

集成光学

谭志飞 编

东南大学出版社

7N25
11

0346

集成光学

谭志飞 编



赠送母校图书馆

南京东南大学

赵小东 冯明琪赠

年 月 日

赵小东 冯明琪

东南大学出版社

北京农业工程大学图书馆

年 月 日

集成光学

谭志飞 编

东南大学 出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 句容栏江印刷厂印刷
开本787×1092毫米 1/32 印张19.19 字数428千字

1989年7月第1版 1989年7月 第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7-81023-116-2

TN·13

定价: 3.75元

责任编辑

王小然

内 容 提 要

集成光学是当今光电子学领域的前沿，它是将微波、激光与集成电路的理论和应用于光电子学领域所产生的新兴学科，其主要研究对象为光电子材料和光电子器件及其集成化。

本书内容涉及介质波导、半导体集成光学中的无源和有源元件（包括耦合器、调制器、光开关、模式转换器、集成光学双稳态、半导体激光器和探测器、集成光路）以及集成光学的材料与工艺等。

本书可作为光电子、通讯、激光等专业的本科生或研究生教材，也可供有关专业的工程技术人员参考。

2548/84
12

中国科学院图书馆

集成光学

1984.12

前 言

集成光学是本世纪六十年代末在微波、激光和微电子技术基础上迅速发展起来的一门边缘性学科，是当今光电子学的前沿。它的研究对象是：光电子学材料、光电子器件，以及光电子器件的集成化。这三者的理论基础、设计制造、特性测试和开发应用构成了集成光学的主要内容。

研究集成光学的意义不仅在于使电子学向光频区扩展，而且更重要的是使光电子学系统走向集成化，即通过集成光学技术能使光辐射的产生、耦合、传输、分路、偏转、会聚、准直、扩束、调制、放大、探测、逻辑运算和参量相互作用等功能在同一块衬底上实现，构成一个单片集成化的光电系统。它集中和发展了光学和电子学的固有技术优势，这对传统的由分立器件构成的庞大而笨重的光电系统来说，无疑是一个革命性的变革。光电子器件和集成光学系统具有宽带、高速、高可靠、抗电磁干扰、体积小、重量轻等优点，因此，它可广泛用于光纤通信、信息处理、传感技术、自动控制、电子对抗、光子对抗、光子计算机等高新技术领域。可以预见，集成光学在今后信息社会中必将扮演一个重要角色，大显身手。

虽然集成光学的发展历史还不足二十年，但由于它具有十分诱人的应用前景，因而决定了它必然具有强大的生命力。正因为如此，集成光学从它出现后一直受到国内外众多学者和专家的极大关注。1980年东南大学电子工程系在激光技术课程中开始讲授集成光学基础知识，1984年正式开设集成光学选修课。本书在原授课讲义基础上修编而成，共九

章，主要内容如下：

第一、二章，阐述波动光学、射线光学的基本原理及平面介质波导理论。

第三～七章，讨论集成光学中的耦合器、调制器、光开关、模式转换器、隔离器、环行器、集成光学双稳态、半导体激光器和探测器的基本原理和特性。

第八章，介绍典型的集成光路及其在光纤通信、信息处理、传感技术、光计算机等方面的可能应用。

第九章，主要论述介质波导的制作技术、测试方法和光路集成工艺。

本书由东南大学魏先任教授主审，他提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

谭志飞

1987年6月

目 录

第一章 电磁波的基本性质及其射线描述	1
1.1 麦克斯韦方程	1
1.2 物质方程	2
1.3 边界条件	3
1.4 波动方程	4
1.5 电磁波的能量定律	6
1.6 相速和群速	9
1.7 平面波的反射和折射	15
1.7.1 史奈尔 (Snell) 定律	16
1.7.2 菲涅尔 (Frensel) 公式	17
1.8 全反射	20
1.8.1 反射光的强度	20
1.8.2 反射光的相位突变	21
1.8.3 透射光波的性质	23
1.9 经典色散理论	25
1.10 射线光学基础	29
1.10.1 程函方程的推导	30
1.10.2 本地平面波	33
1.10.3 射线方程及其应用	34
第二章 平面介质波导	40
2.1 引言	40
2.2 介质薄膜波导的射线分析	42
2.2.1 波导模式的基本概念	42

