

OHM 光通信/光电子系列

集成光路

〔日〕西原 浩 著
光正敏 译
春原敏 译
梁瑞林 译



科学出版社
www.sciencep.com

OHM 光通信/光电子系列

集成光路

〔日〕西原 浩 春名正光 著
栖原敏明
梁瑞林 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2003-3493

Original Japanese language edition

Hikari Shuseki Kairo(Kaitei Zouhoban)

By Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna and Toshiaki Suhara

Copyright © 1993 by Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna and Toshiaki Suhara

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

光集積回路 (改訂増補版)

西原 浩 春名正光 栖原敏明 オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

集成光路/(日)西原 浩等著;梁瑞林译. 北京:科学出版社,2004
(OHM 光通信/光电子系列)

ISBN 7-03-012308-5

I. 集… II. ①西… ②梁… III. 光集成 IV. TN491

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 091110 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 白 羽 封面设计 李 祥

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>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 3 月第一次印刷 印张: 13 3/8

印数: 1—4 000 字数: 366 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

译者序

日文版《集成光路》第一版 1985 年出版发行,1993 年进行了修订改版。这部中译本所依据的原书是 2002 年修订增补版的第五次印刷本。

本书讨论的对象是混合集成光路与准混合集成光路。在混合集成光路与准混合集成光路中,允许不同类别的光学器件分别选择各自最合适的材料以及最佳的工艺,容易获得最好的性能,因此其发展前景被普遍看好。

“集成光路”一词容易诱发人们从字面上的联想。例如,从事电子电路技术的工作者容易理解为,所谓集成光路,是否就是将已经取得骄人成就的集成电路中的电子电路换成光路,由于光信号的传播速度比电信号的传播速度更快,因此光路处理信号的速度可以比电子电路更快。事实上这是一个错误的理解。电磁波频率上的数值变化,最终演化为其本质上的变化。集成光路真正可以发挥特长之处,不在于光脉冲这样的能量传输形态,而在于光路可以处理电子流所没有、而只有光波才具备的波动特性(特别是波面特性)所包含的形态信息。

从事传统光学技术的工作者也容易从字面上联想到,所谓集成光路,无非就是将传统的体型光学器件集中制作在同一块衬底上。事实上并非如此,在集成光路中不可能大量使用体型光学器件,而以光波导器件为主。传统的体型光学器件一般都属于多模结构,而集成光路中的光波导器件多为单模结构。另外,热光效应在体型光学器件中,由于体型器件的热容量较大而无法利用,而在集成光路中却可以如鱼得水。又例如,在传统光学系统中,为实现聚焦、发散和准直等聚光功能以及傅里叶变换功能的透镜早已经实用化;而在制作成波导结构的集成光路时,却会出现各种各样的困难和问题,因此不得不制作成具有透镜功能的光栅结构或者采取其他处理措施。

目前,集成光路还没有像集成电路那样形成一种规模化的工业生产,其理论上的探讨领先于制作技术。但是,人们向电磁波更高频率

资源孜孜不倦的索取,为集成光路提供了诱人的需求牵引,也为刚刚踏入集成光路研究领域的研究生和技术人员展现了一个海阔凭鱼跃,天空任鸟飞的用武之地。本书则好选取这些群体为读者对象。因而,它更侧重于理论知识与实际制作技术的结合,书中深入浅出地融入了作者数十年来在集成光路方面所积累的经验。作者以“阅读并理解了本书内容的读者,就应当能够制作光波导型器件”为目标,编写了本书。

本书的翻译出版如果能够对我国集成光路的发展起到些许抛砖引玉的作用,译者将深感荣幸。另外,对于本书翻译中不正确或者不确切之处,也敬请读者不吝赐教与斧正。

在本书翻译过程中,西安电子科技大学研究生杨鹏和万艳芬参与了文字的校对工作。尤其是在本书翻译出版的整个过程中,始终得到了科学出版社相关人士的指导与帮助。值此《集成光路》中译本出版之际,对关心、指导、帮助过本书翻译和译稿整理工作的所有人士,表示衷心的感谢。

