

高等院校光信息科学与技术专业系列教材

光波导原理与器件

Optical Waveguide Principle and Devices

宋贵才 全薇 主编

Song Guicai Quan Wei

蔡红星 雷建国 朱万彬 副主编

Cai Hongxing Lei Jianguo Zhu Wanbin



清华大学出版社

高等院校光信息科学与技术专业系列教材

光波导原理与器件

Optical Waveguide Principle and Devices

宋贵才 全薇 主编

Song Guicai Quan Wei

蔡红星 雷建国 朱万彬 副主编

Cai Hongxing Lei Jianguo Zhu Wanbin

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍导波光学产生和发展概况之后,从光的电磁理论出发,系统、深入地论述了光在光波导中传播时发生的基本现象和遵循的基本规律,同时阐述了光波导器件的原理、结构、制作技术和工艺。全书内容共分7章:光波导原理与器件概述,光波导的理论基础,光波导元器件和传感器,光波导的制备技术,光波导耦合理论与耦合器,光调制和光波导调制器,光纤和光纤技术。

本着厚基础,重应用,使读者学以致用理念,本书在重点讲述基本原理、基本概念和基本知识的基础上,全面、系统地讲述了光波导原理以及光波导器件的结构、功能、制作方法和相关应用。

本书可作为高等院校光信息科学与技术专业、应用物理学专业、电子科学与技术专业、光电子技术科学专业以及光学工程专业本科生的专业基础教材,也可供从事光学及相关领域学习和研究的师生和科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

光波导原理与器件/宋贵才等主编. —北京:清华大学出版社,2012.1
(高等院校光信息科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-27352-3

I. ①光… II. ①宋… III. ①光波导 IV. ①TN252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 237923 号

责任编辑:盛东亮

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:14.75 字 数:366千字

版 次:2012年1月第1版 印 次:2012年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00元

产品编号:044298-01

出版说明

INTRODUCTION

光信息科学与技术既是信息科学与技术的重要组成部分,又是 21 世纪光子学的重要应用,它涵盖了光信息的产生、检测、处理、传输、存储以及显示等诸多方向。在过去 30 年中,光子学有了巨大的进步,光电子成为我国重要的产业支柱,光通信技术、平板显示技术、光电检测技术、激光加工技术、光盘存储技术都先后形成了独立的高技术产业,并渗透到国防、医疗、能源、交通等各行各业。因此对于高层次人才的需求极为迫切。同时,光信息科学与技术虽然与电子科学技术有天然的联系,但它是一个平行于电子科学技术的独立的信息科学与技术,对于人才的知识结构、实践能力以及科学素养有独特的要求。我国自 1999 年后,有近百所大学设立了光信息科学技术的本科专业,光学工程、光学、物理电子学以及通信工程、凝聚态物理等相关学科也迅速发展。为了适应这个专业人才培养的需要,清华大学出版社特组织出版了这套光信息科学与技术系列教材。

鉴于光信息科学与技术本身发展非常迅速,知识更新快,而本科生主要是打好专业基础,因此本系列教材在选材、框架结构、讲授方法等都十分注意处理好当前最新知识和长远应用的基础知识的关系,并且注意本套丛中各个教材的搭配与衔接,以便读者对于光信息科学与技术专业有一个全面的认识。

希望本系列教材能够为我国光电子产业的人才培养与技术进步做出贡献。

清华大学出版社

前言

PREFACE

本书重点讲解光波导的原理,光波导器件的结构和功能,光波导制备工艺和技术,光波导耦合器,光波导调制器及应用。

本书的教学时数为 48 学时。全书共分 7 章:第 1 章,全面介绍导波光学的产生和发展过程,导波光学系统构成以及导波光学所带动的相关技术的发展。第 2 章,从光的电磁理论出发,着重讨论光在光波导中的传输规律,以及光在突变光波导、渐变光波导、圆柱形光波导、条形光波导中传播时的基本解。第 3 章,重点讲述光路变换器、功率分配器、偏振器、波长分波器以及透镜等光波导型元器件的结构和工作原理。第 4 章,在介绍光波导材料和衬底材料的基础上,重点讲述有源材料和无源材料光波导的制作技术;光路几何图形的微细加工技术和光波导电极的制作方法。第 5 章,在讲述光波导耦合基本理论的基础上,重点讲述了棱镜耦合器、光栅耦合器和楔形耦合器。第 6 章,在讲述光调制的理论基础之后,重点讲述了光波导电光调制器和光波导声光调制器。第 7 章,在简述光纤的种类和结构之后,重点讲述了光纤的制作技术,光纤的光线理论分析,光纤的损耗、色散,以及光纤通信技术和光纤传感器技术。

