



信息科学技术学术著作丛书

微结构光纤 设计、制备及应用

姜淑琴 李曙光 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
信息科学技术学术著作丛书

微结构光纤设计、制备及应用

姜淑琴 李曙光 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在对微结构光纤基础知识及发展历程概括的基础上,基于作者多年的研究成果,详细介绍微结构光纤设计和制备的基础理论,以及实际微结构光纤特性的分析模型、制备手段及应用方法。其中包括大模场面积微结构光纤、双芯微结构光纤、侧漏微结构光纤、空芯微结构光纤、太赫兹微结构光纤,以及基于材料填充微结构光纤器件的设计、制备及应用。大量新型微结构光纤、器件及应用方面的进展和研究成果,穿插在各个章节中,内容深入、具体、细致、翔实。

本书可作为高等院校光电子、光学、光学工程、电子信息类专业、物理学及仪器科学与技术等专业本科生及相关学科研究生课程的教材,也可作为相关领域科研人员及工程技术人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微结构光纤设计、制备及应用/娄淑琴,李曙光著. —北京:科学出版社, 2019.6

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-061700-2

I. ①微… II. ①娄…②李… III. ①光导纤维-研究 IV. ①TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 121187 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:铭轩堂

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>

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 6 月第一次印刷 印张:19

字数:381 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的推动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术、数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业、低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性,体现出科学出版社“高层次、高水平、高质量”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

中国科学院计算技术研究所原所长



前 言

微结构光纤,也称光子晶体光纤或多孔光纤,以其独特的控制光传输的方式及宽广的结构创新空间,极大地突破了传统光纤的局限,为纤维光学带来一场深刻变革,为光纤技术及其应用领域的发展提供了新的途径,成为目前备受关注的研究方向。

自20世纪90年代首次被提出以来,微结构光纤便在国际上掀起引人注目的研究和发展热潮。经过二十多年的飞速发展,各种新型微结构光纤及器件不断涌现,制备材料已从最初的石英,拓展到软玻璃和聚合物材料,工作波段也从通信波段,向紫外、可见、中红外及太赫兹波段发展。其特有的微孔结构也为填充修饰及新型光子器件的开发提供了广阔的创新空间,为光纤通信、传感、计量、生物、天文、航空航天和国防军工等诸多应用领域关键问题的解决提供了新的机遇。微结构光纤设计、制备及应用研究已成为当前光纤技术的前沿。

本书是作者近年来在微结构光纤及器件方面研究成果的总结,并吸收和借鉴了国内外同行的一些有价值的研究成果。本书概括了微结构光纤的基础知识及发展历程,系统介绍微结构光纤的设计思想、制备理论与技术,重点介绍各种新型微结构光纤结构设计及关键参数的选取,并简要介绍微结构光纤的表征手段和应用领域,指出微结构光纤的发展方向。

全书9章。第1章微结构光纤基础,系统总结微结构光纤的基础知识、制备方法及发展历程。第2章微结构光纤设计与制备理论,重点介绍有限元和光束传播数值分析法,并对微结构光纤的制备理论进行系统的介绍。第3章实际微结构光纤特性快速分析模型及应用,针对实际微结构光纤特性及制备监控需求,将数字信号处理技术与数值分析方法相结合,构建评估模型,介绍其在实际微结构光纤制备中的应用。第4章大模场面积微结构光纤,介绍面向高功率小型化光纤激光器应用需求的几种新型抗弯曲的大模场面积微结构光纤设计与制备。第5章双芯微结构光纤及器件,介绍面向高速光通信及光传感应用需求的超宽带双芯微结构光纤、器件及应用。第6章侧漏微结构光纤及其应用,介绍面向光传感应用的侧漏微结构光纤,及其在高灵敏度扭转传感器、弯曲曲率传感器、多参量传感器及高性能光纤激光器的应用。第7章空芯微结构光纤,重点介绍空芯光子带隙光纤的损耗及色散特性。第8章太赫兹微结构光纤,介绍面向太赫兹波段的低损耗柔性太赫兹微结构光纤及其在太赫兹成像技术中的应用。第9章基于材料填充的微结构光纤及其器件,介绍基于金属、液晶、磁流体等填充的微结构光纤及其器件设计,涉及微

