电技术综合应用及光电图像处理为实验的核心内容。

本套教材的作者在相关课程的教学方面具有丰富的经验,但限于水平,难免出现错误和疏漏,欢迎广大同行和读者提出批评和建议。

丛书编委会

2008年10月

# 序



在科学技术日新月异的今天,光电信息技术得到了长足发展。尤其是近 20 年来,国家发展光电技术和产业的一系列战略决策不断出台,国内重点建立了多个“光谷”中心,一大批光电信息领域的技术和产业相继出现,“光电信息产业是 21 世纪最具魅力的朝阳产业,它将成为 21 世纪的高科技主导产业”这一观念得到越来越多人的肯定和认同。

以国家需求与社会发展为导向,培养具有信息工程知识背景,宽基础、高素质的光电专业人才是普通高等院校光电学科专业教学的一项重要任务。这几年来,教育部光电信息科学与工程教学指导委员会对全国高校光电专业提出了人才培养多样化原则,各有关高校的光电专业都在积极探索适应国家需求与社会发展的培养方案,有的已经制订了新的人才培养计划,有的正在确立科学的、适合人才市场需求的教学体系,人才培养模式已呈现百花齐放、各得其所的繁荣局面,编写质量高、系统性强的规划教材也成为专业建设的重要任务,所以,能为这套“普通高等院校光电子实验规划示范教材”作序,我感到很有意义。

光电信息学科要求学生具有较强的专业实验能力,一定的光电信息系统设计能力和工程实践能力,这对相关实验课程的设置和教学提出了更高的要求。这套教材以“实验”为亮点,以“实用”为特色,将光电子实验教学内容完整而系统地整合到四本既独立又相互联系的书中,既体现了光电学科领域的系统性,又能在每本分册中体现该门实验课程的特点,并能够随着光电子领域科学技术的不断发展来扩展新的分册,便于读者有选择、有重点的选择阅读和自学。

华中科技大学光电学院的专业建设尤其是实验室建设、实验教学成果在这套系列教材中得到了很好的体现。刘劲松教授亲自组织多位专家、教授进行论证,各分册由教授光电子实验课程多年的教师担纲写作,并得到了华中科技大学出版社的大力支持,历时两年多,陆续完成这套丛书,可望为高等学校光电信息类专业的光电子实验课程提供一套内容较为全面的实验教材。我深信这套优秀教材的编写者们与出版者们一定会尽其所能,以严谨的态度,不断提高教材的水平,为培养数以千万计的光电专业创新型人才、复合型人才做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士

姚建铨

2008 年 9 月 30 日于 HKUST

# 前 言



始自 20 世纪 80 年代末的光纤通信的高速发展,极大地推动了光纤光学学科的发展,使得“光纤光学”和“光纤通信”课程成为光学工程、光信息科学与技术、光电信息工程、光电子技术、通信技术、测控技术等专业的两门重要的专业基础课。

本书是与“光纤光学”和“光纤通信”课程配套的基础实验教材,在作者多年从事光纤通信、光纤传感及光网络器件与技术方面的科研工作,以及“光纤光学”和“光纤通信”基础实验教学工作的基础上编写完成,内容涵盖光纤基本原理的基础实验、光纤性能参数测试的基础实验、光纤通信器件的基础实验,光纤通信系统、光纤网络技术及光纤光学工艺的基础实验。在实验项目的设置上,既注重了“光纤光学”和“光纤通信”基本概念的验证性实验,又设置了与培养学生研究动手能力密切相关的设计性实验,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的参考书。

本教材参考教学时数为 50 学时,共分 5 章内容。第 1 章绪论,由刘德明编写;第 2 章光纤光学基础实验,由刘德明、崔晟和柯昌剑编写;第 3 章光纤通信基础实验,由刘海和聂明局编写;第 4 章光纤通信系统实验,由鲁平、刘海编写;第 5 章光纤光学工艺实验,由胡必春和聂明局编写。全书最后由刘德明统编定稿,并由鲁平审稿。

