



高等院校电子科学与技术专业系列教材

集成光学

唐天同 王兆宏 编著

43



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校电子科学与技术专业系列教材

集成光学

唐天同 王兆宏 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于集成光学的一本入门教材,系统而扼要地介绍了这一新兴学科的原理、材料、工艺与技术发展。

全书共分为8章,内容包括:集成光学的概念、发展现状和意义;平面介质光波导和耦合模理论;晶体在外场作用下的光学性质;集成光有源器件;集成光无源器件;集成光学器件使用的材料;集成光学器件的主要制作工艺及光波导参量的测试等。

本书适于高等院校电子科学与技术、光学工程、光电子技术、光信息科学技术及通信工程等专业高年级本科生作教材使用,也可供相关领域科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

集成光学/唐天同,王兆宏编著. —北京:科学出版社,2005
(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-015614-5

I. 集… II. ①唐…②王… III. 集成光学-高等学校-教材 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 053614 号

责任编辑:马长芳·姚庆爽/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第一版 开本: B5(720×1000)

2005年8月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—3 000 字数: 271 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

- | | | |
|-----|-----------|----------|
| 主 编 | 姚建铨 | 天津大学 |
| 副主编 | 金亚秋 | 复旦大学 |
| | 陈治明 | 西安理工大学 |
| | 吕志伟 | 哈尔滨工业大学 |
| 委 员 | (按姓氏音序排列) | |
| | 曹全喜 | 西安电子科技大学 |
| | 崔一平 | 东南大学 |
| | 傅兴华 | 贵州大学 |
| | 郭从良 | 中国科技大学 |
| | 郭树旭 | 吉林大学 |
| | 黄卡玛 | 四川大学 |
| | 金伟琪 | 北京理工大学 |
| | 刘纯亮 | 西安交通大学 |
| | 刘 旭 | 浙江大学 |
| | 罗淑云 | 清华大学 |
| | 马长芳 | 科学出版社 |
| | 毛军发 | 上海交通大学 |
| | 饶云江 | 重庆大学 |
| | 张怀武 | 电子科技大学 |
| | 张在宣 | 中国计量学院 |
| | 周乐柱 | 北京大学 |
| | 邹雪城 | 华中科技大学 |
| 秘 书 | 资丽芳 | 科学出版社 |

序 言

21 世纪, 随着现代科学技术的飞速发展, 人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是, 支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展, 并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础, 微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展, 从初期的小规模集成电路 (SSI) 发展到今天的巨大规模集成电路 (GSI), 成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展, 光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成就, 成为具有强烈应用背景的新兴交叉学科, 至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言, 光电子技术将继续微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此, 21 世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代, 是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天, 面对电子科学技术的飞速发展, 世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下, 我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域, 并在产业化方面形成了一定规模, 取得了可喜的进步, 为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献, 在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到, 在电子科学与技术领域, 我国与世界先进水平仍有不小的差距, 尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因, 也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点, 就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素, 其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神, 电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社, 经过广泛而深入的调研, 组织出版

了这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色：

1. 多层次。考虑到多层面的需求（普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学），根据不同的层次，有针对性地编写不同的教材，同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

2. 延续传统、更新内容，基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时，注重反映该领域的最新成果和发展方向，真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

3. 扩宽专业基础，加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围，以增强培养人才的适应性；注重实践环节的设置，以促进学生实际动手能力的培育。

4. 适应教学计划，考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程要求和课程要求的指示精神，同时给学生留有更大的选择空间，以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

5. 立体化。教材的编写是立体的，包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等。

本系列教材的编写集中了全国高校的优势资源，突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关学校教务处及学院的帮助，在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求，我们将对这套系列教材不断更新，以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。



