



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

集成光电子学

唐天同 王兆宏 陈 时 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

集成光电子学

唐天同 王兆宏 陈 时 编著

西安交通大学出版社

· 西 安 ·

内 容 提 要

本书是有关集成光电子学的一本导论性教材,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 13 章,包括以下内容:集成光电子学的概念和意义;平面介质光波导理论和模式耦合理论;晶体光学和光的调制;半导体激光器和放大器;光纤光栅和阵列波导光栅;光电集成器件;声光集成器件;集成光源和波长转换器;集成光探测器;非互易式磁光无源器件;集成光电子器件使用的材料;集成光电子学的主要工艺技术;平面介质光波导的数值计算原理。

本书是西安交通大学研究生创新教育系列教材之一,适合电子科学与技术、光学工程、光电技术、光信息科学技术、通信等专业研究生以及高年级本科生作教材使用,也可供其他相关专业学生及有关科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

集成光电子学/唐天同,王兆宏,陈时编著. —西安:
西安交通大学出版社,2005.9
(西安交通大学研究生创新教育系列教材)
ISBN 7-5605-1975-X

I. 集... II. ①唐... ②王... ③陈... III. 集成光学-光电子学-研究生-教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 031536 号

书 名:集成光电子学

编 著:唐天同 王兆宏 陈时

出版发行:西安交通大学出版社

地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)

电 话:(029)82668357 82667874(发行部)

(029)82668315 82669096(总编办)

网 址:<http://press.xjtu.edu.cn>

电子邮箱:eibooks@163.com

印 刷:陕西宝石兰印务有限责任公司

字 数:397 千字

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:21.625

版 次:2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5605-1975-X/TN·80

定 价:32.00 元

版权所有 侵权必究

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法,把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式,把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,有许多艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

集成光电子学是 20 世纪 60 年代末才发展起来的一门新兴科学技术。它是在光纤与平面介质光波导、半导体激光器与光探测器以及微电子的微细加工工艺技术相结合的基础上形成的,是现代光电子学的一个重要分支。作为光学、光电子学、微电子学和光通信等科学技术的交叉学科,集众多学科之长,经过三十多年的快速发展,集成光电子学在光通信、光信息处理、光传感及光计算等方面已显示出其独特的优越性和发展潜力。

由于半导体激光器、光探测器及平面介质光波导的研究进展,以及在微电子技术蓬勃发展的带动下微细加工技术的日臻完善,实现光电子集成成为可能。光电子集成将相干光限制在衬底上的与光波长可比拟的微小空间以内,通过材料的受激辐射、受激吸收、电-光、声-光、磁-光以及非线性光学等多种物理效应对其中传输的光波进行控制或处理,并可以与微电子技术结合,实现完整的信息系统功能。目前,集成光电子学研究已走向实用化的阶段,集成光源-调制器、矩阵式光开关等集成器件已经实现工程实用;有关新的器件与系统原理和设计概念的研究,为构建具有多种功能、高性能、高集成度的“集成光电子学系统”奠定了基础。在集成光电子的材料和工艺研究方面,也从初期的单一的玻璃或 LiNbO_3 衬底材料发展到如今包括半导体和聚合物在内的多种材料;尤其是 III-V 族半导体化合物实现多种光电功能器件的单片集成技术,得到了迅速发展。

21 世纪是信息技术的时代,光已经成为信息最先进、最重要的载体之一。巨大的发展潜力和应用前景使集成光电子学受到广泛关注。本书作为集成光电子原理与工艺的一门导论性教材,作者希望它能引导研究生和大学高年级本科生进入这一迅速发展的新技术领域,理解和掌握其基本原理和发展动向。

本书首先对集成光电子学的基本知识,包括集成光电子学的发展现状、研究意义、集成方式和集成类型等做了介绍。第二部分中扼要地论述了集成光电子学的基础理论,包括平面介质光波导理论、模式耦合理论、晶体光学、光调制原理和半导体激光器的原理。第三部分论述了各种集成光有源与无源器件及系统,并尽可能对国际上最先进的研究成果予以介绍。第四部分论述了集成光电子学的材料和主要制备工艺,并简要地介绍了有关平面介质光波导的数值计算原理。章末附有思考题与习题及参考文献,便于读者通过本书的学

