




半导体科学与技术丛书



光纤光学前沿

祝宁华 闫连山 刘建国 主编



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

光纤光学前沿

祝宁华 闫连山 刘建国 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是由四十余位知名青年学者撰写而成的。全书共分16章,重点介绍光纤光学技术的最新进展,其中包括微纳光纤、光纤光源、光纤传感及其应用、光纤信息处理、光纤通信系统与接入网、光纤微波光子技术、光纤保密通信技术等方面的新技术和新应用,并对相关技术进行了较为全面的分析和比较。本书着重突出前沿性,书中很多内容是作者近年来所发展的新概念和新技术,例如波长编码技术、光跳频编码保密通信技术等,部分内容属于首次公开发表。

本书适合从事光纤通信、传感、微波光电子学教学与研究的科技工作者、工程技术人员、研究生和高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤光学前沿/祝宁华,闫连山,刘建国主编;—北京:科学出版社,2011
(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-032470-2

I. ①光… II. ①祝… ②闫… ③刘… III. ①纤维光学 IV. ①TN25
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第201545号

责任编辑:钱俊/责任校对:林青梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年10月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年10月第一次印刷 印张:38 1/4

印数:1—2 000 字数:736 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有蚪

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业作出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能作为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

序

1966年高锟先生预言低损耗光纤将被用于通信,并进行了深入的理论与实验研究;1970年康宁公司研制成功传输损耗低于 $20\text{dB}/\text{km}$ 的光纤。此后,光纤光学和光纤通信获得了飞速的发展,光纤结构和控制技术不断推陈出新,引发不同功能的各种光纤相继问世,如单模光纤、色散补偿光纤、保偏光纤、高非线性光纤、稀土掺杂光纤、双包层光纤等,近些年甚至出现了光子晶体光纤和微纳光纤。光纤的不断发展为通信和传感等信息科学的发展提供了广阔的平台,推动了信息产业的蓬勃发展。现在的光纤光学与信息科学、生命科学、医学、环境科学等多门学科有机融合,已经渗透到了人类活动包括生产和生活等各个领域。

近几年,在信息化需求的猛烈推动下,越来越多的人关注并投入到光纤光学及其应用的研究之中,各种各样新型光纤不断涌现,在高速通信和多维传感等领域产生了一批批重要的成果。但是绝大多数科研工作者都仅对自己所研究的方向比较熟悉,而对于其他的近邻和交叉的领域缺乏更深层次的了解。祝宁华博士和各位合著者在各自多年科研经验和成果积累的基础上,对现有光纤光学的前沿科学与技术的诸多方面进行了系统的概述,整理成《光纤光学前沿》一书,“雪中送炭”地迎合了光纤光学蓬勃发展的迫切需求。

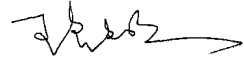
“光纤光学”方面的书籍很多,为了避免重复,作者们力求概述光纤及其应用领域最新的前沿成果,该书近四十位作者分别来自高校、科研院所和知名公司,都是奋斗在科研第一线的青年学子,大部分作者具有海外博士学位或在国外工作的经历。该书的内容也包括了作者们自己的最新研究成果,某些章节的内容是首次以书的形式系统阐述或首次公开发表。

该书的内容涵盖了光纤光学及其在通信、传感等领域的前沿应用。首先介绍了光纤光学的基本概念,然后再介绍光纤技术的前沿应用,同时加入了与相关技术的比较。作者力图通过对该书的介绍,让读者了解最新技术的发展过程、建立的背景和核心的思想,希望对读者有所启迪和借鉴。该书的撰写构思和写作内容与国内外出版的同类书籍有明显的区别,并对相关技术的未来发展趋势进行一定的评估与探讨,提出有待解决的关键科学与技术问题,有待与读者共同思考解决。

就本人所知,国内近几年尚没有深刻探讨光纤光学前沿的相关专著,该书对从

事与光纤相关的研究的科技人员无疑是一本有重要价值的参考读物。为此，我乐意
为该书作序，并真诚希望该书的出版能对光纤光学及相关光电子领域的学科与产业
发展起到积极的促进与推动作用。

