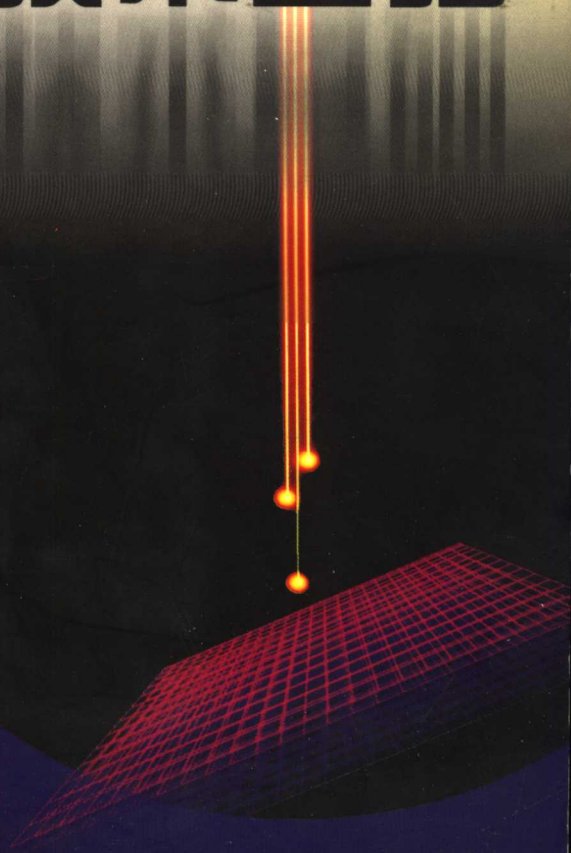
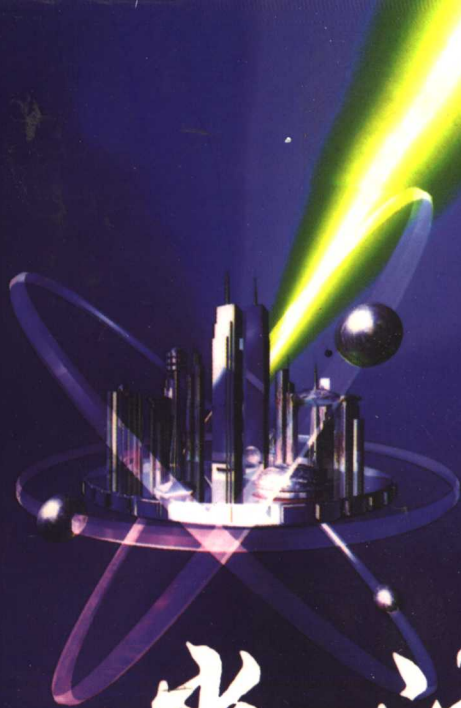


GUANGBO JISHU JICHU

# 光波技术基础

陈根祥 主编  
简水生 主审

中国铁道出版社



铁路科技图书出版基金资助出版

# 光波技术基础

陈根祥 主编

简水生 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 0 年 • 北京

(京)新登字 063 号

### 内 容 简 介

本书根据现代光纤通信技术的需要,较为深入和系统地论述了光纤和半导体光电子器件的有关理论和技术。内容包括光纤基本理论、光纤色散、光纤非线性、半导体光电子器件、光纤特性参数的测量以及对光纤传输系统有重要影响的若干技术进展。全书概念叙述清晰明确,理论分析深入浅出,可适合不同层次读者的需要。为使读者深入理解有关内容,每章后均附有习题。

本书可以作为通信专业本科生和研究生的教材使用,也可供从事光纤通信研究和开发的学者和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光波技术基础/陈根祥编著. —北京:中国铁道出版社, 2000.3

ISBN 7-113-03687-2

I. 光… II. 陈… III. 光通信-基础理论 IV. TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03360 号

书 名: 光波技术基础

作 者: 陈根祥 主编

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 武亚雯

封面设计: 马 利

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 787×960 1/16 印张: 21 5 字数: 432 千

版 本: 2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000 册

书 号: ISBN 7-113-03687-2/TN·124

定 价: 29.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

# 前 言

光纤通信是 20 世纪人类所取得的最具革命性的技术成就之一。由于光纤通信在高速大容量信息传送方面的巨大优势和潜力,从 1970 年第一根低损耗光纤问世至今光纤通信一直以惊人的速度向前发展,并形成了遍布全球的光纤传输网络。这些发展使得光纤通信成为现代通信技术的主要支柱之一。

