

微 纳 系 统 系 列 译 丛

PHOTONIC MICROSYSTEMS

Micro and Nanotechnology Applied to Optical Devices and Systems

光子微系统

微纳技术在光器件与系统中的应用

[挪威] 奥拉沃·索格尔德 (Olav Solgaard) / 著

黄庆安 于虹 雷威 汤勇明 / 译



东南大学出版社



光子微系统

微纳技术在光器件与系统中的应用

Photonic Microsystems

Micro and Nanotechnology Applied to
Optical Devices and Systems

[挪威] 奥拉沃·索格尔德 著
(Olav Solgaard)

黄庆安 于虹 译
雷威 汤勇明

东南大学出版社
· 南京 ·

《微纳系统》译丛总序

微机电系统(MEMS)出现于20世纪80年代中后期,是指可以批量制造的,集微结构、微传感器、微执行器以及信号处理和电路等于一体的器件或系统。其特征尺寸一般在 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围。目前国际上通常将MEMS冠以Inertial-, Optical-, Chemical-, Bio-, RF-, Power-等前缀以表示其不同的应用领域。MEMS集约了当今科学技术的许多尖端成果,更重要的是它将敏感与信息处理及执行机构相结合,改变了人们感知和控制外部世界的方式。

MEMS技术经过20多年的发展,诸如喷墨打印机中的喷嘴阵列、照相机中的图像稳定陀螺、手机中的振荡器和麦克风、投影显示器中的微镜阵列等消费类电子产品以及汽车防撞气囊中的加速度传感器、胎压检测系统中的压力传感器等等已经进入大规模生产。近年来我国出现了不少MEMS高新技术企业,很多大学也开设了MEMS课程,因此,无论是MEMS教学或科学研究,还是工业化产品开发,都迫切需要MEMS技术方面的信息资料,特别是这方面的专著。虽然我国一些出版社已经购买版权并翻译出版了部分国外书籍,对我国MEMS技术的发展起到了积极推动作用,但这些书籍是零散的、缺乏整体规划,而发达国家的出版社在MEMS书籍方面,进行了有效的组织和规划,例如:Springer出版社2005年出版了MEMS/NEMS Handbook: Techniques and Applications(共5卷)、2007年开始出版MEMS Reference Shelf(目前已经出版9本),Wiley-VCH出版社2004年开始出版Advanced Micro and Nanosystems Series(目前已经出版7本)。面对国外MEMS快速发展的形势和我国对MEMS书籍的迫切需求,及时系统地规划、遴选、组织并翻译出版国外MEMS书籍很有必要,东南大学出版社2005年开始出版的《微纳系统》系列译丛就是这方面的尝试。

支撑MEMS发展的共性技术包括设计、制造、封装、可靠性以及测试技术等。

设计

MEMS 工作过程涉及机械能、电能、磁能、热能和化学能等及其之间的耦合,工作原理复杂,因此,理解其工作过程,提高或优化其性能,需要模型、算法和设计工具。

制造

MEMS 所用材料主要有半导体硅、玻璃、聚合物、金属和陶瓷等。由于所用材料不同,习惯上,将 MEMS 制造分为 IC(集成电路)兼容的制造技术和非 IC 兼容制造技术。IC 所完成的功能主要利用了硅单晶的电学特性,而硅单晶也有良好的机械特性,例如,硅单晶的屈服强度比不锈钢的高、努氏硬度比不锈钢的强、弹性模量与不锈钢的接近,同时,硅单晶几乎不存在疲劳失效。硅单晶良好的机械特性以及微电子已经建立起来的强大工业基础设施,使其成为 MEMS 的主流材料。但由于微电子制造技术基本上是一种平面制造工艺,为在芯片上制造可动部件,需要微机械加工技术。

