

光信息科学与技术系列丛书

# 导波光学

余守宪 编著

# 物理基础



北方交通大学出版社  
<http://press.njtu.edu.cn>

责任编辑：高学民  
封面设计：艺铭设计

导  
波  
光  
学  
物  
理  
基  
础



ISBN 7-81082-072-9



9 787810 820721 >

ISBN 7-81082-072-9/O·2

定价：40.00元

102

TK25  
S35

光信息科学与技术系列丛书

# 导波光学物理基础

余 守 宪 编 著



A1058117

北方交通大学出版社  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以经典电磁场理论与近代光学为基础,系统论述了集成光学与纤维光学中各类介质光波导的传输特性,全面讲述了平面介质波导,金属包层平面介质波导,耦合波导,周期性波导,非线性介质波导,光导波调制的基本原理及其应用,以及光导纤维(包括正规与非正规、均匀与非均匀、线性与非线性光纤)的传输特性,光纤耦合,光孤子等的基本原理及其应用。

本书可供理工院校应用物理,光信息科学与技术,光纤通信,光电子技术,光子学与光子技术等专业高年级本科生与研究生作为教材或参考教材,也可供研究人员、工程技术人员及高校其他有关专业教师、学生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

导波光学物理基础/余守宪编著. —1版. —北京:北方交通大学出版社, 2002.8  
ISBN 7-81082-072-9

I. 导… II. 余… III. 波导光学 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 054423 号

丛 书 名: 光信息科学与技术系列丛书

书 名: 导波光学物理基础

著 作 者: 余守宪

责任编辑: 高学民

排版制作: 北京博华电子排版中心

印 刷 者: 北京黄坎印刷厂

装 订 者: 北京黄坎印刷厂

出版发行: 北方交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-62237564 51686045

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 29.25 字数: 728 千字

版 次: 2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

书 号: ISBN 7-81082-072-9/O·2

印 数: 1 000 册 定价: 40.00 元

## 前 言

20 世纪 60 年代激光的出现,导致了半导体电子学、导波光学、非线性光学等一系列新学科的涌现。20 世纪 70 年代,由于半导体激光器和光导纤维技术的重要突破,导致了以光纤通信、光信息处理、光纤传感、光信息存储与显示等为代表的光信息科学与技术的蓬勃发展,导波光学(包括集成光学与纤维光学两个分支)已成为光信息科学与技术的基础。

《导波光学物理基础》全面论述了 20 世纪 70 年代以来导波光学的主要理论成果,注意了反映近 20 年来的新进展,以适应 21 世纪由电子学时代向光子学时代飞跃这一新形势。全书共 12 章,全面地论述集成光学与纤维光学两个分支。第 1 章讲述介质光波导的电磁场理论与射线光学基础,第 2 章到第 8 章阐述集成光学的原理和方法,包括:平板介质波导,金属包层平板介质波导,条形介质波导,波导耦合原理,周期性波导,光导波的调制与非线性介质光波导,第 9 章到第 12 章阐述纤维光学的原理和方法,包括:圆光波导,非圆光波导双折射光纤,光纤的耦合非正规光波导,光纤中的非线性效应光孤子。全书着重讲述基本原理及其物理基础,以及理论分析方法,并结合理论,介绍在光信息科学与技术中的有关应用。便于读者参考,各章末附有参考文献,书末有数学附录。

本书是在作者自 20 世纪 80 年代以来从事导波光学的教学与理论研究的基础上写成的,在编写过程中,作者参考、吸取和借鉴了国内外有关著作与教材及科研论文的成果,并注意了反映国内同行的研究成果(也包括作者本人及合作者的某些成果),所参考及引用的同行著作,已分别在有关章节中标出,在此,一并对有关作者致谢。

本书的编写和出版,得到了北方交通大学校领导和北方交通大学出版社的支持和帮助,并受北方交通大学出版基金资助,在此表示衷心的感谢。在整理书稿、改正差错与疏漏以及校阅校样中,得到了李文博教授、王健副教授的协助,研究生路绪鹏帮我完成了全部文字与图表的计算机输入工作,付出了辛勤的劳动。最后,还要感谢北方交通大学出版社的高学民等同志为本书的出版所做的细致的编辑工作。

