

胶体晶体微结构光纤传输特性研究*

吴婧 王鸣†

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210046)

(2011年4月21日收到; 2011年6月23日收到修改稿)

介绍了胶体晶体微结构光纤的结构, 采用时域有限差分法研究了微结构胶体晶体光纤的传输特性. 建立了该结构的 FDTD 模型, 计算了其透射谱和不同波长的传输场分布. 搭建了光学系统, 测量了实验制备的胶体晶体微结构光纤的透射谱, 并将其与模拟所得透射谱进行比较, 具有良好的一致性. 胶体晶体微结构光纤的传输场分布结果表明, 胶体晶体在不同波长下改变光纤传输场分布.

关键词: 胶体晶体微结构光纤, 时域有限差分法, 透射谱, 传输场

PACS: 42.70.Qs, 78.67.Pt

1 引言

微结构光纤是通过曝光、刻蚀或拉丝在传统光纤上制备出周期性微结构, 如光子晶体光纤、在光纤上制作光子布喇格-珀罗腔等. 微结构光纤具有丰富的微结构和光学特性, 极大地改变了光纤微结构器件的结构和性能. 目前研究的绝大多数微结构光纤的理论模型都是一维或二维光子晶体. 虽然光子晶体光纤及其传感器的研究已经有很大发展, 但是制作工艺仍很复杂, 造价偏高. 近年来, 研究人员提出了一种新的制作微结构光纤的方法, 即在光纤的内部或外侧自组装胶体晶体^[1,2]. 胶体晶体是亚微米级单分散胶体微球在合适的条件下形成的三维有序周期阵列结构. 该种结构具有独特的光学性质. 这种新型微结构光纤可以形成三维光子晶体光纤, 可以形成空气孔和多孔结构, 可以进一步发展成为光纤滤波器和光纤传感器, 形成新的传感机理.

目前, 研究胶体晶体的数值方法比较多, 包括平面波展开法、传输矩阵法、多级法、时域有限差分法 (FDTD) 等^[3-5]. FDTD 是数值求解介质中时域麦克斯韦方程的通用方法, 因此特别适合模拟三维结构的光场传播动态, 结果描述的是电磁波的实际现象, 比较容易解释. 目前, FDTD 是模拟光子晶体的常用方法^[6,7].

我们将胶体微球在普通单模光纤的端面或侧

面通过自组装的方法组装为胶体晶体, 形成“胶体晶体-光纤”结构^[8,9]. 本文进行了胶体晶体微结构光纤传输特性和光学测试的研究, 用时域有限差分方法数值分析胶体晶体透射谱和传输场分布, 指导胶体晶体微结构光纤的设计、制作和应用.

2 胶体晶体微结构光纤的结构

单模光纤通信有许多独特的优点, 如衰减比多模光纤低得多, 带宽宽得多, 可以在更长的距离传输更多的信息等, 因此我们选用单模 G.652 光纤为研究对象, 在单模光纤上设计胶体晶体微结构光纤. 在一根单模光纤的端面自组装胶体晶体, 用两端带有 V 形插槽的空心玻璃管 (孔直径 126—127 nm) 将带有胶体晶体的光纤和另一根光纤对接, 用热塑套管固定, 这样就形成了胶体晶体微结构光纤. 图 1 为胶体晶体微结构光纤示意图.

因为我们的目的是用胶体晶体把光纤结合起来, 所以我们需要制备的胶体晶体的带隙中心波长出现在光的通信波段 (C+L); 考虑到制备胶体晶体的材料一般为 PS, PMMA, Silica, 因此对这三种胶体晶体的能带结构进行了模拟, 通过模拟结果, 确定了每种材料所需的胶体粒子的半径. 如果我们制备的胶体晶体需要带隙中心波长位于 1500—1600 nm, 则需要的胶体微球的直径应

* 江苏省高校研究生科研创新项目 (批准号: CX10B-399Z)、国家自然科学基金 (批准号: 61178044, 91123015) 和教育部博士点基金 (批准号: 20113207110004) 资助的课题.

† E-mail: wangming@njnu.edu.cn

为 672—712 nm.