本教材编写工作得到华中科技大学出版社“高等院校光电子实验规划示范教材”及华中科技大学光电子科学与工程学院精品教材基金支持,在此表示最衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参考并借鉴了国内外同行的相关文献和著作,在此对有关作者、专家一并表示最诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中一定存在不少错误和不妥之处,热切希望读者指正。

编 者

2009 年 2 月 28 日

# 目 录



第 1 章 绪论	(1)
第 2 章 光纤光学基础实验	(3)
2.1 光纤端面处理、耦合与连接技术	(3)
2.2 光纤损耗谱测试	(6)
2.3 光纤数值孔径测量	(10)
2.4 基于光时域反射仪进行光纤长度、损耗及断点测试实验	(12)
2.5 LD/LED 功率-电流及电压-电流特性曲线测试	(13)
2.6 LD/LED 输出光谱特性测试	(15)
2.7 LD 远场特性测试	(16)
2.8 光探测器直流参数的测试	(18)
2.9 光纤模场分布观察、模场半宽测试及光纤带宽测试综合实验 (设计型实验)	(19)
2.10 密集波分复用器的设计	(21)
2.11 掺铒光纤激光器的设计	(25)
第 3 章 光纤通信基础实验	(29)
3.1 引言	(29)
3.2 模拟光纤通信系统实验	(30)
3.3 数字光纤通信系统实验	(34)
3.4 光纤通信系统指标测试实验	(38)
3.5 基于光纤传输的模拟语音通信系统的设计	(47)
3.6 基于 PCM 调制的单向数字语音传输系统的设计	(54)
3.7 附录 实验箱模块原理图	(60)
第 4 章 光纤通信系统实验	(65)
4.1 引言	(65)
4.2 发射机及波长转换器(OTU)测试	(67)
4.3 光放大器测试	(68)
4.4 光纤耦合器(波分复用器与分路器)的测试	(70)
4.5 DWDM 系统网管实验	(72)



## II 光纤光学与光纤通信基础实验

4.6 三网融合光纤到户接入系统的设计.....	(77)
<b>第5章 光纤光学工艺实验</b> .....	(89)
5.1 引言.....	(89)
5.2 光学零件制造工艺实习.....	(97)
5.3 光学加工质量检验 .....	(111)
5.4 光学零件真空镀膜 .....	(114)
<b>参考文献</b> .....	(119)

# 第1章 绪 论

从1966年高锟博士发表他的著名论文,预言通过改进制备工艺,降低原材料杂质,可拉制出损耗低于20 dB/km的光纤算起,光纤通信三十多年的发展速度可谓日新月异,给通信领域带来了巨大的变化,也使人类社会真正享受到“信息高速公路”时代的美妙生活。

用光纤代替电缆作为通信信息的载体,使得信息的传输发生了本质性变革,这不仅是通信史上、也是人类史上的划时代进步。

美国 Corning 公司于20世纪70年代初期拉制出了世界上第一根损耗低于20 dB/km的光纤,使高锟博士的预言很快变为现实,也使人们看到了用光纤作为信息传输媒介的希望。同年由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、理想的光源。这两项技术的突破标志着—个光纤通信新时代的来临,因此,1970年成为光纤通信发展史上的—个重要里程碑,被称为光纤通信的“元年”。

光纤通信的发展首先表现在光纤的传输特性的改进。由于光纤制作工艺尤其是材料提纯技术的不断发展,到1973年,光纤在0.85  $\mu\text{m}$ 波段的传输损耗已下降到2 dB/km左右,在此后又用了不到三十年的时间,单模光纤的损耗就下降到0.16 dB/km。

与此同时,光纤的结构也不断改进,从带宽较窄的阶跃型折射率光纤转向带宽较大的渐变型折射率光纤,使光纤的带宽不断增加。与此同时,光源的寿命不断延长,光源和光电检测的性能不断改善,这些都为光纤传输系统的诞生创造了有利条件。

