

光学纤维基础

[日] 大越孝敬 编



GUANGXUE XIANWEI JICHU

光 学 纤 维 基 础

〔日〕大越孝敬 编

大越孝敬 岡本胜就 保立和夫 执笔

刘时衡 梁民基 译

白其章 校

邮电出版社

光ファイバの基礎

大越孝敬 編

執筆 者

東京大学工学部 大越孝敬

日本電信電話公社 岡本勝就

東京大学工学部 保立和夫

1977年

内 容 簡 介

本书重点讲述光学纤维传播特性方面的理论,是光通信的理论基础读物。全书共分十一章,首先综述光通信和光学纤维的研究史,然后讲述有关光学纤维的基本概念及光线理论和波动理论,以及各种分析方法的分类和比较等,后面的一些章节介绍光学纤维折射率分布和色散特性的测定技术。书末的附录则是对有关章节中一些复杂公式的推导或补充说明。

本书可供从事光学纤维工作、光通信工作的人员及通信专业的师生阅读。

光 学 纤 维 基 础

[日]大越孝敬 編

大越孝敬 岡本勝就

保立和夫 執筆

刘时衡 梁民基译

白其章 校

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本, 850×1168 1/32 1980年7月第 一 版

印张, 9 16/32 页数, 152 1980年7月河北第一次印刷

字数, 244 千字 印数, 1—5,200 册

统一书号: 15045·总2388—有5165

定价: 0.87 元

校 者 的 话

光纤通信近年来得到了迅速发展。构成光纤通信基础之一的光学纤维（或称为光导纤维）在质量上也不断地得到提高。例如在传输损耗方面，近来日本 *NTT* 通信研究所已可制出低到 0.2dB/k （ $\lambda=1.55\mu\text{m}$ ）的单模光纤，这个数值已接近石英光纤损耗的理论极限最低值。随着研究工作的进展，光纤的传播理论也日趋完善，近年来已出现了不少这方面的著作。本书编著者大越先生是日本东京大学的教授，有丰富的教学经验，在光学、电子学以及电磁场理论方面都有较高造诣。他主编的这本书在日本是得到好评的。

本书原来是依照原版“第一次印刷”本译校的。今年，大越先生来华进行讲学，在这次讲学活动之后，大越先生热情地把本书原版的“第三次印刷”本和历次印刷过程中的正误表赠送给我，使我在阅时能对译文加以校正，从而日臻完善。为此，谨向大越先生致谢。

白其章

一九七九年十二月

35443

序 言

本书以光学纤维的理论基础为重点，主要论述与光学纤维传播特性有关的理论，至于光学纤维的制造技术和光通信应用等方面，则不专门做有系统的描述。在制订本书写作计划初期，也曾考虑过适当地讲讲制造技术等，写成一本较全面地论述光学纤维的书。但由于下段所述的几点理由，遂决定按照“单打一”的方针开始写作。

理由之一是，制造技术等迄今已经历过多次翻新，而今后短时期内还会继续革新。要想编撰有关光学纤维制造法方面的教科书，看来还为时尚早。理由之二是，考虑到著者们都是属于从电磁场理论逐渐转向研究光学纤维的，因而在涉及纤维的制造方面，以等到适当时日由更称职的专家执笔为宜。最后一个理由（内部的理由）是，由于这本书预定用作东京大学研究院“电气电子工程学”专业课程的全年基础课“电磁场与光波分析”的第二学期的教科书，页数有限，遂想到把重点移向电磁场理论方面来讲授。

著者们所在的研究室，大约在五年前开始了光学纤维的研究，当时，有关光学纤维传输特性的理论还处在极不成熟阶段，尤其是在文字符号的使用方面，因研究者不同也因分析方法不同而有差异。直到七十年代中期即去年前后，各种各样的分析方法算是大部分出齐，令人感到已进入来讨论这些分析方法的相互关系和比较它们的优缺点的阶段了。但是，文字符号使用上因分析方法不同而全异的状态，即令到目前也未见显著改善。为此，著者们在学习其他研究者的理论或者进行相互比较或在撰写自己的论文时，颇感不便。本书写作的直接动机之一就在于将有关光学纤维的光线理论、

