

全国第四届塑料光纤、聚合物光子学会议

论文集

主办单位：中国光学学会 纤维光学与集成光学专业委员会

承办单位：燕山大学 中国计量学院

河北 秦皇岛 南戴河

二〇〇八年 七月

全国第四届塑料光纤、聚合物光子学会议

论文集

主办单位：中国光学学会 纤维光学与集成光学专业委员会

承办单位：燕山大学 中国计量学院

会议组织机构

大会主席 于荣金 燕山大学教授
共主席 刘德森 西南大学教授

学术委员会

主任 于荣金
副主任 明海 中国科学技术大学 教授
蹇锡高 大连理工大学 教授
张在宣 中国计量学院 教授
赵明山 大连理工大学科技处 处长 教授
张大明 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 教授
马春生 吉林大学 教授
王莉丽 中科院西安光机所 研究员
杨建义 浙江大学 教授
吴文军 东莞市华鹰电子有限公司 董事长
委员 徐传骧 西安交通大学 教授
孙小菡 东南大学 教授
张其锦 中国科学技术大学 教授
王廷云 上海大学 教授
廖常俊 华南师范大学 教授
江晓清 浙江大学 教授
章献民 浙江大学 教授
殷宗敏 上海交通大学 教授
张宁 北京石油化工学院 教授
江源 南京玻璃纤维研究设计院 高工
刘新厚 中科院理化技术研究所 所长 研究员
王学忠 中科院西安光机所 高工
陈明 深圳大圣光电技术有限公司 董事长
储九荣 四川汇源光通信股份有限公司 博士
缪立山 江苏华山光电有限公司 总经理
陈正飞 上海昱品通信科技有限公司 总工程师
吴海生 上海华源光纤通讯有限公司 总经理
金小平 常州市金印福涛光电器材有限公司 总经理
徐兵 北京通元光谷科技有限公司 经理

组织委员会

主任 金尚忠 中国计量学院光电科技学院院长 教授
副主任 祖文林 国检宾馆业务部经理
张淑琴 中国计量学院教授
秘书长 李炳新 燕山大学 副教授

目 录

光纤——从全内反射到布拉格反射	于荣金	1
微结构聚合物光纤规模化制造及其应用技术研究	王丽莉	5
一种新型超晶格光子晶体光纤	黄昌清 张淑琴 董前民	8
光子晶体光纤各种理论计算方法的研究	杨一 张宁	12
聚合物光纤在军事中应用	明海 郑荣升 谢志国 林开群 阎杰 陶俊 陈俊学 许立新	19
聚合物光子晶体光纤作为新型传像光纤的初步探索	汪舰 王丽莉	20
桑色素-Al 掺杂的氧化硅凝胶薄膜修饰 MPOF 的制备及其作为氟离子传感探头的研究	杨兴华 汪舰 王丽莉	26
多孔塑料光纤光学特性研究	张明 阮双琛 杨海丽 邢凤飞 王学忠	33
光学纤维面板微漏气问题的研究	张淑琴 金尚忠 黄昌清 张在宣	39
微结构塑料光纤切割研究	孙灵芝 于荣金	46
光子学聚合物-II 含偶氮嵌段共聚物囊泡的光响应研究	苏伟 韩阔 张其锦	50
含四氟苯乙烯基的杂萘联苯氟代聚芳醚光波导材料合成及性能	李光辉 宋媛 王锦艳 蹇锡高 赵明山	53
含二氮杂萘酮联苯桥连结构有机硅杂化光波导材料	王锦艳 张洪波 张军志 蹇锡高 刘玉辉 赵明山	58
低损耗零双折射率光敏聚酰亚胺光波导材料的制备和性能	李香丹 铁伟伟 文璞山 Myong-Hoon Lee	63
微纳金属结构复合聚合物材料、器件及其全光调控研究	明海 邓燕 闵长俊 张斗国 陶俊 谢志国 王沛 张其锦	68
能源开发——太阳能的进一步利用	于荣金	70
硅基聚合物/SiO ₂ 混合材料 AWG 的无热化	马春生 李德禄 闫欣 汪玉海 郑传涛	79
全聚合物 AWG 的无热化	马春生 李德禄 闫欣 汪玉海 郑传涛	85
基于狭缝波导的聚合物辅助热无关硅基阵列波导光栅	王翔 肖司淼 王帆 郝寅雷 江晓清 王明华 杨建义	91

基于极化聚合物 SU-8/DR1 的材料性能研究和波导结构设计	
.....	单志博 陈长鸣 赵航 高伟男 孙小强 孙杰 张大明 96
M-Z 型电光调制器的行波电极的研究	邓玲 高伟男 王微 赵航 孙小强 张大明 101
铇镜共掺聚合物波导放大器的特性模拟及波导制备	
.....	李彤 陈聪 王英瑜 张丹 齐飞 林权 张大明 106
极化聚合物定向耦合型电光开关波导制备	孙小强 孙杰 高伟男 高磊 陈长鸣 张大明 112
基于有机/无机杂化材料的加载条形光波导的制备研究	
.....	王微 高伟男 邓玲 孙小强 孙杰 高磊 张大明 117
非对称结构 M-Z 型电光调制器的设计	闫云飞 高磊 高伟男 孙杰 孙小强 张大明 122
紫外固化型聚合物弯波导的设计与制备	衣云骥 陈长鸣 赵航 孙小强 张大明 128
聚合物波导光栅耦合器的特性分析	柏婧娜 韩秀友 张希珍 蹇锡高 赵明山 133
新型聚合物 PSQ-L 基余弦型 Y 分支分束器的设计	金婷婷 张希珍 韩秀友 赵明山 139
铇镜共掺聚合物微环谐振器的放大特性分析	汪玉海 马春生 郑传涛 闫欣 145
1×2 Y 型聚合物定向耦合电光开关的设计与模拟	郑传涛 马春生 汪玉海 闫欣 王现银 150
聚合物微纳光学器件的纳米压印微复制技术研究	刘月明 张淑琴 张在宣 155
微纳米压印成形技术制备聚合物光波导的初步尝试	
.....	王凌华 韩秀友 金婷婷 张希珍 蹇锡高 赵明山 162
波导高阶色散对太赫兹脉冲传输的影响	杨泽 李炳新 167

