

明海

张国平

谢建平编著

光电子技术

Guangdianzi Jishu

中国科学技术大学出版社

本书部分内容得到国家自然科学基金委研究项目(19674053)的资助

光 电 子 技 术

明 海 张国平 谢建平 编著

中国科学技术大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光电电子技术/明海 张国平 谢建平 编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,1998年1月

ISBN 7-312-00945-X

I 光电子技术

II 明海…

III ①光学 ②电子

IV O

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:850×1168/32 印张:14.75 字数:382千

1998年1月第一版 1998年1月第一次印刷

印数:1—3000册

ISBN 7-312-00945-X/O · 197 定价:16.00元

内容提要

本书以导波光学为线索,系统地介绍了平面介质波导、纤维光学和半导体光电子器件的基础与技术,同时结合各章节分别阐述光的发射、耦合、调制、偏转、传感、传输、放大、探测和显示等光电子技术和原理,并说明各种物理效应间的内在联系。书中除了选取一些比较成熟的光电子技术作为基本内容外,还介绍了一些 80 年代以来新发展的光电子技术,作为应用实例书中还包含了作者在该领域里多年来的研究成果。

本书可作为光学、光电子技术专业的高年级大学生和研究生的教材,也可供有关专业及涉足交叉学科的教师和科研工作者参考。

前 言

光电子技术是“光子”技术与“电子”技术相结合的产物,是继微电子技术后兴起的又一门高新技术,目前已成为信息科学的重要支柱。

本书以导波光学为基础贯穿全书,分为平面介质波导与技术、纤维光学与技术、半导体光电子器件三部分。着重介绍基本物理概念、原理和方法,同时在各章节中分别介绍光的发射、调制、耦合、偏转、传感、传输、放大、探测和显示等光电子技术。

本书主要面向光学和光电子技术专业的高年级学生和研究生,也可供光学科技工作者参考。

本书第二、三、四章由张国平、谢建平编写;第一章、第五~十章由明海编写;第十一、十二章由张国平、明海、谢建平编写;最后全书由明海统编和定稿。另外,吴云霞同志负责全书图表的绘制工作,在此向她表示诚挚的谢意。由于编写时间仓促,作者水平有限,错误和不妥之处欢迎读者斧正。

作 者

1997 年 3 月

于中国科学技术大学

目 次

第一章 绪论	(1)
--------------	-----

平面介质波导与技术

第二章 介质波导	(6)
----------------	-----

2.1 介质波导的射线光学	(6)
2.2 平面波导的波动分析	(17)
2.3 渐变折射率分布的平面波导	(35)
2.4 均匀介质的条形波导	(41)
2.5 光波导的制备和光波导特性的测试	(47)

第三章 光束耦合器和波导耦合器	(61)
-----------------------	------

3.1 光束耦合器	(61)
3.2 波导耦合器	(74)
3.3 耦合的理论分析	(80)

第四章 光波导调制器	(114)
------------------	-------

4.1 晶体光学基础	(114)
4.2 光调制器中的物理效应	(121)
4.3 体调制器	(130)
4.4 电光波导调制器	(138)
4.5 声光波导调制器	(144)
4.6 磁光波导调制器	(146)

纤维光学与技术

第五章 普通光纤的基础理论	(148)
---------------------	-------

5.1 阶跃折射率光纤的光线理论	(148)
5.2 偏射光线的传播	(160)
5.3 光纤波导中的模式理论	(164)

5.4	阶跃光纤的标量近似分析	(176)
第六章	聚焦纤维透镜	(183)
6.1	聚焦纤维透镜的折射率分布	(183)
6.2	聚焦纤维中的光线轨迹	(188)
6.3	聚焦纤维透镜的成像特性	(193)
6.4	聚焦纤维透镜的像差及测量	(205)
6.5	聚焦纤维透镜的应用	(208)
第七章	光纤的基本特性及测试	(215)
7.1	光纤的传输损耗	(215)
7.2	光纤损耗的测量	(222)
7.3	光纤的色散——脉冲展宽	(226)
7.4	光纤脉冲展宽的测量	(230)
7.5	光纤的偏振和双折射	(235)
7.6	光纤拍长和偏振模色散测量	(244)
第八章	光纤传感技术	(250)
8.1	强度调制光纤传感器	(251)
8.2	相位调制光纤传感器	(258)
8.3	频率调制光纤传感器	(267)
8.4	波长调制光纤传感器	(271)
8.5	偏振态调制	(274)
8.6	光纤陀螺	(281)
第九章	有源光纤器件和光纤光栅	(288)
9.1	光纤激光器及放大器的结构和发展	(288)
9.2	稀土掺杂光纤的光谱	(291)
9.3	稀土掺杂光纤激光与放大过程	(297)
9.4	光纤激光技术	(307)
9.5	光纤放大技术	(318)
9.6	光纤 ASE 光源	(324)
9.7	光敏光纤光栅	(327)