硅微机械加工技术主要包括表面微机械加工技术、体微机械加工技术、硅片直接键合技术以及这些技术的相互融合。

1965 年美国 Westinghouse 电气公司的 H. C. Nathanson 等人提出硅表面微机械加工技术,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展,20 世纪 90 年代出现的气相 HF 牺牲层释放技术,大大提高了表面微机械加工技术的生产成品率和效率,利用表面微机械加工技术制造的典型产品有 ADI 公司加速度传感器、TI 公司的微镜阵列投影显示器等等。

硅体微机械加工技术包括湿法刻蚀和干法刻蚀,KOH 湿法各向异性刻蚀于 1967 年由美国 Bell Lab 的 H. A. Waggener 等人提出,在 20 世纪 80 年代中后期得到发展,20 世纪 90 年代由日本京都大学 O. Tabata 等人发明的 TMAH 湿法各向异性刻蚀与 IC 工艺线兼容,进入工业化应用;反应离子刻蚀(RIE)是 IC 工艺,1994 年,德国 Bosch 公司采用电感耦合等离子(ICP)方法发明了 DRIE(深反应离子刻蚀)技术,它是硅体微机械加工的基本技术之一,利用体微机械加工技术制造的典型产品有 Freescale 公司的压力传感器、ST-microelectronics 公司的加速度传感器、Akustica 公司的麦克风、

SiTime 公司和 Discera 公司的振荡器、HP 公司的喷墨打印机微喷嘴阵列等等。

1986 年,美国 IBM 公司的 J. B. Lasky 等人和日本东芝公司的 M. Shimbo 等人分别独立开发出硅片直接键合技术,它是硅三维结构制造的主要技术之一,利用硅片直接键合技术制造的典型产品有 NovaSensor 公司的压力传感器等。

由于硅材料耐磨性差以及特殊环境的使用问题,非 IC 兼容加工技术的发展可满足 MEMS 不同材料和结构的需要以及特定应用(如生物化学环境和高温环境等)的需要,1985 年德国 W. Ehrfeld 小组开发出的 LIGA(光刻电铸成型)技术以及后来发展起来的 UV-LIGA(紫外光-光刻电铸成型)技术是非 IC 兼容的主要加工技术,此外还有激光三维加工技术、微细电火花加工技术、热压/注射成型加工技术、微纳米压印技术等。

集成化

MEMS 微传感器需要信号放大、信号处理和校准,MEMS 微执行器需要驱动和控制。因此,在应用中,MEMS 器件需要和微电子专用电路(ASIC)集成,这种集成可以是单片集成也可以是多片集成,至于采用哪种方式集成,取决于系统要求和成本。单芯片集成是将传感器及执行器与处理电路及控制电路同时集成在一块芯片上,多片集成实际上涉及了封装技术。

CMOS MEMS 技术是一种单芯片集成技术,它利用集成电路的主流 CMOS 工艺制造 MEMS。MEMS 器件与电路单片集成的主要优点有:

(1) 可以实现高信噪比。一般而言,随着传感器的面积减小,其输出的信号也变小,对于输出信号变化在 nA (电流输出)、 μV (电压输出)或 fF (电容输出)量级的传感器,敏感位置与外部仪器引线的寄生效应会严重影响测量,而单片集成可降低寄生效应和交叉影响。

(2) 可以制备大阵列的敏感单元。大阵列的单元信号连接到片外仪器时,互连线制备及可靠性是主要问题。对于较小阵列,引线键合等技术就可以满足要求,但对于较大阵列,互连问题会影响生产成本和器件成品率甚至不可能实现大的阵列。因此,采用片上多路转换器串行读出,不仅降低了信

号调理电路的复杂性,而且大大降低了键合引线的数量,提高了可靠性和成品率。

(3) 可以实现智能化。除信号处理功能外,诸如校准、控制以及自测试等功能也可以在芯片上实现。单片集成方式已经促成了多种 MEMS 产品商业化,如加速度传感器、数字光处理器以及喷墨头。