光纤——从全内反射到布拉格反射*

于荣金**

(燕山大学 信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 本文侧重分析了光纤的传输损耗、光纤包层结构对导光横向束缚能力的影响, 以及在长波段 ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) 面临无低吸收损耗芯材下, 从实芯光纤的全内反射转到空芯光纤的布拉格反射这一进程。

关键词: 光纤; 损耗; 全内反射; 布拉格反射

光纤是用于传送光的二维束缚的介质波导。在三维空间中, 如果把 Z 方向确定为光纤传送光的方向 (纵向), 则 X 和 Y 方向是光纤的横向。光在横向是受到束缚的, 所以圆形介质光波导是在 X 和 Y 二维受到横向束缚的光波导。

光纤的基本功能是传送光信息 (通信、传感、传像)、光能量 (加工、医疗、武器)、以及其它功能 (如非线性光纤、有源光纤等)。对光纤来说, 无论实现什么功能, 一个基本和共同的目标是传输损耗要低, 而要实现这个目标的关键, 是光纤对光有良好的横向束缚能力以及低吸收损耗的纤芯材料。

从 19 世纪开始, 人们就知道以全内反射机理来制作光的传输元件^[1]。因此, 利用光纤芯区材料折射率大于包层材料折射率在其界面形成全内反射来传输光有其悠久的历史 and 深刻的物理内涵。构成光纤时, 只要满足全内反射条件, 对导光的横向束缚就具有高效性, 几乎是全部被束缚。因此, 不仅各种实芯光纤, 包括液芯光纤和微结构包层实芯光纤, 以及一部分红外空芯光纤, 都是通过全内反射机理导光的。近 10 年来, 发展起来的各种功能特异的实芯光子晶体光纤 (即微结构光纤), 其包层的折射率小于芯区的折射率, 传光机理就是一种修正的全内反射; 由金属、玻璃或塑料管内表面淀积具有折射率小于芯区 (空气) 折射率的材料, 如在 $10.6 \mu\text{m}$ (CO_2 激光波长) 用蓝宝石和 GeO_2 等, 它们的折射率小于 1, 构成衰减全反射 (ART) 波导, 这也是一种全内反射。在近红外, 采用低损耗石英材料、以及芯区折射率大于包层折射率的全内反射机理, 实现了光纤历史上最辉煌的一页。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段, 石英光纤传输损耗低达 0.2dB/Km , 接近石英材料吸收损耗的理论极限, 通过大规模的生产和应用, 从各国的光纤通信光缆到越洋光缆, 形成了遍及全球的光纤通信网络, 为近代通信的普及提供了技术支撑。

在 $3 \mu\text{m}$ 以上的中红外、远红外, 直至太赫兹波段, 到现在为止没有找到在近红外像石英那样低吸收损耗的材料。国际上经历了较长时间探索, 在这个中红外波段材料的吸收损耗起码是每公里几十分贝, 有的材料吸收损耗甚至达到每公里 3×10^7 分贝; 在太赫兹波段 ($30 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$), 即使是无源器件常用的低损耗材料——高阻硅, 它的吸收损耗也达到约 17372dB/Km 。面对这种情况, 靠实芯光纤的全内反射机理, 是无法实现低损耗光纤的, 因为实芯光纤的传输损耗一般都大于 (起码等于) 构成光纤芯区材料的吸收损耗。客观上, 人们已知在各光波段普遍适用的低吸收损耗介质只有空气, 但空气的折射率为 1, 用空气作为芯区就很难找到满足全内反射条件的包层 (即折射率小于 1 的介质), 因此制作空芯光纤必须研究横向束缚的新机理。这首先出现在传输 CO_2 激光 ($10.6 \mu\text{m}$) 光纤中, 国际上为了工业加工和医疗等需要传输 CO_2 激光的光纤, 曾研究过各种单晶或多晶实芯光纤, 但损耗都比较大, 加上实芯光纤遇到端面反射损耗、内部缺陷和结构不均匀性造成的过热点损耗等问题, 从上世纪 90 年代初开始从实芯转向空芯光纤的研究, 大都是以玻璃、塑料或金属空芯管作为基体, 在其内壁涂上有反射本领的一层 (或多层) 金属或介质。这类光纤在传输和耦合

* 国家自然科学基金资助项目 (60444003, 60577009)

** Email: rj.yu@163.com 电话: 0335-8061549.

性能上较原有实芯光纤有一定改善,传输损耗大约是每公里几百分贝,作为传能光纤,长度不用太长,一般几米就可以,所以在一定程度上可以满足使用要求^[2]。其后,就是1999年出现和报导的空芯光子带隙光纤^[3],它是由许多石英玻璃(或有机玻璃)毛细管以一定的周期结构排列成束,在其中心去掉一根、七根或十九根毛细管形成纤芯(空芯),然后拉制成所需尺寸的光纤。周期包层形成光子带隙,空芯中传输的光波如果正好落入包层光子带隙,则光被包层束缚,只能沿着光纤纵向传输。在这种空芯光子带隙光纤中,包层不仅要求微结构有严格的周期排列,而且要求有相当大的空气填充分数。经过国际上许多著名公司和大学的努力,报导在实验上用石英玻璃材料制作的空芯光子带隙光纤,其最低损耗在波长1620nm为1.2 dB/Km^[4],这些光纤的最终损耗受由于冻结的表面张力波所造成的表面粗糙度决定,1620nm处1.2 dB/Km的损耗似乎已经由这种机理处于支配地位,因而近几年空芯光子带隙石英光纤再也没有出现损耗进一步降低的报导。