第十章 光纤中的非线性效应	(341)
10.1 光纤中的非线性转换效率.....	(341)
10.2 光纤中的克尔效应.....	(342)
10.3 光纤中的自位相调制和方波自成形.....	(344)
10.4 光脉冲在光纤中的压缩.....	(348)
10.5 非线性薛定谔方程.....	(352)
10.6 孤子激光器.....	(355)
10.7 受激散射非线性效应.....	(359)

半导体光电子器件

第十一章 半导体激光器	(364)
11.1 概述.....	(364)
11.2 半导体激光器原理.....	(365)
11.3 半导体激光器特性.....	(368)
11.4 同质结和异质结激光器.....	(383)
11.5 分布反馈半导体激光器.....	(394)
11.6 量子阱半导体激光器.....	(399)
第十二章 光电探测器	(407)
12.1 光电探测器的性能和噪声.....	(407)
12.2 光电导探测器.....	(414)
12.3 光伏探测器.....	(423)
12.4 CCD 阵列探测器	(440)

参考文献	(453)
附表	(456)

第一章 绪 论

光电子技术使现代信息科学面貌一新,已成为当今世界竞争极为激烈的高技术领域之一。随着人类社会向信息化过渡,光电子技术的应用将遍及国民经济的各个部门以及人类日常的工作和生活。由于目前人们对“光电子”的内涵理解尚不一致,所以有必要介绍一下什么是光学、光电子学和光电子技术。使读者对它们及其知识结构有个清楚的了解。

光学是物理学的一个分支。经典光学以电磁辐射本身为研究对象,近代的发展使光与物质的相互作用成为更重要的研究内容。今天的光学已渗透到各个科学技术与应用领域,成为一门蓬勃发展的新兴技术,不少分支已形成相当规模的新兴产业。

光电子学是光学与电子学相结合的产物,是信息科学的一个重要方面。本世纪 60 年代以前,虽然对光电现象的研究已有了相当的成就,也出现了不少实用的光电子器件,但光学和电子学仍然是两门独立的学科。随着 60 年代激光的出现,人们对光与物质相互作用过程的研究变得空前活跃,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。70 年代,由于半导体激光器和光导纤维技术的重要突破,导致以光纤通信、光纤传感、光盘信息存储与显示及光信息处理等为代表的光信息技术的蓬勃发展,不仅从深度和广度上促进了相应各学科的知识互相渗透,而且还和数学、物理、材料等基础学科交叉形成新的边缘领域。到了 80 年代,由于对超晶格量子阱(Quantum well)结构材料工艺的深入研究,出现了超大功率量子阱阵列激光器;量子阱结构材料中的三次非线性光学现象,导致半导体光学双稳态功能器件迅速发展;由于光纤的非线性光学效应和色散特性形成的光学孤立子

(Soliton),又进一步推动了对特种光纤的研究,并于 80 年代末期成功研制了稀土掺杂光纤激光器和放大器,将有源和无源光电子功能器件与光纤波导融成一体。光敏光纤光栅的研究,促进了一维光子集成的全光纤回路成为现实……。在这种多学科综合发展的推动下,现代光学中的光源激光化、手段电子化以及采用现代电子学中的理论模式和现代电子学中以光计算为典型代表的电子学处理方法的光学化,使得一门新的综合性交叉学科便从现代信息科学领域中脱颖而出,这就是光电子学。它是研究光频电磁场与物质中电子相互作用及其能量相互转换的学科,因而也可以把它理解为“利用光的电子学”。

光电子技术是“光子”技术与“电子”技术相结合的产物,是继微电子技术后兴起的又一门高技术。它将电子学使用的电磁波频率提高到光频,产生了电子学所不可能实现的许多功能,是信息科学的重要技术支柱。

随着现代科学技术的迅速发展,在空间科学、现代防御体系、生命科学、遥感及管理科学等领域中都拥有巨量科学信息,要求在有限的时间、空间,甚至实时地进行准确处理。以智能化超高速计算机系统和综合业务数字通信网为代表的超高速、大容量信息处理和传输将成为未来信息科学发展的两个重大方向。这一战略目标向微电子学提出了挑战。而微电子技术是实现超高速、超大容量、超低功耗的集成系统方面遇到了根本困难。