结构光纤传感器、滤波器和偏振分束器。

本书获得国家科学技术学术著作出版基金的资助。书中的大部分研究成果是在国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题和多项国家自然科学基金项目支持下取得的,是课题组多年来科研成果的结晶。娄淑琴教授和李曙光教授负责专著的策划及全书的组织撰写,王鑫博士、申艳副教授、陈海良副教授完成了部分章节的撰写。这里要感谢陈卫国博士、王立文博士、郭铁英博士、鹿文亮博士、王鑫博士、刘强博士、赵彤彤博士、严世博博士、张婉博士、唐子娟博士、王明庆博士等的辛勤工作。特别感谢王鑫博士为此书的出版所做的许多协调工作,感谢申艳副教授及陈海良副教授对全书的校对所做的工作。

由于作者水平有限,加之微结构光纤及应用尚处于探索阶段,有些结论还有待发展检验,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝批评指正。

作 者

2018 年 7 月 30 日

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 微结构光纤基础	1
1.1 微结构光纤的提出与发展	1
1.2 导光机理	3
1.2.1 全内反射导光	3
1.2.2 光子带隙导光	3
1.2.3 限制耦合导光	4
1.3 特性及应用	6
1.3.1 实芯微结构光纤	6
1.3.2 空芯微结构光纤	9
1.4 损耗机制	14
1.4.1 固有损耗	14
1.4.2 限制损耗	15
1.4.3 弯曲损耗	16
1.5 制备方法	18
1.5.1 超声波打孔法	18
1.5.2 管束堆积法	19
1.5.3 挤压法	20
1.5.4 铸造法	20
1.5.5 溶胶-凝胶法	21
1.5.6 卷烟法	22
参考文献	23
第 2 章 微结构光纤设计与制备理论	26
2.1 有限元法	26
2.1.1 基本原理	26
2.1.2 边界条件选取	29
2.2 光束传播法	33
2.2.1 全矢量波动方程	33
2.2.2 有限差分法	34

2.2.3 边界条件	35
2.2.4 光束传播法应用实例	36
2.3 毛细管的制备理论	38
2.3.1 数学模型	39
2.3.2 模型参数化	40
2.3.3 制备及结构参数的影响	43
2.3.4 实验验证	46
2.4 微结构光纤的制备理论	48
2.4.1 制备理论	49
2.4.2 参数初始化	51
2.4.3 工艺参数之间的协调控制	52
2.4.4 工艺参数对光纤结构的控制	54
参考文献	56
第3章 实际微结构光纤特性快速分析模型及应用	59
3.1 实际微结构光纤特性快速分析模型	59
3.1.1 分析模型	60
3.1.2 实际光纤结构重建	60
3.2 基于卡尔曼滤波的微结构光纤图像去噪和解模糊	64
3.2.1 基于卡尔曼滤波的微结构光纤图像解模糊方法	65
3.2.2 方法有效性验证	69
3.2.3 实际微结构光纤横截面图像的复原	71
3.3 基于小波变换和全变差的光纤图像去噪方法	72
3.3.1 基于小波变换和全变差的去噪理论模型	72
3.3.2 去噪实验	74
3.4 基于 NSCT 和压缩感知的光纤特性评估	76
3.4.1 评估步骤	76
3.4.2 压缩感知	76
3.4.3 NSCT	78
3.4.4 基于 NSCT 和压缩感知的图像重建	80
3.5 实际光纤特性分析	83
3.5.1 大模场面积微结构光纤特性分析	83
3.5.2 保偏微结构光纤特性分析	84
3.6 分析模型在光纤制备过程中的应用	85
参考文献	89
第4章 大模场面积微结构光纤	91

