

先进**光**电子技术丛书 8

〔日〕伊贺健一 池上彻彦 荒川泰彦 主编

光集成器件

〔日〕小林功郎 著
崔凤林 译

科学出版社 共立出版

2002 北京

图字:01-2001-4114 号

Original Japanese edition

Sentan Hikari Electronics Series ㊄ Hikari Shuseki Device

by Kohroh Kobayashi

Copyright ㊄ 1999

Published by Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.

This Chinese language edition is co-published by

Kyoritsu Shuppan Co., Ltd. and Science Press

Copyright ㊄ 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和共立出版(株)所共有

先端光エレクトロニクス シリーズ 8

光集積デバイス

小林功郎 共立出版(株) 1999

图书在版编目(CIP)数据

光集成器件/(日)小林功郎著;崔凤林译.—北京:科学出版社,2002

(先进光电子技术丛书 8)

ISBN 7-03-010355-6

I.光… II.①小… ②崔… III.集成光学元件 IV.TN256

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 021475 号

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 共立出版 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 8 月 第 一 版 开本:A5(890×1240)

2002 年 8 月 第一次印刷 印张:6 5/8

印数:1—5 000 字数:182 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《先进光电子技术丛书》序

1970年,半导体激光器室温连续振荡的成功和低损耗光纤的实现拉开了光电子时代的序幕。现在主干信息通信网几乎全部都实现了光通信,今后光纤也将进入每个家庭。另外,在存储和显示领域对新的光技术的期望也越来越高,而且期望光技术对计算机技术的发展也有所贡献。在21世纪这个高度信息化的社会中,光技术将起十分重要的作用,对它的发展,人们寄予厚望。

为使希望变成现实,光技术必须要不断地创新和发展。因而,从事光技术的人必须具备两种素质:一是具有在任何时候都能从物理学的角度对光的本质有深入理解的能力;二是具有敢于开辟新领域的开拓精神。为此,就要不断地提高基础知识和基本能力水平,而这种水平要建立在从学术性的基础研究到开发研究,直至应用实践的较宽领域的知识积累之上。

策划编撰本丛书的目的是使那些立志承担21世纪光电子技术发展重任的大学生、企业中的研究人员以及技术工作者,充分掌握要实现光电子最新技术的基础知识及应用知识,并把所掌握的知识有效利用到实际工作中。光电子技术人员往往需要较扎实的基础理论知识与器件技术及系统技术有机结合的广泛知识。本丛书系统地归纳了这些知识,因此通过本丛书的学习可以掌握光电子最前沿的技术。本丛书的另一特点是力求叙述简明,以使非光电子专业的学生或科技工作者也能容易理解;编者在编写本丛书时尽量做到使本丛书系统、完整,自成体系,使之达到不依赖其他参考书也能理解的水平;本丛书中各册的执笔者都是其相应领域中的知名学者。

如果能对飞速发展的光电子的最前沿技术有深刻的了解,那

么就能担负起下一次技术创新的使命。本丛书若能对作为 21 世纪信息通信技术支柱的光电子技术的发展有所贡献,编者将不胜荣幸。

编 委

前 言

在以量子力学诞生为标志开始的 20 世纪中,从晶体管诞生到掌上电脑问世,硅微电子学取得了辉煌的成就。以光纤通信为重点的光电子学,则起着把 20 世纪连接到 21 世纪的高度信息化社会的“神经网络”的作用。以最近几年互联网的爆炸性发展为背景,21 世纪是把家庭及个人通过信息网与世界紧密联系在一起的时代。从这一点也可以看出,以发展信息网为目标的光电子学的作用会越来越重要。

本书将介绍支撑及引导光电子学发展的基础技术——光集成器件技术。一说“集成”,自然就会想起以硅 LSI 及 VLSI 为代表的电子集成器件。目前,光集成器件,在其研究开发及实用化方面都还处于很初级的阶段,根本不能和硅微电子技术相比,但为了使读者对技术发展脉络有一简单了解,图 1 列举了微电子学和光电子学中有关集成的一些成果。以晶体管的诞生(1947 年)和半导体激光器的诞生(1962 年)为各自的出发点。就这个出发点而论,光电子学已经晚了 15 年。其后,在电子学领域里,10 年后发明了 IC,接着实现了微处理器,到 20 世纪 80 年代,迎来了 IC 真正普及的时代,直到现在,微电子技术一直在稳定而迅速地发展。与此相对,在光电子学领域,1970 年前后,提出有关光 IC、光电子 IC(OEIC)的设想,并于 70 年代后半期实现了 OEIC,80 年代中期实现了 PIC(photonic IC)等,研究开发进展得很顺利。但从因集成化而实现高功能的角度来看,能与 1971 年发明的微处理器相对应的光 IC 还没出现;从实用化角度来看,可以与 80 年代的 IC 普及相对应的光 IC 普及还没形成。从这一点可以说,光电子学和微电子学的发展,与起步时相比,差距更大了。1970 年初半

导体激光器(LD; Laser Diode)实现了在室温下的连续工作。若把这个时间看作1947年晶体管诞生的对应点,那么可以说两者的起步相差20年以上。发展上的差距还得看今后的情况。

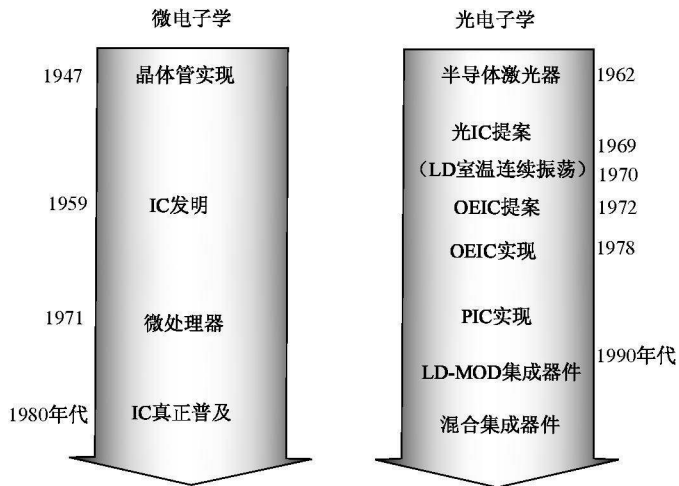


图1 微电子学与光电子学发展的对比

实际上,光集成的历史刚刚才开始。光电子学是否应该走电子学走过的路,也还是正在讨论的课题。光集成器件的发展领域,现在不是固定不变,而是每天都在变化。本书将介绍光集成器件技术的全貌,考虑到光集成器件技术的现状,不可能全面系统地叙述每一个技术关键。因而,书中只是较详细地讨论光集成的思路及光集成器件的应用。就应用而言,为避免内容分散,重点放在光信息传输中的应用及在网络中的实际应用上。

