

高等学校教材

介质光波导器件原理

许政权 等编

上海交通大学出版社

介质光波导器件原理

许政权等编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子材料与固体器件教材编审委员会电子材料与元件编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。

全书共分十一章,内容包括介质光波导的结构与制备、介质光波导的传输特性、介质光波导的评价、介质光波导单元器件、介质光波导光栅器件、介质光波导调制器、非线性介质光波导器件、介质光波导信号处理器件、介质光波导模数(A/D)转换器、介质光波导逻辑器件、介质光波导传感器件。

本书可作为工科院校固体材料、固体器件、集成光学等专业的本科生、研究生教材,也可供上述专业的研究、技术人员参考。

介质光波导器件原理

出版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发行:新华书店上海发行所

印刷:常熟文化印刷厂

开本:787×1092(毫米)1/32

印张:10.625

字数:234000

版次:1989年2月第1版

印刷:1989年4月第1次

印数:1—900

科目:189—265

ISBN 7—313—00391—9/TN·15

定价:2.10元

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子材料与固体器件教材编审委员会电子材料与元件编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。

本教材由上海交通大学许政权担任主编,成都电讯工程学院陆荣鑫担任主审。

本课程的参考学时数为60学时,其主要内容为介质光波导器件基本原理和应用技术。全书共十一章,前三章叙述了介质光波导的结构、制作技术和传输特性,以及光波导质量的评估方法。第四章和第五章分析介质光波导光栅器件,这里把光栅器件列作一章,突出了光栅器件的潜在作用和广阔的应用前景。第六章和第七章讨论光波导调制器和非线性光波导器件。后面四章介绍一些具有特殊功能的集成光路和波导传感器,展示介质光波导器件在集成光路中的应用。传统的介质器件通常从低频做到微波频段为止。随着激光技术和集成光学的兴起和发展,介质光波导器件在光频范围日益显示其重要性,并发展成一门从理论到工艺技术比较成熟的新学科。介质光波导理论及应用是一门与电子工程、微波技术、近代光学(量子电子学)、固体物理和材料科学密切相关的边缘学科。学习这门课程必须具备以下基础知识:大学物理的几何光学和波动光学,电磁场和电磁波理论,以及固体物理理论。使用本教材时应注意:本书可作为电子类工科专业的高年级大学生和硕士研究生的选修课教材,也可供相近专业的

学生选用。本教材前七章为基本内容,供大学生学习;后四章为提高部分,供硕士研究生使用。学时分配:前七章为40学时,后四章为20学时。提高部分的内容用“*”号标出。每章末都附有思考题,供学习参考。限于篇幅,有些内容没有编入本书,有些内容还可深入,有兴趣的读者可阅读每章末所附的参考文献。

本教材由徐敬舆编写第一、二章,许政权编写第三、四、五章,金国良编写第六章,阮丽真编写第七、十一章,沈荣桂编写第八章,李宝贞编写第九、十章。参加审阅工作的还有陈益新同志,为本书提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1986年12月

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出

批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

目 录

第一章 介质光波导的结构与制备	1
第一节 介质光波导的基本结构	1
第二节 溅射淀积法制备介质光波导	8
第三节 扩散掺杂法制备介质光波导	13
第四节 离子交换法制备介质光波导	21
思考题	27
参考文献	28
第二章 介质光波导的传输特性	31
第一节 平板型介质光波导	31
第二节 非均匀平面介质光波导	41
第三节 通道型介质光波导	52
*第四节 圆柱型介质光波导	57
思考题	61
参考文献	62
第三章 介质光波导的评价	63
第一节 概述	63
第二节 传播常数测定法和波导参数的评价	64
第三节 导波光的传输损耗和散射的测量法	68
第四节 波导光损伤	78
思考题	83
参考文献	83
第四章 介质光波导单元器件	85

