

一种胶体光子晶体修饰的光纤*

刘 青 王 鸣[†] 郭文华 闫海涛 喻 平

(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)

(2009 年 12 月 21 日收到; 2010 年 1 月 11 日收到修改稿)

设计了一种胶体光子晶体修饰的光纤. 采用恒温快速蒸发法直接在经切割刀处理后的光纤端面生长胶体晶体, 再与另一根切割后的光纤在毛细玻璃管中完成对接, 制备成胶体光子晶体修饰的光纤. 用扫描电子显微镜和光谱分析仪对样品的形貌、结构以及光学特性进行分析. 实验结果表明, 粒径为 640 nm、体积分数约为 0.5% 的 SiO_2 胶体微球溶液在 60 °C 的情况下沉积, 大约 12 h 后可得到质量较高的胶体光子晶体. 在 SEM 下, 观察到端面的胶体晶体为面心立方 (fcc) 结构. 透射光谱证明, 该结构在 (111) 面上具有光子晶体的带隙性质, 带隙中心波长为 1383 nm.

关键词: 胶体光子晶体, 带隙, 自组装, 中心波长

PACC: 4280L, 8270D

1. 引 言

最近二十年, 胶体晶体的研究因光子晶体概念的提出^[1-3]而快速发展. 光子晶体材料具有光子带隙和色散特性, 可以形成多孔结构, 进一步发展成为光纤波导和光纤传感器等^[4,5], 胶体光子晶体的制备因此引起人们广泛的关注. 目前, 具有代表性的胶体晶体自组装合成方法有: 自然沉降法、电泳辅助沉降法、垂直沉积法、物理强制有序法及其他许多方法. 其中重力沉降法使用得最为广泛^[6-8], 但存在诸多缺点: 若胶体颗粒粒径太小或者密度与介质差不多(如聚苯乙烯小球), 则其 Brown 运动可能抵消重力, 导致沉降时间过长; 若粒径太大, 则沉降速度很快, 不能满足沉降和扰动极度平衡^[9]的自组装条件. 而垂直沉积法有诸多的优点: 可制备出大面积高度有序的结构、通过改变初始介质中胶体颗粒的体积分数, 可系统地控制晶体的层数等^[10-12]. 然而光纤横截面相比之下的区域面积很小, 溶液在蒸发过程中很难在光纤端面形成弯月面, 以致于大粒径微球在沉积过程中所受到的毛细力与静电力、重力等难以达到平衡状态, 所以要以光纤端面为基底不宜采用垂直沉积方法. 而重力沉降法中, 小球的沉降速度是样品制备的主要制约

因素^[13].

中国石油大学^[4]建立了一种蒸发自组装法: 在控制一定温度的情况下, 胶体微球随着水分蒸发在悬浮液表面进行高效组装. 该方法的特点是效率高、晶体质量好. 本文采用该种快速蒸发自组装法, 通过恒温蒸发产生对流来解决由于大粒径微球的重力而导致的沉积速度过快的问题, 在光纤端面水平方向上进行胶体微球的自组装. 利用 640 nm 的 SiO_2 小球在不同的温度条件下来控制小球的沉降速度, 从而进行样品的制备, 并且对典型样品的质量和光子特性进行了表征.

2. 实验方法

实验采用 62.5/125 多模光纤. 先对光纤进行端面处理: 剥去多模光纤一端的涂覆层, 经光纤切割刀切割使其端面平整, 以光纤端面为基底, 在光纤端面进行胶体微球的自组装. 将所有容器用超声波震荡清洗过后, 再依次用二次蒸馏水、无水乙醇冲洗, 并放入恒温干燥箱中干燥备用. 往平均粒径为 640 nm (分散度小于 2%) 的 SiO_2 胶体微球溶液中注入无水乙醇, 经过超声分散配制成相应体积分数的胶体溶液.

图 1 所示为实验的装置图. 我们将切割好的光

* 江苏省科技支撑计划(批准号: BE2008138)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wangming@njnu.edu.cn

纤一端端面朝上放入盛有胶球溶液的容器中, 橡皮塞用来固定光纤, 保持光纤竖直向上。再将整个装置置入恒温干燥箱。通过加热的方法使容器中的乙醇溶液蒸发, 使其产生对流, 乙醇带动胶体粒子顺着玻璃器壁上升, 然后在中心处下降, 在光纤端面处实现胶体小球的自组装。为了比较不同溶液浓度和溶液蒸发速度对样品质量的影响, 我们分别在体积分数为 0.5% 条件下进行三组不同温度 (55, 60, 65 °C) 的实验。大约 12 h 之后, 乳白色的胶球溶液蒸发完毕, 可以看见光纤端面以及容器内壁覆盖了一层白色胶体小球。关闭恒温干燥箱使其冷却至室温, 样品缓慢干燥。