图2示出了本书的构成。在第1章,以几个光集成的关键问题为切入点,综合介绍光集成的思路。第2章介绍作为光集成的重要因素的主要材料及制作工艺。这两章可以看作是光集成器件的基础篇。第3章介绍对今后光集成器件发展有重大影响的选择式晶体生长技术。接下来的第4章相当于其后几章的导言,这一章中,将展望光通信网络的发展,概要说明在这一发展过程

中主要光集成器件所处的位置。第5章以后,将针对光通信网络的每一应用领域阐述相应的光集成器件的有关课题、技术现状等。第5章介绍超高速时间多路复用光通信用集成光源,第6章介绍波长多路复用通信用集成光源,第7章介绍以实现光波网络为目标的波长可变光源和波长变换器,第8章介绍光存取用光源和光收发器件,第9章介绍与光接收器相关的光集成器件,最后的第10章介绍加速渗入光波网络节点的光技术——光集成节点器件。

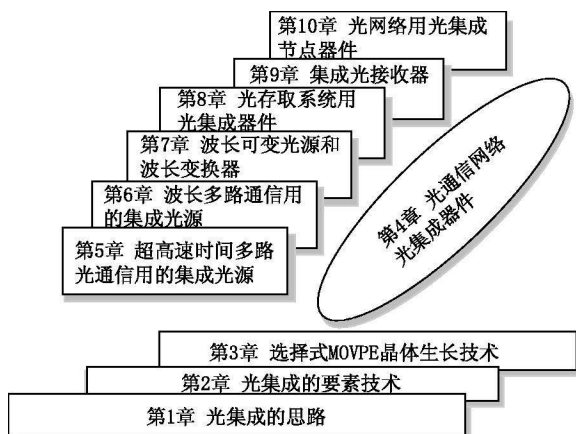


图2 本书的构成

如前所述,光集成技术领域还是发展中的、激烈变化着的领域。即使现在给出个别技术及个别器件的细节及资料也会很快变得陈旧。所以,我们不把重点放在技术和资料的细节上,而着力于介绍集成化的思路及今后的发展方向。重视研究的思路及原理,尽量避免用数学公式。为使读者可以独立地阅读各章,有些内容可能会有重复,对于重复的地方可以跳过去不读。作为基础篇,虽然第1、第2章介绍的是光集成器件的概貌,但从总体上看,在介绍光集成器件时,本书重点放在由光元器件的集成引起的功能的强化及新功能的实现和新性能的大幅度提高上,特别是

放在主要以化合物半导体为基础的单片集成器件及其与石英系光波导的混合集成上。

本书若能引起读者对光集成器件的兴趣,对今后的光集成器件的研究开发及应用有所帮助,笔者将深感幸运。在这里,我向在本书编写过程中提供论文资料、照片等各种信息的以下各位深表谢意:日本电气(株)光·超高频器件研究所的山口昌幸先生、工藤耕治先生、田口剑甲先生,C&C 媒体研究所的江村克巳先生,逸见直也先生,关西电子学研究所的水户郁夫先生,以及其他有关人士。在将本书奉献给读者时,我们担心的心情中伴随着期待,担心的是怕书中内容很快陈旧,期待的是希望看到本领域的更快进步。

小林功郎

目 录

第1章 光集成概论	1
1.1 集成的方向	2
1.1.1 功能集成	2
1.1.2 器件个数的集成	5
1.2 光集成的方式	6
1.2.1 光-光集成	7
1.2.2 光-电集成	8
1.3 光集成的形式	10
1.3.1 单片集成	10
1.3.2 混合集成	11
第2章 光集成的主要技术	13
2.1 光集成器件用的材料	13
2.1.1 所需材料特性及其有关物理现象	13
2.1.2 光集成器件用半导体材料	20
2.1.3 光集成器件用非半导体材料	24
2.2 光集成器件的制作技术	26

2.2.1	半导体单片集成型光集成器件制作工艺	26
2.2.2	用于衍射光栅形成的曝光技术	29
2.2.3	光波导形成技术	33
第3章	选择式 MOVPE 晶体生长技术	37
3.1	原理及特征	37
3.2	选择式 MOVPE 法的应用例	42
3.2.1	光波导	42
3.2.2	光介入用半导体激光器	44
3.2.3	半导体光放大器	46
第4章	光通信网络及光集成器件	49
4.1	光通信网络和光源、光接收器	49
4.2	光通信网络及其他光集成器件	55
第5章	超高速时间多路光通信用的 集成光源	59
5.1	外部光调制概要	60
5.2	半导体光调制器	62
5.3	调制器集成光源的设计与制作	64
5.4	EA 调制器集成光源实现例	69
5.5	用调制器集成光源的光纤传输	71

第6章 波长多路通信用集成光源	77
6.1 单纵模振荡半导体激光器的振荡波长	78
6.2 WDM 光通信用单体半导体激光器	79
6.2.1 WDM 用波长的标准化动向	80
6.2.2 不同波长 LD 的一并制作技术	81
6.3 WDM 光通信用调制器集成光源	83
6.4 WDM 光通信用多波长集成光源	85
6.4.1 WDM 集成光源	85
6.4.2 WDM 光通信用异波长集成光源	87
第7章 波长可变光源与波长转换器	95
7.1 典型的波长可变方式	96
7.2 多电极 DBR 波长可变光源	99
7.2.1 DBR-LD 波长可变原理	99
7.2.2 3 电极波长可变 DBR-LD	101
7.2.3 单一电流连续可变运行	105
7.3 采用不均匀衍射光栅的波长可变 DBR-LD	106
7.4 由加热实现的波长可变 DBR-LD	110
7.5 波长可变 DFB-LD	110
7.6 典型的波长转换方式	112
7.7 光控制光门波长转换器	115