由于作者学术水平有限,书中难免存在差错和不当之处,恳请广大读者批评指正。

余守宪

2002 年 7 月于北方交通大学

# 目 录

<b>第 1 章 介质光波导 电磁场理论与射线光学基础</b> .....	( 1 )
1.1 介质光波导 .....	( 1 )
1.2 电磁场基本方程 平面电磁波 .....	( 3 )
1.2.1 麦克斯韦方程 物质方程 边界条件 .....	( 3 )
1.2.2 电磁场的能量定律 坡印亭矢量 .....	( 5 )
1.2.3 电磁场的波动方程 光速 .....	( 6 )
1.2.4 时谐平面波 相速 群速 .....	( 7 )
1.2.5 横电磁波 横电波 横磁波 .....	( 9 )
1.2.6 亥姆霍兹方程 .....	( 11 )
1.3 平面电磁波的反射与折射 .....	( 11 )
1.3.1 反射定律与折射定律 .....	( 11 )
1.3.2 菲涅耳公式 .....	( 12 )
1.3.3 布儒斯特定律 布儒斯特角 .....	( 14 )
1.3.4 全反射 临界角 全反射时的相移 .....	( 15 )
1.3.5 古斯 - 汉欣位移 .....	( 16 )
1.4 光的吸收与色散 经典色散理论 .....	( 18 )
1.4.1 光的吸收 .....	( 18 )
1.4.2 光的色散 .....	( 20 )
1.4.3 经典色散理论 .....	( 20 )
1.5 射线光学方法 .....	( 22 )
1.5.1 程函方程 .....	( 23 )
1.5.2 射线方程 .....	( 24 )
1.5.3 用射线方法研究平板波导的导模 .....	( 26 )
1.5.4 用射线方法研究非均匀波导的导模 .....	( 28 )
1.6 电磁场理论方法 .....	( 30 )
1.6.1 TE 导模 .....	( 32 )
1.6.2 TM 导模 .....	( 34 )
1.6.3 模的正交性 .....	( 35 )
1.7 传播常数的变分原理 .....	( 36 )
1.7.1 传播常数的积分表示式与变分原理 .....	( 36 )
1.7.2 折射率微小变化引起的传播常数变化 变分定理 .....	( 37 )
1.7.3 导模的相速与群速之间的关系式 .....	( 38 )

1.8 波导模式的正交性与模式展开 .....	(39)
参考文献 .....	(42)
<b>第2章 平板介质波导</b> .....	<b>(44)</b>
2.1 阶跃型三层平板波导 .....	(44)
2.1.1 模式方程 模截止 归一化参量 .....	(44)
2.1.2 模式方程的解 传播常数的近似公式 .....	(47)
2.2 渐变折射率平板波导 .....	(49)
2.2.1 平方律(抛物型)分布 .....	(50)
2.2.2 指数型分布 .....	(53)
2.2.3 直线型分布 .....	(55)
2.3 求解渐变折射率波导的近似方法 .....	(59)
2.3.1 射线方法的应用 .....	(59)
2.3.2 WKB近似法 .....	(63)
2.3.3 微扰法 .....	(66)
2.3.4 变分法 .....	(69)
2.3.5 多层分割法 .....	(71)
2.4 多层平板波导 .....	(74)
2.4.1 四层平板波导 .....	(74)
2.4.2 五层平板波导 .....	(76)
2.4.3 “W”型波导 .....	(79)
2.5 平板波导定向耦合器 .....	(80)
2.6 渐变波导 .....	(83)
2.7 分支波导 .....	(86)
2.8 平板介质波导的散射损耗与吸收损耗 .....	(89)
2.9 平板介质波导的弯曲损耗 .....	(91)
2.9.1 速度方法 .....	(91)
2.9.2 直波导等效法 .....	(94)
参考文献 .....	(98)
<b>第3章 金属包层平板介质波导</b> .....	<b>(99)</b>
3.1 金属的光频特性 .....	(99)
3.1.1 导电媒质中的电磁波 复电容率 .....	(99)
3.1.2 金属光频特性的初等电子论 .....	(100)
3.2 等离子体表面波 .....	(102)
3.2.1 等离子体表面波的存在条件 .....	(102)
3.2.2 长程等离子体表面波 .....	(105)
3.3 非对称金属包层介质波导 .....	(107)
3.3.1 模式复数本征方程及其解法 .....	(107)
3.3.2 传播常数与模式特性 .....	(109)
3.4 金属包层介质波导的色散与损耗:精确微扰分析 .....	(111)