中国科学院院士



2010年11月16日

前 言

作者和本书的几位主要合作者长期从事导波光学、半导体光电子学和光通信技术的研究,在工作中日益感到光纤光学相关技术的重要性. 光纤光学使得许多传统光学实验系统从光学平台上“搬下来”,变得越来越像可“直接插拔”的电子学系统. 而光纤控制技术(包括预制棒制备和拉丝技术)的快速发展,促使稀土掺杂光纤和光子晶体光纤等特种光纤的研究步入普通的实验室,推动了光纤光学器件的高速发展,产生了一批又一批重要的研究成果. 各种各样的有源和无源光纤光学器件的相继出现,使得“光电子”越来越接近“微电子”. 此外,晶体和半导体导波光学的迅速发展,极大地丰富了光纤耦合的有源和无源光电子器件. 到目前为止,对应所有微电子学的功能器件,几乎都有类似功能的光电子学器件. 例如,耦合、滤波、隔离、环行、调制、检波、延时、干涉、变频、混频、放大和信号产生等功能器件.

2009年诺贝尔物理学奖颁给了划时代技术的发明人——“光纤之父”高锟先生. 光纤不仅为日益膨胀的通信容量提供了“管道”,而且成为多种多样光电子功能器件和应用系统生长的“基石”,为光学这门古老的学科注入了新的活力. 光纤光学已经成为备受关注的研究领域. 与传统光学相比,光纤光学技术具有明显的优势:

- (1) 基于光纤光学器件的光学系统体积显著缩小,稳定性大大提高;
- (2) 光纤光学器件与作为传输介质的光纤具有天生的模场匹配,避免了耦合损耗大和菲涅耳反射引起的模式转换和系统不稳定性等问题,而且器件相互级联方便快捷,可以缩短实验周期和提高器件使用效率;
- (3) 光纤的低损耗特性使得光纤光学器件可能具有很长的作用区,非常微弱的非线性效应能够得到充分的放大,出现许多新功能器件和新原理系统方案. 例如,基于拉曼散射或布里渊散射效应的光放大器、激光器和分布式传感技术.

由于光纤光学器件本身的其他特性,如频率高、波长短、对偏振和色散等多参数敏感,这些使得光纤光学技术在其发展过程中获得了极为广泛的应用. 其中光纤传感和光信息处理一直是除了光通信以外最为重要的应用领域. 在本书中,我们用4章的篇幅对这两方面内容进行简要的介绍.

光纤光学技术向微电子技术的拓展实现了不同于传统观念上的功能器件. 另外,光学加工技术向光纤光学的延伸也导致了許多全新工艺和新器件的出现. 典型的例子是光子晶体光纤、光纤光栅和光纤微腔器件,进而也带来了新的系统方案和应用.

光纤光学技术的迅速发展引来越来越多的科技工作者的关注和投入,但在日常研究工作和在与同行学术交流中,一方面,我们发现大家都对某些专门技术进行了深入的研究,有许多经验和技能值得共享;而另一方面,大家对于相互之间的新技术和研究缺乏更进一步的了解.许多学者也表达了迫切需要了解相关技术原理、技术关键和发展动向的愿望.但是要找到这些概念或方法较为全面深刻的描述,并不是一件容易的事情.这就使得我们产生了共同编写这本书的念头,希望通过各位作者结合自己的研究工作经验和成果,系统而全面地整理介绍相关技术,让读者在阅读本书后,能够很快了解这些实用技术的建立背景,掌握其应用条件和使用技巧,以及解决可能出现的问题.

最初我们希望本书有一定的系统性,能够比较全面地阐述光纤光学的各个方面,但是我们很快发现这并不太现实.首先,已经出版的关于光纤光学的书籍很多,面面俱到必然导致重复,浪费读者时间;其次,光纤光学涉及面广,要写的内容太多,过于全面难免对许多问题的探讨不够深入,也不符合写这本书的初衷.因此,我们锁定光纤光学前沿技术,着重介绍近年来比较热门和重要的光纤光学器件和系统技术.