习进行更深入的研究。

本书可用作电子科学与技术、光学工程、光电子技术、光信息科学技术、通信及其他相关专业的研究生和大学高年级本科生教材,并可供有关专业的科研人员与工程技术人员阅读参考。

唐天同教授任本书主编。第1~4章初稿由唐天同组织编写,第5~12章初稿由王兆宏组织编写,第13章初稿由陈时编写。唐天同负责统稿定稿。

由于集成光电子学仍处于快速发展之中,其学科内容日新月异,加之作者水平有限,错误及不完善之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2005年1月

目 录

第1章 概 论	(1)
1.1 集成光电子学的概念和研究范围	(1)
1.2 研究集成光电子学的意义	(2)
1.3 光电子集成的发展方向	(4)
1.4 光电子集成的方式	(7)
1.4.1 功能集成	(7)
1.4.2 个数集成	(9)
1.5 光电子集成的途径	(10)
1.5.1 单片集成	(11)
1.5.2 混合集成	(14)
习题	(16)
参考文献	(17)
第2章 平面介质光波导理论	(19)
2.1 平板波导的射线光学理论	(21)
2.1.1 光线在介质界面的反射和折射	(21)
2.1.2 光线在平板波导中的传播	(23)
2.1.3 平板波导中的导行波	(24)
2.1.4 古斯-汉欣位移	(26)
2.2 平板波导和条形波导的波动方程分析和波的传播模式	(29)
2.2.1 均匀平板波导中的光场和波的传播模式	(31)
2.2.2 条形光波导的光场和波的传播模式	(37)
2.2.3 玻璃衬底离子交换波导	(44)
2.3 导波模耦合理论	(46)
2.3.1 介质光波导的耦合模微扰理论	(47)
2.3.2 相互耦合的光波导之间的模式耦合	(48)
2.3.3 周期波导中波的耦合模分析	(51)
习题	(55)
参考文献	(56)

第3章 晶体光学和光调制原理	(57)
3.1 晶体学基础	(57)
3.1.1 晶体的空间点阵理论和晶系的划分	(57)
3.1.2 晶体的对称性	(60)
3.2 晶体光学介绍	(62)
3.3 电光效应	(66)
3.3.1 电光效应的基本概念	(66)
3.3.2 线性电光效应及电光调制器	(67)
3.4 声光效应	(70)
3.4.1 弹光效应和声光效应	(70)
3.4.2 声光相互作用	(70)
3.4.3 声光调制和声光偏转	(73)
3.5 磁光效应	(75)
3.5.1 磁化和磁畴	(76)
3.5.2 法拉第旋转效应	(77)
3.5.3 磁光克尔效应	(79)
3.5.4 磁致双折射效应	(81)
习题	(82)
参考文献	(83)
 第4章 半导体激光器和光放大器	 (84)
4.1 半导体激光器	(85)
4.1.1 半导体激光器的激光工作物质的特点	(85)
4.1.2 半导体激光器谐振腔和工作模式	(92)
4.1.3 半导体激光器的主要特性	(97)
4.2 光通信中的半导体激光器	(100)
4.3 半导体激光放大器	(103)
4.3.1 增益特性	(105)
4.3.2 噪声	(106)
4.4 新型半导体激光器介绍	(107)
4.4.1 分布反馈式半导体激光器	(109)
4.4.2 量子阱激光器	(111)
4.4.3 垂直腔面发射激光器	(112)
习题	(115)