其实,早在1978年就提出过另一种横向束缚机理^[5],即利用布拉格反射,可以在芯区折射率小于包层介质折射率的光纤中得到无损耗束缚传播。但这种束缚机理提出之后几年,就被人否定^[6]。之后无多少人问过,直到1999年一种空芯布拉格光纤(“全方位波导”光纤)才从实验上做了演示^[7]。1983年英国电信研究实验室的Doran和Blow他们就布拉格光纤在光纤通信中的应用进行了设计和可行性研究,结论是:布拉格光纤原来的设计对低损耗传输是不可能的。他们作出这一结论依据的参数是:芯区 $n_1=1$ (空气) ~ 1.45 ,包层:高折射率层(掺杂的石英) $n_2=1.485$,低折射率层 $n_3=1.45$,包层交替的层数为10层。从这些数据可以看出:高、低折射率包层是从掺杂石英材料和纯石英材料确定的,因而折射率差很小($1.485/1.45=1.024$)。从很局限的参数得出的结论当然是片面的。到1999年,美国麻省理工学院的科学家对高、低折射率包层采用折射率差很大的材料:高折射率层 $n_2=4.6$ (Te),低折射率层 $n_3=1.59$ (聚合物),折射率差达 $4.6/1.59=2.893$,从而成功地打开了空芯布拉格光纤实现低损耗传输的大门,并可把光纤的传输损耗降低到仅有构成材料吸收损耗的 $1/46000$ ^[8]。这是空芯布拉格光纤的一种形式(称为“全方位波导”光纤),见图1(a)。另一种空芯布拉格光纤形式是环形结构包层空芯光纤,见图1(b)。它是采用含有许多小孔的与高折射率包层相同材料构成低折射率包层,因此其折射率介于该高折射率材料的折射率与空气的折射率($n_1=1$)之间。环形结构空芯光纤在红外($\lambda > 1120\text{nm}$)已观察到传输损耗低于材料(PMMA)的损耗,特别是在1390nm处,材料损耗为420dB/m,而光纤的传输损耗只有40 dB/m^[9]。第三种空心布拉格光纤形式就是我们提出的蜘蛛网结构包层空芯光纤^[10,11],如图1(c)所示。蜘蛛网结构包层的材料折射率差要比环形结构的材料折射率差大[见图2(b)和(c)],因而蜘蛛网结构空芯光纤对导波横向泄漏的束缚能力要大于环形结构空芯光纤的能力^[12]。计算结果表明:蜘蛛网结构包层空芯光纤可以把构成光纤包层材料的吸收损耗压缩至约 $10^4 \sim 10^6$ 分之一^[13];另一方面,与用两种折射率差很大的介质所构成的“全方位波导”光纤相比,从材料选择到工艺实现,蜘蛛网结构包层光纤更为简便。

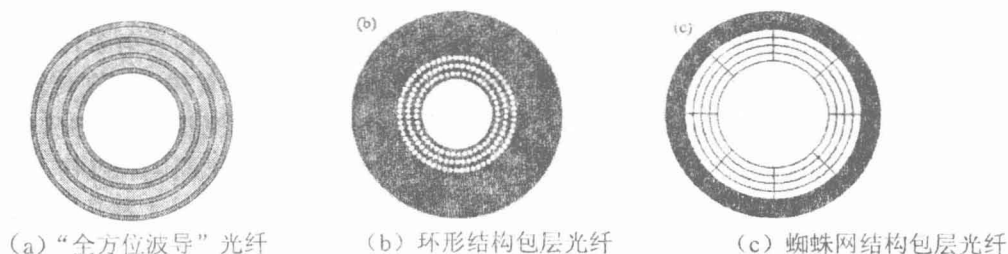


图1 空芯布拉格光纤截面

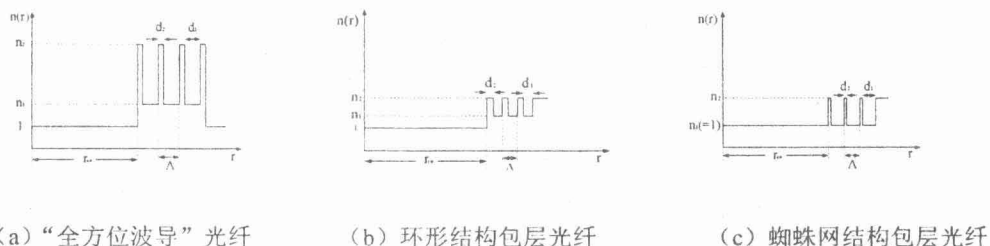


图2 空芯布拉格光纤的折射率分布

空芯光纤与实芯光纤相比，除了可以使传输损耗降低外，还可以消除纤芯材料带来的色散、非线性和散射等问题。因而空芯布拉格光纤在解决当前用实芯石英光纤进行密集波分复用时常面临的非线性和色散等干扰，可以发挥作用，在干线传输以及接入网（特别是光纤到户）中是有竞争力的一种新光纤。从光纤使用角度考虑，塑料因为柔软、弹性极限高，可以制作直径在1mm以上柔软的光纤，便于弯曲。而无定形、单晶或多晶无机材料，呈现的是脆性。例如石英玻璃只有在很小直径（一般为125μm）才能保持光纤的柔软性，石英玻璃固有的脆性需要对纤芯-包层结构外加一个富有弹性的塑料涂层，以保护它的表面、并防止格里菲思裂纹扩展和顺向断裂。在石英光纤包层上加上一个塑料涂层（第3层）已成为一根石英裸光纤的基本组成部分。光纤传输的波长随着由近红外向外长波扩展，特别是太赫兹波段，所需光纤的尺寸必然有很大增加，因此在长波段用塑料来制作空芯布拉格光纤是解决这些波段实用光纤的唯一选择。