第一节	概述	85
第二节	光路变换器	86
第三节	分路器	89
第四节	起偏器和模分割器	93
第五节	透镜	99
	思考题	106
	参考文献	107
第五章	介质光波导光栅器件	108
第一节	概述	108
第二节	模耦合理论	109
第三节	介质光波导光栅器件的应用	132
	思考题	144
	参考文献	144
第六章	介质光波导调制器	146
第一节	概述	146
第二节	光波导电光调制器件	164
第三节	光波导声光调制器件	178
	思考题	188
	参考文献	189
第七章	非线性介质光波导器件	190
第一节	概述	190
第二节	光波导中二阶非线性相互作用的理论	192
第三节	非线性光波导材料	202
第四节	二阶非线性效应的应用	203
*第五节	光波导中的三阶非线性导波	211
*第六节	光波导中三阶非线性导波的应用	216
第七节	光学双稳态器件	218

思考题	222
参考文献	223
*第八章 介质光波导信号处理器件	226
第一节 概述	226
第二节 集成光学频谱分析器	227
第三节 表面波声光卷积器	238
第四节 表面波声光相关器	241
第五节 声光脉冲压缩器	245
思考题	248
参考文献	248
*第九章 介质光波导模数(A/D)转换器	250
第一节 概述	250
第二节 光波导干涉调制模数转换器	253
第三节 高速光波导模数转换器性能分析	265
第四节 其他光波导模数转换器	271
思考题	274
参考文献	274
*第十章 介质光波导逻辑器件	275
第一节 概述	275
第二节 电光效应光波导逻辑系统	276
第三节 介质光波导快速全光逻辑器件	287
第四节 介质光波导双稳逻辑器件	291
思考题	300
参考文献	300
*第十一章 介质光波导传感器件	302
第一节 概述	302
第二节 光纤传感器	304

第三节 集成光学传感器	317
思考题	325
参考文献	326

第一章 介质光波导的结构与制备

介质光波导具有平板型、通道型和圆柱型三类结构。它们的共同特征是波导区介质的折射率比波导区外其他介质的都要高,因此,能将光波限制在波导区中传播。采用不同的制备介质光波导的方法,所得波导横截面中的折射率分布具有不同的形状,如阶跃型分布、渐变型(抛物线型、高斯型、指数型、余误差函数型、线性型等)分布。本章介绍这些介质光波导的基本结构以及主要的制备方法:溅射淀积法、扩散掺杂法和离子交换法。

第一节 介质光波导的

基本结构^[1.1~1.3]

光导纤维通信、平面光学器件和集成光学器件是在本世纪70年代迅速发展起来的,它们的物理基础都是光波导,只不过光导纤维是一种圆柱型介质光波导,另两类是平面型或通道型介质光波导。只要波导区介质的折射率比波导区外的大,这类介质光波导就能导引光波,使光束的功率在横向受到约束,形成光导波。

用来传输光波的平面介质光波导的厚度通常为数个光波长的量级,而长度和宽度可为数千个波长。在波导内传输的光波是一些本征值分立的横电(TE)模和横磁(TM)模。而通道型波导的厚度、宽度都为数个微米的量级,光波被限制在

此通道中传播,光导波的性质与微波波导中的电磁波相似。光导纤维的纤芯视其是单模或多模运用,直径可为数微米或数十微米。

介质光波导的材料可以是石英、玻璃这类无定型材料,也可以是铌酸锂那样的铁电晶体。由于铌酸锂具有压电性和电光性,在这种介质光波导中可以通过电场的调制实现电、光、声的相互作用,制作出许多新颖实用的介质光波导器件。

以下分别介绍平面型、通道型和圆柱型介质光波导。

(一) 平面型介质光波导

众所周知,一束光线在均匀介质中传播时,由于衍射等原因,会发生发散,因而传输一段长距离后,强度就会减弱。在许多应用中,必须避免这种发散及强度的衰减,也就是说需要导引光束,使光束的功率在横向受到约束。光波导就是起着这种作用的一种器件。最简单的一种光波导是由一层高折射率的介质夹在两层折射率略低的介质之间构成的,如图 1.1

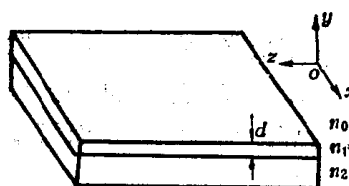


图 1.1 平面型介质光波导结构($n_1 > n_0, n_2$)