参考文献	(115)
第 5 章 光纤光栅和阵列波导光栅	(117)
5.1 光纤光栅及其光学特性	(117)
5.1.1 均匀周期光栅光学特性	(118)
5.1.2 非均匀周期光栅的折射率分布和光谱特性	(120)
5.2 光纤光栅的应用和发展方向	(122)
5.2.1 光纤光栅的应用	(122)
5.2.2 光纤光栅的发展方向	(126)
5.3 阵列波导光栅的结构和原理	(126)
5.3.1 阵列波导光栅的结构	(127)
5.3.2 阵列波导光栅的原理	(128)
5.3.3 自由光谱范围	(130)
5.3.4 频率响应	(131)
5.3.5 阵列波导光栅的性能参数	(132)
5.4 阵列波导光栅的设计与发展现状	(132)
5.4.1 具有热稳定性的阵列波导光栅设计	(133)
5.4.2 极低损耗的阵列波导光栅设计	(134)
5.4.3 低偏振相关性阵列波导光栅设计	(135)
5.5 阵列波导光栅的应用	(137)
5.5.1 波长复用/解复用器	(137)
5.5.2 波导光栅路由器	(139)
5.5.3 光分/插复用器	(141)
5.5.4 阵列波导光栅滤波器	(142)
习题	(143)
参考文献	(143)
第 6 章 电光集成器件	(146)
6.1 几种常用电光材料的线性电光效应	(146)
6.1.1 铌酸锂晶体的线性电光效应	(147)
6.1.2 GaAs 和 InP 晶体的线性电光效应	(149)
6.2 电光开关与调制器	(149)
6.2.1 开关器和调制器的基本工作特性	(150)
6.2.2 波导型电光开关和调制器的基本构型	(152)

6.3	电光波导布喇格衍射调制器	(163)
6.4	电光模式转换器	(165)
6.5	电光波长可调谐滤波器	(168)
	习题	(169)
	参考文献	(169)
第7章	声光集成器件	(172)
7.1	声表面波技术概述	(172)
7.1.1	声表面波技术发展概况	(172)
7.1.2	声表面波技术的特点	(173)
7.1.3	声表面波与体声波的区别	(174)
7.1.4	声表面波材料	(174)
7.2	模式转换型声光器件	(176)
7.2.1	基本结构单元	(177)
7.2.2	声光可调谐滤波器	(180)
7.2.3	波长选择开关和分/插复用器	(184)
7.2.4	集成声光器件在波分复用系统中的应用	(187)
7.3	布喇格衍射型声光器件	(188)
7.4	全光纤声光可调谐滤波器	(190)
	习题	(191)
	参考文献	(191)
第8章	集成光源和波长转换器	(194)
8.1	多波长集成光源	(194)
8.2	波长可调谐光源	(198)
8.2.1	连续波长调谐光源	(199)
8.2.2	不连续波长调谐光源	(201)
8.3	波长转换器	(203)
	习题	(207)
	参考文献	(207)
第9章	集成光探测器	(211)
9.1	p-n 结光电二极管	(211)
9.1.1	反向偏置下 p-n 结的特性	(211)

9.1.2	工作原理	(215)
9.1.3	频率响应	(216)
9.1.4	探测灵敏度	(217)
9.1.5	波导型 p-i-n 光电二极管	(219)
9.2	雪崩光电二极管	(219)
9.3	肖特基势垒探测器	(222)
	习题	(224)
	参考文献	(224)
第 10 章	磁光隔离器和环行器	(226)
10.1	磁光材料	(226)
10.2	磁光隔离器	(228)
10.2.1	光隔离器的工作原理和技术要求	(229)
10.2.2	光隔离器的结构类型和原理	(232)
10.2.3	光隔离器的发展与应用	(238)
10.3	磁光环行器	(241)
10.3.1	光环行器的工作原理	(241)
10.3.2	波导型光环行器	(243)
10.3.3	光环行器的应用	(245)
	习题	(249)
	参考文献	(249)
第 11 章	集成光电子器件的材料	(252)
11.1	集成光电子材料特性及有关物理性质	(252)
11.2	集成光电子半导体材料	(255)
11.2.1	集成光电子半导体材料	(255)
11.2.2	集成光电子半导体材料的发展状况	(257)
11.3	集成光电子器件用非半导体介质材料	(259)
11.4	集成光电子器件用的其他材料	(260)
	习题	(262)
	参考文献	(262)
第 12 章	集成光电子学中的主要制备技术	(264)
12.1	薄膜淀积技术	(264)