随着材料生长工艺和微纳加工技术的日益完善,新的光纤光学技术仍在不断涌现.限于作者涉及的领域和本书的篇幅,不能一一涉及,我们重点介绍光纤光学技术的最新进展,其中包括微纳光纤、光纤光源、光纤传感及其应用、光纤信息处理、光纤通信系统与接入网、光纤微波光子技术和光纤保密通信技术等方面的新技术和新应用,并对相关技术进行了较为全面的分析比较.书中很多内容是作者近年来所发展的新概念和新技术,如波长编码技术、光跳频保密通信技术等.部分内容还没有在刊物和媒体上公开发表.为了适应光纤光学技术的快速发展,满足读者需求,我们下决心在较短时间内完成这本书,而将本书未能讨论的技术留给读者和我们今后一起去探索和总结,这就出现了读者眼前的这本书.

我们都感到在本书编写过程中,通过交流和讨论学到了许多新的东西,理清了思路,对相互间的研究工作和技术发展有了比较全面的了解,从中受益匪浅.我们衷心希望能够通过本书的出版,将这种感受和知识传递给读者.在书稿即将完成之际,我们想起了许多老师、同行和学生.毫无疑问,没有所有作者的共同努力,没有所有同行和助手的大力支持,我们不可能在短短半年时间内完成本书的编写工作,借此机会对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢,同时还要感谢国家自然科学基金委员会、科技部“863”计划、“973”计划、国际合作计划、教育部等多年来对作者和相关学者研究工作的支持.

本书的出版离不开《半导体科学与技术丛书》主编夏建白院士的鼓励和支持,同时还要感谢中国科学院科学出版基金对本书出版的资助.

由于书中许多内容仍然处在探索之中,遗漏和不妥之处在所难免,希望读者将

意见反馈回来,以便在本书再版时补充和修改.为方便联系,特留下 Email: nhzhu@semi.ac.cn.

祝宁华代表全体作者
2010年11月10日于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤光学学科的重要性与持续性	1
1.2 光纤光学主要研究方向	2
1.3 本书主要内容	2
1.4 本书主要特点	3
1.4.1 简要直观, 突出重点	3
1.4.2 系统深入, 强调前沿	3
1.4.3 开拓思路, 展望未来	3
第 2 章 光纤波导概论	5
2.1 光纤类型与特性	5
2.1.1 光纤的几何尺寸与分类	6
2.1.2 归一化频率	7
2.1.3 光纤损耗	7
2.1.4 光纤色散	8
2.1.5 偏振模色散	11
2.2 常用特种光纤	15
2.2.1 保偏光纤	15
2.2.2 色散补偿光纤	19
2.2.3 稀土掺杂有源光纤	22
2.2.4 光敏光纤	27
2.2.5 塑料光纤	31
2.3 光纤中的非线性效应	33
2.3.1 光纤中的非线性效应基本概念	33
2.3.2 光纤中的几种常见的非线性效应	35
2.3.3 小结	38

参考文献	39
第 3 章 光纤光栅与光纤耦合技术	42
3.1 光纤布拉格光栅	42
3.1.1 光纤光栅结构及应用	42
3.1.2 光纤布拉格光栅的光敏性	45
3.1.3 光纤光栅的写入方法	46
3.1.4 光纤光栅耦合模理论和传输矩阵	47
3.2 常用光纤布拉格光栅器件	53
3.2.1 均匀光纤布拉格光栅	53
3.2.2 啁啾光纤布拉格光栅	53
3.2.3 相移光纤布拉格光栅	54
3.2.4 取样光纤布拉格光栅	54
3.2.5 切趾光纤光栅	55
3.2.6 闪耀光纤光栅	56
3.2.7 声光光纤光栅	56
3.3 多信道光纤布拉格光栅器件	56
3.3.1 纯相位取样光纤布拉格光栅	56
3.3.2 取样大啁啾光纤光栅 (LCSNG)	58
3.3.3 多信道光纤布拉格光栅在波分复用系统中的应用	61
3.3.4 等效啁啾	63
3.3.5 等效相移	67
3.3.6 重构 - 等效啁啾技术及应用	69
3.4 长周期光纤光栅	72
3.5 光纤耦合技术	76
3.5.1 光纤耦合的模场理论	77
3.5.2 光纤与半导体激光器的耦合	79
3.5.3 光纤与半导体激光器一维阵列的耦合	81
3.5.4 光纤与半导体激光器二维阵列的耦合	83
参考文献	85
第 4 章 光子晶体光纤	95
4.1 光子晶体光纤发展沿革	95
4.1.1 光子晶体光纤的导模机制及类型	97