教育部“电子科学与技术”教学指导委员会主任
中国科学院院士，天津大学教授

前 言

集成光学是在光通信、光计算机及光信息处理等新兴技术需求的基础上应运而生的。集成光学的概念在 1969 年被首次提出，它将光纤和以平面介质光波导为基础的集成光路相结合，极大地促进了光通信的长足发展。集成光路通常是利用光波导将发光元件、透镜、光传输、光调制、光耦合以及光接收等器件连接在一起，集成在衬底上，构成具有一定独立功能的微型光学体系。

集成光学建立在光电子学、光波导理论、激光技术和微电子学的微细加工工艺发展的基础之上，是光电子学的一个重要分支。集成光学的任务是将传统的光学元器件和系统微型化，并按照新的物理观点将这些元器件或系统“集成”，以形成具有多种功能的集成光学体系。目前，集成光学所利用的光波导的尺度大体上可与光的波长相比拟。随着科学技术的不断发展，纳米量子线、光子晶体以及微谐振腔的研究进展，使得微腔激光器、纳米光波导、纳米光探测器等都可能成为现实，这将不断地影响集成光学的发展进程，并可能实现更小尺寸的光集成。

本书是在编者为本科生讲授“集成光学”课程的讲稿基础上写成的。理论论述尽可能深入浅出、言简意赅。在论述各种集成光学器件时，尽可能对国际上该领域最新的研究成果予以介绍，并采用大量图表进行说明。除了集成光学的主要理论基础、各种集成光学器件及其集成技术以外，本书还扼要论述了集成光学的材料、主要制备工艺以及介质平面光波导主要参量的测量技术，为读者今后进行设计、制作集成光学器件提供必要的技术基础。每章末均附有习题和大量的参考文献，以帮助读者学习和进一步做深入研究。

本书可作为电子科学与技术、光电子技术、光通信及相关专业的大学高年级本科生教材，并可供有关专业的科研人员、工程技术人员参考。

本书由唐天同主编，唐天同编写第 1~3 章、8.1~8.3 节初稿，王兆宏编写第 4~7 章、8.4~8.5 节初稿，最后由唐天同统编成书。

由于集成光学是正在迅速发展中的科学技术，加之编者水平有限，错误和不当之处在所难免，望读者不吝赐教并给予指正。

编著者

2005.4

目 录

序言

前言

第1章 概论	1
1.1 集成光学的概念	1
1.2 集成光学的特点	2
1.2.1 集成光学系统与离散光学器件系统的比较	2
1.2.2 集成光路与集成电路的比较	2
1.3 集成光学的发展和现状	4
1.4 研究集成光学的意义	6
习题	7
参考文献	8
第2章 平面介质光波导和耦合模理论	9
2.1 平板光波导的射线光学分析	11
2.2 平板光波导的波动方程分析	15
2.2.1 TE模的场方程及传播模式	16
2.2.2 TM模的场方程及传播模式	17
2.3 条形光波导的波动方程分析	18
2.3.1 E_{mn}^y 模	19
2.3.2 E_{mn}^x 模	21
2.4 耦合模理论	22
2.4.1 模式耦合	22
2.4.2 平面介质光波导的耦合模微扰理论	24
2.4.3 导模之间的耦合	25
2.4.4 导模与辐射模的耦合	29
2.4.5 光波导的激励	31
习题	43
参考文献	44
第3章 晶体在外场作用下的光学性质	46
3.1 晶体光学简介	46
3.2 电光效应	48
3.3 声光效应	50

