

通 信 光 纤

〔日〕 大越孝敬 冈本胜就 保立和夫 著

刘时衡 梁民基 译

白其章 校

人 民 邮 电 出 版 社

光ファイバ

東京大学・工学博士

日本電信電話公社・工学博士

東京大学・工学博士

才一ム社 1983

大越孝敬

岡本勝就 共著

保立和夫

内容提要

本书是在对《光学纤维基础》一书的内容作了全面修订，并增加了四章新内容的基础上重新编写而成的。本书重点是介绍通信光纤传输特性方面的理论。全书共分十二章，首先综述光纤通信及通信光纤的研究史；再讲述一些基本概念及光线理论和波动理论；然后介绍非轴对称光纤、多模光纤、单模光纤、结构不均匀的光纤，最后介绍通信光纤的折射率分布、色散特性和传输损耗的测量。本书各章均列有习题并有扼要的解答。书末为有关公式推导过程的附录。

本书可供从事光纤通信工作的技术人员及大专院校通信专业的师生阅读。

通信光纤

〔日〕大越孝敬 岡本勝就 保立和夫 著

刘时衡 梁民基 译

白其章 校

责任编辑：李树岭

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

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 1989年8月 第一版

印张：13 16/32 页数：216 1989年8月北京第1次印刷

字数：349千字

印数：1—2000册

ISBN 7-115-03699-3/TN·118

定价：6.05元

序 言

大约六年前，日本欧姆出版社出版了著者等三人所写的《光学纤维基础》一书（由大越主编，大越、冈本、保立合著，1977年版）*。这本旧著有幸再版并承蒙广大读者予以阅读，著者深感荣幸。然而由于旧著原稿的主要部分是1976年所写，至今已六年多了，而这段时间内光纤领域已获得了飞速的发展，最近就连著者等本人也发现该书存在着为数甚多的明显不足之处。

本书对上述旧著的内容作了全面的修订，并增加了很多篇幅。原考虑承袭旧著书名使本书作为《光学纤维基础（修订本）》。但考虑到这次增加了四章新内容，除此以外，在其他章节中也几乎没有保留旧著的原型。再者，由于内容从以旧书为中心的分析基础理论到光纤的设计问题都要加以扩大，因此，我们决定改书名为《光纤》**。另外，在书写旧著的当时，冈本胜就和保立和夫两位还是大学研究生院（攻读博士学位）的学生，所以在编者栏内除写上三人合著外又写上了“大越孝敬主编。”但是现在冈本、保立两位已成长为朝气蓬勃的研究人员，所以这次就把“大越孝敬主编”的字句予以略去。

在执笔之际，著者等经过充分酝酿之后，在互相联络和配合的情况下，对各章进行了下述分工，从而完成了本书的初稿。在第二阶段由大越精读了全书，作了进一步研究，使论点与文理更加合乎逻辑，并谋求符号与文体能够统一。以下括弧内是表示有关各章旧著的执笔人和修订的情况。

第一章“概论”

大越

（旧著也为大越执

* 该书中文译本已于1980年由人民邮电出版社出版——出版者

** 中文译本定名为《通信光纤》——出版者

第二章“基本概念”	大越	笔,此次全面修订) (旧著也为大越执笔,此次全面修订)
第三章“光线理论”	大越	(旧著也为大越执笔,此次较少修订)
第四章“波动理论”(均匀纤芯)	大越	(旧著为冈本执笔,此次全面修订)
第五章“波动理论”(非均匀纤芯)	大越	(旧著为冈本、大越、保立共同执笔,此次全面修订)
第六章“非轴对称光纤”	大越、冈本	(旧著中无此章)
第七章“多模光纤”	冈本	(旧著中无此章)
第八章“单模光纤”	冈本、大越	(旧著中无此章)
第九章“结构不均匀的光纤”	保立	(旧著也为保立执笔,此次全面修订)
第十章“折射率分布的测量”	保立	(旧著也为保立执笔,此次全面修订)
第十一章“色散特性的测量”	冈本	(旧著为大越执笔,此次全面修订)
第十二章“传输损耗的测量”	保立、冈本	(旧著中无此章)

请允许著者预先说明,最近通过一名著者(大越)以旧著为基础,并对旧著的内容大幅度改编后,已把它写成英文本«T.Okoshi: Optical Fibers, Academic Press, New York (1982)»。本书的第二章乃至第五章中有与该英文版非常相似的内容(已译成日文)。另一方面,最近电子通信学会大学丛书中有了一本名为«光电子学»的册子[大越著,日冕出版社(1982)]。其中同样有把上面列举的书籍译成日文的部分。因此,我想读者大概会发现,在论述均匀芯子光纤的基本特性部分(第二章的一部分,第三章的一部分以及第四章的大部分)中,本书与«光电子学»之间有相类似的内容。虽说是