12.1.1	物理淀积方法	(264)
12.1.2	化学气相淀积方法	(266)
12.1.3	混合方法	(266)
12.2	光刻技术	(268)
12.2.1	光刻抗蚀胶	(268)
12.2.2	光学光刻技术	(270)
12.2.3	非光学光刻技术	(271)
12.3	蚀刻技术	(272)
12.4	介质光波导制备技术	(275)
12.4.1	结晶基片的制备	(277)
12.4.2	掺杂技术	(278)
12.4.3	条形介质光波导及有关元件的制备	(281)
12.5	半导体单片集成器件制作工艺	(283)
12.5.1	半导体单片集成型集成光电子学器件制作工艺流程	(283)
12.5.2	Ⅲ-V 族化合物的外延生长	(286)
12.6	光纤光栅的写入技术	(294)
	习题	(297)
	参考文献	(298)
第 13 章	平面介质光波导的数值计算原理	(301)
13.1	平面介质光波导的有限元方法	(302)
13.1.1	有限元方法概略	(302)
13.1.2	封闭波导的有限元理论	(303)
13.1.3	开放波导的有限元理论	(308)
13.1.4	有限元方法的形状函数(插值基函数)	(313)
13.2	平面介质光波导的有限差分方法	(315)
13.2.1	封闭均匀波导的有限差分方法	(315)
13.2.2	封闭不均匀波导的有限差分方法	(318)
13.3	平面介质光波导的束传播方法	(322)
13.3.1	傅里叶变换束传播方法	(322)
13.3.2	有限差分束传播方法	(325)
	习题	(329)
	参考文献	(329)
附录	缩略语表	(331)

第1章 概 论

1.1 集成光电子学的概念和研究范围

集成光电子学是在光电子学和微电子学发展的基础上,采用集成方法研究和
发展光电子学器件和复合光电子学器件系统的一门新的学科。集成光电子学的出
现是光电子器件和电子器件本身发展的必然结果,它的发展受到了微电子集成电
路技术的启发和促进。

传统的光学系统体积大、稳定性差、调整和光束的准直困难,不能适应现代光
电子技术发展的需要。现代的光电子技术中,对于信号的产生与处理的方式与微
电子学不同,这里有两个重要的改变:首先是用光导纤维代替通常的电线或者同轴
电缆进行信息的传输;其次是使用集成光路取代通常的集成电路。在集成光路上,
各光电子学元件成型在一个晶片衬底上,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,把光学元件和电子元件以薄膜形式集
成在同一衬底上的集成光电子回路。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。

集成光电子学是当今光电子学领域的发展前沿之一,它主要研究集成在一个
平面上的光电子学器件和光电子学系统的理论、技术与应用,是光子学发展的必由
之路和高级阶段^[1~4]。集成光电子学以半导体激光器等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^①。目前,主要是研究和开发光通信、光传感、
光学信息处理和光子计算机所需的多功能、稳定、可靠的光集成体系和光电子集成
体系(OEIC:optical-electronic integrated circuit);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
同时与电子器件集成,则构成复合光电子集成体系。集成光电子学的理论基础是
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

① 除了本书所介绍的集成光电子学以外,还有一种微光学集成方式。集成光电子技术侧重于利用
光在光波导中的传播;微光学集成方式则侧重于利用光在自由空间的传播,侧重于光束的并行处理。具体参
见《微光学元件、系统和应用》第7章,赫尔齐克著,国防工业出版社,2002

学、薄膜光学、导波光学、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和光电子学内容;其工艺基础则主要是薄膜技术和微电子工艺技术。集成光电子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(IC: integrated circuit)。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等元件连接^[3]。被集成的晶体管个数,到1997年已经达到了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,经过成品率和小型化的提高,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技术手段。目前集成光电子技术自然还难以直接和微电子学集成技术相比较,后者已达到了很成熟的阶段。但是,从集成电路的飞速发展历程看来,我们有理由期望,在不久的将来,集成光电子学也会以迅猛的速度实现高集成度、小型化、多功能化的目标。