所示,这种波导称为平面型介质光波导。沿 z 方向传播的光束功率被约束在两个平面,即 $y = \pm d/2$ 之间。

若 $n_1 > n_0, n_2$, 且 $n_0 \neq n_2$, 此类波导称为不对称平面介质光波导。通常可将一低光吸收,折射率为 n_1 的薄层介质淀积在折射率略低($n_2 < n_1$) 的衬底上,介质膜的上方是空气($n_0 = 1$)。若薄膜两侧介质的折射率相等, $n_0 = n_2$, 则为对称平面介质波导。

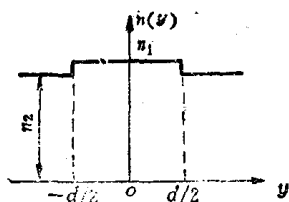
由于制备平面型介质光波导的工艺不同,波导横截面上

的折射率分布可以具有不同形状。折射率分布均匀,但在某位置折射率发生突变的称为阶跃型,见图 1.2(a) 和(b);其折射率分布形式可写为阶跃型对称分布:

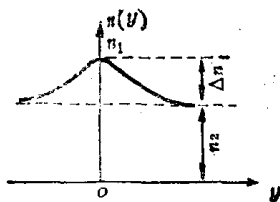
$$n(x) = \begin{cases} n_1, & |y| < d/2; \\ n_2, & |y| > d/2. \end{cases} \quad (1.1a)$$

和阶跃型不对称分布:

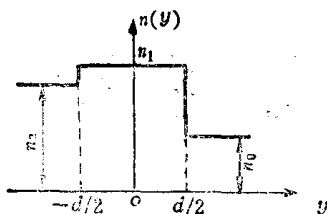
$$n(x) = \begin{cases} n_0, & y > d/2; \\ n_1, & |y| < d/2; \\ n_2, & y < -d/2. \end{cases} \quad (1.1b)$$



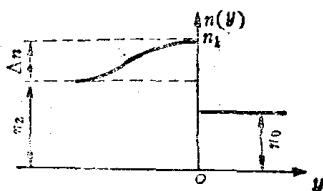
(a) 阶跃型对称分布



(c) 渐变型对称分布



(b) 阶跃型不对称分布



(d) 渐变型不对称分布

图 1.2 平面型介质光波导的折射率分布

折射率随位置逐渐变化的称为渐变型,见图 1.2(c) 和(d),其折射率分布的形式可表述为渐变型对称分布:

$$n(y) = n_2 + \Delta n f(|y|/y_0), \quad -\infty < y < \infty \quad (1.2a)$$

和渐变型不对称分布:

$$n(y) = \begin{cases} n_2 + \Delta n f(-y/y_0), & y < 0; \\ n_0, & y > 0. \end{cases} \quad (1.2b)$$

式中 y_0 为表征介质薄膜厚度的特征量; $f(y/y_0)$ 是归一化的折射率分布函数, 在 $y=0$ 处等于 1, 在其他处随 $|y|$ 的增加而逐渐减小到零。常见的介质光波导 f 函数的形式可为抛物线分布、高斯分布、指数分布、余误差函数分布、线性分布等, 视制备工艺而异。

图 1.3 示出了阶跃型非对称光波导中光传播的情况。在介质薄膜前端面置一不透明的屏, 屏上开一条平行于 Z 轴的狭缝, 有一均匀的平面光波沿 X 轴入射。可将此狭缝视为一线光源, 在与 X 轴成 $\theta_1 = -\pi/2$ 到 $\theta_1 = \pi/2$ 角的范围内向各个方向辐射。这种辐射可以分解成许多均匀平面波, 每一个波都用一条光线代表, 此光线的方向相当于该平面波的传播方向, 以 θ_1 角表示。只要 θ_1 大于 θ_{0c} , 而