3.5	对称金属包层介质波导 .....	(113)
3.6	四层金属包层介质波导 .....	(116)
3.7	金属包层波导的滤模器、偏振器与方向耦合器 .....	(120)
3.7.1	金属包层滤模器 .....	(120)
3.7.2	金属包层波导偏振器 .....	(121)
3.7.3	金属膜偏振分离定向耦合器 .....	(121)
	参考文献 .....	(123)
<b>第 4 章</b>	<b>条形介质波导</b> .....	(124)
4.1	马卡梯里近似解法 .....	(124)
4.2	数值计算解法 .....	(129)
4.2.1	圆谐函数分析法 .....	(129)
4.2.2	有限元法 .....	(131)
4.3	有效折射率法 .....	(133)
4.3.1	模式分析 .....	(134)
4.3.2	脊形波导与条载波导的分析 .....	(136)
4.3.3	扩散条载波导的分析 .....	(138)
4.4	微扰法 .....	(139)
4.5	变分法 .....	(145)
4.6	加权余量法与迭代矩量法 .....	(146)
4.6.1	条形介质波导的加权余量法分析 .....	(146)
4.6.2	迭代矩量法 .....	(149)
	参考文献 .....	(152)
<b>第 5 章</b>	<b>波导耦合原理</b> .....	(153)
5.1	耦合波方程 .....	(153)
5.1.1	两个波导导模之间的耦合 .....	(153)
5.1.2	同方向耦合 .....	(155)
5.1.3	相反方向耦合 .....	(156)
5.2	定向耦合器 .....	(158)
5.2.1	定向耦合的理论分析 .....	(158)
5.2.2	平板波导定向耦合器 .....	(160)
5.2.3	矩形波导定向耦合器 .....	(162)
5.3	棱镜耦合器 .....	(165)
5.3.1	棱镜耦合器的工作原理 .....	(165)
5.3.2	棱镜-波导系统的模式本征值方程 .....	(167)
5.3.3	输出耦合器 .....	(170)
5.3.4	输入耦合器 .....	(171)
5.4	光栅耦合器 .....	(173)
5.5	尖劈形薄膜耦合器 .....	(175)
	参考文献 .....	(177)



<b>第 6 章 周期性波导</b> .....	(179)
6.1 耦合波方程与周期性波导 .....	(179)
6.2 矩形皱纹周期性波导 .....	(183)
6.3 布喇格反射滤波器 .....	(186)
6.4 分布反馈激光器 .....	(189)
6.4.1 耦合模方程及其解 .....	(190)
6.4.2 振荡和放大作用 .....	(191)
6.4.3 振荡条件与阈值增益系数 .....	(191)
6.5 周期性波导的等效折射率法 .....	(193)
6.5.1 矩形皱纹周期性波导的等效多层薄膜波导 .....	(193)
6.5.2 周期性多层薄膜的分析 .....	(194)
6.6 一般周期性波导的分布反馈系数 .....	(198)
6.7 多量子阱波导的传输与色散特性 .....	(203)
参考文献 .....	(207)
<b>第 7 章 光导波的调制</b> .....	(209)
7.1 光波调制的基本概念 .....	(209)
7.1.1 相位调制 .....	(209)
7.1.2 偏振调制 .....	(210)
7.1.3 强度调制 .....	(210)
7.1.4 调制器的质量指标 .....	(211)
7.2 晶体中的光波 .....	(213)
7.2.1 晶体的电容率张量 .....	(213)
7.2.2 晶体中的平面电磁波 .....	(215)
7.2.3 折射率椭球 .....	(218)
7.3 晶体的电光效应 .....	(221)
7.4 电光调制原理 .....	(225)
7.4.1 电光波导相位调制器 .....	(225)
7.4.2 电光波导强度调制器与开关 .....	(228)
7.4.3 定向耦合调制器与光开关 .....	(229)
7.5 磁光效应 .....	(235)
7.5.1 法拉第效应 .....	(236)
7.5.2 科顿-穆顿效应 .....	(236)
7.5.3 旋光介质的电容率张量与磁光效应 .....	(236)
7.6 磁光波导器件 .....	(240)
7.6.1 非互易模式转换理论 .....	(240)
7.6.2 磁光波导隔离器 .....	(243)
7.6.3 磁光回转器与磁光环形器 .....	(244)
7.6.4 TE-TM 模式转换磁光器件 .....	(244)
7.7 声光效应 .....	(246)

