

集成 光学

[美] T. 塔米尔 主编

科学出版社

内 容 简 介

本书是根据 Springer-Verlag 出版的“应用物理丛书”第7卷译出的。全书共分七章，比较全面地论述了集成光学这门新学科的发展历史，介质波导理论，光束耦合器和波导耦合器，介质波导中的光调制器和光开关，无源器件的制作和测量，单片集成光路的半导体器件等方面的内容。可供从事集成光学、光纤通信的科技人员以及大专院校有关专业师生参考。

Edited by T. Tamir

INTEGRATED OPTICS

Springer-Verlag, 1975

集 成 光 学

[美] T. 塔米尔 主编

梁民基 张福初 译

杨再石 校

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1982年8月第一次印刷 印张：11 1/2

印数：0001—4,900 字数：257,000

统一书号：15031·422

本社书号：2667·15—4

定价：1.80 元

译 序

本书是一本截至 1975 年的集成光学研究专著,叙述内容和引用材料中肯全面,对几种最新器件的原理和性能都作了讨论(如室温工作的 GaAs 分布反馈激光器、低功率宽带宽定向耦合器等),不失为该领域目前较有价值的参考书。

全书共分六章,第一章导论回顾了集成光学的整个历史,提到了许多早期论文,这些往往被近期一些文献所忽视,导论中还指出这门新学科的远大前景。

后面五章是本书的主要内容,分别由五位作者编写,介绍了许多新技术发展情况。其中有 H. Kogelnik 的“介质波导理论”,T. Tamir 的“光束耦合器和波导耦合器”,J. M. Hammer 的“介质波导中的光调制器和光开关”,F. Zernike 的“无源器件的制作和测量”和 E. Garmire 的“单片集成光路的半导体器件”。每一章都相当详细地叙述了必要的概念和技术,并引用大量原始文献作为补充,因而几乎可以看成是一篇独立的专论。但各章之间,作者们也注意到保持前后呼应,互相引用彼此论述过的结果。

这里需要指出原书中各章波导名词存在着某些混乱。因此,我们在翻译中在可能范围内力求统一。根据 J. J. Burke 的意见(*J. O. S. A.*, **65**, 1529, 1975),原书中:

T. Tamir 的“linear 波导”和 H. Kogelnik 的“strip 波导”以及 E. Garmire 的“channel 波导”系指同一内容,故我们在译文中均统一为“条形波导”或“沟道波导”。

同样的理由,E. Garmire 的“Rib 波导”和 H. Kogelnik 的

“Ridge 波导”统一译为“脊形波导”。E. Garmire 的“Ridge 波导”和 H. Kogelnik 的“Raised strip 波导”统一译为“凸条形波导”。

此外，原书第二章的“corrugation”和第五章的“groove”波导实质上指同一内容，但有细微差别，故未予统一，分别译成“皱折”和“沟槽”波导。又如 apparent (表观) 折射率和 effective (有效) 折射率也属同样情形。这些就不一一罗列了。

译稿还曾请中国科学院长春物理研究所金锋同志审阅过，在此表示感谢。

最后我们希望说明的是，集成光学是一门新的学科，鉴于译者水平有限，译文一定有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

* * * * *

在译稿完成并交付出版社以后，我们获悉国外在 1979 年已出版了该书的第二版本。经去信联系，不久我们收到了该书作者寄来的新增加部分的原文：“第二版前言”和“第七章集成光学的最新进展”。因此，在中译本发排之前已把这部分补加进去。对此特向原书作者表示感谢。

译 者

前 言

集成光学作为一新兴领域现已有六年之久，它主要以这样的事实为基础，即光波能够通过非常薄的透明材料膜层传播并受到该膜层的限制。利用集成光学技术将这种膜层组合在一起，加工成适当的结构和形状，已研制成许多种元件，它们能对光波实施范围广泛的各种功能。所以光能够在薄膜结构中传导、调制、偏转、滤波和向空间辐射，或者通过受激辐射的作用产生光振荡。这些元件体积小、结构严密，可以预期它们有利于实现某些目标。其中最令人鼓舞的目标当推光通信领域内的光信息处理。在这方面以及其它有关应用中，具体方向就是制作出尺寸小的集成器件和光学仪器，并希望同时具有低功耗、结构可靠、牢固和耐用的优点。