迄今为止,商用化的光纤通信系统已经历了数代的更迭,但有关光纤通信的各种新技术和新的商用化系统的研究和推展仍呈现出方兴未艾之势。这是因为,尽管利用目前的技术光纤已经具有超过  $1\text{Tbit/s}$  的信息传送能力,虽然这一成就对于传统的电信系统来说是根本无法想象的,但这仍然只是光纤传输容量的一小部分。光纤本身所蕴藏的巨大通信潜力尚有待进一步深入的和长期的研究与探索才能得到充分的利用。而从事光纤通信研究的科学家和工程技术人员也正是从这里获得了源源不绝的动力,使得光纤通信这一具有重大突破性意义的技术时刻充满着勃勃的生机与活力,同时也揭示出光纤通信所具有的旺盛的生命力。

光纤通信系统的进步是以光纤技术和半导体光电子技术的发展为基础的。激光技术的出现使得将通信频率推进到光频并形成切合实际的光波通信系统的梦想成为可能,石英光纤作为光波传输的理想媒介受到了高度重视和大力研究,并迅速达到了可以商用化的低损耗水平。由于半导体注入型激光器具有体积小和可以用电流信号进行直接调制等优点,是构成光纤通信系统的理想光源。因此光纤技术的进步又反过来极大地刺激了半导体激光器技术的发展,各种符合光纤通信系统发展方向的先进的半导体激光器和光电检测器技术不断出现和完善。事实上,正是光纤技术与半导体光电子技术长期以来的相互促进和推动为光纤通信系统的迅速发展奠定了坚实的基础。

本书作为一本基础性教材,在力求物理概念清晰和数学过程简明的基础上对光纤基本理论、半导体光电子技术、光纤技术的若干重要进展及光纤测量原理等现代光纤通信技术中不可缺少的基础性内容进行了深入和详细的论述。是编者在长期科研工作以及对通信专业研究生和大学生教学实践的基础上,并参阅大量相关文献编写而成的。每一章后均附有习题,这些习题可以帮助读者对书中有关内容进行深入的理解和掌握。本书可以供通信专业高年级大学生和研究生作为教材使用,也可供从事光纤通信研究与开发工作的学者和工程技术人员参考。

本书共分四篇。第一篇“光纤概论”结合目前光纤通信发展的需要,系统而全面地论述了光纤的基本理论、单模光纤、各种实用的近似方法以及光纤色散和光纤非

线性等光纤的基本传输特性。其中“一维平面光波导”一章是为了便于理解和掌握光纤的有关概念和传输特性而编写的。

第二篇“半导体光电子技术基础”在简要介绍了半导体能带理论的基础上,对半导体注入型激光器(LD)、发光二极管(LED)、单纵模激光器以及PIN和APD光电检测器等半导体光电子器件的原理与结构以及工作特性进行了分析与论述。由于半导体量子阱器件和光电子集成技术是近年来半导体光电子技术的主要发展方向,本书对此也作了较为详细的论述。限于篇幅,本书没有包括半导体电子论的全部内容,而只给出理解半导体光电子器件结构和原理所必须的半导体能带论基础知识,但这些知识对于理解本书的内容已经足够了。需要深入了解半导体电子论有关内容的读者可参阅半导体物理学的有关书籍。

第三篇“光纤技术的重要进展”介绍了对目前光纤通信技术的发展具有重要影响的若干技术进展。内容包括掺铒光纤放大器(EDFA)、光纤光栅(Fiber Grating)、光纤色散补偿、光时分复用(OTDM)和密集波分复用(DWDM)等,并介绍了Tbit/s光纤传输实验系统的构成。

第四篇“光纤测量原理”介绍了对光纤各种特性参数进行测量的基准测试方法和替代测试方法。内容包括光纤几何尺寸、折射率分布、数值孔径、单模截止波长和模场直径、损耗和色散特性及偏振特性等的测量以及光纤的机械特性和强度试验。