1976年,第一条速率为44.7 Mbit/s的光纤通信系统在美国亚特兰大的地下管道中诞生,该系统经过现场实验和全面性能测试后,很快就实现了商品化。

20世纪80年代是光纤通信大发展的年代。在这个时期,所用光纤由多模光纤转向单模光纤,通信传输窗口由0.85  $\mu\text{m}$ 波段转向1.3  $\mu\text{m}$ 波段。这是因为石英光纤在1.31  $\mu\text{m}$ 波段有一个色度色散的零点,有利于实现长距离传输,促成了1.3  $\mu\text{m}$ 波段单模光纤通信系统的迅速发展,也使得光纤通信显示出优越的性能和强大的竞争力,在世界各地迅速发展并很快替代电缆通信,成为电信网中重要的传输手段。

20世纪80年代末期,掺铒光纤放大器(EDFA)问世,它实现了光信号的直接放大,增益达到30 dB以上,其优越的性能是传统的基于光/电/光转换的放大器所无法比拟的,因此很快进入批量实用化阶段。由于掺铒光纤放大器工作在1.55  $\mu\text{m}$ 波段,而在这一波段光纤的损耗也最低,这两方面的原因使人们的兴趣由1.3  $\mu\text{m}$ 波段转向1.55  $\mu\text{m}$ 波段;此外,长波长半导体激光器的成熟也为1.55  $\mu\text{m}$ 波段的应用提供了有力的支持。因此,在这一阶段,1.55  $\mu\text{m}$ 波段光纤通信开始走向应用。

20世纪90年代,随着人类社会信息化时代的来临,对通信的需求呈现加速增长的趋势。为了满足人们对带宽和容量的需求,对系统的传输容量提出了更高的要求,20世纪90年代初期主要通过提高单信道系统的速率实现扩容。1993年,2.5 Gbit/s系统已经实用化,1995年又推出10 Gbit/s的系统。但是,受电子速率瓶颈的限制,单信道速率很难达到40 Gbit/s以上。在这种背景之下,密集波分复用(DWDM)技术应运而生,它改变了以往—根

光纤中只传输一个波长信道,从而造成光纤带宽资源浪费的情况,在同一路光纤中传输若干个不同波长的光信号,并且与宽带掺铒光纤放大器相配合,显示出系列无可比拟的优势。这一技术在1996年推向实用化并很快获得普遍的应用,开辟了光通信发展的又一个新时期。目前密集波分复用系统的传输容量已达1 000 Gb/s以上,全光传输距离达到1 000 km以上。

回顾光纤通信三十多年来的发展历程,可以看出,光纤通信自诞生以来,一直以惊人的速度发展着,新技术、新型器件层出不穷,为信息基础设施提供了宽阔的传输通路。光纤通信之所以能得到如此迅速的发展,与光纤通信的优越性是分不开的。光纤通信的主要优点有: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,易于敷设,便于实际应用,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有色金属材料,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。

本书是与“光纤光学”和“光纤通信”课程配套的基础实验教材,从光纤光学的基础知识出发,介绍了光纤通信和光纤传感等系统应用中所需要掌握的光纤性能参数测量、光纤光学器件及工艺、光纤通信单元与系统、光纤网络技术等方面的基础实验。

全书共分为5章,第1章绪论,简要介绍光纤光学技术及光纤通信技术的发展历程;第2章光纤光学基础实验,简要介绍光纤光学基本性能参数测试及光通信器件的基本实验技术;第3章光纤通信基础实验,简要介绍模拟与数字光通信的基本实验技术;第4章光纤通信系统实验,简要介绍密集波分复用光通信及光接入网络的基本实验技术;第5章光纤光学工艺实验,简要介绍光通信器件光学加工的基本实验技术。

## 第 2 章 光纤光学基础实验

### 2.1 光纤端面处理、耦合与连接技术

#### 2.1.1 实验目的

- (1) 掌握平头光纤端面处理技术。
- (2) 掌握光纤与光纤之间的耦合调试技术,体会光纤横向和纵向偏差对光纤耦合损耗的影响。
- (3) 掌握光纤连接的基本技术。