从科学和技术角度来看，集成光学的其它研究目标包括研究有特定性质的薄膜结构用以制作新的器件；研究由于薄膜内强场聚集引起的现象以及与此相关的薄膜非线性和(或)激励性质增大时导致的效应。由于来自这么多方面目标的推动，目前已研制出许多无定形材料和晶态材料方面的制备技术。若干世纪以来，研究光学现象时使用的都是体积相当庞大的仪器。现在，薄膜元件所具有的小尺寸和平面构形特点无论对传统的还是目前新兴的研究和发展领域都提供了有吸引力和激动人心的潜在远景。无疑这是促进集成光学发展的最强烈因素。

由于集成光学涉及到科学和技术的各个方面，故其发展一直需要各学科的研究人员共同作出贡献。因此，各方面的

研究人员常常结合在一起从事探索和应用薄膜中的光波导现象,其中包括:光学专家,微波工程师,辐射和衍射的专家以及从事半导体、晶体、表面现象、材料科学和其它分支学科的物理学家.最近几年已发表了很多综述性文献,把这些不同领域学科密切地联系在一起.但是这些综述一般只是简短地介绍集成光学及其目标,或者只叙述这一极其宽广领域内的某一狭窄方面.因此,确实有必要较全面地把集成光学的内容汇编成书,以便对上述各领域的科学家和工程技术人员完整地揭示出这个新领域的内容.

本书是介绍集成光学现状的一本专著,以期满足上述这种需要.这里我们试图把注意力集中在最受重视的专题并强调它们的应用以及某些已证明是很有价值的实用方法.由于这一领域内现有的素材极为庞大,把这些内容全部包括进来会超出本书范围,因此我们不准备把材料全部收集成为一本手册.但是仍然尽可能地包括,至少是以参考文献形式给出集成光学领域内报道过的一切内容.因而这本专著适合作为一本有丰富内容的教本,有侧重地而且相当详细地汇集了集成光学所包括的各方面内容,并且足够深入地讨论了其中理论和实际的主要方面.

本书是五位作者共同努力的成果,每人编写其中一章(导论不计入.——译者注).这样,实际上不可避免会有某些重复和前后缺乏连贯.当然我们力求减少这些不足,而且尽量在各章之间适当地加入一些相互关连的内容.但是,如果作者们还没有完全成功地把本书组织成一本完整的专著,则希望读者了解到:写作、编辑和出版一本有关飞速发展、极为活跃的领域而又不过时的书,由于时间太短确实难以达到尽善尽美,这样读者或许就不会有过分的批评了.

在此编者对在本书编写期间给予很多有益和富有成果讨

论的人们表示感谢。尤其高度评价 J. H. Hammer 博士和 H. Kogelnik 博士对导论部分所作的精辟评论和创造性的建议。Mary Lee Criffth 女士仔细耐心协助了本书的编辑工作，我们表示特别的谢意。

T. Tamir

纽约, 1975 年 4 月

第二版前言

业已证明集成光学是一个非常活跃而富有生命力的领域,新的重要的进展层出不穷。鉴于其迅猛的发展,我们原先设想这部书第一版只适用二、三年。然而现在已经清楚,书中大多数基本内容具有较为永久的价值。近来,读者纷纷要求本书再版。为了满足这一要求,我们决定发行本书的平装本,它不仅具有最新的内容,而且售价低廉,便于在校研究生选购。