考虑到研究生教学以及光纤通信领域研究与开发工作的需要,本书部分内容对于大学生而言可能具有一定的深度。在教学过程中,教师可根据学生的实际情况进行选讲。

本书由我国著名光纤通信专家、中科院院士简水生教授主审,陈根祥博士主编。其中第一、二、三篇由陈根祥博士编写,第四篇由延凤平博士编写,龚岩栋博士编写了第一章第二节、第五章第四节及第六章第六节的部分内容。全书由陈根祥博士进行了统稿和校对。

编者非常感谢北方交通大学光波技术研究所全体老师和同学的帮助,以及北方交通大学对本书编写工作的支持。

光纤技术和半导体光电子技术都属于理论与实践紧密结合的新型学科,具有深入而广阔的研究内容。由于编者学识水平浅陋,恳切希望有关专家和读者对书中错误及不妥之处给予指正,以便进一步修改。

编 者

1999年8月于北方交通大学光波技术研究所

# 目 录

## 第一篇 光 纤 概 论

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 引 论.....             | 3  |
| 第一节 光纤技术的历史回顾.....       | 3  |
| 第二节 光纤制造技术和光缆.....       | 5  |
| 第三节 光纤的基本特性.....         | 11 |
| 第四节 光纤传输技术的发展.....       | 17 |
| 习 题.....                 | 18 |
| 第二章 一维平面光波导.....         | 19 |
| 第一节 Maxwell 电磁理论基础.....  | 19 |
| 第二节 一维平面光波导及其几何光学描述..... | 23 |
| 第三节 一维平面光波导的波动光学描述.....  | 26 |
| 习 题.....                 | 29 |
| 第三章 光纤模式理论.....          | 30 |
| 第一节 阶跃折射率光纤中的场模式.....    | 30 |
| 第二节 弱导光纤中的线偏振模.....      | 37 |
| 第三节 光波导中模式的普遍性质.....     | 42 |
| 第四节 波导横向非均匀性的微扰法处理.....  | 46 |
| 第五节 纵向非均匀性与模式耦合方程.....   | 47 |
| 习 题.....                 | 49 |
| 第四章 单模光纤.....            | 50 |
| 第一节 阶跃折射率单模光纤.....       | 50 |
| 第二节 无界抛物型折射率分布弱导光纤.....  | 52 |
| 第三节 单模光纤的高斯拟合和模场直径.....  | 54 |
| 第四节 单模光纤的主要类型.....       | 56 |
| 第五节 近似方法.....            | 59 |
| 第六节 单模光纤的偏振特性.....       | 62 |
| 习 题.....                 | 63 |
| 第五章 光纤色散.....            | 64 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 第一节 概 述.....                    | 64         |
| 第二节 单模光纤中的色散.....               | 67         |
| 第三节 光信号在色散光纤中的传输.....           | 72         |
| 第四节 色散优化光纤.....                 | 76         |
| 第五节 偏振模色散.....                  | 80         |
| 习 题.....                        | 84         |
| <b>第六章 光纤中的光学非线性.....</b>       | <b>87</b>  |
| 第一节 非线性传输方程.....                | 87         |
| 第二节 自相位调制 (SPM) .....           | 90         |
| 第三节 交叉相位调制 (XPM) .....          | 94         |
| 第四节 四波混频 (FWM) .....            | 99         |
| 第五节 受激非弹性散射.....                | 105        |
| 第六节 光纤中的光学孤立子.....              | 111        |
| 习 题.....                        | 115        |
| <b>附录一 矢量分析和场论初步.....</b>       | <b>118</b> |
| § A1.1 矢量的运算 (可拓展至多维) .....     | 118        |
| § A1.2 矢量场和标量场.....             | 119        |
| § A1.3 三维正交曲线坐标系.....           | 122        |
| <b>附录二 Bessel 函数.....</b>       | <b>125</b> |
| § A2.1 整数阶 Bessel 方程及其解.....    | 125        |
| § A2.2 Bessel 函数的性质.....        | 126        |
| § A2.3 整数阶的变形 Bessel 方程及其解..... | 128        |
| § A2.4 变形 Bessel 函数的性质.....     | 129        |
| <b>参考文献.....</b>                | <b>132</b> |

