

文章编号: 1001-3806(2015)03-0312-04

光子晶体微纳光纤的制备新方法及其特性研究

罗 瑛^{1,2}, 马 杰^{1,2}, 钟永春^{1,2*}

(1. 暨南大学 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广州 510632; 2. 暨南大学 光电工程系, 广州 510632)

摘要: 为了形成胶体晶体-微纳光纤结构, 采用提拉生长法, 将单分散的聚苯乙烯微球在微纳光纤表面自组装生长成胶体晶体, 并用扫描电子显微镜和光谱仪对胶体晶体的显微形貌和透射光谱特性进行了表征。结果表明, 聚苯乙烯微球有序堆积, 自组装成胶体晶体, 其结构为面心立方密排结构, 表面为面心立方结构的[111]面。胶体晶体-微纳光纤的透射光谱在1400.8nm处有透射峰, 对应于面心立方结构在[111]方向上的光子带隙。这种光子晶体微纳光纤在光纤传感器及滤波器方面有广阔的应用前景。

关键词: 光学器件; 光子晶体; 微纳光纤; 光子带隙

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.006

Fabrication of photonic crystal micro-fiber and its characteristics

LUO Ying^{1,2}, MA Jie^{1,2}, ZHONG Yongchun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to fabricate colloidal crystal micro-fiber structure, monodisperse polystyrene microspheres were grown into self-assembled colloidal crystals on the surface of micro-nano fiber by Czochralski method. Microstructure of colloidal crystals and properties of transmission spectra were characterized by scanning electron microscopy and spectroscopy. The results show that polystyrene microspheres are accumulated orderly and are assembled to colloidal crystals by themselves. The colloidal crystal has face-centered cubic structure and the surface of micro-fiber has [111] facet of face-centered cubic structure. The transmission peak of micro-structured fiber is about 1400.8nm, corresponding to the photonic band gap in the [111] direction of face-centered cubic structure. This kind of micro-fiber with three-dimensional photonic crystal structure is very useful in the applications of micro-fiber sensors or filters.

Key words: optical devices; photonic crystal; micro-fiber; photonic band-gap

引 言

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)是近年来出现的一种新型光纤。传统光子晶体光纤可分为两种。第1种光子晶体光纤具有高折射率芯层, 纤芯被2维光子晶体包层所包围。这种光纤类似于常规光纤的性质, 由于包层折射率小于纤芯折射率, 从而在光纤纤芯通过全反射形成波导。第2种光子晶体光纤, 其光子晶体包层显示的是光子带隙效应。利用光子带隙中的光频率不能在光子晶体中存在的特点把光束控制在纤芯内。这种光子晶体光纤能使光束在比包层折射

率低的纤芯内传播, 甚至能在空气芯里传播^[1], 从而有利于大功率激光在光纤中的传播。目前, 光子晶体光纤的应用研究已经逐渐覆盖到通信、传感、非线性光学、光谱学, 乃至生物医学等众多科技领域。随着研究的进一步深入, 各种新型光子晶体光纤仍在不断涌现, 基于光子晶体光纤的新应用同样日渐丰富^[14]。

胶体晶体是亚微米级单分散胶体晶体微球在合适的条件下形成的3维有序周期阵列结构, 这种结构具有独特的光学性质^[5-7]。近年来, 研究人员提出了一种新的制作微结构光纤的方法。通过在光纤的内部或外部自组装胶体晶体, 从而制作出一种新的微结构光纤。这种新型微结构光纤可以形成3维光子晶体光纤、空气孔和多孔结构, 能够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^[8-15]。比如ZHANG等人利用胶体晶体的光子带隙随外界折射率变化的特性制成折射率传感器^[8]。DING和YAO等人提出一种

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275046)

作者简介: 罗 瑛(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体、微纳光纤、光纤传感器等研究。

* 通讯联系人。E-mail: ychzhong@163.com

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-10

新型的可调光纤滤波器,它是通过在两单模光纤之间插入压力敏感胶体晶体作为布喇格反射镜^[11]。YAN 和 ZHAO 等人提出了用腐蚀的单模光纤和胶体晶体结合形成胶体晶体光纤结构^[13],但是其单模光纤的腐蚀方法是一个剧毒的过程。

本文中,作者将微纳光纤和胶体晶体结合起来,提出了一种新的制作微结构光纤的方法。在微纳光纤的侧表面通过自组装的方法把胶体微球自组装为胶体晶体,形成“胶体晶体-微纳光纤”结构,并定义这种结构为光子晶体微纳光纤。这种光子晶体微纳光纤具有新型微结构光纤的特色:可以形成 3 维光子晶体光纤、空气孔和多孔结构、能够进一步发展成为光纤波导和光纤传感器,形成新的传感机理,其制作方法具有简便及成本低的优点。

