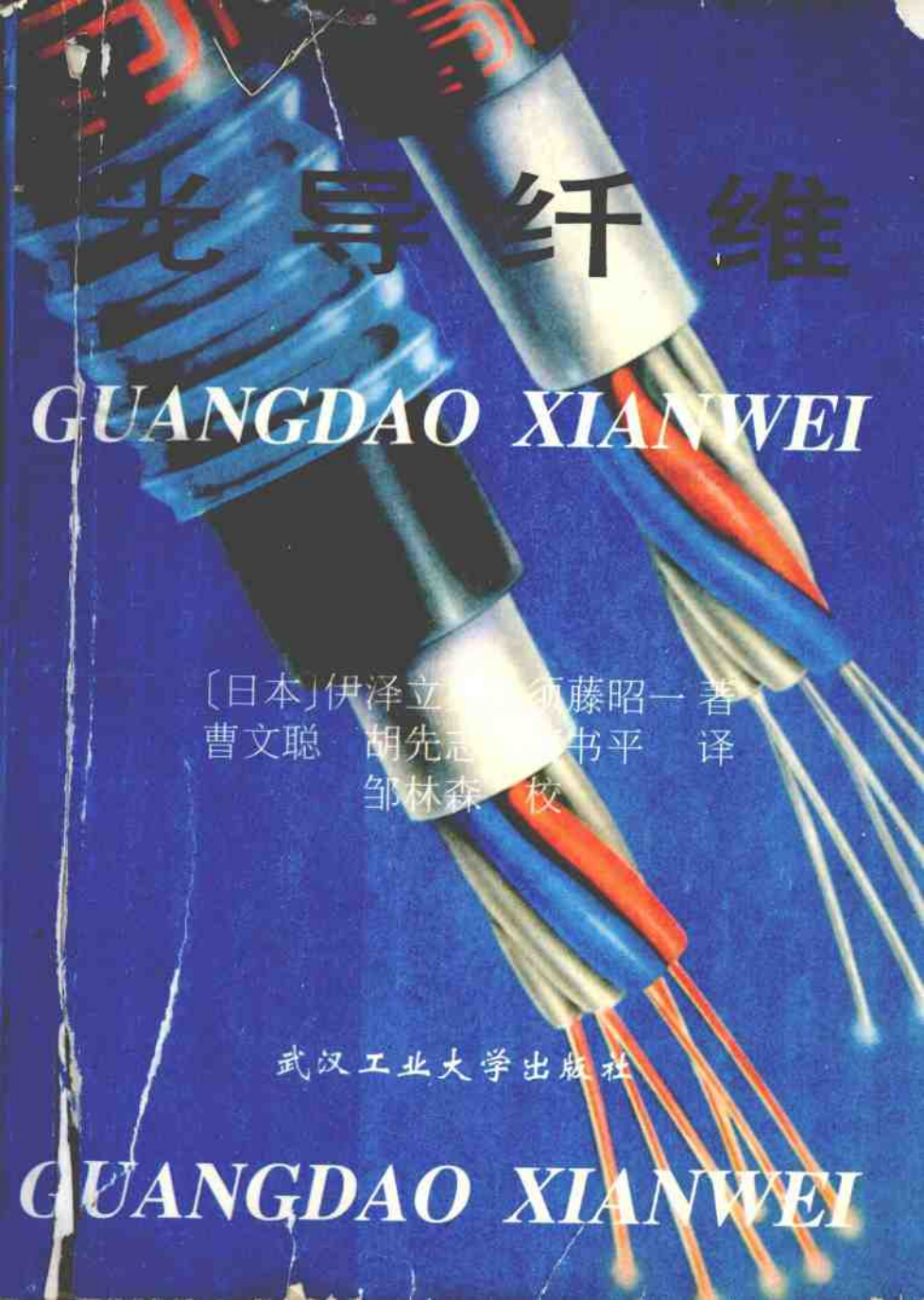




光 导 纤 维

GUANGDAO XIANWEI

〔日本〕伊泽立夫 须藤昭一 著
曹文聪 胡先志 书平 译
邹林森 校

武汉工业大学出版社

GUANGDAO XIANWEI

7028
13

光导纤维

[日本] 伊泽立男 须藤昭一著

曹文聪 胡先志 何书平译
邹林森 校

武汉工业大学出版社

(鄂)新登字 13 号

内容提要

本书由当今世界上广为采用的光纤制备方法之一的气相轴向沉积法发明者,现供职于日本电话公司茨城研究所的伊泽立男博士和须藤昭一博士共同撰写。

本书较全面地论述了光纤材料与制造所涉及的材料种类、性能及选择原则,光纤制造方法的基本原理、工艺设备及过程,光纤的传输特性及有关生产工艺技术中的诸多实际问题,并详细介绍了气相轴向沉积法工艺及主要技术关键,这是迄今为止国内外同类著作所不及的。

本书的特点是在论述光纤材料及制造的过程中,注意材料和制备的基本原理的阐述,并以大量的清晰照片、直观的图表及实验结果将实验室研究与实际生产有机地结合,无论是对光纤通信领域的教学、科研,还是对从事材料科学研究的科技人员,本书都不失为有参考价值的专著。

光导纤维

© [日]伊泽立男 须藤昭一 著

曹文聪 胡克志 何书平 译

邹林森 校

徐杨 责任编辑

武汉工业大学出版社出版发行

湖北省沙市市印刷一厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:7.375 字数:165千字

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数:1—1500册 定价:15元

ISBN7-5629-0948-2/TB·11

译 序 1