## 第二篇 半导体光电子技术基础

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>第七章 半导体能带论基础.....</b>      | <b>135</b> |
| 第一节 固体中的能带.....               | 135        |
| 第二节 载流子的费米统计分布.....           | 138        |
| 第三节 半导体内光与电子的相互作用.....        | 140        |
| 第四节 非平衡载流子和准费米能级.....         | 142        |
| 第五节 P-N 结及其光电特性.....          | 144        |
| 习 题.....                      | 147        |
| <b>第八章 异质结构激光器和发光二极管.....</b> | <b>149</b> |
| 第一节 半导体注入型激光器的基本原理.....       | 149        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 第二节 半导体异质结及其外延生长.....               | 151        |
| 第三节 通信波段的半导体材料.....                 | 153        |
| 第四节 半导体异质结激光器 (LD) .....            | 156        |
| 第五节 半导体发光二极管 (LED) .....            | 158        |
| 第六节 半导体激光器的可靠性.....                 | 160        |
| 习 题.....                            | 162        |
| <b>第九章 注入型激光器的工作特性.....</b>         | <b>163</b> |
| 第一节 阈值电流密度.....                     | 163        |
| 第二节 注入型激光器的光-电流特性.....              | 165        |
| 第三节 注入型激光器的动态特性.....                | 168        |
| 第四节 注入型激光器的光束发散.....                | 172        |
| 习 题.....                            | 173        |
| <b>第十章 单纵模激光器.....</b>              | <b>175</b> |
| 第一节 概 述.....                        | 175        |
| 第二节 分布反馈 (DFB) 激光器.....             | 176        |
| 第三节 分布布喇格 (Bragg) 反射 (DBR) 激光器..... | 179        |
| 第四节 单纵模激光器的动态特性.....                | 182        |
| 第五节 可调谐单频激光器.....                   | 184        |
| 习 题.....                            | 185        |
| <b>第十一章 半导体光电检测器.....</b>           | <b>186</b> |
| 第一节 半导体光电检测器的基本原理.....              | 186        |
| 第二节 通信用光电检测器材料.....                 | 189        |
| 第三节 PIN 光电检测器.....                  | 190        |
| 第四节 雪崩光电二极管 (APD) .....             | 195        |
| 第五节 APD 的碰撞电离理论 .....               | 198        |
| 习 题.....                            | 200        |
| <b>第十二章 量子阱器件.....</b>              | <b>202</b> |
| 第一节 半导体量子阱的基本结构.....                | 202        |
| 第二节 载流子在一维方势阱中的运动.....              | 203        |
| 第三节 量子阱结构中的载流子态密度.....              | 205        |
| 第四节 量子阱激光器.....                     | 207        |
| 第五节 超晶格高速雪崩光电检测器.....               | 211        |
| 习 题.....                            | 216        |
| <b>第十三章 光电子集成器件 (OEIC) .....</b>    | <b>218</b> |
| 第一节 光电子集成的基本思想.....                 | 218        |
| 第二节 单片集成多段式可调谐激光器.....              | 220        |
| 第三节 高速 OEIC 光发送机.....               | 223        |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第四节 高速 OEIC 光接收机 ..... | 225 |
| 习 题 .....              | 226 |
| 参考文献 .....             | 227 |

### 第三篇 光纤技术的重要进展

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第十四章 掺铒光纤放大器 (EDFA) .....   | 231 |
| 第一节 EDFA 的基本原理和结构 .....     | 231 |
| 第二节 EDFA 的传输和速率方程理论 .....   | 234 |
| 第三节 EDFA 的基本特性 .....        | 236 |
| 习 题 .....                   | 238 |
| 第十五章 光纤光栅 .....             | 239 |
| 第一节 光纤光敏效应和光纤光栅紫外写入技术 ..... | 239 |
| 第二节 光纤光栅的模式耦合方程 .....       | 243 |
| 第三节 光纤光栅的光学特性 .....         | 246 |
| 第四节 紫外写入光纤光栅的应用 .....       | 253 |
| 习 题 .....                   | 257 |
| 第十六章 高速率大容量光信号传输 .....      | 258 |
| 第一节 光纤色散补偿 .....            | 258 |
| 第二节 光信号的时分复用 (OTDM) .....   | 261 |
| 第三节 密集波分复用 (DWDM) 技术 .....  | 263 |
| 第四节 Tbit/s 光信号传输 .....      | 265 |
| 习 题 .....                   | 268 |
| 参考文献 .....                  | 269 |

