



高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

光纤光缆制备

张 森 编著 ■



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TQ342
20121

阅 览

高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

光纤光缆制备

张 森 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容以实际工作过程为导向,以光纤与光缆生产工艺及工业化任务为驱动,力求使学生掌握各种光纤光缆制备的基本过程、基本工艺,并了解相关设备。

全书介绍了8个学习情境:石英光纤原材料的选择与制备、石英预制棒制备、石英光纤拉丝、石英光纤质检、石英光缆制备、特种石英光纤制备与应用、塑料光纤制备、塑料光缆制备。

本书可作为高职院校光电电子技术、光信息科学与技术、仪器与测量技术等专业的教材,也可作为光纤光缆生产企业工程师、相关技术人员的培训指导手册和参考书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光缆制备/张森编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.8

高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-2601-7

I. ① 光… II. ① 张… III. ① 光导纤维—制备—高等职业教育—教材

② 光缆—制备—高等职业教育—教材 IV. ① TQ342 ② TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 106647 号

策 划 邵汉平

责任编辑 许青青 邵汉平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467

邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 9

字 数 205千字

印 数 1~3000册

定 价 14.00元

ISBN 978-7-5606-2601-7/TQ·0001

XDUP 2893001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

1966年,高锟(C. K. Kao)和霍克哈姆(C. A. Hockham)提出了利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径。目前,光纤光缆已经应用到通信、传感、照明等多个领域,并且新型光纤不断出现,然而光纤光缆制备与生产的发展较慢,已经影响到全球通信、传感等行业的进步。编写本书正是为了让学生掌握石英光纤光缆与塑料光纤光缆的制备原理及工艺流程,了解特种光纤光缆的制备原理及工艺流程,并了解最新光纤光缆制备技术,实现学校毕业生与企业所需人才之间的无缝对接。

本书充分体现了工学结合的特点,展现了高职教育教学做一体化的特色,精心设计了八个学习情境,分别是:石英光纤原材料的选择与制备、石英预制棒制备、石英光纤拉丝、石英光纤质检、石英光缆制备、特种石英光纤制备与应用、塑料光纤制备及塑料光缆制备。

本书既可以作为教材,也可以作为参考书、培训指导手册。全书由张森编著。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者电子邮箱:zs51882003@163.com。

作 者

2011年5月于武汉

目 录

学习情境一：石英光纤原材料的选择与制备	1
1.1 学习目标	1
1.2 学习内容	1
1.2.1 光纤的分类	1
1.2.2 石英光纤的选材要求和原料	3
1.2.3 掺杂剂对光纤性能的影响	4
1.2.4 掺杂离子对光纤性能的影响	4
1.2.5 光学玻璃材料的特性指标	4
1.2.6 不同类型原材料的特点与掺杂技术指标	5
1.2.7 检测仪器与检测指标要求	6
1.3 思考与练习	7
学习情境二：石英预制棒制备	8
2.1 学习目标	8
2.2 学习内容	8
2.2.1 预制棒的制备历史	8
2.2.2 外部气相沉积工艺(OVD)	10
2.2.3 改良的化学气相沉积工艺(MCVD)	13
2.2.4 等离子体化学气相沉积工艺(PCVD)	15
2.2.5 轴向气相沉积工艺(VAD)	17
2.2.6 制作大型预制棒的新工艺——混合工艺	19
2.2.7 石英光纤预制棒测试技术	23
2.2.8 接管工序与接棒工序	24
2.2.9 套管工序与套棒工序	25
2.2.10 石英光纤预制棒制备的相关设备	27
2.2.11 国内主要光纤制造企业	28
2.3 思考与练习	29
学习情境三：石英光纤拉丝	30
3.1 学习目标	30
3.2 学习内容	30
3.2.1 石英熔融拉丝原理	30
3.2.2 石英光纤拉丝工艺流程	36
3.2.3 熔融温度(高温炉)对拉丝工艺的影响及控制	42

3.2.4 拉丝环境(洁净度、湿度、温度)对拉丝工艺的影响及控制	44
3.2.5 送棒速度与拉丝速度的选择对拉丝工艺的影响	45
3.2.6 光纤直径的监测与控制	46
3.2.7 光纤张力对光纤性能的影响及控制	46
3.2.8 静电对拉丝工艺的影响及控制	49
3.2.9 光纤涂覆及其对光纤性能的影响	50
3.2.10 光纤拉丝的相关设备	52
3.2.11 安全操作规程	53
3.3 思考与练习	54
学习情境四：石英光纤质检	55
4.1 学习目标	55
4.2 学习内容	55
4.2.1 石英光纤的性能要求	55
4.2.2 传输与光学特性参数的测试	56
4.2.3 几何特性参数的测试	59
4.2.4 机械特性参数的测试	62
4.2.5 环境特性参数的测试	63
4.2.6 光纤数值孔径的测试	65
4.2.7 石英光纤的质检要求	66
4.3 思考与练习	67
学习情境五：石英光缆制备	68
5.1 学习目标	68
5.2 学习内容	68
5.2.1 光缆的作用	68
5.2.2 石英光缆的制备流程	68
5.2.3 石英光缆的分类	69
5.2.4 石英光缆的基本结构	70
5.2.5 石英光缆的主要用料	71
5.2.6 石英光纤着色原理与技术	71
5.2.7 石英光纤套塑(二次涂覆)原理与技术	72
5.2.8 石英光缆成缆原理与技术	74
5.2.9 石英光缆护套原理与技术	74
5.2.10 绞合节距的设计与控制	75
5.2.11 扎纱节距的设计与控制	75
5.2.12 光缆参数与性能	75
5.2.13 石英光缆的命名	76
5.2.14 石英光缆生产设备的原理与使用	77
5.3 思考与练习	80