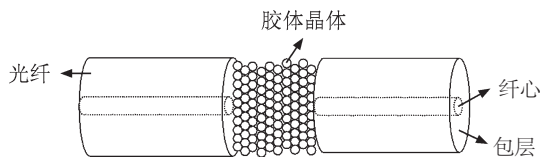


图1 胶体晶体微结构光纤示意图

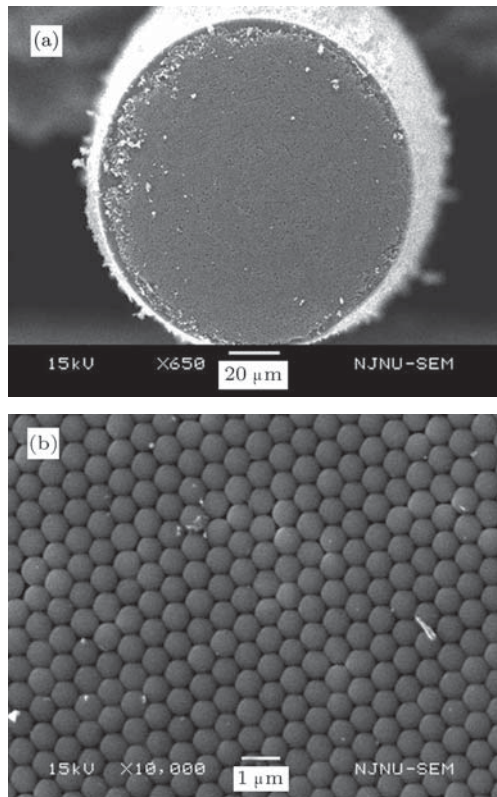


图2 胶体晶体微结构光纤 SEM 图 (a) 沉积了胶体晶体的光纤端面; (b) 胶体晶体局部放大图

我们采用垂直沉积法制作了胶体晶体微结构光纤. 用于制作的光纤端面胶体微球是直径为 690 nm(相对标准偏差小于 5%) 的聚苯乙烯胶体微球. 为了验证胶体晶体的形貌, 采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜观察实验所得样品, 实验结果如图 2 所示. 从图 2(a) 可以看到, 胶体微球覆盖了整个光纤端面, 并且在较大范围内呈现规则排列, 局部有少量点线缺陷. 从图 2(b) 可以看出样品局部范围内是严格的 fcc 结构, 每个小球都有 6 个呈六角排列的邻近小球.

3 胶体晶体微结构光纤的透射谱

采用 EastFDTD 建立胶体晶体微结构光纤的结构模型如图 3 所示. 微结构光纤分为导入光纤、胶体晶体和导出光纤三个部分. 分别建立胶体晶体和光纤的模型, 然后将三部分组合成一个整体. 计算中使用的参数如下: 纤芯和包层的直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $12.5\ \mu\text{m}$, 折射率分别为 1.46 和 1.45, 胶体微球为直径 690 nm 的聚苯乙烯球. 计算透射谱时参数设置如下: 空间步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 40\ \text{nm}$, 网格 306000 ($34 \times 30 \times 300$), 总计算时间步长为 20000. 得到的透射谱如图 4 所示.

为了测试胶体晶体微结构的光学特性, 搭建了如图 5 所示的光学系统. 白光光源 AQ4305 (输出波长范围 400—1800 nm) 发出的光经过单模光纤耦合到微结构胶体晶体光纤, 输出的光由频谱分析仪 (AQ6370) 接收, 得到胶体晶体微结构光纤的透射谱.

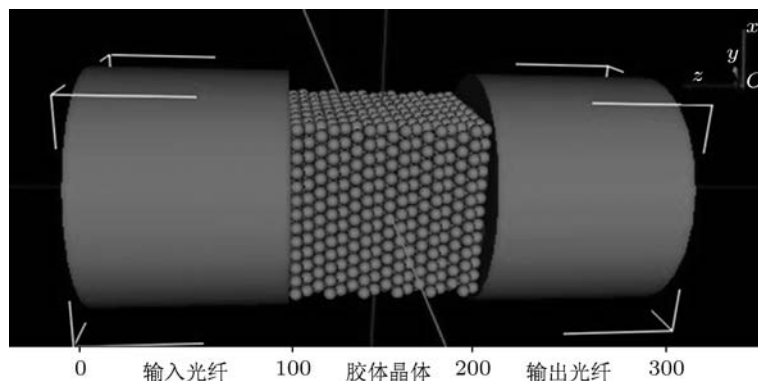


图3 胶体晶体微结构光纤模型

将测量和计算得到的微结构光纤的透射谱进行比较, 如图 4 所示. 实验结果与理论计算非常符

合, 带隙中心波长的漂移约为 5 nm. 原因有以下几个方面: 首先, 胶体微球的大小具有一定偏差, 导致

制备的胶体晶体紧密度不够,有可能形成缺陷;其次,制备过程中温度、湿度等参数也会对晶体质量产生影响,从而产生位错.不过,整体一致表明微观结构失调足够小不足以破坏整体的光学特性.另外,测试过程中,光谱仪的分辨率和实验系统的误差对光子带隙的深度也会产生影响.