7.8 声光波导调制 .....	(248)
7.8.1 喇曼-奈斯衍射 .....	(249)
7.8.2 布喇格衍射 .....	(251)
参考文献 .....	(253)
<b>第8章 非线性介质光波导</b> .....	(255)
8.1 非线性光学效应 .....	(256)
8.1.1 二阶非线性光学效应 .....	(256)
8.1.2 三阶非线性光学效应 .....	(258)
8.1.3 受激拉曼散射与受激布里渊散射 .....	(259)
8.2 波导中的二阶非线性光学效应 .....	(260)
8.2.1 耦合波方程 耦合系数 .....	(260)
8.2.2 和频效应 .....	(264)
8.2.3 倍频效应—二次谐波发生 .....	(265)
8.2.4 参量放大与参量振荡 .....	(266)
8.2.5 非线性光学信息处理 .....	(267)
8.3 波导中的三阶非线性光学效应 .....	(268)
8.3.1 依赖于光强的折射率 .....	(268)
8.3.2 非线性光波导 .....	(269)
8.4 非线性平板波导的波动理论 .....	(271)
8.4.1 非线性三层平板波导导模的近似分析法 .....	(272)
8.4.2 非线性三层平板波导的精确分析 .....	(280)
8.5 波导的光学双稳态器件 .....	(284)
8.5.1 纯光色散型光学双稳器件 .....	(285)
8.5.2 纯光学吸收型光学双稳器件 .....	(288)
8.5.3 光电混合型光学双稳装置 .....	(289)
参考文献 .....	(292)
<b>第9章 圆光波导</b> .....	(295)
9.1 光导纤维(光纤) .....	(295)
9.2 均匀折射率光纤的光线理论分析 .....	(297)
9.2.1 光纤中的光线种类 .....	(298)
9.2.2 数值孔径 .....	(298)
9.2.3 子午光线的色散 时延差 .....	(299)
9.2.4 焦散面 偏射线 .....	(300)
9.2.5 模式的本征方程 .....	(302)
9.3 均匀折射率光纤的波动理论 .....	(304)
9.3.1 亥姆霍兹方程 电磁场的纵向分量 .....	(304)
9.3.2 麦克斯韦方程和电磁场横向分量 .....	(307)
9.3.3 模式本征方程(特征方程) .....	(308)
9.3.4 阶跃型折射率光纤中的各类模式 .....	(309)

9.3.5 各类模式的截止条件 模色散曲线 .....	(309)
9.4 弱导光纤 .....	(313)
9.4.1 弱导光纤中的模式本征方程与场分布 .....	(313)
9.4.2 LP模(线偏振模) .....	(318)
9.5 渐变折射率光纤的光线理论分析 .....	(321)
9.5.1 平方律光纤 自聚焦光纤 .....	(321)
9.5.2 自聚焦光纤棒的成像原理与应用简介 .....	(324)
9.6 渐变折射率光纤的波动理论 .....	(327)
平方律圆光波导的解析解 .....	(327)
9.7 渐变折射率光纤的近似分析 .....	(330)
9.7.1 WKB近似法 .....	(331)
9.7.2 变分法求传播常数 高斯近似法 等效阶跃折射率光纤法 .....	(333)
9.7.3 级数解法 .....	(337)
9.8 光纤的损耗 .....	(338)
9.8.1 吸收损耗 .....	(339)
9.8.2 散射损耗 .....	(339)
9.9 光纤的色散 .....	(339)
9.9.1 光纤色散的种类 .....	(340)
9.9.2 波导色散 .....	(341)
9.9.3 多模色散 .....	(342)
9.9.4 材料色散 .....	(343)
参考文献 .....	(343)
<b>第10章 非圆光波导 双折射光纤 .....</b>	<b>(345)</b>
10.1 非圆光波导与双折射 .....	(345)
10.1.1 单模光纤的双折射性质 .....	(345)
10.1.2 双折射光纤 .....	(348)
10.2 非圆光波导的近似分析 .....	(351)
10.2.1 微扰法的具体应用 .....	(351)
10.2.2 等效光波导的概念与微扰修正 .....	(352)
10.2.3 椭圆芯阶跃光纤 .....	(354)
10.2.4 平方律椭圆光波导 .....	(355)
10.3 偏振态 偏振态在光纤中的演化 .....	(358)
10.3.1 偏振态的描述 琼斯矢量 .....	(358)
10.3.2 偏振的合成与分解 .....	(362)
10.3.3 琼斯矩阵与偏振态的演化 .....	(363)
10.3.4 线双折射和圆双折射的成因和特性 .....	(366)
10.3.5 线双折射和圆双折射光纤的琼斯矩阵 .....	(371)
10.3.6 邦加球法与偏振态演化的表示 .....	(377)
参考文献 .....	(386)