人们越来越充分认识到,技术进步和国民经济建设的各个领域无不以材料科学的发展及其应用作为先导。同样,近年来,世界各国通信事业的高速发展也是得益于光纤材料所具有的优异性能,当前正在蓬勃发展的信息高速公路,正是依靠高性能的光纤、光缆组成的通讯网络,它将把人类社会带进真正意义的信息社会。

由日本伊泽立男博士和须藤昭一博士编著的《光导纤维》一书总结了两位著者自 1970 年代以来,所从事的光纤材料制备工艺及性能方面研究的成果,为读者系统介绍了光纤材料的种类、性能、选择原则;光纤制造方法的基本原理、工艺过程及设备;光纤的传输性能及光纤生产工艺技术关键等。由于书中给出了大量照片、图表和实验结果,使该书在系统阐述基本原理的同时,还具鲜明的实用性。笔者高兴地看到由武汉工业大学曹文聪副教授和武汉邮电科学研究院胡先志、何书平两位工程师翻译,由武汉邮电科学研究院邹林森高级工程师译校的《光导纤维》中译本即将由武汉工业大学出版社出版,这本兼有学术专著和教材特色的译著的出版,对于光纤材料和有关材料学科的生产、科研、教学都将起到促进作用。在深为本书的编著者、译者、审校者及有关出版人员的奉献精神所感动的同时,愿借此机会,向从事材料科学领域的生产、科研、教学工作的同行们推荐此书。

袁润章

1994. 12.

译 序 2

光纤作为光通信的传输媒介,以其大容量、宽频带等优点使得通信技术发生了一次“重大变革”。当今,光通信已成为一门新兴的学科。光纤的组成已由氧化物扩展到非氧化物、高分子材料等;在制备工艺上,已由气相沉积工艺向着溶胶-凝胶、机械挤压成型等新工艺开展研究;在性能上,已开展了范围广泛的各类光学性能和电学性能等研究;在应用方面,出现了新型光纤,如偏振光纤、红外光纤、光纤放大器等;它们正在从实验室走向实际应用,影响着社会的各个方面,造福于人类。

伊泽立男博士和须藤昭一博士,自70年代中期起就在日本电报电话公司茨城电信研究所从事光纤材料、制备工艺及性能等方面的研究。由于他们的学识造诣深,敬业精神佳,因而在1977年共同发明了闻名于世的气相轴向沉积工艺。