电磁场理论、WKB法分析、变分法分析以及多层理论等，都以共同的文字符号统一论述，并阐明其相互关系。

至于本书的结构，简单地说，第一章叙述光通信和光学纤维的研究历史；第二章讲光学和电磁波理论的某些基础知识，这些知识是学习光学纤维理论时所必需的；第三、四、五章说明光线理论、电磁场理论、WKB法分析、变分法分析、多层理论等种种传输特性的分析方法；第六章是将上述方法加以比较，讨论它们之间的关系并比较其优缺点；第七章讨论如何确定单模光学纤维和多模光学纤维两者的最佳折射率分布；第八章处理光学纤维结构有不均匀性的问题；第九章和第十章介绍与传输特性有密切关系的测定技术，分别讲述折射率分布的测定和色散的测定。第十一章以结束语的形式概述了光学纤维技术的当前状况并展望其未来的发展趋势。著者们本身的工作也是限于变分法分析、多模光纤最佳折射率分布的合成、由散射图样法测定折射率分布、脉冲响应的逆算技术等四个方面，这次分别承担编写有关章节，但我们已注意到不能各自为阵而使全书失去平衡。

本书写作之先，曾有过充分协商，在按下述分工撰稿过程，仍保持相互联系，最后由大越复校全文，使论点一致，文脉沟通，并期符号与文体的统一。

第一章 大越	第七章 岡本
第二章 大越	第八章 保立
第三章 大越	第九章 保立
第四章 岡本	第十章 大越
第五章 岡本·大越·保立	第十一章 大越
第六章 保立·岡本	

趁本书出版之际，愿向下述人士表示深切的谢忱，他们是：对本书著者等的研究活动一贯给予热情支持的东京大学工学院电力工程系与电子工程系的各位教师，特别是岡村总吾教授、柳井久义教授和神谷武志助理教授；以及作为直接参与光学纤维研究或于每周

一次的研究室讨论会介绍本书论及的文献，而直接间接地对本书完成作出过贡献的东京大学电子工程系大越研究室的全体工作人员：还有始终热情关心我们的欧姆出版社的各位先生。最后补充一点，要对将本书著者等大部分初稿迅速精确地缮正为整洁的原稿的小野冢雅子先生表示衷心的感谢。

1976年11月28日脱稿之日

执笔者代表 大越孝敬

致 读 者

著者们设想，在从事光学纤维研究与发展的本书的读者中，有一部分人是打算通读全书，而另一部分人是只想知道本书的某些章节的。考虑到有各种不同的读者，特写出以下几点当作“向导”。

首先，对于进行严格通读的读者，恐怕是会在第四章开头的几个式子(4.7)~(4.12)处遇到困难的。但如果要想先说明 TE 、 TM 、 HE 、 EH 各模的区别，作为波动理论的出发点，是不得不预先提出这几个一般式的。不过从以后展开的论述来看，不一定必须理解这几个式子的细节。因此建议读者，先只需对这部分在概念上有所理解即可阅读下去，有必要时再看后面的附录4.4.1。

其次，对于只想概略地了解光学纤维特性的读者，希于熟读第一章之后，再以第三、四两章为主即可。第五章只需匆匆过目。第六至第八章主要是以这一课题的专业人员为对象，不看也无妨。

至于从事光学纤维制造工作、特别是这方面与测试技术有关的读者，完全可以从第一章跳到第九章和第十章，而不会在理解上有多大困难。

对于理论本身感兴趣的读者，特别是大学研究院的学生，请反复熟读第三至第五章。而且阅读第六章至第八章也还是很有兴趣的。

大越孝敬

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 前言.....	(1)
1.2 光学纤维问世前的光通信研究史.....	(2)
1.2.1第一阶段——目视通信.....	(2)
1.2.2第二阶段——光电方式.....	(3)
1.2.3第三阶段——传光线路的探索	(3)
1.2.4第四阶段——光学纤维问世	(12)
1.3 光通信研究史小结.....	(14)
1.4 本书的目的与构成.....	(14)
参考文献.....	(15)
第二章 基本概念	(18)
2.1 前言.....	(18)
2.2 波动方程.....	(18)
2.2.1麦克斯韦方程	(19)
2.2.2波动方程的推导	(19)
2.3 波动方程的解.....	(20)
2.4 波动方程解的分类.....	(21)
2.4.1平面波	(21)
2.4.2在两导体间传播的波	(22)
2.4.3在空心波导管中传播的波	(23)
2.4.4表面波	(23)
2.5 相速度与群速度.....	(24)
2.6 传输功率.....	(25)

2.7	程函方程	(26)
2.8	光线方程	(29)
2.9	在两种介质界面上的折射与反射	(31)
2.9.1	斯涅耳定律	(31)
2.9.2	入射波的电场方向垂直于入射面的情形	(31)
2.9.3	入射波的电场方向与入射面平行的情形	(32)
2.10	光学纤维传输损耗的生成机理	(33)
2.10.1	损耗的主要原因	(33)
2.10.2	本征损耗的机理	(34)
2.10.3	杂质吸收	(35)
2.10.4	结构缺陷	(35)
2.11	光学纤维的制造法	(35)
2.11.1	制法种类	(35)
2.11.2	双坩埚法	(36)
2.11.3	CVD法	(36)
	参考文献	(37)
第三章	光学纤维的光线理论分析	(38)
3.1	前言	(38)
3.2	均匀芯子光学纤维的光线理论分析	(39)
3.2.1	光学纤维中的光线种类	(39)
3.2.2	子午光线的分析	(40)
3.2.3	数值孔径	(41)
3.2.4	子午光线的色散	(41)
3.2.5	斜光线分析	(43)
3.3	非均匀芯子光学纤维的光线理论分析	(44)
3.3.1	光学纤维中的光线种类	(44)
3.3.2	基本方程	(44)
3.3.3	解的实例(1)——子午光线	(45)
3.3.4	解的实例(2)——螺旋光线	(48)