本书前后连贯,逻辑性强,便于学习和记忆。书中图表丰富,推演过程详细,便于理解和掌握。书中各节都有要点总结,便于对重点知识的把握。书中各章后面都有小结,附有与讲述内容联系紧密并且实用性强的习题,便于学以致用。

本书可作为高等院校光信息科学与技术专业、应用物理学专业、电子科学与技术专业、光电子技术科学专业以及光学工程专业本科生的专业基础教材,也可供从事光学及相关领域学习和研究的师生和科技人员参考。

本书由宋贵才、全薇编写第 1~4 章,蔡红星、雷建国、朱万彬共同编写第 5~7 章。宋贵才统编全稿,研究生贾昧超、李国伟、杨飞宇、曹世豪、张琦、倪维元和史文宗对本书的习题进行了编写和解答。高飞老师对本书进行了排版、编辑和校对。

本书由孔梅教授审阅,并提出了中肯的意见和建议,使本书结构更加合理,内容更加丰富,在此对孔梅教授表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了张先徽和王雪萍老师的热情帮助,同时也得到了金光勇和马文联两位院长的大力支持。本书的写作参阅了一些编著者的著作,在此一并谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切期望广大读者批评指正。

编者

目 录

CONTENTS

第 0 章 绪论	1
第 1 章 光波导原理与器件概述	3
1.1 导波光学的发展	4
1.1.1 导波光学基本概念	4
1.1.2 导波光学产生及发展过程	4
1.2 导波光学系统构成及优点	7
1.2.1 导波光学系统构成	8
1.2.2 导波光学系统优点	8
1.3 光波导器件的进展	9
1.3.1 光波导宽带光调制器	9
1.3.2 光波导开关	9
1.3.3 光波导频谱分析器	11
1.3.4 高密度信息读取器	12
1.4 光波导技术研究热点和发展趋势	14
1.4.1 光波导技术的研究热点	14
1.4.2 光波导技术的发展趋势	15
小结	16
习题	16
第 2 章 光波导的理论基础	17
2.1 光波导种类	17
2.1.1 按形状分	18
2.1.2 按折射率分布分	18
2.2 光波导的射线光学理论	19
2.2.1 平面(板)光波导简介	19
2.2.2 射线光学模型	19

2.2.3	光入射到介质界面处的基本定律	20
2.2.4	全反射时的相移	21
2.2.5	平面光波导的导模	22
2.2.6	模式本征方程的图解	24
2.2.7	应用实例	26
2.3	古斯-汉欣线移和有效厚度原理	27
2.3.1	古斯-汉欣线移	28
2.3.2	有效厚度	29
2.4	光波导的电磁理论	29
2.4.1	电磁过程的基本方程	30
2.4.2	平面光波导中的亥姆霍兹方程	32
2.5	折射率突变光波导的基本解	36
2.5.1	TE 导模的场分布	37
2.5.2	模式本征方程	37
2.6	折射率渐变光波导的基本解	39
2.6.1	平方律折射率分布	39
2.6.2	指数律折射率分布	40
2.7	条形介质光波导的基本解	42
2.7.1	马卡提里近似	42
2.7.2	$E_{m,n}^x$ 模式分析	43
2.7.3	$E_{m,n}^y$ 模式分析	46
2.7.4	有效折射律法	47
2.8	圆柱形介质光波导的基本解	49
2.8.1	光纤导模的基本解	49
2.8.2	导引模的截止条件	51
	小结	52
	习题	52
第 3 章	光波导元器件和传感器	55
3.1	光路变换器	55
3.1.1	光波导棱镜	56
3.1.2	端面反射镜	56
3.1.3	弯曲光波导	56
3.2	功率分配器	58
3.2.1	单模光波导型功率分配器	58
3.2.2	多模光波导型功率分配器	61
3.3	光波导偏振器	62