4.1.2	光子晶体光纤的数值分析方法	102
4.1.3	光子晶体光纤的制造	104
4.2	光子晶体光纤的传输特性	107
4.2.1	损耗特性	107
4.2.2	色散特性	110
4.2.3	双折射	113
4.2.4	非线性	115
4.2.5	无截止波长单模传输	119
4.3	光子晶体光纤光栅	121
4.3.1	光子晶体光纤光栅概述	121
4.3.2	光子晶体光栅的应用实例	123
4.4	光子晶体光纤在能量传输中的应用	124
	参考文献	128
第 5 章	微纳光纤	140
5.1	微纳光纤制备	140
5.2	微纳光纤特性	142
5.2.1	损耗特性	142
5.2.2	模场分布特性	143
5.2.3	色散特性	144
5.2.4	其他相关特性研究	144
5.3	微纳光纤谐振腔与激光器	145
5.3.1	微纳光纤谐振腔	145
5.3.2	微纳光纤结型激光器	149
5.4	微纳光纤在冷原子、量子光学等领域中的应用	150
5.4.1	基于微纳光纤的冷原子的捕获和传导	150
5.4.2	微纳光纤在量子光学中的应用	151
	参考文献	153
第 6 章	光纤光源	158
6.1	光纤放大器	158
6.1.1	放大器的种类	158
6.1.2	光纤放大器前沿进展	159
6.2	大功率光纤激光器	163

6.2.1	大功率光纤激光器的应用	163
6.2.2	大功率光纤激光器的发展历程与研究现状	164
6.2.3	光纤激光器的性能参数	166
6.2.4	大功率光纤激光器基本原理与关键技术	167
6.2.5	影响功率的关键因素	177
6.2.6	总结与展望	178
6.3	超短脉冲光纤激光器	178
6.3.1	孤子的由来和分类	180
6.3.2	孤子光纤激光器	182
6.3.3	展宽脉冲光纤激光器	184
6.3.4	自相似光纤激光器	184
6.3.5	全正色散光纤激光器	186
6.3.6	超短脉冲光纤激光器内其他孤子现象	189
6.3.7	基于新型饱和吸收体的超短脉冲光纤激光器	194
6.4	窄线宽光纤激光器	195
6.4.1	窄线宽光纤激光器的发展现状	195
6.4.2	DFB 光纤激光器的原理	196
6.4.3	高频调制大功率窄线宽 DFB 光纤激光器	197
6.5	基于非线性效应的激光器和振荡器	200
6.5.1	光纤拉曼激光器	200
6.5.2	光纤布里渊激光器	202
6.5.3	光纤参量振荡器	203
6.6	光子晶体光纤在激光器中的应用	205
6.7	超连续谱的产生及应用	209
	参考文献	212
第 7 章	光纤布拉格光栅传感的复用与解调	224
7.1	光纤布拉格光栅传感机制	224
7.2	光纤布拉格光栅传感复用技术	225
7.2.1	FBG 的 WDM 技术	226
7.2.2	FBG 的 TDM 技术	226
7.2.3	FBG 的 SDM 技术	228
7.2.4	FBG 的 FDM 技术	228