这就是目前的状况。科学技术总是不断发展的，期待今后会有更新更好的横向束缚机理出现。

参考文献

- [1] 刘德森, 殷宗敏, 祝颂来, 等. 纤维光学. 北京: 科学出版社, 1987, 1-3
- [2] Harrington J A. A review of IR transmitting, hollow waveguides. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, 19(3): 211-227
- [3] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539
- [4] Roberts P J, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. *Opt. Express*, 2005, 13(1):236-244
- [5] Yeh P, Yariv A, Marom E. Theory of Bragg fiber. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, 68(9): 1196-1201
- [6] Doran N J, Blow K J. Cylindrical Bragg fibers: A design and feasibility study for optical communications. *J. Lightwave Technol.*, 1983, 1(4): 588-590
- [7] Yink Y, Ripin D J, Fan S, et al. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(11):2039-2041
- [8] Dellemann G, Engeness T D, Skorobogatiy M, et al. Perfect mirrors extend hollow-core fiber applications. *Photonics Spectra*, 2003, 37(6):60-64
- [9] Argyros A, Eijkelenborg M A van, Large M C J, et al. Hollow-core microstructured polymer optical fiber. *Opt. Lett.*, 2006, 31(2):172-174
- [10] 于荣金, 陈明阳. 蜘蛛网状空芯光纤. 中国发明专利, CN200510060031.7
- [11] Chen M-Y, Yu R-J, Tian Z-G, et al. Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure. *Chin. Opt.Lett.*, 2006, 4(2):63-65
- [12] 于荣金, 张冰, 张永强, 等. 一种全新的保持圆偏振态低损耗单模空芯光纤. *光电子·激*

光,2007,18(11):1283-1285

[13] 于荣金,张冰. 新一代塑料光纤及其功能开发. 中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(5):807-816

Optical fiber—from total internal reflection to Bragg reflection

Yu Rong-jin

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract This paper gives emphasis to analyze the transmission loss of optical fibers, the effect of optical fiber cladding structure on transverse confined ability of guided ray, and the course of transforming from total internal reflection in solid-core fibers into Bragg reflection in hollow-core fibers without fiber core materials with low absorption loss.

Keywords: optical fiber; loss; total internal reflection; Bragg reflection

微结构聚合物光纤规模化制造及其应用技术研究

王丽莉

(中科院西安光学精密机械研究所, 光纤与集成光学研究室)

西安市高新区新型工业园信息大道 17 号, 710119

摘要: 光子晶体光纤(PCF), 又称微结构光纤(MOF)。其主要的结构特点是光纤构架中有孔贯通光纤整个长度、且规则排列的空气微孔。常规的制造方法有毛细管堆积-拉伸法和钻孔-拉伸法。本研究探索利用透明高分子材料聚甲基丙烯酸甲酯的本体聚合法及颗粒料直接挤出法制造大尺寸多孔光纤预制棒, 然后拉伸的方法规模化制造聚合物光子晶体光纤。把高纯度 PMMA 单体预聚到一定黏度后, 将其浆料注入自制模具, 加温加压一定时间后冷却脱模, 得到了长 35 厘米、直径 5 厘米的多孔预制棒。把洁净的 PMMA 颗粒料在 100 °C 加热干燥后送入单螺杆挤出机, 在 200 °C 加热塑化后在螺杆推动下将流体 PMMA 挤入模具, 最后冷却脱模, 得到了长 35 厘米、直径 7 厘米的多孔预制棒, 此挤出技术适合规模化生产大尺寸多孔预制棒(图 1 左)。这些预制棒在自制的拉伸塔经过两次拉伸后, 可以得到微结构完整无缺的阵列化多孔光纤。该光纤可以直接用于图像的短距离传递, 注入高折射率液体时, 可以用于数十米距离的图像传递。可以做成新一代传像束、传像面板、传像光锥等。此外, 孔道被纳米银、多孔高分子、或无机薄膜修饰的聚合物 PCF 被制备, 在新一代可挠性太阳能电池制作以及作为新一代光化学光纤传感器的可利用性被证明。

关键词: 微结构聚合物光纤, 规模化制造技术, 微结构光纤传像束, 微结构光纤面板, 微结构光锥, 传像应用, 新一代光纤式可挠性太阳能电池

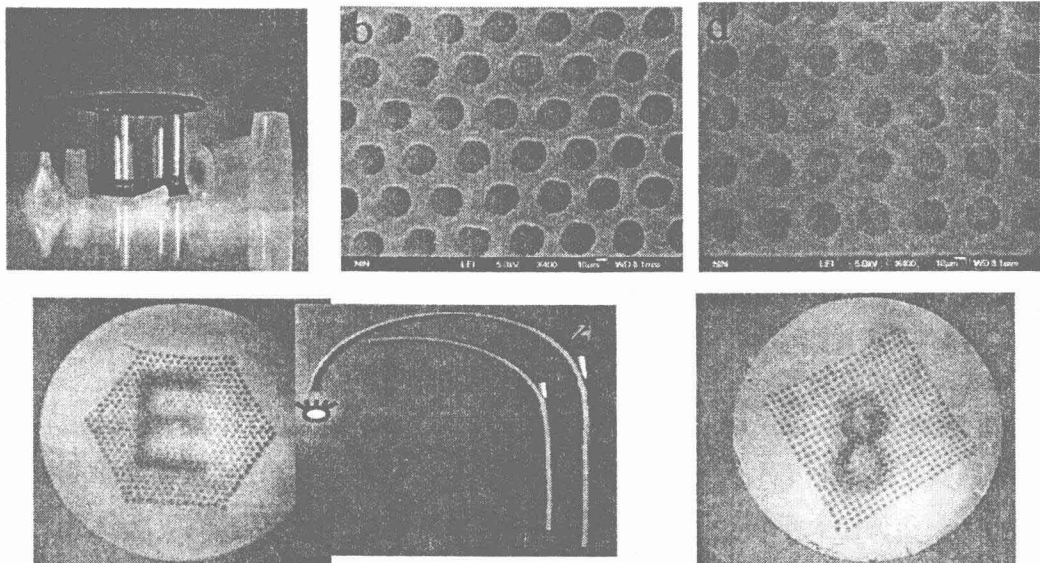


图 1 (左) 挤出法制造的多孔 PMMA 预制棒, (右) PMMA 多孔光纤端面 (小孔直径 25um)
Fig. 1 (left) extruded PMMA preforms, and (right) a cross-section of resultant PMMA holey fiber