但是,使用 CMOS MEMS 技术,可用材料被限制到 CMOS 材料以及和 CMOS 工艺兼容的材料,其制备与封装工艺也有较多限制。

封装

MEMS 封装的目的是为其提供物理支撑和散热,保护其不受环境的干扰与破坏,同时实现与外界信号、能源及接地的电气互连。MEMS 含有可动结构或与外界环境直接接触,因此 MEMS 封装比 IC 封装更复杂。一般来说,IC 制造中采用的低成本封装技术只能适用于一部分 MEMS,而大多数 MEMS 器件中含有可活动部件,往往需要采用特殊的技术和材料才能实现其电信号与非电信号的相互作用,而且器件种类繁多,大大增加了封装的难度和成本。MEMS 封装包括单芯片封装、多芯片封装、圆片级封装和系统封装(SiP)等封装技术,可实现非气密、气密和真空封装,封装过程需要考虑电性能、电磁性能、热性能(等物理场)、可靠性等问题。

可靠性

MEMS 可靠性指长期暴露在外界时可靠工作的能力。MEMS 可靠性一般分为制造过程中的可靠性(包括制造过程、划片、超声键合引线、封装等)、工作过程中的可靠性以及环境影响可靠性。为了保证 MEMS 的可靠性,还需要对材料、工艺、器件、系统等可靠性进行测试、表征和预测。MEMS 在工作过程中的可靠性可以分为四类:

- (1) 没有可动的部件(例如压力传感器、微喷嘴等);
- (2) 有可动但没有摩擦或表面相互作用的部件(例如谐振器、陀螺等);
- (3) 有可动和表面相互作用的部件(例如继电器、泵等);
- (4) 有可动并有摩擦和表面相互作用的部件(例如光开关、光栅等)。

MEMS 机械失效机制主要是由于 MEMS 器件表面接触、滑动和摩擦

引起。

机械装置的运动包括弹性运动和刚体运动(或整体运动),弹性装置借助柔性结构(如弹簧和扭转杆等)运动;而刚体装置借助铰链和轴承运动。刚体装置允许部件积累位移,而弹性装置将部件限制在固定点或固定轴附近运动。由于 MEMS 器件表面接触、滑动和摩擦引起的诸多问题还没有解决,因此目前 MEMS 产品均使用了柔性连接方式。

应用

MEMS 具有微型化的特征,而且可高精度批量制造,与其他科学技术的结合,会产生新的应用领域,例如:

1970 年,美国 Kulite 公司研制出硅加速度传感器原型;1991 年,美国 Draper 实验室 P. Greiff 等人发明硅微机械陀螺。陀螺传感器与加速度传感器构成了惯性传感器及其系统,目前在电子类消费品、汽车、航空航天以及军事等领域有广泛应用。

1987 年,美国 UC Berkeley 的 R. S. Muller 小组和 Bell Lab 的 W. N. S. Trimmer 小组利用多晶硅表面微机械加工技术,研制出自由移动的微机械结构(微马达、微齿轮);1991 年,美国 UC Berkeley 的 K. J. Pister 小组研制出多晶硅铰链结构,自此,微机械操作、微组装、微机器人成为新的研究分支。

1989 年,美国 UC Berkeley 的 R. T. Howe 小组研制出横向驱动梳状谐振器,它是目前微机械振荡器、微机械滤波器、加速度传感器、角速度传感器(陀螺)、电容式传感器等的基本结构。

1980 年,美国 IBM 公司的 K. E. Petersen 发明硅扭转扫描微镜,它是光学扫描仪、数字微镜器件、光学开关等的基本结构;1992 年,美国 Stanford 大学 O. Solgaard 等人发明 MEMS 光栅光调制器,实现了微机械对光的操作,自此,Optical MEMS(光微机电系统)分支出现。光 MEMS 在光通信技术、显示技术、光谱分析技术等领域有广泛应用。

1990 年,美国 Hughes 实验室的 L. E. Larson 等人研制出微机械微波开关。自此,RF MEMS(射频/微波微机电系统)分支出现,用微机械加工技术制造芯片上无源元件(电容、电感、开关等)、组件(滤波器、移相器)以及单