#### 2.1.2 实验原理

##### 1. 平头光纤端面处理

在光纤的各种应用中,光纤端面处理是一种最基本的技术。光纤端面处理的形式可分为两种:平面光纤头与微透镜光纤头,前者多用于各种光无源器件及光纤的连接与接续;后者则多用于光纤和各种光源及光探测之间的耦合。本实验要求掌握平头光纤端面处理技术。光纤端面处理的基本步骤为:①涂覆层剥除;②光纤头制作;③光纤头检验。

##### 1) 涂覆层剥除

在制备光纤头之前,首先要剥除一段光纤的套塑层与预涂覆层(长 20~30 mm),使光纤的包层裸露出来。剥除套塑层的方法之一是用刀片(如剃须刀片)切削,使光纤头与刀口之间成一小角度,用左手拇指将光纤头压在刀口上,右手拉动光纤即可剥除套塑层;另外一种方法是将光纤头在塑料溶剂中浸泡几分钟,然后用脱脂棉擦除套塑层。预涂覆层的剥除也可采用类似的方法进行。在剥除套塑和预涂覆层之后,要用脱脂棉蘸乙醇/乙醚混合液将光纤头清洗干净,才能进行下一步光纤头的处理。

##### 2) 平面光纤头的制作

对于平面光纤头的基本要求是,光纤端面应是一个平整的镜面,且须与光纤纤轴垂直。因此,将光纤简单地“一刀两断”是不行的,必须根据光纤的材料与品种选择合适的端面处理技术。对于石英系光纤,制备平面光纤头的常用方法有:加热法、切割法和研磨法。本实验采用切割法。

切割法又称刻痕拉断法,因为它是利用金刚石特制的光纤切割刀先在光纤侧表面垂直于光纤轴轻轻刻一小口,然后施加弯曲应力拉动光纤使其折断。利用这种方法制备平面光纤头的成功率一般较高,稍加训练即可获得满意的效果,因此已成为目前最常用的光纤头处理技术。而且技术人员已利用切割法的原理制成了光纤切剥钳,集剥除与切割于一体,使用十分方便。

##### 3) 光纤头质量的检验

检验平面光纤端面质量的最直观的方法是向光纤中注入 He-Ne 光,观察由光纤输出的

光斑质量,即可判定光纤端面的质量。一个好的光纤端面,其输出光斑应是圆对称的、边缘清晰且与光纤轴线方向垂直;如果端面质量不高,则输出光斑就会发生散射或倾斜。

另一种更为精密的方法是利用高倍率显微镜进行检验。首先正面观察光纤端面,其表面应均匀、无裂纹,圆周轮廓清晰;然后侧面观察光纤并转动光纤,其端部边缘应齐整,无凹陷或尖劈,且边缘与纤轴垂直。

## 2. 光纤之间的耦合

光纤线路的传输距离一般都较长,多模光纤系统的中继距离可达数公里至十几公里,单模光纤系统中继距离则达数十公里,而每根光纤(光缆)的长度一般只有一公里左右,最长不超过三公里,因此必须将光纤(光缆)连接起来。

光纤(光缆)的连接并不像电线(电缆)的连接那样简单,后者只需使两根导线紧密接触即可,其传输特性并不受接头的影响;光纤(光缆)则不同,其接续的质量直接影响光传输性能,即增加光纤的损耗,因此其连接技术远比电线(电缆)复杂得多。

光纤(光缆)的连接方式有固定连接与活动连接两种。活动连接所用的光纤连接器是一种光无源器件,一般多用于光端机上的线路测试和调度。光纤线路上所用的连接多为固定连接。按照 CCITT 规定的标准多模光纤固定连接的平均接头损耗应小于  $0.1 \sim 0.2$  dB/个,单模光纤平均接头损耗应小于  $0.05 \sim 0.1$  dB/个。在光纤固定连接中造成光纤连接损耗的主要因素有:①两光纤纤轴错位;②两光纤纤芯径不同;③两光纤数值孔径不同;④两光纤因折射率分布不同而造成的场分布差异;⑤两光纤角向位移;⑥两光纤包层与纤芯不同心造成的纤芯轴错位。为获得最低的连接损耗,必须对连接的光纤进行参数配对筛选,并在连接过程中进行精心调节,使几何位移误差减到最小。