2.2.2	导模的色散方程	44
2.2.3	古斯—汉顺(Goos-Hanchen)位移	52
2.2.4	薄膜波导的有效厚度	54
2.3	均匀薄膜波导的波动理论	56
2.3.1	薄膜波导模式的定性讨论	56
2.3.2	对称薄膜波导	60
2.3.3	非对称薄膜波导	75
2.3.4	模式对称性	90
2.3.5	模式正交性	94
2.3.6	模展式和归一化	97
2.4	非均匀薄膜波导	101
2.4.1	波动方程	102
2.4.2	平方律波导的模式	104
2.4.3	核函数	111
2.4.4	高斯光束在平方律波导内的传播	114
2.4.5	指数型波导的模式	117
2.5	条形波导	124
2.5.1	TE导波模 $E_{\beta q}$	125
2.5.2	TM导波模 $E_{\beta q}$	132
第三章	耦合模理论和耦合器	135
3.1	耦合模理论	135
3.1.1	周期波导的耦合模方程	140
3.1.2	耦合系数 K	145
3.1.3	耦合模方程的解——两个反向模式的耦合	147
3.2	定向耦合器	154
3.2.1	耦合模方程及其解	154

3.2.2	耦合系数的计算	161
3.2.3	两个条形波导组成的定向耦合器	164
3.3	渐变波导	167
3.3.1	渐变波导连接器	167
3.3.2	尖劈形薄膜波导耦合器	175
3.4	棱镜薄膜耦合器	177
3.4.1	棱镜-薄膜相互耦合的模型	179
3.4.2	耦合模的理论描述	181
3.4.3	棱镜薄膜耦合器的基本方程	190
3.4.4	耦合特性	192
3.5	光栅耦合器	198
第四章	光波导调制器和光开关	207
4.1	光调制器的基本概念	208
4.1.1	相位调制	210
4.1.2	偏振调制和强度调制	211
4.1.3	调制器的质量指标	216
4.2	电光效应	219
4.3	声光效应	226
4.4	磁光效应	231
4.4.1	磁畴和磁化	231
4.4.2	法拉第(Faraday)旋转效应	236
4.4.3	科顿-穆顿(Cotton-Mouton)效应	241
4.5	各向异性介质波导的耦合模方程	244
4.6	光波导相位调制器	250
4.6.1	工作原理	251
4.6.2	主要特性	252

4.7	光波导强度调制器	261
4.7.1	干涉型强度调制器	261
4.7.2	截止调制器	264
4.7.3	电吸收调制器	266
4.7.4	声光调制器	268
4.7.5	电光波导布拉格衍射调制器	275
4.8	模式转换调制器	278
4.8.1	工作原理	278
4.8.2	TE \longleftrightarrow TM模式转换电光器件	282
4.8.3	共线模式转换声光器件	285
4.8.4	TE \longleftrightarrow TM模式转换磁光器件	286
4.9	定向耦合调制器和光开关	288
4.10	全内反射电光波导开关	299
4.11	非互易磁光波导器件	302
4.11.1	非互易模式转换理论	30
4.11.2	磁光波导隔离器	30 ³ ₉
4.11.3	磁光回转器	312
4.11.4	磁光环行器	313
第五章	集成光学双稳态装置	323
5.1	光学双稳态装置的基本原理	324
5.1.1	纯光学色散型	324
5.1.2	纯光学吸收型	329
5.1.3	光电混合型	334
5.2	集成F-P型光学双稳态装置	337
5.3	定向耦合型光学双稳态装置	338
5.4	双臂干涉仪型光学双稳态装置	341