<b>第 11 章 光纤的耦合 非正规光波导</b> .....	(387)
11.1 非正规光波导的耦合波方程 .....	(387)
11.2 弱导缓变光波导的模式耦合 .....	(390)
11.3 非正规光波导 .....	(392)
11.4 光纤光栅 .....	(393)
11.4.1 均匀周期正弦型光纤光栅 .....	(393)
11.4.2 非均匀周期光纤光栅 .....	(396)
11.5 光纤的对接 突变光波导 .....	(397)
11.6 正规光波导的横向耦合方程 .....	(400)
11.6.1 模式耦合方程 .....	(400)
11.6.2 耦合波的特性 .....	(405)
11.7 光纤耦合器与光纤滤波器 .....	(407)
11.7.1 光纤定向耦合器 .....	(407)
11.7.2 光纤滤波器 .....	(408)
11.8 光纤激光器与光纤放大器 .....	(410)
参考文献 .....	(412)
<b>第 12 章 光纤中的非线性效应 光孤子</b> .....	(413)
12.1 光纤中的非线性效应 .....	(413)
12.1.1 光纤中的非线性转换效率 .....	(413)
12.1.2 光纤中的克尔效应 .....	(414)
12.1.3 光纤中的自相位调制和方波自成形 .....	(415)
12.1.4 光脉冲在光纤中的压缩 .....	(417)
12.2 孤子 .....	(418)
12.2.1 KdV 方程 钟型孤立波 .....	(419)
12.2.2 单孤子解和双孤子解 .....	(420)
12.3 包络型孤子 非线性薛定谔方程 .....	(422)
12.4 亮光孤子与暗光孤子 .....	(424)
12.5 光脉冲的传播方程 .....	(427)
12.6 色散与非线性效应对脉冲传播的影响 .....	(430)
12.6.1 群速度色散引起的脉冲展宽 .....	(430)
12.6.2 非线性效应对脉冲传播的影响 .....	(431)
12.6.3 群速度色散效应与自相位调制效应的平衡——光孤子的形成 .....	(432)
12.7 光孤子通信简介 .....	(433)
参考文献 .....	(435)
<b>数学附录</b> .....	(436)
A1 直角坐标系 圆柱坐标系 球坐标系 .....	(436)
A2 复数表示法 .....	(437)
A3 矢量代数运算 .....	(437)
A4 矩阵与矩阵乘法 矩阵的本征值问题 .....	(438)

---

A5	矢量微分算符 .....	(440)
A6	双曲函数 .....	(443)
A7	伽马函数( $\Gamma$ 函数).....	(444)
A8	贝塞耳函数(Bessel 函数) .....	(444)
A9	爱里函数(Airy 函数).....	(448)
A10	雅可比椭圆函数(Jacobi 椭圆函数) .....	(453)

# 第 1 章 介质光波导

## 电磁场理论与射线光学基础

介质光波导(简称光波导)是一种能够将光波限制在其内部或其表面附近,引导光波沿确定方向传播的介质几何结构,它包括具有圆形截面的圆波导(光学纤维,简称光纤)以及平板波导、条形波导等具有平面对称性或直角对称性的光波导。研究光波导中光传播特性及其应用的学科称为导波光学,并把它划分成两个分支:纤维光学(光纤光学)和集成光学,前者研究光纤,后者研究光波导器件中采用的平板波导、条形波导等基本结构的特性及其应用。事实上,这两个分支所依据的基本原理和所采用的分析方法相类似。本书第 1 章到第 8 章阐述集成光学的原理和方法,第 9 章到第 12 章阐述纤维光学的原理和方法。