## 3. 光纤的连接

活动接头的损耗一般比较高,且性能不稳定。对于工程应用而言,几乎所有的正式永久性连接都必须采用熔焊法连接。光纤熔焊连接是在光纤熔接机上进行的。目前常用的光纤熔接机一般包括五个部分。

(1) 程控电源 用以提供电弧放电所必需的高频高压和照明用的电源,同时也可对光纤熔接过程中的预熔、熔融、续熔三个阶段所需的不同放电电流实行程序控制。

(2) 可移动电极 用以改变加热部位。

(3) 自动推进 V 形槽 使光纤在熔接过程中自动贴紧。

(4) 光纤微调架 用以精密调节光纤使其对准。

(5) 带照明显微镜 用以观察光纤的对准情形,通常还配一 V 形反射镜,使其不但可以观察左右方向是否对准,而且可以观察上下方向是否对准,这时向下调节显微镜头可看到两对光纤像,当两对光纤分别对准时即说明光纤对的上、下、左、右均已对准。

光纤熔接的过程如下:①制备光纤端面,利用上一节介绍的“切割法”对光纤端面进行处理,处理好的无涂覆层裸光纤长度一般为  $15 \sim 20$  mm,应强调的是,光纤端面处理对于接续质量至关重要;②在光纤上套上保护用套管(不锈钢管或热缩管)并置于自动推进 V 形槽中,调节光纤使端面紧密接触,保持一定压力(使压力显示灯熄灭),然后将放电电极移到光纤接头处,调节其高度使其略低于光纤对,即可进行放电熔焊(可用自动或手动);③熔焊完毕,检测确定焊接损耗符合要求,即可取下光纤,将保护套管移至接头处,涂胶或加热(对于热缩管)使其固定,以保护光纤接头及去掉涂覆层的部分不受局部应力,并使其与外界空气

隔离。

### 2.1.3 实验仪器和装置

实验装置:光纤熔接机及电源;尾纤输出半导体激光器(LD)及电源;光探测器及功率计;刀片与金刚刀;显微镜。实验系统如图 2.1.1 所示。

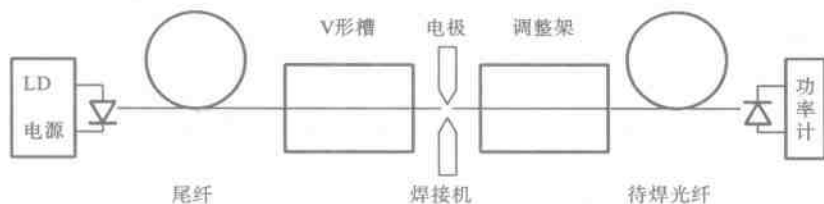


图 2.1.1 光纤耦合和熔接实验系统

### 2.1.4 实验内容和步骤

#### 1. 光纤端面处理

按下列步骤处理 LD 尾纤及待连接光纤端面。

- (1) 用刀片剥除光纤套塑层与预涂覆层,使光纤包层裸露出 20~30 mm 长。
- (2) 用脱脂棉蘸乙醇/乙醚混合液将裸光纤头清洗干净。
- (3) 用金刚刀在距光纤端约 5 mm 处垂直于纤壁轻刻一小口。
- (4) 对光纤端施加弯曲应力,使其折断形成平整端面。
- (5) 在显微镜下观看光纤端面,应为圆周整齐的完整镜面(可以有较小的切口),若不理想,则应重复步骤(1)至步骤(4),直至满意为止。

