



微米纳米技术丛书

MEMS与微系统系列

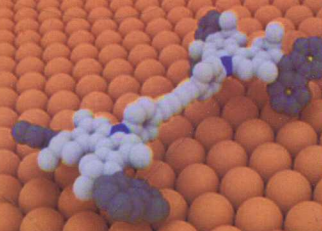
微纳光纤及其 在传感技术中的应用

Micro/Nanofiber and It's
Applications in Sensing Technology

■ 马成举 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列

微纳光纤及其在 传感技术中的应用

Micro/Nanofiber and It's Applications in
Sensing Technology

马成举 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书就微纳光纤的光学和力学特性、光波导理论及制备方法等进行总结和概述,并介绍微纳光纤在气体传感、角速度传感、生物传感、电流传感、加速度传感、温度传感等领域的应用。重点研究微纳光纤在慢光技术、气体传感技术、角速度传感技术中的应用。另外,研究基于分布式光纤布拉格光栅传感技术在光缆卷盘静态压力测量中的应用。

本书可供从事微纳光子器件研发及光纤传感技术研究的科研人员参考,也可作为大专院校相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微纳光纤及其在传感技术中的应用 / 马成著.

—北京:国防工业出版社, 2015. 11

(微米纳米技术丛书. MEMS 与微系统系列)

ISBN 978 - 7 - 118 - 10448 - 6

I. ①微… II. ①马… III. ①纳米材料—应用
—光纤传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 229399 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 插页 7 印张 12 字数 213 千字

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

邓中亮 丁桂甫 郝一龙 黄庆安

金玉丰 金仲和 康兴国 李佑斌

刘晓为 欧 黎 王晓浩 王跃林

温志渝 邢海鹰 杨拥军 张文栋

赵万生 朱 健

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术年会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和相关计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形

成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

前 言

随着纳米技术的发展,光学元件的微型化、集成化已成为光学元件发展的一个重要方向。此外,人们对新型材料和微纳尺度上光学效应进行了深入的研究,已经在微纳尺度上发现了非常有趣的光学现象,而微纳尺度的光波导是构建微纳光子器件的基石。目前,微纳尺度的光波导主要有硅基波导、光子晶体波导、表面等离子体波导、半导体纳米线波导和微纳光纤等。微纳光纤除具有一般光波导的功能外,还具有倏逝场强、柔韧性好、损耗低、制作简单、光耦合输入与输出方便等特点。微纳光纤具有的这些优良光学和力学特性,为研究和开发基于微纳光纤的微型化光学器件提供了很好的条件。特别是微纳光纤具有很强的倏逝场特性,可以应用于研发结构紧凑、灵敏度高、微型化、价格低廉的光学传感单元。

本书就微纳光纤的光学和力学特性、光波导理论、制备过程及其在传感领域的应用进行总结概述。第1章介绍微纳光纤的光波导基本理论;第2章介绍微纳光纤的制备方法,并对电流加热制备微纳光纤技术进行理论和实验研究;第3章理论和实验研究基于微纳光纤的慢光单元;第4章介绍基于微纳光纤的气体传感技术;第5章基于微纳光纤设计一种微型化的角速度传感单元;第6章介绍基于微纳光纤的生化传感器;第7章介绍微纳光纤在其他传感领域的应用;第8章以光纤布拉格光栅作为传感单元,理论和实验研究光缆卷盘静态压力分布。本书的大部分相关内容,是作者在中国科学院西安光学精密机械研究所攻读博士学位研究工作积累和沉淀。

在本书编写过程中,获得西安石油大学优秀学术著作出版基金、陕西省教育厅科研计划项目(项目编号:15JK1578)、西安石油大学博士科研启动基金项目资助。感谢我的导师任立勇研究员对我研究工作的指导和帮助。感谢西安石油大学理学院同事给予的关心和支持。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中的内容不妥之处难免,敬请各位同行和读者提出宝贵意见。