学习情境六：特种石英光纤制备与应用	81
6.1 学习目标	81
6.2 学习内容	81
6.2.1 特种石英光纤概述	81
6.2.2 掺稀土光纤	81
6.2.3 色散补偿光纤	87
6.2.4 偏振保持光纤	90
6.2.5 光子晶体光纤	94
6.2.6 传能光纤	98
6.2.7 抗辐射光纤	101
6.3 思考与练习	102
学习情境七：塑料光纤制备	103
7.1 学习目标	103
7.2 学习内容	103
7.2.1 塑料光纤的发展史与分类	103
7.2.2 塑料光纤预制棒的制备	104
7.2.3 各种塑料光纤的制备原理与过程	105
7.2.4 塑料光纤的应用	116
7.2.5 塑料光纤的优点	116
7.2.6 塑料光纤的研究趋势	117
7.3 思考与练习	117
学习情境八：塑料光缆制备	118
8.1 学习目标	118
8.2 学习内容	118
8.2.1 塑料光缆的发展史与分类	118
8.2.2 通信级塑料光缆的制备	119
8.2.3 端面发光照明级塑料光缆的制备	122
8.2.4 流星塑料光缆的制备	126
8.2.5 绞合通体发光塑料光缆的制备	129
8.2.6 灌注通体发光塑料光缆的制备	131
8.3 思考与练习	135

学习情境一：石英光纤原材料的选择与制备

1.1 学习目标

- ★ 掌握光纤的分类；
- ★ 了解光纤的各种原材料；
- ★ 了解原材料的物理与化学性能及检测标准；
- ★ 了解原材料制备与检测的相关设备，如精馏塔等；
- ★ 掌握安全操作规程。

1.2 学习内容

1.2.1 光纤的分类

1. 按照材料不同进行的分类

按照制造光纤的基质材料的不同，光纤可分为石英基光纤、复合光纤、塑料光纤。

1) 石英基光纤

石英基光纤(行业简称石英光纤)是一种以高折射率的石英玻璃(SiO_2)材料为芯，以有机或无机材料(石英)为包层的光学纤维。由于石英基光纤传输波长范围宽(从紫外线到红外线，波长从 $0.38\ \mu\text{m}$ 到 $2.0\ \mu\text{m}$)，所以它适用于从紫外线到红外线各波长信号及能量的传输。另外，石英基光纤数值孔径较大，光纤芯径较大，机械强度较高，弯曲性能较好，且比较容易与光源耦合，故在传感、光谱分析、过程控制、激光传输、激光医疗、测量技术、刑侦、信息传输和照明等领域有着极为广泛的应用，这是其他种类的光纤无法比拟的。

石英基光纤通常采用高纯度的玻璃材料制成。依据光纤材料所含的化学元素，石英基光纤可分为高硅玻璃光纤和多组分玻璃光纤两个大类。高硅玻璃光纤采用高纯度的熔融石英(SiO_2)作纤芯；多组分玻璃光纤采用普通的多组分玻璃作为纤芯，常用的配方成分有钠-硼酸盐玻璃、钾-硼酸盐玻璃、钠-钙酸盐玻璃、钡-硼酸盐玻璃以及钠-锌-铝-硼酸盐玻璃等。

石英基光纤一般包含以下光纤：

(1) 塑料包层石英光纤。塑料包层石英光纤是用高纯度的石英玻璃制作成纤芯，将折射率比石英稍低的塑料作为包层的阶跃型光纤。它具有纤芯粗、数值孔径大的特点，易与发光二极管(LED)光源结合，损耗也较小，所以，非常适用于局域网(LAN)和近距离通信。

(2) 氟化物光纤(Fluoride Fiber)。氟化物光纤是由氟化物玻璃做成的光纤。这种光纤的原料简称 ZBLAN(即氟化锆(ZrF_4)、氟化钡(BaF_2)、氟化镧(LaF_3)、氟化铝(AlF_3)、氟化钠(NaF)等氟化物玻璃原料简化成的缩略语)。氟化物光纤主要用于波长为 $2\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的光传输业务。其特点是采用氟化物作涂覆层,耐腐蚀。