导波光学中涉及的光波,其波长范围大体在  $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 。研究光波导应以光的电磁场理论和介质光学特性的理论为基础。本章将阐述有关的基础知识,原理和方法。我们将从电磁场所遵守的麦克斯韦方程出发,对光波导中的光波传播问题进行理论分析,这种理论也就是光波导的电磁场理论。当光波波长与传播区域的线度相比极小时,可以认为光沿着一定的曲线(光线)传输,采用几何光学的方法作近似处理。几何光学(也称射线光学)理论宜用于分析较简单的问题,给出直观、清晰的物理图象,其缺点是不能给出严格而精确的解,难以分析复杂问题。

本章首先对介质光波导作一概略介绍,然后总结、回顾光的电磁理论,简述电介质光学特性的经典电子理论,并阐述研究光波导传播问题的两种基本方法:射线光学方法与电磁场理论方法。后者也常称为电磁波理论方法。最后,简单介绍用以计算导波传播常数常用的变分原理。从第 2 章起,以上述理论为基础,阐述各种介质光波导及基本器件的原理。

### 1.1 介质光波导

图 1-1 画出了集成光学中用到的几种典型导波结构的横截面示意图。在与该横截面垂直的纵向上,波导无限延伸;介质的折射率通常是与纵向无关的。如果不考虑光波导的激励,一般常忽略光源的影响,着重研究光的纵向传播。在这些光波导中,如果光在横向受到充分的约束而没有辐射或泄漏,就可以沿纵向传播,这种光波称为导波,其基本传播模式(见后面)称为导波模或导模;反之,如果光在横向有辐射,则基本传播模式称为辐射模。下面,以常见的三层平板均匀波导为例,借助射线光学的概念,给以简单说明。

三层平板均匀波导的结构如图 1-2 所示,它是由夹在低折射率衬底和包层之间的高折射率薄膜构成的。薄膜衬底和包层的折射率分别为  $n_1$ ,  $n_2$  和  $n_3$ ,且  $n_1 > n_2 \geq n_3$ ,包层通常为空气,即  $n_3 = 1$ ,薄膜和衬底折射率之差一般为  $10^{-3} \sim 10^{-1}$ ,薄膜厚度一般为几微米,可与光波长

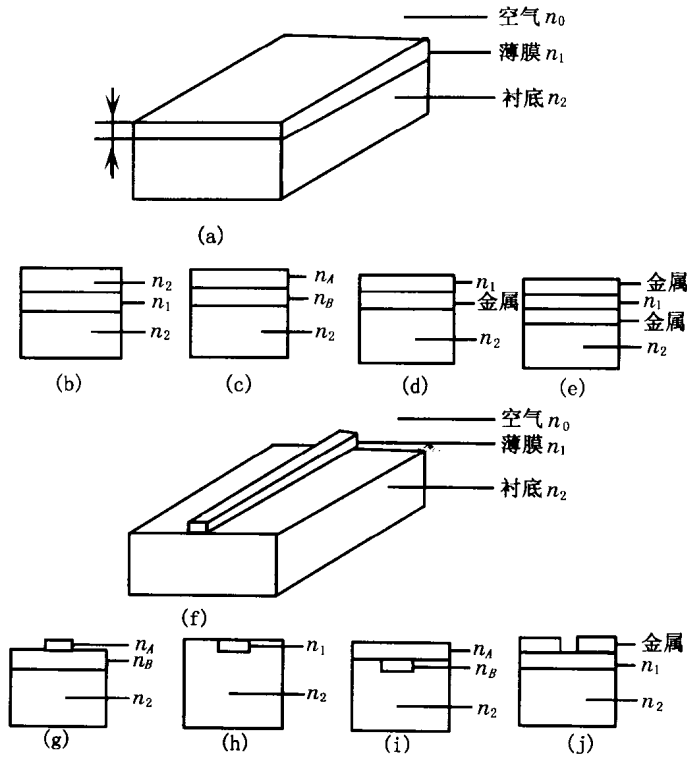


图 1-1 几种典型的介质光波导

(a)非对称薄膜波导  $n_1 > n_2 > n_3$ ; (b)对称薄膜波导  $n_1 > n_0$ ; (c)复合波导  $n_A, n_B > n_2$ ; (d)金属包层波导  $n_1 > 1.0$ ; (e)双金属包层波导  $n_1 > 1.0$ ; (f)~(j)各种二维限制条形波导