3.3.1	金属包层	63
3.3.2	各向异性晶体	63
3.4	模分割器和模变换器	64
3.4.1	方向耦合器型模分割器	64
3.4.2	三层结构分支光波导	65
3.4.3	Y形分支光波导模分割器	66
3.4.4	模变换器	66
3.5	光波导型透镜	67
3.5.1	模折射率透镜	67
3.5.2	短程透镜	68
3.5.3	费涅耳透镜	70
3.5.4	微透镜阵列	71
3.6	光波导传感器	72
3.6.1	光波导温度传感器	72
3.6.2	光波导压力传感器	73
3.6.3	光波导微位移传感器	74
3.6.4	光波导振动传感器	74
小结	75
习题	75
第4章	光波导的制备技术	76
4.1	光波导制作概述	76
4.1.1	光波导光薄膜材料	76
4.1.2	光波导制作难点	77
4.1.3	材料与制作技术	77
4.1.4	光波导的结构、制作方法和特性	78
4.2	光波导衬底材料及加工	80
4.2.1	光波导衬底材料	80
4.2.2	衬底材料的加工	81
4.3	无源材料光波导的制备技术	82
4.3.1	淀积技术	83
4.3.2	置换技术	85
4.4	有源材料光波导制备技术	87
4.4.1	外延生长技术	87
4.4.2	减少载流子浓度技术	91
4.5	光路几何图形的加工工艺	93
4.5.1	集成光路设计和加工工艺	94

4.5.2	光路几何图形设计和加工工艺	94
4.6	光刻技术	95
4.6.1	光致抗蚀剂	95
4.6.2	涂布抗蚀剂	96
4.6.3	曝光方式	96
4.6.4	显影和坚膜	96
4.6.5	脱膜和腐蚀	97
4.7	电子束扫描曝光法	98
4.7.1	电子束致抗蚀剂	98
4.7.2	电子束扫描曝光系统构成和特点	98
4.8	光波导加工技术	99
4.8.1	脱膜法	99
4.8.2	腐蚀法	100
4.9	条形光波导的制作方法	104
4.9.1	条形光波导的结构及制作方法	104
4.9.2	埋入型条形光波导的制作工艺流程	105
4.9.3	脊型条形光波导的制作工艺流程	105
4.9.4	加载型条形光波导的制作工艺流程	106
4.10	条形玻璃光波导的制作	107
4.10.1	埋入型条形玻璃光波导	107
4.10.2	脊型玻璃光波导	109
4.10.3	加载型玻璃光波导	110
4.11	条形 LiNbO_3 光波导的制作	111
4.11.1	Ti 扩散 LiNbO_3 光波导	111
4.11.2	质子交换 LiNbO_3 光波导	113
4.11.3	LiNbO_3 光波导电极的制作	113
小结		116
习题		116
第 5 章	光波导耦合理论与耦合器	118
5.1	光波导耦合的基本理论	118
5.1.1	模式耦合方程	119
5.1.2	光波导耦合的微扰理论	119
5.2	导模与辐射模的耦合	125
5.2.1	导模与辐射模耦合分析	125
5.2.2	输出耦合	126
5.2.3	输入耦合	126