5.5	全内反射调制型光学双稳态装置	345
5.6	声光互作用光学双稳态装置	349
5.7	半导体光学双稳态器件	351
5.7.1	一般本征型	351
5.7.2	多量子阱结构	353
5.7.3	半导体激光器的双稳性	355
第六章	半导体激光器	361
6.1	半导体激光器的基本原理	361
6.1.1	半导体的能带结构和载流子的统计分布	362
6.1.2	p-n结的能带图	370
6.1.3	正向偏置下p-n结的能带图	372
6.1.4	半导体的受激发射条件	374
6.1.5	阈值条件和阈值电流密度	380
6.2	F-P型半导体激光器的主要结构	384
6.2.1	同质结激光器	384
6.2.2	单异质结激光器	386
6.2.3	双异质结激光器	390
6.2.4	大光腔激光器	396
6.2.5	分别限制异质结激光器	397
6.2.6	四元系材料的隐埋异质结激光器	398
6.3	F-P型半导体激光器的输出特性	400
6.3.1	输出光功率和转换效率	400
6.3.2	光谱分布	404
6.3.3	激光模式	405
6.4	分布反馈激光器	411
6.4.1	耦合模方程及其解	412

6.4.2	有源周期波导的振荡和放大作用	413
6.4.3	振荡条件	414
6.4.4	阈值增益系数 g_t	416
6.4.5	纵模特性	419
6.4.6	横模特性	421
6.4.7	半导体异质结DFB实验器件	423
6.5	分布布拉格反射激光器	428
6.5.1	原理分析	428
6.5.2	DBR激光器举例	435
6.6	集成双波导激光器	438
6.7	解理耦合腔激光器	442
6.7.1	单纵模运转的原理	442
6.7.2	调谐特性	444
6.8	量子阱异质结激光器	446
第七章 光波导探测器		459
7.1	p-n结光电二极管	460
7.1.1	反向偏置下p-n结的特性	460
7.1.2	工作原理	465
7.1.3	长波极限和量子效率	466
7.1.4	频率响应	469
7.1.5	探测灵敏度	473
7.2	雪崩光电二极管	476
7.3	肖特基势垒探测器	481
7.4	集成探测器	484
7.4.1	混合集成硅探测器	484
7.4.2	外延型集成探测器	485

7.4.3	质子轰击型探测器	486
7.4.4	电吸收光波导探测器	490
7.4.5	光电导探测器	492
第八章	集成光路及其应用	497
8.1	光纤通信用的集成光路	497
8.1.1	集成光发射机	497
8.1.2	集成光接收器	503
8.1.3	单片集成光中继器	506
8.2	集成光学在传感技术上的应用	508
8.2.1	集成光学温度传感器	509
8.2.2	集成光学微位移传感器和压力传感器	510
8.3	集成光学频谱分析器	512
8.4	集成光学模数转换器	513
8.5	逻辑集成光路	518
8.5.1	线性波导光学逻辑门	519
8.5.2	非线性波导光学逻辑门	530
第九章	介质波导的制备、测量以及光路集成工艺	539
9.1	集成光学材料	539
9.2	介质波导的制作技术	543
9.2.1	衬底的制备	544
9.2.2	溶液淀积法制作有机薄膜波导	546
9.2.3	利用真空蒸发制备薄膜波导	547
9.2.4	高频溅射法制备薄膜波导	548
9.2.5	等离子体聚合波导	551
9.2.6	离子迁移法	553
9.2.7	质子交换法	555

9.2.8	离子注入和质子轰击	556
9.2.9	扩散波导	559
9.3	波导参数的测量	564
9.3.1	折射率测量	564
9.3.2	波导衰减的测量	574
9.3.3	波导模式的观察	575
9.4	光路集成工艺	577
9.4.1	液相外延	578
9.4.2	气相外延	579
9.4.3	分子束外延	581
9.4.4	金属有机化学气相淀积 (MOCVD)	583
9.4.5	远紫外光刻	584
9.4.6	电子束曝光和电子束制版	585
9.4.7	x射线光刻	586
9.4.8	离子蚀刻技术	587