4.1 大模场面积光纤的发展简介	91
4.1.1 大模场面积阶跃光纤存在的问题	91
4.1.2 大模场面积微结构光纤的研究进展	93
4.1.3 大模场面积微结构光纤面临的挑战	95
4.2 矩形晶格大模场面积微结构光纤	97
4.2.1 结构设计	97
4.2.2 弯曲特性	100
4.2.3 制作测试	103
4.3 三角芯大模场面积微结构光纤	106
4.3.1 结构设计	106
4.3.2 弯曲特性	107
4.3.3 改进型结构设计	110
4.4 multi-trench 大模场面积微结构光纤	113
4.4.1 multi-trench 光纤结构	113
4.4.2 新型 multi-trench 芯结构	115
4.4.3 弯曲特性	117
参考文献	122
第5章 双芯微结构光纤及器件	125
5.1 双芯光纤的模式耦合理论	125
5.1.1 耦合模方程	126
5.1.2 耦合模方程的解	128
5.1.3 耦合系数	129
5.1.4 耦合特性	130
5.1.5 正规模式	132
5.2 普通双芯微结构光纤	134
5.2.1 光纤结构及模式特性	134
5.2.2 模式耦合的偏振依赖性和波长依赖性	136
5.2.3 基于双芯光纤的定向耦合器	137
5.3 超宽带偏振不敏感的双芯微结构光纤耦合器	138
5.3.1 双芯微结构光纤中宽带偏振不敏感特性实现机理	139
5.3.2 宽带偏振不敏感双芯微结构光纤及耦合器的实现方案	143
5.3.3 改进型宽带偏振不敏感双芯微结构光纤及耦合器	148
5.4 超宽带双芯微结构光纤偏振分束器	153
5.4.1 超宽带双芯光纤的偏振分束器原理	154
5.4.2 超宽带双芯微结构光纤偏振分束器设计	155

5.4.3 改进型超宽带双芯微结构光纤偏振分束器	160
5.5 双芯微结构光纤及其在多参量传感器中的应用	166
5.5.1 双芯微结构光纤的设计及制作	166
5.5.2 实际光纤的特性分析	167
5.5.3 基于双芯微结构光纤的多参量传感器	169
参考文献	177
第6章 侧漏微结构光纤及其应用	179
6.1 侧漏微结构光纤的设计与制作	179
6.1.1 光纤结构与特性参数	179
6.1.2 光纤制作及特性分析	181
6.1.3 光纤特性的测试	183
6.2 基于侧漏微结构光纤的光纤扭转传感器	185
6.2.1 扭转传感器的结构及工作原理	186
6.2.2 扭转传感测量	187
6.3 基于侧漏微结构光纤的弯曲曲率光纤传感器	189
6.3.1 弯曲曲率传感器结构及测量原理	190
6.3.2 弯曲曲率测量	191
6.4 基于侧漏微结构光纤的多参量光纤传感器	194
6.4.1 多参量光纤传感器的结构及工作原理	194
6.4.2 多参量传感	195
6.5 基于侧漏微结构光纤的可开关多波长光纤激光器	198
6.5.1 基于侧漏微结构光纤的 Mach-Zehnder 干涉型滤波器	198
6.5.2 基于侧漏微结构光纤的可开关多波长光纤激光器	199
参考文献	204
第7章 空芯微结构光纤	206
7.1 空芯微结构光纤简介	206
7.1.1 空芯光子带隙光纤	206
7.1.2 空芯布拉格光纤	208
7.1.3 空芯反谐振式微结构光纤	209
7.2 空芯光子带隙光纤的损耗特性	210
7.2.1 损耗来源	210
7.2.2 表面散射损耗	211
7.2.3 包层结构参数的影响	212
7.2.4 纤芯结构参数的影响	215
7.3 空芯光子带隙光纤的色散特性	217