#### 2. 光功率测试及光纤调试

- (1) 开启 LD 电源,调节电流大小至规定的电流值。
- (2) 测试 LD 尾纤输入功率,记为  $P_{in}$ 。
- (3) 将 LD 尾纤置于焊接机平移 V 形槽中,将待测光纤置于微调 V 形槽中,应保持两光纤平直。
- (4) 开启熔接机电源,向下调节观察显微镜直至看到两对平行光纤像,然后调节微调旋钮,使两对光纤像分别成一直线则说明两光纤上、下、左、右均基本对准,这时测试待测光纤输出端功率,应有显示。

- (5) 仔细调节微调旋钮,使待测光纤输出功率为最大,记为  $P_c$ ,它应尽量接近  $P_{in}$  值。

#### 3. 光纤熔接

- (1) 调节平移旋钮使两光纤端面紧密接触并使压力显示灯刚好熄灭。
- (2) 将熔接机放电电极移至两光纤接触点,即可利用“自动”或“手动”方式进行电弧放电焊接,同时监测光纤输出功率值,使其最大,记为  $P_{out}$ ,它应大于  $P_c$  值;否则,说明连接点损耗较大,应重复进行步骤(1)至步骤(3),直至连接点损耗满足要求为止。

#### 4. 连接点损耗计算

连接点损耗  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = -10 \lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (\text{dB}) \quad (2.1.1)$$

### 5. 结束实验

将 LD 电流缓慢调至零,关 LD 电源,关熔接机电源,实验结束。

### 2.1.5 思考题

(1) 光纤的纵向与横向偏差哪种对光纤耦合效率的影响大? 结合实验谈谈感性认识并作理论解释。

(2) 在光纤熔接实验中,为什么熔接后的光功率应比熔接之前大?

(3) 就本实验而言,按式(2.1.1)测得的连接点损耗是否是连接点实际损耗? 为什么?

## 2.2 光纤损耗谱测试

### 2.2.1 实验目的

- (1) 掌握“剪断法(差值法)”光纤损耗测试技术。
- (2) 了解光纤稳态功率分布概念及其对光纤损耗的影响。
- (3) 了解光纤损耗与波长之间的关系和光纤通信“窗口”的实际意义。

### 2.2.2 实验原理

#### 1. 光纤的损耗

光波在实际光纤中传输时,光功率将随传输距离增加而作指数衰减,即

$$P(z) = P(0)\exp(-\alpha z) \quad (2.2.1)$$

式中: $\alpha$  为光纤的衰减系数,单位为  $1/\text{km}$ 。以  $\text{dB}/\text{km}$  为单位的光纤损耗系数可以表示为

$$\alpha = -10 \lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}})/L \quad (\text{dB}/\text{km}) \quad (2.2.2)$$

产生光纤损耗的机理主要有三个方面:吸收、散射和弯曲所引起的损耗。吸收损耗是指由于光纤材料的量子跃迁,使得光功率转换成热量。光纤的吸收损耗包括基质材料的本征吸收、杂质的吸收和原子缺陷的吸收。本征吸收是指紫外和红外电子跃迁与振动带跃迁引起的吸收,这种吸收带的尾端延伸到光纤通信波段,但引起的损耗一般很小( $0.01 \sim 0.05 \text{ dB}/\text{km}$ )。杂质吸收主要是指各种过渡金属离子( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 等)的电子跃迁以及氢氧根离子( $\text{OH}^-$ )的分子振动跃迁所引起的吸收,通过适当的光纤制备工艺可以得到纯度很高的光纤材料,使过渡金属离子的含量降到  $\text{ppb}(10^{-9})$  量级以下,从而基本上可以消除金属离子引起的杂质吸收,而  $\text{OH}^-$  所引起的吸收则难以根除,它构成了光纤通信波段内的三个吸收峰( $1.39 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$  和  $0.95 \mu\text{m}$ )和三个通信窗口( $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.31 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$ )。如图 2.2.1 所示, $1.55 \mu\text{m}$  是光纤的最低损耗波长。原子缺陷吸收主要是指光纤材料受到热辐射或光辐射作用所引起的吸收。对于以石英为纤芯材料的光纤,这种吸收可以忽略不计。