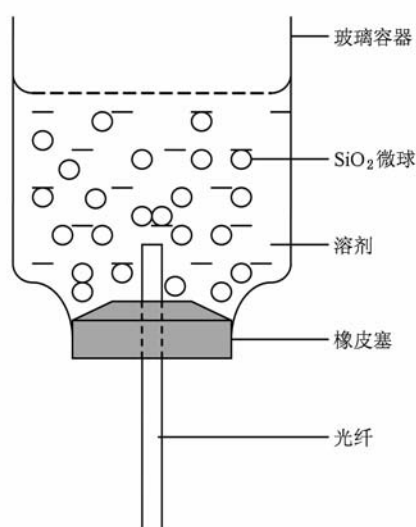


图 1 实验装置图

3. 结果与讨论

3.1. 晶体形貌

在密闭条件下缓慢干燥, 可以减小溶剂挥发速度, 有效防止样品的龟裂现象^[14]。干燥后所得到的样品颜色均匀一致, 在光学显微镜下观察, 端面覆盖了一层厚厚的白色胶体小球, 且排列紧密。本文采用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察实验所得典型样品, 图 2 为一组在体积分数为 0.5%, 温度为 60 °C 条件下所制备的不同放大倍数下的样品图。

如图 2(a) 所示, 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。其中部分是由于干燥过程中毛细作用^[15]

和扫描电镜下的金属镀膜和高真空度^[16]而导致的。从图 (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 个成六角排列的邻近小球。(c) 为局部断层面的 SEM 图。从照片中可以看出, 样品端面堆积的小球大约有 6—8 层。

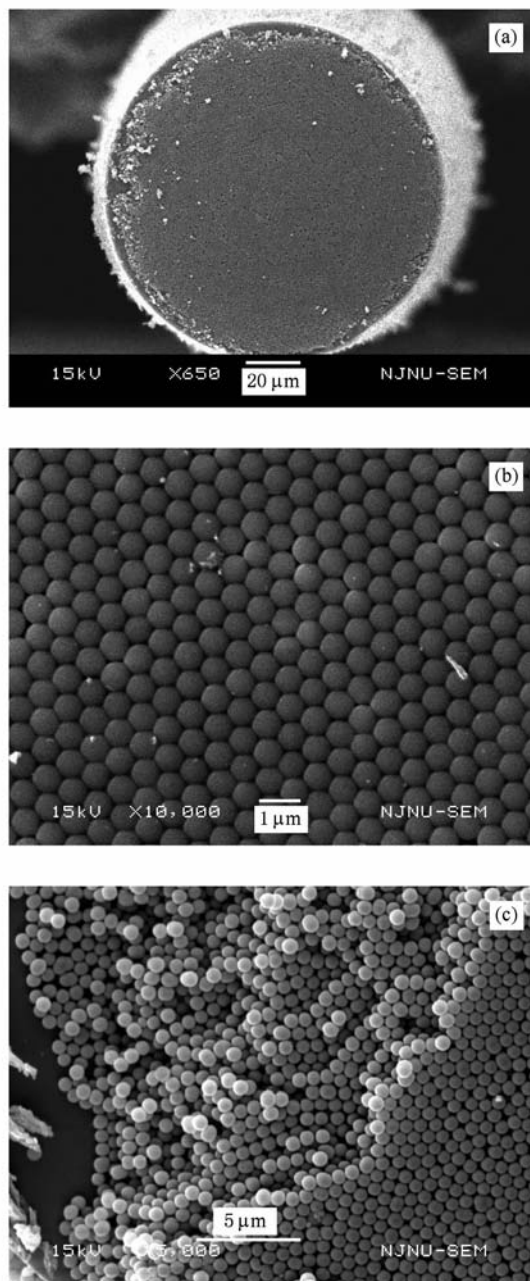


图 2 典型样品在不同放大倍数下的 SEM 图 (a) 650 倍, (b) 10000 倍, (c) 5000 倍

3.2. 光学特性分析

将一端覆盖了小球的光纤插入内孔直径为 126 nm 的毛细玻璃管中, 与另一根切割过后的光纤

对接,如图 3 所示. 毛细玻璃管可以将两根待测光纤保持在同一直线上,并且对胶体晶体结构起到很好的保护作用.