译者

前 言

世界光纤通信技术已经取得巨大的阶段性进展。为使光纤通信技术进一步向前发展,人们开始把注意力集中于集成光路。日月如梭,转瞬间本书第一版问世已 8 年。在这 8 年时间里,集成光路进步显著,故本书部分章节需要重新修订。作者十分高兴能够借这次机会对原书进行修订和增补。

集成光学的概念,起源于 20 世纪 60 年代末、70 年代初。当时由于薄膜制作技术和精细加工技术水平较低,因此各种薄膜波导型光学器件只可纸上谈兵,无法实现其优异特性。在其后的几十年的时间里,作为光源的半导体激光器、作为光传输媒体的光纤取得了令人耳目一新的发展,光通信系统所必需的外围硬件也逐一齐备。在光学技术发展过程中,集成光路虽然若隐若现,但却在稳步地发展。而从事集成光路研究的科研人员和技术人员,在支撑现代高新技术的集成电路迅猛发展的启迪与促进下,也在为这种新型光学器件早日实用化的理想进行着不懈的努力。由于这些因素,使得实用性极强和发展前途极广的集成光路迎来了成熟阶段。

集成光路器件大致上可分为两类。一类是以 III-V 族化合物半导体为衬底,在其表层集成了从光源到检测器的单片型;另一类是在介质材料衬底上,以外置光源和检测器的方式构成的混合型。到 1993 年为止,作者从事混合集成光路的研究大约已有 20 年了。在这 20 年左右的时间里,日本国内对于集成光路的关心程度发生了巨大变化,尤其是近年来关心程度特别高涨,各类人群大量垂询诸如集成光路的设计方法、制造技术、评价方法、发展前途等方面的问题。在这部技术专著中,作者结合自己的研究成果,将对以介质材料为衬底的混合集成光路,从波导理论到制作技术,做一系统介绍。在书中仔细地描述了与集成光路相关的基本公式的推导、机理的诠释、技术指标、制作方法等内容。这将会对有志于这方面学习的研究生以及刚踏入该领域大门的技术人员提供很大帮助。迄今为止,在国际上已经出版的与此

内容相近的入门书有 Tamir 1975 年编写的《Integrated Optics》*。但是在国际上,专门针对集成光路话题进行详细讲述的书籍,本书大概要算是首部。

全书共分 12 章。其中,第 2~5 章讲述光波导及其调制理论,第 6~8 章介绍制作方法与检测技术,第 9~11 章介绍了集成光路所使用的器件,篇幅上基本做到了均衡分配。这次主要修订和增补的内容包括波导光的散射(第 2 章)、非线性光学器件(第 10 章)以及集成光路实例(第 11 章)。阅读并理解了本书内容的读者,自己就应当能够制作光波导型器件了。参与本书编写的作者,都是同一研究室的同事,相互间能进行充分的联络沟通,因此每人分担执笔自己最擅长的内容。由此也造成了执笔人与章节间的交叉,例如:

西原:第 1 章,第 3.1 节,第 6.1 节、6.2 节,第 7.1 节、7.2 节,第 9.2 节,第 11.1~11.3 节,第 12 章。

春名:第 2 章,第 5.1 节、5.2 节、5.4 节、5.5 节,第 6.3 节、6.5 节,第 7.4 节,第 9.3 节、9.4 节,第 10.1 节、10.2 节、10.5 节、10.8 节,第 11.8 节。

栖原:第 3.2 节,第 4 章,第 5.3 节、5.6 节,第 6.4 节、6.6 节、6.7 节,第 7.3 节、7.5 节,第 8 章,第 9.1 节、9.5 节、9.6 节,第 10.3 节、10.4 节、10.6 节、10.7 节,第 11.4~11.7 节。

各章相关的表格、文献等,精选后列于各章末尾。至于更详细的内容,请参阅相应的文献。在本书写作过程中,作者间虽经充分磨合与互审,但名词不统一、思考方法不一致之处恐怕仍在所难免,恳请读者谅解与斧正。

本书若能对日本集成光路的发展起到些许作用,作者将感到无比高兴。最后,对于指导作者研究集成光路并激励作者执笔本书的大阪大学小山次郎教授、对于参与本书所列各项成果研究的本研究室毕业生和在读学生表示谢意。并对为本书出版付出巨大努力的欧姆社出版部的各位表示由衷的感谢。