3.3.1 声光布拉格衍射	50
3.3.2 声光相互作用的耦合模理论	53
3.4 热光效应	55
3.5 磁光效应	56
3.5.1 法拉第旋转效应	56
3.5.2 磁致双折射效应	57
3.6 非线性光学效应	58
3.6.1 二阶非线性光学效应	59
3.6.2 三阶非线性光学效应	60
习题	60
参考文献	61
第4章 光有源器件	62
4.1 半导体激光器和集成光源	62
4.1.1 半导体激光器的基本原理	62
4.1.2 法布里-珀罗双异质结激光器	66
4.1.3 分布反馈式与分布布拉格反射器式半导体激光器	67
4.1.4 量子阱激光器	70
4.1.5 垂直腔面发射激光器	74
4.2 半导体光放大器	77
4.2.1 半导体光放大器	77
4.2.2 基于半导体光放大器的全光波长转换器	79
4.3 集成光探测器	83
4.3.1 p-n 结光电二极管	83
4.3.2 雪崩光电二极管	87
4.3.3 肖特基势垒探测器	88
习题	88
参考文献	89
第5章 集成光无源器件	91
5.1 基本元件	91
5.1.1 定向耦合器及分支波导	91
5.1.2 透镜	93
5.2 电光集成器件	98
5.2.1 电光开关和电光调制器	98
5.2.2 TE-TM 模式转换器	106
5.3 声光集成器件	107
5.3.1 共线模式转换型声光集成器件	108
5.3.2 非共线布拉格衍射型声光器件	112

5.4 热光开关和调制器	114
5.4.1 马赫-曾德尔干涉仪型热光开关和调制器	114
5.4.2 Y分支热光数字光开关	117
5.5 磁光隔离器和环行器	119
5.5.1 波导型磁光隔离器	119
5.5.2 波导型磁光环行器	123
5.5.3 磁光隔离器和环行器的发展方向	124
习题	125
参考文献	125
第6章 系统集成	128
6.1 光集成的方式	128
6.1.1 功能集成	128
6.1.2 个数集成	131
6.2 光集成的类型	132
6.2.1 全光集成	133
6.2.2 混合光电集成	134
6.3 光集成的技术途径	137
6.3.1 单片集成	138
6.3.2 混合集成	140
习题	144
参考文献	144
第7章 集成光学器件的材料	145
7.1 集成光学器件用材料的共同要求	145
7.2 半导体材料	146
7.2.1 间接带隙半导体材料	146
7.2.2 直接带隙半导体材料	147
7.3 介质材料	151
7.3.1 LiNbO_3 和 LiTaO_3 晶体	151
7.3.2 ZnO 晶体	152
7.4 聚合物材料和玻璃材料	153
7.4.1 聚合物材料	153
7.4.2 玻璃材料	154
7.5 磁性材料	155
习题	156
参考文献	156

第8章 集成光学器件的主要制作工艺及平面介质光波导参量的测试	158
8.1 薄膜淀积技术	158
8.1.1 真空蒸发淀积	158
8.1.2 溅射淀积	160
8.1.3 离子镀	161
8.1.4 化学气相淀积	162
8.1.5 等离子体增强化学气相淀积	164
8.2 薄膜外延生长技术	164
8.2.1 外延生长过程和生长模型	166
8.2.2 液相外延生长	169
8.2.3 分子束外延	169
8.2.4 金属有机化合物气相外延及其在集成光学中的应用	172
8.3 微细图形加工技术	178
8.3.1 抗蚀胶	178
8.3.2 光刻技术	180
8.3.3 蚀刻	188
8.4 条形光波导及典型器件的制作	193
8.4.1 LiNbO_3 波导及相应的集成光学器件	194
8.4.2 玻璃光波导的制作	200
8.4.3 聚合物光波导的制作	203
8.5 光波导主要参量的测量	204
8.5.1 光波导的折射率和传播常数的测量	204
8.5.2 光波导传输损耗的测量	206
习题	210
参考文献	210
附录 缩略语表	213

第1章 概 论

1.1 集成光学的概念

集成光学的概念是1969年美国贝尔实验室的 Miller 博士提出的^[1]。集成光学是在光电子学和微电子学基础上,采用集成方法研究和发展光学器件和混合光学-电子学器件系统的一门新的学科。1972年,Somekh 和 Yariv 提出了在同一个半导体衬底上同时集成光器件和电子器件的构想。从那时起,研究人员开始利用各种材料、多种制备方法制作集成光学器件。