### 第四篇 光纤测量原理

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十七章 光纤几何参数的测量 .....  | 273 |
| 第一节 折射近场法 .....       | 273 |
| 第二节 近场扫描法 .....       | 276 |
| 第三节 反射法 .....         | 278 |
| 习 题 .....             | 279 |
| 第十八章 光纤损耗和色散的测量 ..... | 280 |
| 第一节 概 述 .....         | 280 |
| 第二节 光纤衰减测量 .....      | 281 |
| 第三节 光纤衰减的现场测试 .....   | 287 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第四节 光纤色散的测量.....            | 291 |
| 第五节 偏振模色散的测量.....           | 295 |
| 习 题.....                    | 298 |
| 第十九章 光纤偏振特性的测量.....         | 299 |
| 第一节 单模光纤的双折射.....           | 299 |
| 第二节 光纤拍长的测量.....            | 301 |
| 第三节 侧向压力法拍长测试装置.....        | 304 |
| 第四节 偏振光时域反射计.....           | 305 |
| 习 题.....                    | 307 |
| 第二十章 光纤折射率分布及数值孔径的测量.....   | 308 |
| 第一节 光纤折射率分布的测量.....         | 308 |
| 第二节 光纤数值孔径的有关概念.....        | 313 |
| 第三节 最大理论数值孔径的测试方法.....      | 314 |
| 习 题.....                    | 317 |
| 第二十一章 单模光纤模场直径及截止波长的测量..... | 318 |
| 第一节 模场直径的有关定义.....          | 318 |
| 第二节 单模光纤模场直径测量.....         | 320 |
| 第三节 单模光纤截止波长的有关概念.....      | 322 |
| 第四节 单模光纤截止波长的测试.....        | 323 |
| 习 题.....                    | 325 |
| 第二十二章 光纤的机械特性和强度试验.....     | 326 |
| 第一节 光纤的强度衰弱和断裂.....         | 326 |
| 第二节 光纤的强度实验及其表征参数.....      | 327 |
| 习 题.....                    | 330 |
| 参考文献.....                   | 331 |

# 第一篇

## 光 纤 概 论



# 第一章 引 论

## 第一节 光纤技术的历史回顾

### 一、光波通信系统的巨大潜力

任何通信系统的目的都是为了把信息从一地及时、准确地传送到另外一地。为此，一个通信系统应当包括信息的发送、传输和接收三个基本的部分。在传统的电信系统中，为了使电信号的发送、传输和接收更加方便和有效，需要将电信号迭加在以某一频率振荡的电磁波（载波）上进行传送，这一过程称为信号的调制。在接收端进行解调，并恢复出原始的电信号。根据载波频段在电磁波频谱中位置的不同，相应的通信系统所要求的技术及其通信能力也不同。图 1.1 给出了从射频（RF）到紫外区域的电磁波频率谱。传统的电信系统一般为载波频率位于射频波段的无线电系统或者位于微波及毫米波波段的微波和毫米波系统。系统传输容量的大小直接受系统载波频率的限制。通常情况下，系统所能达到的调制带宽只有其载波频率的百分之几，因此提高系统的载波频率将直接导致系统传输容量的增加。

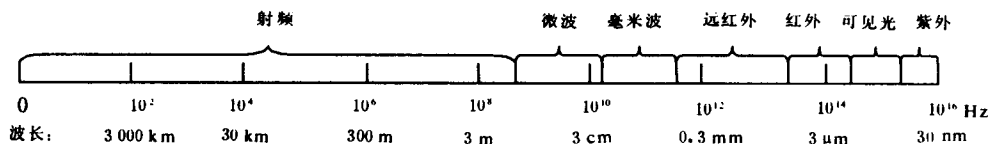


图 1.1 电磁波频谱图

从广义上讲，载波频率位于远红外、红外、可见光和紫外光区域的通信系统统称为光通信系统。由于光波波长在微米( $\mu$ m)量级以及前面所述的原因，光波系统具有宽带宽、大容量、能量集中程度高、器件尺寸小和低功耗等潜在的巨大优点。其通信容量大约是射频或微波通信系统容量的  $10^5$  倍，因此将载波频率推进到光频区域无疑具有十分巨大的吸引力和实际意义，长期以来一直是通信研究人员所不懈追求的目标。但是，一个新的通信系统的建立和发展，取决于它所能采用的发送装置、传输媒质和接收设备等系统构成要素的技术和特性。光波系统与射频或微波通信系统有着本质上的不同。首先，光频所对应的电磁波具有非常小的波长，因此光波器件的尺寸将