5.3	棱镜耦合器	127
5.3.1	棱镜耦合器的工作原理	127
5.3.2	棱镜耦合实验	130
5.4	光栅耦合器	132
5.4.1	光栅耦合器的工作原理	132
5.4.2	光栅耦合形成导波的条件	133
5.4.3	光栅的制作方法	136
5.5	楔形光波导耦合器	138
5.5.1	楔形光波导耦合器的工作原理	138
5.5.2	楔形耦合模型	139
5.6	光波导耦合的其他方法	140
5.6.1	直接聚焦耦合	140
5.6.2	直接对接耦合	141
	小结	142
	习题	142
第6章	光调制和光波导调制器	144
6.1	光波导调制技术概述	144
6.1.1	几个基本概念	144
6.1.2	光调制的评价指标	145
6.2	调制光的光谱分析	147
6.2.1	调幅光频信号频谱	147
6.2.2	频率调制的频谱	148
6.2.3	相位调制的频谱	149
6.2.4	强度调制的频谱	150
6.2.5	脉冲调制的频谱	151
6.3	电光调制技术	152
6.3.1	几个基本概念	152
6.3.2	线性电光效应	153
6.3.3	电光相位调制	156
6.3.4	电光强度调制	157
6.3.5	电光高频调制	158
6.3.6	行波电光调制	159
6.3.7	电光偏转	160
6.4	声光调制技术	162
6.4.1	几个基本概念	162
6.4.2	拉曼-奈斯衍射	163

6.4.3	布拉格衍射	165
6.4.4	声光调制器	167
6.4.5	声光偏转	168
6.5	光波导调制器	169
6.5.1	基本机理	170
6.5.2	电光波导调制器	170
6.5.3	声光波导调制器	173
	小结	176
	习题	176

第7章 光纤和光纤技术 178

7.1	光纤产生及应用	178
7.1.1	光纤初始阶段	179
7.1.2	光纤实用阶段	179
7.2	光纤的种类和结构	180
7.2.1	光纤的种类	180
7.2.2	光纤的结构	182
7.3	光纤的制作技术	183
7.3.1	光纤材料	183
7.3.2	光纤预制棒制备	183
7.3.3	光纤拉丝	186
7.3.4	光纤涂覆	189
7.4	折射率突变光纤的光线理论分析	192
7.4.1	光纤中的光线	192
7.4.2	光纤的数值孔径	193
7.4.3	子午光线的时延差	194
7.5	折射率渐变光纤的光线理论分析	195
7.5.1	平方律光纤(自聚焦光纤)	195
7.5.2	光线在光纤中的传播轨迹	196
7.6	光纤的损耗	198
7.6.1	吸收损耗	198
7.6.2	散射损耗	199
7.7	光纤的色散	200
7.7.1	光纤色散的种类	200
7.7.2	光波导色散	201
7.7.3	多模色散	202
7.7.4	材料色散	202
7.8	光纤传感技术	203
7.8.1	光纤传感器的基本原理	203

7.8.2 光纤传感器的优点·····	204
7.8.3 光纤传感器的种类·····	204
7.9 光纤通信技术·····	205
7.9.1 光通信技术的原理·····	206
7.9.2 光纤通信的特点·····	207
小结·····	209
习题·····	209
附录 A 常用术语 ·····	211
附录 B 习题参考答案 ·····	219
参考文献 ·····	221

光波导是将光波限制在特定介质中进行传输的导光通道。说到光波导就不得不提到导波光学,通常人们把纤维光学和集成光学统称为导波光学。导波光学以光的电磁理论为基础,研究光波在光波导中的传播、耦合、散射和衍射等效应。目前,导波光学已成为各种光波导器件设计和制作的理论基础。

导波光学研究的重点是光波导传光理论;光波导电光、声光、磁光等调制技术;光波导器件原理与制作技术和光波导的应用技术等。

导波光学是1969年美国贝尔实验室的 Miller 博士提出集成光学的概念后发展起来的。1972年,Somekh 和 Yariv 提出在同一个衬底上同时制作光波导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和制备方法制作光波导器件。其中,最主要的光波导器件就是微型的光源器件和低损耗的传光器件。

在微型的光源器件方面。1962年,第一个半导体同质结激光二极管问世,尽管其效率较低,阈值电流较大,不能在室温下连续工作,却带来了光源小型化的希望和曙光。1963年,人们对三层结构的双异质结构半导体激光二极管进行了深入的理论和试验研究。1967年,外延生长技术的出现,使半导体激光器制作工艺更加成熟和完善。1970年研制成功能在室温下连续工作的激光二极管。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、半导体光放大器等导波光学所需微型光源不断涌现,为光波导技术长远的发展奠定了基础。