集成光学的出现自然是光学器件和系统本身发展的必然结果,但是,它的发展也受到了微电子集成电路技术的启迪和促进。集成光学是当今光学和光电子学领域的发展前沿之一,它主要研究集成在一个平面衬底上的光学器件和光电子学系统的理论、技术与应用,是光学发展的必由之路和高级阶段^[1,2]。集成光学以半导体激光器、光调制器、接收器等光子和光电子元件为核心集成起来,并以具有一定功能的体系为标志。目前,主要是研究和开发光通信、光学信息处理、光子计算机和光传感等所需的多功能、稳定、可靠的光集成体系和混合光电集成体系等。把激光器、调制器、探测器等有源器件集成在同一衬底上,并用光波导、隔离器、耦合器和滤波器等无源器件连接起来构成的微型光学系统称为集成光路,以实现光学系统的薄膜化、微型化和集成化。如果同时与电子器件(如场效应晶体管、电阻、电容等)集成,则构成混合光电子集成体系(opto-electronic integrated circuit, OEIC)。

集成光的理论基础是光学和光电子学,涉及波动光学与信息光学、非线性光学、半导体光电子学、晶体光学、薄膜光学、导波光路、耦合模与参量作用理论、薄膜光波导器件和体系等多方面的现代光学内容;其工艺基础则主要是薄膜技术和微电子工艺技术。集成光学的应用领域非常广泛,除了光纤通信、光纤传感技术、光学信息处理、光计算机与光存储等之外,还在向其他领域,如材料科学研究、光学仪器、光谱研究等方面渗透。

提到“集成”,人们首先会想到集成电路(integrated circuit, IC)。毫无疑问,现在和将来的信息化社会,在很大程度上依赖以硅技术为基础的微电子学技术。现代微电子学起源于1947年发明的晶体管。在晶体管诞生10年后,得克萨斯仪器公司的基尔毕(Kirby)发明了集成电路。最早的集成电路,只不过是把一个晶体管用导线与几个电阻电容等元件连接,元器件总数为12个。从此以后,

集成电路迅速发展。到 1997 年,被集成的晶体管个数已经达到了 1G-DRAM (约 10^6 个元器件)。现在,集成电路仍然以每 3 年增加 10 倍集成度的速度发展。微电子学的集成电路之所以取得如此爆炸性的进展,是由于充分发挥了集成化的优越性,从最早的去掉焊点提高可靠性开始,经过小型化和成品率的提高,从量的扩大引起质的变化,“集成”成为了一种潜力难以估量的科学技术手段。

目前,集成光学技术还难以直接和微电子学集成技术相比较,微电子集成已达到了相当成熟的阶段。但是,从集成电路的飞速发展历程看来,我们有理由期待,在不久的将来,集成光学也会以迅猛的发展速度实现高集成度、小型化和多功能化的目标。

1.2 集成光学的特点

1.2.1 集成光学系统与离散光学器件系统的比较

传统的、非集成的离散光学元件系统由于体积和重量大、稳定性差和光束的调准困难,已不能适应现代信息光电子技术发展的需要^[3]。为满足当今信息时代的要求,光学器件的发展从传统的离散光学器件发展到目前的集成光学阶段。离散光学器件是将体型光学器件固定在大型的平台或光具座上,构成光学系统。该系统的大小大约是 1m^2 的数量级,光束的粗细大约为 1cm 的程度。除了体积庞大之外,组装、调整也比较困难。本书将要介绍的集成光学系统具有如下优点^[4]:

(1) 光波在光波导中传播,光波容易控制和保持其能量。

(2) 集成化带来的稳固定位。如上所述,集成光学期待在同一块衬底上制作若干个器件,因而不存在离散光学器件所具有的组装问题,这样就可以保持稳定的组合,所以它对振动和温度等环境因素的适应性也比较强。这可以说是集成光学的最大优点。