第8章 光存取系统用光集成器件	123
8.1 光部件间的连接	123
8.2 光斑尺寸转换器集成光源	126
8.2.1 典型的光斑尺寸转换结构	126
8.2.2 集成光斑尺寸转换器集成半导体激光器	128
8.3 光集成发射、接收器件	134
8.3.1 混合光集成收发器件	135
8.3.2 单片集成光收发器件	139
第9章 集成光接收器	143
9.1 波导型光二极管	143
9.2 WDM 用集成光接收器	145
9.2.1 具有波长分波特性的 PD	145
9.2.2 密集 WDM 用光集成光接收器	146
第10章 光网络用光集成节点器件	155
10.1 光集成开关器件	157
10.1.1 用方向性耦合器的矩阵式集成光开关	160
10.1.2 利用光门的矩阵式集成光开关	162
10.1.3 其他矩阵式集成光开关	169
10.2 上路和下路光集成器件	170
10.2.1 阵列波导衍射光栅	170
10.3 应用 AWG 的节点用光集成器件	183

10.3.1 上、下路用光集成器件 *183*

10.3.2 波长分配器集成器件 *188*

索 引 *191*



光集成概论

毫无疑问,现在和将来的信息化社会,在很大程度上依靠硅技术为基础的微电子技术。现在的微电子学始于贝尔研究所的肖克莱(Shockley)、巴丁(Bardeen)、布拉特(Brattain)三人在 1947 年发明的晶体管。在晶体管诞生后 10 年左右的 1958 年,得克萨斯仪器公司的基尔毕(Kirby)发明了集成电路(IC: Integrated circuit)。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。以后,硅集成电路,一直处在“不知其终于何处”的良好状况。被集成的晶体管个数,从基尔毕的 1 个开始,到 1997 年达到了 1G-DRAM(10^9 个),现在,仍然以每 3 年增加 10 倍集成度的速度发展。微电子学的 IC、LSI 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,经可生产性、成品率和小型化的提高,从量的扩大引到质的变化,集成化的优越性很明显。

和以信号处理为中心内容的微电子学不同,光电子学以光纤传输为代表、以信号传输为中心出现于世。本书的主要目的是介绍目前光集成器件的研究概况,对一些关键问题提出看法。光集成器件技术无法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。但希望读者在很多问题上,把它作为先行科学参考。

在本章,首先考虑光集成的一些关键问题,综合叙述一些想法。1.1 节介绍光集成研究的倾向和方向。接着,在 1.2 节里,叙述光集成的方式,一是集成多个光器件的光-光集成,二是集成光器件和电子器件的光-电集成。在 1.3 节里,讨论集成的形式:单片集成和混合集成。本章的目的是,作为以后各章所述具体技术的基础,概述集成器件的总体情况。

1.1 集成的方向

光集成器件目前的集成规模,按集成的元件数讲,由几个到几百个。不能和集成了1亿到10亿个晶体管的微电子器件相比较。光集成还没到讨论集成规模的阶段。今后如何扩大其规模,还不太明确。对光电子学,其重要性并不一定在于规模。光集成器件的集成方法有二,即如图1.1所示,器件个数的集成和功能的集成。虽然规模和功能的复杂性完全不同,但了解一下电子学的相关情况还是有好处的。图1.1中,在各相应轴附近示出了电子学中功能集成的典型示例:CPU和MPU以及个数集成的示例:DRAM。

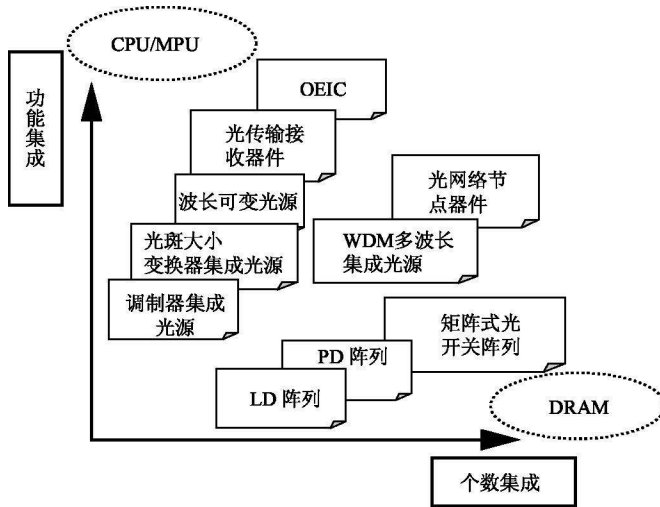


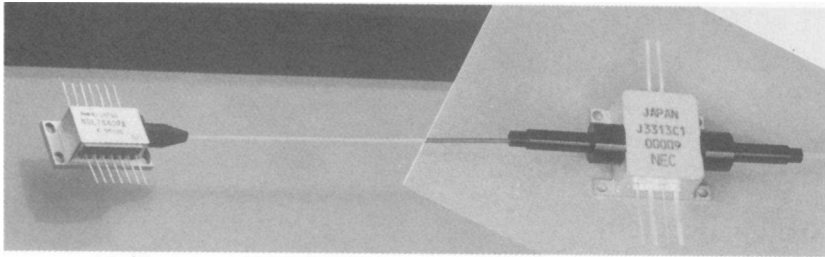
图 1.1 光集成的两个方向和主要光集成器件

1.1.1 功能集成

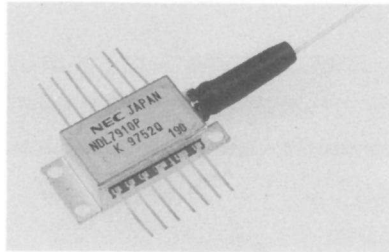
对于光电子学,所谓功能集成的方向就是通过把不同功能的元件集成在一起,制造出高功能、高性能的器件。其典型例子是在半导体激光器上

集成了光调制器的调制器集成光源。另外,将半导体激光器、光接收器及分离输出光信号和接收光信号的分波器集成在一起的光收发信号器也是功能集成的重要例子。这些器件是通过把半导体激光器及光调制器等单个器件结合起来实现其功能,它们集成在同一器件内,并不产生新功能。我们的目的,比起分立器件的单纯组合,集成化更容易实现:(a)小型化,(b)低成本化,(c)高可靠化。下面以调制器集成光源为例,说明这个目的。

在 10Gbit/s 以上的高速光信号光纤传输里,由电流直接调制引起的半导体激光器的波长变动即波长啁啾是限制传输距离的重要因素。为了解决这个问题,采用外部光调制器,它用光调制器打开和关闭直流驱动的半导体激光器的输出光。作为具体例子,取单独封装的半导体激光器和光调制器,把它们用光纤连接在一起(参看图 1.2(a))。另外,图 1.2(b)中示出了封装好的调制器集成光源的实例。通过对比可以看出,封装后,对于