作者谨识

* 该书中译本:集成光学. 梁民基等译. 科学出版社,1982 年出版。——译者注

目 录

第 1 章 集成光路概述

1.1 定 义	1
1.2 发 展	2
1.3 特 点	4
1.4 制作集成光路所需的技术	6
1.5 本书的结构	7

第 2 章 光波导理论

2.1 光波导概述	8
2.2 折射率突变型二维光波导	10
2.3 折射率渐变型二维光波导	23
2.4 三维光波导	29
2.5 三维光波导的实例	38
2.6 波导光的散射与传输损耗	47

第 3 章 光波导的模耦合理论

3.1 模耦合理论的基本概念	51
3.2 模耦合的一般理论	60

第 4 章 光波导结构中的光栅理论

4.1 光栅的分类	66
4.2 光栅耦合	68
4.3 共线耦合	70

4.4	共面耦合	78
4.5	导模-辐射模耦合	87

第 5 章 光波导的调制

5.1	调制方法的分类	101
5.2	利用电光效应的调制	103
5.3	利用声光效应的调制	117
5.4	利用磁光效应的调制	126
5.5	利用热光效应的调制	130
5.6	利用非线性光学效应的调制	134
附录	典型的光学常数	143

第 6 章 光波导的材料与制作技术

6.1	典型材料与制作技术	146
6.2	高分子薄膜波导	150
6.3	玻璃波导	152
6.4	非晶质硫硒碲化合物薄膜波导	160
6.5	LiNbO_3 波导	163
6.6	其他波导	172
6.7	薄膜淀积型波导用的 SiO_2/Si 衬底	176
附录	各种波导的特性与光学材料的折射率	178

第 7 章 集成光路的精细加工技术

7.1	精细加工工艺	182
7.2	图形形成技术	184
7.3	加工技术	189
7.4	三维光波导的制作方法	195
7.5	光栅的制作方法	214
附录 1	用照相缩小法制作光掩模	230

附录 2 用激光束直接绘图法制作光波导图形	232
-----------------------------	-----

第 8 章 光波导技术与波导的评价

8.1 概 述	235
8.2 波导光的激励方法	236
8.3 传输常数的测量方法与波导参数的评价	246
8.4 传输损耗与散射的测量方法	250

第 9 章 无源光波导器件

9.1 概 述	256
9.2 光路变换器	257
9.3 分配器	263
9.4 偏振器与模分离器	268
9.5 波长分波器与合波器	271
9.6 透 镜	278

第 10 章 有源光波导器件

10.1 概 述	292
10.2 电光调制器	293
10.3 声光控制器件	316
10.4 磁光调制器	332
10.5 热光调制器	338
10.6 二次非线性光学效应器件	343
10.7 三次非线性光学效应器件(光双稳态器件)	350
10.8 波导激光与波导型放大器件	357

第 11 章 集成光路实例

11.1 概 述	362
----------------	-----

11.2	宽带光调制器	363
11.3	光学开关、光学开关阵列与多重光波长	364
11.4	频谱分析器	372
11.5	卷积器与相关器	376
11.6	高密度信息读取器(光盘拾波器)	380
11.7	连接器	382
11.8	集成光路传感器	384

第 12 章 集成光路今后的课题

12.1	混合集成光路存在的课题	391
12.2	光电子集成回路	394
12.3	集成光路的发展方向	394

参考文献	396
------------	-----

第 1 章 集成光路概述

1.1 定 义

集成光路(optical integrated circuits)是指在同一块衬底的表面上,用折射率略高的材料制作成光波导,并以此为基础再集成作为光源的激光二极管,以及开关、调制器等有源器件、光二极管检测器等,所构成的具有整体功能的光学通路。通过集成化,实现了光学系统的小型化、轻量化、稳定化、高性能化的目的。如果从材料结构的角度对现有的集成光路进行分类,大致上可分为混合型集成光路、单片型集成光路以及介于以上二者之间的准混合型(或者准单片型)集成光路。它们各自的特征示于图 1.1。