1 样品制作过程

图 1 为实验的流程图。图 1a 表示在光纤中段去除 4cm ~ 5cm 涂敷层,图 1b 使用熔融拉锥法制作微纳光纤,图 1c 使用垂直提拉法使聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 小球在微纳光纤表面自组装成胶体晶体,图 1d 用毛细管封装加固胶体晶体微结构光纤。

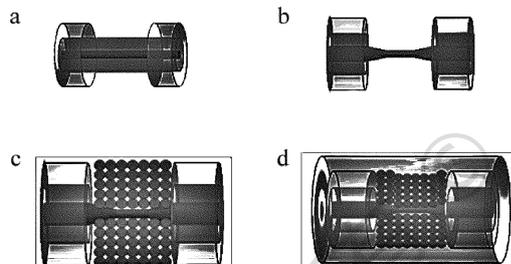


Fig. 1 Processing steps of colloidal photonic crystal micro-fiber
a—removing the coating of fiber b—making the micro-fiber c—silica colloidal photonic crystal d—packaging and consolidating the micro-structure

选取纤芯直径为 8 μm 标准单模光纤,在光纤中段表面取一段 4cm ~ 5cm 的区域,将涂覆层去除。将去除涂敷层的单模光纤两端固定在光纤拉锥平台上,使用熔融拉锥的方法把单模光纤的直径从 125 μm 减小至 20 μm ~ 30 μm 。为了增加微纳光纤表面的亲水性,将微纳光纤放在浓硫酸和双氧水的混合液(浓硫酸和质量分数为 0.3 的双氧水体积比为 3:1)中浸泡,0.5h 后取出光纤并用蒸馏水反复冲洗。

图 2 是去除涂敷层之后的裸光纤(见图 2a)和制作的微纳光纤(见图 2b)的显微镜图。相对于直径为 125 μm 的裸光纤,微纳光纤的直径明显减小,大约为 20 μm ~ 30 μm 。

用于制作胶体晶体的胶体溶液是质量分数为 0.1 的聚苯乙烯微球,微球直径为 619.7nm(单分散度为

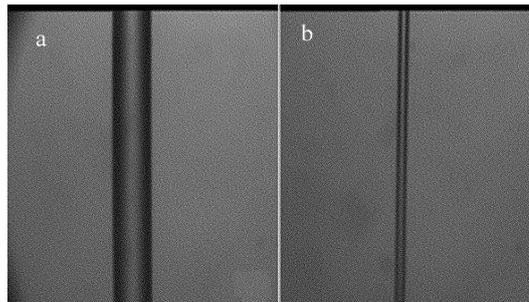


Fig. 2 Micrograph of the fibers
a—the bare fiber with diameter of 125 μm b—the micro-fiber with diameter 20 μm ~ 30 μm

4%)。在恒温蒸发的条件下,使用垂直提拉法使聚苯乙烯微球在微纳光纤的表面自组装从而形成胶体晶体。图 3 为微球自组装的实验装置图,微纳光纤浸没在微球溶液里,将光纤的末端固定在横梁上,横梁的移动由步进电机控制。在本实验中,横梁向上提拉的速度 $v = 4\mu\text{m/s}$ 。提拉设备被放置在恒温箱里以确保胶体晶体生长过程在恒温中进行,恒温箱的温度设置为 27 $^{\circ}\text{C}$ 。在蒸汽压和液体表面张力的共同作用下,聚苯乙烯小球在微纳光纤的侧表面自组装成胶体晶体。晶体生长时间为 2.5h,胶体晶体的长度约为 3cm ~ 4cm。