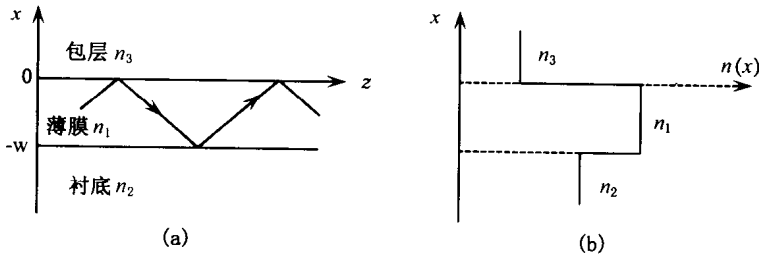


图 1-2 三层平板均匀波导

(a)横截面图; (b)横向折射率分布

比较. 平板波导沿与图面垂直的  $y$  方向的几何结构和折射率分布都是不变的. 如图所示, 当光在薄膜—衬底界面(简称下界面)和薄膜—包层界面(简称上界面)上不断发生全反射时, 光波能够限制在薄膜内以锯齿形光路传播. 可以看出, 出现这种情况的条件是: 光线在上、下界面的入射角应分别大于相应的两个(全反射)临界角. 由光学可知, 下界面的临界角,  $\theta_{12} = \arcsin(n_2/n_1)$ , 上界面的临界角  $\theta_{13} = \arcsin(n_3/n_1)$ , 而  $\theta_{12} > \theta_{13}$ . 对于特定的满足条件  $\theta > \theta_{12}$  的入射角  $\theta$  来说, 所形成的传光模式就是导波模或导模. 以后会看到, 导模的  $\theta$  值只能取有限个离散值. 如图 1-3(a)、(b)、(c)所示为当值  $\theta$  从零起逐渐增大时出现的三种情况. (1) 如果  $\theta_{13} > \theta > 0$ , 则由衬底一侧入射的光折射入薄膜内后, 又通过薄膜上界面折射到包层中; 反之, 由包层一侧入射的光通过薄膜的下界面折射到衬底中(见图 1-3(a)). 在这种情况下, 光波能

量未限制在薄膜内,而是辐射在衬底和包层这两个半无限空间中,相应的电磁波模式叫做包层模,是一种辐射模,在此范围内, $\theta$ 可以取无限多个连续值。(2)如果 $\theta_{12} > \theta > \theta_{13}$ ,则由衬底一侧入射的光在薄膜的下界面折射入薄膜内,在薄膜的上界面受到全反射后又折射到衬底中(见图1-3(b)).这时,光波能量也不能限制在薄膜内,而是辐射到衬底这个半无限空间中,相应的电磁波模式叫做衬底模,这是另一种辐射模,在相应的范围内, $\theta$ 也可以取无限多个连续值。(3)只有当 $\theta$ 增大到 $\theta > \theta_{12} > \theta_{13}$ 时,正如前述,才能形成导模(图1-3(c)).在导波光学中,着重研究的是导模,但当研究波导损耗和某些光波导器件时,也有必要研究辐射模。

在图1-2所示的平板波导中,各层内折射率不变因而横向折射率分布为阶梯状的波导,通常叫做阶跃型平板波导或均匀平板波导;在某一层或几层内横向折射率为不均匀分布的波导,通常叫做渐变型平板波导,也叫梯度折射率平板波导或非均匀平板波导.平板介质波导将在第2章研究。

在图1-1(a)、(e)、(j)所示的平板波导中,有一层(或两层以上)金属薄膜,常称为金属包层平板波导.金属包层平板波导将在第3章中研究。

在图1-1(f)、(g)、(h)、(i)所示的条形介质波导中,波导可以在横截面内的相互垂直的两个方向上限制光波,使之被限制在横截面为矩形的无限长柱体内沿纵向传播.条形介质波导可以有若干种结构,具有代表性的如图1-1(f)、(g)、(h)、(i)所示.条形介质波导将在第4章中研究。