7.2.5	FBG 的 WDM+TDM+SDM 技术	230
7.3	光纤布拉格光栅传感器的解调技术	230
7.3.1	滤波解调技术	231
7.3.2	成像光谱解调技术	239
7.3.3	基于光学色散补偿器件的解调制技术	242
7.3.4	基于 DBR 激光器的拍频解调技术	243
	参考文献	244
第 8 章	分布式光纤传感技术	249
8.1	光时域反射 (OTDR) 传感技术	250
8.1.1	OTDR 传感原理	250
8.1.2	OTDR 的分类	252
8.1.3	OTDR 的性能指标	255
8.2	分布布里渊传感技术	256
8.2.1	光纤布里渊分布式传感机理	256
8.2.2	光纤布里渊分布式传感分类	257
8.2.3	光纤布里渊分布式传感的性能指标	259
8.2.4	高空间分辨率布里渊光纤传感系统	260
8.2.5	超长距离布里渊分布式传感	263
8.3	拉曼分布式传感技术	265
8.4	波长编码时域反射技术	267
	参考文献	270
第 9 章	新型光纤传感机制与技术	275
9.1	光腔衰荡光谱传感	275
9.1.1	光腔衰荡光谱传感	275
9.1.2	法布里 - 珀罗 (F-P) 腔衰荡传感器	279
9.1.3	小结	280
9.2	光纤法布里 - 珀罗 (F-P) 传感器	280
9.3	光纤表面等离子体传感	284
9.4	光纤表面增强拉曼散射传感	286
9.5	光子晶体光纤在传感中的应用	288
9.5.1	基于 PCF 光栅的传感	288

9.5.2	干涉型 PCF 传感	289
9.5.3	PCF 液体/气体传感	291
9.5.4	PCF 表面增强拉曼散射传感	297
9.6	微纳光纤传感器	299
9.6.1	光强测量型微纳光纤传感器	300
9.6.2	光谱测量型微纳光纤传感器	301
	参考文献	302
第 10 章	光纤信息处理技术	315
10.1	相位敏感光放大	315
10.2	波长转换与全光再生	316
10.2.1	波长转换	317
10.2.2	全光信号再生	321
10.2.3	光学相位共轭	323
10.3	光开关与光逻辑	324
10.3.1	光开关	325
10.3.2	全光逻辑	327
10.4	光纤延迟线与缓存	327
10.5	慢光	330
10.5.1	慢光原理	330
10.5.2	慢光的物理实现方法	332
10.5.3	基于光纤非线性效应的可调慢光	333
10.5.4	波长转换与色散组合的延迟技术	339
10.5.5	慢光性能衡量指标	340
10.5.6	光纤慢光应用实例	341
10.5.7	今后研究方向	343
10.6	码型变换与组播	344
10.7	多维光信息处理	346
10.7.1	多波长全光再生	346
10.7.2	偏振复用系统中的全光再生	348
10.7.3	偏振复用系统中的全光波长转换	350
	参考文献	352

第 11 章 高速光纤通信前沿	365
11.1 高光谱效率调制方式	365
11.2 相干光检测	369
11.3 复用技术	373
11.3.1 偏振复用技术	373
11.3.2 光正交频分复用技术	374
参考文献	380
第 12 章 光纤通信中的光性能监测	386
12.1 基本光性能监测技术	387
12.2 光信噪比监测技术	389
12.2.1 带外光信噪比监测技术	389
12.2.2 带内光信噪比监测技术	390
12.3 色度色散监测技术	393
12.3.1 相移技术	394
12.3.2 射频功率技术	396
12.4 偏振模色散监测技术	399
12.4.1 射频功率技术	399
12.4.2 偏振度测量技术	402
12.5 多参数监测技术	403
12.5.1 非线性效应技术	403
12.5.2 异步采样技术	403
12.5.3 相干检测技术	404
12.6 结论	404
参考文献	405
第 13 章 波分复用无源光网络	412
13.1 无源光网络概述	412
13.2 WDM-PON 光源技术	413
13.2.1 长可调谐激光器	413
13.2.2 基于光谱分割技术的宽带光源	414
13.2.3 自注入式光源	415
13.2.4 载波分配技术 (carrier distributed)	416