参考文献

2007-2008 年发表的代表性论文:

1. Xinghua Yang and Lili Wang, "Synthesis of novel hexagon SnO₂ nanosheets in ethanol/water solution by hydrothermal process", **Materials Letters**, Volume 61, Issue 17, July 2007, Pages 3705-3707 (SCI, impact factor 1.35)
2. Xinghua Yang, Lili Wang and Sheng Yang "Facile route to fabricate large-scale silver microtubes", **Materials Letters**, Volume 61, Issues 14-15, June 2007, Pages 2904-2907 (SCI, impact factor 1.35)
3. Xinghua Yang, Lili Wang, "Silver nanocrystals modified microstructured polymer optical fibers for chemical and optical sensing" **Optics Communications**, Volume 280, Issue 2, 15 December 2007, Pages 368-373 (SCI, impact factor 1.48)
4. Xinghua Yang and Lili Wang, "Fluorescence pH probe based on microstructured polymer optical fibre" **Optics express** Vol. 15 Issue 25 (2007), 16478-16483 (SCI, impact factor 4.003)
5. Jian Wang, Xinghua Yang and Lili Wang, "Fabrication and experimental observation of monolithic multi-air-core fiber array for image transmission" **Optics Express**, Vol. 16, No. 11 (2008) 7703-7708 (SCI, impact factor 4.003)
6. Xinghua Yang, Jian Wang, and Lili Wang, "Preparation and characterization of morin-Al-doped sol-gel thin film modified microstructured optical fibre towards the sensor probe" **Optics Express**, (in press)
7. Jian Wang and Lili Wang, "Fabrication and experimental observation of array liquid-core fiber for image transmission" **Optics Express**, (in press)

2007 年申请的发明专利:

1. 王丽莉 杨兴华 赵卫 "电子-光子双传输微结构聚合物光纤"发明专利申请号: 200710017440.8 申请日: 2007 年 2 月 14 日
2. 王丽莉 杨兴华 康利军 "微结构光纤传感探头"发明专利申请号: 200710018112.x 申请日: 2007 年 6 月 22 日
3. 王丽莉 杨兴华 康利军 陈兴华 "微结构光纤传像束"发明专利申请号: 200710018133.1 申请日: 2007 年 6 月 26 日
4. 王丽莉 孔德鹏 康利军 汪舰 郭昭龙 "新型等离子体共振传感器探头"发明专利申请号 200810017412.0 申请日: 2008 年 1 月 25 日
5. 王丽莉 郭昭龙 孔德鹏 汪舰 杨兴华 "微结构光纤面板及其在成像中的应用"发明专利申请号: 200810017410.1 申请日: 2008 年 1 月 25 日
6. 王丽莉、孔德鹏、汪舰、杨兴华、郭昭龙 "微结构液芯光纤"发明专利申请号: 200810018206.1 申请日: 2008 年 5 月 14 日
7. 杨兴华 王丽莉 孔德鹏 郭昭龙 "光纤式柔性太阳能电池"发明专利申请号: 200810018803.1 申请日: 2008 年 5 月 26 日

通讯作者: 王丽莉 电话: 86-029-88887506, 传真: 86-029-88887506, E-Mail: wangll@opt.ac.cn.

作者简介: 西安光机所研究员, 博士生导师。1985 年-1993 年日本东京工业大学获得硕士和博士学位。1994-1996 年厦门大学化学系博士后、副教授。1997 年西安交通大学高分子材料系主任。1998-2002 年日本邮政省通信放送机构千岁光子研究中心特聘研究员。2003 年入西安光机所。从事有机聚合物电、光功能薄膜及光纤材料的设计、制备及其有机光电子器件研究。1992 年获“日中科学技术交流学会”有突出贡献留学生奖; 1993 年获东京工业大学“手岛工业资金团”“手岛纪念奖”。2002 年受到日本邮政省通信放送机构的表彰。1994-1997 年主持自然科学基金“新概念新思考”课

题、教委“优秀年轻教师基金”课题、归国留学人员专项基金、中国博士后专项基金、厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室开放课题、中科院化学所有机固体国家重点实验室开放课题；在日本完成重大科研计划 4 项；2005 年主持自然科学基金重点基金项目资助，从事聚合物光子晶体光纤技术研究；2007 年获 863 计划资助，开展内窥镜一次性尾纤的规模化制造技术研究；；已发表科学论文 80 多篇，申请发明专利 12 项。在导电高分子合成新方法、生物高分子 DNA 作为光学材料的应用、聚合物光子晶体规模化制造新技术及其应用三领域取得了多项成果。

一种新型超晶格光子晶体光纤

黄昌清, 张淑琴, 董前民

(中国计量学院光学与电子科技学院 杭州 310018)

摘要: 本文介绍了石英光子晶体光纤和聚合物光子晶体光纤结构研究进展情况, 并提出了一种新型光子晶体光纤结构——超晶格光子晶体光纤。该光纤可以制成实芯或空芯结构, 可以选用石英材料或聚合物材料, 而制备方法与传统的石英 PCF 或聚合物 PCF 相同或相近, 因此超晶格光子晶体光纤具有广阔的应用前景。