目前集成光电子学也正以其独特的优点进入了迅速发展的阶段。集成光电子学的器件尺寸较大和集成度不高一度是困扰集成光电子学发展的一个重要问题。近来,微腔激光器、纳米光波导等新技术原理的出现^[6~8]为实现小尺寸和高集成度提供了理论基础,使得集成光电子学进入了高速发展的新阶段。

1.2 研究集成光电子学的意义

上面说明了集成光电子学系统是什么,随之而来的第二个问题是,人们为什么要研究集成光电子学,或者说研究集成光电子学的意义何在。

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:信息大爆炸、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(Tb/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一片片小小的存储介质之中,单片存储器的存储容量将达到万亿字节(Tb)。由Tb/s信息传输、T/s信息处理和Tb信息存储所构成的三“T”模式将成为人类数字化生存最显著的标志。

预计到2010年,这个世界将有足够的数字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网络时代或信息时代。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 21 世纪科技发展的基石和支柱之一。而这些都离不开集成光电子学的发展。

我们说 20 世纪是电子世纪。电是由电子传导的,电子带有电荷,电子的运动及电信号易受电磁场干扰;电子具有有限的质量或惯性,因而电子传输信号的速率也受到限制。而光波是波长非常短、频率极高的电磁波,光子的静止质量为零,因而光传输信号的速率为光速,非常高;光子又是一种电中性粒子,因此光子的运动及光信号不受电磁场干扰。而电子学的发展又为我们更好地控制和使用光波奠定了基础。第一,利用微电子学中的半导体 p-n 结和谐振腔相关技术产生激光,而且这种激光易于用电的方法控制;第二,利用电子学中电磁波传输原理,发展包括光纤在内的光波导,实现光信号的传输包括远距离传输;第三,电子学在发展过程中所发展起来的整套电子学技术,包括真空电子技术、半导体技术和光电—电光转换技术,架起了电子和光信息技术的桥梁。凡此种种使得光电子技术在信息领域的应用中迅速发展且有其独特的优势。

集成光电子学集中并发展了光学和微电子学的固有技术优势,将传统的由分立器件构成的庞大的光电子系统变革为集成光电子学系统。由光电子学材料、光电子器件以及光电子器件集成化这三部分内容构成的集成光电子学系统具有宽带、高速、高可靠、抗电磁干扰、体积小、重量轻等优点,可以被广泛用于光纤通信、信息处理、传感技术、自动控制、电子对抗、光子对抗、光子计算机等高技术领域。集成光电子学已成为现代光电子学的一个重要分支,各国从事光电子、光信息系统研究的专家、学者都意识到了集成光电子学系统的重要性。

目前,集成光电子学已初具规模,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。不单是比分立光学元器件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,集成光电子学系统也具有其固有的重大优越性。其优点可以分为两个方面:其一是与用集成光电回路代替集成电路有关;其二则与用光导纤维代替电线或者同轴电缆有关。

采用光纤连接可带来如下的优点^[9~11]:

(1)电磁干扰小。这是因为在光导纤维中传播的光信号通常不会与在其附近出现的电信号相互作用。在彼此邻近的两根光纤之间也不会有显著的耦合。

(2)因为在光纤中没有电流流动,不存在电的短路或接地问题。

(3)在易燃区安全,不像电线或同轴电缆那样有发热及产生火花问题。

(4)传输损耗小。光纤的损耗在一个相当宽的波长范围内非常小。而双绞线电缆及同轴电缆的损耗随频率增加而迅速增加。

(5)保密性好,难于窃听。

(6)尺寸小,重量轻。

(7)价格低廉,原材料丰富。制造光导纤维所用的 SiO_2 是一种价廉而丰富的材料,而生产电线所用的铜则是日益稀缺的材料,其成本不断增加。

(8)带宽很宽。同样的传输长度,光纤的传输带宽为 10GHz 甚至更高,而同轴电缆只有 50MHz 左右。因此,光纤的整个带宽可以用来同时传输许多信号。而且光纤很细,这就意味着,即使不考虑其他方面的改善,经过相同横截面的传输通路,利用光纤可以传输的信号大约为用同轴电缆的 10^4 倍。