作 者

2015年9月

目 录

绪论	1
参考文献	3
第 1 章 微纳光纤的光波导特性	5
1.1 微纳光纤简介	5
1.2 微纳光纤的光波导特性	10
1.2.1 理想微纳光纤的光波导特性	10
1.2.2 微纳光纤的群速度和色散	14
1.2.3 锥形微纳光纤	16
1.3 小结	17
参考文献	18
第 2 章 微纳光纤的制备方法	22
2.1 微纳光纤制备方法简介	22
2.1.1 化学腐蚀的方法制备微纳光纤	22
2.1.2 块状材料熔融拉伸的方法制备微纳光纤	24
2.1.3 利用静电纺丝技术制备微纳光纤	25
2.2 加热拉锥的方法制备微纳光纤研究	27
2.2.1 加热拉锥制备微纳光纤方法简介	27
2.2.2 利用电流加热拉锥制备微纳光纤的研究	30
2.3 小结	36
参考文献	37
第 3 章 微光纤环谐振器慢光效应的研究	38
3.1 慢光技术基础	40
3.1.1 相速度、群速度和信号速度	40
3.1.2 慢光理论基础	42

3.2	微光纤环谐振器慢光效应理论研究	49
3.2.1	MCR 慢光效应理论模型的建立	49
3.2.2	MCR 谐振及慢光特性模拟分析	52
3.3	微光纤环谐振器慢光效应实验研究	56
3.3.1	MCR 慢光单元的缠绕制作	56
3.3.2	特氟龙柱子构成的 MCR 慢光单元慢光延时测量	65
3.3.3	MgF ₂ 柱子构成的 MCR 慢光单元慢光延时测量	68
3.4	小结	72
	参考文献	73
第4章	基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器	74
4.1	气体传感技术简介	74
4.1.1	各类气体传感器的优、缺点	74
4.1.2	光纤气体传感器	75
4.2	基于光纤倏逝场效应的气体传感器研究进展	76
4.2.1	倏逝场穿透深度	76
4.2.2	基于光纤倏逝场效应气体传感器研究进展	77
4.3	基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器	78
4.3.1	锥形微纳光纤气体传感器	78
4.3.2	表面镀膜的锥形微纳光纤气体传感器	80
4.3.3	微纳光纤锥气体传感器	81
4.3.4	微纳光纤光栅和石墨烯复合型气体传感器	84
4.3.5	基于锥形微纳光纤倏逝场效应的光声光谱气体传感器	86
4.4	基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器研究	87
4.4.1	传感器结构设计	87
4.4.2	传感器传感原理	88
4.4.3	传感器测试光路	88
4.5	小结	90
	参考文献	90
第5章	基于微光纤环谐振器的角速度传感技术	92
5.1	角速度传感技术简介	92

5.1.1	光纤陀螺的研究进展	92
5.1.2	光纤陀螺的基本工作原理	94
5.2	基于微光纤环谐振器的角速度传感技术探索	96
5.2.1	慢光陀螺研究进展	96
5.2.2	MCR 慢光角速度传感单元结构设计	98
5.2.3	MCR 慢光角速度传感单元角速度传感模型的建立	98
5.2.4	MCR 慢光角速度传感单元传感特性模拟分析	101
5.3	小结	106
	参考文献	106
第 6 章	微纳光纤在生物传感技术中的应用	110
6.1	光学生物传感技术简介	110
6.1.1	光学生物传感技术	110
6.1.2	光学生物传感器	111
6.2	基于微纳光纤倏逝场效应的生物传感器	113
6.2.1	基于微纳光纤线圈的生物传感器	114
6.2.2	基于微纳光纤布拉格光栅的生物传感器	116
6.2.3	微纳光纤表面固化金属纳米颗粒的生物传感器	117
6.2.4	微纳光纤和介质微粒构成的光学谐振微腔生物传感器	118
6.2.5	微纳光纤锥尖端镀铝膜的生物传感器	118
6.2.6	塑料微纳光纤表面涂覆石墨烯的生物传感器	119
6.3	小结	121
	参考文献	121
第 7 章	微纳光纤在其他传感技术领域的应用	124
7.1	微纳光纤在温度传感技术中的应用	124
7.1.1	温度传感技术简介	124
7.1.2	基于微纳光纤的温度传感技术	126
7.2	微纳光纤在电流传感技术中的应用	128
7.2.1	光纤电流传感技术简介	130
7.2.2	法拉第效应	132
7.2.3	基于微纳光纤的电流传感技术	133