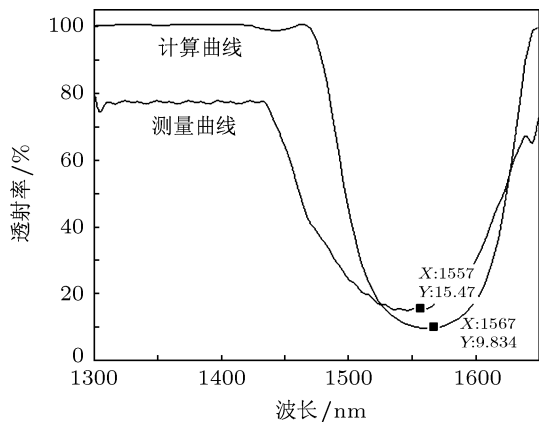


图4 测量和计算得到的透射谱

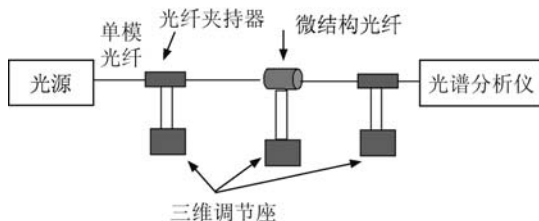


图5 实验系统

4 胶体晶体微结构光纤传输场分布

建立胶体晶体微结构光纤模型,计算参数设置如下:空间步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 100 \text{ nm}$, 网格 3000000 ($100 \times 100 \times 300$), 总计算时间步长为 20000.光源时域类型为高斯脉冲,光源种类为扩展光源,中心频率为 $1.923 \times 10^{14} \text{ Hz}$,即禁带中透射峰的位置,光源方向为 z 轴正方向.分别记录频率为 $2.04 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $1.923 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $1.829 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的 $yo z(x = 0)$ 面的每一点场值的时间累积大小.对计算得到的记录数据进行处理,得到不同波长光在微结构光纤中传播时的电场分布如图 6 所示.

电场分布在 z 方向上可分为三个部分:导入光纤(网格 0—100)、胶体晶体(网格 100—200)和导出光纤(网格 200—300).图 6(a)给出了频率为 $2.04 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (即波长为 1470 nm)时的 yz 面($x = 0$)的电场分布.大部分光可通过胶体晶体,由于胶体晶体的修饰作用使输出光场与输

入光场存在差异.从导入光纤出来的光进入胶体晶体,由于在胶体晶体修饰区域存在横向模式、输出场的横向分量和传播分量的叠加,因此输出的光存在一个角度扩散.图 6(b)给出了频率为 $1.923 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (即波长为 1560 nm)时 yz 面($x = 0$)的电场分布,只有小部分光可通过胶体晶体,有一部分光从胶体晶体反射回导入光纤,导入光纤场是输入场强和反射光场强的叠加.图 6(c)给出了频率为 $1.829 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (即波长为 1640 nm)时 yz 面($x = 0$)的电场分布,光可通过胶体晶体,但输出光的宽度限制在 y 轴 40—60 范围之间,