集成光电回路和集成光电子体系比集成电子体系具有更大的优越性。虽然计算机已经进入大规模和超大规模集成电路的时代,但计算速率始终局限在电子学所能达到的范围,而光子计算机的理论计算速率可高达 10^{10} 次/秒至 10^{11} 次/秒,存储容量达到 10^{18} Kb。它比目前计算速率最快的电子计算机高一百倍到一千倍,存储容量大一百万倍。如果用集成光电回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。

集成光电回路具有同光纤类似的特征带宽,而且两种情形中的载体都是光波而不是电流,这样就避免了导线固有的电容和电感导致的频率限制效应。在集成光电回路中可以方便有效地实现将许多信号耦合进一个光波导。除了能把许多信号耦合到一个光波导之外,集成光电回路还可以用调制功能方便地把光信号从某个波导通到另一个波导。这能够用电光、声光或热光调制等多种方法来实现。

1.3 光电子集成的发展方向

随着光网络技术的发展,对光电子集成技术提出了更高的要求。多波长系统需要工作于不同波长的阵列激光器,光交换单元需要大规模的光开关阵列,密集波分复用/解复用器、波长转换器、可调谐滤波器等关键器件都依赖于光电子集成技术。

在早期的光通信设备中,光发送单元和光接收单元的半导体激光器和光探测

器都是分立的元件。由电子器件构成的驱动电路、保护电路与激光器组成光发送机。类似地,由放大电路、判定电路与光探测器组成光接收机。随着传输速率的提高,电子电路的寄生效应成为影响系统性能的重要因素。为了改进高速光通信系统的性能,将电子器件与激光器集成在一个芯片之中,即可形成单片光发送机。进一步还可以将光探测器也集成到光发送单元之中,此光探测器主要是用来监测激光器发光功率的变化情况,从而可以形成完整的集成光发送机。光电集成技术的另外一个重要应用是将光发送机的外调制器与激光器集成在同一个基片上。

从实用角度来讲,大部分光电子集成还处于初级阶段。其主要原因在于光电子器件和电子元器件/电路的结构不同。表 1.1 中列出了光电子器件与电子元器件的特征比较。光电子器件的基本作用、基本元器件、尺度及与其他元器件的连接方式等都与电子器件不同。这主要是因为光和电器件工作原理上的差异。对于光电子器件来说,在可靠性和元器件制作工艺方面不够理想。大部分光电子器件,为了满足可靠性要求,使用前都需要经历筛选试验。也就是说,在比分立元器件时的实际工作条件更严格的条件下,让所有的元器件同时运行,从其中挑选高可靠性元器件。这一点大大不同于电子元器件的筛选抽检的方法,这是因为电子元器件的制作工艺已经比较成熟,在筛选试验中仅需要随机抽取部分产品进行检验即可。光电子器件的制作工艺要求每一个元器件的最优化,所以通常需要采用多种工艺及工艺技术。将表 1.1 的(f)和(g)结合起来看,不得不引进新的概念,就是把制作出的光电子学元器件全部逐一检查,挑出性能优良的器件。目前,对大多数电子元器件来说,已经不需要逐一检查进行筛选了。否则,集成了上千万个晶体管的集成电路难以实现实用化。

表 1.1 光电子器件与电子元器件的特征比较

特征项	光电子器件	电子元器件
(a) 基本作用	光波导中的光传输及光与电子/晶格的相互作用	衬底表面附近的电子传输与控制
(b) 基本元器件	光波导, 半导体激光器	晶体管、电容、电阻
(c) 元器件尺寸(厚度方向)	波长量级, 数微米至十微米	数百埃至数微米
(d) 元器件尺寸(长度方向)	数百微米至数毫米	数平方微米
(e) 与其他部件的连接	稍难——需要较高的位置精度(μm), 光波导	容易——电气布线, 导体
(f) 元器件可靠性	有问题, 通常需要检测全部元器件	几乎没问题, 通常进行抽检
(g) 元器件制作工艺	多样, 研究开发中	基本平面工艺, 已成熟