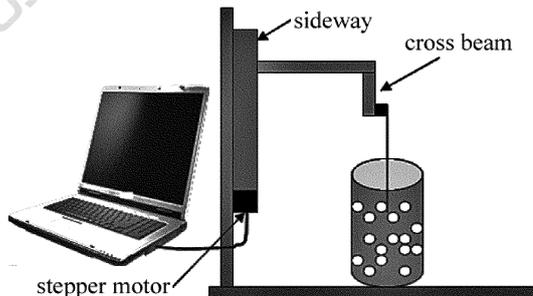


Fig. 3 The sketch of experimental setup

2 表征与分析

实验中采用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 来表征胶体晶体的形貌特征。图 4a 是直径为 25 μm 的微纳光纤的扫描电子显微镜图。图 4b 是侧表面覆盖了胶体晶体的微结构光纤。从图中可以清楚地看到胶体晶体整齐有序的排列在微纳光纤侧表面,从而使微结构光纤直径增加到 30 μm 。图 4c 是胶体晶体表面的局部放大图,由图可知,聚苯乙烯小球在微纳光纤表面整齐有序地排列,形成面心立方密排结构,并且晶体的 [111] 方向垂直于微纳光纤表面。图 4d 是胶体晶体的断面图(此断面是在做 SEM 实验准备时,切割样品所造成)。如断面图所示,所形成的胶体晶体为多层结构。这些 SEM 图既证明了在微纳光纤表面生长高质量胶体晶体的可行性,也证明了在微弯曲表面生长 3 维光子晶体的可行性。

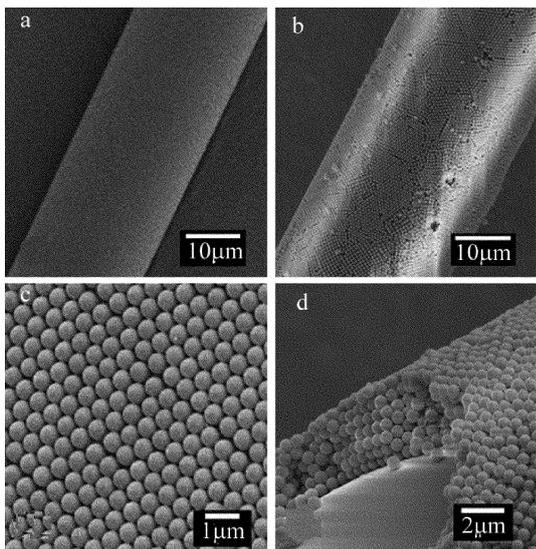


Fig. 4 SEM images of the colloidal crystals cladding micro-fiber

以海洋光学公司的卤素灯 (HL-2000) 作为测量光源,使用海洋光学公司生产的光纤光谱仪 (NIRQuest 近红外光谱仪) 对微纳光纤的透射谱进行测量。以单模光纤的透射光谱作为基线,微纳光纤的归一化透射谱如图 5a 中插图所示。图 5a 右上角的插图分别为胶体晶体微结构光纤的归一化透射光谱 (灰色空心圆形) 和未生长胶体晶体的微纳光纤的归一化透射光谱 (黑色空心三角形)。相对于单模光纤,制作的微纳光纤光强下降 5dB,这是由于单模光纤直径减小至 20μm ~ 30μm,使得单模光纤传导模泄漏所致。当微纳光纤侧面覆盖胶体晶体后,由于胶体晶体的有效折射率比空气大,透射光的光强应该增大。实验中胶体晶体微结构光纤的透射光强比微纳光纤稍微减小。这是因

为胶体晶体中存在缺陷,晶体中的缺陷对微纳光纤的倏逝场散射所致。图 5a 是覆盖胶体晶体的微结构光纤相对于未覆盖胶体晶体的微纳光纤的相对光强曲线。虽然胶体晶体中缺陷使微结构光纤透射光强减小,但相对透射光谱在 1400.8nm 处出现一个透射峰,透射峰高度约为 2dB。这是由于胶体晶体的光子带隙造成,泄漏的单模光纤传导模被胶体晶体反射并耦合进入微纳光纤。

用 Rsoft 的 Bandsolve 模块对胶体晶体的能带进行模拟分析。模拟计算中,晶体结构设为 7 层面心立方结构,聚苯乙烯小球半径为 619.7nm,折射率设为 1.59。图 5b 中是胶体晶体的能带结构。从下往上,分别是第 1 条到第 7 条能带。可知在布里渊区的 Γ -L 方向存在不完全带隙,带隙的归一化频率范围为 0.59 ~ 0.63。该带隙的归一化频率满足 $\omega = \lambda/a$,其中 a 为胶体晶体的晶格常数,对于面心立方结构,晶格常数 a 与组装的微球直径 D 的关系满足 $D = 0.707a$ 。因此,可以计算得到选取直径为 619.7nm 聚苯乙烯微球制备的面心立方结构的带隙波长范围为 1391.1nm ~ 1485.4nm。计算得到的沿 [111] 晶体取向的光子带隙与所测得的透射峰位置相吻合。