在低损耗的传光器件方面。1970年,美国康宁玻璃公司的三名科研人员马瑞尔、卡普隆、凯克成功地制成了世界上第一根低损耗的石英光纤,其传输损耗只有 20dB/km,1974年美国贝尔研究所发明了低损耗光纤制做法——汽相沉积法(CVD),使光纤损耗降低到 1dB/km。1990年,传输损耗降低到 0.14dB/km,已经接近石英光纤的理论衰减极限值(0.1dB/km)。目前光纤的传输损耗已经降低到 0.1dB/km 以下。

相对于微电子学,光波导器件尺寸较大和集成度不高是限制光波导技术发展的一个重要问题。近年来,光子晶体、微腔激光器、纳米量子线导光等新材料、新技术的出现,为实现小尺寸和高集成度提供了技术和工艺基础,使得光波导技术进入了高速发展的新阶段。

光子晶体的理论研究始于20世纪80年代末期。1987年 Yablonovitch 和 John 提出了光子晶体的概念,1989年, Yablonovitch 和 Gmitter 首次在试验上证实三维光子能带结构的存在。迄今为止,已有多种基于光子晶体的全新光子学器件被相继提出,包括无阈值的激

光器,无损耗的反射镜和弯曲光路,高品质因子的光学微腔,低驱动能量的非线性开关和放大器,波长分辨率极高而体积极小的超棱镜,具有色散补偿作用的光子晶体光纤,以及高效率的发光二极管等。光子晶体的出现使信息处理技术的“全光子化”和光子技术的微型化与集成化成为可能,它可能在未来导致信息技术的一次革命,其影响可能与当年半导体技术相提并论。

谐振腔尺度在光波波长量级的激光器称为微腔激光器。目前,其结构形式主要有垂直腔面发射激光器和微盘激光器。垂直腔面发射激光器一般是以高反射率的多层介质膜作为平面腔镜,激光垂直于腔镜表面出射;微盘激光器则是利用弯曲界面的全反射形成腔限制,以回音壁模式作为主要谐振模式。1988年,日本东京工业大学的伊贺(Iga)等人成功地研制出垂直腔面发射激光器;1992年美国AT&T的麦考(McCall)等人研制成功液氮温度光泵浦InGaAs/InGaAsP微盘激光器。微腔激光器具有尺寸小、阈值低、转化效率高和易调制等特点,在光集成、光互连、光神经网络以及光通信等导波光学系统中有着广泛的应用前景。

纳米线是一种具有在横向上被限制(100nm以下)在纵向没有限制的准一维结构。这种尺度上,量子力学效应很重要,因此,也被称作“量子线”。根据组成材料的不同,纳米线可分为金属纳米线(如Ni,Pt,Au等)、半导体纳米线(如InP,Si,GaN等)和绝缘体纳米线(如SiO₂,TiO₂等)。纳米线不仅可以被用来制作超小电路,甚至可以制作超低损耗的光波导。

目前,实用光波导有光纤、平面光波导和条形光波导。光纤的一个传输特性是衰减很小、频带很宽、抗电磁干扰,主要用于通信;它的另一传输特性是对外界的温度和压力等因素敏感,因而可制成光纤传感器,用于测量温度、压力、声场等物理量。平面光波导与条形光波导主要用于制作有源和无源的光波导元件,如激光器、调制器和光耦合器等。它们采用半导体薄膜工艺,适合制成平面结构的集成光路。

光波导原理与器件的研究成果将广泛用于信息获取、信息传输、信息处理和生产生活领域。在信息获取方面,可对位移、振动、温度、压力、应变、应力、电流、电压、电场、磁场、流量、浓度等物理、化学量进行测量。在信息传输方面,可制成有源、无源器件,可构成光纤通信干线,可组成光交换接入网,可实现AON、DWDM、OADM、OTDM和FTTC/B/O/H。在信息处理方面,可实现光子集成、光电子集成,完成集成光路当中光收发模块、光接入模块、光开关模块和光放大模块的研制。在生产生活方面,可用于广告显示牌、激光手术刀、仪表照明、工艺装饰、光纤面板、医用内窥镜和潜望镜等方面。