7.3 微纳光纤在加速度传感技术中的应用	135
7.3.1 加速度传感技术简介	135
7.3.2 基于微纳光纤的加速度传感技术	137
7.4 小结	138
参考文献	138
第8章 基于光纤布拉格光栅的光缆卷盘静态压力研究	142
8.1 光纤光栅简介	142
8.1.1 光纤光栅的发展	142
8.1.2 光纤光栅的分类	143
8.1.3 光纤光栅的写入技术	145
8.1.4 光纤光栅信号解调方法	146
8.1.5 光纤布拉格光栅传感原理	149
8.2 微纳光纤光栅	155
8.2.1 微纳光纤光栅的制备方法	155
8.2.2 基于微纳光纤光栅传感技术	158
8.3 基于光纤布拉格光栅的光缆卷盘静态压力分布研究	160
8.3.1 光缆卷盘静态压力分布理论研究	161
8.3.2 光缆卷盘静态压力分布实验研究	170
8.4 小结	175
参考文献	176

绪 论

在过去的几十年中,光纤已经在通信、传感、生物、医学、航空、航天等领域得到了广泛应用^[1-7]。近年来,随着纳米技术的发展,光学元件的微型化、集成化成为光学元件发展的趋势之一。与电子元器件相比,光学元器件的微型化、集成化的研究起步较晚。从商业应用的角度来看,光学元器件的研究源于超大量数据传输的光纤通信行业。光纤网络的铺设实现了光通信技术,而在目前的光路中光子器件的尺寸比较大。如此一来,微型光子器件的设计和集成变为光学领域发展的重要研究课题,而且微电子学技术领域也有发展微纳尺度上光子学技术的内在要求。随着集成电子技术的发展,电子芯片单位面积上集成的器件越来越多,芯片间的通信速度成为集成电子技术的一大瓶颈,研究者们开始考虑用电子元器件间微纳光波导光互连的办法解决这个问题^[8]。

在这样的研究背景下,微纳尺度上的光子器件及集成研究进入研究人员的视界。随着对新型材料和微纳尺度上光学效应的深入研究,研究人员在微纳尺度上发现了非常有趣的光学现象,并基于这些现象研究了具有各种功能的微纳光子器件。微纳光波导是这些光学现象和器件实现的最基本的单元,成为研究微纳光子学现象和构建光子学器件的基石。目前,得到广泛研究的微纳尺度的波导有硅基刻蚀波导^[9]、光子晶体波导^[10]、表面等离子体波导^[11]、半导体纳米线波导^[12]、激光直写微纳波导^[13]和微纳光纤^[14]等。

微纳光纤除实现光波导的功能外,还具有许多特性:微纳光纤对光场的约束比普通的单模光纤强,增强了光与物质的相互作用,从而在输入较低光功率时产生高阶非线性效应^[15];在微纳光纤中,光场有很大一部分能量分布在微纳光纤表层,可以利用微纳光纤表面的倏逝场与环境发生相互作用,研发结构紧凑、灵敏度高、微型化、价格低廉的光学传感器。

微纳光纤是对光在微纳米尺度上进行调控的优秀平台,也是连接微观光子学和宏观光学的一座理想桥梁^[16]。与其他类型的微米量级的光波导相比,微纳光纤具有独特的优点:①微纳光纤是采用低损耗的玻璃材料高温拉制而成,所以其表面粗糙度可以低至原子尺度,直径可以非常均匀,光传输损耗远低于其他方法制作的同等尺度的光波导。②利用高温拉制一般光纤或特种光纤而成的微纳光纤,两端锥区与普通光纤自然连接,不仅方便光波的耦合输入与输出,而且光耦合损耗非常



低。另外,与现有的通信系统兼容性好。③制作工艺简单,通过加热拉锥的方法可以方便地拉制出长度为几十甚至上百毫米的微纳光纤。④微纳光纤具有强的光场约束能力、大比例倏逝场传输和大的波导色散等。微纳光纤具有的力学和光学特性,使其在微纳光子器件、微纳米尺度的光学传感、非线性光学和量子光学等方面具有巨大的潜在应用价值,备受研究者们的关注^[17]。

微纳光纤的优点直到二十世纪八九十年代才被发现,并逐渐应用于光耦合、光传感和超连续谱产生等方面。但是,以前微纳光纤主要采用激光切削和化学汽相沉积等方法来制备,无法制备出损耗很低的微纳光纤。所以,微纳光纤的应用受到很大限制。2003年,Tong等人^[18]利用蓝宝石棒辅助的二步拉伸法可以获得直径50nm的超细径微纳光纤,长度可达数十毫米。并实验观测了光在微纳光纤中的低损耗传输,实验测得损耗只有0.1dB/mm。随后,他们又采用自调制拉伸法获得了直径20nm、均匀度达0.1%的微纳光纤^[19]。2004年,Leon-Saval等人^[20]也成功制备了氧化硅微纳光纤,实验测得其传输损耗达0.001dB/mm。2008年,Shi等人^[21]研究了低损耗微纳光纤在慢光元件方面的应用。2014年,Ma等人^[22]在理论和实验上研究了低损耗锥形微纳光纤的制备工艺,理论上给出了制备低损耗锥形微纳光纤的最佳外形轮廓参数,并在实验上成功制备出拉锥损耗只有0.005dB的低损耗锥形微纳光纤。这种具有极低损耗特性微纳光纤的成功制备和基于微纳光纤的各种微结构的提出,为研制微型化、集成化的光学元器件提供了创新思路。