散射损耗是光纤中由于某种远小于波长的不均匀性(如折射率不均匀、掺杂粒子浓度不均匀等)引起的对光的散射所造成的光功率损耗。其中,在小信号功率传输时,最基本的散射过程是瑞利散射,其特征是散射光强正比于  $1/\lambda^4$ 。正因为如此,目前光纤通信的光源波

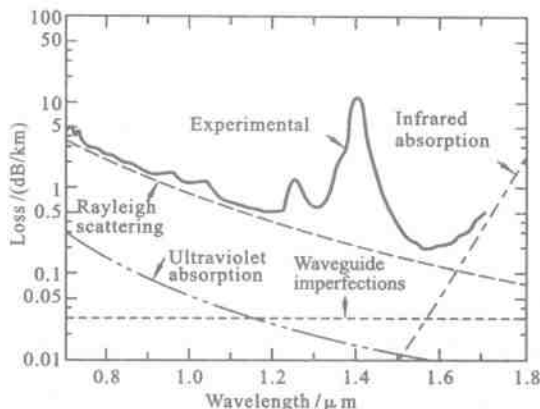


图 2.2.1 光纤损耗谱

长逐步向长波长发展。当光纤中传输的光功率超过一定值(阈值功率)时,还会诱发另外两种散射过程,即受激喇曼散射与受激布里渊散射,它们会引起光纤的非线性损耗。因此在光纤通信中,一般要求功率低于非线性散射的阈值功率。

多模光纤弯曲损耗是指由于光纤的弯曲,使一部分高阶模从光纤纤芯中辐射出去所引起的损耗。光纤的弯曲损耗随光纤弯曲曲率半径的减小而呈指数性增大,当曲率半径小于某一个临界曲率半径  $R_c$  时,所引起的损耗将大至不能忽略的量级。对于多模光纤  $R_c$  约 10 cm,对于单模光纤弯曲损耗主要是基模  $LP_{01}$  模的功率泄漏所致,其临界曲率半径  $R_c$  可近似表示为

$$R_c \approx 20 \frac{\lambda_0}{\Delta^{3/2}} \left( 2.748 - 0.996 \frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad (2.2.3)$$

除了上述三种损耗机理之外,实际光纤在包层之外的涂覆层也会产生附加损耗,这是因为导模的功率(尤其是高阶模)有相当一部分是要在包层之中传输的,如果涂覆层材料折射率与包层材料折射率相近,这部分光功率就会进入涂覆层之中,而涂覆层材料的损耗是非常高的,这就带来导模光功率的损耗。

## 2. 剪断法(差值法)测试原理

根据损耗的定义式可以建立损耗的测试方法,这就是切断法,如图 2.2.4 所示。在这种测量方法中,首先测试待测长光纤的输出光功率  $P_{out}$ ;然后在距输入端约 2 m 处将光纤剪断,测试短光纤输出光功率作为注入功率  $P_{in}$ ;将  $P_{in}$ 、 $P_{out}$  和光纤长度  $L$  代入式(2.2.2),即求得光纤损耗。改变单色仪的波长,可以得到损耗谱  $\alpha(\lambda)$ 。

切断法测光纤损耗的关键是在测  $P_{in}$ 、 $P_{out}$  时要保证注入条件不变。通常采用稳态注入方式,经扰模器和滤模器及包层模剥除器来实现模式稳态分布。切断法具有较高的测试精度,误差可低于 0.1 dB。

## 3. 注入条件与稳态分布

光功率进入光纤有下列两种注入方式。

(1) 稳态注入 又称限制注入,通过适当的光学系统,使注入光本身接近于光纤的稳态分布,即仅激励损耗较低的低阶模,因为只有低阶模才能够在光纤中远距离传输。

(2) 满注入 即激励所有的导模,所以又称全激励,对于芯径/包层直径为 50/125  $\mu\text{m}$ ,



## 8 光纤光学与光纤通信基础实验

最大理论数值孔径  $NA=0.2$  mm 的多模光纤, 稳态注入的条件是注入光近场光斑  $-3$  dB 直径不大于  $20\ \mu\text{m}$ , 远场过  $20\ \mu\text{m}$  光斑中心的  $-3$  dB 数值孔径不大于  $0.2$  mm; 满注入的条件是注入光近场光斑  $-3$  dB 直径不小于  $70\ \mu\text{m}$ , 远场  $-3$  dB 数值孔径不小于  $0.3$  mm。采用任何一种注入方式, 都不能确保光纤中传播的模式处于稳态分布。