关键词: 光子晶体光纤; 超晶格; 光子带隙; 石英; 聚合物

0 引言

1987 年 Yablonovitch^[1]和 John^[2]分别提出光子晶体的概念。根据这一思想, Russell 等人在 1992 年首次提出了光子晶体光纤的概念, 并于 1996 年研制成功世界上第一根光子晶体光纤 (Photonic crystal fiber, PCF)^[3]。光子晶体光纤是一种二维的光子晶体, 从光纤端面看, 存在由二氧化硅 (或聚合物) 和空气形成的二维周期性结构。如果在光纤纤芯或其它位置破坏二维周期性结构, 就会在二维结构中形成缺陷, 满足一定条件的光就可以沿着缺陷传播, 从而可以控制光纤中光的传播特性。光子晶体光纤的导光机制主要分为两种, 即全内反射型和光子禁带型^[4]。全内反射型 PCF 中间空气孔缺失而引起缺陷, 会使中间的缺陷区域和外围的周期性区域出现有效折射率差, 从而使光可以传播, 中间的缺陷相当于纤芯, 而外围的周期性区域相当于包层。全反射型 PCF 要求纤芯折射率大于包层折射率, 因而全反射型 PCF 的纤芯一般不能为空芯。光子带隙型 PCF 利用光子带隙 (Photonic band gap, PBG) 效应导光, 其纤芯可以做成空芯结构 (这种光纤称为空芯光子晶体光纤)。

1 石英光子晶体光纤结构

1996 年, Russell 课题组研制了第一根光子晶体光纤, 这种光纤纤芯为二氧化硅, 包层中空气孔按六角密排结构排列。包层的有效折射率低于纤芯折射率, 光在这种 PCF 中利用改进的全内反射效应进行传输^[3], 且可以实现与光纤的实际几何尺寸无关的、无休止单模传输特性。在此基础上, Nielsen 等^[5]提出所谓的三棒光子晶体光纤 (3-rod PCF) (如图 1), 这种 PCF 纤芯为三角形结构, 可以减小其弯曲敏感性。

通过适当设计空气孔的参数, PCF 可以获得正常色散、反常色散或近零色散的光纤, 可以任意调整零色散波长位置。Knight 等^[6]报道了一种新型类似蛛网状 (cobweb) 的 PCF 结构 (如图 2 所示), 通过设计空气孔的形状、尺寸和排列方式, 获得在 560nm 处色散为零的 PCF。

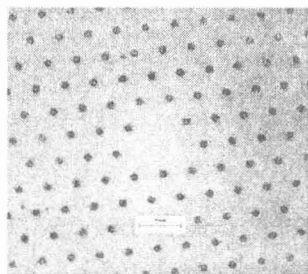


图 1 三棒光子晶体光纤

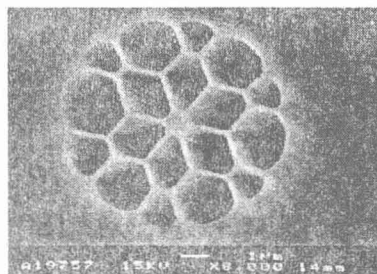


图 2 大空气孔蛛网状光子晶体光纤

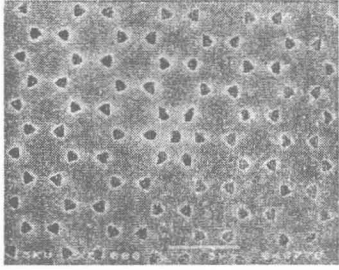


图3 蜂窝状 PCF

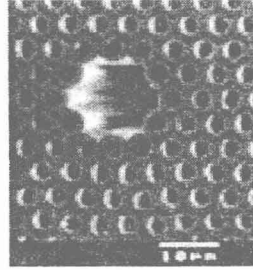


图4 空芯 PCF

理论分析表明,在 PCF 中要产生 PBG 效应,要求 PCF 包层空气孔填充率较低,即空气孔直径与孔间距之比大于 0.4,且要求空气孔的排列规则。1998 年, Knight 等^[7]首次报道了利用 PBG 效应导光的新型 PCF (如图 3 所示)。该光纤采用新型的空气孔排列结构,即蜂窝状 (honeycomb) 排列方式。同时为了排除全内反射导光的可能性,在光纤中心部分引入了附加的空气孔。由于实芯 PCF 中光沿着石英纤芯材料传播,使得在实芯 PCF 中光的损耗仍然很大。而空芯 PCF 中光沿着纤芯的空气孔传播,这种现象可能使得空芯 PCF 的传输损耗比商用普通光纤的传输损耗低很多。图 4 给出了一种空芯 PCF 结构图^[8],它是将六角密排结构中心位置抽取适当数量的空芯毛细管而得到的空芯 PCF。研究表明,当从光纤一段入射白光时,从另一断出射的是彩色光,说明这种光纤只对部分波长的光具有光子带隙效应。

为了进步改善 PCF 的传输特性,研究人员提出了一些其它的空气孔结构类型。Benabid^[9]报道了一种 Kagomé 包层点阵结构来扩展 PCF 光纤的传输带宽。姜淑琴等^[10]设计了一种新型 PCF,其空气孔采用六角密排结构,但纤芯位置的空气孔直径大于包层且按一定规律排列,这种结构有效地增大了 PCF 的双折射效应。

2 聚合物光子晶体光纤结构

除了石英材料以外,聚合物也是制备光子晶体光纤的一种常用材料。2001 年悉尼大学的 Eijkelenborg 首先报道^[11]利用 PMMA 制得聚合物光子晶体光纤 (Polymer photonic crystal fibers, PPCF),其结构如图 5 所示。由于聚合物光子晶体光纤预制棒可以采用钻孔法、挤压法、模具内聚合法和浇注成型法等方法制备得到,因此 PPCF 可以形成任意的空气孔排列方式,从而获得具有较好性能的 PPCF。图 6 给出了环形空气孔 PPCF 的结构图^[12],这种光纤所有的空气孔都在一系列同心圆上。研究表明,环形空气孔 PPCF 在长波长单模传播,短波长多模传播,这与六角密排结构 PCF 传输特性不同。图 7 给出了几种不同结构 PPCF 图^[13]。特别一提的是,PPCF 可以制得在石英 PCF 中难以实现的、具有梯度折射率的光纤 (图 7b) 和具有椭圆空气孔结构的光纤 (图 7c),前者可以提高光纤的传输特性,后者则可以获得高双折射效应的 PCF。由于 PPCF 制备方法多样,光纤中的空气孔形状和排列可以根据需要随意控制,因此在未来的光通信技术具有重要的应用前景。