7.3.1 色散特性	218
7.3.2 色散测量方法	219
7.3.3 干涉法色散测量系统	221
7.3.4 基模色散测量	224
7.3.5 高阶模色散测量	226
参考文献	227
第8章 太赫兹微结构光纤	229
8.1 微结构太赫兹波导的发展	229
8.1.1 金属结构太赫兹波导	229
8.1.2 实芯太赫兹微结构光纤	230
8.1.3 空芯太赫兹微结构光纤	232
8.2 太赫兹常用聚合物材料特性	234
8.2.1 实验测量系统	235
8.2.2 测量原理及测试结果	235
8.3 管状包层太赫兹微结构光纤	237
8.3.1 基本结构与特性	237
8.3.2 结构参数对光纤性能的影响	240
8.3.3 低损耗柔性太赫兹光纤设计与性能分析	242
8.4 空芯高双折射太赫兹光纤	249
8.5 太赫兹微结构光纤在成像系统中的应用	251
8.5.1 反射式 THz-TDS 系统	251
8.5.2 伪色彩区间定义	253
8.5.3 移动成像实验及结果	253
8.5.4 伪色彩成像系统分辨率	255
参考文献	256
第9章 基于材料填充的微结构光纤及其器件	258
9.1 修饰材料及其光学特性	258
9.1.1 向列相液晶	259
9.1.2 磁流体	260
9.1.3 金属材料	260
9.2 微结构光纤的材料填充方法	262
9.2.1 完全填充法	263
9.2.2 部分选择填充法	263
9.2.3 完全选择填充法	265
9.2.4 镀膜法	267

9.3 液体材料填充微结构光纤光子器件	268
9.3.1 基于模式耦合理论的温度传感器	268
9.3.2 基于 Sagnac 干涉理论的温度传感器	270
9.3.3 基于液晶填充的偏振分束器	272
9.3.4 基于磁流体填充的磁场传感器	274
9.4 金属材料填充微结构光纤光子器件	276
9.4.1 基于金薄膜涂覆的窄带偏振滤波器	276
9.4.2 基于金薄膜涂覆的超宽带偏振滤波器	278
9.4.3 基于金薄膜涂覆的折射率传感器	280
9.4.4 基于铝金属丝填充的偏振滤波器	282
参考文献	285
索引	287

第 1 章 微结构光纤基础

微结构光纤,也称光子晶体光纤或多孔光纤,以其独特的控制和传输光的方式突破了传统光纤的局限,带来纤维光学及其应用领域的一场变革,为光纤技术及其应用领域发展提供了新的发展契机。自 20 世纪 90 年代提出以来,微结构光纤便从通信领域,逐渐渗透到计量学、光谱学、天文学、微机械、生物和传感等诸多领域,为通信、传感、航空航天和国防军工等领域关键问题的突破提供了新的机遇。本章在回顾微结构光纤发展历程的基础上,对微结构光纤的基本概念及特性与应用进行简要介绍。

1.1 微结构光纤的提出与发展

20 世纪 80 年代末期,人们开始探索具有光波长量级,甚至小于微米量级的新型光学介质,即光子晶体。光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列形成的规则人工光学材料。这种材料因为具有光子带隙而能够阻断特定频率的光子,从而影响光子的运动,这种影响类似于半导体晶体对电子行为的影响。1987 年,Yablonovitch 在研究抑制自发辐射的时候,首次提出光子晶体的概念^[1]。与此同时,John 在讨论光子局域特性的时候,也提出类似的概念^[2]。1989 年,Yablonovitch 和 Gmitter 首次在实验中成功证实在三维光子晶体中存在带隙。这一发现,使人为操作和控制光子成为可能,为性能优越的人工超常介质的构建和发展提供了一个可行的方向,是人们在控制光子领域的新里程碑。

1992 年,Russell 将光子晶体的思想引入光纤,提出光子晶体光纤的概念^[3]。其设计思想是,在纤芯中引入不同线缺陷,在包层中利用周期性排布的高低折射率材料形成光子带隙,从而将频率落入光子带隙中的光限制在缺陷纤芯中传输。

1996 年,Knight 在世界顶级光通信国际会议上首次报道了具有光子晶体包层的单模光纤^[4],如图 1.1(a)所示。虽然该光纤具有类似光子晶体排布的包层结构,但是这种光纤的导光机理并非基于光子带隙原理,而是基于类似传统光纤的全内反射导光机理,因此该光纤并不是真正意义上光子晶体光纤。Knight 等将其称为微结构光纤(microstructured optical fiber,MOF)。