(a) 封装好的单个半导体激光器和外部光调制器的组合



(b) 调制器集成光源插件

图 1.2 高速光通信的光源及外部构成的例子

同一功能可集成的器件尺寸只是原来的一半。再则,对于光集成,比小型化更重要的可能是低成本化和高可靠性。在电子学里,集成器件的最初目的是消除因元件间连接引起的麻烦和解决由此引起的可靠性问题。在光电子学集成、特别是功能集成里,解决连接问题是集成化的主要动机。和电子学中一样,伴随着“连接”问题的解决,可靠性问题也得以解决,另外还有减少和外部连接点的问题。光器件间的光连接主要用光纤、光波导等的传输连接方法,以及直接往自由空间辐射光束来连接等方法。不管哪种方法,都要求微米以下或亚微米的位置精度。如,对于半导体激光器谐振腔输出端面的光发射部分,必须把光纤中心(芯)调到 $1\mu\text{m}$ 处,并固定。这种跟精密调整和固定有关的光连接,需要长时间调整及较多的制作工时,它占有光器件制作费用的很大部分。采用光集成的光器件间的连接,若用光刻(lithography)及其后的制作工艺来实现,则光纤连接的工时大幅度减少。这对降低成本很有好处,而且对提高可靠性也很有效。

下面用具体例子说明功能集成的最大目的——减少连接点。图 1.3 示出了因集成化减少了连接点的调制器集成光源。用分立元器件组合时,

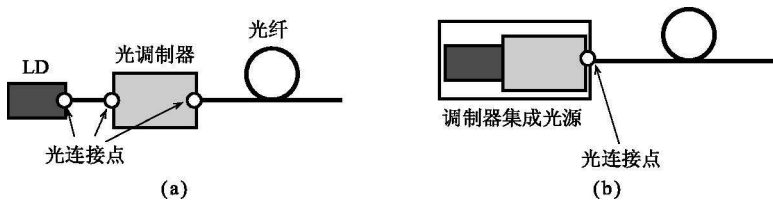


图 1.3 调制器集成光源结构:由集成化减少光连接点的例子

光纤和光器件的连接点有 3 个,在光集成光源中,元器件间连接点中的 2 个在制作工艺中被去掉,因而和光纤的连接点减少成 1 个。图 1.4 示出的另一例是双向光通信系统里用的光发射接收器。这是,下行线 $1.5\mu\text{m}$ 带、上行线 $1.3\mu\text{m}$ 带的双向光通信用发射接收器上的光收发信号器件,它是在分离的 $1.5\mu\text{m}$ 带和 $1.3\mu\text{m}$ 带光的多路分波器周围配置了 $1.3\mu\text{m}$ 半导体激光器(LD)和 $1.5\mu\text{m}$ 光接收器(PD)的系统。原来用分立元器件组合的光发射接收器用 5 个点和光纤连接,而现在的光集成器件只有 1 个点和外部光纤连接。

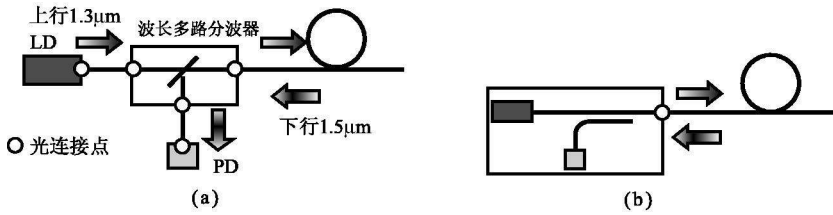


图 1.4 双向光通信用集成光发射接收器结构;因集成化减少光连接点的例子

1.1.2 器件个数的集成

除了“功能集成”外,还有把多个同样的光器件集成的所谓“个数集成”(参见图 1.1)。作为典型例子,有集成多个半导体激光器或光接收器等器件的阵列器件。这称之为光互连,同时并联连接计算机或交换器等,作为并联光传输的光源或光接收器使用。有在一列上集成十至数十个元器件的一维阵列;有在平面上纵横集成十到数十个元器件的二维阵列。二维阵列器件中,作为光源,经常采用往垂直于衬底方向上发射光束的面发射激光器(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)^[1]。图 1.5 示出阵列器

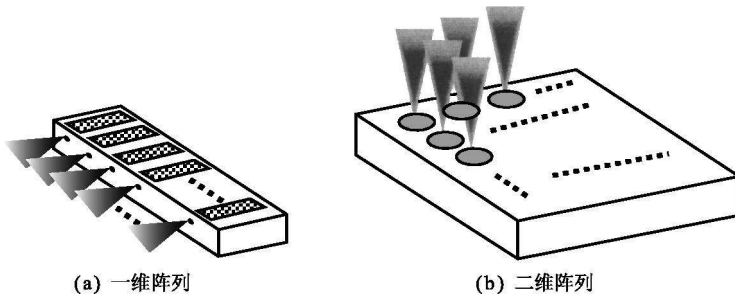


图 1.5 阵列集成光器件图形

件的图像。图 1.5(a)为一维阵列,图 1.5(b)为二维阵列。作为“个数集成”的重要例子,还有矩阵式光开关。图 1.6 为其概念图。这是把多个输入光转换成多个输出光的光开关,是今后光信息网络里不可缺少的器件。在矩

阵式光开关里,只是简单地集成多个转换光通道的元器件,来实现多通道的转换。根据光开关电路构成进行光波导的连接。如,在 8 通道矩阵式开关里要集成 64 个开关元件并用光波导连接它们。