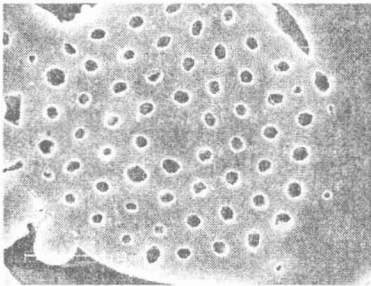


图5 聚合物光子晶体光纤

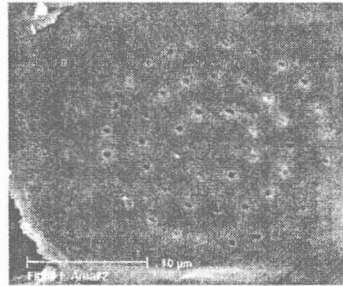


图6 环形空气孔 PPCF

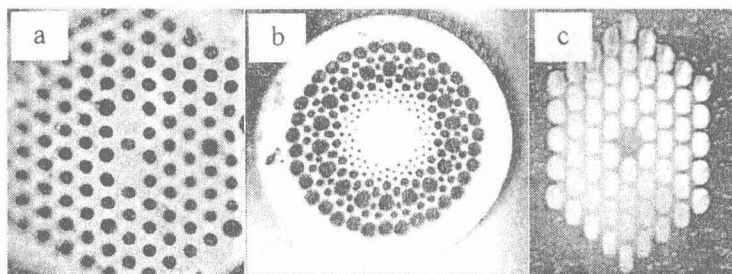


图7 几种不同 PCF 结构

(a) 双芯结构; (b) 梯度折射率结构; (c) 椭圆形空气孔结构

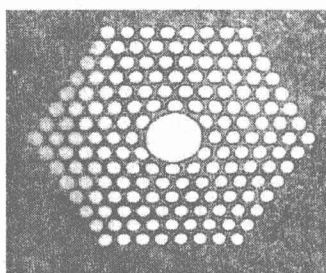


图8 空芯 PCF

与石英 PCF 相似, 聚合物材料也可以制得利用 PBG 效应进行导光的 PCF 结构, 甚至制得空芯 PCF (如图 8 所示), 以减少光传输损耗对光纤材料的依赖关系, 克服光在聚合物材料中巨大的传输损耗。

3 一种新型超晶格光子晶体光纤

回顾光子晶体光纤结构演化历程可知, 不论哪种结构, 都主要只能利用光子晶体光纤两种导光机制中的一种导光机制。在传统的六角密排 HC-PCF 中 (图 4), 用于堆积二维周期性结构的空芯毛细管完全相同, 因此传统 HC-PCF 包层的有效折射率在光纤径向不会发生变化, 这种光纤利用光子带隙效应进行导光。为此, 本课题组提出了一种新型具有超晶格结构的光子晶体光纤结构: 我们在径向利用空芯毛细管堆积二维周期性结构时, 选用两种具有相同外径、不同内径的空芯毛细管进行堆积, 从而在包层中形成有效折射率沿径向周期性变化的二维周期性结构, 形成如图 9 所示新型 HC-PCF 结构。这种新型光子晶体光纤结构在利用光子带隙效应进行导光的同时, 又充分利用新型结构引起的折射率沿径向周期性变化特性, 依靠布拉格全内反射实现对光的限制, 进一步降低光纤的传输损耗。同时根据这种新型的 PCF 结构, 通过不断的改进, 可以有效改善光纤的色散、双折射等光纤特性。这种新型 HC-PCF 的最大特点是将光子带隙导光特性与固体物理中的超晶格结构思想相结合, 利用这种超晶格结构在径向引起的光纤折射率周期性分布特性, 可以将 PCF 光纤的两种导光机制 (光子带隙和全内反射) 有机结合起来, 从而改善 PCF 的损耗、色散等特性。

不论是石英材料或聚合物材料, 也不论是实芯还是空芯 PCF, 都可以制得如图 9 所示的超晶格 PCF 或者其改进型。石英材料可以采用堆积-拉丝方法制备: 先将空芯石英棒在一定温度下拉制成具有相同外径、不同内径的空芯毛细管, 再将一定数量的空芯毛细管按要求堆积成超晶格结构, 装入一个较大玻璃集束管中, 并按需要移去处于中心附近的若干根毛细管, 形成预制棒, 采用一定的拉丝工艺将预制棒拉制成新型超晶格光子晶体光纤。聚合物材料可以采用钻孔-拉丝方法制备: 先将一根大直径的聚合物预制棒按设计的超晶格结构空气孔排列方式钻孔, 然后在一定条件下拉制成超晶格光子晶体光纤。

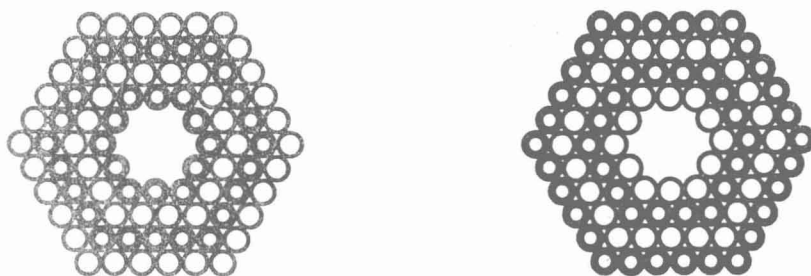


图9 新型超晶格光子晶体光纤结构示意图

4 总结与展望

从第一根光子晶体光纤研制成功至今,只有短短的十几年。但是人们在 PCF 的结构设计方面已经进行很多的努力,从而使得 PCF 光纤特性有了很大的提高。然而,目前 PCF 的实际损耗仍然比理论损耗大很多。为此,我们提出一种新型超晶格光子晶体光纤结构,以期进一步降低 PCF 的损耗,改善其色散特性。由于这种新型超晶格光子晶体光纤的理论、实际制作和性能改善方面的研究还刚开始,还有很多的研究工作要做。