3 结 论

利用提拉生长法将单分散的聚苯乙烯微球在微纳光纤表面自组装生长成胶体晶体,并用扫描电子显微镜和光谱仪对胶体晶体的显微形貌和透射光谱特性进行了表征,结果表明,聚苯乙烯微球有序堆积,自组装成胶体晶体,其结构为面心立方密排结构,晶体的 [111] 方向垂直于微纳光纤的侧表面。胶体晶体-微纳光纤的透射光谱在 1400.8nm 处观察到一个透射峰,对应于面心立方结构在 [111] 方向上的光子带隙。这种光子晶体微纳光纤在光纤传感器及滤波器方面有广阔的应用前景。

在拉锥光纤实验方面,得到了暨南大学理工学院陈哲教授及其课题组的协助和指导,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

[1] GUO X, LIU F, BI W H. Analysis of photonic crystal fiber sensor character[J]. Optoelectronics Letters, 2007, 3(3): 199-202.
 [2] YU P, OU H Y. Self-assembled colloidal crystals in capillary with its fiber junction[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(10): 1-4.
 [3] YAO Y H, LI Y F, LIU B W, et al. Analysis of real photonic crystal fibers by finite-difference frequency-domain method combined with digital image processing[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1364-1370 (in Chinese).
 [4] WU J, WANG M. Colloidal photonic crystal microstructure fiber; propagation characteristics analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2012,

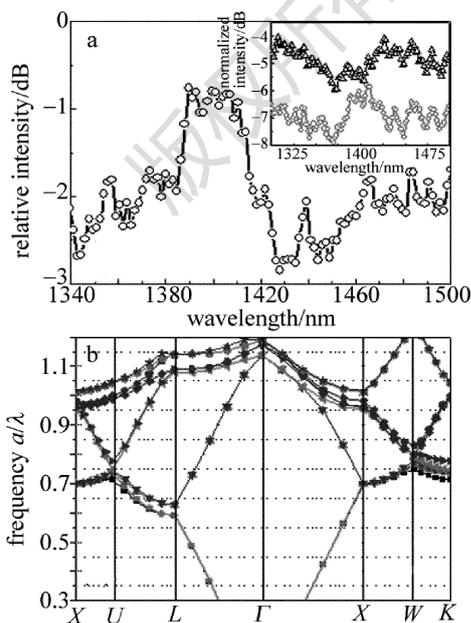


Fig. 5 a—relative transmission intensity of colloidal crystals coated micro-fiber b—band structure of colloidal crystals

- 61(6):064215 (in Chinese).
- [5] DONG H Y, LIU M, WU Z H, *et al.* Band structures of three-dimensional photonic crystals consisting of dielectric spheres; a plane-wave approach[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(1):3194-3199 (in Chinese).
- [6] ZHANG Q, MENG Q B, CHENG B Y, *et al.* Preparation of high-quality large diameter polystyrene spheres opal by self-assemble method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(1): 59-61 (in Chinese).
- [7] LI X Y, ZHAO Q L, XU T T, *et al.* Highly ordered microporous polystyrene-b-poly (acrylic acid) films; study on the influencing factors in their fabrication via a static breath-figure method [J]. *European Polymer Journal*, 2014, 50(1): 135-141.
- [8] ZHANG Zh, YAN H T, LI L B, *et al.* Experiment of liquid refractive index sensing based on crystal photonic band-gap [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 35(1):88-91 (in Chinese).
- [9] YAN H T, ZHANG Zh, ZHAO X Y, *et al.* Experimental research of liquid refractive index sensing by optical fiber and colloidal crystal's photonic band-gap[J]. *Optik*, 2014, 125(1): 1914-1917.
- [10] DENG L, FU M, TAO Y L, *et al.* Fabrication of ordered poly (methyl methacrylate) nanobowl arrays using SiO₂ colloidal crystal templates[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 14(6): 4622-4625.
- [11] DING H B, YAO Ch, GU H Ch, *et al.* Tunable fiber Bragg grating based on responsive photonic crystal [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(23): 11572-11576.
- [12] GUO W H, WANG M, XIA W, *et al.* Pressure and temperature controlled self-assembly of high-quality colloidal crystal films on optical fibers [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1259-1263.
- [13] YAN H, ZHAO X, QIAO C, *et al.* A colloidal crystal microstructure fiber: fabrication and characterization [J]. *Applied Physics*, 2012, B107(1): 91-95.
- [14] ZHANG M, LIU M, SUN Sh H, *et al.* Analysis of temperature sensing characteristics of photonic bandgap photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 204-207 (in Chinese).
- [15] SONG D J, XIE K, XIAO J. Mode field and dispersion analysis of photonic crystal fiber based on finite element method [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 111-117 (in Chinese).