所谓模式稳态分布是指光纤中全部模功率分布是稳定的, 不随距离而变, 且光纤输出端和输入端远场辐射角及近场光斑尺寸均相一致(匹配), 衰减符合长度相加性。为了在较短的距离内实现稳态模功率分布, 一般是根据模耦合的机理, 用强烈的几何扰动来促使光纤中的模式尽快达到稳态分布。这种方法需要用到扰模器、滤模器和包层模剥除器。

扰模器是一种用强烈的几何扰动来实现模式强耦合的装置。图 2.2.2 所示为一种扰模器结构, 是将光纤在一系列圆棒之间作正弦形弯曲, 在几厘米之内即可达到模式稳态分布。

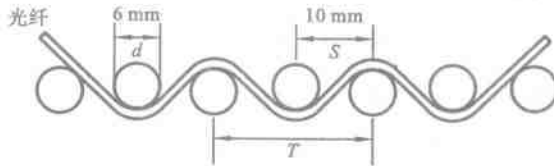


图 2.2.2 光纤扰模器

滤模器是一种用来选择、抑制或衰减某些模式的装置。滤模器可以采用绕棒式的, 先将光纤低张力地绕在一根  $20\ \text{mm}$  长的圆棒上, 棒的直径为  $12\ \text{mm}$ , 约绕  $5$  圈即可达到滤除高阶模的目的。也可采用如图 2.2.3 所示装置, 将光纤嵌入正弦形槽内, 其中充满折射率匹配液以消除包层模。

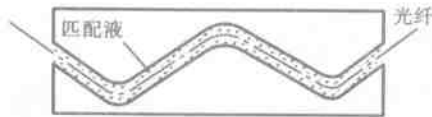


图 2.2.3 光纤滤模器

包层模剥除器是一种促使包层模转换成辐射模的装置, 以便将包层模从光纤中除掉。这种装置是将光纤的一小段去掉涂覆层, 浸入折射率等于或稍大于包层折射率的匹配液中, 来使包层模被剥除的。匹配液一般采用丙三醇(甘油)、四氯化碳和液态石蜡等。如果涂覆层折射率高于包层折射率, 就可以不去掉涂覆层而直接将光纤浸入匹配液, 也可达到剥除包层模的目的。

适当的光耦合系统与扰模器、滤模器及包层模剥除器一起构成注入系统。经过注入系统的光功率应达到稳态分布。判断是否达到稳态分布有两种方法。其一是看光纤输出功率与扰模程度的变化关系: 刚开始扰模时由于高阶模与包层模损耗很大, 输出功率下降很快; 当模式趋于稳态分布时, 输出功率的变化就很缓慢。其二是看光纤输出近场和远场分布: 按照 CCITT 的规定, 对于  $50/125\ \mu\text{m}$ ,  $NA$  为  $0.2$  mm 的多模渐变光纤, 当使用了注入系统之后,  $850\ \text{nm}$  的注入光在光纤中传输  $2\ \text{m}$  距离后测量其远场和近场分布, 应达到近场光斑  $-3$  dB 全宽为  $26 \pm 2\ \mu\text{m}$ ; 远场辐射图  $-3$  dB 孔径角的数值孔径为  $0.11\ \text{mm} \pm 0.02\ \text{mm}$ 。模式稳态分布在光纤的衰减(损耗)与带宽(色散)测量中尤为重要。应注意, 稳态分布是针对  $2\ \text{m}$  长的短光纤而言的。对于长光纤, 由于高阶模在足够长的传输之后基本上可全部损耗,