1998 年,Knight 等成功研制出第一根真正意义上的光子晶体光纤^[5],即光子带隙光纤(photonic bandgap fiber,PBGF),如图 1.1(b)所示。该光纤具有蜂窝状包层结构。随后,具有三角格子周期排布包层结构的空芯光子带隙光纤(hollow

core-photonic bandgap fiber, HC-PBGF)^[6](图 1.1(c))也研制成功。

2002 年,英国巴斯大学 Benabid 等在 *Science* 报道了一种能有效导光的具有 Kagome 包层结构的空芯微结构光纤,如图 1.1(d)所示^[7]。其微结构虽类似于 HC-PBGF,但周期性要求并不严格。2007 年, Pearce 基于反谐振式平面波理论解释了其导光机理,即谐振波长处的芯模会通过谐振耦合到包层而衰减掉,非谐振耦合波段的芯模能在纤芯中稳定传输^[8]。这种基于反谐振理论的空芯光纤被称为空芯反谐振光纤(hollow core-anti resonant fiber, HC-ARF)。

2011 年,英国巴斯大学的 Wang 等制作了一种纤芯区域具有内螺旋形状的空芯光纤,如图 1.1(e)所示^[9]。其在 200THz 的频率范围内损耗低于 180dB/km。这种光纤也被称为空芯负曲率光纤,其导光机理与 Kagome 空芯光纤相同。

随后,人们发现这种光纤的特性主要与芯区的管壁形状有关系,因此出现以单层相连的圆管为包层的 HC-ARF,如图 1.1(f)所示^[10]。2012 年,英国巴斯大学 Yu 进一步简化 Kagome 包层结构,提出单层负曲率 HC-ARF,如图 1.1(g)所示。其在波长 3.05 μm 处损耗低至 34dB/km^[11]。

2013 年,人们对单层空气孔结构研究的过程发现,减小内壁相交的节点个数可有效降低损耗,因此无节点型 HC-ARF 应运而生,如图 1.1(h)所示^[12]。

2016 年,人们发现通过增加反谐振层的层数,采用多层嵌套的方法,可以进一步降低 HC-ARF 的传输损耗,如图 1.1(i)所示^[13]。

2018 年, Gao 等报道了超低损耗的 HC-ARF,如图 1.1(j)所示^[14]。该光纤包层有六个连接管,通过引入连接管结构增加反射壁来束缚光场,可以得到 2dB/km 的超低损耗。目前, HC-ARF 的最低损耗已降至 1.3dB/km。

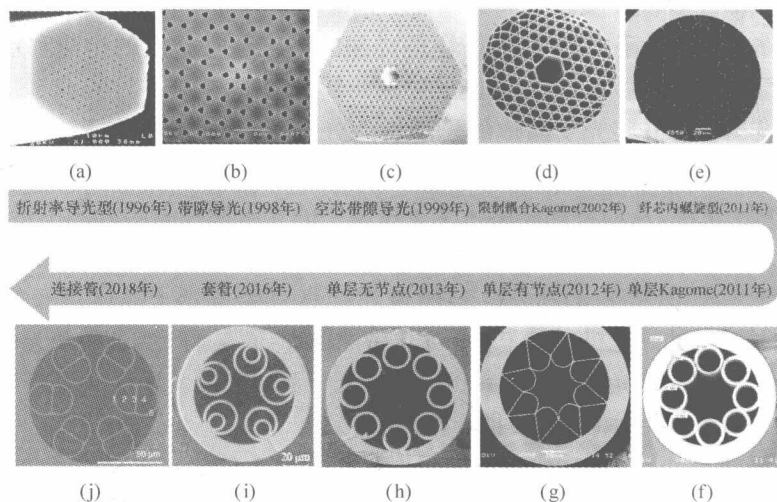


图 1.1 空芯微结构光纤截面图

随着光纤结构的多样化,光子晶体光纤的应用领域从早期的通信波段,逐渐拓展到中红外波段、太赫兹波段。为了满足不同传输波段的应用需求,光纤制作材料从石英拓展到软玻璃,以及聚合物,对应的光纤尺寸也从几百纳米拓展到几十毫米。在这些不断涌现的新颖光纤结构中,其设计思想已不再局限于早期光子晶体光纤的概念。鉴于这些新兴的特种光纤均具有小到纳米量级,大到毫米量级的微结构,因此更习惯将这类新型特种光纤统称为微结构光纤。然而,这只是称呼上的问题,这种全新的光纤一经问世,就对整个光纤领域产生了巨大的影响。