平装本新增了第七章,其余基本上和原精装本相同。新的一章扼要地阐述了集成光学的最新发展,提供许多新的参考文献,原版本中几处印刷错误在再版时已作了校正。

由于时间和篇幅的限制,第七章只能向读者指点一些最新的文献。但是我们希望,施普林格光学丛书中以后各卷将会详尽介绍集成光学不断取得的进展。

T. Tamir

纽约,布鲁克林,1979年7月

目 录

译序

前言

第二版前言

第一章 导论(T. Tamir).....	1
1.1. 历史概况	1
1.1.1. 起始六年	2
1.1.2. 近期六年	3
1.1.3. 近期与未来的展望	6
1.2. 本书的结构.....	9
参考文献.....	12
第二章 介质波导理论(H. Kogelnik).....	14
2.1. 平板波导的射线光学	16
2.1.1. 反射和折射	17
2.1.2. 导模	20
2.1.3. 古斯-汉欣位移.....	26
2.1.4. 波导的有效厚度	28
2.2. 介质波导的电磁理论的基本原理	29
2.2.1. 麦克斯韦方程	30
2.2.2. 波导的模	32
2.2.3. 平面波导的波动方程	33
2.2.4. 由对称性得出的模的性质	34
2.2.5. 模的正交性	35
2.2.6. 模展式和归一化	37
2.2.7. 介质波导的变分定理	41
2.2.8. 介质波导中的功率流和储能	42

2.2.9. 传播常数的变分性质	45
2.3. 平面平板波导的模	46
2.3.1. TE 模	47
2.3.2. TM 模	51
2.4. 具有渐变折射率分布的平面波导	54
2.4.1. 抛物型分布(谐振子)	55
2.4.2. “ $1/\cos h^2$ ” 型分布	56
2.4.3. 指数型分布	58
2.4.4. 高非对称性的折射率分布	59
2.4.5. WKB 法	62
2.5. 条形波导	63
2.6. 耦合模公式与周期波导	66
2.6.1. 波导模的激发	67
2.6.2. 波导畸变	69
2.6.3. 耦合波的解	72
2.6.4. 周期波导	75
2.6.5. TE-TM 模转换	79
参考文献	80
第三章 光束耦合器和波导耦合器 (T. Tamir)	83
3.1. 光束与平面波导的耦合	84
3.1.1. 横向耦合器	84
3.1.2. 棱镜耦合器	86
耦合模描述	87
基本特性	89
3.1.3. 光栅耦合器	91
3.1.4. 光束耦合器的漏波理论	94
非均匀平面波	94
层状介质中的漏波	97
介质光栅中的漏波	99
光束耦合器中的漏波	100
3.1.5. 棱镜耦合器的设计考虑	103

光束宽度的作用	103
光束形状的影响	105
相位匹配角的偏差	107
可变空气隙对光束的整形	109
漏波特性的计算	109
3.1.6. 光栅耦合器的设计考虑	112
单光束耦合器	112
光栅高度的影响	114
高阶模的影响	115
双光束耦合器	116
3.1.7. 其它光束耦合器	120
尖劈形薄膜波导	120
全息耦合器	121
3.2. 波导耦合器和模转换器	123
3.2.1. 平面波导至平面波导的耦合器	123
3.2.2. 平面波导至条形波导的耦合器	125
3.2.3. 条形波导至条形波导的耦合器	127
3.2.4. 波导至纤维的耦合器	129
3.2.5. 模转换器	131
3.2.6. 至辐射模的耦合	134
3.2.7. 滤波器和其它器件	136
参考文献	138
第四章 介质波导的光调制器和光开关 (J.M. Hammer)	141
4.1. 调制器、开关和扫描器的定义	142
4.2. 相对质量指标的测量和系统的使用	143
4.2.1. 强度调制器和调制深度	144
4.2.2. 84% 等价强度调制条件下, 单位带宽的激励功 率——功率带宽比	145
4.2.3. 插入损耗	146
4.2.4. 开关的质量指标	147
4.3. 相位调制器、偏振调制器和调频器	148

4.3.1. 相位调制	148
4.3.2. 偏振调制	149
4.3.3. 调频器	150
4.4. 用于光调制器中的物理效应	150
4.4.1. 电光效应	150
4.4.2. 声光效应	153
4.4.3. 磁光效应	155
4.5. 体调制器	157
4.5.1. 体声光调制器	158
4.5.2. 体电光调制器	164
4.5.3. 体磁光调制器	167
4.6. 光波导调制器	170
4.6.1. 声光波导调制器	173
4.6.2. 电光波导调制器	180
4.6.3. 磁光波导调制器	195
4.7. 光调制器的比较	198
4.8. 附录	201
参考文献	205
第五章 无源器件的制备和测量 (F. Zernike)	207
5.1. 波导层的制备方法	208
5.1.1. 衬底制备	209
5.1.2. 衬底清洗	211
5.1.3. 溅射	213
5.1.4. 等离子体聚合	218
5.1.5. 旋涂和浸渍	221
5.1.6. 离子迁移	222
5.1.7. 质子轰击和离子注入	222
5.2. 波导鉴定	224
5.2.1. 衰减测量	224
5.2.2. 厚度测量	228
干涉测量法	228