全书凝集了两位著者的学术思想和研究经验。它不同于国内外已出版的光纤通信原理性叙述及解说性的相关著作,而是从光纤材料的种类、材料的性能、材料的选择原则及光纤制备方法到光纤性能的测试及应用,总揽光纤材料及制备工艺的科学成就,憧憬新型光纤研究的绚丽前程。特别是作者在详细论述光纤材料及气相轴向沉积工艺时,本着兼收并蓄之长的学风,还简要介绍了MCVD和OVD工艺的精髓所在。

本书的出版无疑将对从事光纤材料、制备工艺及性能研究的科技人员以及材料科学等相关专业的大专院校师生都会起到启迪作用,成为他们必读的参考书和教科书。

本书译文流畅,词义选用贴切,反映了原文的风格与情趣,但因此书有着一定的深度和广度,译文如有不妥之处亦请读者赐教。本着让更多的中国同行参阅方便而充分利用这本专著的动机,乐于举荐并为之作序。

国家光纤通信技术工程研究中心技术委员会主任

赵梓森

1994年10月

于邮电部武汉邮电科学研究所

前 言

对于光子与固体材料之间的相互作用现象,许多科学家饶有兴趣;但仔细地研究这种作用的寥寥无几。所以,对于象“什么是最透明的固体材料?”、“固体材料的透过极限是多少?”等简单问题,人们难以作答。

C·K·Kao^①曾预言光纤的衰减是能够降低的。自那时起,科技工作者就在不懈地努力以使这一预言变为现实,其中大多仅限于对光纤材料的选择和制备工艺的研究。在全球性的竞争中,用OVD、MCVD或VAD工艺制备的掺杂石英玻璃光纤鹤立鸡群。当今已能制得传输衰减低达0.15dB/km的石英玻璃光纤。然而,要想制得超低衰减的光纤从而实现横跨太平洋或大西洋的无中继通信仍然是人们梦寐以求的事情。

在低衰减光纤的研制过程中,已有各种有关光导纤维的教科书和专著出版,其中大多数仅阐述光波导的理论知识。本书所介绍的是光纤的实用性问题,如光纤材料及制备工艺。书中列举了作者及其在NTT茨城研究所的同事所测定的各种光纤材料的光学、热学、化学及机械性能数据。作者还从对低衰减光纤制备过程中重要影响因素的正确理解出发,阐明了光纤的制备工艺。本书还详细地介绍了由作者所研制的VAD工艺。这些内容不仅对于从事光纤研制的人员有用,对于通信系统设计人员、光缆设计者及相关工程技术人员都是十分有益的。

^① 英籍华人高锟博士。——译者注

尽管对实现小于 0.01dB/km 的超低衰减光纤持悲观态度，但我们相信，本书将有助于读者理解影响低衰减光纤制备的重要而有效的因素。

衷心地感谢 NTT 茨城研究所的同事为本书提供了大量的有关光纤材料和制备工艺的数据。特别值得感谢的是芝田博士、宫博士、坂口博士及高桥博士为我们提供一些有价值的资料。在此也向在本书的编写过程中始终给予鼓励的大越教授表示诚挚的敬意。

著者 伊泽 须藤

目 录

1 光纤材料	1
1.1 光纤材料	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 氧化物玻璃	5
1.1.3 卤化物玻璃	8
1.1.4 硫化物玻璃	9
1.1.5 单晶和多晶	9
1.1.6 塑料	9
1.2 光纤材料的光传输衰减	10
1.2.1 引言	10
1.2.2 声子吸收	14
1.2.3 电子跃迁吸收	18
1.2.4 弱吸收拖尾	19
1.2.5 散射衰减	21
参考文献	24
2 纯石英玻璃和掺杂石英玻璃的光学性能	29
2.1 传输衰减	29
2.1.1 引言	29
2.1.2 声子吸收与多声子吸收	30
2.1.3 紫外吸收及其拖尾	36
2.1.4 杂质吸收	39
2.1.5 散射衰减	43
2.1.6 石英光纤的总衰减	44
2.2 折射率	46