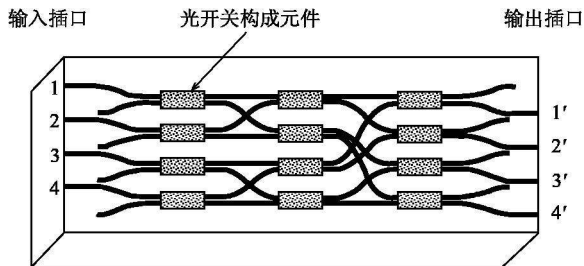


图 1.6 矩阵式光开关示意图

“个数集成”的最大优点是,把多个同样的器件集成在同一个半导体基片上,实现了大幅度的小型化。例如,对于 16 通道并联传输用的光发射器,比较下列二种情况就可以看出上面的优点。一是把图 1.2(a)所示的封装好的半导体激光器组件排列 16 个;另一是在集成了半导体激光器的半导体激光器阵列芯片上装上阵列光纤的并列传输光源。另外,制作阵列芯片上连接阵列光纤的组件的成本远低于制作 16 个单个组件所需的成本。所以集成化的低成本也是一大优点。“功能集成”的高可靠性来自减少了连接点而导至的高可靠性。在“个数集成”中,在光集成器件内含有多个半导体激光器及光接收器等,所以芯片自身的可靠性比单个器件的可靠性要求更苛刻,所以,这种情况下不能一概说由集成化带来高可靠性。在这种并联传输中,作为光收/发信号器用的阵列器件,在同一衬底上还集成了驱动半导体激光器的驱动电路和放大接收信号的放大器,所以小型化的优点更明显。这些是光-电集成电路 OEIC(Opto-Eletronic Integrated Circuit)的重要指标。

1.2 光集成的方式

光集成的方式可粗略地分为两种:集成光器件的“光-光集成”和集成光

器件及电子器件的“光-电集成”。光-光集成可以追溯到 1969 年 S. E. Miller 提出的集成光路^[2]。当时,是在一个光具座上排列透镜、反射镜、半透镜等光学零件,组成一个实现光信号分路、合成及转换等的光学回路。Miller 的方案,是想在以光波导为中心的固体光学回路上实现这些功能。这个方案是想把 1m 长的光具座上的光路缩短到 1cm 以内,这是划时代的方案。小型化和高稳定性是集成光路的目的。用光波导连接光器件的集成光路类似于用导线连接晶体管和电阻等的电子学中的集成电路,但它们的目标很不一样。另外,在 1972 年, S. Somekh 和 A. Yarive 提出了在同一半导体衬底上同时集成光器件和电子器件的构想^[3],称为光-电集成电路(OEIC)的这个构想的根据,一是光器件经常与电子器件一起使用,另一是光器件和电子器件都用化合物半导体实现等。本节将总结光-光集成及光-电集成的历史和特长。

1.2.1 光-光集成

光-光集成或者集成光学(integrated optics)的基础是光波导。把光限制在比周围折射率高的部分传输,把各种各样的光器件用光波导连接起来,以此制成具有某种功能的光器件。前边说过, S. E. Miller 提出集成光学概念的 1969 年时的情况是,大部分光学实验是以 He-Ne 或红宝石激光器为光源,把透镜和反射镜等放在大的光具座上实现的。那时, AlGaAs 及 GaAs 半导体激光器在室温下不能连续振荡,光纤的损耗也很大,但人们已经对光通信很感兴趣,并进行了空间传输等光通信实验。从实用角度考虑,光具座上排列的光回路,作为通信设施很不适合,因此产生了集成光学、集成光路的设想。到那时为止的光学部件,如透镜、反射镜、光调制器及光开关等,几乎都是由体结构实现的。从那时起,光调制器、光开关、合波及分波等基本的光器件开始以光波导形式实现,集成光路有了机遇。对应于光-电子集成电路(OEIC),我们把由光-光集成实现的光集成器件称为集成光路(PIC: Photonic Integrated Circuit)。

图 1.7 示出了初期的集成光路的图形。在光学透明的衬底表面附近,形成折射率高的区域,在这个区域上引导光经过光器件,进行调制、分路、合波、波长多路/分波以及其他处理,再经光波导,通过光纤输出。在图 1.7 所示例子中,表示了用光调制器把光信号搭载在二个不同波长(波长 λ_1 、 λ_2)

的光束上,在波长多路合波器上合成而输出。当初用作衬底的是 LiNbO_3 (铌酸锂)和 LiTaO_3 (钽酸锂)等电光晶体。在这个阶段,光源及光接收器等都是用外部连接方式连接,而没采用单片集成方式。其后,可以用化合物半导体制作以半导体激光器为代表的驱动器件了,因此集成光路发展成包含光源、光接收器等半导体集成光路(PIC)。

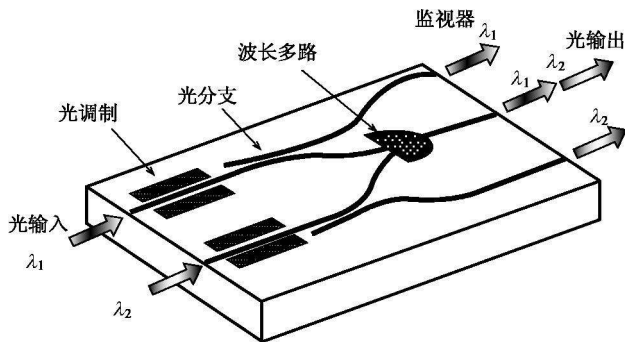


图 1.7 集成光路(PIC)示意图

1.2.2 光-电集成

光-电集成电路(OEIC)的原理示于图 1.8。一般同时使用光器件、电子器件/电路。不论是光器件,还是电子元器件/电路,都可以用化合物半导体制作。从这个想法出发的 OEIC,在实验室作了很多尝试,并发表了很多研究论文。从实用角度看,它还处于初级阶段,要取得大的发展还不得不说是今后的任务。其主要原因,如表 1.1 中说明的那样,在于光器件和电子元器件/电路的结构不同。基本动作(a)、基本元器件(b)、尺寸(c,d)及与其他元器件的连接(e)等都不同,这些不同点来自光和工作原理上的不同,是本质上的差异。可靠性(f)和元器件制作工艺(g),对于刚起步的光器件这是不利条件,从实用化角度看,这是大障碍。大部分光器件,为了可靠性,使用以前都经历筛选试验。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。还有制作工艺