1.2 导光机理

最早出现的微结构光纤的导光机理主要是全内反射型导光和光子带隙型导光。随着微结构光纤的发展,人们发现空芯微结构光纤中还存在一种不同于光子带隙的导光机理——限制耦合导光。本节简要介绍这三种导光机理。

1.2.1 全内反射导光

如图 1.1(a)所示的微结构光纤,其纤芯为实芯,包层中虽然引入周期性排布的空气孔,但并未形成有效的光子禁带,芯区的折射率大于包层的有效折射率,因此光在纤芯中是以类似传统阶跃光纤的全内反射形式进行传导。如图 1.2 所示,在折射率分别为 n_1 和 n_2 ,且 $n_1 > n_2$ 的两种材料组成的光波导中,只有传输常数 β 满足 $k_0 n_2 < \beta < k_0 n_1$ (k_0 为波数)的光波才能在高折射率材料 n_1 中传输,一旦泄漏到折射率为 n_2 的低折射率材料中,光波能量就会迅速衰减,该原理即全内反射导光原理。这类微结构光纤也称为折射率导光型微结构光纤。由于这类微结构光纤对包层结构的周期性要求并不严格,空气孔的引入只是起到降低并调控包层等效折射率的作用,因此在工艺上比较容易实现。

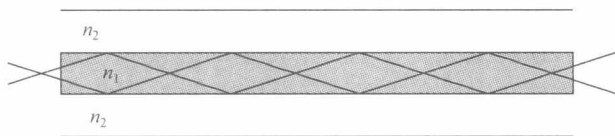


图 1.2 全内反射导光原理示意图

1.2.2 光子带隙导光

如图 1.3(a)所示的空芯光子带隙光纤,其导光原理从物理学的角度出发,来源于二维光子晶体的光子带隙,即当包层空气孔间距和直径满足一定条件时,其频率处于带隙范围内的光波被禁止向包层传播,只能被限制在缺陷纤芯中,沿着缺陷

的方向传播。从光学原理的角度出发,还可以用布拉格散射的原理来解释。在空芯光子带隙光纤中,假设石英折射率为 n_1 ,空气折射率为 n_2 ,由于 $n_2 < n_1$,要想使光波在低折射率的空芯中传输,光波的传输常数 β 需满足 $\beta < k_0 n_2 < k_0 n_1$ 。满足此传播常数的光波能传播到光子晶体的所有介质层中,并且在传播过程中产生不同程度的散射,当包层中的介质层满足布拉格条件时,对某一特定波长和入射角的光波会产生严重的散射和干涉效应,多重散射产生的干涉将入射光波的大部分能量束缚在纤芯中传输,如图 1.3(b)所示。