芯片微波系统研究进入热潮。RF MEMS 在雷达、通信等领域有广阔的应用前景。

1990 年,瑞士 Ciba-Geigy 制药公司的 A. Manz 等人研制出微全分析系统(μ TAS)或称为芯片上实验室(Laboratory on a chip),这是目前微流控分析芯片的原型。自此开始了微型泵、微型阀门、微型混合器、微型通道等对微尺度下的流体操作器件研究。微流控在生物领域的应用是近年来 MEMS 最活跃的方向之一,具有降低分析成本、缩短反应时间、提高精度、多功能集成等优点,在分析化学、医疗、药物筛选等领域有广阔的应用前景。

1995 年,美国 MIT 的 J. H. Lang, A. H. Epstein 和 M. A. Schmidt 等人开始了微型气动涡轮发动机研究;2000 年,美国 Minnesota 大学 Kelley 小组研制出基于 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池原型。另外,诸如压电振动能量收集、热电能量收集、电磁能量收集等技术的发展,促进了 Power-MEMS(动力微机电系统)分支出现。动力微机电系统在无线传感网、医疗、土木工程结构健康监测等领域有广阔的应用前景。

❷ 微米/纳米技术的结合

试验已经证实,硅基 NEMS 器件能够提供高达 10^9 Hz 的频率、 10^5 的品质因数、 10^{-24} 牛的力感应灵敏度、低于 10^{-24} 卡的热容、小到 10^{-15} 克的质量以及 10^{-17} 瓦的功耗。由于纳米尺度材料或结构的量子效应、局域效应以及表面/界面效应所呈现的奇特性质,可以大幅度提高 MEMS/NEMS 的性能,也可能使以前不可能实现的器件或系统成为可能。例如,2004 年英国 University of Manchester 的 K. S. Novoselov 和 A. K. Geim 成功制备出可在外界环境中稳定存在的单层石墨烯(Graphene),其特异的性质如量子霍尔效应、超高迁移率、超高热导率和超高机械强度已经引起人们的广泛重视,是目前材料和凝聚态物理领域的研究热点之一,而当气体分子吸附在石墨烯表面时,吸附的分子会改变石墨烯中的载流子浓度,引起电阻突变,可实现单分子检测。但实际上,只有将纳米结构与微米结构互连后,才能与宏观世界联系起来,通过微米技术进行集成,可将基于纳米尺度效应的功能和特性转变成新的器件和系统,因此,MEMS 技术可作为纳米科学走向纳米技术的桥梁。例如,20 世纪 80 年代出现的隧道扫描显微镜、原子力显微镜

以及近场显微镜等,它的探针最前面的部分是“纳”,后面就是“微”和“电”,三者集成在一起,协调工作。因此,微米纳米技术相互融合已成为趋势和发展主流。

市场

据有关咨询机构(例如 Yole, iSuppli, SPC, MANCEF, NEXUS, ITRS)的统计与预测分析, MEMS 产业在 2000 年全球销售总额约为 40 亿美元, 2005 年约为 68 亿美元, 2010 年约为 100 亿美元。目前的主要产品包括微型压力传感器、惯性测量器件、微流量系统、读写头、光学系统、打印机喷嘴等,其中汽车工业和信息产业的产品居主导地位,占总销售额的 80% 左右。

一方面, MEMS 前期开发的技术已经开始进入产业化,另一方面, MEMS 与纳米技术等其他新技术的交叉研究方兴未艾。面临这种发展趋势,无论是高等学校教学或科学研究,还是工业部门产品开发,都需要及时系统地学习并总结前人的知识和经验。