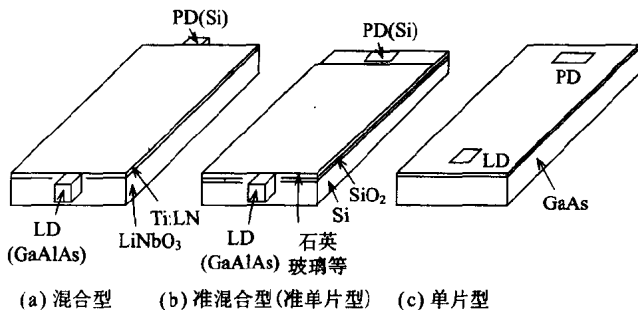


图 1.1 集成光路按照材料结构的分类

如果将构成上述集成光路的三种基本器件,也就是光源、含有各种有源器件的光波导以及光检测器件,都制作在与这三者相同材料的衬底上,所构成的集成光路称为**单片集成光路**(monolithic optical IC),单片集成光路的衬底材料是 GaAs, InP 系列的化合物半导体。如果构成集成光路的三种基本器件的材料各不相同,而且它们与衬底材料也不相同的集成光路,称为**混合集成光路**(hybrid optical IC)。例

如,在混合集成光路中,光源采用化合物半导体,光波导采用玻璃和铌酸锂(LiNbO_3)之类的介质材料,而光检测器件则采用硅材料制作,并将它们组合在一起。而在准混合(quasi-hybrid)集成光路,或者准单片(quasi-monolithic)集成光路中,则是光源采用与前面相同的化合物半导体材料,光波导的衬底以及光检测器件都是采用硅材料制作的。准混合集成光路是在混合集成光路的基础上,往单片集成光路的方向迈进了一大步。在这种场合下,它是将硅的表面经加热氧化形成 SiO_2 层,再在 SiO_2 层的表面上镀制介质层构成光波导。也就是说,准混合集成光路与混合集成光路一样,它们的波导采用的都是介质波导。

有关采用半导体材料制作的波导型器件,其他书中已有介绍,本书不再重述。本书所讨论的波导型器件采用的都是介质材料,也就是说,在本书中以混合集成光路与准混合集成光路的构成材料作为讨论对象。

作为集成光路,理所当然地希望是单片的;而混合型集成光路的三种基本器件,在单独地制作完成后,还存在它们之间相互连接的问题。但是,换一个角度来看,混合集成光路又具有允许不同类别的器件分别选择各自最合适的材料以及最佳工艺以便取得最好性能的优点。因此,混合集成光路在今后有可能会得到长足的发展。

1.2 发 展

有关集成光路的研究,是从1969年美国贝尔实验室的S. E. Miller博士提出了 Integrated Optics(集成光学,或者光集成技术)的概念开始的。他所提出的集成光学的概念,为本书将要研究的以介质材料为衬底的混合集成光路,描绘出了一个雏形。

20世纪70年代初期,无论是在混合集成光路的起步阶段,还是在单片集成光路的起步阶段,为了制作光波导,都对各种材料及其制作方法进行了大量的尝试与评价,从而最终选定了高分子材料光波导、玻璃光波导和 LiNbO_3 光波导。另外,发光二极管(LED)和激光二极管(LD)以及光纤的研究也取得了进展,特别是光纤的传输损耗降到了20 dB/km,从而开始了光纤通信系统的实用性讨论,以满足未来光通信系统所需要的集成光路的研究。该研究在以美国为中心,包括日本在内的许多国家中开始盛行起来。被公认为是关于集成光路热门

报告的 Topical Meeting on Integrated Optics (Optical Society of America 主办,后改名为 Integrated and Guided Wave Optics,简称为 IGWO)的第 1 次会议于 1972 年召开,具有深远的意义。