(3) 碳涂层光纤(CCF, Carbon Coated Fiber)。碳涂层光纤是在石英光纤的表面涂覆碳膜的光纤。其机理是利用碳的致密膜层,使光纤表面与外界隔离,以改善光纤的机械疲劳损耗和氢分子的损耗。

(4) 金属涂层光纤(Metal Coated Fiber)。金属涂层光纤是在光纤的表面涂上 Ni、Cu、Al 等金属层的光纤。它是抗恶劣环境光纤中的一种,也可作为电子电路的部件使用。金属涂层光纤的早期产品是在拉丝过程中,涂上熔解的金属制作而成的。由于玻璃与金属的膨胀系数差异太大,会增加弯曲造成的损耗,因此实用性不高。近期,在玻璃光纤的表面采用低损耗的非电解镀膜法可使金属涂层光纤的性能大为改善。

(5) 掺稀土光纤(Rare Earth Doped Fiber)。掺稀土光纤是在光纤的纤芯中掺杂铒(Er)、钕(Nd)、镨(Pr)等稀土族元素的光纤。1985 年英国 Southampton 大学的 Payne 等首先发现掺稀土元素的光纤有激光振荡和光放大的现象。现在使用的 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 掺铒光纤放大器(EDFA)就使用了掺铒的单模光纤,它利用 $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 的激光进行激励,得到 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的光放大信号。另外,掺镨光纤放大器(PDFA)正在开发之中。

(6) 荧光光纤(Luminescent Fiber)。荧光光纤(也称发光光纤)是采用荧光物质制造的光纤。它在受到辐射线、紫外线等光波照射时将产生荧光,部分荧光可经光纤进行传输。荧光光纤可以用于检测辐射线和紫外线,还可进行波长变换,或用作温度敏感器、化学敏感器。在辐射线的检测中,荧光光纤也称做闪光光纤(Scintillation Fiber)。

2) 复合光纤

复合光纤(Compound Fiber)是在 SiO_2 原料中再适当混合诸如氧化钠(Na_2O)、氧化硼(B_2O_3)、氧化钾(K_2O)、硝酸盐玻璃、磷酸盐玻璃等做成的光纤。其特点是软化点较低,纤芯与包层折射率相差很大。这种光纤主要用于医疗业务的光纤内窥镜中。

3) 塑料光纤

塑料光纤是纤芯和包层都用塑料(聚合物)制成的光纤。塑料光纤的早期产品主要用于装饰和导光照明及近距离光链路的光通信中。其原料主要是聚甲基丙烯酸甲酯(也称有机玻璃, PMMA)、聚苯乙烯(PS)和聚碳酸酯(PC)。这种光纤的损耗受塑料固有的 C-H 结构的影响,一般每千米可达几十分贝。为了降低损耗,很多公司正在开发应用氟化物塑料光纤。由于塑料光纤的纤芯直径为 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 甚至更大,是单模石英光纤的 100 倍以上,接续简单,而且易于弯曲,施工容易,因此近年来,加上宽带化的进度,作为渐变型(GI)折射率的多模塑料光纤的发展受到了重视。最近,塑料光纤在汽车内部 LAN 中应用较快,未来在家庭 LAN 中也可能得到应用。

2. 按照传输模式不同进行的分类

按光在光纤中的传输模式不同,光纤可分为单模光纤和多模光纤。

1) 单模光纤

单模光纤(Single Mode Fiber)的中心玻璃芯很细(芯径一般为 $2\sim 12\text{ }\mu\text{m}$),只能传输一种

模式的光，因此，其模间色散很小，适用于远程通信。但单模光纤也存在着材料色散和波导色散，这样它对光源的谱宽和稳定性就有较高的要求，即谱宽要窄，稳定性要好。后来人们又发现在 $1.31\ \mu\text{m}$ 波长处，单模光纤的材料色散和波导色散一为正、一为负，大小也正好相等，即在 $1.31\ \mu\text{m}$ 波长处单模光纤的总色散为零。从光纤的损耗特性来看， $1.31\ \mu\text{m}$ 处正好是光纤的一个低损耗窗口。这样， $1.31\ \mu\text{m}$ 波长处就成了光纤通信的一个很理想的工作窗口，也是现在实用光纤通信系统的主要工作波段。 $1.31\ \mu\text{m}$ 常规单模光纤的主要参数是由国际电信联盟 ITU-T 在 G652 建议中确定的，因此这种光纤又称为 G652 光纤。典型单模光纤结构图如图 1-1 所示。

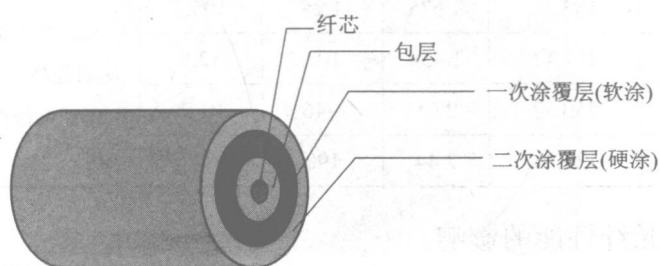


图 1-1 典型单模光纤结构图

2) 多模光纤

多模光纤(Multi-Mode Fiber)的中心玻璃芯较粗($50\ \mu\text{m}$ 或 $62.5\ \mu\text{m}$)，可传输多种模式的光，但其模间色散较大，这就限制了传输数字信号的频率，而且其色散随距离的增加会更加严重。因此，多模光纤传输的距离比较近，一般只有几千米。