东南大学黄庆安教授长期从事 MEMS 教学和科研工作,经常关注国际微米/纳米技术的最新进展及有关 MEMS 技术信息,他带领的团队在 MEMS CAD、RF MEMS、CMOS MEMS、MEMS 可靠性、NEMS 以及微传感器等方面进行了长期研究,此次东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织翻译出版《微纳系统》系列译丛,将会促进我国 MEMS 教学、科研以及产业化发展。《微纳系统》系列译丛涉及面广,从选题、翻译、校对到出版等工作量巨大,为此,向为翻译该书付出辛勤劳动的师生们表示敬意。

希望《微纳系统》系列译丛的出版对有志从事微米/纳米技术及 MEMS 研发的广大师生和科研人员有所帮助。

中国工程院院士

丁衡高

2010 年 10 月

译者序

自 MEMS 技术出现后,一直倡导、关心和支持我国 MEMS 发展的丁衡高院士在百忙中为本书中文版作序,并对翻译工作一直给予鼓励,使我们深感鼓舞。

从 2004 年开始,东南大学 MEMS 教育部重点实验室与东南大学出版社合作,组织出版《微纳系统》系列译丛,我们在选择国际上出版的书籍时,主要基于以下考虑:(1)书籍是国际知名专家所写,以保证内容的权威性;(2)书籍是近期出版的,以保证技术的先进性;(3)国内还没有同类书籍翻译,避免重复引进;(4)本实验室也在进行该方向的研究,以保证翻译质量。

《微纳系统》译丛将覆盖 MEMS 设计、制造、封装、可靠性及测试等共性的技术以及射频 MEMS、光 MEMS、动力 MEMS 等各种应用的技术。

MEMS 与光学技术的结合,即对光的操作,是 MEMS 主要应用领域之一,其目的就是利用集成电路技术和 MEMS 技术,使光学系统小型化,进而实现高性能、低成本的光学系统。《光子微系统》一书是国际 MEMS 知名学者、MEMS 光栅光调制器发明人、斯坦福大学 Olav Solgaard 教授所著。内容深入浅出,特别适合光 MEMS 领域的高年级本科生作为教科书使用。

要感谢 Springer 出版公司将简体中文版授权东南大学出版社,才使本书中文版成为可能。

本书翻译由东南大学 MEMS 教育部重点实验室于虹副教授和黄庆安教授、东南大学显示技术中心雷威教授和汤勇明教授组织,东南大学 MEMS 教育部重点实验室和东南大学显示技术中心相关课题组的研究生参加,具体翻译分工如下:黄庆安(第 1 章、序言)、崔云康(第 2、4 章)、狄云松(第 3 章、附录 A)、张聪(第 5 章)、刘春胜与徐涛(第 6 章)、刘凯丽(第 7 章)、汤勇明(第 8 章)、杨海宁(第 9 章)、陈仲珊(第 10 章)、曾洁琼(第 11 章)、李敏(第 12、13 章、附录 B)、于虹(第 14、15 章)。其中第 1、12、13 章

及附录 B 由黄庆安校对,第 5、6、11、14、15 章由于虹校对,第 2、3、4 章及附录 A 由雷威校对,第 7~10 章由汤勇明校对,黄庆安对全书进行了统稿。在这里对参加翻译的研究生们表示感谢。

在翻译过程中,我们对书中专用名词、术语及相关问题进行定期讨论与商榷,但由于翻译水平有限、加之时间紧迫,译书中肯定有这样或那样的错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

黄庆安

东南大学 MEMS 教育部重点实验室

2010 年 10 月

原 书 序

与许多工程师和发明者一样,我深信传统领域之间的边缘学科为发明创造提供了独有且令人振奋的机会。当我们考虑由许多不同领域的技术集成为复杂系统时,情况尤其如此。由于不同领域之间的边缘学科需要两个或多个领域的专家,因此人们对这种边缘学科的了解更少。

根据这种观察,我认为进行交叉学科的研究是困难的,它不仅需要愿意投入精力去掌握不同领域知识甚至有时是特别专业知识的专门人才,又需要在交叉的边缘学科能够自由交流的团队。这正是本书要讨论的问题。本书之目的是鼓励并促进光学微系统交叉研究。光学微系统含义是:用微制造技术即集成电路(IC)和微机电系统(MEMS)技术创作光学。