传感器在人类世界中扮演者非常重要的角色。例如,人们的视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉无时无刻都在凭借着眼睛、鼻子、舌头、耳朵等器官,以及全身的皮肤获取和感知外界海量的信息。由于科学技术的不断进步,人类开发未知领域的热情更加高涨。宏观上我们要探索上千光年的茫茫宇宙,微观上要观察细小到飞米(10^{-15} m)尺寸的粒子世界。此外,我们在研究新能源、新材料时需要克服各种极端环境,如高/低温、高压/真空、强/弱磁场等。显然,仅仅靠人类的感官已经无法满足人们想要的信息。这时就需要能精确检测的传感器,可以说,传感器就是人们五官的延伸。

2009年,在奥巴马总统与美国工商业领袖的会议上,IBM首席执行官Sam Palmisano建议政府投资新一代的智慧型基础设施——物联网^[23]。当年,美国将物联网和新能源列为振兴经济的两大重点战略^[24]。我国对物联网的发展也给予了高度重视,正式列为我国五大新兴战略性产业之一,写入政府工作报告^[25]。物联网将智能感知与互联网、大数据、云计算相融合,是继计算机、互联网之后信息产业发展的第三次浪潮,也是继通信网之后的另一个万亿级市场^[26]。感知层处在物联网架构的最底层,包括重力、应力、速度、温度、湿度等数以万计的敏感检测元件。如果没有这些获取和感知信息的智能终端,物联网的铺设也就无从谈起。

光纤传感技术与其他传感技术相比具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、重量轻、带宽宽、易形成分布式网络传感一系列独特的优点,所以,在应用和研究领域涌现出一大批光纤传感器,用于实现折射率传感、生化传感、温度传感、湿度传感、电流传感、位移传感、应力应变传感、弯曲传感、表面粗糙度传感、加速度传感、旋转传感、电磁场等传感及测量。光纤传感器一般通过检测待传感量对光信号的功率、相位、偏振、波长等参量的调制,然后,接收并解调这些被调制的光信号,进而获得被检测量的信息。低损耗微纳光纤的成功制备为研发微型化、集成化、高灵敏度的光学传感器开辟了崭新的思路。

本书就微纳光纤的光学特性、制备及其在传感领域的应用进行了总结概述,重点介绍了微纳光纤的波导特性、制备方法及其在气体传感、角速度传感、生化传感等领域的应用。本书的结构安排如下:

第1章重点介绍微纳光纤,并介绍微纳光纤的光波导基本理论。

第2章介绍微纳光纤的制备方法,重点介绍加热拉锥制备微纳光纤的方法,并理论和实验研究利用电流加热的方法制备低损耗微纳光纤技术。

第3章介绍慢光技术,利用微纳光纤设计一种微型化的慢光单元,并进行理论和实验研究。

第4章介绍气体传感技术及基于微纳光纤的气体传感技术,并基于微纳光纤设计一种气体传感器,实现了微型化、高灵敏度的气体传感。

第5章介绍角速度传感技术,并基于微纳光纤设计一种高灵敏度、微型化的角速度传感单元。

第6章介绍生物传感技术,并介绍已报道的基于微纳光纤的生物传感器。

第7章介绍微纳光纤在其他传感领域的应用。

第8章介绍光纤布拉格光栅传感技术及基于微纳光纤布拉格光栅的传感技术,并以光纤布拉格光栅作为传感单元,理论和实验研究光缆卷盘静态压力分布。

参 考 文 献

- [1] Mynbaev D K, Scheiner L L. Fiber-optic communications technology [M]. New York: Prentice Hall, 2001.
- [2] Casimer DeCusatis. Handbook of Fiber Optic Data Communication [M]. Boston: Academic Press, 2008.
- [3] Cuishaw J D B. Optical Fiber Sensors: Principles and Components [M]. London: Artech House Publishers, 1988.
- [4] Eric U, William B, Spillman Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2011.