显著减小,其设计和制作技术也必定与射频系统所需的电子器件完全不同;其次,光波长几乎与分子和其他微粒的尺寸相当,由于光散射和衍射效应,一般的传输媒质将对光载波的传输产生不利的影响。

早在 19 世纪, A.G.Bell 即用一束光线在长达数百米的距离上进行过语音传送, 贝尔研究所也曾进行过利用可见光通信的实验。但由于当时所具备的光发送、光接收和传输媒质等技术水平尚不足以显示出光通信所具有的任何优点, 因此这些早期的工作并没有引起人们对其进行持续研究的兴趣。直到 20 世纪 50 年代末和 60 年代初, 激光器的发明和实验室的验证给光波系统的发展带来了光明的前景。尤其是半导体激光器和半导体光电检测器的出现, 由于它们具有可用电信号进行直接调制、小型化、高可靠性和低成本的巨大潜力而成为近乎理想的光发送和光接收器件。在这些工作之后, 寻找适合于光载波传输的媒质具有特别重要的意义, 并成为光通信开发研究工作的主要方面。

## 二、光纤技术的发展

光纤是具有圆对称结构的介质光波导纤维, 通常由芯子和包层两部分组成, 其中芯子具有较高的折射率。在芯子和包层分界面上满足全反射条件的光线将被约束在光纤内不断向前传输, 形成对光的定向导引。激光器问世之后, 作为潜在的光载波传输媒质之一, 很多研究机构即开展了用光纤进行光载波传输的研究。但是直到 20 世纪 60 年代中期, 所研制的最好的光纤也具有 400dB/km 以上的损耗, 将光纤用于光波传输系统的希望十分渺茫。1966 年, 英国标准电信研究所的华裔学者高琨及其同事 Hockham 首次从理论上推测出光纤损耗可以降低到 20dB/km 的水平。这一惊人的预言使得国际上多家研究机构开始大力进行低损耗光纤的研究工作。由于纯  $\text{SiO}_2$  具有已知的最低光学损耗, 这些工作主要集中在石英光纤的研究上。日本于 1969 年首先研制出第一条通信用光纤, 但其损耗仍然超过 100dB/km。与此同时, 美国的康宁公司和贝尔研究所各自独立地开发出可以用于制作低损耗光纤的内容十分相近的技术。康宁公司于 1970 年采用所谓“粉末法(Soot Method)”先后获得了损耗低于 20dB/km 和 4dB/km 的低损耗石英光纤, 其芯子微量掺锗以提高其折射率。而贝尔研究所则采用改进的化学汽相沉积法(MCVD 法)于 1974 年研制出性能优于康宁公司光纤的产品, 并发现掺硼可以使  $\text{SiO}_2$  玻璃的折射率降低。目前, MCVD 法仍然是光纤制作最广泛使用的方法之一。同时英国的多家研究机构合作也研制出了损耗降低到 4~7dB/km 范围内的光纤。

除 MCVD 法之外, 外部汽相沉积法(OVD 法)、轴向汽相沉积法(VAD 法)等光纤制作技术也陆续得到发展并趋于成熟, 光纤的传输损耗也得以显著降低。到 1979 年, 掺锗石英光纤在  $1.55\mu\text{m}$  处的损耗被降低到 0.2dB/km, 这一数值已十分接近由 Rayleigh 散射损耗所决定的石英光纤理论损耗极限。

在光纤损耗得到显著降低的同时,对光纤色散和偏振等波导传输特性的研究也受到了充分的重视。芯区折射率渐变光纤、色散位移光纤、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 双窗口色散平坦光纤及偏振保持光纤等方面的研究与实验工作也取得了丰富的成果。

光纤技术和半导体光电子技术的进步使光纤通信技术得到了迅速的发展,给通信领域带来了革命性的变革,并成为本世纪最伟大的技术成就之一。目前,采用在一根光纤上同时传输多个十分邻近波长通道的密集波分复用(DWDM)技术,光纤已经具有超过 $1\text{Tbit/s}$ 的信息传送能力。