接触测量	229
淀积过程中的测量	230
5.2.3. 折射率测量	230
5.2.4. 由表观折射率测量确定薄膜折射率和厚度	231
数据处理	237
5.3. 图样的制备	240
5.3.1. 周期性图样	240
5.3.2. 非周期性图样	241
5.3.3. 材料清除方法	242
5.3.4. 电子束写入图样	244
5.3.5. 激光束写入图样	246
5.3.6. 波导间的耦合	247
5.3.7. 复制方法	247
参考文献	249
第六章 单片集成光路的半导体器件 (E. Garmire)	251
6.1. 波导	251
6.1.1. 利用自由载流子浓度变化构作的波导	252
外延波导	254
扩散波导	256
离子注入波导	257
6.1.2. 利用材料成分变化构作的波导	260
$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 三元系波导	261
其它半导体波导	266
绝缘晶体波导	269
6.1.3. 波导现象的观测	271
6.2. 三维沟道(条形)波导和耦合器	272
6.2.1. 沟道波导	272
凸条形波导	273
掩埋形波导	275
条载形波导	276
6.2.2. 定向耦合器	277

6.3. 激光器	282
6.3.1. GaAs 异质结激光器	282
6.3.2. 平面工艺制作的激光器	284
6.3.3. 分布反馈激光器	286
6.4. 调制器	291
6.4.1. GaAs 中的电光效应	291
6.4.2. 电光相位调制器	293
6.4.3. 强度调制器	294
6.5. 探测器	297
6.5.1. 光电二极管	297
6.5.2. 外延光电探测器	299
6.5.3. 电吸收探测器	300
6.5.4. 离子注入光电探测器	302
6.6. 集成化	303
6.7. 液相外延	306
6.7.1. 生长设备	306
6.7.2. 生长过程	309
6.7.3. 生长特性	312
参考文献	317
第七章 集成光学的最新进展 (T. Tamir)	320
7.1. 概况	320
7.2. 无源元件	321
7.3. 有源元件	322
7.4. 集成化和其它方面概况	324
参考文献	326
附加参考文献(带标题索引)	343
名词索引	349

第一章 导 论

(T. Tamir)

集成光学领域研究有关光沿介质薄膜或介质薄条传播, 并受其制约的各种现象。所考虑的光波波长基本上介于 0.1 至 10.0 微米之间(10^3 — 10^5 埃), 这主要是决定于现在能实现的激光器频率和波导材料的性质。对于波长远大于 10 微米, 即毫米波和大于毫米波的波段, 微波金属波导技术提供了更为有效的手段; 而波长为 0.1 微米左右或更短时, 则由于缺乏合适的光源以及存在较大的材料吸收和散射损耗, 限制了波导效应的实际应用。

导论之后的其它各章逐一论述集成光学中代表该领域比较重要的概念和重大技术成就的几个主要方面。为了勾画出所有这些内容的清晰轮廓, 这里先回顾一下集成光学的发展过程并估计一下它的某些应用前景, 然后概要说明以后各章所要论述的专题。

1.1. 历史概况

集成光学基于薄膜能够传输光频波段的电磁能, 故其诞生主要受两个不同技术学科的推动和影响, 即微波工程和薄膜光学。半导体也起了特殊的作用, 现在看来, 它最有希望促成实现单片集成光路。这种光路一旦实现, 将成为微波器件和网络的微型光学对应器件, 而且具有更宽广的带宽, 并几乎

不受自然界和人工低频电磁场的干扰等优点。

Kapany 和 Burke 的专著^[1.1]充分论述了早先的导光波研究工作和微波工程在集成光学研究中起的作用。书中把光波导研究的起点归之于 1910 年 Hondros 和 Debye^[1.2] 的圆柱介质研究工作。因此,这里将跳越前面的五十多年,只集中介绍有关平面薄膜介质结构的科研成果而不涉及金属或圆柱波导结构。