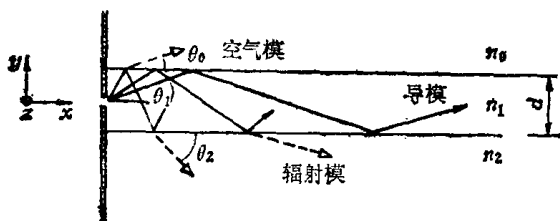


图 1.3 介质光波导中光传输情况

$$\theta_{0c} = \arccos(n_0/n_1), \quad (1.3)$$

此光线在介质薄膜与空气的交界面上受到部分反射, 就有一部分光线以 θ_0 角折入空气, θ_0 满足以下条件:

$$n_0 \cos \theta_0 = n_1 \cos \theta_1.$$

反射光线以 $-\theta_1$ 角入射到薄膜与衬底交界面处, 因为 $n_1 > n_2$,

它受到的反射比上界面处的还小, 折射光线以 θ_2 角辐射入衬底, 则有

$$n_2 \cos \theta_2 = n_1 \cos \theta_1.$$

光线在上、下两界面反复发生部分反射和折射, 使越来越多的光能同时漏泄入空气和衬底。波导中满足 $\theta_{0c} < |\theta_1| < \pi/2$ 条件的光线称为空气辐射模。

如果光线的传播方向满足以下条件,

$$\theta_{2c} < |\theta_1| < \theta_{0c},$$

式中

$$\theta_{2c} = \arccos(n_2/n_1), \quad (1.4)$$

它在上界面发生全反射, 在薄膜-衬底边界上发生部分反射, 只是在衬底中才有折射光线, 发生能量泄漏。这种光线也属于辐射模, 称为衬底辐射模。

若线光源辐射光线的角度为

$$\theta_1 < \theta_{2c},$$

则它不仅在薄膜-空气边界上发生全反射, 而且在薄膜-衬底的边界上也发生全反射。由于这种光线所载功率均被限制在薄膜之内, 这类光线称为导模。

形成导模的临界条件 $\theta_1 = \theta_{2c}$ 也可改写为

$$\sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / n_1. \quad (1.5)$$

在前端面的空气中以与 Z 轴成 θ 角入射的光线, 经折射进入薄膜的光线折射角为 θ_1 , 它们满足以下关系:

$$\sin \theta = n_1 \sin \theta_1.$$

因而, 在 $\theta < \theta_c$ 内的光线, 满足下列关系式:

$$\sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (1.6)$$

都能进入薄膜而形成导模。 $\sin \theta_c$ 称为光波导的数值孔径 (N.A.)。

光波导中的导模是一些分立的模式。根据波导结构和折射率的大小,一个波导只允许有限个数量的导模在里面传输,即图 1.3 中的 θ_1 值是一些特定的值。只允许一个导模传播的光波导称为单模波导,允许两个或两个以上导模传播的称为多模波导。这些导模还因场的横电性和横磁性,又区分为 TE 模和 TM 模。 $n_1 \cos \theta_1$ 称为导模的有效折射率。

(二) 通道型介质光波导

前面讨论的平面型介质光波导,只在 Y 方向上约束光波,

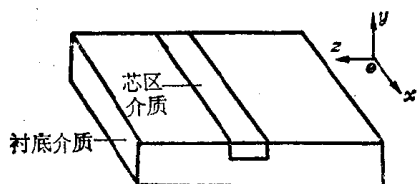
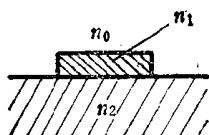


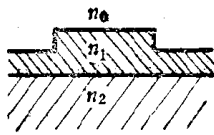
图 1.4 通道型介质光波导

而在薄膜平面 ($X-Z$ 平面) 内并不约束光能量。通道型介质光波导 (又称三维波导, 见图 1.4), 在 Z 方向上也能约束光能量。

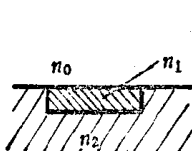
许多介质光波导器件,如分路器、调制器、A/D 变换器、开关器等都采用这类波导。



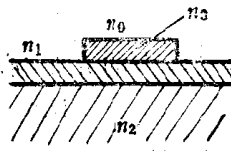
(a) 凸条形



(b) 脊形



(c) 掩埋形



(d) 条载形

图 1.5 四种通道型介质光波导截面示意图