(3) 器件尺寸和相互作用长度缩短;相关的电子器件的工作电压也较低。

(4) 功率密度高。沿波导传输的光被限制在狭小的局部空间,导致较高的光功率密度,容易达到必要的器件工作阈值和利用非线性光学效应工作。

(5) 体积小、重量轻。集成光学器件一般集成在厘米尺度的衬底上,其体积小,重量轻。

在基本上完成了作为集成光学初期阶段的单个器件的研究工作后,现在终于迎来了光集成的实质性阶段,相信今后会逐步走向广泛的实用化。

1.2.2 集成光路与集成电路的比较

1.2.1 节里,就集成光学的特点与离散光学进行了比较。下面我们再换个角

度来分析集成光学的产生与发展的必然性, 就会更容易了解目前还处于发展阶段的集成光学的地位了。

目前, 集成光学已初具规模, 并在光通信及光信息处理方面显示出电子学无法比拟的优越性。不单是比离散元器件构成的光学系统具有巨大优越性, 作为一种信息的处理与传输系统, 与微电子系统相比, 集成光学系统也具有其固有的重大优越性。

光集成的优点可以分为两个方面^[5], 其一是用集成光学体系(集成光路)代替集成电子体系(集成电路), 其二则与导光波的光学纤维和介质平面光波导代替电线或者同轴电缆传输信号有关。

在集成光路上, 各光学元件形成在一个晶片衬底上, 用衬底内部或表面上形成的光波导连接起来。采用类似于半导体集成电路的方法, 把光学元件以薄膜形式集成在同一衬底上的集成光路, 是解决原有光学系统小型化和提高整体性能问题的重要途径。这样的集成器件具有体积小、性能稳定可靠、效率高、功耗低, 使用方便等优点。

与集成电子体系相比, 集成光学体系具有其独特的优越性^[6~8]。首先, 集成光路与光纤一样, 信号的载体是光波, 光波的频率比电子手段产生的电磁振荡(包括微波)高得多, 因而可能加载频带宽度极宽的信号; 而且避免了电路的导线固有的电容和电感导致的频率限制效应。这样, 集成光路的光信号的传输带宽及与此相应的传输信息量, 比电子电路系统的电信号的传输带宽和信息量超过若干数量级。其次, 虽然电子计算机已经进入大规模和超大规模集成电路的时代, 但其运算速率始终受限于固体电子器件中电子运动的速度, 而光子计算机以光速运动的光子为工作的基础, 其理论计算速率可高达 $10^{10} \sim 10^{11}$ 次/s, 它比目前计算速率最快的电子计算机高 100~1000 倍。第三, 空间上多道阵列、多频(波分复用)以致三维立体的光学存储及处理的特点, 使光存储和处理的容量可达到 10^{18} Kbit 的“海量信息”。如果用集成光路来实现光信号的逻辑运算、传送和处理, 则可制成体积小、速度快、容量大的“全光计算机”。光子计算机比电子计算机有着并行处理、信号互不干扰、开关速度快、光速传递、宽带以及信息容量极大的优点。

总的来说, 用集成光路代替集成电路的优点包括^[5]带宽增加, 波分复用, 多路开关, 耦合损耗小, 尺寸小, 重量轻, 功耗小, 成批制备经济性好, 可靠性高等。由于光和物质的多种相互作用, 还可以在集成光路的构成中, 利用诸如光电效应、电光效应、声光效应、磁光效应、热光效应等多种物理效应, 实现新型的器件功能。集成光路的主要优点列举在表 1.1 中。

表 1.1 集成光路的优点

1	光波导具有非常宽的带宽
2	光子器件中光子运动速度比电子器件中电子高得多, 而且没有导线电容和电感对频率的限制
3	在同一光路上可以传输和处理多个或多道频率的信号, 即实现“波分多路复用”
4	在空间上可以实现一维或二维以至三维立体的多路阵列传输及存储、处理
5	较小的尺寸、重量, 较低功耗
6	成批制造的前景和经济性
7	改善可靠性
8	改善光学连接及对准的稳定和可靠性, 避免由于震动带来的系统不稳定或失效
9	降低成本(制造、应用、维护、升级)