第一章 电磁波的基本性质及其射线描述

集成光学系统的基本元件是光波导。研究光在光波导中的传播规律，可以采用射线理论或波动理论。射线理论适宜于分析简单问题，可以给出直观、清晰的物理图象，如果用来分析复杂问题，只能给出粗糙的结果。波动理论的分析方法比较复杂，但它能够得出全面、正确的解析或数字结果，是设计计算的强有力手段。

本章首先给出电磁场理论的一些基本结论，然后简述射线理论的重要内容，为学习后面章节提供基础。

1.1 麦克斯韦方程

光是电磁波，它遵守电磁场运动规律。根据经典理论，电磁场的基本规律可用一套麦克斯韦 (Maxwell) 方程表达出来，即

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1.1b)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.1c)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (1.1d)$$

式中 \vec{E} 、 \vec{H} 、 \vec{D} 、 \vec{B} 、 \vec{J} 分别代表电场强度、磁场强度、电位移（或叫电通量密度）、磁感应强度（或叫磁通量密度）、电流密度，它们都是矢量。 ρ 代表电荷密度，是标量。

在麦克斯韦方程组中，(1.1a) 式表明磁场随时间的变化感应出电场；(1.1b) 式表明电流（位移电流和传导电流）的存在必然会产生磁场；(1.1c) 式表明电场终止于电荷；(1.1d) 式表明磁感应强度永远是封闭的。容易看出，电场和磁场在方程中的地位并不是完全对称的，其原因是物质世界只存在电荷和电流，而不存在孤立的磁荷。

1.2 物质方程

麦克斯韦方程组中只有两个独立方程，即使给定电流密度和电荷密度的分布，也不足以解出 \vec{E} 、 \vec{H} 、 \vec{B} 和 \vec{D} 来，还必须加上描写物质特性的方程，即物质方程。对于最一般的情形，物质既各向异性，又不均匀，则物质方程是

$$\vec{D}(\vec{r}) = \epsilon(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad (1.2a)$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu(\vec{r}) \cdot \vec{H}(\vec{r}) \quad (1.2b)$$

式中 \vec{r} 代表某一点的位置矢量或矢径。 ϵ 、 μ 为物质的张量介电系数和张量导磁率，都是二阶张量，一般应有 3^2 个分量。一般的光学介质，都是非磁性的，导磁率为标量，且接

近等于真空中的导磁率, 即 $\mu = \mu_0$ 。介电常数的形式较复杂一些, 对于各向异性介质为

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$$

对于双轴晶体, $\epsilon_{11} \neq \epsilon_{22} \neq \epsilon_{33}$; 对于单轴晶体, $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$ 。对于各向同性晶体, $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33}$, 介电常数为标量。

最简单的情况是物质既各向同性, 又均匀, 则 ϵ 和 μ 都是标量, 且是常数, 物质方程的形式也最简单

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.3a)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.3b)$$

必须指出, (1.3a) 式是在假定介质的极化是线性的条件下得到的。且认为介质无色散, 即介电常数同频率无关。介质有色散的情况放在后面讨论。

1.3 边界条件

利用麦氏方程和物质方程求解电磁场, 还必须满足边界条件, 才能得到唯一的解, 集成光学中遇到的材料大多数是电介质, 其中不存在自由电荷和传导电流, 即 $\rho = 0$, $\vec{J} = 0$ 。于是在两种介质的交界面上的连续条件可表述为

(1) 电场和磁场强度相切于交界面的分量连续, 即

$$(\vec{E}_1)_t = (\vec{E}_2)_t, \quad (\vec{H}_1)_t = (\vec{H}_2)_t \quad (1.4a)$$