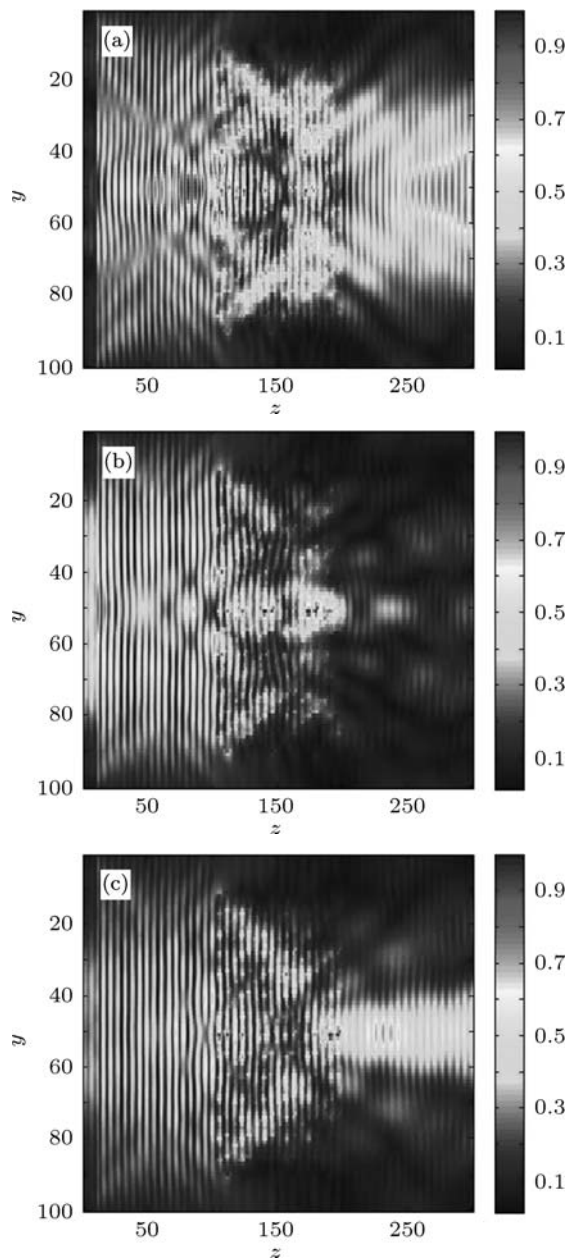


图6 胶体微球为直径 690 nm 的 PS 时传输场分布 (a) $\lambda = 1470 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1560 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1640 \text{ nm}$

此时胶体晶体修饰区域电场横向分量较少, 所以输出的光呈现有效地定向传播. 通过比较三个波长的场分布情况, 我们可以得到以下结论: 胶体晶体可以改变光的传播特性; 带隙的中心波长在 1560 nm 处; 波长对胶体晶体结构的定向发射存在一定的影响.

传输场分布描述了胶体晶体微结构光纤的传输特性. 在带隙内, 光不能穿过胶体晶体到达导出光纤. 在带隙外, 光可以通过胶体晶体光纤从导入光纤传输到导出光纤. 某些波长的光束通过微结构光纤可以呈现一个高效率的定向发射现象.

5 结论

采用时域有限差分法建立了胶体晶体微结构光纤模型, 计算并测量了该结构的透射谱, 实验结果和理论计算得到的光子带隙一致, 模拟了不同波长胶体晶体微结构光纤传输场分布, 结果表明胶体晶体对光传播模式存在一定的影响. 该结构具有特殊的光学特性, 可以潜在应用于需要狭窄光束的近场光学与集成光学中.

-
- [1] Lin Y, Herman P R, Valdivia C E, Li J, Kitaev V, Ozin G A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 121106
 - [2] Moon J H, Yang S, Dong W T, Perry J W, Adibi A, Yang S M 2006 *Opt. Express* **14** 6297
 - [3] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, de Sandro J P 1998 *J. Opt. Soc. Amer. A Opt. Image Sci.* **15** 748
 - [4] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J, Andres P, Andres M V 1999 *Opt. Lett.* **24** 276
 - [5] Qiu M 2001 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **30** 327
 - [6] Yee K S 1966 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **AP-14** 302
 - [7] Ge D B, Yan Y B 2002 *Electromagnetic Wave Finite Difference Time Domain Method* (Xian: Xidian University Press) pp20–30 (in Chinese) [葛德彪, 闫玉波 2002 电磁波时域有限差分法 (西安: 西电出版社) 第 20—30 页]
 - [8] Yan H T, Wang M, Ge Y X, Yu P 2009 *Optical Fiber Technology* **15** 324
 - [9] Yu P, Wang M, Yan H T, Guo W H, Liu Q, Ge Y X 2010 *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** 01AE16

Colloidal photonic crystal microstructure fiber: propagation characteristics analysis*

Wu Jing Wang Ming[†]

(*Jiangsu Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*)

(Received 21 April 2011; revised manuscript received 23 June 2011)

Abstract

In the paper, we describe the structure of colloidal photonic crystal microstructure fiber and investigate the propagation characteristics using the finite-difference time-domain method. A structure model is established to simulate the transmission spectra and propagation field distributions under different wavelengths. Experimental system is built to measure the transmission spectrum of fabricated colloidal photonic crystal microstructure fiber. Experimental result is in good agreement with numerical result. The propagation field distribution result shows that the colloidal crystal changes the propagation mode of optical fiber under different wavelengths.

Keywords: colloidal photonic crystal microstructure fiber, finite-difference time-domain method, transmission spectra, propagation field distribution

PACS: 42.70.Qs, 78.67.Pt

* Project supported by the University Postgraduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province, China (Grant No. CX10B-399Z), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178044, 91123015), and the Fund for Doctoral Program of Ministry of Education of China (Grant No. 20113207110004).

[†] E-mail: wangming@njnu.edu.cn