1.3 集成光学的发展和现状

经过长期的研究比较, 目前常用的光波导材料是半导体、 LiNbO_3 等晶态介质、聚合物和玻璃。与此同时, 与集成光学息息相关的半导体激光器、低损耗光纤等的研究也取得了一定进展。

1962 年开发出了第一个半导体同质结激光二极管, 但其效率较低, 阈值电流较大, 不能在室温下连续工作。1963 年提出了具有三明治结构的双异质结构半导体激光二极管, 并对其工作原理作了深入研究。1967 年异质结外延生长技术的出现, 拉开了半导体激光器实用化的序幕。1970 年实现了激光二极管的室温连续工作。此后, 分布反馈式和分布布拉格反射器式激光器、量子阱和应变量子阱激光器、垂直腔面发射激光器、半导体激光器阵列等半导体激光器、半导体光放大器和集成光源不断涌现, 为集成光学长远的发展奠定了基础。此外, 1970 年研制成功了低损耗光纤, 目前光纤的传输损耗已经降低到了 0.2dB/km 以下。这些研究开辟了全光通信系统的实用性讨论。

目前, 集成光学正以其独特的优点进入了迅速发展的阶段。相对于微电子学, 集成光学的器件尺寸较大和集成度不高一度是困扰集成光学发展的一个重要问题。近来, 光子晶体和微谐振腔、微腔激光器、纳米量子线导光和等离子体激元表面波等新技术原理的出现为实现小尺寸和高集成度提供了理论基础, 使得集成光学进入了高速发展的新阶段。

1987 年, Yablonovitch 和 John 大约同时独立地提出了光子晶体 (photonic crystal, PC) 的概念。光子晶体^[9,10]概念的提出向人们展示了一种全新的控制光子的机制, 它完全不同于以往利用全反射来引导光传输。利用光子晶体实现的集成光学系统可能实现小型化、提高集成度, 为集成光学的发展和应用带来了新的

生机和活力,展现了一个美好的未来。

1946年从理论上提出了限制在微腔中的光场的光子态密度的改变的效应,并预言了腔对自发辐射衰变速度有增强和抑制的作用;1982年预期微腔激光器可以极大地降低激射阈值,可望实现无阈值激光器,这才引起了人们的注意,从此开始了微腔的深入研究。由于微腔激光器有许多优点,如小尺寸、动态单纵模、窄光束、垂直于衬底出射光和便于集成等,使它有极为重要的应用前景。微腔激光器^[11]及其集成的二维面阵,有望成为集成光学系统所需光源的最佳选择。

2003年,中美科学家联合开发出制备纳米线的新方法^[12]。纳米线提供了尺度远远小于光波长的导光结构,它与有关纳米尺度的微腔和激光器的技术配合,可望用于制作各种纳米光集成器件^[13,14]。

集成光学的理论研究也是重要的研究方面。集成光学的理论研究主要集中在器件的新原理、设计概念、结构设计、功能模拟、特性参数计算等方面。理论上对于集成器件的结构与性能模拟通常使用计算机辅助设计与数值计算的方法^[15~18],如传递矩阵方法(transfer matrix method, TMN)、光束传播法(beam propagation method, BPM)、时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)和有限元法(finite element method, FEM)等都有效地用于集成光学器件的模拟与计算,并用于实现集成器件结构的优化。

目前,集成光学的研究已经在光电子行业中产生了重大的影响。国际上关于集成光学的研究十分活跃。1972年由美国光学协会主办召开了集成光学主题会议(Topical Meeting on Optics,后改名为Integrated and Guided Wave Optics),这是关于集成光学研究的第一次会议,具有深远的意义。此后,有关集成光学的国际会议大量增加。集成光学和光纤通信国际会议(International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, IOOC)从1977年开始,每隔一年召开一次;欧洲每年还要召开欧洲集成光学会议(European Conference on Integrated Optics, ECIO)。这些会议频繁地传递着国际间有关集成光学方面的最新研究成果,同时也加快了集成光学的研究进展。