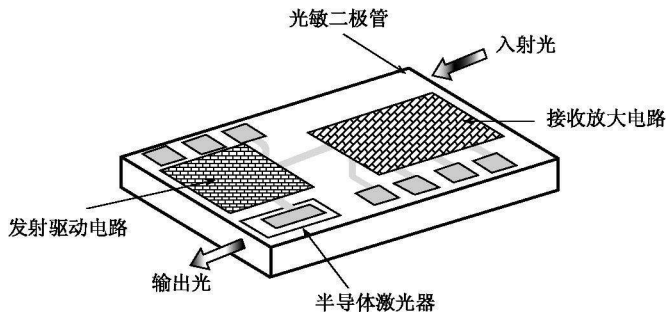


图 1.8 光电集成电路示意图

表 1.1 光器件与电子器件的特征比较

	光元器件	电子元器件
(a)基本动作	光波导中的光传输及光与电子/晶格的相互作用	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、光敏二极管	FET、电阻、电容
(c)元器件尺寸(厚度方向)	波长量级数微米至 10 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;需要精密的位置精度($\sim \mu\text{m}$),光波导	容易;电气布线,导体
(f)元器件可靠性	有问题,通常要检测全部元器件	几乎没问题,通常是进行抽查
(g)元器件制作工艺	多样,研究开发之中	基本工艺,成熟

上,它很重视每一个元器件的最优化,所以采用多种工艺及工艺技术的确定,这也可算是一个特征。将表 1.1 的(f)和(g)结合起来看,不得不引进元器件成品率的概念。就是把制作出的元器件全部逐一检查,挑出好的元器件。对于大部分电子器件来说,已经不经过这一步检查了。否则,集成了几百万、几千万个晶体管的器件,不可能实用化。集成了光器件、电子器件/电路的 OEIC 被易出问题的“光方面”拖住了,也许会抵消两者集成时的优点。期望提高光器件的可靠性、提高和确立制作工艺,以此增加 OEIC 的作用。但是,由于光器件和电子器件/电路的诸如基本动作、结构及大小等方面的差别,光-电集成的未来不一定很乐观。

1.3 光集成的形式

光集成形式有二种:一种是在半导体衬底或光学晶体衬底上,只经过制作工艺,把所有元器件集成在一起的“单片光集成”,另一种是用不同的制作工艺制作一部分元器件以后,装在半导体衬底或光学晶体衬底的“光部分”上的“混合光集成”。混合光集成广义上也包括把小的单个光学部件用光学黏接剂固定在一起的光器件/电路^[4,5],但本书把重点放在光波导器件/电路上,所以不包括这些。表 1.2 为单片集成和混合集成的对比。本章前半部分叙述的 PIC 和 OEIC 等是单片集成的典型例子。混合集成可实现称作基础电路的光波导和有源器件的较自由的结合,所以很有可能实现各种功能的光集成器件。相反,因为单片集成用生产工艺来决定一切,所以一旦技术确定下来以后,可以大幅度的降低成本化,与芯片的小型化结合会有广泛的应用。希望很好地利用两者的优点、特点,制作出在光电子学发展中起重要作用的器件。

表 1.2 单片集成与混合集成的比较

	单片集成	混合集成
(a)优点	<ul style="list-style-type: none"> • 易小型化 • 将来可降低成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 材料选择组合范围宽 • 可以使用最优化高性能有源器件
(b)主要技术	<ul style="list-style-type: none"> • 工艺技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 芯片组装技术 • 工艺技术
(c)主要形状	<ul style="list-style-type: none"> • 半导体芯片 • 电光晶体芯片 	<ul style="list-style-type: none"> • 石英波导 (PLC)+LD/PD
(d)主要课题	<ul style="list-style-type: none"> • 提高成品率 • 高可靠性 	<ul style="list-style-type: none"> • 组装成本低 • 组装自动化
(e)主要光集成器件	<ul style="list-style-type: none"> • 调制器集成化光源 • 多波长光源 • 矩阵式光开关 • PIC/OEIC 	<ul style="list-style-type: none"> • 光存取用收发信器件 • 矩阵式光开关

1.3.1 单片集成

单片集成,以 PIC 和 OEIC 为典型例子,所有的光/电子器件/电路,经晶体生长、光刻、刻蚀及成膜等制作工艺而制成。一旦技术确立,可批量生

产,因而能实现低成本,是很有前途的形式。这已经在硅系微电子学里很好地被证实。在光电子学里,描准将来的大发展,最初对单片集成下了很大功夫。光器件在工作原理、所用材料、元器件间连接及应用市场规模等方面和电子元器件不同,所以需要不同的方法、不同的对策。现在,光集成器件还处于初期研究开发阶段。如,半导体激光器和光调制器的集成,制作的集成光源刚刚开始实用化,其集成元器件个数最少只有两个。将来也许也不能期望达到微电子学中那样的集成规模、高性能以及市场规模,但作为 21 世纪信息社会的神经网络及光信息网络的关键元素,肯定单片光集成将占据很重要的位置。本书介绍光集成器件的总的情况,把重点放在单片光集成器件,特别是以半导体为基础的光-光集成器件。

1.3.2 混合集成

图 1.9 是混合集成的典型例子^[8]。这是在硅衬底上形成的石英系光波导回路上安装芯片的双向光通信用收发器的光器件单元。半导体激光

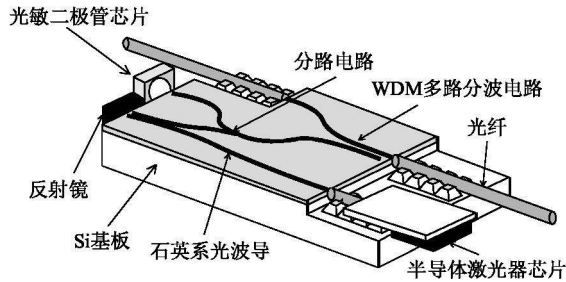


图 1.9 混合光集成形态例^[8]

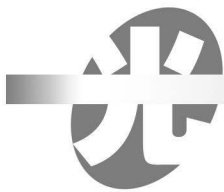
器和光接收器等有源器件和搭载它的光波导基础电路完全用不同的工艺制作,因而,可以分别自由选择各自最合适的材料、最合适的器件,这也是混合集成的最大特征。其结果是大多在初期就可以得到可实用的性能。在这个例子中,光波导基础电路,采用了可以制作光波导形状复杂的石英系光波导(PLC: Planar Lightguide Circuit)^[7]的大衬底,在其上附装了 $1.3\mu\text{m}$ 的 InP 系半导体激光器和光接收器等。有源光器件和光波导间的精

密的位置调整和固定是混合集成低成本化的关键。混合集成光路里,除了上述形式外,有的还附装一些其他电路,如在光回路上附装驱动光回路中的有源光器件的电路,或附装放大经光电转换后的电信号的电路。通过采用非常低成本的集成电路,如 Si-IC,可以实现整体低成本的光路器件。光器件和电路的连接,对于不是超高速的场合可以直接焊接来实现。这一点是把电路与光器件全部单片集成的 OEIC 在成本上不如混合集成光路和器件的主要原因。