图 1-2 所示为光纤中的光传输示意图。

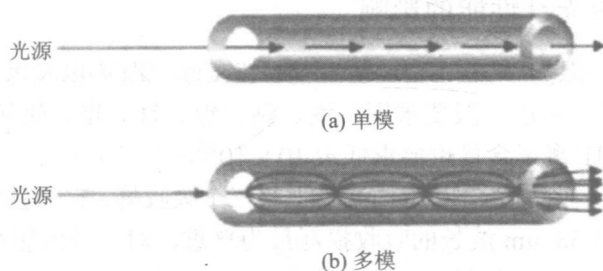


图 1-2 光纤中的光传输示意图

3. 按照性能和用途不同进行的分类

按照性能和用途不同，光纤可分为通信光纤和特种用途光纤(如照明光纤)。

1.2.2 石英光纤的选材要求和原料

石英光纤的选材要求如下：

- (1) 必须能够拉制成很长、很细、可卷绕的纤维。
- (2) 对特定的光波必须是透明的，以便光纤可以有效地导光。
- (3) 物理性能合适，使得拉制成的光纤纤芯与包层折射率仅有稍许差异。

制备石英光纤的原料是一些高纯度的卤化物化学试剂，常见的有液态四氯化硅(SiCl₄)、四氯化锗(GeCl₄)、三氯氧磷(POCl₃)、三氯化硼(BCl₃)、三氯化铝(AlCl₃)、三溴化硼(BBr₃)以及气态六氟化硫(SF₆)、四氟化碳(C₂F₄)等。表 1-1 所示为这些原料的常用参数。

表 1-1 石英光纤材料的常用参数

名称	形态	分子量	比重	熔点/℃	沸点/℃	主要特点
SiCl ₄	液态	169.9	1.50	-70	59	(1) 均有腐蚀性，有刺鼻性气味； (2) 易水解，在潮湿的空气中发烟强烈，并放出热量； (3) 无极性分子，不易吸附
GeCl ₄	液态	214.42	1.879	-49.5	83.1	
POCl ₃	液态	153.33	1.675	1.25	105.3	
BCl ₃	液态	117.17	1.434	-107.3	12.5	
BBr ₃	液态	250.52	2.65	-46	91.7	
AlCl ₃	液态	133.34	2.44	190	182.7	

1.2.3 掺杂剂对光纤性能的影响

制作光纤时，采用特殊工艺在光纤芯层中掺入浓度极低的稀土元素，如铒、镨或铷等，可制作出相应的掺铒、掺镨或掺铷光纤。光纤中的掺杂离子在受到泵浦光激励后会跃迁到亚稳定的高激发态，在信号光的诱导下，将产生受激辐射，形成对信号光的相干放大。

掺稀土元素的光纤放大器是利用光纤中掺杂稀土元素(如铒、镨等)引起增益而实现光放大的。其优点是工作波长恰好落在光纤通信的最佳波长区(1.3~1.6 μm)，结构简单，与线路的耦合损耗很小，噪声低，增益高，频带宽，与光纤偏振状态无关，所需泵浦功率也较低。

1.2.4 掺杂离子对光纤性能的影响

铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锰(Mn)、铬(Cr)、钒(V)以及氢氧根(OH⁻)的含量超限会引起光纤吸收损耗。所以一般要求铜、铁、钴、镍、锰、铬、钒等过渡金属离子杂质含量低于 10 × 10⁻⁹，OH⁻离子含量也要求低于 10 × 10⁻⁹。

氢氧根在普通材料制的光纤其工作波段上有三个吸收峰，它们分别是 0.95 μm、1.24 μm 和 1.38 μm。其中，1.38 μm 波长的吸收损耗最为严重，对光纤的影响也最大。在 1.38 μm 波长，含量仅占 0.0001 的氢氧根产生的吸收峰损耗就高达 33 dB/km。

1.2.5 光学玻璃材料的特性指标

表 1-2 所示为几种光学玻璃材料的特性指标。

表 1-2 几种光学玻璃材料的特性指标

玻璃成分	分子量	折射率	膨胀系数
SiO ₂	60.08	1.457	5.5 × 10 ⁻⁷ /℃
B ₂ O ₃	69.62	1.45	150 × 10 ⁻⁷ /℃
P ₂ O ₅	141.94	1.50	140 × 10 ⁻⁷ /℃
GeO ₂	104.61	1.48~1.50	60 × 10 ⁻⁷ /℃