由于光的传输速度极快、频率极高,故光载波的信息容量极大。以光通信为例,光波频率比微波频率约高 10^3 倍,如果每个话路的频带宽 4kHz,则光载波可容纳 100 亿路电话;若一套彩色电视节目的频带为 4MHz,则一条光路上可同时播送 1000 万套电视节目。因此,光电子技术便成了实现上述战略目标的重要手段。

从一个完整的光信息系统来说,光电子技术应包括光电子发射源、光的控制或信号加载、光信号的传输、光信号的处理和接收等几个基本的部分。每一部分均需大量的光电子器件以实现其各

自的功能。如光的控制和信号加载涉及到开关、偏转、调制、传感和复用等功能；光信号传输包括波导、耦合、隔离、偏振、中继和反馈等部分；光信号的处理和接收涉及到解调、整形、放大、探测和显示等技术。目前光纤通信已形成产业；光纤传感技术日趋成熟，半导体光逻辑功能器件和光集成技术取得重大进展，使光计算和光信息处理成为十分活跃的研究课题。

全世界光电子技术产业已达到相当大的规模，预计 2000 年达 1030 亿美元。当前日本占有光电子器件国际市场的 51%，美国占有光电子系统国际市场的 57%。从各类国际光电子会议可以清楚地看到，占 80% 以上的各类激光器件、光电子器件以及它们的应用仪器产品早已把经典的光学仪器远远抛在后面，而展出的产品每年不断翻新，门类繁多，仪器高度自动化、智能化，以及所涉及的如此广泛的应用领域，使人们强烈地感受到新兴光的光电子技术诱人的生命力及其巨大的经济效益。

世界上对光电子学科充满信心的预测使我们预感到下个世纪必将到来的光电子领域中的巨大跃变。1990 年英国科学技术咨询委员会曾预言：再过 7 年，光电子器件将十分普遍，而在下一世纪，在快速通信和大容量存储方面，光电子器件将全部取代电子器件。美国的贝尔实验室也预言，在 10 年内将开发出超级计算机，其速度比现有的电子计算机高三个数量级，且同时能进行 10^6 路计算。而日本则以开发新型非线性有机材料为先导，使得价格低廉、耗能少、可擦除的超高容量光盘可能成为下个世纪光电子技术又一竞争力非凡的商品。因此，科学家们认为：光电子技术、纳米技术及生物工程构成当今三大高技术，是下个世纪初的代表性产业。

60 年代激光出现后，我国的光电子技术研究也应运而起。80 年代，由于高技术发展的需要，光电子技术在整个科技领域的地位日益突出，科研工作也进入了一个新阶段。目前我国的光学与光电子技术研究有相当大的队伍，也有较好的基础。现有大、中型研究所和企业近 300 家，从业人员 15.5 万人，由中国科学院、国家教

委、机械电子工业部、航空航天工业部等 18 个部委归口管理。全国有 80 多所高等院校设立了有关光电、光学及激光方面的专业。

30 年来我国光电子的科研工作取得较好的进展。基础研究方面,在某些学科点上做出了达到国际水平的科研成果;在高技术方面,建立了相应的技术基础,开展了跟踪研究;在为国民经济和国防建设服务,为解决有关科学技术问题,提供科学实验装备等方面作出了积极的贡献。但是我国光电子技术的总体水平还是显著落后于世界先进水平,技术基础比较薄弱,特别是元器件的研制水平不高。例如,发展光电子技术的关键是半导体电子器件,而与国外相比,在器件性能指标如波段覆盖、阈值电流、输出功率、寿命、器件可靠性、互换性、封装以及工艺、测试手段上都有很大差距。国家每年要花大量外汇进口光电子元器件与仪器。然而,只要我们政策对头、体制合理、资金投入有保证,依靠光电子领域的广大科技人员和职工的艰苦奋斗,相信用不了太长时间,完全可以把我国的光电子技术产业发展上去。

光电子技术作为现代信息技术的一个分支,它形成了一个知识高度密集,发展更新极快的技术领域。因此,单纯从技术观点考虑,试图通过一门课或一本书面面俱到地讲清楚它的全貌是异常困难的,更何况在技术飞速发展的今天,也许刚写进书本的东西过不多久就被更新的技术所取代。

本书结合当今光电子技术发展的纤维光学、半导体光电子器件和集成光学这三个主要领域,根据学科性质和技术特点,以导波光学为基础贯穿全书,从简单的平面介质波导开始,然后阐述光纤波导和半导体导波器件。全书分为平面介质波导及技术、纤维光学及技术和半导体光电子器件三大部分。同时结合各章节分别介绍光的发射、耦合、调制、偏转、传感、传输、放大、探测和显示等光电子技术和原理。并阐明各种物理效应间的内在联系,以便读者对光电子技术的全貌有清晰的了解,并形成比较系统、完整合理的知识结构。