参考文献

- [1] E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20): 2059~2062
- [2] S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58** (20): 2486~2489
- [3] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. Russell, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 1547~1549
- [4] 廖兴展, 高跃飞, 李鸿, 等. 空芯 PBG 光子晶体光纤带隙的结构. *南昌大学学报(工科版)*, 2007, **29**(2): 139~142
- [5] M. D. Nielsen, N. Mortensen, J. R. Folkenberg, et al. Improved all-silica endlessly single-mode photonic crystal fiber. *IEEE optical fiber communications conference*, 2004, **2**: 701~702
- [6] J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 2000, **12**: 807~809
- [7] J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, et al. Photonic band gap guidance in optical fibers. *Science*, 1998, **282**: 1476~1478
- [8] P. Russell. Photonic crystal fibers. *Science*, 299: 358~362
- [9] F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, et al. Stimulated raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber. *Science*, 2002, **298**: 399~402
- [10] 娄淑琴, 简伟, 任国斌, 等. 一种新结构的高双折射光子晶体光纤. *光电子·激光*, 2005, **16**(11): 1265~1269
- [11] M. A. van Eijkelenborg, M. C. J. Large, A. Argyros, et al. Microstructured polymer optical fibre. *Optics Express*, 2001, **9**(7): 319~327
- [12] A. Argyros, I. M. Bassett, M. A. van Eijkelenborg, et al. Ring structures in microstructured polymer optical fibres. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 813~820
- [13] M. A. van Eijkelenborg, A. Argyros, G. Barton, et al. Recent progress in microstructured polymer optical fibre fabrication and characterization. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(3): 199~209

光子晶体光纤各种理论计算方法的研究

杨一¹ 张宁²¹(北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)²(北京石油化工学院信息工程学院 北京 102617)

摘要: 本文大体介绍了光子晶体光纤的特点和关于光子晶体光纤的理论计算方法, 通过对各种理论计算方法的比较, 得出结论时域有限差分法最为有效。

关键词: 光子晶体光纤, 理论计算方法, 时域有限差分

0 引言

光子晶体光纤(PCF)又被称为微结构光纤, 是一种由单一介质(通常为石英玻璃, 也可以为塑料)构成、并且在二维方向上呈现周期性紧密排列(周期性六角形)、而在三维空间(光纤轴向)基本保持不变的波长量级空气孔构成的微结构包层的新型光纤。近年来引起广泛关注, 它的横截面上有较复杂的折射率分布, 通常含有不同排列形式的气孔, 这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级且贯穿器件的整个长度, 光波可以被限制在光纤芯区传播。

在微观上光子晶体光纤的横截面完全不同。光子晶体光纤的横截面由非常微小的孔阵列组成, 类似于晶体中的晶格, 这也是光子晶体名称的由来。实际上这些小孔是一些直径为光波长量级的毛细管, 平行延伸在光纤中。我们知道, 在半导体材料中由于晶格周期性势场作用, 电子形成能带结构, 带与带之间存在一定宽度的带隙。如果电子的能量落在带隙内, 那么它是被禁止传播的。光子的情况也有非常相似的地方, 当电磁波在周期性介质材料空间中传播时, 由于折射率的周期性调制, 也会在其色散曲线上出现光子禁带, 光子禁带的出现意味着在一定频率范围内的电磁波是禁止传播的。我们将这种具有光子带隙的周期性介质结构称为光子晶体。根据组成光子晶体的介质排列方式的不同, 光子晶体可以分为一维、二维、三维共三种结构, 如图 1-1 所示, 不同灰度代表不同折射率, 箭头所示为光子带隙所在的方向^[1]。

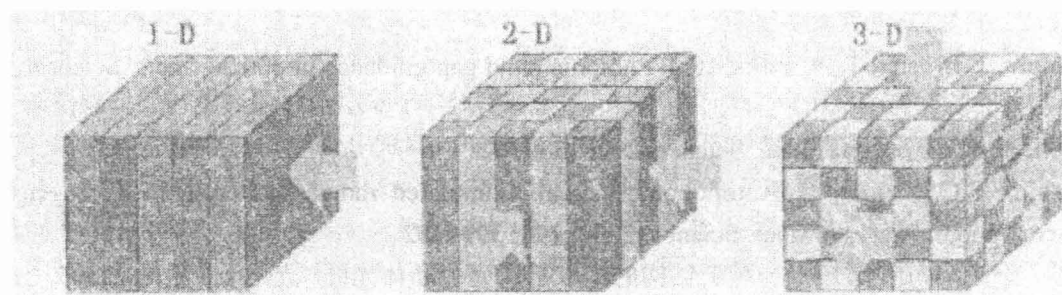


图 1-1 一维、二维、三维共三种结构

光子晶体光纤(PCF)是一种由单一介质(通常为石英玻璃, 也可以为塑料)构成、并且在二维方向上呈现周期性紧密排列(周期性六角形)、而在三维空间(光纤轴向)基本保持不变的波长量级空气孔构成的微结构包层的新型光纤。与常规光纤不同, PCF 是由石英玻璃—空气孔微小结构组成的光纤, 其又可以分为实芯光纤和空芯光纤, 即前者是由石英玻璃棒和石英玻璃毛细管加热拉制成的, 而后者则是由石英玻璃管和石英玻璃毛细管加热拉制成的。