现代光学系统的创新与设计,需要不同领域的知识以及专业应用知识。例如光互连、光纤通信网络、数字投影仪、光学和显微成像系统。这些系统的设计依赖于光学与电学以及力学的无缝集成。最好的解决方案是,对所有这些领域优化来满足应用需求。对微光学而言,这些交叉的需求更苛刻,这些系统必须面向 IC 和 MEMS 制造环境进行优化。优化中的大部分工作就是减小光学系统的尺寸以便实际且经济地用 IC 和 MEMS 技术制造。

本书为学生、教师和研发工程师提供他们分析和设计微光器件及系统所需的基本知识和工具。设计是最终的“反”问题,所以,本书的重点放在解析模型上,而这些模型可转换为设计方程。为使交叉研究成为可能,我假定读者有关光学、MEMS 或制备技术方面的综合知识较少。本书第一部分是光学基础知识,其程度相当于大学一年级物理课程的水平。本书自成体系,第一部分的概念将是理解第二部分和第三部分内容所必需的背景知识。

本书的写作得到了很多人的帮助,如果没有 Stanford University、UC Berkeley、UC Davis、University of Oslo 以及 Oslo 的 SINTEF 这些单位的合作者,本书是不可能完成的。他们深邃的洞察力和启发性的讨论是令人

鼓舞的源泉。我非常感激能够在他们创造的环境中工作。从我的同事那里学习了很多,而我的学生也教了我很多。与这样一种人才队伍一起工作是一种荣誉。我感谢他们投入的时间、精力和贡献。也特别感谢他们对本书的评阅,这使本书在许多方面变得更好。

作为教师,我相信好教练的能力。我非常幸运师从最好的老师,我在 UC Berkeley 做博士后的几年里,我与 Kam Lau 教授和 Richard Muller 教授一起工作,这两个一流的专家为我打开了半导体激光器和 MEMS 领域之门。除他们技术建议之外,还归功于他们创造的启发性环境,并鼓励我按照自己的想法进行。我诚挚的感谢我的博士指导教师 David Bloom 教授。他教育我:改进现有的问题总是可能的,疯狂的想法是可以开发的,最好的解决方案经常出现在似乎不可能的地方。

Olav Solgaard

Stanford University

目 录

1 光学微系统导论	1
1.1 光学的小型化	1
1.2 小型化光学的设计	2
1.3 本书构成	3
参考文献	5
2 电磁场和能量	7
2.1 场和能量简介	7
2.2 从麦克斯韦方程组到波动方程	7
2.3 平面波	10
2.3.1 相速	11
2.3.2 群速	12
2.4 相量表示法	13
2.4.1 迈克耳孙干涉仪-相量表示法	14
2.5 坡印亭定理	16
2.6 分离源的光场组合	18
2.7 基于能量守恒的分析实例	20
2.7.1 “准直光束”	20
2.7.2 输入端光束的合成	21
2.7.3 双输入端口和双输出端口的光学器件——一般情况	21
2.7.4 电介质界面	22
2.7.5 Y-耦合器	23
2.7.6 扇形张开损耗	23
2.7.7 实际的光束组合器	24
2.7.8 波分多路复用	24
2.8 场和波总结	25
延伸阅读物	27
习题	27
3 界面处的平面波	29
3.1 平面波的简介	29