同一作者，但在不同的书中有相似的地方也是不够理想的。其实这部分对执笔者大越来说，文章的每一个句子都是呕心沥血写成的，所以（主观上）不能不感到：即使对文章稍加润饰也势必会向不理想的方向发展（当然，从客观来说，这只不过是一种滑稽的设想）。因此这次经过苦心思虑，结果确信“对文章是可以加以改进和变动的，目的只是为了打破文章的相同性，而不见得就此会改变文章的体裁和论点。”关于这一点，深希读者及有关出版社多加海涵。

最后，对于著者等撰写本书的研究活动不惜任何代价始终给予支援的诸位朋友，尤其对提供宝贵资料的 NHK 技术研究所的小山田公之博士，以及始终亲临指导的欧姆出版社的诸君深致谢忱，在撰写本书过程中还得到了其他各方面朋友的大力协助，更应值得一提的是对竭尽全力为本书誊清原稿和复写整理的小野冢雅子女士表示衷心的感谢。

执笔者代表

大越孝敬

1983 年 3 月

目 录

第一章 概论

1.1 前言	(1)
1.2 从“烽火”到光纤通信	(1)
1.2.1 目视光通信	(1)
1.2.2 电气通信技术的高频率化	(3)
1.2.3 传光线路的探索	(4)
1.2.4 光纤问世	(7)
1.3 光纤的特征	(9)
1.4 小结	(10)
1.5 本书的目的与构成	(11)
习题	(12)
参考文献	(12)

第二章 基本概念

2.1 前言	(14)
2.2 波动光学基础	(14)
2.2.1 麦克斯韦方程	(14)
2.2.2 波动方程	(15)
2.2.3 传播常数	(16)
2.2.4 沿 z 方向行进的平面波	(17)
2.2.5 波导的分类 (表面波的概念)	(18)
2.2.6 传输功率	(20)
2.2.7 相速度与群速度	(21)
2.2.8 k - β 图	(21)
2.2.9 偏振光 (偏振波)	(22)
2.3 光纤的种类和色散特性	(25)
2.3.1 多模光纤与单模光纤	(25)
2.3.2 光纤的色散	(26)

2.3.3 各种色散的大小比较	(27)
2.3.4 非均匀纤芯的光纤	(28)
2.3.5 单模光纤材料色散与波导色散的抵消	(30)
2.3.6 自旋式单模光纤	(30)
2.3.7 单偏振波单模光纤	(31)
2.4 光纤的传输损耗	(31)
2.4.1 损耗的主要原因	(31)
2.4.2 实际光纤的损耗波长特性	(33)
2.5 光纤的制造法	(33)
2.5.1 制法种类	(33)
2.5.2 双坩埚法	(34)
2.5.3 MCVD 法	(34)
2.5.4 VAD 法	(35)
习题	(37)
参考文献	(37)

第三章 光纤的光线理论分析

3.1 前言	(38)
3.2 均匀纤芯光纤的光线理论分析	(40)
3.2.1 均匀纤芯光纤中的光线种类	(40)
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	(42)
3.2.6 Goos-Hänchen 相移	(43)
3.3 光线理论的基本方程	(44)
3.3.1 不均匀介质中的光线理论	(44)
3.3.2 程函方程	(45)
3.3.3 光线方程	(47)
3.4 非均匀纤芯光纤的光线理论分析	(49)
3.4.1 非均匀纤芯光纤中的光线种类	(49)
3.4.2 基本方程	(49)

3.4.3 解的实例 (I)——子午光线	(50)
3.4.4 与均匀纤芯的情形比较	(53)
3.4.5 解的实例 (II)——螺旋光线	(53)
3.5 小结	(54)
习题	(56)
参考文献	(56)