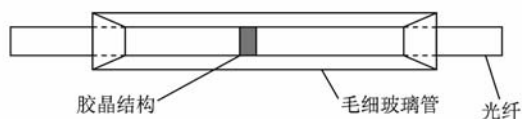


图 3 对接示意图

实验中所用到的是 AQ4305 白光源(波长范围 400—1800 nm)和 AQ6370 光谱分析仪. 我们将生长好胶体晶体结构的光纤样品在毛细玻璃管中完成与另一根切割过后的光纤对接之后,再将一端生长了胶体晶体的光纤连接到宽光源,另一根与之对接的光纤连接到光谱分析仪. 普通多模光纤由三部分组成:纤芯、包层、涂覆层. 纤芯位于光纤圆柱体的最内层,是传光的主要通道,实验采用的多模光纤直径为 62.5 μm . 纤芯外面是包层,用来将光波约束在纤芯内传播. 测试时,入射光通过一端光纤的纤芯垂直于样品表面,即(111)面,再通过另一根光纤的纤芯传入光谱分析仪. 所得到的透射光谱图如图 4 所示.

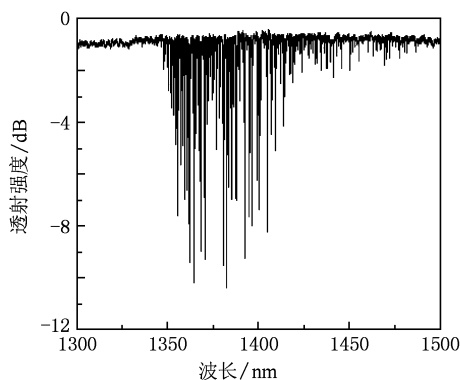


图 4 透射光谱图

从图 4 中可以看出,位于 1350—1420 nm 波长范围内的光强有着明显的衰减,且在 1383 nm 处具有强烈的衰减峰. 表明样品在宏观尺度上具有有序排列,并且在(111)方向上具有光子带隙的性质. 而根据面立方结构的 Bragg 公式^[17]算出对应于 640 nm 的 SiO_2 微球的光子带隙中心波长大约在 1385 nm. 实验值与计算值较好的吻合,也进一步证明了在光纤端面排列得到的胶体晶体为 fcc 结构.

带隙的位置决定于晶体结构和晶格常数 a_0 . 由于 SiO_2 微球自身的粒径偏差、自组装过程中的位置

偏差以及晶体结构中存在的位错等缺陷而导致晶体的晶格常数 a_0 存在偏差 Δa ,从而影响了实际情况中的带隙位置^[18].

3.3. 蒸发温度对晶体质量的影响

蒸发温度决定了溶液蒸发的速度,溶液蒸发的越快,粒子的动能就越大,微球自自组装的速率也越快. 如图 5 所示,(a)和(b)分别对应的蒸发温度为 55 和 65 $^{\circ}\text{C}$ (体积分数 0.5%). 与图 2(b)相比,它们的排列都不够紧密,都具有较多的点、线缺陷. Ye 等^[19]指出蒸发温度越高样品的缺陷越少,然而温度过高会导致粒子动能过大,传输速度过快,从而破坏了晶体排列过程中与晶核生成和结晶化的平衡. 试验证明,640 nm 的 SiO_2 微球在蒸发温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,粒子在晶体排列过程中晶核的生成、粒子的传输和结晶化达到平衡状态.

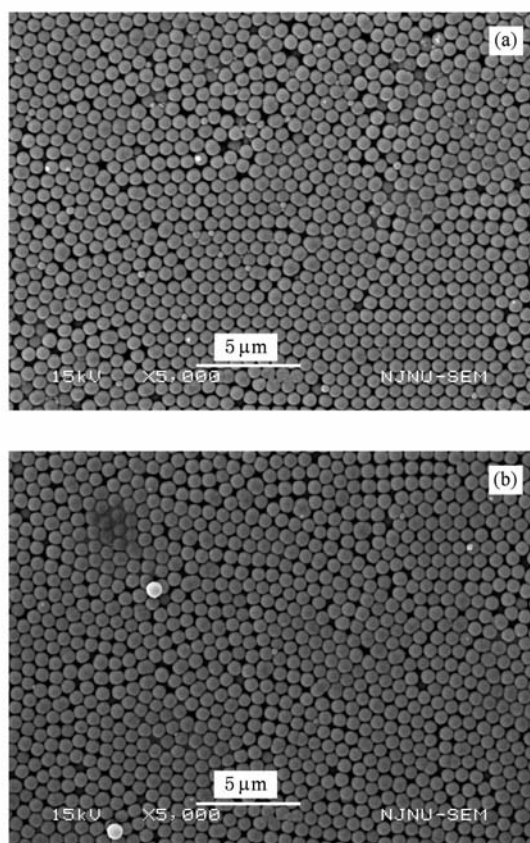


图 5 体积分数 0.5%,不同蒸发温度下制备的样品 SEM 图 (a) 55 $^{\circ}\text{C}$, (b) 65 $^{\circ}\text{C}$