3.2	界面处的平面波——菲涅耳反射	29
3.2.1	反射和折射定律(几何光学)	29
3.2.2	菲涅耳方程	31
3.2.3	菲涅耳公式的数值计算	33
3.2.4	反射率和透射率	35
3.2.5	布鲁斯特(Brewster)角	35
3.3	全内反射(TIR)的波动描述	36
3.3.1	消逝场	37
3.3.2	古斯-汉欣(Goos-Hänchen)位移	38
3.3.3	基于全内反射的光学器件	39
3.4	多层界面	39
3.5	层状结构的应用	42
3.5.1	抗反射膜	42
3.5.2	布拉格反射器	43
3.5.3	光子隧穿	44
3.5.4	表面等离子激元	45
3.6	平面波总结	47
	延伸读物	48
	习题	48
	参考文献	51
4	衍射光束和高斯光束	52
4.1	衍射光束和高斯光束简介	52
4.2	傍轴波动方程	52
4.2.1	高斯光束的基本性质	53
4.2.2	束腰	54
4.2.3	高阶高斯模式	56
4.3	透镜中的高斯光束变换	58
4.3.1	高斯光束的聚焦与准直	59
4.4	透镜分辨率	61
4.4.1	高折射率媒质中的聚焦	63
4.5	高斯光束的投影	65
4.6	高斯光束“成像”	66
4.6.1	高斯光束“成像”的图形描述	67
4.7	截断高斯光束	68
4.7.1	截断高斯光束引起的能量损失	68

4.7.2 截断高斯光束的远场——夫琅禾费衍射	71
4.8 高斯光束总结	74
延伸读物	76
习题	76
参考文献	79
5 光纤和波导	80
5.1 光纤和波导简介	80
5.2 波导的几何光学描述	80
5.3 三层平板波导	81
5.3.1 本征值方程的数值解	83
5.3.2 TM 模的解	83
5.3.3 解的本质	84
5.3.4 模式数	85
5.3.5 模式携带能量	86
5.3.6 模式特性	87
5.3.7 归一化传播常数	87
5.4 光纤	89
5.4.1 阶跃光纤的模式	89
5.4.2 线偏振模	90
5.4.3 圆柱形波导的基模	93
5.4.4 功率限制	94
5.5 色散	94
5.5.1 材料色散	95
5.5.2 波导色散	99
5.5.3 模式色散	100
5.5.4 总色散——材料色散、模式色散和波导色散共同存在	101
5.6 光纤的脉冲展宽	102
5.6.1 脉冲展宽	104
5.6.2 频率啁啾	105
5.6.3 色散补偿	106
5.6.4 归一化传播参数表示色散	107
5.6.5 归一化参数表示单模色散	109
5.6.6 单模光纤设计	110
5.7 光纤计算实例	110
5.8 光纤和波导总结	111

延伸读物	115
习题	115
参考文献	120
6 光纤和波导器件	121
6.1 光纤和波导器件简介	121
6.2 与光纤和波导的耦合	121
6.2.1 单模光纤的连接损耗	123
6.2.2 耦合系数	124
6.2.3 激光与单模光纤的耦合	126
6.2.4 用刀口检验法测量激光的模半径	127
6.2.5 空间非相干光源与多模光纤的耦合	128
6.2.6 空间相干光源与多模光纤的耦合	129
6.2.7 空间非相干光源与单模光纤的耦合	129
6.2.8 棱镜耦合	129
6.2.9 光栅耦合	130
6.3 耦合光波模式	131
6.4 定向耦合器	134
6.4.1 定向耦合器的耦合模态	135
6.4.2 耦合系统的本征模	140
6.4.3 基于本征模对定向耦合器的概念描述	142
6.5 基于定向耦合器的光学器件	143
6.5.1 基于定向耦合器的调制器与开关	143
6.5.2 基于定向耦合器的功率合成器与滤波器	145
6.6 周期性波导——布拉格滤波器	146
6.6.1 相向传播光波中的能量守恒	148
6.6.2 布拉格光栅的模式	148
6.6.3 一维光子带隙	149
6.6.4 布拉格滤波器	150
6.7 波导调制器	151
6.7.1 Mach-Zender 调制器	151
6.7.2 光调制器质量因数	153
6.7.3 相位调制	154
6.7.4 声光调制器	155
6.7.5 改进的 Mach-Zender 调制器	156
6.7.6 定向耦合开关	156