1.2.6 不同类型原材料的特点与掺杂技术指标

1. 石英玻璃

石英玻璃大致可分为以下几种：透明石英玻璃(外径为 1.5~300 mm)、滤紫外线石英玻璃、彩色石英玻璃等。图 1-3 所示为常见的石英玻璃管。

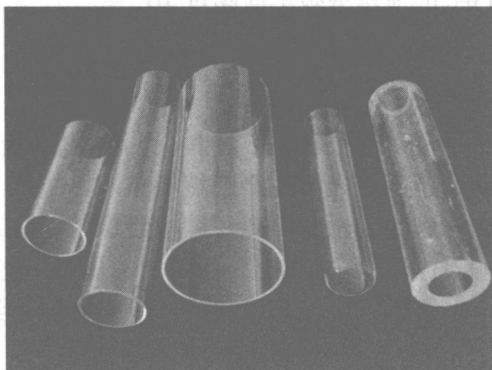


图 1-3 常见的石英玻璃管

石英玻璃是用二氧化硅制造的特种工业技术玻璃，是一种非常优良的基础材料，具有以下优良性能：

(1) 耐高温。石英玻璃的软化点温度约为 1730°C ，可在 1100°C 下长时间使用，短时间最高使用温度可达 1450°C 。

(2) 耐腐蚀。除氢氟酸外，石英玻璃几乎不与其他酸类物质发生化学反应，其耐酸能力是陶瓷的 30 倍，是不锈钢的 150 倍，尤其是它在高温下的化学稳定性，是其他任何工程材料都无法比拟的。

(3) 热稳定性好。石英玻璃的热膨胀系数极小，能承受剧烈的温度变化，将石英玻璃加热至 1100°C 左右，放入常温水中也不会炸裂。

(4) 透光性能好。石英玻璃在紫外线到红外线的整个光谱波段都有较好的透光性能，可见光透过率在 93% 以上，在紫外光谱区，最大透过率可达 80% 以上。

(5) 电绝缘性能好。石英玻璃的电阻值相当于普通玻璃的一万倍，是极好的电绝缘材料，即使在高温下也具有良好的电绝缘性能。

2. SiCl_4

四氯化硅的工业制法主要是将工业硅在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 下氯化，再经冷凝。粗制四氯化硅(98%~99%)中常含有硼、磷、钛、铜、碳、铁、锡、锑等多种杂质化合物。对光纤原料纯度的控制是光纤产品质量的关键，因为它直接影响光纤的损耗特性。为保证光纤具有低损耗，理论上要求原料中杂质含量不超过 10^{-9} 量级，实际中纯度要求 9 个 9 以上。

3. GeCl_4

光纤用 GeCl_4 除了要求其过渡金属杂质含量很低外，还对其含有的氢杂质(OH^- 、含 C-H 键的化合物、HCl)有严格的要求。光纤损耗包括吸收损耗和色散损耗，金属离子(Fe、Co、Cr、Mn 等)和含氢杂质的存在是产生吸收损耗的主要原因。为了使吸收损耗小于 1 dB/km ，

光纤中的杂质质量分数不应超过 $10^{-8}\% \sim 10^{-7}\%$ 。在研究 OH^- 对掺杂 GeCl_4 光纤吸附的影响时发现, 在红外光谱中存在许多吸收峰: $0.725\ \mu\text{m}$ 、 $0.825\ \mu\text{m}$ 、 $0.875\ \mu\text{m}$ 、 $0.950\ \mu\text{m}$ 、 $1.24\ \mu\text{m}$ 、 $1.38\ \mu\text{m}$, 尤其在 $1.24\ \mu\text{m}$ 和 $1.38\ \mu\text{m}$ 处有强的吸收峰。当光纤中 OH^- 的质量分数为 $10^{-4}\%$ 时, 其在 $1.38\ \mu\text{m}$ 处的吸收损耗相当于 $55\ \text{dB/km}$ 。有人证明, 在 PCVD 工艺中, 原料中每 80 个氢原子中就有一个在光纤中形成 OH^- 。为了使 OH^- 不对 $1.2 \sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波长范围内的光纤损耗产生影响, 光纤中 OH^- 的质量分数不应超过 $10^{-7}\%$ 。

4. 光纤涂料

1) 光纤涂料的主要应用方面

光纤涂料主要应用于光纤制棒后的拉丝工艺中。预制棒是光纤的原料, 对光纤的性能、质量起着至关重要的作用, 其制备是光纤生产的核心技术。拉丝工艺通常是指将用气相沉积法工艺和外包层技术结合制成的大预制棒直径缩小且保持芯包比和折射率分布恒定的操作。在拉丝工艺中, 将预制棒拉成光纤的同时, 由特定的化学工艺(比如热固化和紫外固化)将光纤涂料直接涂到光纤上。通俗地讲, 可以将光纤涂料比作光纤的贴身内衣, 而光缆外护套则相当于光纤的外衣。