## 第二节 光纤制造技术和光缆

### 一、光纤制造技术

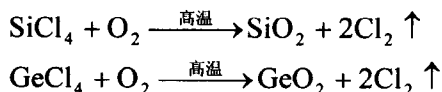
光纤生产工艺主要包括生产光纤预制棒和拉丝两个过程。其中预制棒的制作是光纤生产工艺主要的和关键的过程。为了获得低损耗的光纤,光纤生产需要在超净环境中进行。光纤预制棒是与所要获得的光纤具有相同物理和材料结构,但在尺寸上大得多的实心棒。目前使用较为广泛的光纤预制棒制作方法主要有MCVD法、OVD法、VAD法和PCVD法(等离子体激活化学汽相沉积法)。将所制成的光纤预制棒用精确的送棒机构以适当的速度送入高温拉丝炉中加温软化即可将其拉制成所需尺寸的光纤波导纤维。实践证实,在拉丝过程中,预制棒所具有的径向折射率分布结构可以得到完整的保持。因此,拉丝后所获得的光纤事实上是光纤预制棒的小型复制品。为了使拉制成的石英玻璃光纤具有足够的机械强度和抗老化性能,在拉丝过程中必须同时对所拉出的光纤进行适宜的涂覆保护。

生产石英光纤所需要的原料主要有四氯化硅( $\text{SiCl}_4$ )(它由天然二氧化硅加高温迅速气化而得)、四氯化锗( $\text{GeCl}_4$ ),还有氟里昂( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ )等,它们在常温下是无色的透明液体,有刺鼻气味,易水解,在潮湿空气中强烈发烟,有一定的毒性和腐蚀性;氧化反应和载运气体有氧气( $\text{O}_2$ )和氩气( $\text{Ar}$ )等。

为了保证光纤质量,要求原材料中含有的过渡金属离子、氢氧根等杂质浓度只有十亿分之一( $10^{-9}$ )量级,大部分的卤化物都需要进一步提纯。现在一般对卤化物采用精馏-吸附-精馏综合提纯法,对气体则采用吸附法提纯。

#### (一) MCVD 法

MCVD工艺是目前使用最广泛的光纤预制棒生产工艺之一。图1.2为MCVD法生产光纤预制棒的示意图。其基本原理是用氧气通过 $\text{SiCl}_4$ 和 $\text{GeCl}_4$ 等液态原料进行鼓泡,并将其输送到一由氢氧焰加热的高纯石英管内发生高温氧化反应:



并在管壁上沉积出  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 。为了保证沉积的均匀性，在整个过程中都需要以一定的速度旋转石英管，并使氢氧焰喷灯以适当的速度沿石英管来回移动。通常情况下，光纤的包层由纯  $\text{SiO}_2$  构成。当包层沉积到一定厚度时，再开始芯子的沉积。为了使芯子具有略高于包层的折射率，通常在  $\text{SiO}_2$  中掺入适量  $\text{GeO}_2$  以提高其折射率。 $\text{GeO}_2$  的掺杂量可以通过控制氧气经过  $\text{GeCl}_4$  的鼓泡速度进行调节。在整个沉积过程完成之后，便获得一个中心带有小孔的石英棒。这时通过加大火焰并降低火焰左右移动的速度，使石英棒软化，并在表面张力的作用下烧缩成实心的光纤预制棒。

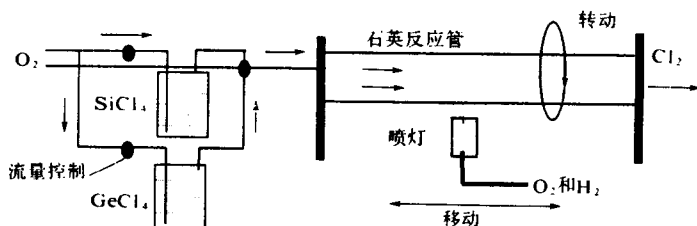


图 1.2 MCVD 生产工艺示意图

由于 MCVD 法的化学反应都是在管内进行，易于降低  $\text{OH}^-$  离子和其他杂质的浓度，有利于制造低损耗光纤，但预制棒的尺寸受到一定的限制。MCVD 法设备相对简单，所制作的光纤特性也较好，因此得到广泛的采用。

## （二）OVD 法

OVD 法由美国康宁公司于 1971 年发明，它的沉积顺序正好与 MCVD 的相反，它是先沉积芯层，后沉积包层。它生产出来的光纤性能比 MCVD 法生产出来的要好。