20 世纪 70 年代后期,LD、LED 得到了进一步改善,光纤也成功地实现了低损耗化,这时的日本企业界都在追逐光纤通信系统开发的风潮。再加上由于不知道集成光路的器件何时才能够实用化,因此在日本从事这方面研究的人员大量减少,日本的集成光路研究一度停滞不前。但是,在该领域处于主导地位的美国,对集成光路的研究依然十分活跃,尤其是在这段时间内提出了体现集成光路特征的集成光路器件和射频(RF)频谱分析仪的方案,更有若干研究机构还接受了军事部门的委托,开始了热心的研究工作。在日本全国的大学中有 50 多个课题组,参加了由文部省科学研究经费资助的“光波导电子学”的专题研究。该专题研究,从 1977 年到 1979 年持续了 3 年,使得在日本的大学中对集成光路的研究得以延续。在这期间,1977 年在东京召开了第 1 届 IOOC'77(International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication)会议,日本人借此机会将自己的研究成果公布于世。

进入 20 世纪 80 年代,多模光纤通信的研究已经告一段落,这时日本的企业界出现了剩余的研究人员,再加上光纤通信技术的单模化也取得了进展,集成光路在日本被人们重新认识。在此期间内,与日本的大学里的集成光路研究课题组减少的现象相反,日本企业界的研究开始盛行起来。完成了实用阶段光通信系统微光学技术研究的的企业界,由于在组装时遇到了使用过程中的性能不稳定等许多麻烦,开始寄希望于集成光路。如此一来,集成光路再度引起了众多日本光学技术工作人员的关注。

从 20 世纪 70 年代后期到现在,有关集成光路的国际会议大量增加。上述的 IOOC(集成光路和光纤通信国际会议),1983 年在日本召开了第 4 届会议,1989 年在日本召开了第 7 届会议。OEC(Optoelectronics Conference,光电子学会议)作为日本国内的会议,从 1986 年起隔一年召开一次。前面所介绍的 IGWO(集成和光波导学会议),1990 年起更名为 IPR(Integrated Photonics Research,集成光学研讨会),每年召开一次。还有,欧洲每年都要召开 ECIO(European Con-

ference on Integrated Optics, 欧洲集成光学会议)。这些会议频繁地传递着国际间有关集成光路方面的信息,同时也加快了集成光路的研究进展。

1.3 特点

目前,集成光路还算不上是一种成熟的产品,其理论上的探讨领先于制作技术。原因在于支撑现代计算机技术的集成电路取得的骄人业绩,启发许多人产生了字面上的联想,于是就对集成光路来了个囫圇吞枣。例如不少人认为,集成光路是将集成电路中的电子电路换成了光路;由于光信号的传播速度比电信号的传播速度更快,因此光路处理信号的速度可以比电子电路更快,因而就更为有利。但是实际情况并非如此,例如光脉冲在玻璃光波导中的传播速度比电脉冲在集成电路中的传播速度快了不过几倍。如果仅仅为了区区数倍的处理速度,用结构大致相同的集成光路置换现成的集成电路,意义并不大。集成光路真正可以发挥特长之处不在于光脉冲这样的能量传输形态,而在于光路可以处理电子流所没有的、而只有光波才具备的波动特性(特别是波面)所包含的形态信息。要想理解集成光路,首先必须从这个角度来观察它、认识它。

以上就集成光路的特点与集成电路进行了比较,下面我们再换个角度来看看集成光路的产生与发展的必然性,就会更容易了解目前还处于光器件发展阶段的集成光路的地位了。现在我们来了解一下集成光路的特点。光器件的发展,如表 1.1 所示,大致上分为三个阶段。第一代是传统的光学器件阶段,它是将体型光学器件固定在大型的底盘上,构成光学系统。该系统的大小大约是 1 m 见方的数量级,光束的粗细也大到了 1 cm 的程度。第二代是在第一代的基础上,将脉冲光学器件原封不动地缩小的光学技术,也就是微光学阶段。在第二代中所使用的光学器件有 LED、LD、光纤、棒状透镜等所谓微型光学器件,这些器件支撑着现在的光纤通信系统。它们几乎具备了需要它们具备的所有性能;缺点是它们的尺寸小到毫米数量级,在将它们连接的时候,光轴的调整和位置的磨合比较麻烦,尤其是调整后的连接不稳固,组装也比较困难。