以上,通过关键问题提出了对光集成的见解。后面将以半导体单片集成为中心进行讨论。在第 2 章,首先简要介绍单片光集成所必需的一些技术问题。在第 3 章详细讨论选择式 MOVPE 晶体生长技术,它是今后半导体光集成发展的关键新工艺。由第 4 章开始,介绍现在已经试制成功的光集成器件及其应用。

■参考文献

- [1] 伊賀健一, 小山二三夫:面発光レーザ, オーム社(1990).
- [2] S.E.Miller:Integrated Optics:An Introduction,Bell System Technical Journal, 48, p.2059 (Sept.1969).
- [3] S.Somekh,and A.Yarive:Fiber Optic Communications,Proc.Conf.International Telemetry,Los Angeles, pp.407-418(1972)
- [4] T.Uchida,and I.Kitano:SELFOC:A New Light focusing Fiber Guide,Japan Electronic Engineering, 27,p.22(Feb.1969).
- [5] 小林功郎:光微小回路, 光通信ハンドブック, pp.314-334, 朝倉書店(1982).
- [6] 後藤明生, 中村真一, 金山義信, 蔵田和彦, 小松耕哉, 石川重太:NEC技報, 51, pp.27-32(1998).
- [7] M.Kawachi:Optical and Quantum Electronics,22,pp.391-416(1990).
- [8] N.Kitamura,S.Mizuta,T.Shimoda,M.Kitamura,and S.Nakamura:Technical Digest of Integrated Photonics Research,I ThB2,pp.608-611(1996)



光集成的主要技术

在前一章,通过几个关键问题说明了光集成器件的概况。本章概括地叙述实现光集成器件必需的一些技术。

2.1 光集成器件用的材料

光集成器件所用的材料很多是和分立光器件所用的材料一致。但光集成有特殊的要求,在下面的叙述里我们将注意这一点。在此,我们先考察光集成器件所需材料的特性,然后叙述半导体材料和非半导体材料。

2.1.1 所需材料特性及其有关物理现象

不只是光集成器件,为实现某种器件而选择材料时,首先要考虑的都是所要实现的功能。要实现的功能多的时候,对材料的要求也多。在此,我们集中在对光集成器件特别重要的一些特性上。图 2.1 表示了光集成器件的功能,为实现此功能所需元器件及和所要求的材料特性的关系。光集成器件,和非光集成器件一样,用各种所需元器件的集成来实现较复杂的功能,以此为目标。最终目标是在一个芯片上作出很复杂的系统。如:在硅系电子技术中的“芯片上的系统”(SOC: System on a Chip),就是集成的最终形态。在光电子学里,迄今还没有成熟的技术能达到这个地步。不仅如此,在光集成里,是否必需像集成电路那样的大规模集成,技术上是否能实现这种集成,还不太清楚。但只要要求明确,或换句话说,市场需要大规模集成才能完成的功能,就能越过这些技术上的障碍。纵观目前及以后

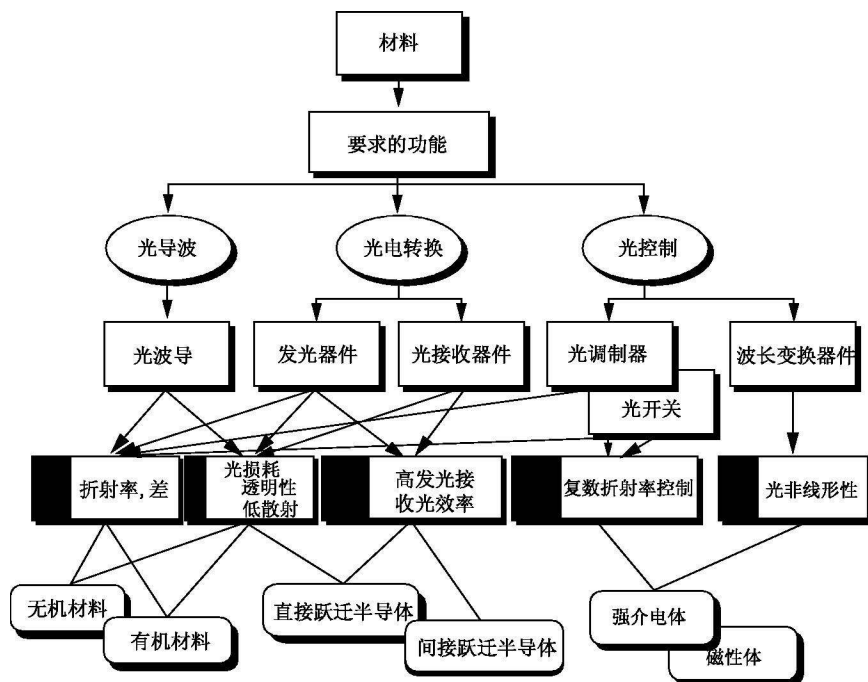


图 2.1 光集成器件要求的主要功能和器件、材料的关系

5~10 年的情况,可以得出如下结论:对光集成器件所需功能,是光波导、光电转换、光调制、光开关及光波长(频率)转换等光控制。具体所需器件是光波导、半导体激光器及发光二极管等发光器件、光敏二极管等光接收器件、光调制器件、光开关以及光波长(频率)转换器件等。下面叙述实现这些器件所必需的材料特性。

光波导连接发光器件、光接收器件、光调制器件及光开关等,以实现新功能。它是光集成器件中最基本的器件。同时,发光器件、光接收器件及光调制器件内部也有光波导结构,所以也是所有光部件的共同的基本元器件,或基本结构。如图 2.2 所示,光波导里有把光只在一个方向上传输的二维光波导(参见图 2.2(a))和把光限制在垂直于行进方向的平面内两个方向上传输的三维光波导(参见图 2.2(b))。大多数光集成器件希望在器件平面内任何方向上传输光,所以一般用三维光波导。横向没有光限制的