3.4	小结	(50)
	参考文献	(50)
第四章	均匀芯子光学纤维的波动理论分析	(51)
4.1	前言	(52)
4.2	光学纤维的波动理论	(52)
4.2.1	基本方程的推导	(52)
4.2.2	对于各种模的标量波动方程	(55)
4.2.3	标量波动方程和边界条件	(61)
4.3	均匀芯子光学纤维的各种特性	(63)
4.3.1	色散方程	(63)
4.3.2	截止频率	(67)
4.3.3	LP 模	(67)
4.3.4	色散曲线	(69)
4.3.5	电磁场分布	(72)
4.4	均匀芯子光学纤维的色散特性	(76)
4.4.1	产生色散的各种原因	(76)
4.4.2	时延的表示式	(77)
4.4.3	时延的计算例	(80)
4.4.4	波导色散	(81)
4.4.5	材料色散	(82)
4.4.6	多模色散	(82)
4.4.7	各种色散的大小比较	(82)
4.5	小结	(85)
	参考文献	(85)
第五章	非均匀芯子光学纤维的波动理论分析	(86)
5.1	前言	(86)
5.2	基本方程	(88)
5.2.1	矢量波动方程和标量波动方程	(88)
5.2.2	$x-y$ 坐标系表示和 $r-\theta$ 坐标系表示	(89)

5.2.3 标量波动方程的解法	(91)
5.2.4 矢量波动方程的解法	(91)
5.3 非均匀芯子光学纤维的 WKB 法分析	(92)
5.3.1 基本概念	(92)
5.3.2 传播模的 WKB 法分析	(95)
5.3.3 WKB 近似解的精度	(97)
5.3.4 转折点附近的解	(98)
5.3.5 解的连续性和本征方程的推导	(99)
5.3.6 漏泄模的 WKB 法分析	(100)
5.4 多模光学纤维传播特性的 WKB 法计算	(101)
5.4.1 传播模数	(102)
5.4.2 时延和 α 的最佳值	(106)
5.4.3 脉冲响应	(106)
5.5 非均匀芯子光学纤维的变分法分析	(109)
5.5.1 变换成变分问题的方法	(109)
5.5.2 色散方程	(111)
5.5.3 色散方程的数值解	(113)
5.5.4 时延	(113)
5.6 α 次方分布的光学纤维的变分法分析	(116)
5.6.1 α 次方分布表示	(116)
5.6.2 色散方程与电磁场分布	(117)
5.6.3 截止条件	(120)
5.6.4 时延	(121)
5.6.5 α 和 ρ 的最佳值	(122)
5.6.6 折射率分布的“沟”的效应	(127)
5.6.7 漏泄模的影响	(128)
5.7 非均匀芯子光学纤维的多层分割法分析	(131)
5.7.1 概说	(131)
5.7.2 基本方程	(133)

5.7.3 传输矩阵和边界矩阵	(135)
5.7.4 色散方程	(136)
5.7.5 近似条件的引入	(137)
参考文献	(139)
第六章 各种分析方法的分类和比较	(141)
6.1 前言	(141)
6.2 光学纤维的各种波动理论分析方法的相互比较	(142)
6.2.1 概说	(142)
6.2.2 非均匀芯子光学纤维的分析方法	(143)
6.3 波动理论同光线理论的关系	(147)
6.3.1 概说	(147)
6.3.2 问题的假设条件	(147)
6.3.3 波动方程及其 WKB 法的解	(148)
6.3.4 光线方程和它的解	(150)
6.3.5 模的概念同光线概念的关系	(151)
6.3.6 传播常数同光线弯曲行进周期的关系	(153)
6.3.7 光线速度和群速度	(153)
6.4 小结	(157)
参考文献	(157)
第七章 光学纤维的最佳折射率分布	(159)
7.1 前言	(159)
7.2 单模光学纤维的最佳折射率分布	(160)
7.2.1 W 形光学纤维的设想	(160)
7.2.2 色散方程	(161)
7.2.3 色散特性	(163)
7.3 多模光学纤维最佳折射率分布的合成方法	(165)
7.3.1 约束条件	(165)
7.3.2 用变分法分析光学纤维的传播特性	(166)
7.3.3 多模色散的指标	(166)