本书着重讲解基础知识——基本的物理概念、技术原理和理论方法,因为基础知识反映科学的基本规律,同时又尽可能结合实际,因为实际的知识是这些基础知识融合的结晶,能诱发人的创造思维。因此,书中除了选取一些比较成熟的光电子技术作为基本内容之外,还介绍了一些 80 年代以来新发展的光电子技术研究课题,如光纤传感、光纤激光器和放大器、光敏光纤光栅、光纤非线性效应、分布反馈和量子阱光电器件、CCD 阵列探测器等,试图在读者的脑海里播下一些未来光电子技术的种子。

第二章 介质波导

介质波导是集成光学中用以限制和传导光的基本结构,是把各分立元件连结起来的光通路。介质波导中光传输特性的研究是集成光学的基本内容之一。光纤是圆形截面的介质波导,而集成光学中的介质波导往往是平面薄膜或条形的平面结构波导。这里集中介绍平面波导:首先用射线光学给出介质波导的一些基本概念,接着是介质波导的简要电磁理论,最后是一些介质波导的制备技术。光纤将留在第二部分中讨论。

2.1 介质波导的射线光学

图 2.1 表示了最简单的平面介质波导,它由三层介质组成,折射率 n_f 的平面薄膜夹在折射率较低的衬底(n_s)和覆盖层(n_c)之间。它们折射率之间有下列关系

$$n_f > n_s \geq n_c$$

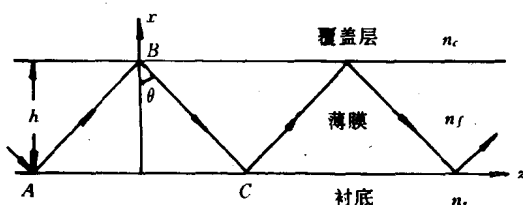


图 2.1 平面波导示意图

$n_s = n_c$ 为对称型平面波导结构, $n_s > n_c$ 为非对称型平面波导结构。中间一层为波导薄膜,光在其中传播,这层的厚度一般为 $1 \sim$

10 μm 。薄膜和衬底折射率之间的差值在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 范围内, 覆盖层常常为空气, $n_c = 1$ 。表 2.1 给出了介质波导所用材料和折射率的例子。此外还有薄膜层内的折射率是渐变的介质波导。在集成光学中, 平面薄膜波导是用于仅将光限制在一定区域内的情况, 具体用途如声光调制器、光束耦合器等。

表 2.1 几种介质波导材料及其折射率

材 料	折 射 率	型 式	工作波长(μm)
GaAs 和 GaAlAs 双异质结构	GaAs $n_f = 3.6$	对称型	0.90
	GaAlAs $n_s = 3.55$		
	GaAlAs $n_c = 3.55$		
溅射玻璃	$n_f = 1.62$ $n_s = 1.515$ $n_c = 1$ (空气)	非对称型	0.633
外扩 LiNbO ₃	$n_f = 2.215$ $n_s = 2.214$ $n_c = 1$	非对称型	0.80
外扩 LiTaO ₃	$n_f = 2.16$ $n_s = 2.15$ $n_c = 1$	非对称型	0.80

光射线也即光线, 用它来代表光能量传输的方向(即波印廷矢量的方向)和路径的方法称为射线光学或几何光学。几何光学是波长趋近于零, 即 $\lambda \rightarrow 0$, 光频率 $\omega \rightarrow \infty$ 这一极限情况的一个光学分支学科, 是波动光学的近似表述。射线光学对平面波导的描述虽然没有光的电磁理论描述得全面和准确, 但它具有简明直观、容易理解和便于分析的优点, 可以清楚地给出介质波导中的一些基本概念。下面我们介绍射线光学对平面波导的描述。

光线进入到图 2.1 所示的薄膜层, 在薄膜和衬底、薄膜和覆盖层之间的分界面上发生反射。当入射角 θ 大于薄膜—覆盖层分界面的临界角 θ_c 和薄膜—衬底分界面的临界角 θ_c 时, 光线在这两个界面发生全内反射, 光线在 z 方向沿 Z 字形路径传播, 被限制在薄膜层内。这样传播的光波称为波导的导波, 或称为导模。对于非