4. 结 论

采用等温加热产生对流的方法成功制备出一

种胶体光子晶体修饰的光纤. SEM 观察的结果表明, 640 nm 的 SiO₂ 胶球在体积分数为 0.5%、温度条件为 60 °C 的情况下可获得大面积高度有序的密排结构, 缺陷相对较少. 通过光谱分析仪分析得知, 该结构对应的光子晶体带隙的中心波长约为

1383 nm. 证明了所制备出的光纤具有光子晶体带隙的特性. 该结构可潜在应用于光学滤波器、光开关以及化学传感器等领域. 实验所采用装置简单, 制作周期短, 成本较低, 有着良好的发展前景.

-
- [1] Vlasov Y A, Bo X, Sturn J C, Norris D J 2001 *Nature* **4** 289
- [2] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [3] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [4] Wang X D, Dong P, Yi G Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2092 (in Chinese) [汪晓冬、董鹏、仪桂云 2006 物理学报 **55** 2092]
- [5] Yan H T, Wang M, Ge Y X, Yu P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2389
- [6] Mayoral R, Requena J, Moya J S 1997 *Adv. Mater.* **9** 257
- [7] Chung Y W, Leu I C, Lee J H, Hon M H 2004 *Appl. Phys. A* **79** 2089
- [8] Li M H, Ma Y, Xu L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1302 (in Chinese) [李明海、马懿、徐岭 2003 物理学报 **52** 1302]
- [9] Miguez H, Blanco A, Lopez C 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1975
- [10] Gu Z Z, Akira F, Osamu S 2002 *Chem. Mater.* **14** 760
- [11] Ye Y H, LeBlanc F, Hache A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 52
- [12] Cong H L, Cao W X 2003 *Langmuir* **19** 8177
- [13] Zhou Q, Dong P, Cheng B Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3984 (in Chinese) [周倩、董鹏、程丙英 2004 物理学报 **53** 3984]
- [14] Wang J, Yuan C W, Huang Z B, Tang F Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3054 (in Chinese) [汪静、袁春伟、黄忠兵、唐芳琼 2004 物理学报 **53** 3054]
- [15] Yoldy M, Gonzalez-Vinas W, Arcos M C 2006 *J. Mater. Sci.* **41** 2965
- [16] Jiang P, Bertone J F, Hwang K S 1999 *Chem. Mater.* **11** 2132
- [17] Frieda K, Vlad L S, Dan D 2003 *Synth. Met.* **137** 993
- [18] Wang Y P, Zhu Y Z, Li Z H 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 557 (in Chinese) [王艳平、朱永政、李志慧 2006 中国激光 **33** 557]
- [19] Ye Y H, Leblanc F, Hache A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 52

A fiber decorated by colloidal photonic crystal^{*}

Liu Qing Wang Ming[†] Guo Wen-Hua Yan Hai-Tao Yu Ping

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

(Received 21 December 2009; revised manuscript received 11 January 2010)

Abstract

A method of fabricating fiber decorated by colloidal photonic crystal is devised. Three-dimensional nanostructure colloidal crystal on the end face of optical fiber was grown by isothermal heating evaporation induced self-assembly method. The optical fiber with colloidal crystals was connected to another lapped optical fiber by glass capillary, and the fiber decorated by colloidal photonic crystal was formed. The nanostructural morphology of the colloidal crystal was examined by SEM. The optical characteristics of the colloidal crystal was also analyzed. The spectral feature of the optical fiber colloidal crystal was measured by using optical sensing analyzer. It has been found that the optimal conditions for a good quality crystal are an evaporation temperature of 40 °C with a volume fraction of 0.5% and a deposition time of 12 hours. SEM reveals that the colloidal crystal on the end face of optical fiber has face-centered-cubic structure. Transmission measurement shows the existence of photonic band gap, and the stopgap is located at 1365 nm.

Keywords: colloidal photonic crystal, band gap, self-assembly, stopgap

PACC: 4280L, 8270D

^{*} Project supported by the Jiangsu Provincial Science and Technology Foundation of China (Grant No. BE2008138).

[†] Corresponding author. E-mail: wangming@njnu.edu.cn