第四章 均匀纤芯光纤的波动理论分析

4.1 前言	(58)
4.2 基本方程的推导	(59)
4.2.1 直角坐标系中的波动方程	(59)
4.2.2 柱坐标系中的波动方程	(60)
4.3 条形光波导中的光波	(61)
4.3.1 均匀纤芯光纤与条形光波导的对应关系	(61)
4.3.2 波动方程的通解	(62)
4.3.3 纤芯和包层中的解 (TE 模)	(63)
4.3.4 传播特性	(65)
4.3.5 光线理论的分析	(65)
4.3.6 波动理论和光线理论的结果比较	(67)
4.4 均匀纤芯光纤中的光波	(67)
4.4.1 波动方程的通解	(67)
4.4.2 纤芯与包层中的电磁场的解	(68)
4.4.3 模的分类	(71)
4.4.4 本征方程(精确解)	(71)
4.4.5 本征方程(弱波导近似解)	(74)
4.4.6 本征方程的统一形式	(74)
4.5 均匀纤芯光纤的性质	(76)
4.5.1 传播模、辐射模、漏泄模	(76)
4.5.2 各模传播特性的决定	(76)
4.5.3 模序号 l 的意义和截止频率	(77)
4.5.4 LP 模	(80)
4.5.5 色散曲线	(81)

4.5.6 多模光纤与单模光纤	(82)
4.5.7 电磁场分布	(82)
4.6 均匀纤芯光纤的色散特性	(87)
4.6.1 产生色散的各种原因	(87)
4.6.2 群时延的表示式	(87)
4.6.3 多模色散	(89)
4.6.4 波长色散	(90)
4.6.5 波导色散	(91)
4.6.6 材料色散	(92)
4.6.7 偏振波色散	(92)
4.6.8 各种色散大小的比较	(93)
4.7 小结	(95)
习题	(96)
参考文献	(96)

第五章 非均匀纤芯光纤的波动理论分析

5.1 前言	(97)
5.2 非均匀纤芯光纤的基本方程和模的概念	(98)
5.2.1 基本方程的推导	(99)
5.2.2 矢量波动方程与标量波动方程	(100)
5.2.3 柱坐标系中的标量波动方程	(101)
5.2.4 对应于各种模的波动方程及其解	(102)
5.2.5 标量波动方程和 LP 模的概念	(108)
5.2.6 轴向与横向电磁场函数的关系	(109)
5.2.7 边界条件	(111)
5.2.8 标量波分析	(112)
5.2.9 矢量波分析	(112)
5.3 非均匀纤芯光纤的 WKB 法分析	(113)
5.3.1 基本概念	(113)
5.3.2 传播模的 WKB 法分析	(115)
5.3.3 WKB 法近似解的精度	(118)
5.3.4 转折点附近的解	(118)

5.3.5	解的连续性和本征方程的推导	(120)
5.3.6	漏泄模的 WKB 法分析	(121)
5.4	多模光纤传播特性的 WKB 法计算	(122)
5.4.1	传播模数	(123)
5.4.2	群时延和 α 的最佳值	(127)
5.4.3	脉冲响应	(128)
5.5	非均匀纤芯光纤的 Rayleigh-Ritz 法分析	(130)
5.5.1	变换成变分问题的方法	(131)
5.5.2	本征方程	(133)
5.5.3	本征方程的数值解	(135)
5.5.4	群时延	(135)
5.6	α 次方分布的光纤的幂级数展开法分析	(138)
5.6.1	概说	(138)
5.6.2	“带沟”或“带阶”的 α 次方分布	(139)
5.6.3	本征方程的推导	(139)
5.6.4	截止条件	(141)
5.6.5	群时延	(142)
5.6.6	传播特性的计算结果	(142)
5.7	关于多模光纤最佳折射率分布的几点提示	(147)
5.7.1	α 和 ρ 的最佳值	(147)
5.7.2	纤芯-包层界面上折射率分布的“沟”的效应	(148)
5.8	非均匀纤芯光纤的有限元法分析	(149)
5.8.1	概说	(149)
5.8.2	变分公式化	(151)
5.8.3	变分问题借有限元法求解	(152)
5.8.4	标量波近似	(155)
5.8.5	标量波近似产生的误差	(156)
5.9	非均匀纤芯光纤的阶段近似法分析	(159)
5.9.1	概说	(159)
5.9.2	基本方程	(159)
5.9.3	本征方程	(162)
5.9.4	电磁场分量的计算	(163)