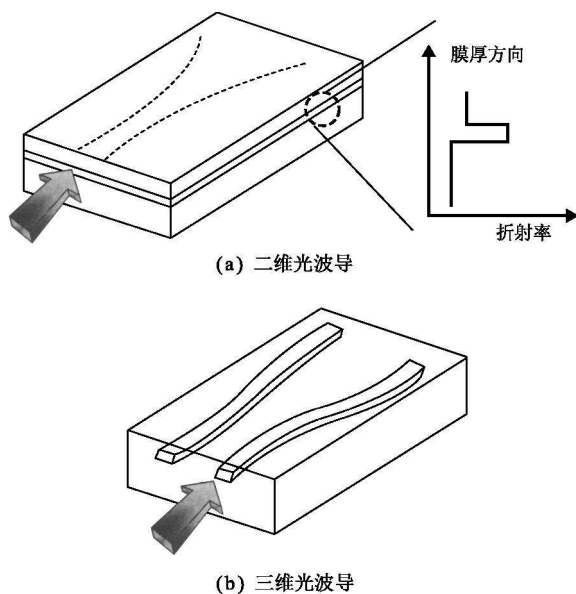


图 2.2 光波导图

二维(slab)光波导用于三维光波导的连接及干涉上。典型的三维光波导如图 2.3 所示,分为掩埋式光波导、脊式(ridge)光波导和条载式光波导。光波导是把光限制在折射率大的区域中传输。在掩埋式光波导里,实际上是折射率大的芯被折射率比它小的外包层包围着。而在脊式和条载式光波导里,其膜厚方向上是由材料的折射率差来限制光。膜面内是附加上有

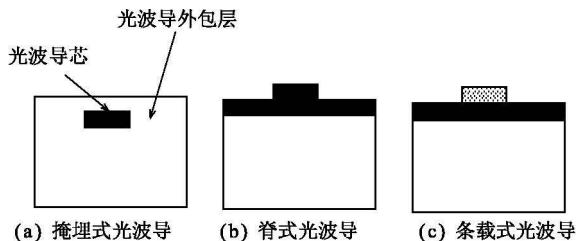


图 2.3 三维光波导典型例(截面结构)

效折射率差来限制光。对于光波导材料,必须考虑的主要特性是折射率和光吸收/散射损耗。限制光的芯部分的折射率应大于外包层的折射率。就是说,重要的参数是折射率差 Δn 。芯和外包层折射率差由要制成的光波导的特性决定。例如,对只传输一个模式的单模光波导,若以二维光波导情形表示,则波导宽度 W 应满足

$$W < W_c \simeq \lambda/2 \sqrt{2n \cdot \Delta n} \quad (2.1)$$

其中, W_c 为高次模的截止波导宽度。折射率差很大程度上决定于光波导尺寸,一般取 0.5% 到 5%。希望有能自由地控制这种程度折射率差的材料。图 2.4 表示了光集成器件中常用的单模光波导尺寸参数计算例。以半导体材料为例,示出了掩埋式光波导和条载式光波导的数据。如,膜厚为 $0.1\mu\text{m}$ 时,掩埋式光波导的横宽为 $1.5\mu\text{m}$ 左右,条载式光波导的横宽为 $4.5\mu\text{m}$ 左右。脊式光波导和条载式光波导在横向上光的限制较弱,所以加大横宽,高次模也不存在。因为尺寸大容易制作,但芯片的尺寸也变大,或者在半导体激光器 etc 情况下工作电流变大,对这一点必须注意。

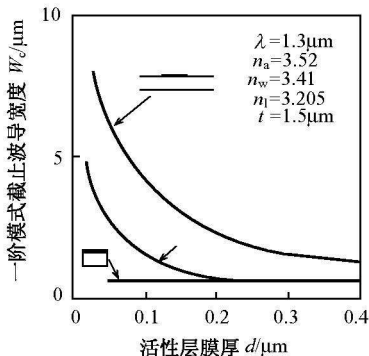


图 2.4 单模光波导尺寸参数的计算例

另外,制作低损耗光波导时,材料的透明性是很重要的。当然,几乎没有用像光纤那样长的光波导的情况,所以对透明性的要求不必像对光纤那样要求太高,但为了实现光集成器件的良好性能,还是需要低损耗光波导。所以需要光吸收和光散射少的材料。为了避免大的光吸收,可从所用波长

范围和材料的吸收关系出发选择材料,但也有必要注意杂质的光吸收。光散射主要由材料的不均匀性引起。光波导经常用薄膜重叠的方法制作。这时,薄膜间接合部的粗糙也会引起光散射。所以制作平滑的多层薄膜是相当重要的。在三维光波导里,膜厚平面内条形结构界面的平滑程度也非常重要。

发光器件几乎都是由直接跃迁型半导体制成。特别是半导体激光器,要求用高跃迁概率实现高发光效率,所以直接跃迁型半导体是不可缺的。对光接收器件除了使用直接跃迁型半导体外还用硅等间接跃迁型半导体。而发光器件、光接收器件有源层用材料,为了得到目标波长,应具有适合的带隙能量。另外,为了形成光波导,需要满足折射率和透明性要求的外包层材料。这些芯(=活性层)和外包层,在保持良好的界面、良好的结晶条件下生长成晶体,这些半导体材料,必须具有几乎一样的晶格常数。引入少量的晶格位错引起的形变缺陷,用它控制能带结构,尝试以此提高半导体激光器性能(有关半导体激光器问题,请参考本丛书中的《半导体激光器基础》)。

光集成器件必需的重要功能除发光及光接收等光电转换外,同样重要的还有光调制及光开关等光控制功能。光调制器的作用是,用外部信号改变光的强度、相位及频率等,在传输信息的光上加载信息。光的开关作用是,时间上的开和关,或者空间上转换光的路径。时间上的开关功能和数字信号的光调制一样。和光集成有关的光调制、光开关功能,都以光波导参数调制和控制为中心实现的。图 2.5 总结了为实现光调制、光开关功能而利用的物理效应和有关材料(关于光调制、光开关的工作原理可参阅本丛书中的《光开关与光互连》)。这里,只是概述大致情况。概括地说,为实现光调制、光开关等光控制功能,利用了由外部激发引起的复数折射率的变化。外部激发包括:电、声、光等。用于光集成器件的首先是电,部分也用光来控制。利用交叉电极的压电(piezo)效应由电信号产生声波,由它控制光。复数折射率的实部就是一般所说的折射率,虚部为吸收系数或放大系数。

复折射率的实部即通常所说的折射率这个参数决定媒质中的光速。而且,比如用外部电场改变折射率,以此控制光的相位。频率在时间上的变化就是相位,所以利用上述效应,可以实现相位调制和频率调制。把相