1.1.1. 起始六年

1962 年至约 1968 年期间开始进行了薄膜现象的若干研究,当时它们似乎出于不同的目的。但大多数研究成果趋于奠定大部分现在认为是属于集成光学领域的知识的基础。虽然,在 1962 年前,平面介质波导已为人们所熟知并在微波工程中得到应用^[1.1],但只是到 1965 年才由 Anderson 和他的小组^[1.3,4]把微波概念和光刻技术结合起来制作出应用于红外区域的薄膜波导和其它平面器件和光路。他们出于自己采用的方法,使用了术语“准微波光学”来描述这门新发展的技术。但是早在 1963 年, Yariv 和 Leite^[1.5], Bond 等人^[1.6]尽管还没考虑到这种波导光路,却已观察到并报道了 $p-n$ 结平面层的波导作用。Nelson 和 Reinardt^[1.7]接着采用他们的成果证明了 $p-n$ 结内的平面波导模有助于实现用光电效应进行光调制。

在上述研究进行的同时, Osterberg 和 Smith^[1.8]用薄玻片和稜镜作了实验,他们的实验虽然还未用上激光,却实现了平面薄膜导光和把光束耦合到薄膜中去。实际上如图 1.1 所示,他们的实验成功地实现了象传输,其方法是:通过稜镜 L 把光束耦合到平面波导 S_1 中,再由 S_1 传输到一间隙,一部分光经由狭缝 U 后部分地为另一相同薄玻片 S_2 捕获,然后由第二个稜镜 R 收集从 S_2 逸出的光能。这样就生成一光束,它经过适

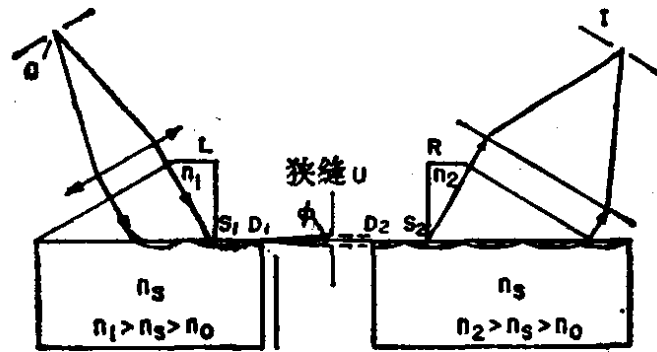


图 1.1 Osterberg 和 Smith^[1.8] 的象传输实验。注意平面玻璃波导，稜镜耦合器与当前实验用器件间的相似性

当聚焦，可在 I 处重现出输入小孔 a 的象。使玻璃折射率朝界面方向递增就能使玻璃表面具有导光能力，而 Pilkington 厂的浮法玻璃特别能增强这一效应。因此作为象传输器件来说，Osterberg 和 Smith 的装置可视为第一个原始型无源光波导装置，其某些元件甚至目前还是适用的。

上述研究工作，加上 Snitzer 和 Osterberg^[1.9]，Kapany 和 Burke^[1.10] 等人先前在圆形介质光波导研究方面的成功结果，在引起人们对平面光波导或纤维的关注上起了相当大的作用。虽然 Karbowiak^[1.11] 曾考虑过把平面光波导作为长距离传输的一种可能手段，但其制备工作^[1.3,4,12,13] 主要受短距离光表面波传播的应用所推动。这些应用启示了光表面波在信息处理网络中的利用，因此在 1968 年开始使用“集成光学信息处理器”^[1.13] 和“集成光路”^[1.14] 之类的术语。1969 年，当 Milier^[1.15] 把这些术语统一简称为“集成光学”时，他不仅是创造了一个既诱人而又便于记忆的名称，同时也宣告了大力研究和发发展光通信用完善而可靠的薄膜技术的开始。

1.1.2. 近期六年

1968 年带来了集成光学潜力的宏伟前景，这一年也是延续至今紧张而富有成效的研究活动时期的开端。从一开始，