5.9.5 群时延	(163)
5.10 小结	(163)
习题	(165)
参考文献	(165)
第六章 非轴对称光纤的分析	
6.1 前言	(167)
6.2 单偏振光纤的种类和特性	(169)
6.2.1 单线偏振光纤	(169)
6.2.2 单圆偏振光纤	(171)
6.3 椭圆纤芯光纤的分析	(172)
6.3.1 各种分析方法	(172)
6.3.2 分析法概述	(172)
6.3.3 分析结果示例	(173)
6.4 具有非轴对称折射率分布的光纤的有限元法分析	(175)
6.4.1 概说	(175)
6.4.2 二维有限元法的公式化	(176)
6.4.3 本征方程	(177)
6.4.4 数值计算例(计算精度的研究)	(180)
6.4.5 乱真模	(182)
6.4.6 非轴对称折射率分布时的计算例	(183)
6.5 具有非轴对称内应力分布的光纤的有限元法分析	(183)
6.5.1 基本方程	(183)
6.5.2 非轴对称光纤的模双折射率	(186)
6.5.3 椭圆纤芯光纤的波导结构双折射率与应力感生双折射率	(186)
6.5.4 鞍槽形光纤的偏光特性与应力分析	(188)
6.6 扭转式单模光纤中的光波传播	(190)
6.6.1 概说	(190)
6.6.2 无扭转的状态	(192)
6.6.3 有扭转的状态(在忽略旋光性的条件下公式化)	(192)
6.6.4 考虑到扭转产生旋光性的条件下公式化	(194)

6.6.5 表示偏振状态的解与计算结果	(195)
6.7 小结	(198)
习题	(199)
参考文献	(199)

第七章 多模光纤的特性和设计

7.1 前言	(202)
7.2 α 次方分布的多模光纤	(203)
7.2.1 α 次方折射率分布时的群时延	(203)
7.2.2 α 的最佳值	(204)
7.3 折射率分布和脉冲响应	(206)
7.3.1 任意折射率分布多模光纤的脉冲响应	(206)
7.3.2 理论同实测特性的比较	(209)
7.3.3 折射率凹坑的影响	(209)
7.3.4 条纹的影响	(211)
7.4 最佳折射率分布的合成	(214)
7.4.1 约束条件	(214)
7.4.2 光纤传播特性的变分法分析	(215)
7.4.3 多模色散的指标	(216)
7.4.4 用Newton-Raphson法修正折射率分布	(216)
7.4.5 合成的结果	(219)
7.5 广波长区低色散多模光纤的设计	(223)
7.5.1 基本方程	(223)
7.5.2 $\text{GeO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系	(226)
7.5.3 $\text{GeO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ 系	(228)
7.6 小结	(230)
习题	(232)
参考文献	(232)

第八章 单模光纤的特性和设计

8.1 前言	(233)
8.2 光纤的单模条件	(235)

8.2.1 基本公式的推导	(235)
8.2.2 归一化截止频率的近似式	(236)
8.3 单模光纤的色散	(238)
8.3.1 材料色散和波导色散	(238)
8.3.2 零色散波长	(239)
8.4 W形光纤	(240)
8.4.1 W形光纤的设计思想	(240)
8.4.2 本征方程	(240)
8.4.3 色散特性	(243)
8.5 在 $1.55\mu\text{m}$ 波段具有零色散的单模光纤	(244)
8.5.1 结构参量和零色散波长	(244)
8.5.2 考虑到弯曲损耗和接续损耗时的最佳设计	(245)
8.6 在宽波段内具有低色散的单模光纤	(246)
8.6.1 设计用的基本方程	(247)
8.6.2 各种单模光纤的波导色散	(248)
8.6.3 高折射率差的均匀纤芯光纤	(250)
8.6.4 Ω 形光纤	(251)
8.6.5 Ω 形光纤的色散特性	(253)
8.7 单偏振光纤	(254)
8.7.1 概说	(254)
8.7.2 鞍槽形光纤	(254)
8.7.3 鞍通道形光纤	(256)
8.7.4 内应力形双折射光纤	(259)
8.7.5 单圆偏振光纤	(260)
8.7.6 单线偏振光纤同单圆偏振光纤的优缺点比较	(260)
8.8 小结	(262)
习题	(263)
参考文献	(263)

第九章 具有结构不均匀性光纤的理论

9.1 前言	(266)
--------------	-------

9.2	功率耦合方程	(267)
9.3	两个模之间的模变换	(269)
9.3.1	基本方程	(269)
9.3.2	对单偏振光纤的要求	(270)
9.4	多模光纤中的模变换对色散特性的改善	(271)
9.4.1	模变换对色散特性的改善	(271)
9.4.2	模的简并	(272)
9.4.3	耦合方程	(273)
9.4.4	脉冲响应	(276)
9.4.5	脉冲时延和脉冲宽度	(279)
9.5	小结	(281)
	习题	(282)
	参考文献	(282)
第十章 光纤折射率分布的测量		
10.1	前言	(283)
10.2	多模光纤的折射率分布测量方法	(285)
10.2.1	纵向干涉法	(285)
10.2.2	横向干涉法	(289)
10.2.3	数值孔径扫描法	(292)
10.2.4	端面反射法	(295)
10.2.5	会聚法	(297)
10.3	单模光纤的折射率分布测量方法	(299)
10.3.1	散射图样法	(300)
10.3.2	远射图样法	(304)
10.4	预制棒的折射率分布测量方法	(307)
10.4.1	空间滤波法	(307)
10.4.2	横向干涉法的应用	(309)
10.5	二维折射率分布测量方法	(311)
10.5.1	用三角掩模法对预制棒进行二维折射率分布的测量	(313)
10.5.2	用数值孔径扫描法对预制棒进行二维折射率分布的测量	(315)