OVD 法的沉积过程需要一根芯棒，如芯棒是用氧化铝陶瓷或高纯石墨制成的，则沉积过程是先沉积芯层，后沉积包层，如芯棒是一根合成的高纯石英玻璃时，这时沉积只需要沉积包层材料即可。最后的工艺是把沉积出来的疏松的管棒材放入烧结炉中脱水处理，烧结成透明的预制棒。

OVD 的优点是沉积速度快，能生产出大型的预制棒。每一根预制棒可达 2~3kg，可控制 100~200km 的光纤；不需要高质量的石英管做套管；棒芯中  $\text{OH}^-$  的含量可低于  $10^{-8}$ ；由于是中心对称沉积，光纤几何尺寸精度高；能进行大规模的生产，生产成本低。此工艺在国际上被广泛采用。

## （三）VAD 法

VAD 法由日本 NTT 茨城电气通信实验室于 70 年代发明，VAD 法制作光纤预制

棒的过程是把经过提纯的化学试剂,如  $\text{SiCl}_4$ 、 $\text{GeCl}_4$  等以气态送入氢氧火焰喷灯,使之在氢氧火焰中水解,生成石英玻璃粉尘。这些粉尘被吹附到种子石英棒的下端并沉积下来,这样轴向就生长出由玻璃粉尘组成的多孔粉尘预制棒,如图 1.3 所示。这种粉尘多孔预制棒被向上提升,通过一管状的加热炉,被烧结处理,熔缩成透明的光纤预制棒,采用这种方法可以生产很长的预制棒。

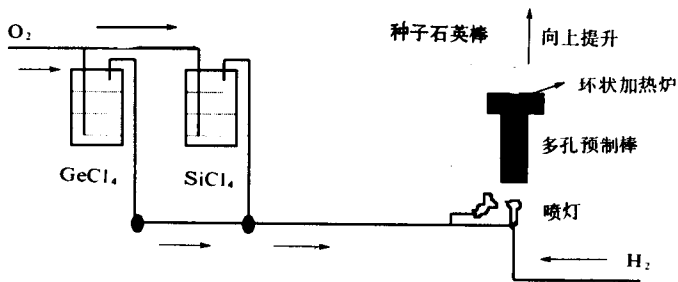


图 1.3 VAD 工艺示意图

VAD 法具有下述优点,沉积速度比 MCVD 法要大 5~10 倍,沉积效率可达 80%;一次形成由纤芯和包层组成的粉尘棒,然后对粉尘棒分段熔融,并通入氯气、氮气以及氯化亚硫( $\text{SOCl}_2$ )进行脱水处理可使光纤中的  $\text{OH}^-$  含量降到十亿分之一左右,适于制备长波长低损耗光纤;虽然 VAD 法需要较高的环境洁净度,但它更适合于批量生产,采用多喷头氢氧焰喷灯可加快沉积速率,增大预制件尺寸(直径 14cm,长 180cm),一次可拉制 1600km 的光纤。其缺点是工艺程序多,对产品的成品率有一定影响。

#### (四) PCVD 法

PCVD 法是用微波代替 MCVD 工艺中的氢氧焰对反应石英管进行加热以实现材料的沉积,由荷兰飞利浦研究室发明。其特点是不用氢氧焰加热沉积,管内沉积温度低于相应的热反应温度,反应管不易变形;由于气体电离不受反应管的热容量限制,所以微波加热腔可以沿石英反应管做快速往复运动,沉积层厚度可小于  $1\mu\text{m}$ ,从而可制备出芯层达千层以上的接近理想分布的折射率剖面;光纤的几何特性和光学特性的重复性好,适于批量生产;沉积效率高,对  $\text{SiCl}_4$  的沉积效率近 100%,沉积速度快,可达  $5\text{g/min}$ ,有利于降低成本。

#### (五) 拉丝工艺

图 1.4 为光纤拉丝塔的示意图,拉丝塔通常有十几米高,顶端的拉丝高温炉一般用石墨制成,在上千安培的电流下产生  $2000^\circ\text{C}$  的高温。为防止石墨在高温下氧化,通常要通入氩气一类的惰性保护气体。当预制棒由送棒机构以一定的速度均匀地送往管状加热炉中,预制棒尖端热到一定的度时,棒体尖端的粘度变低,靠自身重量逐渐