2.2.1 折射率色散	46
2.2.2 材料色散	49
2.2.3 剖面色散	54
2.2.4 温度关系	56
2.3 线性热膨胀系数	58
参考文献	60
3 石英光纤的制造工艺	62
3.1 引言	62
3.2 MCVD 工艺	65
3.2.1 MCVD 工艺所用设备	68
3.2.2 管径控制	70
3.2.3 石英玻璃管的抛光	72
3.2.4 羟基杂质的减少	74
3.2.5 最佳沉积温度	76
3.3 外气相沉积工艺	78
3.4 拉丝	80
3.4.1 拉丝设备	81
3.4.2 直径控制	83
3.4.3 强度	83
参考文献	90
4 气相轴向沉积工艺	93
4.1 引言	93
4.2 预制棒制造设备	95
4.2.1 多孔预制棒制造室	97
4.2.2 烧结炉	98
4.2.3 牵引装置	100
4.2.4 排气系统	102
4.3 多孔预制棒制造	103

4.3.1 玻璃微粒的合成与沉积	103
4.3.2 多孔预制棒的制备与尺寸控制	106
4.3.3 同步包层形成	109
4.3.4 多孔预制棒的高速生产	112
4.4 脱水与烧结	114
4.4.1 实验结果	117
4.4.2 烧结终止的模型	120
4.4.3 烧结条件	123
4.5 脱水	126
4.5.1 脱水原理	127
4.5.2 最佳脱水温度	129
4.5.3 水的蒸气压	130
4.5.4 脱水剂压力	132
4.5.5 脱水时间	132
4.5.6 脱水剂类型	133
4.5.7 包层厚度	134
4.6 折射率剖面控制	136
4.6.1 引言	136
4.6.2 掺杂浓度	137
4.6.3 折射率剖面形成机理	144
4.6.4 折射率剖面控制方法	150
4.6.5 氟掺杂	155
参考文献	157
5 多组分玻璃光纤和非石英光纤的制造工艺	164
5.1 多组分玻璃光纤	164
5.1.1 制造工艺	164
5.1.2 原材料的提纯	167
5.1.3 气泡形成	171

5.2 氟化物玻璃光纤	172
5.3 硫化物玻璃光纤	177
5.4 晶体光纤	179
5.5 塑料光纤	179
参考文献	183
6 光纤的传输特性	187
6.1 单模光纤	187
6.1.1 传输衰减	187
6.1.2 传输带宽	188
6.1.3 弯曲损耗	196
6.2 梯度折射率分布石英光纤	201
6.2.1 传输衰减	201
6.2.2 带宽	202
6.2.3 折射率波动	202
6.3 掺 Al_2O_3 石英光纤	204
6.4 由氢渗透引起的衰减	208
6.5 多组分玻璃光纤	210
6.6 非石英光纤	211
6.6.1 氟化物玻璃光纤	211
6.6.2 硫化物玻璃光纤	213
6.6.3 晶体光纤	216
6.6.4 塑料光纤	217
参考文献	219

光纤材料

本章着重从光纤材料的选择角度出发来阐述固体材料的基本光学性能。在制备实用光纤时需要考虑许多问题,如光衰减、折射率、细光纤的形成能力、物理和化学稳定性以及制造成本等;而材料选择最重要的因素是材料的光衰减性能。尽管材料在超低衰减区的光衰减机理并不十分清楚,但本章中的许多实验数据将对光纤应用中的材料选择起到显著作用。

1.1 光纤材料

1.1.1 引言

光纤材料涉及到的问题众多,其中应考虑的主要因素有:

(1) 光衰减性能:本征衰减与非本征衰减的降低潜力是极为重要的。

(2) 折射率控制:要制造优质光纤,必须精确地控制径向折射率剖面并减小轴向的折射率波动。

(3) 形状控制:光纤横截面形状与大小、表面光洁度以及沿光纤轴向的尺寸波动强烈地影响着光纤的传输特性。

上述三要素对获得优质光纤是十分必要的。当材料形状的可控性不好时,即使该材料的本征衰减极小,也难得制造出优质光纤。一些晶体材料就属这一类。虽然能在碱金属卤化物晶体

中找到光衰减极小的材料,但还未研制出令人满意的方法来控制晶体材料的几何形状。

除上述三方面以外,在光纤的实际应用中还必须考虑光纤的化学稳定性和机械强度。易吸水材料,即使其光衰减极小,也不适宜作为光纤材料。机械强度也是选择光纤材料的重要条件,因为在实用中光缆会遇到极度的弯曲和拉伸。尽管这些方面能采用加强件和防潮膜、通过某些工程设计来解决;然而,更可取的仍是光纤材料自身应具有良好的化学稳定性和高的机械强度。

溯源而观,为了光传输的应用,已经研究了各种各样的光传输波导。因此,重要的是考虑哪一种物质,即气体、液体、晶体或玻璃最适用于优质光纤。尽管在可见光和近红外光区域,各种气体的光衰减是极小的,但气体物质的致命缺点是它们的折射率控制困难。为了实现气体波导,已作了许多实验。在这些实验中,通过改变波导中心与波导周边之间的温度来控制其折射率。空心波导管是一种金属管或一种电介质管。有时用在红外波段,它的传输衰减主要取决于波导管材料与波导管的表面光洁度。

一些液体物质也是光的低衰减介质,适合于制作光纤。在透明的液体物质中可供选择的折射率种类很多。在低衰减光纤的发展过程中已研制出液芯纤维,即液体充满细玻璃管的纤维。可是液体的折射率随温度变化十分显著,致使精确地保持波导特性变得极为不易。此外,对实际使用来说,仅能制造出阶跃型多模光纤。

与气体和液体相比,固体材料与光的相互作用要强得多。因此,一般来说,固体材料的传输衰减可能更大,可是其光学性能却更加稳定。在紫外和红外波段,固体材料具有强烈的吸收,分

别由于电子跃迁和分子振动。这些吸收峰会影响在可见光和近红外光区的吸收衰减。为寻找低衰减材料,最好选择那些强吸收峰彼此远离的材料。固体材料分为两类,即晶态和非晶态。尽管这两种状态的原子组成相同,但它们的光学性质是截然不同的。晶体材料如石英、蓝宝石、碱金属卤化物晶体所具有的光衰减比非晶体材料低得多。究其原因是晶体材料中由于密度波动而引起的瑞利散射衰减仅为非晶体同类衰减的 $1/10$ 。从本征衰减的观点来说,在单晶中可找到最理想的材料。然而,单晶体的快速生长或单晶纤维的大规模生产都极为困难,而且晶体材料的折射率控制也非常不易。实际上,掺杂过多的折射率调整体到基质晶体中去,有时会使它很难生成大的单晶体。此外,由于长成的单晶体具有特定的晶面,这就使得纤维表面和芯/包界面变得粗糙,从而引起大的散射衰减。

尽管多晶体材料的传输衰减相当大,但它们仍是可用的。引起多晶体衰减增大的主要原因是晶界处的光散射。因为散射强度非常大,故多晶光纤的传输衰减比由多晶材料固有性质预计的传输衰减大得多。在红外波段,只可用多晶光纤,因为除碱金属卤化物晶体外,在该波段可用的材料很少。

非晶态物质或玻璃是理想的光纤材料,因为某些氧化物玻璃、氟化物玻璃和硫化物玻璃在可见光和红外波长区域具有高透光性。这些玻璃极易制成纤维,且不会引入如特定的晶面粗糙度或晶界之类的非本征散射源。而且,通过改变这些玻璃的组成比例很容易控制它们的折射率,而又不会严重限制玻璃的形成条件。对于由密度波动和成分波动而产生的瑞利散射衰减而言,非晶材料比晶体材料大得多。然而,非晶材料的瑞利散射衰减却大大小于多晶材料由晶界散射所引起的衰减。