7.3.4用Newton-Raphson法修正折射率分布	(167)
7.3.5合成的结果.....	(169)
参考文献.....	(174)
第八章 具有结构不均匀性的光学纤维理论	(175)
8.1 前言.....	(175)
8.2 由不均匀性引起的模变换.....	(176)
8.2.1模变换改善了色散特性	(176)
8.2.2功率耦合方程	(177)
8.2.3模的简并	(179)
8.2.4基本方程	(180)
8.2.5脉冲响应	(183)
8.2.6脉冲延迟和脉冲宽度	(186)
8.3 芯子形状的不均匀性带来的光散射.....	(187)
8.3.1散射电场的表示式	(187)
8.3.2芯子直径成阶梯状变化时造成的散射	(189)
8.3.3芯子直径成正弦状变化时造成的散射	(192)
8.3.4其他类型的不均匀性造成的散射	(194)
8.4 小结.....	(195)
参考文献.....	(195)
第九章 折射率分布的测量	(196)
9.1 前言.....	(196)
9.2 散射图样法.....	(198)
9.2.1散射图样的测量系统	(198)
9.2.2折射率分布的反推计算公式的推导	(199)
9.2.3散射图样的极性判别法	(201)
9.2.4散射图样法的精度	(202)
9.2.5散射图样法的空间分辨率	(204)
9.2.6折射率分布的测量系统	(205)
9.2.7测量例	(206)

9.2.8其他利用到散射图样的方法	(208)
9.3 干涉法	(212)
9.3.1干涉法的原理	(212)
9.3.2使用干涉显微镜的方法(1)	(213)
9.3.3使用干涉显微镜的方法(2)	(215)
9.3.4微分干涉法	(216)
9.3.5由使用成象透镜的干涉仪进行预制块料内部折射率分 布的测量	(218)
9.3.6利用光学纤维两端面反射光干涉的方法	(220)
9.4 端面反射法	(222)
9.4.1原理	(222)
9.4.2测量例	(224)
9.4.3空间分辨率的改善	(224)
9.4.4微振动反射法	(225)
9.5 其他方法	(225)
9.5.1利用近场图样的方法	(225)
9.5.2用X射线显微分析仪测量折射率分布	(227)
9.5.3测量平方分布型纤维的高次项系数	(228)
9.5.4使用匹配油的方法	(228)
9.5.5使用扫描电子显微镜的方法	(228)
9.6 小结	(229)
参考文献	(230)
第十章 光学纤维色散特性的测量	(232)
10.1 前言	(232)
10.1.1色散的种类	(232)
10.1.2色散大小的表示方法	(233)
10.2 色散特性测量方法的分类	(233)
10.3 脉冲法	(235)
10.3.1测量系统的构成	(235)

10.3.2	脉冲响应的表示方法	(235)
10.3.3	脉冲响应的简单表示	(236)
10.3.4	脉冲响应的正确计算方法(1)——福里哀变换法	(237)
10.3.5	脉冲响应的正确计算方法(2)——直接法	(237)
10.3.6	多模色散分离测量法	(241)
10.4	扫描调制法	(242)
10.4.1	测量系统的构成	(242)
10.4.2	全色散测量实例	(243)
10.4.3	多模色散分离测量法	(243)
10.5	频谱分析法	(244)
10.6	往复脉冲法	(246)
10.7	模群类别多模色散测量法	(248)
10.8	小结	(252)
	参考文献	(252)
第十一章	结束语	(254)
	参考文献	(256)
附录		(257)
4A.1	基本方程式(4.7)~(4.12)的推导	(257)
5A.1	式(5.3)、(5.4)的圆柱坐标系中的解〔式(5.10)、 (5.11)的推导〕	(262)
5A.2	Airy函数 $Ai(x)$ 、 $Bi(x)$ 的定义及其公式	(263)
5A.3	式(5.112)的推导	(265)
5A.4	式(5.117)的推导	(267)
5A.5	式(5.118)的推导	(268)
5A.6	式(5.119)的推导	(269)
5A.7	式(5.137)的推导	(272)
5A.8	式(5.138)和(5.142)的推导	(274)
5A.9	式(5.148)的推导	(276)
5A.10	传输矩阵〔式(5.178)〕各分量值	(279)

8A.1	平方分布光学纤维的模的简并(8.2.3节)·····	(281)
8A.2	式(8.27)的推导 ·····	(282)
8A.3	式(8.30)的稳定解 ·····	(282)
9A.1	汉克尔变换中的抽样定理(9.2.5节) ·····	(283)
9A.2	式(9.50)的推导 ·····	(284)