21世纪,人类将进入信息化时代。信息时代的特征是信息量十分巨大,信息传递非常快捷,信息处理十分迅速。与它们对应的光存储、光传输和光计算将成为信息化时代最显著的标志。光波导理论和光波导器件的研究将为信息时代的发展奠定基础。

【教学目的和学习目标】

- (1) 掌握光波导、集成光路、导波光学等基本概念
- (2) 掌握导波光学系统的基本构成
- (3) 了解导波光学及相关技术发展概况
- (4) 了解光波导器件的发展历程
- (5) 了解导波光学的发展方向和趋势

光波导是一种能够将光限制在其内部或其表面附近,引导光波沿着确定的方向传播的导光通道,它包括平面光波导、条形光波导和圆柱形光波导。研究光波导中光传输特性及其应用的学科称为导波光学。导波光学一般可以划分为两个分支:光纤光学和集成光学。导波光学以光的电磁理论为基础,研究光波在光波导中的传播、散射、偏振、衍射等效应,导波光学已成为各种光波导器件制作技术的理论基础。

光波在诸如空气和水等开放性介质当中传播时,介质会对光产生较大的吸收、色散和散射,从而使光产生较大的损耗。为了减少光在介质当中的传输损耗,人们利用不同介质对光吸收(选择性吸收)不同的特点制成了不同的光波导。例如,光波导层可以用玻璃、石英、塑料和半导体等材料。

实用光波导有平面光波导、柱形光波导和条形光波导三类,如图 1-1 所示。平面光波导有三层介质,中间层为导光层(阴影部分),其薄膜厚度约 $1\sim 10\mu\text{m}$,上层(通常为空气)为覆盖层,下层为衬底层,上下层的折射率均小于导光层的折射率。当薄膜的宽度为有限尺寸时,称为条形光波导。光波能量主要集中在条形带状结构中。平面光波导与条形光波导主要用于制作有源和无源的光波导元件,如激光器、调制器和光耦合器等。它们采用半导体薄

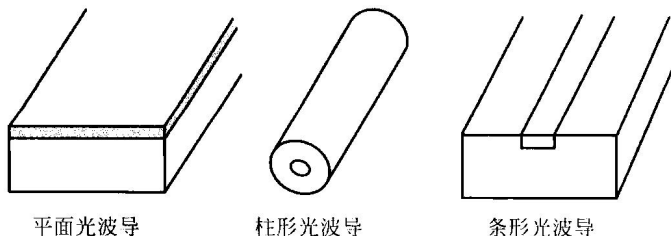


图 1-1 光波导种类

膜工艺,适合制成平面结构的集成光路。柱形光波导通常又被称为光导纤维,一般通过拉丝的方式进行制作,它可以用来制作光纤激光器,更多是用于进行光传输。

本章将介绍光波导、集成光路、导波光学等基本概念之后;重点讲述导波光学系统的基本构成和优点;导波光学及相关技术发展概况;光波导器件的发展历史和导波光学的发展方向 and 趋势。

1.1 导波光学的发展

20世纪60年代激光的出现,使半导体电子学、导波光学、非线性光学等一系列新学科涌现出来。20世纪70年代,由于半导体激光器和光导纤维技术的重大突破,使以光通信、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得到迅速发展,导波光学已经成为光信息科学与技术的基础。为了便于理解导波光学的含义,我们从相关的基本概念讲起。

1.1.1 导波光学基本概念

1. 导波光学

导波光学是研究光在光波导中传输规律及其应用的学科。它的研究对象是以光波导现象为基础的光子学和光电子学系统。

光波导:光波导是将光波限制在特定介质中进行传输的导光通道。光波导一般指导光薄膜,可定义为有一维或二维限制的狭窄的导光通道元器件。

光子学:光子学定义为光的产生、发射、调制、探测和存储等行为的一门学科,主要的研究领域包括量子光学、分子光学和非线性光学。

光电子学:光电子学是由光学和电子学相结合而形成的新技术学科。光电子学通常是指光频电子学,即以光波代替无线电波作为信息载体,实现光发射、控制、测量和显示等。光电子学有时也狭义地专指光—电转换器件及其应用的领域。光电子学还包括利用光电子发射带出的信息来研究固体内部和表面的成分和电子结构的光电子能谱学。