玻璃是以冷凝某些熔体的方法而制得的。在冷凝的方式下，玻璃不析晶而保持着非晶态，且粘度值增大得很多，以至于玻璃呈现为固体。具有在冷凝条件下不析晶能力的材料为数极少，二氧化硅便是最常见的例子。某些氧化物和它们的混合物极易制成玻璃。氧化物玻璃，特别是石英玻璃，具有高的透可见光和近红外光的能力，且具有良好的化学稳定性和高的机械强度。通过掺杂某些氧化物，如 GeO_2 、 Al_2O_3 和 TiO_2 能容易地改变石英玻璃的折射率。另外，石英玻璃的原材料价格低廉。因此作为低衰减光纤材料，石英玻璃是最适合的材料之一。

将石英玻璃用于光通信的想法由来已久，有关内容可在 1936 年的日本专利中查到。然而，据科技研究成果报道，首次公开预言是在 1965 年由英国标准通信实验室的高锟和 Hockham 提出的。他们推测，要是能把石英玻璃中的过渡金属含量减小到 1ppm，那么由吸收引起的传输衰减将会下降到小于 20dB/km 。同时估算出石英玻璃的散射衰减也会减小到大约 1dB/km 。因此预示石英玻璃的总衰减可以减小至 20dB/km 以下。

1970 年，康宁公司的 Kapron 及其同事成功地制造出一根光传输衰减小到 20dB/km 的光纤。正是这一成功，使得将光纤推向实用的研究日趋活跃。历经大约 10 年对各种制造方法和光纤材料的深入研究，已制得了掺杂石英玻璃光纤，其光衰减低于 0.2dB/km 。虽然已有许多讨论小于 10^{-2}dB/km 超低衰减光纤的可能性的报道，但对碱金属卤化物来说，除了石英玻璃外，要想制得衰减低于 0.2dB/km 的光纤似乎很不易。

氧化物玻璃、氟化物玻璃、硫化物玻璃、碱金属卤化物晶体和塑料都是低衰减材料的典型供选材料，在下节中，将从光纤材料的观点来综述典型的透可见光和近红外光材料的基本特性。

图 1.1 示出了在可见光和近红外波长区域,典型的透光材料的传输衰减小于 1000dB/km 的透过波长范围。

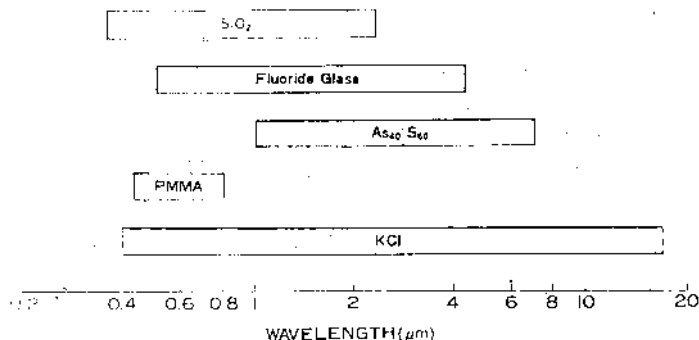


图 1.1 典型的高透光材料透光波长的大致范围

图中示出了传输衰减小于 1000dB/km 的波长范围,
对 KCl 晶体,其波长范围是由已知数据外推而得的

1.1.2 氧化物玻璃

当液体物质经缓慢冷却时,在特征温度(即熔点)下,将放出其潜热而变成晶体。然而一些特殊材料即使在它们的熔点之下也不结晶,而且它们的粘度增大到很高的数值以致于成为固体。这些固体中的原子排列是无序的,与液体中的原子无序排列十分相似。过冷液体被称为玻璃。从热力学观点来看,玻璃是不稳定的,因为玻璃态的焓比晶体的焓更高。

一些自身具有形成玻璃能力的氧化物称为网络形成体。 SiO_2 、 GeO_2 、 B_2O_3 、 P_2O_5 、 As_2O_3 和 Sb_2O_3 都是众所熟知的玻璃网络形成体。网络形成体既可自身形成玻璃,又可与其它网络形成体以任一比例混合而形成玻璃。Zachariasen 提出了要形成稳定玻璃应满足的条件,即将玻璃形成能与晶体形成能相比而获得