此外,尚有具有周期性结构的波导,称为周期性波导,将在第6章中研究,而由具有非线性特性的介质所构成的波导,称为非线性波导,将在第8章中研究.本书第5章和第7章将分别阐述波导耦合的原理及导波光的调制。

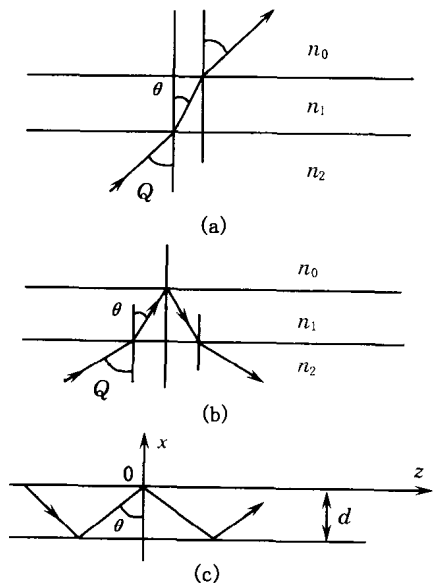


图1-3 平板波导模式的射线光学模型  
(a)包层模;(b)衬底模;(c)导模

## 1.2 电磁场基本方程 平面电磁波

### 1.2.1 麦克斯韦方程 物质方程 边界条件

光是电磁波,它遵守电磁场的基本规律.根据经典理论,电磁场的基本规律可以用麦克斯韦方程表达,它们是:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-2-1)$$



$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1-2-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-2-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-2-4)$$

式中,  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\rho$  分别代表电场强度、磁场强度、电位移、磁感应强度、电流密度与电荷密度.

由式(1-2-2)两边取散度,再利用式(1-2-3)即得:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1-2-5)$$

这是电荷守恒定律的微分形式.

要能从给定的电流和电荷分布惟一地确定各个场矢量,还必须对麦克斯韦方程组补充一些描述物质在电磁场作用下的特性的经验关系式,它们称为物质方程. 对于最常用到的静止的各向同性介质来说,我们有

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (1-2-6)$$

式中,  $\epsilon$  为电容率,  $\mu$  为磁导率,  $\sigma$  为电导率,  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$  称为相对电容率,  $\epsilon_0$  称为真空电容率,  $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mu_r$  称为相对磁导率,  $\mu_0$  称为真空磁导率. 对于非磁性媒质,  $\mu_r = 1$ ,  $\mu = \mu_0$ , 对于真空,  $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $\epsilon = \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ .

这里应指出,对于静止的各向异性介质,  $\epsilon$  和  $\mu$  都是二阶张量,式(1-2-6)中前两式应改写为

$$D_i = \sum \epsilon_{ij} E_j, \quad B_i = \sum \mu_{ij} H_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1-2-6a)$$

还应指出,以上各式的成立条件是:(i)介质是线性介质( $\epsilon_{ij}$ 和 $\mu_{ij}$ 与场强无关);(ii)电容率与磁导率与电磁场的变化频率无关. 关于电介质的色散(电容率与频率有关)的情况将在 1.4 节中作简单讨论(为便利读者,本书有关于矢量代数、矢量分析等附录,可供查阅).

由麦克斯韦方程组可以导出在两个媒质分界面(突变面)上应满足的边界条件,它们是:

(1)电位移法向分量的关系

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma$$

其中,  $\sigma$  为界面处的面电荷密度,  $\mathbf{n}$  是界面法线方向的单位矢量. 若界面处没有面电荷, 则

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0 \quad \text{即} \quad D_{1n} = D_{2n} \quad (1-2-7)$$

即,电位移法向分量连续.

(2)磁感应强度法向分量的关系

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad \text{即} \quad B_{1n} = B_{2n} \quad (1-2-8)$$

即,磁感应强度法向分量连续.

(3)电场强度切向分量的关系

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \quad \text{即} \quad E_{1t} = E_{2t} \quad (1-2-9)$$

这里  $E_{1t}$  和  $E_{2t}$  分别表示  $\mathbf{E}_1$  及  $\mathbf{E}_2$  的切向分量,它们是连续的.

(4)磁场强度切向分量的关系

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \lambda$$