表 1.1 光学器件技术的发展阶段

	第一代	第二代	第三代	特点
所属学科与技术	光学 (Conventional Optics)	微光学 (Micro Optics)	集成光学 (Integrated Optics)	○ 波动光学 ○ 薄膜技术 ○ 精细加工技术
具有代表性的器件	气体激光器、透镜、反射镜等	LED、LD、多模光纤、棒透镜等	集成光路(单模 LD、单模光纤)	○ 集成化 ○ LD、光纤等与外部连接困难
器件间的位置调整	需要调整	需要调整(非常麻烦)	无需调整(相对固定)	○ 稳定(抗振动性好)
光的传输(传输直径)	束状(cm 级)	束状多模光波导(mm 级)	单模光波导(μm 级)	○ 易于控制 ○ 光强度大: → 相互作用大 → 非线性大 → 光损伤大
控制电极的大小	1 cm 数量级	1 mm 数量级	1 μm 数量级	○ 工作电压低 ○ 速度快
器件大小	1 m 见方数量级	10 厘米见方数量级	数厘米见方数量级(薄膜)	○ 体积小、重量轻

本书将要介绍的集成光路,就是应当称之为即将诞生的第三代光学器件。其特点可列举如下。

(1) **以波动光学的方式进行处理** 器件主要由微米数量级宽度的单模光波导构成,其中传输的是单模光波。在此之前,无论是第一代光学器件所处理的光的形态,还是第二代光学器件所处理的光的形态,都属于射线光学(ray optics);而与它们相比,第三代光学器件所处理的光的形态则必须是波动光学(wave optics)所携带的光学信息。

(2) **集成化带来的稳固定位** 如上所述,集成光路是在同一块衬底上制作若干个器件,因而不存在第二代光学器件所具有的组装问题,也无需调整光轴和磨合它们之间的相对位置,往往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。这可以说是集成光路的最大优点。

(3) **易于调制波导光** 集成光路中的光波导属于单模波导,与第一代光学器件和第二代光学器件中的光束处理方式和多模光波导相比,集成光路可以利用电光效应、声光效应、热光效应等原理很好地实现光的调制。而在多模光波导的情况下,很难对于多种模式进行同样

的调制。

(4) **工作电压低以及相互作用长度的缩短** 由于是单模光波导,控制电极之间的距离可以做得非常小,因此集成光路在实现低电压控制的同时,相互间的作用强度反而变得更大。同时,电极间距的缩小,也更利于光通信系统的小型化。

(5) **动作迅速** 随着电极尺寸的减小,分布电容也会大为减小,由此而可以实现开关的高速化、调制的高速化。

(6) **功率密度高** 沿单模波导传输的光被封闭在狭小的空间内,所以其光功率密度可以远大于光束的功率密度。这样就容易实现光波导材料的非线性光学效应,也容易制成利用这种效应的器件。当然,应当注意到集成光路在具有该优点的同时,也带来了容易受到光损伤的缺点。

(7) **体积小、重量轻** 器件尺寸即数厘米见方的衬底尺寸,所以体积小,重量轻。

(8) **价格便宜** 实际上,即使在现阶段仅仅能够便宜一点点,随着集成化技术的进展,当发展到能够进行批量生产时,再加上材料的用量少,将来会有大幅度降低成本的可能。

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

1.4 制作集成光路所需的技术

如上节所述,集成光路实质上是由单模波导构成的,这是一个难得的优点。由于集成光路中的器件尺度与光波的波长处于相同的数量级,也就是用微米尺度进行计量,因此就要求在集成光路的加工制作过程中必须采用微米数量级的技术。例如,波导层的厚度大约 $1\ \mu\text{m}$,波导的宽度大约 $4\ \mu\text{m}$,光栅的周期大约 $0.5\ \mu\text{m}$ 。为了制作器件尺度为微米级的集成光路,就需要有精湛的薄膜制作技术以及精细的图形加工技术。到目前为止,与各种光波导材料相适应的溅射技术、等离子体化学气相沉积技术(等离子体 CVD)之类的薄膜化技术,以及光刻技术、电子束蚀刻成形技术等精细加工技术,全部都取得了突飞猛进的进展。在这些技术的支持下,各种集成光路的研究取得了