在我国,集成光学研究是从1970年开始的,发展也十分迅速。1981年召开第一届全国集成光学学术会议,此后,每隔一年召开一次。1986年,我国启动的“863”计划中,将光电子器件及其集成技术选为信息领域的三大主题之一。从1986年至今,国家自然科学基金委员会对光电子研究给予了大力支持,所资助的项目大约200项,其中包括有源和无源器件及其集成相关的理论、方法、材料研究、器件与制作工艺研究及集成光学系统研究等。

国际上的学术交流与合作大大推动了集成光学的研究进程。虽然如此,集成光学目前在实践中依然面临许多尚未克服的技术和性能障碍,在理论上也有待新的突破。当前,集成光学的研究热点主要集中在如下几个方面^[19~23]:①在

很大程度上提高集成光学器件的可靠性和稳定性；②减小波导传输损耗、降低散射；③减小器件尺寸，提高集成度；④期待着光路/光元件的集成化；⑤提高光通信用多波长光源的性能、成本、可靠性；⑥突破目前的“光-电-光”交换的瓶颈；⑦进一步改善开关/调制器的消光比；⑧力争利用聚合物材料制作出实用化的集成光学器件；⑨尽可能研制实用化的波导型磁光隔离器和环行器，减小尺寸、提高集成度；⑩为制作高质量的狭长结构的波导，需要研究与此相适应的制作技术；⑪虽然适合通信波段的波导材料已经有了充分研究，但在 $0.633\mu\text{m}$ 波长段下，目前还没有合适的波导材料。因此，今后关于集成光学材料的研究，以及利用这些材料制作光波导的技术研究，必然将继续下去。⑫目前，光纤或激光器与波导的耦合过程比较复杂、费时而又难于固定，影响了集成光学的实用化进程；研究新的耦合技术以便高效的实现高性能的耦合。

1.4 研究集成光学的意义

前面我们说明了集成光学系统的含义及优特点；随之而来的问题是，人们为什么要研究集成光学，或者说研究集成光学的意义何在？

21 世纪，人类将迈入一个高度信息化的社会。信息时代的特征是：要求信息量十分巨大、信息传递非常快捷、信息处理十分迅速。其量化的标志为三“T”：信息传输速率将达到每秒万亿比特 (Tbit/s)；基于网络高速互联的计算机在人类活动中发挥着无与伦比的巨大作用，单个计算机的数据处理速度将达到每秒万亿次 (T/s) 的量级；超高密度的光存储技术将把海量信息浓缩在尺度很小的存储介质之中，单片存储器的存储容量将达到万亿字节 (Tbit)。由 Tbit/s 信息传输、T/s 信息处理和 Tbit 信息存储所构成的三“T”模式将成为人类数字化生活最显著的标志。

预计到 2010 年，这个世界将有足够的数字信息容量分配给每一个人，点播一部电影就像目前发送一封电子邮件一样容易。未来的大学将延伸为网络大学，未来的实验室可能会扩展为网络实验室，未来的图书馆可能演变为网络图书馆，未来的商务活动也将大量地采用电子商务的形式，未来的时代因此而被人们称作信息时代或网络时代。由此可见，三“T”技术的实现在某种程度上改变着人类的生存和发展方式。而这一切都离不开信息光电子技术。

在现代战争中，基于信息光电子技术的激光雷达、红外夜视和激光精密制导等先进军事技术扮演了重要的角色。海湾战争、科索沃战争、美伊战争突出地向全世界展示了信息和信息光电子技术在现代战争中的重要地位。因此，信息光电子技术也是保障国防安全的核心技术之一。

由此可见，光电子技术在未来的信息社会中必将扮演重要的角色，将成为