- [5] Abraham K. Lasers and Optical Fibers in Medicine [M]. Boston: Academic Press, 1993.
- [6] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. Boston: Academic Press, 2007.
- [7] Hecht J. City of Light: The Story of Fiber Optics [M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [8] Kirchain R, Kimerling L. A roadmap for nanophotonics [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 303 – 305.
- [9] Lee K K, Lim D R, and Kimerling L C, et al. Fabrication of ultralow – loss Si/SiO₂ waveguides by roughness reduction [J]. Optics Letters, 2001, 26(23): 1888 – 1890.
- [10] Lin S Y, Chow E, Hietala V V, Villeneuve P R, et al. Experimental demonstration of guiding and bending of electromagnetic waves in a photonic crystal [J]. New York: Science, 1998, 282(5387): 274 – 276.
- [11] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189 – 193.
- [12] Sirbuluy D J, Law M, Yan H, et al. Semiconductor nanowires for subwavelength photonics integration [J]. Journal of Physical Chemistry. B, 2005, 109(32): 15190 – 15213.
- [13] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1729 – 1731.
- [14] Yu S L, Meng C, Chen B G, et al. Graphene decorated microfiber for ultrafast optical modulation [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10764 – 10770.
- [15] Mngi E C, Fu L B, Nguyen H C, et al. Enhanced Kerr nonlinearity in sub – wavelength diameter As₂Se₃ chalcogenide fiber tapers [J]. Optics Express, 2007, 15(16): 10324 – 10329.
- [16] Tong L M, Zi F, Guo X, et al. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial [J]. Optics Communications, 2012, 285(23): 4641 – 4647.
- [17] Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review [J]. Journal of Optics, 2010, 12(4): 043001.
- [18] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength – diameter silica wires for low – loss optical wave guiding [J]. Nature, 2003, 426: 816 – 819.
- [19] Tong L M, Lou J, Ye Z, et al. Self – modulated taper drawing of silica nanowires [J]. Nanotechnology, 2005, 16(9): 1445.
- [20] Leon – Saval S, Birks T, Wadsworth W, et al. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides [J]. Optics Express, 2004, 12(13): 2864 – 2869.
- [21] Shi L, Chen X, Xing L, et al. Compact and tunable slow and fast light device based on two coupled dissimilar optical nanowires [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(23): 3714 – 3720.
- [22] Ma C J, Ren L Y, Xu Y P, et al. Design and fabrication of tapered microfiber waveguide with good optical and mechanical performance [J]. Journal of Modern Optics, 2014, 61(8): 683 – 687.
- [23] Chui M, Löffler M, Roberts R. The internet of things [J]. McKinsey Quarterly, 2010, 2: 1 – 9.
- [24] 张方风, 申贵成. 我国物联网发展思考 [J]. 计算机系统应用, 2011, 20(3): 247 – 251.
- [25] 程钰杰. 我国物联网产业发展研究 [D]. 安徽: 安徽大学, 2012.
- [26] Giusto D, Lera A, Morabito G, et al. The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications [M]. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer Science, 2010.
- [27] 梅方权. 智慧地球与感知中国——物联网的发展分析 [J]. 农业网络信息, 2009(12): 5 – 7.

第 1 章 微纳光纤的光波导特性

微纳光纤除具有一般光波导的光学特性以外,还具有表面粗糙度低、直径均匀、光传输损耗低、方便光波的耦合输入与输出、光耦合损耗低、与现有的通信系统兼容性好、制作工艺简单、具有强的光场约束能力、大比例倏逝场传输、波导色散可设计、柔韧性好、便于设计等特点。微纳光纤具有的力学和光学特性,使其在微纳光子器件、微纳米尺度的光学传感、非线性光学和量子光学等方面具有巨大的潜在应用价值,备受人们的关注^[1]。

1.1 微纳光纤简介

图 1-1(a) 为直径 150nm 的微纳光纤缠绕在直径 4 μ m 的光纤上的扫描电镜图片,图 1-1(b) 为直径 500nm 的微纳光纤打结后放在头发丝上的扫描电镜图片^[2]。