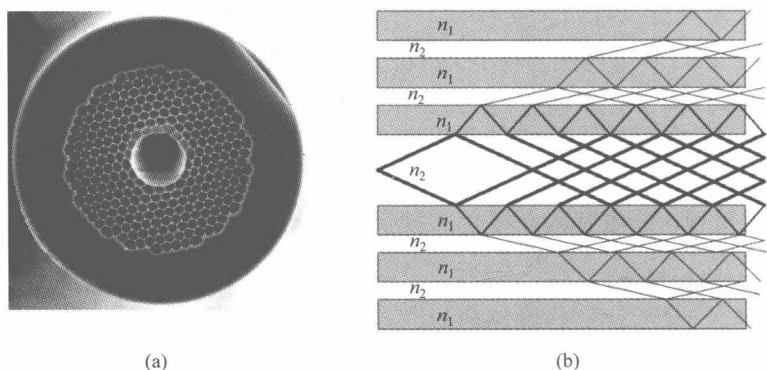


图 1.3 空芯光子带隙光纤导光原理示意图

1.2.3 限制耦合导光

限制耦合导光机理是近年来人们在研究晶格尺寸较大的空芯微结构光纤时发现的一种不同于光子带隙的导光机理。如图 1.4 所示,空芯微结构光纤的包层由大间距的方形晶格构成,晶格的介质壁很薄,方形晶格结构的边长为 Δ ,壁厚为 t 。光纤中同时存在位于中心空气孔的芯模和位于包层的包层模两种模式。包层模又分为空气模式(airy mode)和介质模式(strut mode)。介质模式在包层介质中传输,受材料吸收影响,损耗最大。在空气中传输的芯模和包层中的空气模损耗较小。由于芯模与介质模在内层介质壁处有少量的交叠,因此会发生耦合,但是耦合模式仅发生在芯模与介质模匹配的频率处。这些频率可以通过下面的推导得出。

假设壁厚相同,其间距比为 $t/\Delta = 25$,则每个包层介质壁相隔较远,均可看作无限宽度的平行板波导。它们之间的耦合可以忽略,介质壁中模式的归一化频率可以表示为

$$V = \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{n^2 - 1} \quad (1.1)$$

其中, n_{co} 和 n_{cl} 分别表示平行板波导的芯区和包层的折射率; λ 为波长。

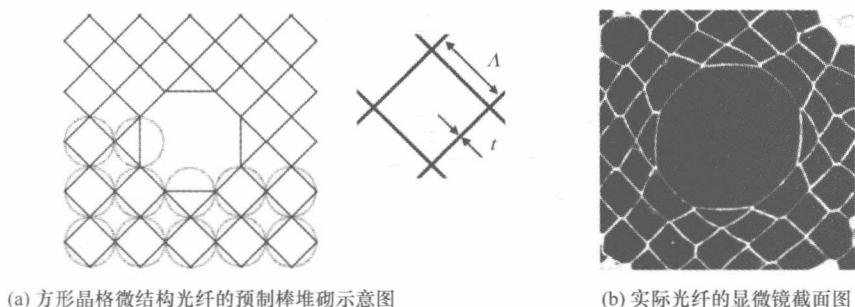


图 1.4 方形晶格微结构光纤预制棒堆砌与实际光纤的显微镜截面图

当每个介质壁被看作独立的平行板波导时,芯区为介质壁材料,折射率为 n ,而包层为空气,折射率为 1。如果用 U 表示波导支持模式的归一化频率,则 U 需要满足下式,即

$$U = \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (1.2)$$

其中, n_{eff} 为模式的等效折射率。

当包层介质对芯区光影响最小时,应满足介质壁的厚度引起的相位变化是 π 的整数倍,可以用下式表示为

$$kt = \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{n^2 - 1} = 2V = m\pi \quad (1.3)$$

其中, k 为光在横向方向的波数; m 为正整数; $V/\pi = m/2$ 对应平板波导的截止频率,此时 $U = V$, 并且 $n_{\text{eff}} = n_{\text{cl}}$ 。

在这些对应的频率位置处,包层对芯区内的光近似透明,对芯模没有限制,芯模可以耦合到包层中,呈现高损耗。

由于 $\lambda = c/f$, 因此可以推得损耗芯模对应的频率为

$$f = \frac{mc}{2t \sqrt{n^2 - 1}}, \quad m \in \mathbf{N} \quad (1.4)$$

其中, c 为真空中的光速; n 为包层介质壁的折射率。

式(1.4)说明,在基于限制耦合原理导光的微结构光纤中,频率为 f 的芯模不能被包层有效束缚,可以耦合到包层模,因此将频率 f 称为耦合频率,而其他频率模式均可被包层束缚,以较低的损耗在空芯中传输。

相比光子带隙导光型光纤,基于限制耦合导光机理的光纤仅有特殊频率的光可以耦合到包层中,在满足式(1.4)的耦合频率 f 处发生高损耗,而在其他频率处损耗低,通过控制耦合频率的间隔,可以实现较宽的传输带宽。限制耦合原理要求微结构光纤具有大尺寸的晶格间距,所以在尺寸较大的光纤中更容易实现。