2) 光纤涂料的主要作用

光纤涂料是当今高速光纤网络的重要组成部分, 有助于防止信号流失, 延长光纤的使用寿命, 提升性能。影响光纤质量的因素主要有两个: 预制棒有气孔, 这跟光纤的生产工艺和技术密切相关; 另外一点, 也是最容易被忽视的一点便是光纤涂料。实际上, 光纤涂料有两个主要的作用。首先, 确保光纤正常工作, 这是光纤涂料最重要的作用。光纤是一种十分脆弱的产品, 它需要通过涂料充分保证高速有效的信号传输。其次, 光纤涂料对光纤的机械性能有决定性影响, 并且涂料成本占光纤成本的 8% 。

1.2.7 检测仪器与检测指标要求

1. 精馏塔

精馏塔实物图如图 1-4 所示。精馏塔结构示意图如图 1-5 所示。

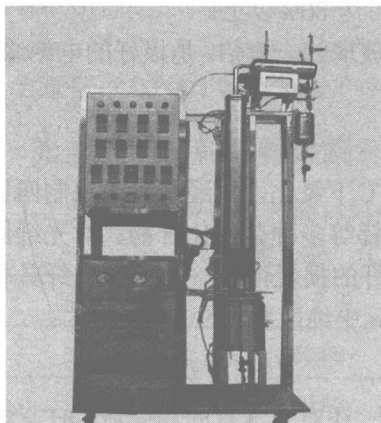


图 1-4 精馏塔实物图

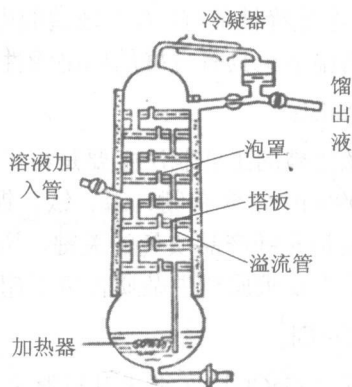


图 1-5 精馏塔结构示意图

精馏塔的工作原理如下：

SiCl_4 原料经精馏塔中的加热器蒸发后进入第一精馏塔顶部，塔顶连续排放低沸物，将釜液连续注入吸附设备，由吸附性活性氯化铝对原料进行吸附，再将釜液注入第二精馏塔顶部，之后进入吸附设备，由吸附性活性氯化铝对原料进行吸附，如此经过四次精馏吸附后，金属氧化物、非金属氧化物、 OH^- 及其他金属离子将会降至很低水平。此法可使 SiCl_4 达到很高的纯度，其中有害金属杂质总含量将降至 5×10^{-9} ，产生 OH^- 的含氢化合物 SiHCl_3 的含量可小于 0.2×10^{-6} 。

2. 络合法提纯设备

图 1-6 所示为络合法提纯设备。

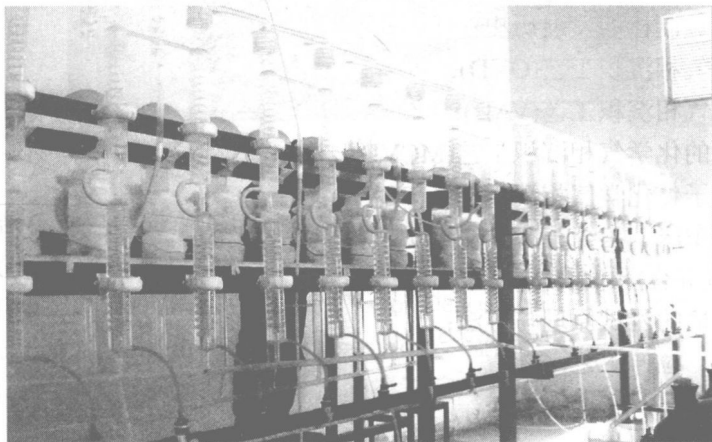


图 1-6 络合法提纯设备

在 SiCl_4 及 SiHCl_3 原料提纯领域，络合法一直引起人们的极大关注。在络合物形成过程中，一直存在络合剂的选择问题。选择络合剂的一般原则是：能与 BCl_3 形成化学上和热学上高度稳定的络合物；极难挥发，对热很稳定；不与 SiCl_4 及 SiHCl_3 发生作用。提纯效果最佳的是四氢化吡咯二硫代氨基甲酸钠，它能将硼、钙、铝、钛、铜、镁、铁的含量降低到 $(1 \sim 0.01) \times 10^{-7}$ 数量级，但除磷效果较差。

1.3 思考与练习

- (1) 石英光纤在选材上有何要求？
- (2) 塑料包层石英光纤与塑料光纤有何区别？
- (3) 氟化物光纤有何特点？
- (4) 掺杂离子对光纤性能有何影响？
- (5) 精馏塔主要起什么作用？
- (6) 按照材料进行分类，光纤可分为哪几类？