10.5.3 用散射图样法对单模光纤进行二维折射率分布的测量	(316)
10.6 小结	(318)
习题	(319)
参考文献	(319)

第十一章 光纤色散特性的测量

11.1 前言	(323)
11.1.1 色散的种类	(323)
11.1.2 色散大小的表示方法	(324)
11.2 色散特性测量方法的分类	(325)
11.3 脉冲法	(326)
11.3.1 测量系统的构成	(326)
11.3.2 脉冲响应的表示方法	(327)
11.3.3 脉冲响应的简单表示	(328)
11.3.4 脉冲响应的正确计算方法——傅里叶变换法	(329)
11.3.5 多模色散分离测量法	(329)
11.3.6 往复脉冲法	(331)
11.3.7 模群类别多模色散测量法	(334)
11.4 扫描调制法	(337)
11.4.1 测量系统的构成	(337)
11.4.2 总色散测量实例	(338)
11.4.3 多模色散分离测量法	(339)
11.5 频谱分析法	(339)
11.6 利用光纤喇曼激光器进行的色散测量方法	(341)
11.6.1 测量系统的构成	(341)
11.6.2 多模光纤传输频带随波长变化的特性测量	(343)
11.7 单模光纤的色散测量方法	(344)
11.7.1 波长扫描测量法	(344)
11.7.2 色散特性的差分法测量	(345)
11.7.3 单偏振光纤的传播常数差 $\Delta\beta$ 的测量	(346)

11.7.4 单偏振光纤的偏振(模)色散的测量	(349)
11.8 小结	(352)
习题	(354)
参考文献	(354)

第十二章 光纤传输损耗的测量和有关测量技术

12.1 前言	(356)
12.2 光纤传输损耗的测量方法	(358)
12.2.1 损耗特性测量方法的分类	(358)
12.2.2 分光特性测量法	(359)
12.2.3 $1/\lambda^4$ 图示法	(360)
12.3 光纤单模条件的测量方法	(362)
12.3.1 测量方法的原理和分类	(362)
12.3.2 弯曲损耗法	(363)
12.4 光纤故障点位置和损耗分布的测量方法	(365)
12.4.1 利用反射光测量故障点位置和损耗分布的原理	(365)
12.4.2 费涅耳反射强度和后向瑞利散射强度	(367)
12.4.3 改善信噪比的方法和测量例	(369)
12.4.4 改善距离分辨能力的方法和测量例	(371)
12.5 小结	(373)
习题	(375)
参考文献	(375)

习题略解	(377)
------------	-------

附录	(387)
----------	-------

附录 3A.1 式(3.12)的推导	(387)
附录 3A.2 式(3.56)的推导	(388)
附录 3A.3 式(3.78)的推导	(389)
附录 4A.1 圆柱坐标系中的波动方程推导	(390)
附录 4A.2 贝塞尔函数各公式	(390)
附录 5A.1 基本方程式(5.7)~(5.12)的推导	(391)
附录 5A.2 式(5.23)的推导	(396)

附录 5A.3	Airy 函数 $Ai(x)$ 、 $Bi(x)$ 的定义及其公式	(397)
附录 5A.4	式(5.136)~(5.139) 的推导(常数 $A \sim G$, φ 和 β_1 的确定)	(398)
附录 5A.5	式(5.198) 的推导	(401)
附录 5A.6	归一化截止频率的严格值	(402)
附录 5A.7	泛函[式(5.242)]妥当性的证明	(404)
附录 5A.8	由式(5.258) 推导出标量波动方程的证明	(406)
附录 6A.1	式(6.56) 和式(6.58) 的推导	(407)
附录 6A.2	式(6.63) 的推导	(408)
附录 9A.1	平方分布光纤的模的简并(9.4.2 节)	(409)
附录 9A.2	式(9.36) 的推导	(410)
附录 9A.3	式(9.39) 的稳定解	(411)
附录 10A.1	汉克尔变换中的抽样定理(10.3.1 节)	(412)