2. 集成光路

集成光路指在光波导上制造微型的光学元件,并互连耦合为具有一定功能的光学系统,用于实现光的发射、传输、偏转、调制和探测功能的光路系统。

1.1.2 导波光学产生及发展过程

推动导波光学发展的动力来自于人们要制造小型化光学元件和集成化光学系统,即制造结构紧凑、性能稳定的集成光路。制造集成光路首先要解决的就是光源小型化,因此,导波光学是伴随半导体激光器的发展而发展起来的。

1. 半导体激光器的产生

1962年7月,在固体器件研究国际会议上,美国麻省理工学院林肯实验室的学者克耶斯(Keyes)和奎斯特(Quist)报告了砷化镓材料的光发射现象,这是半导体激光器的雏形。半导体激光器以材料的p-n结特性为基础,因此,半导体激光器常被称为二极管激光器或激光二极管。

早期的激光二极管有很多实际限制,例如,只能在77K低温下以微秒脉冲工作,过了8年多时间才由贝尔实验室和列宁格勒约飞(Ioffe)物理研究所制造出能在室温下工作的连续器件。而足够可靠的半导体激光器则直到20世纪70年代中期才出现。

20世纪60年代初期的半导体激光器是同质结型激光器,如图1-2所示。它是在一种材料上制作的p-n结二极管在正向大电流注入下,电子不断地向p区注入,空穴不断地向n区注入。于是,在原来的p-n结耗尽区内实现了载流子分布的反转,由于电子的迁移速度比空穴的迁移速度快,在有源区发生辐射、复合,发射出荧光,在一定的条件下发出激光,这是一种只能以脉冲形式工作的半导体激光器。

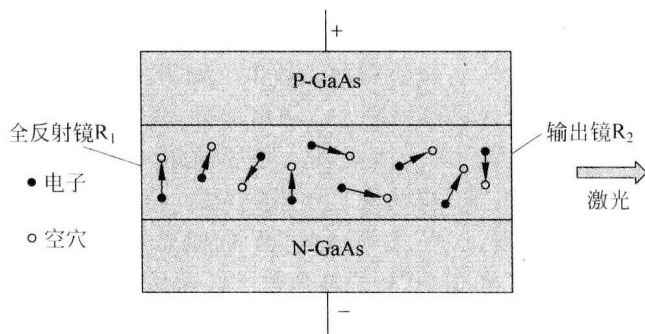


图 1-2 同质结半导体激光器示意图

半导体激光器发展的第二阶段是异质结构半导体激光器,它是由两种不同带隙的半导体材料薄层,如GaAs, GaAlAs所组成,如图1-3所示。1969年,最先出现的是单异质结构激光器(Single Heterojunction Laser, SHL),如图1-3(a)所示。它是利用异质结提供的势垒把注入电子限制在GaAs p-n结的p区之内,以此来降低阈值电流密度,其数值比同质结激光器降低了一个数量级,但单异质结激光器仍不能在室温下连续工作。

1970年,实现了激光波长为900nm室温连续工作的双异质结GaAs-GaAlAs激光器,如图1-3(b)所示。双异质结激光器(Double Heterojunction Laser, DHL)的诞生使可用波段不断拓宽,线宽和调谐性能逐步提高,其结构的特点是在p型和n型材料之间生长了仅有 $0.2\mu\text{m}$ 厚的,不掺杂的,具有较窄能隙材料的一个薄层,因此,注入的载流子被限制在该区域内(有源区),这样注入较少的电流就可以实现载流子数的反转。在半导体激光器件中,目前技术比较成熟、性能较好、应用较广的是具有双异质结构的电注入式GaAs二极管激光器。

随着异质结激光器的研究发展,人们想到将超薄膜($< 20\text{nm}$)的半导体层作为激光器的激活层,以至于能够产生量子效应。由于分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、金属有机化合物化学气相淀积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)技术的成熟,在1978年出现了世界上第一只半导体量子阱激光器(Quantum Well Laser, QWL)。