学习情境二：石英预制棒制备

2.1 学习目标

- ★ 了解石英预制棒的发展历史；
- ★ 了解外部气相沉积工艺(OVD)；
- ★ 了解轴向气相沉积工艺(VAD)；
- ★ 掌握改良的化学气相沉积工艺(MCVD)；
- ★ 掌握等离子体化学气相沉积工艺(PCVD)；
- ★ 了解沉积车床、熔缩车床、烧结炉、拉伸塔等设备；
- ★ 了解新型(混合)预制棒的制备工艺；
- ★ 了解预制棒的测试原理与方法；
- ★ 掌握接管、拉伸工艺；
- ★ 掌握套棒工艺；
- ★ 掌握安全操作规程。

2.2 学习内容

2.2.1 预制棒的制备历史

众所周知，光纤的发明可以说是人类通信发展史上最重要的里程碑，正如“光纤之父”高锟认为的那样，光纤牵动着世界的神经。四十多年前，高锟发明了光纤，彻底改变了人类通信的模式，为今天通信、网络的迅猛发展奠定了基础，他也凭此荣获了2009年诺贝尔物理学奖。

光纤作为光信号的载体是光通信技术发展的基本元素，其主要特性和应用是靠光纤预制棒的结构设计和制造技术来实现的。光纤技术的每次进步都对光纤通信技术的进步起到了推动作用，而光纤技术的每次进步都离不开光纤制造技术尤其是光纤预制棒制造技术的相应发展。可以说，光纤预制棒制造技术不仅是光纤制造技术的核心，也是光纤通信技术的命脉。

所谓光纤预制棒，简单地说，就是必须在制成光纤前将经过提纯的原料制成一根满足一定性能要求的玻璃棒，也称为母棒。光纤预制棒是控制光纤质量的原始棒体材料，其结构为多层圆柱体，内层为高折射率的纤芯层，外层为低折射率的包层，它应具有符合要求

的折射率分布形式和几何尺寸。图 2-1 和图 2-2 分别给出了大直径和小直径光纤预制棒的外观图。

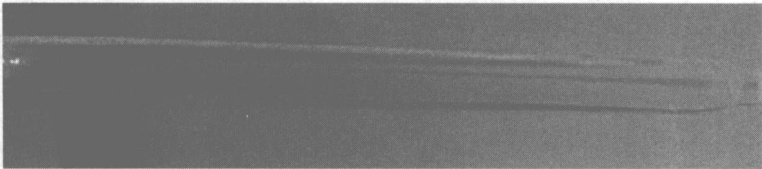


图 2-1 大直径石英光纤预制棒的外观图

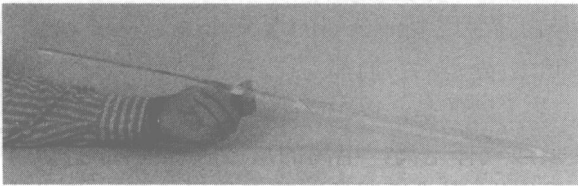


图 2-2 小直径石英光纤预制棒的外观图

石英光纤预制棒的制备目前主要采用气相沉积法，其中最为成熟和目前国内外光纤制造企业广泛使用的有四种：外部气相沉积工艺(OVD, Outside Vapor Deposition)、改良的化学气相沉积工艺(MCVD, Modified Chemical Vapor Deposition)、等离子体化学气相沉积工艺(PCVD, Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition)、轴向气相沉积工艺(VAD, Vapor phase Axial Deposition)。图 2-3 所示为四种光纤预制棒制造工艺简图。