对称型波导, $n_c > n_s$, 相应的临界角 $\theta_c > \theta_s$ 。当光线的入射角满足 $\theta_c < \theta < \theta_s$ 时, 光线在薄膜—覆盖层分界面上为全内反射, 在薄膜—衬底分界面不为全内反射, 有一部分光被折射后进入衬底, 在这样两个分界面上多次反射和折射后, 光最终穿过衬底而逸出波导结构, 即光没有受到限制, 称为衬底辐射模。显然, 当 $\theta < \theta_c < \theta_s$ 时, 光在两个分界面上都不发生全反射, 只有部分反射, 光将辐射到覆盖层和衬底中去, 称为辐射模。这两种情况分别表示在图 2.2 的 (a) 和 (b) 中。

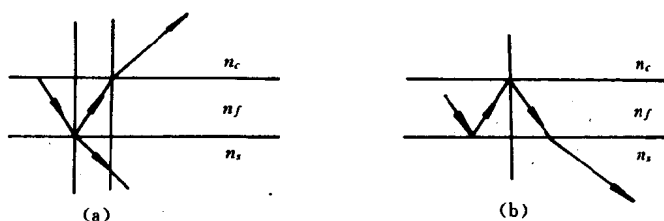


图 2.2 (a)平面波导中辐射模的光线图像
(b)衬底辐射模的光线图像

由上述可见, 分界面上光的反射和折射在波导限制光的过程中起着重要作用, 下面列出它们的一些结果。

在薄膜—覆盖层分界面上, 光在薄膜一侧的入射角若为 θ , 对于振动垂直于入射面的分量即 s 分量, 这里也称为 TE 偏振分量, 其反射系数由菲涅耳公式表示

$$R_{TE} = \frac{n_f \cos \theta - \sqrt{n_c^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}}{n_f \cos \theta + \sqrt{n_c^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.1)$$

对于 TM 偏振 (即光波磁场垂直于入射面的分量) 则有

$$R_{TM} = \frac{n_c^2 \cos \theta - n_f \sqrt{n_c^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}}{n_c^2 \cos \theta + n_f \sqrt{n_c^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}} \quad (2.2)$$

当入射角为

$$\sin\theta_c = n_c/n_f \quad (2.3)$$

时,反射系数 R_{TE} 和 R_{TM} 为 1, 发生了全反射, θ_c 称为临界角。

同理,在薄膜—衬底分界面上的菲涅耳反射系数为

$$R_{TE} = \frac{n_f \cos\theta - \sqrt{n_i^2 - n_f^2 \sin^2\theta}}{n_f \cos\theta + \sqrt{n_i^2 - n_f^2 \sin^2\theta}} \quad (2.4)$$

$$R_{TM} = \frac{n_i^2 \cos\theta - n_f \sqrt{n_i^2 - n_f^2 \sin^2\theta}}{n_i^2 \cos\theta + n_f \sqrt{n_i^2 - n_f^2 \sin^2\theta}} \quad (2.5)$$

相应的临界角为

$$\sin\theta_c = n_i/n_f \quad (2.6)$$

当 $\theta \leq \theta_c$ 或 θ_i 时,反射系数 R 都为实数,反射光波无位相变化。当 $\theta > \theta_c$ 或 θ_i 时, R 为复数,且 $|R|=1$, 即发生内全反射。这时在入射处,反射光位相相对于入射光产生了相移, R 可写成 $R = \exp(2j\phi)$, 其相移值 ϕ 也可由菲涅耳反射公式得到。在薄膜—覆盖层分界面上,

$$\text{tg}\phi_{TE} = \sqrt{n_f^2 \sin^2\theta - n_c^2} / (n_f \cos\theta) \quad (2.7)$$

$$\text{tg}\phi_{TM} = \frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{n_f^2 \sin^2\theta - n_c^2} / (n_f \cos\theta) \quad (2.8)$$

在薄膜—衬底分界面上,

$$\text{tg}\phi_{TE} = \sqrt{n_f^2 \sin^2\theta - n_i^2} / (n_f \cos\theta) \quad (2.9)$$

$$\text{tg}\phi_{TM} = \frac{n_f^2}{n_i^2} \sqrt{n_f^2 \sin^2\theta - n_i^2} / (n_f \cos\theta) \quad (2.10)$$

图 2.3 表明了溅射玻璃所构成的非对称波导结构的相移图。由图可见,相移从临界角处的 0° 增大到掠入射时的 180° , 在临界角处相移的斜率都为无穷大, 在 $\theta=90^\circ$ 时,相移的斜率将各取确定的值,界面两侧折射率差值越小,斜率则越大。

由前面分析知道,导波的图像是光线在薄膜层内按 Z 字形方式在膜层内传播。这些光波是单色相干光,令其角频率为 ω , 在自