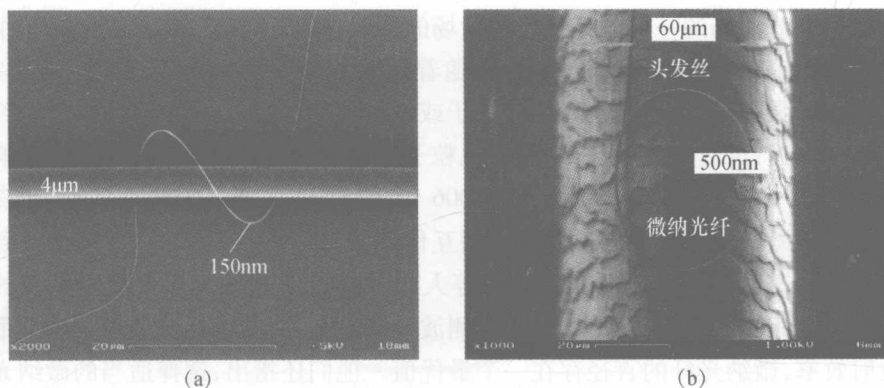


图 1-1 微纳光纤扫描电镜图片^[2]

(a) 直径 150nm 的微纳光纤缠绕在直径 4 μ m 光纤上的扫描电镜图片;

(b) 直径 500nm 的微纳光纤打结后放置在头发丝上的扫描电镜图片。

由于微纳光纤的直径接近或小于传输光的波长,光纤与环境包层(空气)之间具有很大的折射率差(约为 0.45),因此,相比普通单模光纤,微纳光纤具有以下特性:



1. 柔韧性好和机械强度高

微纳光纤柔韧性很好、机械强度较高。2003 年, Tong 等人^[3] 在实验中把直径 520nm 的微纳光纤弯曲成微环(微环直径小于 $15\mu\text{m}$), 发现微纳光纤没有发生塑性形变, 如图 1-2 所示。另外, 他们发现直径约 280nm 的微纳光纤的抗张强度高 5.5GPa。2006 年, Silva 等人^[4] 研究了不同直径微纳光纤的劲度, 发现微纳光纤直径达 280nm 时, 仍具有与块状硅材料近似一样的劲度。

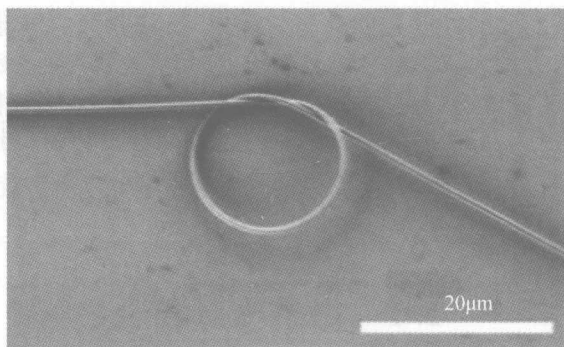


图 1-2 用直径 520nm 的微纳光纤制备的直径小于 $15\mu\text{m}$ 的微环扫描电镜图片^[3]

2. 倏逝场强

微纳光纤光场的一部分能量以倏逝场的形式在其表面进行传输, 所以, 微纳光纤在空气中有很强的倏逝场, 且倏逝场随着微纳光纤直径的减少而增强。可以利用微纳光纤强的倏逝场特性, 使其与原子或微粒相互作用, 从而实现对微纳光纤透射特性的调控; 反过来, 也可以利用微观粒子处于微纳光纤的倏逝场中时, 影响其透射光谱这一特性来构建传感器件。2006 年, Chremmos 等人^[5] 研究发现, 当直径较大的介质微粒与微纳光纤的倏逝场相互作用时, 在其透射光谱中可以观察到与偏振相关的透射尖峰。2007 年, Wang 等人^[6] 在理论上模拟分析了微纳光纤的倏逝场与微粒相互作用情况, 并指出当探测波长给定时, 对特定微粒如果要获得最大的散射效率, 微纳光纤的直径存在一个最优值。他们还指出, 选择适当的微纳光纤直径, 可以探测直径为 90nm 的微粒, 从而构建微粒传感器。除介质微粒外, 原子也可以散射微纳光纤传导的倏逝场光能量。Kien 等人^[7,8] 研究了铯原子对微纳光纤的散射特性, 发现除微纳光纤倏逝场与介质微粒或原子相互作用外, 当微纳光纤内部或表面形成周期性结构时, 也可对传输的光波形成显著的调制作用。2005 年, Liang 等人^[9] 在直径为 $6\mu\text{m}$ 的微纳光纤上形成布拉格光栅, 用来制作高灵敏度的折射率传感元件, 如图 1-3 所示。2006 年, Barrelet 等人^[10] 将纳米线置于光子