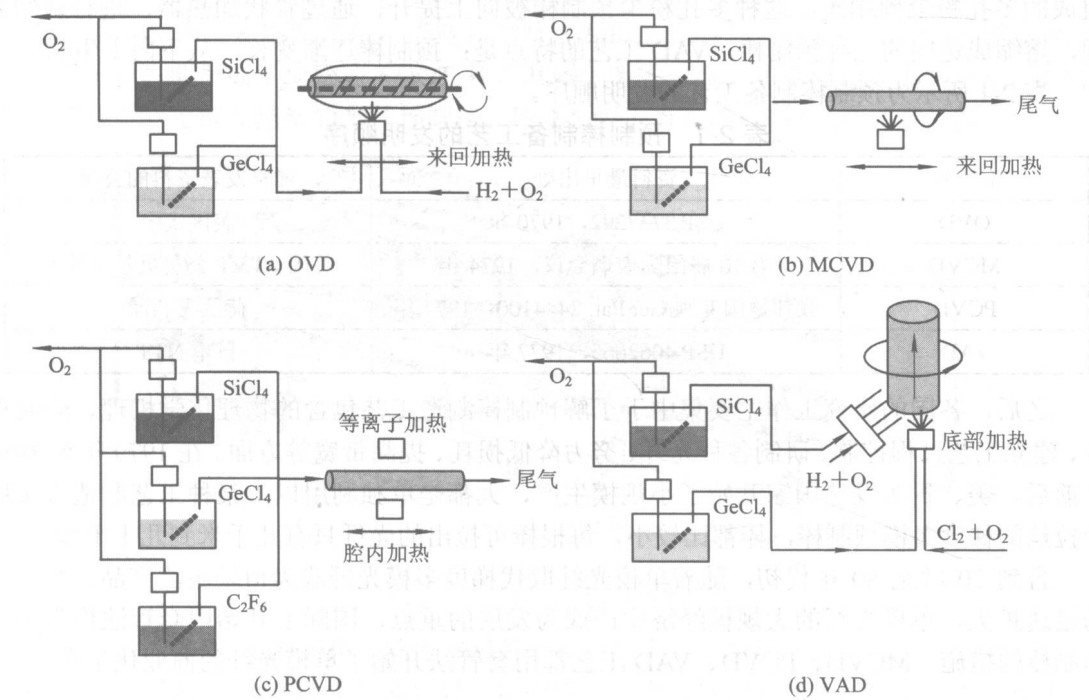


图 2-3 四种光纤预制棒制造工艺简图

(1) OVD 工艺：是由美国康宁公司的 Kapron 在 1970 年研发的便捷工艺。OVD 工艺的

化学反应机理为通过氢氧焰或甲烷焰中携带的气态卤化物产生“粉末”并逐层沉积而获得预制棒。OVD 工艺有沉积和烧结两个具体工艺步骤：① 按所设计的光纤折射分布要求进行多孔玻璃预制棒芯棒的沉积；② 将沉积好的预制棒芯棒进行烧结处理，除去残留水分，以便制得一根透明无水分的光纤预制棒。OVD 工艺的特点是：预制棒逐渐变粗，从里向外长。

(2) MCVD 工艺：是由美国 AT&T 公司贝尔实验室的 Machesney 等人于 1974 年开发的经典工艺。MCVD 工艺是一种以氢氧焰为热源，在高纯度石英玻璃管内进行的气相沉积工艺。MCVD 工艺的制备过程分为两步：① 熔制光纤内包层玻璃；② 熔制光纤外包层玻璃。MCVD 工艺的特点是：预制棒在石英管里面长，沉积和熔缩在一台设备上完成。

(3) PCVD 工艺：是由荷兰飞利浦公司的 Koenings 于 1974 年发明的生产工艺。PCVD 工艺与 MCVD 工艺的相似之处是：它们都是在高纯度石英玻璃管内进行气相沉积和高温氧化反应的。与 MCVD 工艺不同的是，PCVD 工艺用的热源是微波，其反应机理为：微波激活气体产生等离子，使反应气体电离，电离的反应气体为带电离子，带电离子重新结合时释放出的热能熔化气态反应物，形成透明的石英沉积层。PCVD 工艺有沉积和制棒两个步骤。PCVD 工艺的特点是：预制棒在石英管里面长，沉积和熔缩在两台设备上完成。

(4) VAD 工艺：是由日本电报电话公司(NTT)的伊泽立男等人于 1977 年发明的生产工艺。VAD 工艺的化学反应机理与 OVD 工艺近似，不同之处是：VAD 工艺沉积获得的预制棒的生长方向是由下向上垂直沿轴向生长的。其过程是：把经过提纯的化学试剂(如 SiCl_4 、 GeCl_4 、 SiHCl_3)等以气态送入氢氧焰喷灯，使之在氢氧焰中水解，生成石英(SiO_2)玻璃微粒粉尘，这些粉尘被吹附到种子石英棒的下端并沉积下来，这样沿轴向就生长出由玻璃粉尘组成的多孔粉尘预制棒，这种多孔粉尘预制棒被向上提升，通过管状加热器，进行烧结处理，熔缩成透明的光纤预制棒。VAD 工艺的特点是：预制棒逐渐变长，从下向上生长。

表 2-1 所示为预制棒制备工艺的发明顺序。

表 2-1 预制棒制备工艺的发明顺序

名 称	资料最早出处	最早发表资料的公司
OVD	USP 3737292, 1970 年	美国康宁
MCVD	第 10 届国际玻璃会议, 1974 年	美国 AT&T 公司贝尔实验室
PCVD	联邦德国专利 Ger.Pat. 2444100, 1974 年	荷兰飞利浦
VAD	USP 4062665, 1977 年	日本 NTT

之后，各国的研究工作主要集中于了解预制棒制造工艺包含的物理化学机理、研制设备、建立工艺过程控制、研制各种光纤、努力降低损耗、提高带宽等方面。在 1979 年至 1980 年前后，美、日等发达国家开始了小规模生产，大都是单独利用以上某种工艺制造直接用于拉丝的梯度多模预制棒，棒都比较小，每根棒可拉出的光纤只有几千米到几十千米。

直到 20 世纪 80 年代初，随着单模光纤取代梯度多模光纤成为市场主流产品，光纤市场迅速扩大，单模光纤的大规模经济生产成为发展的重点，国际上开始用套管法作为增大预制棒的措施。MCVD、PCVD、VAD 工艺都用套管法开始了单模光纤的商业化生产。

2.2.2 外部气相沉积工艺(OVD)

OVD 工艺模拟图如图 2-4 所示。